Πανεπιστήμιο Πατρών
Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής
Διπλωματική Εργασία

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών
«Ολοκληρωμένα Συστήματα Υλικού Λογισμικού»
ΠΜΣ-ΟΣΥΛ

Συγκριτική Μελέτη της Απόδοσης Αλγορίθμων Δρομολόγησης Αυτοοργανούμενων Δικτύων

Παπαδόπουλος Χαράλαμπος
Α.Μ. 154

Εξεταστική Επιτροπή

Αναπ. Καθηγητής κ. Γ. Καλύβας
Καθηγητής κ. Σ. Κουμπιάς
Καθηγητής κ. Κ. Γκούτης

Περίληψη

Στα αυτοοργανούμενα ασύρματα δίκτυα, αυτόνομοι κόμβοι με κάρτες ασύρματης μετάδοσης σχηματίζουν ένα δίκτυο χωρίς προυπάρχουσα δομή. Η δρομολόγηση σε ένα συμβατικό δίκτυο γίνεται από ειδικούς δρομολογητές, είτε υλοποιημένους σε υλικό ειδικά για αυτό το σκοπό, ή υπολογιστές εξοπλισμένους με πολλαπλές διεπαφές δικτύου και ανάλογο λογισμικό. Αντίθετα, σε ένα ad-hoc δίκτυο, η δρομολόγηση διεκπεραιώνετε από τους ίδιους τους κόμβους. Κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να προωθεί δικτυακό φορτίου στους υπόλοιπους. Αντίθετα με τους σταθερούς δρομολογητές, ένας κόμβος ασύρματου δικτύου έχει μόνο μια δικτυακή διεπαφή, καθώς όλη η επικοινωνία γίνεται μέσω ενός και μόνο ασύρματου καναλιού. Οι κόμβοι σε ένα ad-hoc δίκτυο προσφέρονται να προωθήσουν την δικτυακή κίνηση εκ μέρους άλλων κόμβων. Αν αρνηθούν να το κάνουν αυτό, η συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων επηρεάζεται αρνητικά. Η λειτουργικότητα και χρησιμότητα του ad-hoc δικτύου εξαρτάται σημαντικά από την ικανότητα προώθησης πακέτων των κόμβων του. Συνεπώς, καταλαβαίνουμε ότι ο αλγόριθμος δρομολόγησης του ad-hoc δικτύου διαδρατίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοσή του.

Βασικός σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι να μελετήσει την απόδοση μερικών βασικών αλγορίθμων δρομολόγησης ως προς κάποιες μετρήσιμες παραμέτρους (throughput, end to end delay, delivery ratio). Έγιναν εξομοιώσεις για δύο διαφορετικά πρωτόκολλα φυσικού επιπέδου (802.11 και 802.15.4). Επίσης, αναλύονται θεωρητικά σε βάθος διάφορα ζητήματα σχετικά με τη διευθυνσιοδότηση, τη δρομολόγηση, τα σχετικά MAC πρωτόκολλα, τη δικτυακή ασφάλεια, τη κατανάλωσης ενέργειας, τις απαιτήσεις στο hardware των διάφορων αλγορίθμων δρομολόγησης που έχουν αναπτυχθεί από την ακαδημαϊκή κοινότητα και τη βιομηχανία.

Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, η αγορά των κινητών επικοινωνιών αυξήθηκε δραματικά. Τα κινητά τηλέφωνα και άλλου είδους φορητές συσκευές με δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας εξαπλώθηκαν παντού, ενώ τα δίκτυα υπολογιστών, τα οποία παλαιότερα είχαν σταθερή δομή, έχουν εξελιχθεί σε συνδυασμούς ενσύρματων και ασύρματων δικτύων προκειμένου να ανταποκριθούν στις σύγχρονες ανάγκες. Καθώς η κινητικότητα των χρηστών συνεχίζει να αυξάνεται, μια νέα μορφή δικτύων κερδίζει συνεχώς έδαφος – τα κινητά αυτοοργανούμενα δίκτυα.

Σε ένα κινητό αυτοοργανούμενο δίκτυο, οι κόμβοι δεν χρησιμοποιούν κάποιες σταθερό δίκτυο επικοινωνίας. Αντίθετα, οι ίδιοι οι κόμβοι αποτελούν το δίκτυο και επικοινωνούν ασύρματα. Οι κόμβοι προωθούν δικτυακό φορτίο για λογαριασμό άλλων κόμβων προκειμένου να καταστεί δυνατή η επικοινωνία μεταξύ κόμβων που απέχουν περισσότερο από την εμβέλεια μετάδοσης του ασύρματου πομποδέκτη που διαθέτει ο κάθε κόμβος. Συνεπώς, η δρομολόγηση της δικτυακής κίνησης είναι ένα σημαντικό θέμα που ανακύπτει. Για το λόγο αυτό πολλά πρωτόκολλα έχουν προταθεί, κυρίως από τον οργανισμό IETF (Internet Engineering Task Force). Πολλά από τα πρωτόκολλα αυτά έχουν αξιολογηθεί μέσω εξομοιώσεων στον υπολογιστή, αλλά μόνο λίγα έχουν αξιολογηθεί σε δοκιμές στον πραγματικό κόσμο.

Τόσο οι εξομοιώσεις στον υπολογιστή όσο και τα πραγματικά τεστ έχουν το δικό τους νόημα. Στις εξομοιώσεις, τα πειράματα μπορούν εύκολα να επαναληφθούν και οι παράμετροι των εξομοιώσεων μπορούν εύκολα να αλλάξουν. Ωστόσο, το μειονέκτημα των εξομοιώσεων είναι ότι βασίζονται στα μοντέλα του εξομοιωτή, τα οποία δεν είναι ακριβή. Στα πειράματα με πραγματικές συσκευές, ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης μπορεί αν αξιολογηθεί με ακρίβεια, ωστόσο το πειραματικό περιβάλλον δυσχεραίνει την συσχέτιση των παρατηρούμενων αποτελεσμάτων με τις λεπτομέρειες της υλοποίησης. Συνεπώς και οι δύο προσεγγίσεις είναι χρήσιμες και αλληλοσυμπληρώνουν η μία την άλλη.

Αυτοοργανούμενα Δίκτυα

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι άκρως κατανεμημένα δίκτυα μικρών και ελαφρού βάρους ασύρματων κόμβων, οι οποίοι παρατάσσονται σε μεγάλους αριθμούς για να εποπτεύουν είτε το περιβάλλον ή ένα σύστημα, μέσω της διαχείρισης φυσικών παραμέτρων όπως είναι η θερμοκρασία, η πίεση ή η σχετική υγρασία. Η δημιουργία αισθητήρων έγινε εφικτή λόγω των πρόσφατων προόδων στην τεχνολογία των μικρό-ηλεκτρομηχανικών συστημάτων MEMS (micro-electro mechanical systems).

Κάθε κόμβος του δικτύου αισθητήρων αποτελείται από τρία υποσυστήματα: το υποσύστημα του αισθητήρα το οποίο αισθάνεται/ανιχνεύει το περιβάλλον, το υποσύστημα επεξεργασίας το οποίο εκτελεί τοπικούς υπολογισμούς στα δεδομένα που ανιχνεύονται και το υποσύστημα επικοινωνίας το οποίο είναι υπεύθυνο για την ανταλλαγή μηνυμάτων με τους γειτονικούς κόμβους αισθητήρες. Ενώ οι ξεχωριστοί αισθητήρες έχουν περιορισμένη περιοχή ανίχνευσης, επεξεργαστική ισχύ και ενέργεια, η διασύνδεση ενός μεγάλου αριθμού αισθητήρων δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας ενός εύρωστου, αξιόπιστου και ακριβούς δικτύου αισθητήρων το οποίο μπορεί να καλύπτει μια ευρύτερη περιοχή. Το δίκτυο είναι ανεκτικό σε σφάλματα επειδή πολλοί κόμβοι ανιχνεύουν τα ίδια γεγονότα. Επιπλέον, οι κόμβοι συνεργάζονται και χειρίζονται μαζί τα δεδομένα τους, γεγονός το οποίο οδηγεί σε ακριβή ανίχνευση γεγονότων στο συγκεκριμένο περιβάλλον. Οι δύο περισσότερο σημαντικές λειτουργίες σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι η διασπορά των δεδομένων (data dissemination), δηλαδή, η διάδοση δεδομένων/ερωτημάτων (queries) σε ολόκληρο το δίκτυο, και η συγκέντρωση δεδομένων, δηλαδή, η συλλογή των παρατηρούμενων δεδομένων από τους ξεχωριστούς κόμβους σε μία δεξαμενή (sink).

Τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από διάφορους τύπους αισθητήρων όπως είναι οι σεισμικοί, οι θερμικοί, οι οπτικοί και οι υπέρυθροι, και ανιχνεύουν μια μεγάλη ποικιλία από τις περιβάλλουσες συνθήκες όπως είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η πίεση και τα χαρακτηριστικά ή η κίνηση διάφορων αντικειμένων. Οι κόμβοι αισθητήρες μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε στρατιωτικά σενάρια και σε σενάρια υγείας, χημικής επεξεργασίας και αποκατάστασης καταστροφών. Μερικά από τα ακαδημαϊκά ερευνητικά προγράμματα πάνω στα δίκτυα αισθητήρων καθώς και αυτά που υποστηρίζονται από την βιομηχανία, είναι το Smart Dust στο Πανεπιστήμιο της California, Berkeley (UCB) και το WINS (wireless integrated sensor network) στο πανεπιστήμιο της California, Los Angeles (UCLA).

Οι εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων περιγράφονται στην επόμενη ενότητα, η οποία ακολουθείται από τις διαφορές ανάμεσα στα ad hoc ασύρματα δίκτυα και στα δίκτυα αισθητήρων. Έπειτα αναλύονται τα κυριότερα θέματα και οι προκλήσεις που αφορούν στον σχεδιασμό των δικτύων αισθητήρων καθώς και οι δύο βασικοί τύποι της αρχιτεκτονικής των δικτύων αισθητήρων – με στρώματα (layered) και κατά ομάδες (clustered). Στην συνέχεια αυτών, περιγράφονται διάφορα πρωτόκολλα για τις κύριες λειτουργίες της διασποράς και της συγκέντρωσης δεδομένων και ακολουθεί η περιγραφή ειδικών MAC πρωτοκόλλων που αναπτύσσονται ή τροποποιούνται για να εξυπηρετήσουν τα δίκτυα αισθητήρων. Επίσης περιγράφονται οι τεχνικές που υιοθετήθηκαν από

τους κόμβους αισθητήρων για να ανακαλύπτουν την τοποθεσία τους και οι μετρήσεις για τον υπολογισμό της ποιότητας κάλυψης ενός δικτύου αισθητήρων. Τελικά, αναλύονται μερικά θέματα ειδικά για τα δίκτυα αισθητήρων, όπως είναι ο ενεργειακά αποδοτικός σχεδιασμός, ο συγχρονισμός, τα πρωτόκολλα τους στρώματος μεταφοράς, η ασφάλεια και η επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο.

Εφαρμογές των Δικτύων Αισθητήρων

Οι κόμβοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών το οποίο απαιτεί συνεχή παρακολούθηση και ανίχνευση συγκεκριμένων γεγονότων. Οι στρατιωτικές εφαρμογές των κόμβων αισθητήρων περιλαμβάνουν επιτήρηση του πεδίου μάχης και ανίχνευση, συστήματα οδήγησης για έξυπνους πυραύλους και ανίχνευση επιθέσεων με όπλα μαζικής καταστροφής, όπως είναι τα χημικά, τα βιολογικά ή τα πυρηνικά. Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται επίσης σε περιβαλλοντολογικές εφαρμογές όπως είναι οι φωτιές σε δάση και η ανίχνευση πλημμύρας καθώς και η εξερεύνηση των φυσικών κατοικιών των ζώων. Οι αισθητήρες μπορεί να είναι εξαιρετικά χρήσιμοι στην διάγνωση και παρακολούθηση ασθενών. Οι ασθενείς μπορούν να φορούν μικρές συσκευές αισθητήρων οι οποίες παρακολουθούν τα φυσιολογικά τους δεδομένα όπως είναι ο ρυθμός της καρδιάς και η πίεση του αίματος. Τα δεδομένα που συγκεντρώνονται μπορούν να στέλνονται τακτικά πάνω από το δίκτυο σε αυτοματοποιημένα συστήματα παρακολούθησης τα οποία είναι σχεδιασμένα να ειδοποιούν τον σχετικό γιατρό κατά την ανίχνευση μιας ανωμαλίας. Τέτοια συστήματα παρέχουν στους ασθενείς μεγαλύτερη ελευθερία κινήσεων αντί να είναι περιορισμένοι σε ένα νοσοκομείο. Οι κόμβοι αισθητήρες μπορεί επίσης να είναι τόσο πολύπλοκοι ώστε να αναγνωρίζουν σωστά αλλεργίες και να αποτρέπουν λάθος διαγνώσεις.

Οι αισθητήρες θα βρουν σύντομα εφαρμογή σε ένα σύνολο εμπορικών εφαρμογών για το σπίτι και για τις βιομηχανίες. Έξυπνοι κόμβοι αισθητήρες μπορούν να ενσωματωθούν σε οικιακές συσκευές όπως είναι οι ηλεκτρικές κουζίνες, τα ψυγεία και οι ηλεκτρικές σκούπες, δίνοντας τους την δυνατότητα να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και να ελέγχονται από μακριά. Το σπίτι μπορεί να λειτουργήσει ως ένα “έξυπνο περιβάλλον” το οποίο θα προσαρμόζεται σύμφωνα με τις προτιμήσεις του χρήστη. Για παράδειγμα, ο φωτισμός, η μουσική και η ατμόσφαιρα ενός δωματίου μπορεί να ρυθμιστεί αυτόματα και σύμφωνα με τις προτιμήσεις του χρήστη. Παρόμοιος έλεγχος είναι χρήσιμος και στα κτίρια γραφείων, όπου μπορεί να ελέγχεται αυτόματα η ροή του αέρα και η θερμοκρασία σε διαφορετικά μέρη του κτιρίου. Οι αποθήκες εμπορευμάτων μπορούν να βελτιώσουν το σύστημα ελέγχου των αποθεμάτων τους εγκαθιστώντας αισθητήρες στα προϊόντα έτσι ώστε να ανιχνεύουν την κίνηση τους. Οι εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων είναι ατελείωτες και περιορίζονται μόνο από την ανθρώπινη φαντασία.

Σύγκριση με τα Ad Hoc ασύρματα δίκτυα

Ενώ και τα ad hoc ασύρματα δίκτυα και τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από ασύρματους κόμβους που επικοινωνούν μεταξύ τους, τα δίκτυα αισθητήρων θέτουν συγκεκριμένες προκλήσεις. Ο αριθμός των κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να είναι κατά πολλές τάξεις μεγαλύτερος από τον αριθμό των κόμβων σε ένα ad hoc δίκτυο. Οι κόμβοι αισθητήρες είναι περισσότερο επιρρεπείς σε βλάβες και η ενέργεια τους εξαντλείται γρηγορότερα, ενώ συνήθως οι μπαταρίες τους δεν μπορούν να αντικατασταθούν ή να επαναφορτιστούν. Οι κόμβοι αισθητήρες μπορεί να μην έχουν μοναδικές global ταυτότητες (identifiers) και έτσι στα δίκτυα αισθητήρων δεν είναι πάντα εφικτή η αποκλειστική διευθυνσιοδοτηση.

Τα δίκτυα αισθητήρων είναι δεδομένο-κεντρικά (data-centric), δηλαδή, τα queries στα δίκτυα αισθητήρων απευθύνονται σε κόμβους οι οποίοι έχουν δεδομένα που ικανοποιούν κάποιες συνθήκες. Για παράδειγμα, ένα query μπορεί να απευθύνεται σε όλους τους κόμβους "του νοτιοανατολικού τεταρτημορίου" ή σε όλους τους κόμβους "οι οποίοι κατέγραψαν μια θερμοκρασία μεγαλύτερη από 30ºC". Αφ' ετέρου, τα ad hoc δίκτυα βασίζονται στην διεύθυνση (address-centric), με τα queries να απευθύνονται σε συγκεκριμένους κόμβους που καθορίζονται από την μοναδική τους διεύθυνση. Έτσι, τα δίκτυα αισθητήρων απαιτούν ένα διαφορετικό μηχανισμό για την δρομολόγηση και την απάντηση των queries. Τα περισσότερα πρωτόκολλα δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται στα ad hoc δίκτυα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας στα δίκτυα αισθητήρων εξαιτίας των περιορισμών στην μνήμη, την ισχύ και στην ικανότητα επεξεργασίας των κόμβων αισθητήρων καθώς και στην φύση των πρωτοκόλλων, τα οποία δεν είναι επιδεκτικά στην μεταβολή της κλίμακάς τους (non-scalable).

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των δικτύων αισθητήρων είναι η συγχώνευση/συσσωμάτωση δεδομένων, σύμφωνα με την οποία τα δίκτυα αισθητήρων συγκεντρώνουν την τοπική πληροφορία πριν από την αναμετάδοση. Οι βασικοί στόχοι της συγχώνευσης δεδομένων είναι η μείωση της κατανάλωσης του εύρους ζώνης, της καθυστέρησης στην πρόσβαση στο μέσο και της κατανάλωσης ισχύος για την επικοινωνία.

Προβλήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά τον σχεδιασμό ενός δικτύου αισθητήρων

Τα δίκτυα αισθητήρων θέτουν ορισμένες προκλήσεις κατά τον σχεδιασμό τους, οι οποίες οφείλονται στους ακόλουθους λόγους:

- Τα δίκτυα αισθητήρων παρατάσσονται σε λειτουργία κατά τυχαίο τρόπο και έτσι δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτά κάποια κανονική τοπολογία. Εφόσον τεθούν σε λειτουργία, συνήθως

δεν απαιτούν κάποια ανθρώπινη παρέμβαση. Έτσι, η εγκατάσταση και η συντήρηση του δικτύου μπορεί να είναι εξολοκλήρου αυτόνομη.

- Τα δίκτυα αισθητήρων δεν βασίζονται σε κάποια υποδομή. Έτσι, όλοι οι αλγόριθμοι δρομολόγησης και συντήρησης θα πρέπει να είναι κατανεμημένοι.

- Ένας σημαντικός ανασχετικός παράγοντας στην λειτουργία των κόμβων αισθητήρων είναι η διαθέσιμη ενέργεια. Οι αισθητήρες συνήθως βασίζονται μόνο στην μπαταρία τους για ενέργεια, η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις δεν μπορεί να επαναφορτιστεί ή να αντικατασταθεί. Έτσι, η διαθέσιμη ενέργεια στους κόμβους θα πρέπει να θεωρηθεί ως βασικός περιορισμός κατά τον σχεδιασμό των πρωτοκόλλων. Για παράδειγμα, είναι επιθυμητό να δοθεί σε ένα χρήστη η επιλογή να διαπραγματεύεται την διάρκεια ζωής του δικτύου με την ανοχή στις βλάβες ή την ακρίβεια στα αποτελέσματα.

- Ο σχεδιασμός του hardware των κόμβων αισθητήρων θα πρέπει επίσης να λαμβάνει υπόψιν του την αποδοτικότητα ως προς την ενέργεια. Ο μικρο-ελεγκτής, το λειτουργικό σύστημα και το λογισμικό των εφαρμογών θα πρέπει να είναι έτσι σχεδιασμένα ώστε να διατηρούν όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια.

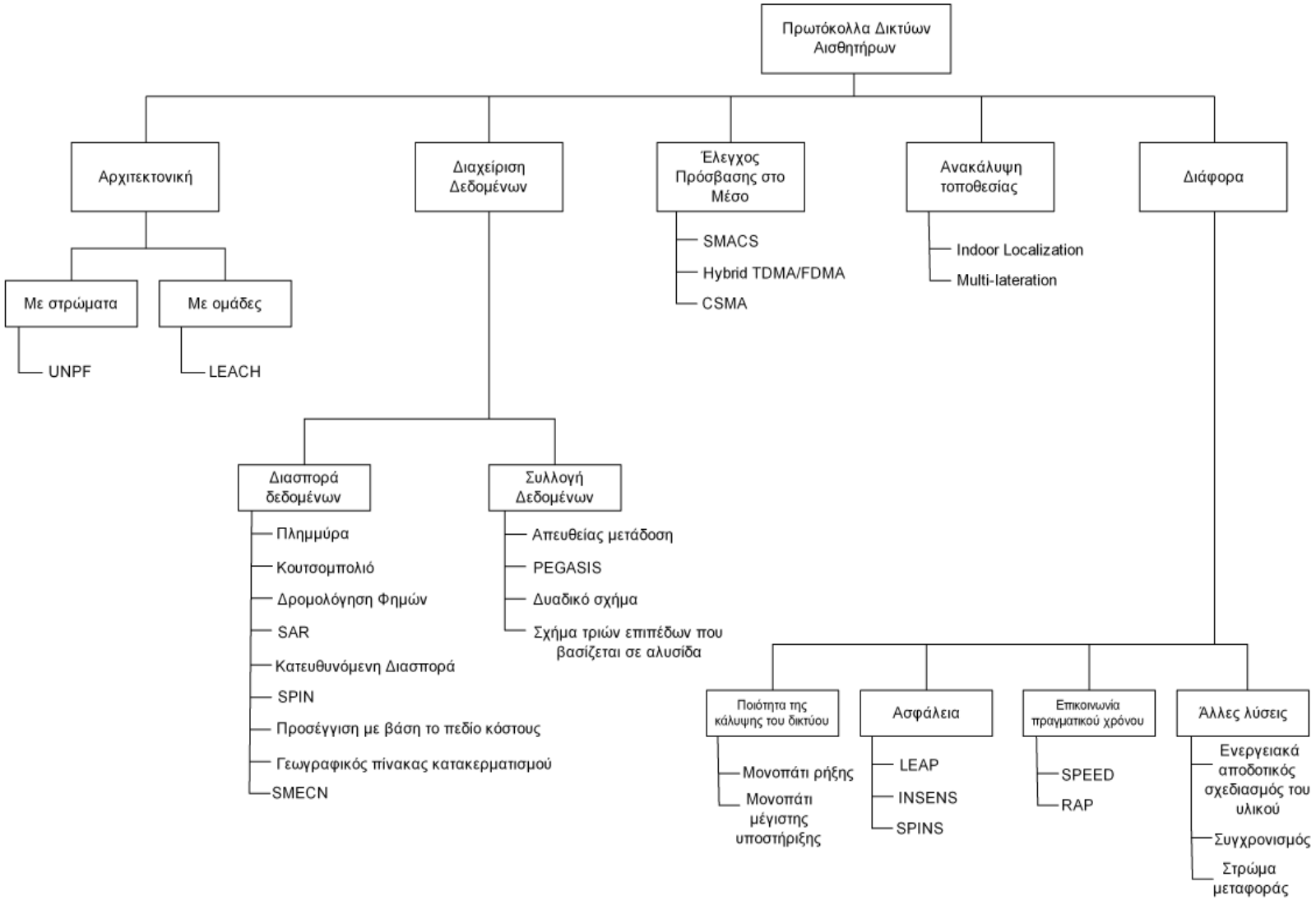
- Οι κόμβοι αισθητήρες θα πρέπει να μπορούν να συγχρονίζονται μεταξύ τους κατά ένα εντελώς κατανεμημένο τρόπο, έτσι ώστε τα TDMA χρονοδιαγραμμάτα να εκτελούνται σωστά και να εκτελείται χωρίς αμφιβολία η χρονική τακτοποίηση των γεγονότων που ανιχνεύονται.

- Ένα δίκτυο αισθητήρων θα πρέπει επίσης να είναι ικανό να προσαρμόζεται στην μεταβολή των συνδέσεων που συμβαίνουν λόγω των βλαβών στους κόμβους ή λόγω της λειτουργίας νέων κόμβων. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης θα πρέπει να είναι ικανά να συμπεριλαμβάνουν ή να αποφεύγουν άλλους κόμβους στα μονοπάτια τους με δυναμικό τρόπο.

- Τα δίκτυα αισθητήρων θα πρέπει να υποστηρίζουν επικοινωνία πραγματικού χρόνου και να παρέχουν εγγυήσεις για την μέγιστη καθυστέρηση, το ελάχιστο εύρος ζώνης ή άλλες παραμέτρους QoS.

- Θα πρέπει, τέλος, να προσφέρουν ασφαλή επικοινωνία, ειδικά όταν πρόκειται για στρατιωτικές εφαρμογές οι οποίες μεταφέρουν ευαίσθητα δεδομένα.

Τα πρωτόκολλα τα οποία σχεδιάστηκαν για να αντιμετωπίσουν τα παραπάνω θέματα ταξινομήθηκαν στην εικόνα που ακολουθεί.


Πρωτόκολλα Δικτύων Αισθητήρων
Αρχιτεκτονική
Διαχείριση Δεδομένων
Έλεγχος Πρόσβασης στο Μέσο
Ανακάλυψη τοποθεσίας
Διάφορα
Με στρώματα
Με ομάδες
UNPF
LEACH
SMACS
Hybrid TDMA/FDMA
CSMA
Indoor Localization
Multi-lateration
Διασπορά δεδομένων
Συλλογή Δεδομένων
Πλημμύρα
Κουτσομπολιό
Δρομολόγηση Φημών
SAR
Κατευθυνόμενη Διασπορά
SPIN
Προσέγγιση με βάση το πεδίο κόστους
Γεωγραφικός πίνακας κατακερματισμού
SMECN
Απευθείας μετάδοση
PEGASIS
Δυαδικό σχήμα
Σχήμα τριών επιπέδων που βασίζεται σε αλυσίδα
Ποιότητα της κάλυψης του δικτύου
Ασφάλεια
Επικοινωνία πραγματικού χρόνου
Άλλες λύσεις
Μονοπάτι ρήξης
Μονοπάτι μέγιστης υποστήριξης
LEAP
INSENS
SPINS
SPEED
RAP
Ενεργειακά αποδοτικός σχεδιασμός του υλικού
Συγχρονισμός
Στρώμα μεταφοράς

ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΝΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Ο σχεδιασμός των δικτύων αισθητήρων επηρεάζεται από παράγοντες όπως είναι η δυνατότητα αυξομείωσης, η ανοχή σε σφάλματα και η κατανάλωση ενέργειας. Τα δύο βασικά είδη της αρχιτεκτονικής ενός δικτύου αισθητήρων είναι η αρχιτεκτονική με στρώματα (layered) και η αρχιτεκτονική με ομάδες (clustered).

Αρχιτεκτονική με στρώματα (Layered Architecture)

Μια αρχιτεκτονική με στρώματα έχει ένα και μόνο ισχυρό σταθμό βάσης BS (base station) και τα στρώματα των κόμβων αισθητήρων γύρω από αυτό αντιστοιχούν στους κόμβους οι οποίοι έχουν τον ίδιο αριθμό hop προς τον BS.

Οι αρχιτεκτονικές με στρώματα χρησιμοποιήθηκαν για ασύρματα δίκτυα κορμού εντός κτιρίου και σε στρατιωτικές υποδομές που βασίζονται σε αισθητήρες, όπως είναι το MINA (multi-hop infrastructure network architecture). Στο εντός του κτιρίου σενάριο, ο BS δρα ως ένα σημείο πρόσβασης σε ένα ενσύρματο δίκτυο, ενώ μικροί κόμβοι σχηματίζουν μια ασύρματη ραχοκοκαλιά για να παρέχουν ασύρματη δυνατότητα σύνδεσης. Οι χρήστες του δικτύου έχουν συσκευές χειρός, όπως είναι τα PDAs, οι οποίες επικοινωνούν μέσω των μικρών κόμβων με τον BS. Παρόμοια, σε μία στρατιωτική επιχείρηση, ο BS είναι μια οντότητα συγκέντρωσης δεδομένων και επεξεργασίας με μία ζεύξη επικοινωνίας προς ένα μεγαλύτερο δίκτυο. Οι συσκευές χειρός των στρατιωτών μπορούν να έχουν πρόσβαση σε ένα σύνολο ασύρματων κόμβων αισθητήρων. Το πλεονέκτημα της αρχιτεκτονικής με στρώματα είναι ότι τον κάθε κόμβο αφορούν μόνο μικρής απόστασης και χαμηλής ισχύος μεταδόσεις προς τους κόμβους των γειτονικών στρωμάτων.

Unified Network Protocol Framework (UNPF)

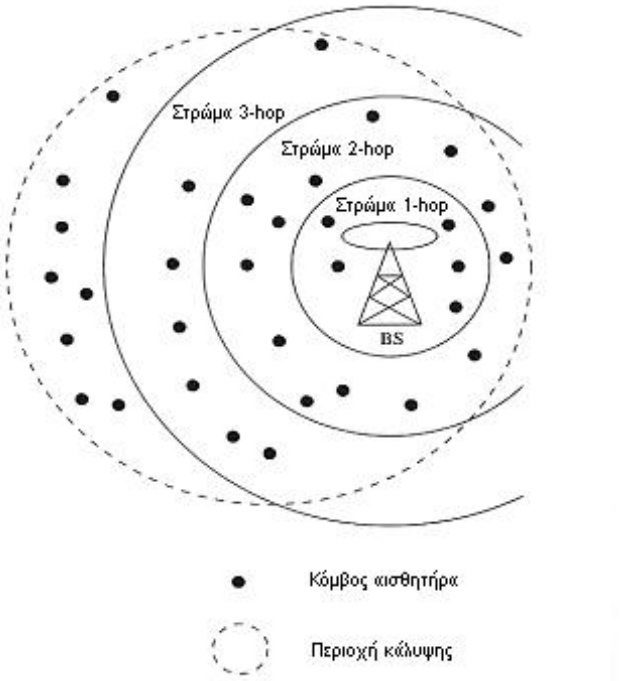
Το UNPF είναι ένα σύνολο πρωτοκόλλων για την πλήρη υλοποίηση της αρχιτεκτονικής με στρώματα στα δίκτυα αισθητήρων. Το UNPF ενσωματώνει τρεις λειτουργίες στην δομή των πρωτοκόλλων του: τοποθέτηση αρχικών τιμών στο δίκτυο και συντήρηση, έλεγχο πρόσβασης στο μέσο (MAC) και πρωτόκολλα δρομολόγησης.

- **Πρωτόκολλο τοποθέτησης αρχικών τιμών και συντήρησης**

Το πρωτόκολλο τοποθέτησης αρχικών τιμών στο δίκτυο οργανώνει τους κόμβους αισθητήρες σε διαφορετικά στρώματα, χρησιμοποιώντας την δυνατότητα εκπομπής του BS. Ο BS μπορεί να φτάσει όλους τους κόμβους με επικοινωνία ενός hop πάνω από ένα κοινό κανάλι ελέγχου. Ο BS εκπέμπει το αναγνωριστικό του ID (identifier) χρησιμοποιώντας ένα γνωστό CDMA κωδικό στο κοινό κανάλι ελέγχου. Όλοι οι κόμβοι που ακούν την εκπομπή αυτή, καταγράφουν την BS ID και στην συνέχεια στέλνουν ένα σήμα σηματοδοσίας (beacon) με τις δικές τους IDs, στα δικά τους προκαθορισμένα χαμηλά επίπεδα ισχύος. Αυτοί οι κόμβοι που μπορεί να ακούσει ο BS σχηματίζουν το στρώμα ένα καθώς είναι σε απόσταση ενός hop από τον BS. Ο BS κατόπιν εκπέμπει ένα πακέτο ελέγχου με όλες τις IDs των κόμβων του στρώματος ένα. Όλοι οι κόμβοι στέλνουν πάλι ένα σήμα beacon. Οι κόμβοι του στρώματος ένα καταγράφουν τις IDs που ακούν, και αυτές σχηματίζουν το στρώμα δύο, καθώς είναι ένα hop μακριά από τους κόμβους του στρώματος ένα. Στον επόμενο γύρο των beacons, οι κόμβοι του στρώματος ένα πληροφορούν τον BS για τους κόμβους του στρώματος δύο, ο οποίος έπειτα εκπέμπει σε ολόκληρο το δίκτυο. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η δομή με στρώματα δημιουργείται από διαδοχικούς κύκλους από beacons και εκπομπές του BS. Η περιοδική σηματοδοσία ενημερώνει την πληροφορία των γειτόνων και μεταβάλλει την δομή των στρωμάτων αν οι κόμβοι καταστραφούν ή μετακινηθούν εκτός εύρους μετάδοσης.

- **Πρωτόκολλο MAC**

Η τοποθέτηση αρχικών τιμών στο δίκτυο γίνεται σε ένα κοινό κανάλι ελέγχου. Κατά την φάση της μετάδοσης των δεδομένων χρησιμοποιείται η DTROC (distributed TDMA receiver oriented channel) λειτουργία του πρωτοκόλλου MAC. Σε κάθε κόμβο ανατίθεται ένα κανάλι υποδοχής από τον BS, ενώ η επαναχρησιμοποίηση του καναλιού είναι τέτοια ώστε να αποφεύγονται οι συγκρούσεις. Ο κόμβος προγραμματίζει τις σχισμές μετάδοσης για όλους τους γείτονές του και εκπέμπει αυτό το πρόγραμμα. Αυτό καθιστά εφικτή την μετάδοση χωρίς συγκρούσεις και εξοικονομεί ενέργεια καθώς οι κόμβοι μπορεί να σβήνουν όταν δεν λαμβάνουν μέρος σε κάποια λειτουργία αποστολής/αποδοχής. Τα δύο βήματα του DTROC είναι η κατανομή του καναλιού (η ανάθεση των καναλιών υποδοχής στους κόμβους) και ο προγραμματισμός του καναλιού (το μοίρασμα των καναλιών υποδοχής ανάμεσα στους γείτονες). Το DTROC αποφεύγει τα προβλήματα του κρυμμένου και του εκτεθειμένου τερματικού, χρησιμοποιώντας κατάλληλους αλγορίθμους κατανομής καναλιών.



Αρχιτεκτονική με στρώματα

- **Πρωτόκολλο δρομολόγησης**

  Η κάτω ζεύξη από τον BS γίνεται με απευθείας εκπομπή στο κανάλι ελέγχου. Η αρχιτεκτονική με στρώματα χρησιμοποιεί πολλαπλών hop προώθηση δεδομένων από τους κόμβους αισθητήρες προς τον BS. Ο κόμβος προς τον οποίο πρέπει να προωθηθεί ένα πακέτο, επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψιν την απομένουσα ενέργεια των κόμβων. Αυτό επιτυγχάνει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής για το δίκτυο. Τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης για τα ad hoc μπορούν να απλοποιηθούν για την αρχιτεκτονική με στρώματα, καθώς μόνο οι κόμβοι του επόμενου στρώματος θα πρέπει να διατηρούνται στον πίνακα δρομολόγησης.

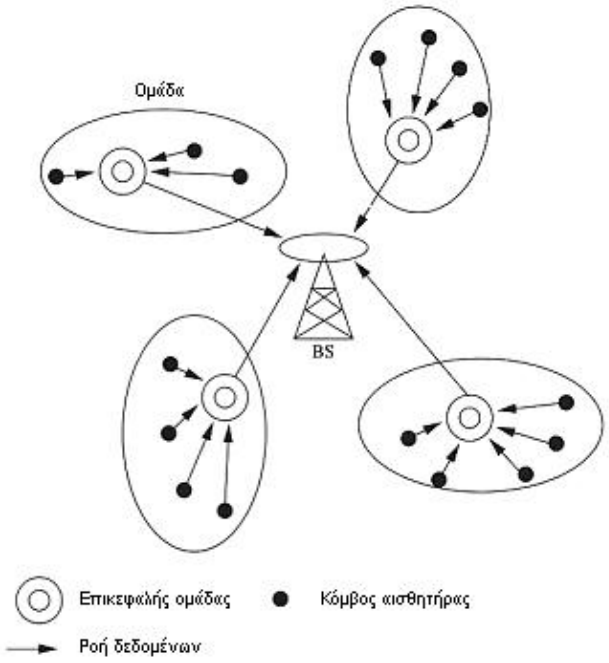
Μια μετατροπή στο σύνολο πρωτοκόλλων UNPF, η οποία προτάθηκε, όρισε το UNPF-R. Αυτό κάνει τους κόμβους αισθητήρες να μεταβάλλουν ανάλογα το εύρος μετάδοσης τους έτσι ώστε η απόδοση του δικτύου να γίνεται βέλτιστη. Ενώ ένα πολύ μικρός εύρος μετάδοσης μπορεί να προκαλέσει διαμερισμό του δικτύου, ένα μεγάλο εύρος μετάδοσης θα μειώσει την χωρική επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων. Το βέλτιστο εύρος καθορίζεται μέσω ενός αλγορίθμου παρόμοιου με την εξομοίωση της ανόπτησης. Αυτός είναι ένας συγκεντρωτικός αλγόριθμος ελέγχου στον οποίο ο BS εκτιμά περιοδικά μια αντικειμενική συνάρτηση. Για ένα εύρος μετάδοσης R, η αντικειμενική συνάρτηση είναι η $f(R) = \frac{\in \times d}{n/N}$, όπου N είναι ο συνολικός αριθμός των αισθητήρων στο σύστημα, n είναι ο αριθμός των κόμβων στο στρώμα ένα, $\in$ είναι η κατανάλωση ενέργειας ανά πακέτο και d είναι η μέση καθυστέρηση των πακέτων. Ο BS επιλέγει ένα νέο εύρος μετάδοσης R΄ με τον ακόλουθο τρόπο. Αν δεν ληφθεί κανένα πακέτο στον BS από κάποιο κόμβο αισθητήρα για κάποιο χρονικό διάστημα, το

εύρος της ζώνης μετάδοσης αυξάνεται κατά Δr, που είναι μια προκαθορισμένη αύξηση. Αλλιώς, το εύρος μετάδοσης είτε μειώνεται κατά Δr με πιθανότητα 0.5x(n/N), ή αυξάνεται κατά Δr με πιθανότητα [1-0.5x(n/N)]. Η αντικειμενική συνάρτηση υπολογίζεται και πάλι με το νέο εύρος μετάδοσης. Αν ισχύει $f(R) < f(R')$, τότε επιλέγεται το εύρος μετάδοσης R΄. Αλλιώς, το R μετατρέπεται σε R΄ με πιθανότητα $e^{\frac{(f(R)-f(R'))\times(n/N)}{T}}$, όπου T είναι η παράμετρος της θερμοκρασίας, όπως στην εξομοίωση της ανόπτησης. Το πλεονέκτημα του UNPF-R είναι ότι ελαχιστοποιεί το κριτήριο (metric) ενέργεια × καθυστέρηση και μεγιστοποιεί των αριθμό των κόμβων που μπορούν να συνδεθούν με τον BS. Η ελαχιστοποίηση του κριτηρίου (metric) ενέργεια × καθυστέρηση εξασφαλίζει ότι η μετάδοση θα γίνεται με την ελάχιστη καθυστέρηση και την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Οι δύο αντικρουόμενες επιδιώξεις βελτιώνονται μαζί ελαχιστοποιώντας το γινόμενό τους.

Αρχιτεκτονική με ομάδες (Clustered Architecture)

Μια αρχιτεκτονική με ομάδες οργανώνει τους κόμβους αισθητήρες σε ομάδες, η κάθε μία από τις οποίες ελέγχεται από έναν κόμβο επικεφαλής ομάδας (cluster-head). Οι κόμβοι σε κάθε ομάδα ανταλλάσσουν μηνύματα με τους αντίστοιχους επικεφαλής κόμβους τους, ενώ οι επικεφαλής κόμβοι στέλνουν μηνύματα σε ένα BS, ο οποίος είναι συνήθως ένα σημείο πρόσβασης συνδεδεμένο με ένα ενσύρματο δίκτυο. Η παρακάτω εικόνα αναπαριστά μια αρχιτεκτονική με ομάδες, όπου κάθε μήνυμα μπορεί να φτάσει τον BS σε απόσταση το πολύ δύο hops. Η ομαδοποίηση μπορεί να επεκταθεί ιεραρχικά σε μεγαλύτερο βάθος.

Η αρχιτεκτονική με ομάδες είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τα δίκτυα αισθητήρων εξαιτίας του ότι είναι εγγενώς κατάλληλη για συγχώνευση δεδομένων. Τα δεδομένα που συγκεντρώνονται από όλα τα μέλη της ομάδας μπορούν να συγχωνευτούν στον επικεφαλής κόμβο και έτσι στον BS αποστέλλεται μόνο η πληροφορία που προκύπτει από τη συγχώνευση. Τα δίκτυα αισθητήρων θα πρέπει να μπορούν να αυτο-οργανώνονται και έτσι ο σχηματισμός ομάδων και η εκλογή των επικεφαλής κόμβων θα πρέπει να είναι μία αυτόνομη, κατανεμημένη διεργασία. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των πρωτοκόλλων του στρώματος δικτύου όπως είναι το LEACH (low-energy adaptive clustering hierarchy).



Αρχιτεκτονική με ομάδες

Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)

Το LEACH είναι ένα πρωτόκολλο που βασίζεται σε ομάδες και το οποίο ελαχιστοποιεί την σπατάλη ενέργειας στα δίκτυα αισθητήρων. Το LEACH επιλέγει τυχαία κόμβους ως επικεφαλής ομάδων και εκτελεί περιοδική επανεκλογή, έτσι ώστε η υψηλή σπατάλη ενέργειας των επικεφαλής κόμβων κατά την επικοινωνία τους με τον BS να απλώνεται σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Κάθε επανάληψη της επιλογής των επικεφαλής κόμβων ονομάζεται γύρος (round). Η λειτουργία του LEACH χωρίζεται σε δύο φάσεις: φάση οργάνωσης και σταθερή φάση.

Κατά την φάση της οργάνωσης, κάθε κόμβος αισθητήρας διαλέγει ένα τυχαίο αριθμό μεταξύ του 0 και του 1. Αν αυτός είναι μικρότερος από το κατώφλι για τον κόμβο n, T(n), ο κόμβος αισθητήρας γίνεται επικεφαλής κόμβος. Το κατώφλι T(n) υπολογίζεται ως εξής:

$$T(n) = \begin{cases} \dfrac{P}{1 - P[r \times \mathrm{mod}(1/P)]} & \alpha\nu\ n \in G \\ 0 & \alpha\lambda\lambda\iota\acute{\omega}\varsigma \end{cases}$$

όπου P είναι το επιθυμητό ποσοστό των κόμβων οι οποίοι είναι επικεφαλής ομάδων, r είναι ο παρών γύρος (round) και G είναι το σύνολο των κόμβων οι οποίοι δεν ήταν επικεφαλής ομάδων κατά τους περασμένους 1/P γύρους. Αυτό εξασφαλίζει ότι όλοι οι κόμβοι αισθητήρες στο τέλος θα ξοδέψουν την ίδια ενέργεια. Μετά την επιλογή, οι επικεφαλής κόμβοι γνωστοποιούν (advertise) την επιλογή

τους σε όλους τους κόμβους. Όλοι οι κόμβοι επιλέγουν τον περισσότερο κοντινό επικεφαλής κόμβο όταν λαμβάνουν γνωστοποιήσεις, με βάση την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος. Έπειτα οι επικεφαλής κόμβοι αναθέτουν ένα TDMA χρονοδιάγραμμα για τα μέλη της ομάδας τους.

Η σταθερή φάση είναι μεγαλύτερης διάρκειας έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το overhead του σχηματισμού ομάδας. Κατά την σταθερή φάση, η μετάδοση των δεδομένων γίνεται με βάση το χρονοδιάγραμμα TDMA, ενώ οι επικεφαλής κόμβοι εκτελούν συγκέντρωση/συγχώνευση δεδομένων μέσω τοπικών υπολογισμών. Ο BS λαμβάνει μόνο συγκεντρωμένα δεδομένα από τους επικεφαλής των ομάδων, γεγονός που οδηγεί σε συντήρηση ενέργειας. Μετά από μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο στην σταθερή φάση, οι επικεφαλής κόμβοι επιλέγονται και πάλι μέσω της φάσης οργάνωσης.

ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η διασπορά δεδομένων είναι η διαδικασία κατά την οποία ερωτήματα (queries) ή δεδομένα δρομολογούνται στο δίκτυο αισθητήρων. Τα δεδομένα που συγκεντρώνονται από του κόμβους αισθητήρες θα πρέπει να διαβιβαστούν στον BS ή σε οποιονδήποτε άλλον κόμβο που ενδιαφέρεται για τα δεδομένα. Ο κόμβος ο οποίος παράγει δεδομένα λέγεται πηγή και η πληροφορία η οποία θα πρέπει να αναφερθεί λέγεται γεγονός. Ένας κόμβος τον οποίο αφορά ένα γεγονός και ψάχνει πληροφορία για αυτό λέγεται δεξαμενή (sink). Για τα δίκτυα αισθητήρων έχουν αναπτυχθεί μοντέλα κίνησης όπως είναι τα μοντέλα συλλογής δεδομένων και διασποράς δεδομένων. Στο μοντέλο συλλογής δεδομένων, η πηγή στέλνει τα δεδομένα που συγκεντρώνει σε μία οντότητα συλλογής όπως είναι ο BS. Αυτό μπορεί να είναι περιοδικό ή κατ' απαίτηση. Τα δεδομένα επεξεργάζονται από την κεντρική οντότητα συλλογής.

Η διασπορά δεδομένων, αφετέρου, αποτελείται από μια διαδικασία δύο βημάτων, την διάδοση ενδιαφέροντος (interest propagation) και την διάδοση δεδομένων (data propagation). Ένα ενδιαφέρον (interest) περιγράφει ένα συγκεκριμένο είδος δεδομένων ή γεγονότων για τα οποία ενδιαφέρεται ένας κόμβος, όπως είναι για παράδειγμα η θερμοκρασία, η ανεπιθύμητη εισβολή ή η παρουσία βιο-πρακτόρων (bio-agents). Για κάθε γεγονός για το οποίο ενδιαφέρεται μία δεξαμενή, εκπέμπει το ενδιαφέρον της (interest) στους γείτονές της και το ανανεώνει περιοδικά. Το ενδιαφέρον (interest) διαδίδεται σε όλο το δίκτυο, και κάθε κόμβος διατηρεί μια μνήμη ενδιαφερόντων (interest cache) όλων των γεγονότων που πρέπει να αναφερθούν. Αυτό είναι παρόμοιο με τον σχηματισμό ενός δέντρου πολυεκπομπής, το οποίο έχει ως ρίζα την δεξαμενή (sink). Όταν ανιχνεύεται ένα γεγονός, αναφέρεται στους ενδιαφερόμενους κόμβους αφού ανατρέξει στην μνήμη ενδιαφερόντων (interest cache). Οι ενδιάμεσοι κόμβοι διατηρούν μία μνήμη δεδομένων (data cache) και μπορούν να συγκεντρώσουν τα δεδομένα ή να τροποποιήσουν τον ρυθμό των δεδομένων αναφοράς. Τα μονοπάτια που χρησιμοποιούνται για την διάδοση των δεδομένων τροποποιούνται, προτιμώντας τα συντομότερα μονοπάτια και από-επιλέγοντας (deselect) τα πιο αδύναμα και τα πιο μεγάλα

μονοπάτια. Η βασική ιδέα της διασποράς γίνεται αποδοτική και έξυπνη μέσω διάφορων αλγορίθμων για την δρομολόγηση των δεδομένων και των ενδιαφερόντων (interests).

Πλημμύρα (Flooding)

Κατά την πλημμύρα, κάθε κόμβος ο οποίος λαμβάνει ένα πακέτο το εκπέμπει όταν δεν προσεγγίζεται ο μέγιστος αριθμός των hop του πακέτου και όταν ο ίδιος ο κόμβος δεν είναι ο προορισμός του πακέτου. Αυτή η τεχνική δεν απαιτεί περίπλοκους αλγορίθμους διατήρησης τοπολογίας ή ανακάλυψης διαδρομών. Ωστόσο, η πλημμύρα έχει τα παρακάτω μειονεκτήματα:

- **Ενδόρρηξη:** Αυτή είναι η κατάσταση κατά την οποία διπλότυπα (duplicate) μηνύματα στέλνονται στον ίδιο κόμβο. Αυτό συμβαίνει όταν ένας κόμβος λάβει αντίγραφα του ίδιου μηνύματος από πολλούς γείτονές του.
- **Επικάλυψη:** Το ίδιο γεγονός μπορεί να ανιχνευθεί από περισσότερους από ένα κόμβους εξαιτίας της επικάλυψης των περιοχών κάλυψης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την λήψη από τους γείτονές τους διπλότυπων αναφορών για το ίδιο γεγονός.
- **Τύφλωση των πόρων:** Το πρωτόκολλο πλημμύρας δεν λαμβάνει υπόψιν του την διαθέσιμη ενέργεια στους κόμβους με αποτέλεσμα να γίνονται πολλές περιττές μεταδόσεις. Έτσι, μειώνει την διάρκεια ζωής του δικτύου.

Κουτσομπολιό (Gossiping)

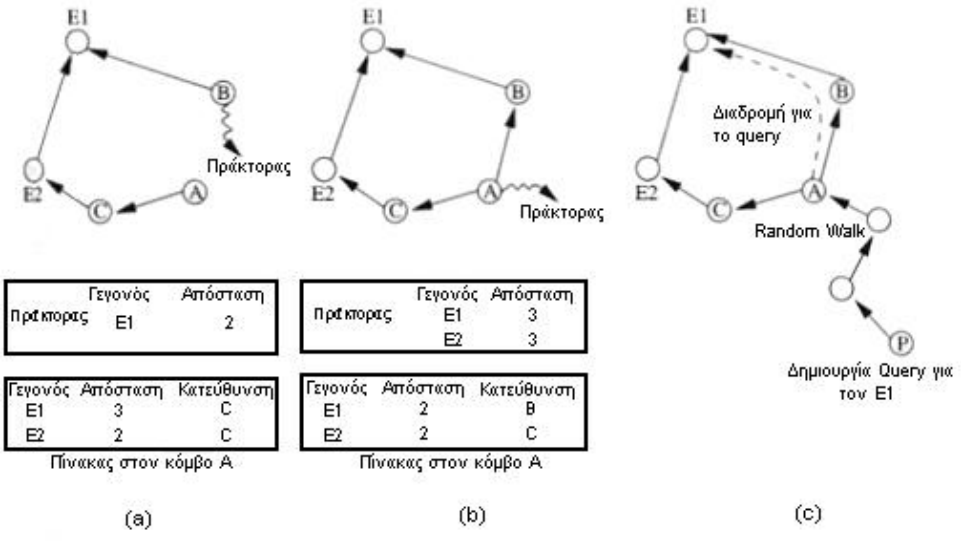
Το κουτσομπολιό είναι μια τροποποιημένη έκδοση της πλημμύρας, όπου οι κόμβοι δεν εκπέμπουν ένα πακέτο, αλλά το στέλνουν σε ένα τυχαία επιλεγμένο γείτονα. Αυτό αποφεύγει το πρόβλημα της ενδόρρηξης, αλλά ένα μήνυμα χρειάζεται πολύ χρόνο για να διαδοθεί σε όλο το δίκτυο. Αν και το κουτσομπολιό έχει αισθητά χαμηλότερο overhead από την πλημμύρα, δεν υπάρχει εγγύηση ότι όλοι οι κόμβοι του δικτύου θα λάβουν το μήνυμα. Βασίζεται στην τυχαία επιλογή ενός γείτονα για να διαδώσει τελικά το μήνυμα σε όλο το δίκτυο.

Δρομολόγηση φημών (Rumor Routing)

Η δρομολόγηση φημών είναι ένας αλγόριθμος δημιουργίας μονοπατιού που βασίζεται σε πράκτορες (agents). Οι πράκτορες, ή “μυρμήγκια”, είναι μακρόβιες οντότητες που δημιουργούνται τυχαία από κόμβους. Κατά βάση, αυτά είναι πακέτα τα οποία κυκλοφορούν στο δίκτυο για να δημιουργήσουν τα συντομότερα μονοπάτια σε γεγονότα τα οποία αντιμετωπίζουν. Μπορούν επίσης να εκτελέσουν βελτιστοποιήσεις μονοπατιών στους κόμβους τους οποίους επισκέπτονται. Όταν ένας πράκτορας βρει έναν κόμβο του οποίου το μονοπάτι προς ένα γεγονός είναι μεγαλύτερο από το δικό του,

ενημερώνει τον πίνακα δρομολόγησης του κόμβου. Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει την λειτουργία του αλγορίθμου δρομολόγησης φημών. Στην εικόνα 3.4 (a), ο πράκτορας έχει καταγράψει αρχικά ένα μονοπάτι απόστασης 2 προς το γεγονός E1. Ο πίνακας του κόμβου A δείχνει ότι είναι σε απόσταση 3 από το γεγονός E1 και σε απόσταση 2 από το γεγονός E2. Η ενημέρωση είναι κατά ένα hop μεγαλύτερης απόστασης από αυτό που βρήκε στο A, για να υπολογίσει και το hop ανάμεσα σε οποιονδήποτε γείτονα του A που θα επισκεφτεί στην συνέχεια ο πράκτορας και τον A. Επίσης βελτιστοποιεί το μονοπάτι προς το E1 που καταγράφεται στον κόμβο A έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψιν το συντομότερο μονοπάτι μέσω του κόμβου B. Η ενημερωμένη κατάσταση του πράκτορα και ο πίνακας του κόμβου δείχνονται στην εικόνα 3.4 (b).

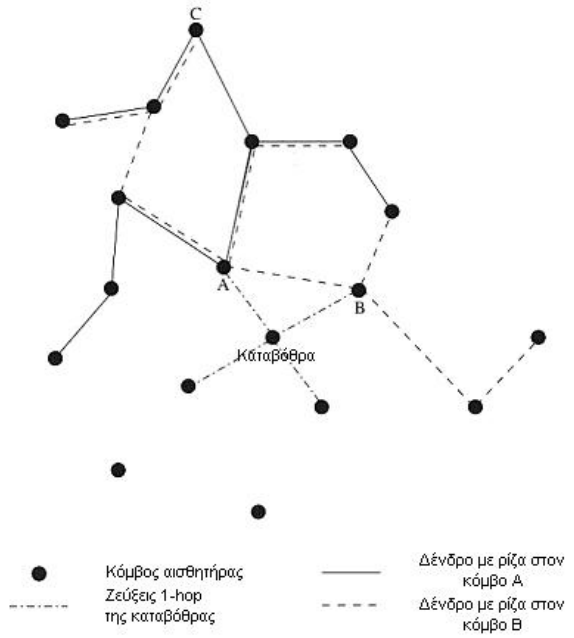
Όταν ένα query δημιουργηθεί σε μία δεξαμενή (sink), στέλνεται σε ένα τυχαίο περίπατο (random walk) με την ελπίδα ότι θα βρει ένα μονοπάτι (το οποίο θα έχει δημιουργηθεί από πριν από ένα πράκτορα) που θα οδηγεί στο απαιτούμενο γεγονός. Αυτό βασίζεται στην υψηλή πιθανότητα ότι δύο ευθείες γραμμές θα διασταυρωθούν σε ένα επίπεδο διάγραμμα, υποθέτοντας ότι η τοπολογία του δικτύου είναι παρόμοια με ένα δισδιάστατο διάγραμμα και τα μονοπάτια που σχηματίζονται μπορούν να προσεγγιστούν από ευθείες γραμμές λόγω της υψηλής πυκνότητας των κόμβων. Αν ένα query δεν βρει ένα μονοπάτι γεγονότος (event path), η δεξαμενή (sink) κάνει παύση και χρησιμοποιεί την πλημμύρα ως τελευταία λύση για να διαδώσει το query. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4 (c), ας υποθέσουμε ότι δημιουργείται από τον κόμβο P ένα query για το γεγονός E1. Μέσω ενός τυχαίου περιπάτου (random walk), φτάνει στον κόμβο A, όπου βρίσκει το μονοπάτι που δημιουργήθηκε προηγουμένως προς το E1. Έτσι, το query κατευθύνεται προς το E1 μέσω του κόμβου S, όπως φαίνεται και από τον πίνακα του A.



Δρομολόγηση φημών

Δρομολόγηση διαδοχικής ανάθεσης (Sequential Assignment Routing)

Για τα δίκτυα αισθητήρων έχει προταθεί ένα σύνολο αλγορίθμων το οποίο εκτελεί οργάνωση και διαχείριση της κινητικότητας. Ο αλγόριθμος SAR (Sequential assignment routing) δημιουργεί πολλαπλά δέντρα, όπου η ρίζα του καθενός είναι ένας γείτονας της δεξαμενής ο οποίος απέχει κατά ένα hop. Κάθε δέντρο μεγαλώνει εξωτερικά της δεξαμενής, αποφεύγοντας τους κόμβους με μικρό throughput και υψηλή καθυστέρηση. Στο τέλος της διαδικασίας, οι περισσότεροι κόμβοι ανήκουν σε πολλά δέντρα. Ένα παράδειγμα δημιουργίας δέντρου απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα. Δείχνονται τα δέντρα που έχουν ρίζες στα A και B, οι οποίοι είναι δύο από τους γείτονες της δεξαμενής που απέχουν κατά ένα hop. Ο κόμβος C ανήκει και στα δύο δέντρα και έχει μήκη μονοπατιών, 3 και 5 αντίστοιχα, προς την δεξαμενή, χρησιμοποιώντας τα δύο δέντρα. Κάθε κόμβος αισθητήρα καταγράφει δύο παραμέτρους για κάθε μονοπάτι που περνά μέσα από αυτόν: τους διαθέσιμους ενεργειακούς πόρους στο μονοπάτι και τα επιπρόσθετα κριτήρια QoS όπως είναι η καθυστέρηση.



Δρομολόγηση διαδοχικής ανάθεσης

Αυτό επιτρέπει σε έναν κόμβο να διαλέξει ένα μονοπάτι ανάμεσα σε πολλά για να αναμεταδώσει το μήνυμά του στην δεξαμενή (sink). Ο αλγόριθμος SAR διαλέγει ένα μονοπάτι το οποίο υπολογίζει ότι έχει αρκετούς ενεργειακούς πόρους, ενώ μπορούν να γίνουν παροχές για να εξυπηρετηθούν τα

πακέτα διαφορετικών προτεραιοτήτων. Για να διαχειριστούν τα πακέτα τα οποία έχουν κάποιες προτεραιότητες, χρησιμοποιείται ένα κριτήριο (metric) QoS με ειδικό βάρος, το οποίο υπολογίζεται ως το γινόμενο του επιπέδου προτεραιότητας και της καθυστέρησης (priority level × delay). Η δρομολόγηση εξασφαλίζει ότι διατηρείται το ίδιο σταθμισμένο κριτήριο QoS. Έτσι, τα πακέτα με υψηλότερη προτεραιότητα θα ακολουθήσουν μονοπάτια με χαμηλότερη καθυστέρηση και τα πακέτα με χαμηλότερη προτεραιότητα θα πρέπει να χρησιμοποιήσουν μονοπάτια μεγαλύτερης καθυστέρησης. Για παράδειγμα, αν ο κόμβος C δημιουργήσει ένα πακέτο προτεραιότητας 3, αυτό θα ακολουθήσει το μεγαλύτερο μονοπάτι κατά μήκος του δέντρου B, ενώ ένα πακέτο με προτεραιότητα 5 (υψηλότερη προτεραιότητα) θα ακολουθήσει την συντομότερη διαδρομή κατά μήκος του δέντρου A, έτσι ώστε να διατηρείται το κριτήριο (metric) QoS, προτεραιότητα × καθυστέρηση. Το SAR ελαχιστοποιεί το μέσο σταθμισμένο κριτήριο (metric) QoS κατά την διάρκεια ζωής του δικτύου. Η δεξαμενή προκαλεί περιοδικές ενημερώσεις στο κριτήριο αυτό (metric) για να αντικατοπτρίζει τις αλλαγές στους διαθέσιμους ενεργειακούς πόρους μετά από μερικές αναμεταδόσεις.

Κατευθυνόμενη Διασπορά (Directed Diffusion)

Το πρωτόκολλο κατευθυνόμενης διασποράς είναι χρήσιμο σε σενάρια όπου οι κόμβοι αισθητήρες δημιουργούν αιτήσεις/ερωτήματα (requests/queries) για τα δεδομένα τα οποία ανιχνεύονται από άλλους κόμβους, αντί των queries τα οποία προκύπτουν μόνο από τον BS. Έτσι, η δεξαμενή (sink) για ένα query μπορεί να είναι ένας BS ή ένας κόμβος αισθητήρας. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης κατευθυνόμενης διασποράς βελτιώνει την διασπορά των δεδομένων χρησιμοποιώντας κλίσεις ενδιαφέροντος (interest gradients). Κάθε κόμβος αισθητήρα ονομάζει τα δεδομένα του με ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά, ενώ οι άλλοι κόμβοι εκφράζουν το ενδιαφέρον τους (interest) με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά. Για να περιγραφεί ένα ενδιαφέρον για τα δεδομένα που εισέρχονται, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ζευγάρια του τύπου χαρακτηριστικό-τιμή ως ακολούθως, όπου ένα ενδιαφέρον (interest) δεν είναι τίποτε άλλο από ένα σύνολο περιγραφών για τα δεδομένα για τα οποία ενδιαφέρεται ο κόμβος που στέλνει το ερώτημα (query).

```
type = vehicle          /* ανίχνευση της θέσης του οχήματος */
interval = 1 s          /* αναφορά κάθε 1 δευτερόλεπτο*/
rect = [0, 0, 600, 800]     /* query το οποίο κατευθύνεται στους αισθητήρες
                            εντός αυτού του ορθογωνίου*/
timestamp = 02:30:00        /* όταν δημιουργήθηκε αυτό το ενδιαφέρον*/
expiresAt = 03:00:00        /* μέχρις όταν η δεξαμενή διατηρεί το ενδιαφέρον
                            της για αυτά τα δεδομένα */
```

Η δεξαμενή θα πρέπει να ανανεώνει περιοδικά το ενδιαφέρον της (interest) αν απαιτεί ακόμα τα δεδομένα να αναφέρονται σε αυτή. Τα δεδομένα διαδίδονται κατά μήκος του αντίστροφου μονοπατιού που ακολουθεί η διάδοση του ενδιαφέροντος (interest). Κάθε μονοπάτι σχετίζεται με μία κλίση (gradient) η οποία σχηματίζεται κατά την στιγμή της διάδοσης του ενδιαφέροντος (interest). Ενώ οι θετικές κλίσεις (positive gradients) προωθούν την ροή των δεδομένων κατά μήκος του μονοπατιού, οι αρνητικές κλίσεις εμποδίζουν την κατανομή των δεδομένων κατά μήκος ενός συγκεκριμένου μονοπατιού. Η ένταση του ενδιαφέροντος (interest) είναι διαφορετική σε διαφορετικούς γείτονες, με αποτέλεσμα να έχουμε μονοπάτια πηγής-δεξαμενής με διαφορετικές κλίσεις (gradients). Η κλίση που αντιστοιχεί σε ένα ενδιαφέρον (interest) προέρχεται από το πεδίο διάστημα/ρυθμός-δεδομένων (interval/data-rate), το οποίο ορίζεται στο ενδιαφέρον (interest). Για παράδειγμα, αν υπάρχουν δύο μονοπάτια που σχηματίζονται με κλίσεις 0.8 και 0.4, η πηγή μπορεί να στείλει τα διπλάσια δεδομένα κατά μήκος του μονοπατιού υψηλότερης κλίσης σε σύγκριση με το μονοπάτι χαμηλότερης κλίσης. Για το ενδιαφέρον (interest) που αναφέρθηκε προηγουμένως, ένας αισθητήρας μπορεί να στείλει δεδομένα τα οποία θα έχουν την ακόλουθη μορφή:

```
type = vehicle          /* τύπος της παρατηρούμενης εισβολής */
instance = car          /* συγκεκριμένο στιγμιότυπο του τύπου */
location = [200,250]    /* θέση του κόμβου */
confidence = 0.80       /* εμπιστοσύνη */
timestamp = 02:45:20    /* χρόνος ανίχνευσης */
```

Το μοντέλο διασποράς επιτρέπει στους κόμβους να αποθηκεύουν σε μνήμη (cache) ή να μεταπλάθουν (συγχώνευση) τα δεδομένα. Αυτό αυξάνει την δυνατότητα αυξομείωσης της επικοινωνίας και μειώνει τον αριθμό των απαιτούμενων μεταδόσεων μηνυμάτων.

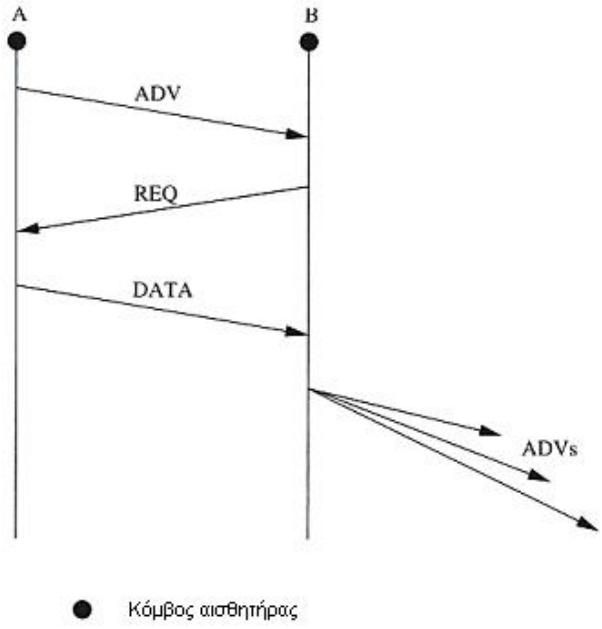
Για να ενημερωθεί το ενδιαφέρον ενός κόμβου κατά μήκος ενός συγκεκριμένου μονοπατιού χρησιμοποιείται η ιδέα της ενίσχυσης (reinforcement). Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι η δεξαμενή χρειάζεται περισσότερες συχνές ενημερώσεις από τους αισθητήρες οι οποίοι ανίχνευσαν κάποιο γεγονός. Ενισχύει το μονοπάτι στέλνοντας ένα ενδιαφέρον (interest) με υψηλότερη απαίτηση για ρυθμό δεδομένων με αποτέλεσμα να αυξάνει την κλίση (gradient) αυτού του μονοπατιού. Αφετέρου, αν η δεξαμενή απαιτεί μόνο λιγότερες ενημερώσεις, εφαρμόζει αρνητική ενίσχυση στέλνοντας ένα ενδιαφέρον (interest) χαμηλότερης απαίτησης σε ρυθμό δεδομένων. Το μοντέλο κατευθυνόμενης διασποράς χρησιμοποιεί ονοματοδοσία δεδομένων με βάση τα χαρακτηριστικά και τοπικούς μετασχηματισμούς δεδομένων για να αναπαραστήσει την δεδομένο-κεντρική (data-centric) φύση των λειτουργιών ενός δικτύου αισθητήρων. Οι τοπικές λειτουργίες της συσσώρευσης δεδομένων είναι ανάλογες με την εφαρμογή. Οι κλίσεις (gradients) μοντελοποιούν τα αποτελέσματα

των τοπικών αλληλεπιδράσεων που συμβαίνουν σε όλο το δίκτυο, ρυθμίζοντας την ροή των δεδομένων κατά μήκος διαφορετικών μονοπατιών, ανάλογα με το ενδιαφέρον που εκδηλώνεται.

Πρωτόκολλα αισθητήρων για πληροφορίες μέσω διαπραγματεύσεων – SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation)

Για τα δίκτυα αισθητήρων έχει προταθεί μια οικογένεια πρωτοκόλλων η οποία καλείται SPIN (sensor protocols for information via negotiation). Η SPIN χρησιμοποιεί διαπραγμάτευση και προσαρμογή πόρων για να αντιμετωπίζει τα ελαττώματα της πλημμύρας. Η διαπραγμάτευση μειώνει την επικάλυψη και την ενδόρρηξη, ενώ χρησιμοποιείται μία λειτουργία που λαμβάνει υπόψιν της τους πόρους βασιζόμενη σε ένα κατώφλι, έτσι ώστε να επιμηκύνεται η διάρκεια ζωής του δικτύου. Αντί για ακατέργαστα δεδομένα (raw data) χρησιμοποιούνται μετά-δεδομένα (meta-data), δηλαδή δεδομένα που περιγράφουν δεδομένα. Αυτό απαιτεί λιγότερα bytes και μπορεί να έχει την μορφή μιας συγκεκριμένης εφαρμογής. Η SPIN έχει τρεις τύπους μηνυμάτων: ADV, REQ και DATA. Ένας κόμβος αισθητήρας εκπέμπει ένα μήνυμα ADV το οποίο περιέχει μετά-δεδομένα που περιγράφουν τα πραγματικά δεδομένα. Αν ένας γείτονας ενδιαφέρεται για τα δεδομένα, στέλνει ένα μήνυμα REQ. Στην συνέχεια, ο κόμβος αισθητήρας στέλνει το πραγματικό DATA στον γείτονα. Ο γείτονας στέλνει ξανά μηνύματα ADVs στους γείτονές του και η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έτσι ώστε τα δεδομένα να διαδοθούν σε ολόκληρο το δίκτυο. Αυτή η απλή εκδοχή του SPIN φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

Το SPIN βασίζεται στην δεδομένο-κεντρική δρομολόγηση, όπου οι κόμβοι γνωστοποιούν τα διαθέσιμα δεδομένα μέσω ενός ADV και περιμένουν για αιτήσεις από τους ενδιαφερόμενους κόμβους. Το SPIN-2 επεκτείνει το SPIN, χρησιμοποιώντας ένα κατώφλι ενέργειας ή πόρων για να μειώσει την συμμετοχή. Ένας κόμβος μπορεί να συμμετέχει στην χειραψία ADV-REQ-DATA μόνο αν έχει επαρκείς πόρους πάνω από ένα κατώφλι.



Πρωτόκολλο SPIN

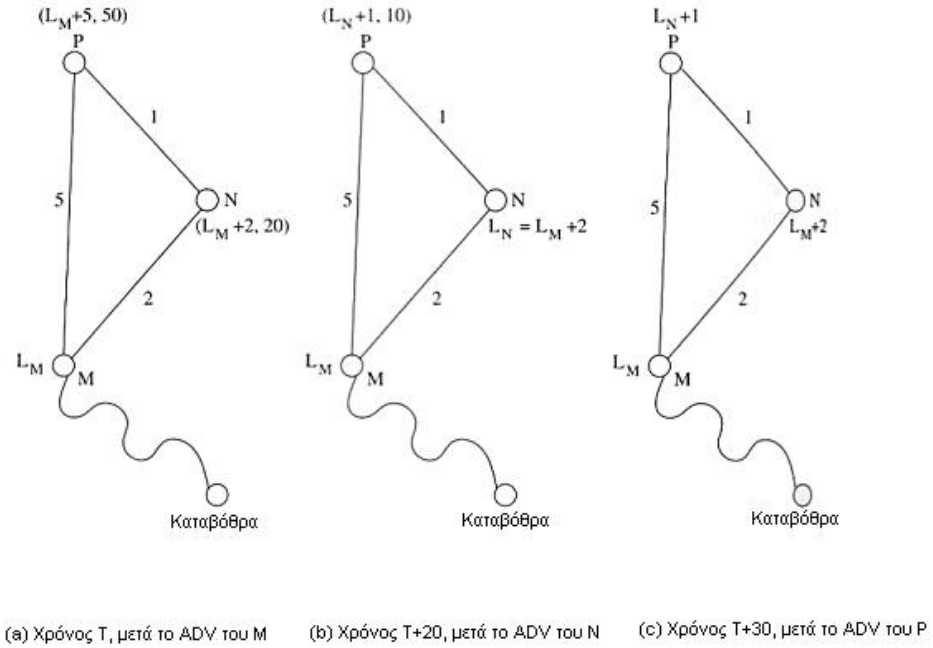
Προσέγγιση με βάση το πεδίο κόστους (Cost-Field Approach)

Η προσέγγιση με βάση το πεδίο κόστους εξετάζει το πρόβλημα της δημιουργίας μονοπατιών σε μία δεξαμενή (sink). Αυτή είναι μία διαδικασία δύο φάσεων, η πρώτη από τις οποίες είναι η δημιουργία του πεδίου κόστους, με βάση κριτήρια (metrics) όπως είναι η καθυστέρηση, σε όλους τους κόμβους αισθητήρες και η δεύτερη είναι η διασπορά των δεδομένων χρησιμοποιώντας τα κόστη. Σε κάθε κόμβο, το κόστος ορίζεται ως το ελάχιστο κόστος από αυτό τον κόμβο προς την δεξαμενή (sink), το οποίο προκύπτει κατά μήκος του βέλτιστου μονοπατιού. Δεν είναι απαραίτητη η διατήρηση της ρητής πληροφορίας μονοπατιού.

Η φάση 1 δημιουργεί ένα πεδίο κόστους ξεκινώντας από τον κόμβο δεξαμενή (sink node). Μία δεξαμενή εκπέμπει ένα πακέτο ADV με το δικό της κόστος ίσο με 0. Όταν ένας κόμβος N ακούσει ένα μήνυμα ADV από τον κόμβο M, θέτει το δικό του κόστος μονοπατιού στο $\min(L_N, L_M + C_{NM})$, όπου L_N είναι το συνολικό κόστος μονοπατιού από τον κόμβο N στην δεξαμενή, το L_M αναπαριστά το κόστος του κόμβου M προς την δεξαμενή και C_{NM} είναι το κόστος από τον κόμβο N στον M. Αν το L_N είναι ενημερωμένο, το νέο κόστος εκπέμπεται μέσω ενός νέου ADV. Αυτή είναι μια υλοποίηση του αλγόριθμου του Dijkstra η οποία βασίζεται στην πλημμύρα. Για να μειωθούν τα υψηλά κόστη επικοινωνίας τα οποία σχετίζονται με την πλημμύρα, χρησιμοποιείται μία προσέγγιση η οποία βασίζεται στον αλγόριθμο back-off. Ο κύριος λόγος για overhead είναι ότι ένας κόμβος εκπέμπει αμέσως το ενημερωμένο κόστος του ακόμα κι αν αυτό δεν ήταν το βέλτιστο. Αντίθετα, η τροποποίηση back-off αναγκάζει ένα κόμβο να αναβάλει το ADV του αντί να το εκπέμπει αμέσως. Ο χρόνος της αναβολής καθορίζεται ευρετικά (heuristically) ως $\gamma \times C_{NM}$, όπου γ είναι μία παράμετρος του αλγορίθμου.

Η λειτουργία της προσέγγισης που βασίζεται στο πεδίο κόστους με την τροποποίηση back-off απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα. Οι αριθμοί στις ζεύξεις δείχνουν τα κόστη των ζεύξεων. Η τιμή του γ υποτίθεται ίση με 10. Αρχικά, οι κόμβοι N και P δεν έχουν ένα μονοπάτι προς την δεξαμενή και έτσι είχαν τα κόστη τους ίσα με ∞. Στην εικόνα (a), ο κόμβος M εκπέμπει ένα ADV, το οποίο λαμβάνεται από τους κόμβους N και P. Αυτοί φτιάχνουν τα κόστη τους σε L_M+2 και L_M+5 αντίστοιχα, και θέτουν τους back-off χρονοδιακόπτες τους σε 20 και 50, αντίστοιχα. Η εικόνα (b) δείχνει τα κόστη μετά από 20 χρονικές μονάδες, όταν λήγει ο back-off χρονοδιακόπτης του κόμβου N. Ο κόμβος N οριστικοποιεί το κόστος του σε L_M+2 και εκπέμπει ένα ADV, το οποίο ακούει ο κόμβος P. Εφόσον ισχύει L_N+1 < L_M+5, ο κόμβος P ενημερώνει το κόστος του και θέτει ένα νέο back-off χρονοδιακόπτη με την τιμή 10. Το περιττό ADV του κόμβου P το οποίο είναι πρόωρο και μη βέλτιστο αποφεύγεται ρυθμίζοντας τον back-off χρονοδιακόπτη. Τελικά, στις 30 χρονικές μονάδες, ο κόμβος P οριστικοποιεί το κόστος του σε L_N+1 και εκπέμπει ένα ADV, όπως φαίνεται στην εικόνα (c).

Η φάση 2 είναι η διαδικασία της διασποράς δεδομένων. Εφόσον δημιουργηθεί το πεδίο κόστους, μία πηγή στέλνει το μήνυμά της στην δεξαμενή (sink) S με κόστος C_S. Το μήνυμα περιέχει επίσης ένα πεδίο που περιλαμβάνει το μέχρι τώρα κόστος (cost-so-far field), το οποίο αρχικά τίθεται στο 0. Κάθε ενδιάμεσος κόμβος προωθεί το πακέτο αν το κόστος το οποίο επισημαίνεται στο πακέτο συν το δικό του κόστος, είναι ίσο με το πραγματικό κόστος πηγής προς δεξαμενή (source-to-sink cost). Αυτό εξασφαλίζει ότι το αυθεντικό βέλτιστο μονοπάτι θα χρησιμοποιηθεί όποτε δρομολογηθεί ένα πακέτο. Κατά την προώθηση, οι ενδιάμεσοι κόμβοι ενημερώνουν επίσης και το πεδίο που περιλαμβάνει το μέχρι τώρα κόστος (cost-so-far field).



(a) Χρόνος T, μετά το ADV του M (b) Χρόνος T+20, μετά το ADV του N (c) Χρόνος T+30, μετά το ADV του P

Προσέγγιση η οποία βασίζεται στο πεδίο κόστους

Γεωγραφικός πίνακας κατακερματισμού (Geographic hash table)

Ο γεωγραφικός πίνακας κατακερματισμού (GHT) είναι ένα σύστημα που βασίζεται σε δεδομένο-κεντρική αποθήκευση (data-centric storage), εμπνευσμένο από τα συστήματα κατανεμημένων πινάκων κατακερματισμού (DHT – Distributed hash table) της κλίμακας του Internet, όπως είναι το Chord και το Tapestry. Ο GHT κατακερματίζει κλειδιά σε γεωγραφικές συντεταγμένες και αποθηκεύει ένα ζεύγος (τιμής κλειδιού) στον κόμβο αισθητήρα που βρίσκεται πιο κοντά στην τιμή κατακερματισμού. Η υπολογισμένη τιμή κατακερματισμού αντιστοιχίζεται σε ένα μοναδικό κόμβο με συνέπεια, έτσι ώστε τα queries για τα δεδομένα να δρομολογούνται στον σωστό κόμβο. Τα αποθηκευμένα δεδομένα αντιγράφονται για να εξασφαλιστεί η περίσσεια σε περίπτωση βλάβης ενός κόμβου, ενώ για να διατηρηθούν τα αντιγραμμένα δεδομένα χρησιμοποιείται ένα πρωτόκολλο συνέπειας (consistency protocol). Τα δεδομένα κατανέμονται ανάμεσα στους κόμβους έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα αυξομείωσης και το φορτίο αποθήκευσης να είναι εξισορροπημένο. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο χρησιμοποιείται είναι το GPSR (greedy perimeter stateless routing), το οποίο και πάλι χρησιμοποιεί γεωγραφική πληροφορία για να δρομολογήσει τα δεδομένα και τα queries. Το GHT είναι περισσότερο αποτελεσματικό στα μεγάλα δίκτυα αισθητήρων, όπου ανιχνεύεται ένας μεγάλος αριθμός γεγονότων αλλά δεν ερωτώνται όλα (query). Σε αυτή την περίπτωση, τα δεδομένα που παρατηρούνται αποθηκεύονται κατά έναν κατανεμημένο τρόπο σε όλους τους κόμβους, αντί να δρομολογούνται σε μία κεντρική εξωτερική αποθήκη. Τα queries δρομολογούνται στον πλησιέστερο κόμβο ο οποίος περιέχει ένα αντίγραφο των σχετικών δεδομένων. Αυτό κάνει την κατανομή της αποθήκευσης και της κίνησης ομοιόμορφη.

Μικρό δίκτυο επικοινωνίας ελάχιστης ενέργειας SMECN (Small Minimum Energy Communication Network)

Το SMECN είναι ένα πρωτόκολλο το οποίο προτάθηκε για την κατασκευή ενός υπό-δικτύου από ένα δεδομένο δίκτυο επικοινωνίας. Αν το συνολικό δίκτυο αισθητήρων αναπαρίσταται από ένα γράφο G, ο υπογράφος G΄ κατασκευάζεται έτσι ώστε η χρήση ενέργειας του δικτύου να ελαχιστοποιείται. Ο αριθμός των ακμών του G΄ είναι μικρότερος από αυτόν του G, αλλά όλοι οι κόμβοι του G διατηρούνται στον G΄. Η δυνατότητα σύνδεσης ανάμεσα σε δύο οποιουσδήποτε κόμβους δεν διαταράσσεται από τον υπογράφο. Ο G΄ κατασκευάζεται έτσι ώστε η ενέργεια η οποία απαιτείται για να μεταδοθούν τα δεδομένα από έναν κόμβο σε όλους τους γείτονές του να είναι μικρότερη στο G΄ απ’ ότι στον G. Το SMECN επίσης ακολουθεί την ιδιότητα της ελάχιστης ενέργειας ΜΕ (minimum energy) κατά την κατασκευή του υπογράφου του, δηλαδή, υπάρχει ένα μονοπάτι ΜΕ στον υπογράφο

G΄ ανάμεσα σε δύο οποιουσδήποτε κόμβους οι οποίοι συνδέονται στον G. Η ενέργεια που απαιτείται για την μετάδοση δεδομένων ανάμεσα σε δύο κόμβους u και v μοντελοποιείται ως εξής:

$$p(u,v) = t \times d(u,v)^n$$

όπου t είναι μία σταθερά, n είναι ο εκθέτης της απώλειας μονοπατιού, που δείχνει την απώλεια ενέργειας σε σχέση με την απόσταση από τον πομπό και d(u,v) είναι η απόσταση ανάμεσα στους u και v. Ας θεωρήσουμε ότι η ενέργεια που χρειάζεται για να ληφθούν τα δεδομένα είναι c. Καθώς η ισχύς μετάδοσης αυξάνει εκθετικά με την απόσταση, θα ήταν περισσότερο οικονομικό να μεταδοθούν τα δεδομένα σε μικρότερα hops. Αν υποθέσουμε ότι το μονοπάτι ανάμεσα στον u (δηλαδή τον u_0) και τον v (δηλαδή τον u_k) αναπαρίσταται από το r = (u_0 , u_1 , u_k), τέτοιο ώστε κάθε ζεύγος (u_i, u_{i+1}) να είναι μία ακμή του υπογράφου G΄, τότε η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται για την μετάδοση είναι:

$$C(r) = \sum_{i=0}^{k-1} (p(u_i, u_{i+1}) + c)$$

Το μονοπάτι r είναι το μονοπάτι ΜΕ αν ισχύει C(r)<C(r') για όλα τα μονοπάτια r΄ ανάμεσα στους u και v στον γράφο G. Ο υπογράφος G΄ λέγεται ότι έχει την ιδιότητα ΜΕ αν υπάρχει ένα μονοπάτι r στον G΄ το οποίο είναι ένα μονοπάτι ΜΕ στον G, για όλα τα ζεύγη κόμβων (u,v). Το SMECN χρησιμοποιεί μόνο τα μονοπάτια ΜΕ από τον G΄ για την μετάδοση δεδομένων, έτσι ώστε η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται να ελαχιστοποιείται.

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Ο αντικειμενικός στόχος της συγκέντρωσης δεδομένων είναι να μεταδώσει τα δεδομένα που ανιχνεύονται από κάθε κόμβο αισθητήρα σε ένα BS. Ένας γύρος (round) ορίζεται ως η μία φορά που συλλέγει δεδομένα ο BS από όλους του κόμβους αισθητήρες. Ο στόχος των αλγορίθμων οι οποίοι υλοποιούν την συγκέντρωση των δεδομένων είναι να μεγιστοποιηθεί ο αριθμός των γύρων επικοινωνίας προτού οι κόμβοι τερματιστούν και το δίκτυο αχρηστευθεί. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να καταναλώνεται η ελάχιστη ενέργεια και ότι η μετάδοση θα πρέπει να γίνεται με την ελάχιστη καθυστέρηση, τα οποία είναι αντικρουόμενες απαιτήσεις. Έτσι, για την σύγκριση αλγορίθμων χρησιμοποιείται το κριτήριο (metric) ενέργεια × καθυστέρηση, καθώς αυτό το κριτήριο μετρά την γρήγορη και ενεργειακά αποδοτική συγκέντρωση δεδομένων. Στην συνέχεια αναλύονται μερικοί αλγόριθμοι οι οποίοι υλοποιούν την συγκέντρωση των δεδομένων.

Απευθείας μετάδοση

Όλοι οι κόμβοι αισθητήρες μεταδίδουν τα δεδομένα τους κατευθείαν στον BS. Αυτό είναι εξαιρετικά δαπανηρό όσον αφορά την ενέργεια που καταναλώνεται, καθώς ο BS μπορεί να είναι πολύ μακριά από μερικούς κόμβους. Επίσης, οι κόμβοι θα πρέπει να αλλάζουν κατευθύνσεις όσο μεταδίδουν στον BS για να αποφεύγουν τις συγκρούσεις και έτσι η καθυστέρηση πρόσβασης στο μέσο είναι επίσης μεγάλη. Συνεπώς, η μέθοδος αυτή έχει ιδιαίτερα πτωχή απόδοση όσον αφορά το κριτήριο (metric) ενέργεια × καθυστέρηση.

Ενεργειακά αποδοτική συγκέντρωση για τα πληροφοριακά συστήματα αισθητήρων PEGASIS (Power-Efficient Gathering for Sensor Information Systems)

Το PEGASIS είναι ένα πρωτόκολλο συγκέντρωσης δεδομένων το οποίο βασίζεται στην υπόθεση ότι όλοι οι κόμβοι αισθητήρες γνωρίζουν την τοποθεσία κάθε άλλου κόμβου, δηλαδή, η πληροφορία τοπολογίας είναι διαθέσιμη σε όλους τους κόμβους. Επίσης, οποιοσδήποτε κόμβος που επιλέγεται ως ηγέτης, έχει το απαιτούμενο εύρος μετάδοσης για να φτάσει τον BS σε ένα και μόνο hop. Οι στόχοι του PEGASIS είναι οι ακόλουθοι:

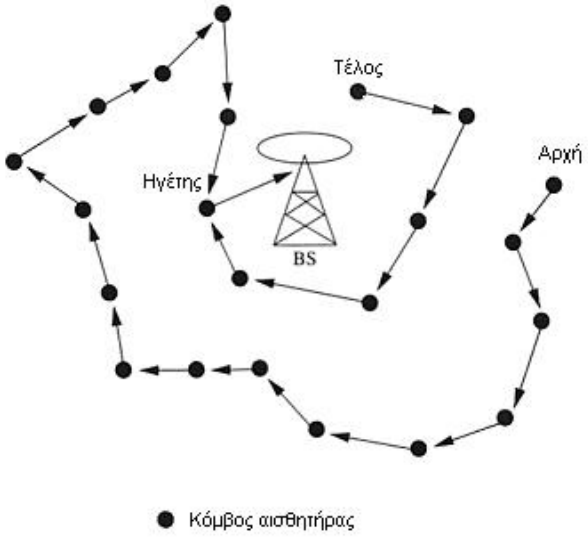
- Ελαχιστοποίηση της απόστασης στην οποία θα εκπέμπει κάθε κόμβος
- Ελαχιστοποίηση του overhead εκπομπής
- Ελαχιστοποίηση του αριθμού των μηνυμάτων που χρειάζεται να αποσταλούν στον BS
- Ισότιμη κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας σε όλους τους κόμβους

Για την δημιουργία μιας αλυσίδας από κόμβους αισθητήρες, η οποία ξεκινά από τον κόμβο ο οποίος είναι μακρύτερα από τον BS, χρησιμοποιείται ένας άπληστος αλγόριθμος (greedy algorithm). Σε κάθε βήμα, ο κοντινότερος γείτονας ο οποίος δεν έχει ακόμα επισκεφθεί προστίθεται στην αλυσίδα. Η αλυσίδα δημιουργείται εκ των προτέρων, προτού αρχίσει η μετάδοση των δεδομένων και δημιουργείται ξανά όταν οι κόμβοι τερματιστούν. Σε κάθε κόμβο, η συγχώνευση ή η συγκέντρωση δεδομένων εκτελείται έτσι ώστε μόνο ένα μήνυμα να περνά από τον ένα κόμβο στον επόμενο. Ένας

κόμβος ο οποίος επιλέγεται να είναι ο ηγέτης μεταδίδει τελικά ένα μήνυμα στον BS. Η ηγεσία μετατίθεται κατά διαδοχική σειρά και μία σκυτάλη μεταβιβάζεται έτσι ώστε οι κόμβοι να ξέρουν προς ποια κατεύθυνση να προωθήσουν τα μηνύματά τους έτσι ώστε αυτά να φτάσουν στον ηγέτη. Ένας πιθανός σχηματισμός αλυσίδας απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα. Η καθυστέρηση η οποία υπεισέρχεται στα μηνύματα τα οποία φτάνουν στον BS είναι O(N), όπου N είναι ο συνολικός αριθμός των κόμβων του δικτύου.

Δυαδική μέθοδος

Αυτή είναι μία ακόμη μέθοδος η οποία βασίζεται σε αλυσίδα όπως το PEGASIS και η οποία ταξινομεί τους κόμβους σε διαφορετικά επίπεδα. Όλοι οι κόμβοι οι οποίοι λαμβάνουν μηνύματα σε ένα επίπεδο ανέρχονται στο επόμενο. Ο αριθμός των κόμβων διαιρείται στα δύο από το ένα επίπεδο στο επόμενο. Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε ένα δίκτυο με 8 κόμβους με ετικέτες s0 μέχρι s7. Όπως δείχνει η παρακάτω εικόνα, τα συγκεντρωμένα δεδομένα φτάνουν στον BS σε τέσσερα βήματα, το οποίο είναι $O(\log_2 N)$, όπου N είναι ο αριθμός των κόμβων στο δίκτυο. Αυτή η μέθοδος είναι πιθανή όταν οι κόμβοι επικοινωνούν χρησιμοποιώντας το CDMA, έτσι ώστε οι μεταδόσεις σε κάθε επίπεδο να μπορούν να γίνονται ταυτόχρονα.

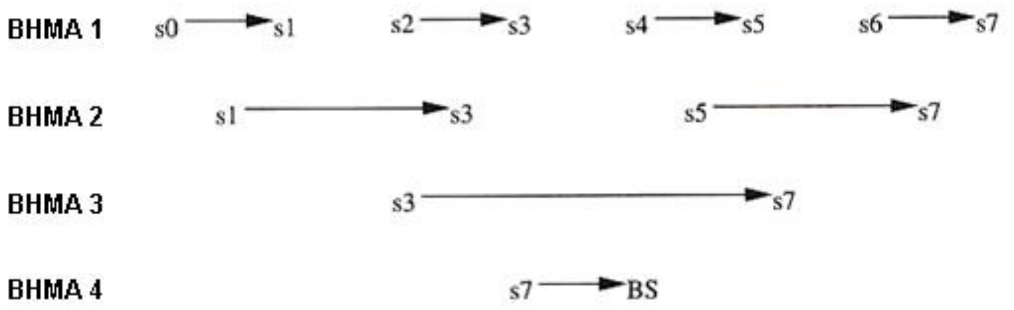


Συγκέντρωση δεδομένων με το PEGASIS

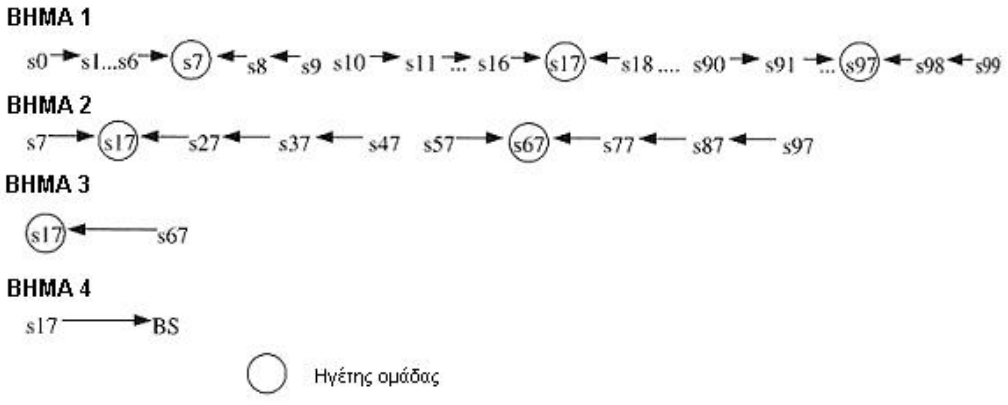
Μέθοδος τριών επιπέδων που βασίζεται σε αλυσίδα

Για κόμβους αισθητήρες που δεν χρησιμοποιούν το CDMA, δεν μπορεί να εφαρμοστεί μία δυαδική μέθοδος. Η μέθοδος τριών επιπέδων που βασίζεται σε αλυσίδα μπορεί να αντιμετωπίσει αυτή την κατάσταση, όπου και πάλι δημιουργείται μία αλυσίδα όπως στο PEGASIS. Η αλυσίδα χωρίζεται σε ένα αριθμό ομάδων έτσι ώστε να λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονες μεταδόσεις και να ελαχιστοποιηθεί η

παρεμβολή. Μέσα σε μία ομάδα, οι κόμβοι μεταδίδουν ένας κάθε φορά. Ένας κόμβος από κάθε ομάδα συγκεντρώνει τα δεδομένα από όλα τα μέλη της ομάδας και ανέρχεται στο επόμενο επίπεδο. Ο δείκτης (index) αυτού του κόμβου ηγέτη αποφασίζεται εκ των προτέρων. Στο δεύτερο επίπεδο, όλοι οι κόμβοι χωρίζονται σε δύο ομάδες, ενώ το τρίτο επίπεδο αποτελείται από ανταλλαγές μηνυμάτων ανάμεσα σε ένα κόμβο από κάθε ομάδα του δευτέρου επιπέδου. Τελικά, ο ηγέτης μεταδίδει ένα και μόνο μήνυμα στον BS. Η λειτουργία αυτής της μεθόδου απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα. Το δίκτυο έχει 100 κόμβους, ενώ το μέγεθος της ομάδας είναι δέκα για το πρώτο επίπεδο και πέντε για το δεύτερο επίπεδο. Με την βοήθεια εξομοιώσεων έχουν βρεθεί τρία επίπεδα έτσι ώστε να έχουμε το βέλτιστο γινόμενο ενέργεια × καθυστέρηση.



Δυαδική μέθοδος



Μέθοδος τριών επιπέδων το οποίο βασίζεται σε αλυσίδα

ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ MAC ΓΙΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Τα πρωτόκολλα MAC στα δίκτυα αισθητήρων θα πρέπει να δημιουργούν μια δικτυακή υποδομή έτσι ώστε να δημιουργούνται ζεύξεις επικοινωνίας ανάμεσα στους χιλιάδες τυχαία διασκορπισμένους αισθητήρες. Θα πρέπει επίσης να εξασφαλίζει δίκαιο και αποδοτικό μοίρασμα των πόρων επικοινωνίας ανάμεσα στους κόμβους, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου. Οι προκλήσεις που τίθενται από τα πρωτόκολλα MAC για τα δίκτυα αισθητήρων τα κάνουν να ξεχωρίζουν από τα άλλα ασύρματα δίκτυα. Αντίθετα με τα κυτταρικά δίκτυα που βασίζονται σε υποδομή, στα δίκτυα αισθητήρων δεν υπάρχει μία και μοναδική εξουσία ελέγχου και έτσι γίνεται δύσκολος ο ολικός (global) συγχρονισμός. Στα δίκτυα αισθητήρων, ο βαθμός απόδοσης της ενέργειας είναι υψίστου ενδιαφέροντος. Επίσης αντιμετωπίζουν συχνές αλλαγές στην τοπολογία εξαιτίας της κινητικότητας και των βλαβών. Αυτοί οι παράγοντες δίνουν έμφαση στην ανάγκη για MAC πρωτόκολλα τα οποία θα ειδικεύονται σε δίκτυα αισθητήρων.

Υπάρχουν τρία βασικά είδη MAC πρωτοκόλλων τα οποία χρησιμοποιούνται στα δίκτυα αισθητήρων: πρωτόκολλα σταθερής ανάθεσης (fixed-allocation), πρωτόκολλα που βασίζονται σε απαιτήσεις (demand-based) και πρωτόκολλα που βασίζονται στον ανταγωνισμό (contention-based). Τα MAC πρωτόκολλα σταθερής ανάθεσης μοιράζονται το κοινό μέσο μέσω μιας προκαθορισμένης ανάθεσης. Είναι κατάλληλα για δίκτυα αισθητήρων τα οποία ελέγχουν συνεχώς και παράγουν ντετερμινιστική κίνηση δεδομένων, καθώς όλοι οι κόμβοι οι οποίοι μοιράζονται το κανάλι μπορούν να κάνουν χρήση της δικής τους σχισμής σε κάθε γύρο. Τα πρωτόκολλα σταθερής ανάθεσης παρέχουν μία περιορισμένη καθυστέρηση για κάθε κόμβο. Ωστόσο, στην περίπτωση της καταιγιστικής (bursty) κίνησης, όπου οι απαιτήσεις καναλιού για κάθε κόμβο μπορεί να αλλάζουν χρονικά, μία σταθερή ανάθεση μπορεί να οδηγήσει σε μη αποδοτική χρήση του καναλιού. Τα πρωτόκολλα τα οποία βασίζονται σε απαιτήσεις χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου το κανάλι ανατίθεται σύμφωνα με απαίτηση του κόμβου. Αν και απαιτείται επιπρόσθετο overhead για την διαδικασία κράτησης, με τη χρήση MAC πρωτοκόλλων τα οποία βασίζονται σε απαιτήσεις μπορεί να μεταδοθεί αποδοτικά μεταβλητός ρυθμός κίνησης. Τελικά, τα πρωτόκολλα MAC τα οποία βασίζονται σε ανταγωνισμό, περιλαμβάνουν ανταγωνισμό για το κανάλι που βασίζεται στην τυχαία πρόσβαση όταν απαιτείται η μετάδοση πακέτων. Είναι και πάλι κατάλληλα για καταιγιστική κίνηση (bursty traffic), αλλά υπάρχει μια πιθανότητα συγκρούσεων και δεν παρέχονται καμία εγγύηση όσον αφορά την καθυστέρηση. Έτσι, δεν είναι κατάλληλα για κίνηση ευαίσθητη στην καθυστέρηση ή πραγματικού χρόνου. Μερικά από τα περισσότερο δημοφιλή πρωτόκολλα MAC για τα δίκτυα αισθητήρων περιγράφονται σύντομα στην συνέχεια.

Αυτο-οργανούμενο MAC για δίκτυα αισθητήρων (SMACS – Self-organizing MAC for sensor networks) και Παρακολούθηση και Καταχώριση (EAR – Eavesdrop and Register)

Το SMACS και το EAR είναι δύο πρωτόκολλα τα οποία ασχολούνται με την τοποθέτηση αρχικών τιμών και την υποστήριξη της κινητικότητας αντίστοιχα. Το SMACS είναι ένα κατανεμημένο πρωτόκολλο για την αρχικοποίηση ενός δικτύου και για την οργάνωση του στρώματος ζεύξης. Σε αυτό το πρωτόκολλο, η ανακάλυψη γειτόνων και η ανάθεση του καναλιού γίνεται ταυτόχρονα κατά έναν εντελώς

κατανεμημένο τρόπο. Μία ζεύξη επικοινωνίας ανάμεσα σε δύο κόμβους αποτελείται από ένα ζεύγος χρονοθυρίδων, σε μία σταθερή συχνότητα, το οποίο επιλέγεται τυχαία κατά τον χρόνο της αποκατάστασης της ζεύξης. Μία τέτοια ανάθεση είναι πιθανή στα δίκτυα αισθητήρων χωρίς να υπάρξει παρεμβολή από τους γειτονικούς κόμβους επειδή το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι μεγαλύτερο από τον ρυθμό δεδομένων που απαιτείται για την μετάδοση ενός μηνύματος ανάμεσα σε δύο κόμβους. Αυτή η μέθοδος απαιτεί συγχρονισμό μόνο ανάμεσα στους γείτονες που επικοινωνούν, έτσι ώστε να καθορίσει ακριβώς τις σχισμές που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την επικοινωνία τους. Η ενέργεια διατηρείται κλείνοντας τον πομποδέκτη κατά την διάρκεια αδρανών σχισμών, και χρησιμοποιώντας ένα τυχαίο πρόγραμμα ξυπνήματος κατά την διάρκεια της φάσης που ξεκινά το δίκτυο.

Το πρωτόκολλο EAR έχει την δυνατότητα συνεχούς σύνδεσης των κόμβων κάτω από συνθήκες κίνησης ή στατικότητας. Το πρωτόκολλο αυτό χρησιμοποιεί συγκεκριμένους κινητούς κόμβους, πέρα από τους υπάρχοντες στατικούς κόμβους αισθητήρες, για να παρέχει υπηρεσίες και να διατηρεί τις συνδέσεις. Οι κινητοί κόμβοι κρυφακούν τα σήματα ελέγχου και διατηρούν πληροφορίες για τους γείτονες. Επίσης υποθέτουν ότι έχουν τον πλήρη έλεγχο στις συνδέσεις και μπορούν να τις διακόπτουν όταν αλλάζουν θέση. Έτσι η κινητικότητα γίνεται με διαφάνεια ως προς το SMACS, καθώς μεταχειρίζεται ανεξάρτητα από το EAR.

Υβριδικό TDMA/FDMA

Αυτή είναι μια κεντρικά ελεγχόμενη μέθοδος η οποία υποθέτει ότι οι κόμβοι επικοινωνούν απευθείας με έναν κοντινό BS. Μια καθαρή TDMA μέθοδος ελαχιστοποιεί τον χρόνο για τον οποίο ένας κόμβος θα πρέπει να διατηρείται ανοιχτός, όμως τα σχετικά κόστη για συγχρονισμό είναι πολύ υψηλά. Μία καθαρή FDMA μέθοδος μοιράζει το ελάχιστο απαιτούμενο εύρος ζώνης σε κάθε σύνδεση. Η υβριδική TDMA/FDMA μέθοδος χρησιμοποιεί ένα βέλτιστο αριθμό από κανάλια, ο οποίος δίνει την ελάχιστη συνολική κατανάλωση ενέργειας. Αυτό βρέθηκε ότι εξαρτάται από τον λόγο της κατανάλωσης ενέργειας του πομπού προς αυτή του δέκτη. Αν ο πομπός καταναλώνει περισσότερη ενέργεια, προτιμάται μία TDMA μέθοδος, καθώς μπορεί να σβήσει στις αδρανείς σχισμές έτσι ώστε να εξοικονομήσει ενέργεια. Αφετέρου, η μέθοδος FDMA προτιμάται όταν ο δέκτης καταναλώνει περισσότερη ενέργεια. Αυτό συμβαίνει επειδή στο FDMA ο δέκτης δεν χρειάζεται να ξοδεύει ενέργεια για συγχρονισμό, βρισκόμενος σε κατάσταση λήψης κατά την διάρκεια της ζώνης επαγρύπνησης ανάμεσα στις σχισμές, πράγμα το οποίο είναι απαραίτητο στην TDMA μέθοδο.

MAC πρωτόκολλα τα οποία βασίζονται στο CSMA

Οι παραδοσιακές μέθοδοι οι οποίες βασίζονται στο CSMA είναι περισσότερο κατάλληλες για στοχαστικά κατανεμημένες ροές κίνησης σημείου-προς-σημείο (point-to-point). Αφετέρου, τα δίκτυα αισθητήρων έχουν μεταβλητή αλλά περιοδική και συσχετισμένη κίνηση. Οι περίοδοι ανίχνευσης του

CSMA είναι σταθερές για αποδοτικότητα στην ενέργεια, ενώ ο αλγόριθμος back-off είναι τυχαίος για να αποφεύγονται οι επανειλημμένες συγκρούσεις. Για την διατήρηση της αμεροληψίας στο δίκτυο χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος δυαδικού εκθετικού back-off (binary exponential back-off). Επίσης χρησιμοποιείται ένας προσαρμοστικός έλεγχος του ρυθμού μετάδοσης (ARC – Adaptive rate control), ο οποίος εξισορροπεί την κίνηση που δημιουργείται στους κόμβους και την κίνηση που περνά μέσα από τις διαδρομές. Αυτό εξασφαλίζει ότι οι κόμβοι που βρίσκονται πιο κοντά στον BS δεν θα προτιμώνται σε σχέση με τους κόμβους οι οποίοι βρίσκονται πιο μακριά. Ο ARC χρησιμοποιεί γραμμική αύξηση και πολλαπλασιαστική μείωση της κίνησης που δημιουργείται σε ένα κόμβο. Η τιμωρία για την διακοπή της κίνησης που διέρχεται από μία διαδρομή είναι υψηλότερη, καθώς έχει ήδη επενδυθεί ενέργεια για να φτάσουν τα πακέτα μέχρι εκείνο τον κόμβο. Το ARC πραγματοποιεί αλλαγές φάσης, δηλαδή, μεθοδεύει την ακολουθία των χρόνων εκπομπής διαφορετικών ροών έτσι ώστε οι περιοδικές ροές να είναι λιγότερο πιθανό να συγκρουστούν κατ' επανάληψη. Έτσι, το πρωτόκολλα MAC τα οποία βασίζονται στο CSMA είναι πρωτόκολλα τα οποία βασίζονται στον ανταγωνισμό και σχεδιάζονται κυρίως για να αυξήσουν το βαθμό απόδοσης της ενέργειας και να διατηρούν την αμεροληψία.

ΑΝΑΚΑΛΥΨΗ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ

Η πληροφορία τοποθεσίας των αισθητήρων θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά την φάση της συγκέντρωσης των ανιχνευόμενων δεδομένων. Αυτό υπονοεί ότι κάθε κόμβος θα πρέπει να ξέρει την τοποθεσία του και να συσχετίζει την πληροφορία τοποθεσίας του με τα δεδομένα στα μηνύματα που στέλνει. Για την ανακάλυψη διαδρομής είναι απαραίτητος ένας χαμηλής ισχύος, φτηνός και λογικά ακριβής μηχανισμός. Ένα GPS (Global positioning system) δεν είναι πάντα εφικτό επειδή δεν μπορεί να προσεγγίσει τους κόμβους οι οποίοι βρίσκονται σε πυκνές φυλλωσιές ή μέσα σε κτίρια. Επίσης καταναλώνει υψηλή ισχύ και κάνει τους κόμβους αισθητήρες περισσότερο ογκώδεις. Στην συνέχεια περιγράφονται δύο μηχανισμοί ανακάλυψης τοποθεσίας.

Εντοπισμός εντός κτιρίων

Οι τεχνικές εντοπισμού εντός κτιρίων χρησιμοποιούν μία σταθερή υποδομή για να υπολογίσουν την τοποθεσία των κόμβων αισθητήρων. Στο πεδίο παρατήρησης τοποθετούνται σταθεροί κόμβοι σηματοδοσίας (beacon nodes), συνήθως εντός κτιρίων. Οι τυχαία κατανεμημένοι αισθητήρες λαμβάνουν σήματα από τους κόμβους σηματοδοσίας και μετρούν την ένταση του σήματος, την γωνία άφιξης και την χρονική διαφορά ανάμεσα στην άφιξη διαφορετικών σημάτων. Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις από πολλαπλούς beacons, οι κόμβοι υπολογίζουν την τοποθεσία τους. Μερικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούν απλές μεθόδους τριγωνομέτρησης (triangulation), ενώ άλλες απαιτούν την εκ των προτέρων δημιουργία μίας βάσης δεδομένων που θα περιέχει τις μετρήσεις σημάτων. Οι κόμβοι υπολογίζουν τις αποστάσεις ελέγχοντας την βάση δεδομένων αντί να εκτελούν υπολογισμούς.

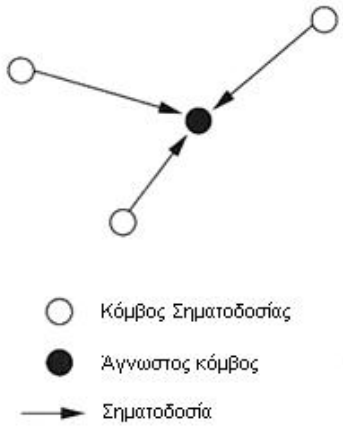
Ωστόσο, η αποθήκευση της βάσης δεδομένων μπορεί να μην είναι εφικτή σε κάθε κόμβο και έτσι μπορεί να την φέρει μόνο ο BS.

Εντοπισμός του δικτύου αισθητήρων

Σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει καθόλου σταθερή υποδομή διαθέσιμη και δεν είναι δυνατές προηγούμενες μετρήσεις, μερικοί από τους κόμβους αισθητήρες δρουν μόνοι τους ως beacons. Έχουν την δική τους πληροφορία τοποθεσίας, χρησιμοποιώντας ένα GPS και στέλνουν αυτοί περιοδικά beacons σε άλλους κόμβους. Στην περίπτωση επικοινωνίας με χρήση RF σημάτων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ένδειξη της λαμβανόμενης έντασης του σήματος RSSI (received signal strength indicator) για να υπολογιστεί η απόσταση, ωστόσο αυτό είναι πολύ ευαίσθητο σε εμπόδια και περιβαλλοντικές συνθήκες. Εναλλακτικά, για τον υπολογισμό της τοποθεσίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί η χρονική διαφορά ανάμεσα στις αφίξεις των beacons από διαφορετικούς κόμβους, όταν χρησιμοποιούνται για επικοινωνία RF ή υπερηχητικά σήματα. Αυτό παρέχει ένα μικρότερο εύρος υπολογισμού απ' ότι το RSSI αλλά είναι μεγαλύτερης ακρίβειας. Οι αλγόριθμοι εντοπισμού απαιτούν τεχνικές για υπολογισμό της τοποθεσίας με βάση την τοποθεσία των κόμβων σηματοδοσίας (beacon nodes). Αυτές λέγονται τεχνικές multi-lateration (ML). Μερικές απλές ML τεχνικές περιγράφονται στην συνέχεια:

- Ατομική ML: Αν ένας κόμβος λάβει τρεις beacons, μπορεί να καθορίσει την θέση του μέσω ενός μηχανισμού παρόμοιου με το GPS. Αυτό απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.

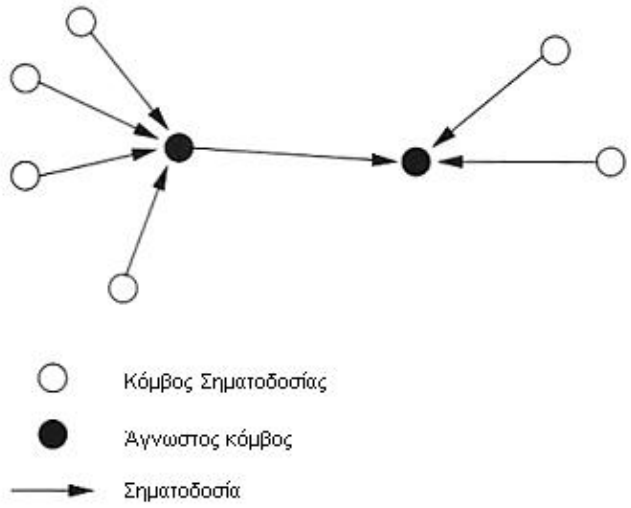
- Επαναληπτική ML: Μερικοί κόμβοι μπορεί να μην είναι στο άμεσο εύρος αυτών των τριών beacons. Όταν ένας κόμβος υπολογίσει την τοποθεσία του, στέλνει ένα beacon, το οποίο καθιστά ικανούς μερικούς άλλους κόμβος για να λάβουν τώρα τουλάχιστον τρεις beacons. Επαναληπτικά, όλοι οι κόμβοι του δικτύου μπορούν να υπολογίσουν την τοποθεσία τους. Αυτό φαίνεται στην επόμενη εικόνα . Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου πολλαπλών hop είναι ότι τα λάθη διαδίδονται, και έτσι ο υπολογισμός της τοποθεσίας μπορεί να μην είναι ακριβής.



Ατομική ML

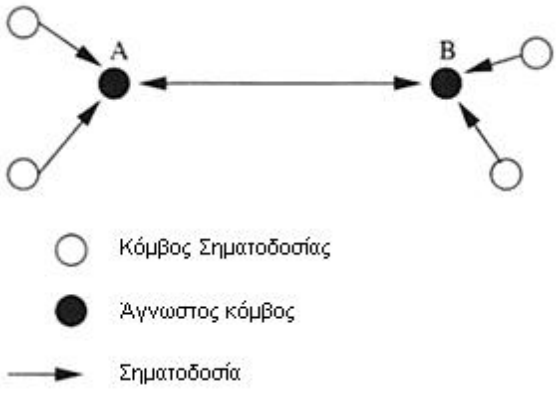
- Συνεργατική ML: Όταν δύο ή περισσότεροι κόμβοι δεν μπορούν να λάβουν τουλάχιστον τρεις beacons ο καθένας, συνεργάζονται μεταξύ τους. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, ο κόμβος Α και ο κόμβος Β έχουν τρεις γείτονες ο καθένας. Από τους έξι κόμβους που συμμετέχουν, οι τέσσερις είναι beacons, τον οποίων οι θέσεις είναι γνωστές. Έτσι, λύνοντας ένα σύνολο από ταυτόχρονες δευτεροβάθμιες εξισώσεις, μπορούν να καθοριστούν οι θέσεις των Α και Β.

Για το πρόβλημα αυτό έχει εξερευνηθεί μία προσέγγιση εντοπισμού η οποία βασίζεται στην κατευθυντικότητα. Αυτή υποθέτει ότι οι κόμβοι σηματοδοσίας (beacon nodes) έχουν δυνατότητα εκπομπής τέτοια ώστε να φτάνουν όλους τους κόμβους του δικτύου, ενώ ένας κεντρικός ελεγκτής περιστρέφει τους beacons με μία συνεχή γωνιακή ταχύτητα ω radiants/s. Ανάμεσα στους κόμβους αισθητήρες διατηρείται ένας σταθερός γωνιακός διαχωρισμός. Οι κόμβοι του δικτύου μετρούν τις γωνίες άφιξης των σημάτων των beacons για να υπολογίσουν την τοποθεσία τους. Τα λάθη σε αυτή την τεχνική συμβαίνουν λόγω του μη μηδενικού εύρους εκπομπής της ακτίνας του σήματος από τους beacons. Η ακτίνα εκπομπής δεν είναι μια ευθεία γραμμή όπως υποτίθεται θεωρητικά, αλλά έχει ένα πεπερασμένο εύρος. Έτσι, η μέτρηση της γωνίας του σήματος του beacon θα είναι ανακριβής.



Επαναληπτική ML

Έχει προταθεί ένας αλγόριθμος ο οποίος εξάγει την τοποθεσία των κόμβων αισθητήρων βασιζόμενος κυρίως στην πληροφορία για τις συνδέσεις ανάμεσα στους κόμβους. Στον γράφο του δικτύου τρέχει ο αλγόριθμος των συντομότερων μονοπατιών για όλα τα ζευγάρια (all-pairs shortest path algorithm) που έχει ακμές που δείχνουν τις συνδέσεις ανάμεσα στους κόμβους. Με αυτό τον τρόπο αποκτάται η συντομότερη απόσταση ανάμεσα σε κάθε ζεύγος κόμβων. Για την ανάθεση τοποθεσιών στους κόμβους έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί στην απόσταση, χρησιμοποιείται μια μαθηματική τεχνική η οποία λέγεται πολυδιάστατη κλιμάκωση MDS (multi-dimensional scaling), ένας $O(n^3)$ αλγόριθμος (όπου n είναι ο αριθμός των αισθητήρων). Η εικόνα που παίρνεται από το δίκτυο μπορεί να είναι μία περιστραμμένη ή ανεστραμμένη εκδοχή του πραγματικού δικτύου. Αν οι πραγματικές θέσεις οποιονδήποτε τριών κόμβων του δικτύου είναι γνωστές, τότε μπορεί να κανονικοποιηθεί (να περιστραφεί ή να αναστραφεί) ολόκληρο το δίκτυο έτσι ώστε να αποκτηθεί ένας αρκετά ακριβής εντοπισμός όλων των άλλων κόμβων.



Συνεργατική ML

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΝΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Ο σκοπός ενός δικτύου αισθητήρων είναι να ανιχνεύσει και να αναφέρει γεγονότα ή φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα σε μία συγκεκριμένη περιοχή. Έτσι, οι κύριες παράμετροι που καθορίζουν πόσο καλά το δίκτυο παρατηρεί μία δεδομένη περιοχή είναι η “κάλυψη” και η “έκθεση”. Σε αυτή την ενότητα, θα οριστούν με μεθοδικό τρόπο τα προβλήματα της κάλυψης και της έκθεσης και θα περιγράφουν μερικές μαθηματικές τεχνικές για την επίλυσή τους.

Κάλυψη

Η κάλυψη είναι ένα μέτρο για το πόσο καλά ένα δίκτυο μπορεί να παρατηρήσει ή να καλύψει ένα γεγονός. Η κάλυψη εξαρτάται από το εύρος και την ευαισθησία των κόμβων ανίχνευσης καθώς και την τοποθεσία και την πυκνότητα τους στην δεδομένη περιοχή. Η χειρότερη περίπτωση κάλυψης ορίζει περιοχές ρήξης, δηλαδή, περιοχές όπου η κάλυψη είναι πιο αδύναμη. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστεί αν απαιτείται να τεθούν σε λειτουργία επιπρόσθετοι αισθητήρες έτσι ώστε να βελτιωθεί το δίκτυο. Η καλύτερη περίπτωση κάλυψης, αφετέρου, καθορίζει της περιοχές όπου η κάλυψη είναι καλύτερη. Ένα μονοπάτι κατά μήκος των περιοχών με την καλύτερη κάλυψη λέγεται μονοπάτι μέγιστης υποστήριξης (maximum support path) ή μονοπάτι μέγιστης έκθεσης (maximum exposure path).

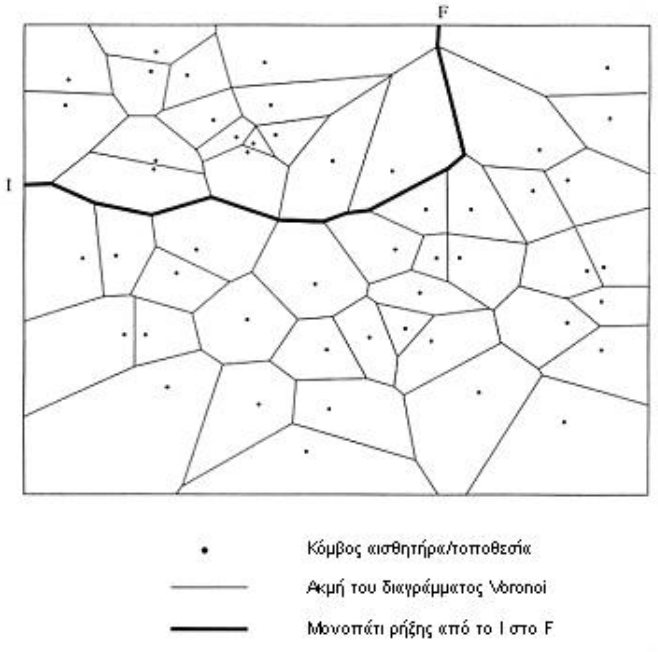
Το πρόβλημα της κάλυψης τυπικά ορίζεται ως εξής: Δεδομένου ενός πεδίου A με ένα σύνολο αισθητήρων $S = \{s_1, s_2,..., s_n\}$, όπου για κάθε αισθητήρα s_i του S οι συντεταγμένες της θέσης του (x_i, y_i) είναι γνωστές με βάση τεχνικές εντοπισμού. Οι περιοχές I και F είναι οι αρχικές και οι τελικές θέσεις ενός εισβολέα που διασχίζει το πεδίο. Το πρόβλημα είναι να αναγνωριστεί το P_B, το μέγιστο μονοπάτι ρήξης το οποίο αρχίζει στο I και τελειώνει στο F. Το P_B ορίζεται ως ο γεωμετρικός τόπος των σημείων

p στην περιοχή A, όπου το p είναι στο P_B αν η απόσταση από τον p στον κοντινότερο αισθητήρα γίνει μέγιστη.

Μια μαθηματική τεχνική για να λυθεί το πρόβλημα της κάλυψης είναι το διάγραμμα Voronoi. Μπορεί να αποδειχθεί ότι το μονοπάτι P_B θα αποτελείται από τμήματα γραμμής τα οποία ανήκουν στο διάγραμμα Voronoi που αντιστοιχεί στον γράφο του αισθητήρα. Σε δύο διαστάσεις, το διάγραμμα Voronoi ενός συνόλου τοποθεσιών είναι ένας διαμερισμός του επιπέδου σε ένα σύνολο από κυρτά πολύγωνα, τέτοια ώστε, όλα τα σημεία εντός του πολυγώνου να είναι πιο κοντά στην περιοχή που εσωκλείεται από το πολύγωνο, ενώ όλα τα πολύγωνα να έχουν ακμές που να ισαπέχουν από τις γειτονικές περιοχές. Ένα διάγραμμα Voronoi για ένα δίκτυο αισθητήρων και ένα μονοπάτι ρήξης (breach path) από το I στο F, δείχνεται στην παρακάτω εικόνα.

Ο αλγόριθμος για την εύρεση του μονοπατιού ρήξης (breach path) P_B είναι ο εξής:

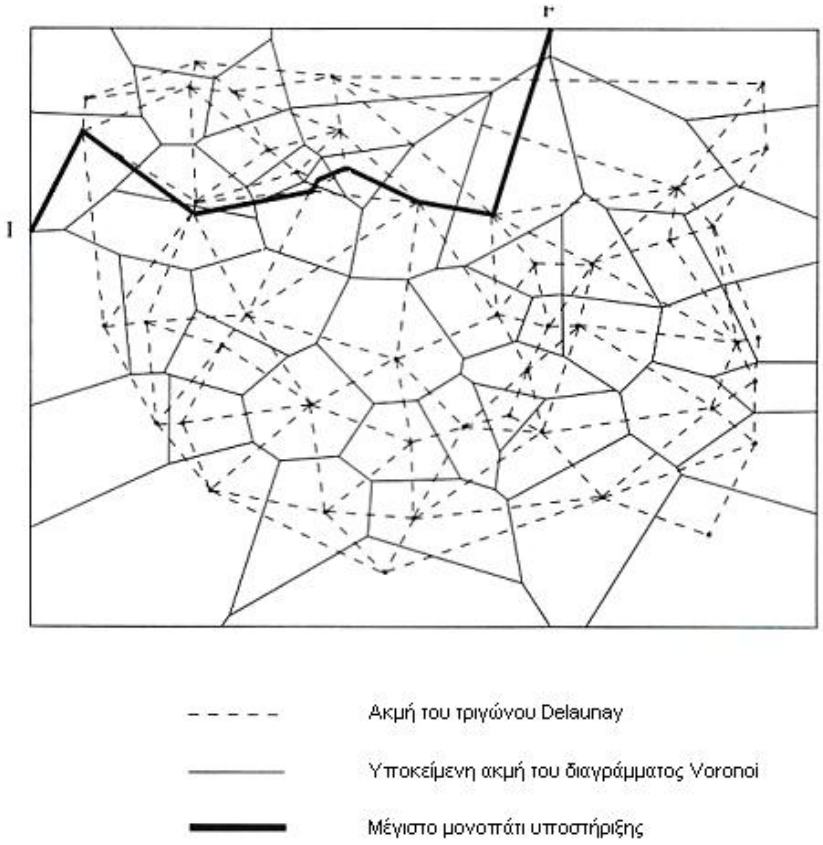
- Δημιούργησε το διάγραμμα Voronoi, με το σύνολο των κατακόρυφων V και το σύνολο των ακμών E. Αυτό γίνεται σχεδιάζοντας τις κατακόρυφες διχοτόμους από κάθε τμήμα της γραμμής που συνδέει δύο τοποθεσίες, ενώ χρησιμοποιεί τα σημεία τομής τους ως τις καθέτους των κυρτών πολυγώνων.
- Δημιούργησε ένα σταθμισμένο γράφο (weighted graph) με καθέτους από το V και ακμές από το E, τέτοιο ώστε το βάρος της κάθε ακμής του γράφου να είναι η ελάχιστη απόσταση από όλους τους αισθητήρες του S. Τα βάρη των ακμών αναπαριστούν την απόσταση από τον κοντινότερο αισθητήρα. Μικρότερα βάρη ακμών υπονοούν καλύτερη κάλυψη κατά μήκος της ακμής.
- Καθόρισε το μονοπάτι μέγιστου κόστους από τον I στον F, χρησιμοποιώντας ανίχνευση πρώτα του πλάτους (breadth-first search).



Διάγραμμα Voronoi

Το μέγιστο κόστος συνεπάγεται την ελάχιστη κάλυψη. Έτσι, το απαιτούμενο μονοπάτι ρήξης (breach path) βρίσκεται κατά μήκος αυτού του μονοπατιού μέγιστου κόστους, το οποίο καθορίζεται από το διάγραμμα Voronoi. Το μονοπάτι ρήξης (breach path) δείχνει την περιοχή που είναι περισσότερο ευάλωτη σε ένα δίκτυο αισθητήρων, όπου η κάλυψη που παρέχεται από τους αισθητήρες είναι η πιο αδύναμη.

Ένα σχετικό πρόβλημα είναι αυτό της εύρεσης της καλύτερης περίπτωσης κάλυψης. Το πρόβλημα τυπικά είναι η εύρεση του μονοπατιού που προσφέρει την μέγιστη κάλυψη, δηλαδή, το μονοπάτι μέγιστης υποστήριξης P_S στο S, από το I στο F. Η λύση βρίσκεται από μία μαθηματική τεχνική η οποία λέγεται Delaunay τριγωνομέτρηση (triangulation) και φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Αυτό βγαίνει από το διάγραμμα Voronoi συνδέοντας τις περιοχές των οποίων τα πολύγωνα έχουν μία κοινή ακμή. Το καλύτερο μονοπάτι P_S θα είναι ένα σύνολο από τμήματα γραμμών της τριγωνομέτρησης Delaunay, οι οποίες συνδέουν μερικούς από τους κόμβους αισθητήρες. Ο αλγόριθμος είναι και πάλι παρόμοιος με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση του μέγιστου μονοπατιού ρήξης, αντικαθιστώντας το διάγραμμα Voronoi από την τριγωνομέτρηση Delaunay και ορίζοντας τα κόστη των ακμών ανάλογα με τα μήκη των τμημάτων των γραμμών. Έτσι, το μέγιστο μονοπάτι υποστήριξης (maximum support path) σχηματίζεται από ένα σύνολο τμημάτων γραμμών που συνδέουν μερικούς από τους κόμβους αισθητήρες.



Delaunay τριγωνομέτρηση (triangulation)

Έκθεση

Η έκθεση ορίζεται ως η αναμενόμενη δυνατότητα παρακολούθησης ενός στόχου στο πεδίο του αισθητήρα. Τυπικά ορίζεται ως το ολοκλήρωμα της συνάρτησης αίσθησης σε ένα μονοπάτι από τον κόμβο πηγή P_s μέχρι τον κόμβο προορισμού P_d. Η ισχύς ανίχνευσης ενός κόμβου s στο σημείο p μοντελοποιείται συνήθως ως

$$S(s,p) = \frac{\lambda}{[d(s,p)]^k}$$

όπου λ και k είναι σταθερές και d(s, p) είναι η απόσταση από τον p στον s. Ας θεωρήσουμε ένα δίκτυο με αισθητήρες $s_1,s_2,...,s_n$. Η ολική ένταση στο σημείο p, λέγεται ένταση του πεδίου όλων των αισθητήρων (all-sensor field intensity) και δίνεται από την σχέση:

$$I_A(F,p) = \sum_{i=1}^{n} S(s_i,p)$$

Η ένταση του πεδίου του κοντινότερου αισθητήρα στο σημείο p είναι:

$$I_C(F, p) = S(s_{\min}, p)$$

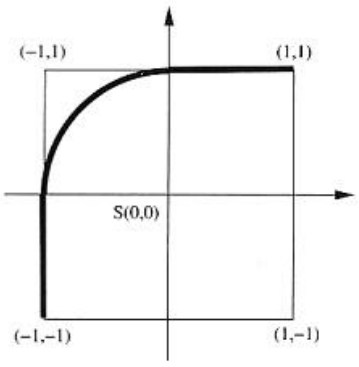
όπου s_{min} είναι ο κοντινότερος αισθητήρας στο p. Η έκθεση κατά την διαδρομή ενός γεγονότος κατά μήκος του μονοπατιού p(t) ορίζεται από την συνάρτηση έκθεσης:

$$E[p(t), t_1, t_2] = \int_{t_1}^{t_2} I_{AorC}(F, p(t)) \left| \frac{dp(t)}{dt} \right| dt$$

όπου $\frac{dp(t)}{dt}$ είναι το στοιχειώδες μήκος τόξου, και t_1, t_2 είναι τα χρονικά στιγμιότυπα ανάμεσα στα οποία διασχίζεται το μονοπάτι. Για την μετατροπή από τις Καρτεσιανές συντεταγμένες (x(t),y(t)),

$$\frac{dp(t)}{dt} = \sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt}\right)^2}$$

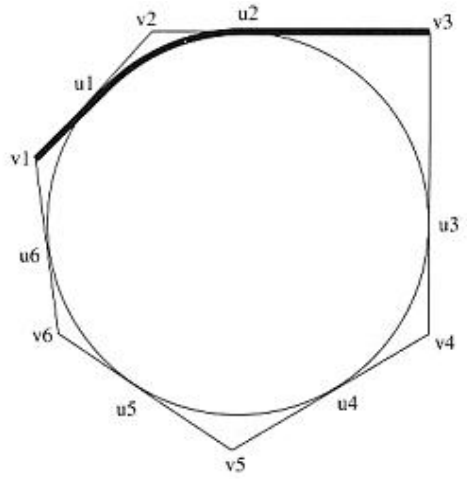
Στην απλούστερη περίπτωση που έχουμε έναν κόμβο αισθητήρα στο σημείο (0,0) σε ένα μοναδιαίο πεδίο, το μονοπάτι ρήξης ή το μονοπάτι ελάχιστης έκθεσης (MEP – minimum exposure path) από το (-1,-1) στο (1,1) δείχνεται στην παρακάτω εικόνα.



Μοναδιαίου πεδίου μονοπάτι ελάχιστης έκθεσης

Μπορεί επίσης να αποδειχθεί ότι για ένα και μόνο αισθητήρα s σε ένα πολυγωνικό πεδίο, με καθέτους $υ_1,υ_2,...,υ_n$ το MEP ανάμεσα σε δύο καθέτους $υ_i$ και $υ_j$ μπορεί να καθοριστεί ως ακολούθως. Η ακμή ($υ_i$, $υ_{i+1}$) είναι εφαπτόμενη στον εγγεγραμμένο κύκλο στο u_i. Τότε το MEP αποτελείται από το τμήμα της γραμμής από το $υ_i$, στο u_i, μέρος του εγγεγραμμένου κύκλου από το u_i στο u_j και το τμήμα της γραμμής από το u_j στο $υ_j$. Αυτό φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

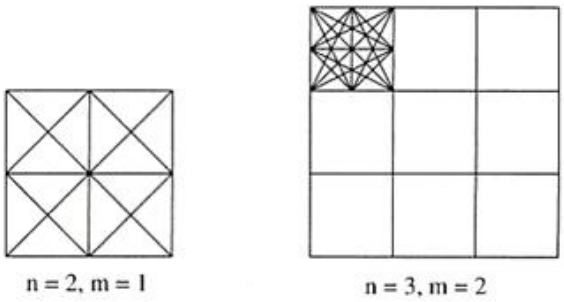
Το πρόβλημα της έκθεσης ακόμα δεν έχει λυθεί για δύο σημεία που βρίσκονται στην ίδια γωνία, ή για σημεία εντός του εγγεγραμμένου κύκλου. Για το πιο γενικό πρόβλημα έκθεσης, που είναι ο καθορισμός του MEP για τυχαία τοποθετημένους στο δίκτυο κόμβους αισθητήρες, στο δίκτυο τοποθετούνται σημεία πλέγματος. Ένα παράδειγμα δείχνεται στην αμέσως επόμενη εικόνα. Για την κατασκευή ενός n×n πλέγματος τάξης m, κάθε πλευρά ενός τετραγώνου διαιρείται σε m ίσα μέρη, δημιουργώντας (m+1) καθέτους πάνω στην ακμή. Εντός κάθε τετραγώνου, όλοι οι κάθετοι συνδέονται για τον σχηματισμό ενός πλέγματος. Τα πλέγματα υψηλότερης τάξης έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια. Για κάθε ακμή στο δίκτυο πλέγματος, για να καθοριστούν τα βάρη των ακμών χρησιμοποιείται η συνάρτηση έκθεσης, ενώ το MEP ορίζεται ως το συντομότερο μονοπάτι το οποίο καθορίζεται από τον αλγόριθμο του Dijkstra.



Πολυγωνικού πεδίου μονοπάτι ελάχιστης έκθεσης

Η μαθηματική έννοια της έκθεσης είναι σημαντικός παράγοντας για τον υπολογισμό της δυνατότητας ανίχνευσης ενός στόχου σε ένα δίκτυο αισθητήρων. Οι αισθητήρες τοποθετούνται σε μία δεδομένη περιοχή για να ανιχνεύουν γεγονότα τα οποία συμβαίνουν στο πεδίο ενδιαφέροντος. Οι κόμβοι συνεργάζονται μεταξύ τους (κάνουν συγχώνευση δεδομένων) μέσω της ανταλλαγής τοπικής πληροφορίας και αποφασίζουν για την τοποθεσία και την κίνηση ενός δεδομένου γεγονότος ή στόχου. Οι Clouqueur et al. αναλύουν ένα πιθανοτικό πρωτόκολλο για ανίχνευση στόχου, όπου οι παρατηρήσεις που γίνονται από ξεχωριστούς αισθητήρες συνεργάζονται και η παρουσία ή η κίνηση ενός στόχου καθορίζεται πιθανοτικά μέσω της συγχώνευσης δεδομένων, επιτρέποντας την ύπαρξη

θορύβου κατά την καταγραφή των δεδομένων. Η τοπολογία του δικτύου η οποία δίνει την μέγιστη έκθεση καθορίζεται επίσης αναλυτικά.



Γενικό μονοπάτι ελάχιστης έκθεσης

ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΟΥ ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΙ ΣΕ ΕΞΕΛΙΞΗ

Τα πρότυπα για τα δίκτυα αισθητήρων βρίσκονται σε αρχικά στάδια. Το πρότυπο IEEE 802.15.4 LR-WPANs (low-rate wireless personal area networks) διερευνά μια λύση χαμηλού ρυθμού δεδομένων με διάρκεια ζωής μπαταρίας από πολλούς μήνες έως και πολλά χρόνια και πολύ χαμηλή πολυπλοκότητα. Προορίζεται να λειτουργεί σε μία διεθνή ζώνη συχνοτήτων χωρίς άδεια. Πιθανές εφαρμογές αυτού του προτύπου περιλαμβάνουν τα δίκτυα αισθητήρων, τον οικιακό αυτοματισμό και τον απομακρυσμένο έλεγχο. Το δέκατο όγδοο προσχέδιο αυτού του προτύπου έγινε αποδεκτό τον Μάιο του 2003.

Το πρότυπο αυτό έχει σκοπό να καθορίσει τις προδιαγραφές του φυσικού και του MAC στρώματος για τα δίκτυα αισθητήρων ή για άλλα WPAN δίκτυα. Στόχος του προτύπου είναι η κατανάλωση ελάχιστης ενέργειας, το οποίο είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό. Αυτό απαιτεί μειωμένο ρυθμό μετάδοσης, ενεργειακά αποδοτικές τεχνικές διαμόρφωσης και αυστηρές τεχνικές διαχείρισης ενέργειας όπως είναι οι καταστάσεις ύπνου (sleep modes). Έχουν συγκριθεί διαφορετικές ρυθμίσεις και τοπολογίες και τα δίκτυα αστέρα (star) και πλέγματος (mesh) βρέθηκαν να έχουν τα περισσότερα πλεονεκτήματα. Το πρότυπο επίσης προτείνει μία γενική δομή πλαισίου του οποίου το μήκος θα μπορεί να αλλάζει ανάλογα με την εφαρμογή.

Άλλα πρότυπα τα οποία είναι υπό ανάπτυξη περιλαμβάνουν την έρευνα SensIT από το DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) το οποίο επικεντρώνεται σε μεγάλα κατανεμημένα στρατιωτικά συστήματα, καθώς και το ZigBee Alliance, το οποίο ασχολείται με βιομηχανικές εφαρμογές και εφαρμογές οχημάτων. Το πρότυπο IEEE 1451.5 για την έξυπνη διεπαφή ασύρματου

πομποδέκτη βρίσκεται ακόμη υπό αξιολόγηση. Προτείνεται να συμπεριλαμβάνει πολλαπλούς συνδυασμούς των στρωμάτων MAC και φυσικού, χρησιμοποιώντας ως μοντέλο την προσέγγιση IEEE 802.

ΑΛΛΑ ΘΕΜΑΤΑ

Αυτή η ενότητα ασχολείται με μερικά ακόμη θέματα των δικτύων αισθητήρων τα οποία βρίσκονται ακόμα υπό εξερεύνηση, όπως είναι το ενεργειακά αποδοτικό υλικό (hardware) και η αρχιτεκτονική, η επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο, τα πρωτόκολλα του στρώματος μεταφοράς και θέματα ασφάλειας. Επειδή όλα αυτά είναι κυρίως σε ερευνητικό στάδιο, υπάρχουν ακόμα πολλές βελτιώσεις για να γίνουν.

Ενεργειακά αποδοτικός σχεδιασμός

Όπως τονίστηκε σε ολόκληρο αυτό το κεφάλαιο, οι κόμβοι αισθητήρες έχουν ένα πολύ αυστηρό περιορισμό όσον αφορά την ενέργεια. Η ενεργειακή βελτιστοποίηση στα δίκτυα αισθητήρων θα πρέπει να επιμηκύνει την ζωή τόσο ενός και μόνο κόμβου όσο και ολόκληρου του δικτύου. Η επιλογή του επεξεργαστή στην μονάδα του μικρό-ελεγκτή θα πρέπει να γίνεται ανάλογα με την εφαρμογή, έτσι ώστε οι απαιτήσεις στις επιδόσεις να ταιριάζουν με την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Ο υπολογισμός μπορεί να εκτελείται κατά έναν τρόπο που να λαμβάνει υπόψιν του την ενέργεια χρησιμοποιώντας δυναμική διαχείριση ενέργειας (DPM – dynamic power management). Μία από τις βασικές τεχνικές DPM είναι η απενεργοποίηση διάφορων στοιχείων του κόμβου αισθητήρα όταν δεν συμβαίνουν γεγονότα. Ο επεξεργαστής έχει υπολογιστικό φορτίο το οποίο μεταβάλλεται ανάλογα με τον χρόνο και έτσι η τάση που παρέχεται σε αυτό μπορεί να αυξομειώνεται έτσι ώστε να αντιμετωπίζει μόνο τις στιγμιαίες απαιτήσεις για επεξεργασία. Αυτό λέγεται δυναμική αυξομείωση τάσης (DVS – dynamic voltage scaling).

Το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται για τα δίκτυα αισθητήρων όπως είναι το λειτουργικό σύστημα, το λογισμικό εφαρμογών και το λογισμικό δικτύου μπορούν επίσης να φτιαχτούν έτσι ώστε να λαμβάνουν υπόψιν τους την ενέργεια. Ο προγραμματιστής (scheduler) εργασιών πραγματικού χρόνου θα πρέπει να υποστηρίζει ενεργά το DVS προβλέποντας τα φορτία υπολογισμού και επικοινωνίας. Οι εφαρμογές αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα συγκερασμό ανάμεσα στην ενέργεια και την ακρίβεια, εκτελώντας πρώτα τις περισσότερο σημαντικές λειτουργίες, έτσι ώστε ο πρώιμος τερματισμός του υπολογισμού εξαιτίας των ενεργειακών περιορισμών να μην επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα.

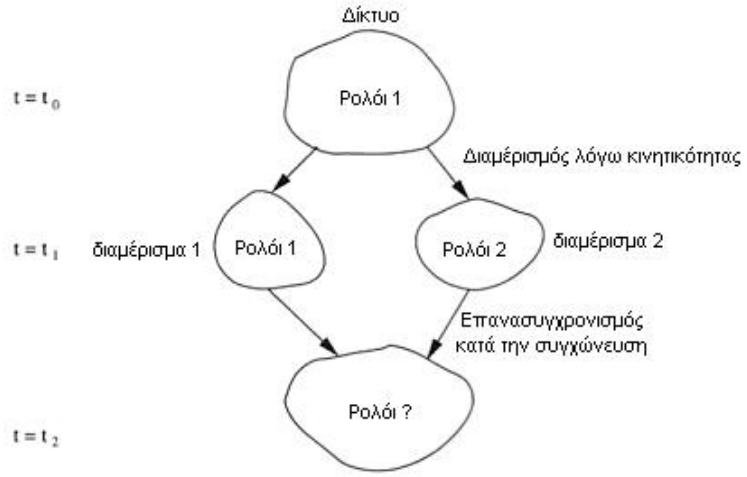
Το υποσύστημα επικοινωνίας θα πρέπει επίσης να διεξάγει προώθηση πακέτων λαμβάνοντας υπόψιν του την διαθέσιμη ενέργεια. Η χρήση έξυπνου υλικού (hardware) επικοινωνίας δίνει την δυνατότητα στα πακέτα να προωθούνται άμεσα από το υποσύστημα επικοινωνίας, χωρίς να απαιτείται επεξεργασία από τον μικροελεγκτή. Κατά την διαμόρφωση εφαρμόζονται τεχνικές παρόμοιες με την

DVS για την μετάδοση δεδομένων, χρησιμοποιώντας μία πιο απλή μέθοδο διαμόρφωσης, καταναλώνοντας έτσι λιγότερη ενέργεια όταν ο απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι χαμηλότερος. Αυτό λέγεται αυξομείωση διαμόρφωσης.

Εκτός από την ενσωμάτωση ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων στο επίπεδο κόμβου, θα πρέπει να υπάρχει συνεργασία ανάμεσα σε όλους τους κόμβους του δικτύου έτσι ώστε να εξοικονομείται ενέργεια και να αυξάνεται η συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου. Ο συγκερασμός ανάμεσα στην υπολογιστική ισχύ και την επικοινωνία καθορίζει πόση υπολογιστική ισχύ απαιτείται τοπικά σε κάθε κόμβο και ποιό επίπεδο συγκεντρωμένων δεδομένων θα πρέπει να μεταδίδεται στους γειτονικούς κόμβους ή στον BS. Οι αλγόριθμοι διανομής κίνησης και διαχείρισης τοπολογίας εκμεταλλεύονται την περίσσεια στον αριθμό των κόμβων αισθητήρων για να χρησιμοποιούν εναλλακτικές διαδρομές έτσι ώστε η κατανάλωση ενέργειας σε όλο το δίκτυο να είναι σχεδόν ομοιόμορφη.

Συγχρονισμός

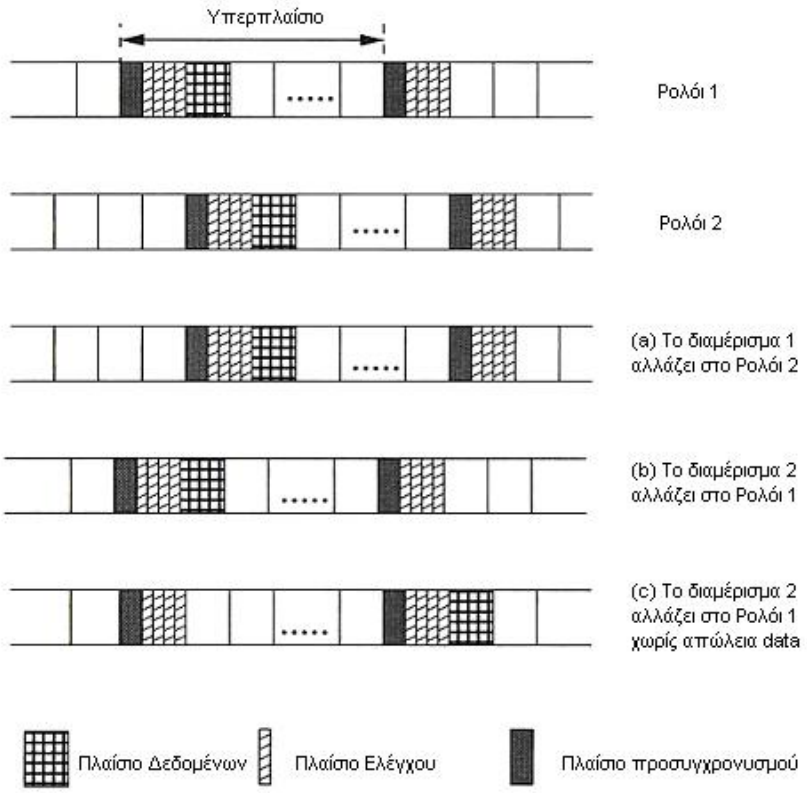
Ο συγχρονισμός ανάμεσα στους κόμβους είναι βασικός έτσι ώστε να υποστηρίζονται TDMA σχέδια για ασύρματα δίκτυα πολλαπλών hop. Επίσης, ο συγχρονισμός είναι χρήσιμος για τον καθορισμό της χρονικής τακτοποίησης των μηνυμάτων που στέλνονται από τους αισθητήρες καθώς και της γειτνίασης τους. Συνήθως, οι κόμβοι αισθητήρες τοποθετούνται μέσα στο περιβάλλον από το οποίο θα συλλεχθούν τα δεδομένα και οι ακριβείς τους θέσεις δεν είναι σταθερές πριν την τοποθέτηση και λειτουργία τους. Συνεπώς, ο συγχρονισμός είναι ο μόνος τρόπος με τον οποίο οι κόμβοι μπορούν να καθορίσουν τις σχετικές τους θέσεις. Επιπλέον, για να υποβάλουν τα συγκεντρωμένα δεδομένα στον κόμβο ελέγχου, οι αισθητήρες θα πρέπει να αναπτύξουν μία κοινή χρονική κλίμακα χρησιμοποιώντας τα συγχρονισμένα ρολόγια τους, έτσι ώστε να αποφανθούν για την ταχύτητα ενός κινούμενου στόχου ή φαινομένου. Οι αισθητήρες θα πρέπει να μπορούν να αναγνωρίζουν διπλότυπες αναφορές του ίδιου γεγονότος από διαφορετικούς κόμβους και να τις απορρίπτουν, πράγμα που σημαίνει ότι ο κόμβος θα πρέπει να είναι ικανός ώστε να καθορίζει επακριβώς την χρονική στιγμή κατά την οποία συνέβη το γεγονός. Υπάρχουν δύο κύρια είδη αλγορίθμων συγχρονισμού: ένα το οποίο επιτυγχάνει μεγάλης διάρκειας γενικό (global) συγχρονισμό, δηλαδή, που διαρκεί για όλη την διάρκεια ζωής ολόκληρου του δικτύου και έναν ο οποίος επιτυγχάνει ένα μικρής διάρκειας ή παλμικό συγχρονισμό κατά τον οποίον οι κόμβοι συγχρονίζονται μόνο για μία στιγμή.



Επανασυγχρονισμός

Τα πρωτόκολλα συγχρονισμού συνήθως περιλαμβάνουν μετρήσεις για την καθυστέρηση των πακέτων ελέγχου. Οι καθυστερήσεις που αντιμετωπίζονται κατά την μετάδοση ενός πακέτου μπορούν να χωριστούν σε τέσσερα κύρια συστατικά στοιχεία: τον χρόνο αποστολής, τον χρόνο πρόσβασης, τον χρόνο διάδοσης και τον χρόνο παραλαβής. Ο χρόνος αποστολής είναι ο χρόνος που χρειάζεται ο αποστολέας για να δημιουργήσει ένα μήνυμα. Ο χρόνος πρόσβασης είναι ο χρόνος που χρειάζεται το στρώμα MAC για να έχει πρόσβαση στο μέσο, ο οποίος είναι σημαντικός σε ένα MAC πρωτόκολλο που βασίζεται στον ανταγωνισμό (contention-based). Ο χρόνος διάδοσης αναπαριστά τον χρόνο που χρειάζονται τα bits για να μεταδοθούν φυσικά από το μέσο μετάδοσης κατά την απόσταση που χωρίζει τον αποστολέα από τον παραλήπτη. Ο χρόνος λήψης είναι ο χρόνος για επεξεργασία που απαιτείται στην διεπαφή δικτύου του παραλήπτη, για να λάβει το μήνυμα από το κανάλι και να ειδοποιήσει τον host για την άφιξή του. Αν ο χρόνος άφιξης έχει χρονική σφραγίδα (time-stamp) από ένα κατώτερο επίπεδο, αποφεύγονται τα overheads από τους σχετικούς διακόπτες και οι κλήσεις συστήματος (system calls), ενώ η χρονική σφραγίδα (time-stamp) αντανακλά πιο προσεκτικά τον πραγματικό χρόνο άφιξης και το μοναδικό μη ντετερμινιστικό στοιχείο που εισάγεται οφείλεται στην υποδοχή του πρώτου bit.

Πολλοί υπάρχοντες αλγόριθμοι συγχρονισμού για τα δίκτυα αισθητήρων βασίζονται στην χρονική πληροφορία που αποκτάται μέσω του GPS για να παρέχουν χονδρικό συγχρονισμό. Η ακρίβεια του συγχρονισμού που παρέχεται από το GPS εξαρτάται από τον αριθμό των δορυφόρων που παρακολουθεί ο δέκτης του GPS. Στην χειρότερη περίπτωση, με μόνο ένα παρακολουθούμενο δορυφόρο, το GPS προσφέρει μία ακρίβεια του 1 μs. Ωστόσο, το GPS δεν είναι μία κατάλληλη επιλογή για τα δίκτυα αισθητήρων επειδή οι GPS δέκτες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσα σε μεγάλα κτίρια και υπόγεια ή κάτω από το νερό ή σε άλλα περιβάλλοντα που δεν μπορούν να προσεγγίσουν οι δορυφόροι και στα οποία θα πρέπει να αναπτυχθούν δίκτυα αισθητήρων.



Μετακίνηση των πλαισίων κατά τον επανασυγχρονισμό

Για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων προτάθηκε από τους Elson και Estrin μία μέθοδος συγχρονισμού χαμηλής ενέργειας η οποία καλείται συγχρονισμός μετά το γεγονός (post facto). Σε αυτή την μέθοδο, τα ρολόγια των κόμβων αποσυγχρονίζονται κανονικά και όταν παρατηρείται κάποιο γεγονός, ένα κόμβος σηματοδοσίας (beacon node) εκπέμπει έναν παλμό συγχρονισμού με βάση τον οποίο όλοι οι κόμβοι κανονικοποιούν τις χρονικές σφραγίδες τους (time-stamps) για την παρατήρηση του γεγονότος. Η μέθοδος αυτή προσφέρει μικρής διάρκειας συγχρονισμό, δημιουργώντας μόνο ένα στιγμιότυπο συγχρονισμού ανάμεσα στους κόμβους οι οποίοι βρίσκονται εντός του εύρους μετάδοσης του κόμβου σηματοδοσίας (beacon node). Η καθυστέρηση διάδοσης του παλμού συγχρονισμού υποτίθεται ότι είναι ίδια σε όλους τους κόμβους.

Ο Yoram Ofek πρότεινε ένα πρωτόκολλο γενικού συγχρονισμού το οποίο βασίζεται στην ανταλλαγή σημάτων ελέγχου ανάμεσα σε γειτονικούς κόμβους. Ένας κόμβος γίνεται ηγέτης όταν εκλέγεται από την πλειοψηφία των κόμβων του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ένα πρωτόκολλο κατανεμημένης εκλογής το οποίο εξασφαλίζει την παρουσία ενός μοναδικού ηγέτη για το δίκτυο. Ο ηγέτης τότε, στέλνει περιοδικά μηνύματα συγχρονισμού στους γείτονές του, τα οποία εκπέμπονται εκ περιτροπής σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Τα όρια χρονικής διαφοράς (time-difference bounds) αναλύθηκαν θεωρητικά, ενώ προστέθηκαν τεχνικές ανοχής σε λάθη για να αντιμετωπιστούν τα λάθη στα μηνύματα συγχρονισμού.

Επιπλέον έχει προταθεί ένα πρωτόκολλο συγχρονισμού μεγάλης διάρκειας το οποίο εξασφαλίζει γενικό συγχρονισμό για ένα συνδεδεμένο δίκτυο, ή συγχρονισμό ανάμεσα σε συνδεδεμένα τμήματα ενός δικτύου. Κάθε κόμβος του δικτύου διατηρεί το δικό του τοπικό ρολόι (πραγματικό ρολόι) και ένα εικονικό ρολόι για να είναι συγχρονισμένος με το ρολόι του ηγέτη. Ένας μοναδικός ηγέτης εκλέγεται για κάθε διαμέρισμα του δικτύου, ενώ τα εικονικά ρολόγια ενημερώνονται για να ταιριάζουν με το πραγματικό ρολόι του ηγέτη. Η διαδικασία εκλογής του ηγέτη γίνεται με την μέθοδο που αναφέρεται στην συνέχεια. Κατά την εκκίνηση του δικτύου, κάθε κόμβος κάνει μια προσπάθεια είτε να εντοπίσει έναν ηγέτη στο διαμέρισμά του ή ισχυρίζεται ότι ο ίδιος είναι ηγέτης. Ένας κόμβος αποφασίζει, με μικρή πιθανότητα, να προβάλει αξιώσεις για την ηγεσία και ανακοινώνει την αξίωση του (claim) με ένα τυχαίο αριθμό που στέλνεται στο πακέτο διεκδίκησης (claim packet). Αυτό το πακέτο Ανακοίνωσης Ηγεσίας (Leader Announcement) περιέχει επίσης και την ισχύ μετάδοσης που χρησιμοποιείται από τον κόμβο. Ένας κόμβος που λαμβάνει αυτό τον ισχυρισμό (claim) διορθώνει την καθυστέρηση διάδοσης την οποία αντιμετωπίζει το πακέτο διεκδίκησης (η οποία υπολογίζεται με βάση την λαμβανόμενη ισχύ) και ενημερώνει το εικονικό του ρολόι στην αναμενόμενη τιμή του πραγματικού ρολογιού του ηγέτη στην δεδομένη χρονική στιγμή. Η τοποθέτηση χρονικής σφραγίδας στους ισχυρισμούς (claims) εκτελείται από το φυσικό επίπεδο, έτσι ώστε να αποφευχθούν οι μεταβλητές ουρές και οι καθυστερήσεις πρόσβασης στο μέσο που εισάγονται από το στρώμα MAC. Ο ισχυρισμός (claim) πλημμυρίζει όλο το διαμέρισμα (partition) ενώ περιορίζεται από ένα πεδίο TTL. Στην περίπτωση όπου δύο κόμβοι εντός ενός διαμερίσματος (partition) προβάλουν αξιώσεις ηγεσίας, αυτός του οποίου η Ανακοίνωση Ηγεσίας έχει μεγαλύτερο τυχαίο αριθμό συγχρονίζεται ξανά στον ηγέτη του οποίου η Ανακοίνωση Ηγεσίας έχει τον μικρότερο τυχαίο αριθμό και έπειτα εκπέμπει ξανά την Ανακοίνωση Ηγεσίας του κόμβου ο οποίος δημιούργησε τον μικρότερο τυχαίο αριθμό. Στην εξαιρετικά απίθανη περίπτωση όπου δύο ηγέτες δημιουργούν τον ίδιο τυχαίο αριθμό, για την επίλυση χρησιμοποιείται η ID του κόμβου. Η περιοδική σηματοδοσία εξασφαλίζει ότι ο συγχρονισμός διατηρείται σε ολόκληρο το διαμέρισμα, ενώ οι κόμβοι οι οποίοι θα συνδεθούν αργότερα θα συγχρονίζουν τα ρολόγια τους.

Ο επανασυγχρονισμός (resynchronization) είναι η διαδικασία του συγχρονισμού διάφορων διαμερισμάτων του δικτύου τα οποία συγχρονίζονται ξεχωριστά από διαφορετικά ρολόγια, με βάση ένα κοινό ρολόι. Στα δυναμικά δίκτυα όπως είναι τα δίκτυα αισθητήρων, οι συχνές αλλαγές στην τοπολογία, κάνουν τον επανασυγχρονισμό μία σημαντική διαδικασία. Ο επανασυγχρονισμός γίνεται σε καταστάσεις όπως είναι η συγχώνευση δύο διαμερισμάτων εξαιτίας της κινητικότητας, όπου όλα τα ρολόγια σε ένα διαμέρισμα θα πρέπει να ενημερωθούν για να ταιριάζουν με το ρολόι του ηγέτη του άλλου διαμερίσματος, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.

Η τυπική δομή ενός TDMA υπερ-πλαισίου (superframe) δείχνεται στην αμέσως επόμενη εικόνα. Τα πλαίσια προ-συγχρονισμού (presynch frames) ορίζουν την αρχή και το τέλος ενός υπερ-πλαισίου, τα πλαίσια ελέγχου μεταδίδουν πληροφορία ελέγχου και τα πλαίσια δεδομένων είναι TDMA χρονικές σχισμές οι οποίες ανατίθενται στους κόμβους που εμπλέκονται στην μεταφορά δεδομένων. Μια θετική μετατόπιση του επανασυγχρονισμού ορίζεται ως η μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων κατά

έναν απόλυτο χρόνο αργότερα από την σχισμή της παρούσας δομής του πλαισίου. Η αρνητική μετατόπιση ορίζεται ως η προώθηση της αρχής ενός υπερ-πλαισίου, έτσι ώστε τα πακέτα δεδομένων να μεταδίδονται νωρίτερα από την αρχή της μετάδοσης της παρούσας δομής του πλαισίου. Ο επανασυγχρονισμός διατηρεί την ανάθεση των σχισμών σε διαδρομές μέσω του κόμβου, αλλά μετατοπίζει την αρχή του υπερ-πλαισίου. Αν τα ρολόγια των κόμβων του διαμερίσματος 1 πρέπει να ενημερωθούν, το υπερ-πλαίσιο μπορεί να μετατοπιστεί χωρίς απώλεια δεδομένων ή απαίτηση για ανασχηματισμό. Ωστόσο, αν πρέπει να μετατοπιστούν τα ρολόγια του διαμερίσματος 2, όπως φαίνεται στην αμέσως επόμενη εικόνα (b), μερικά πλαίσια δεδομένων χάνονται εξαιτίας της αρνητικής μετατόπισης. Αν η πολιτική της θετικής μετατόπισης ακολουθείται ομοιόμορφα, οι κόμβοι θα πρέπει να έχουν ικανή χωρητικότητα ώστε να καταχωρούν (buffer up) τα πακέτα δεδομένων ενός ολόκληρου υπερ-πλαισίου έτσι ώστε να ξεκινούν εκ νέου με βάση τον καινούριο συγχρονισμό, όπως φαίνεται και στην αμέσως επόμενη εικόνα (c). Η χρήση καταχωρητών (buffering) μετριάζει το πρόβλημα της απώλειας δεδομένων στην ζεύξη της οποίας τα τελικά σημεία επανασυγχρονίζονται, αλλά οι γειτονικές ζεύξεις μπορεί να υποφέρουν από συγκρούσεις όταν ακολουθούν διαφορετικά ρολόγια. Έτσι, καθώς ο επανασυγχρονισμός προχωρεί ακτινικά από τον νέο ηγέτη, υπάρχει απώλεια δεδομένων κατά μήκος της κεφαλής του κύματος επανασυγχρονισμού. Αυτό για μία χρονική περίοδο παραμένει ανάλογο με τον χρόνο που χρειάζεται το πακέτο Ανακοίνωσης Ηγέτης (Leader Announcement) για να διαδοθεί από τον ηγέτη μέχρι τον πιο μακρινό κόμβο, ο οποίος με τη σειρά του εξαρτάται από την διάμετρο του δικτύου, μέχρις ότου επανασυγχρονιστεί όλο το δίκτυο. Επίσης, έχουν μελετηθεί διαφορετικές μέθοδοι για την μετάδοση της πληροφορίας συγχρονισμού. Ο εκτός ζώνης (out-of-band) συγχρονισμός χρησιμοποιεί ένα ξεχωριστό κανάλι ελέγχου για να στέλνει τους ισχυρισμούς (claims) και τα πακέτα σηματοδοσίας (beacon packets). Για τα πακέτα ελέγχου οι συγκρούσεις μειώνονται κατά ένα μεγάλο βαθμό. Ωστόσο, το διαθέσιμο εύρος ζώνης για την μετάδοση των δεδομένων μειώνεται και το κόστος των κινητών κόμβων αυξάνεται εξαιτίας της ανάγκης για μία επιπλέον ράδιο-διεπαφή (radio interface). Στον εντός ζώνης συγχρονισμό, η πληροφορία ελέγχου για τον συγχρονισμό μοιράζεται το ίδιο κανάλι με τα πακέτα δεδομένων, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.21 (a). Αυτό οδηγεί σε ένα μεγαλύτερο αριθμό συγκρούσεων, αλλά αποφεύγει ένα επιπλέον κανάλι ή την προκράτηση του εύρους ζώνης. Για την μείωση των ρητών πακέτων ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του piggy-backing. Η πληροφορία ελέγχου μπορεί να τοποθετηθεί μέσα στα εξερχόμενα πακέτα δεδομένων, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.21 (b). Αυτό συνεπάγεται πολύ χαμηλό overhead με κάθε πακέτο και οδηγεί σε αισθητή εξοικονόμηση του εύρους ζώνης. Ένα πακέτο ελέγχου που μεταφέρει πληροφορία συγχρονισμού, δημιουργείται μόνο όταν οι κόμβοι δεν έχουν να στείλουν πακέτα δεδομένων. Η μέθοδος αυτή μπορεί επίσης να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας ως μέσο μεταφοράς (μέθοδος piggy-backing) τα πακέτα επιβεβαίωσης λήψης (acknowledgements) του επιπέδου ζεύξης. Στα δίκτυα αισθητήρων, τα δεδομένα συνήθως ρέουν από όλους τους αισθητήρες στον ελεγκτή (monitor), ο οποίος είναι ένας σταθερός κόμβος με περισσότερους πόρους επεξεργασίας και ενέργειας απ’ ότι οι υπόλοιποι αισθητήρες. Αν ο ελεγκτής αναγκαστεί να γίνει ο ηγέτης, η πληροφορία συγχρονισμού μετακινείται προς την αντίστροφη κατεύθυνση, δηλαδή, μαζί με τα πακέτα επιβεβαίωσης λήψης (acknowledgements) του επιπέδου

ζεύξης, τα οποία στέλνονται από τους κόμβους σε κάθε hop των πακέτων δεδομένων, όπως φαίνεται στην εικόνα αμέσως επόμενη εικόνα (c). Χρησιμοποιώντας μελέτες εξομοίωσης, αυτός ο μηχανισμός παρατηρήθηκε ότι είναι ο περισσότερο αποδοτικός.

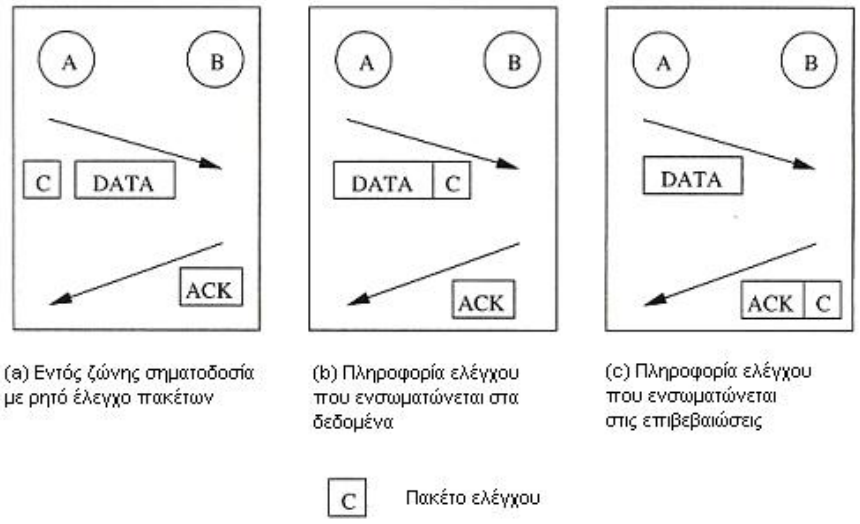
Θέματα που αφορούν το Στρώμα Μεταφοράς

Το πρωτεύον θέμα στα πρωτόκολλα του στρώματος μεταφοράς για τα δίκτυα αισθητήρων είναι η παροχή αξιόπιστης μεταφοράς δεδομένων. Αυτό προϋποθέτει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στον σχεδιασμό δικτύων αισθητήρων γενικού σκοπού, όπου ομάδες κόμβων μπορεί να απαιτούν ανασχηματισμό ή αναπρογραμματισμό έτσι ώστε να ταιριάζουν σε μία εφαρμογή που μπορεί να εμφανιστεί. Αυτό μπορεί να απαιτεί διασπορά ενός κομματιού του κώδικα σε μερικούς κόμβους, όπου η απώλεια ακόμα και μίας μόνο γραμμής του κώδικα θα μπορούσε να οδηγήσει σε αποτυχία της λειτουργίας της εκ νέου ανάθεσης καθηκόντων (retasking operation).

Για το θέμα αυτό έχει προταθεί ένα αξιόπιστο, εύρωστο, με δυνατότητα αυξομείωσης και προσαρμόσιμο πρωτόκολλο μεταφοράς το οποίο λέγεται PSFQ (pump slowly fetch quickly). Η βασική ιδέα πίσω από αυτό το πρωτόκολλο είναι ότι ένας κόμβος πηγή διανέμει τα δεδομένα με χαμηλό ρυθμό (pump slowly), και ο κόμβος παραλήπτης που υφίσταται απώλεια δεδομένων, ξαναβρίσκει τα χαμένα δεδομένα από έναν άμεσο γείτονα, με γρήγορο ρυθμό (fetch quickly). Το PSFQ υποθέτει ότι η απώλεια δεδομένων οφείλεται περισσότερο στις συνθήκες των ανεπαρκών ζεύξεων παρά στην συμφόρηση της κίνησης. Προτείνει μία hop-by-hop μέθοδο ανάκαμψης από λάθη, παρά να συγκρατείται μόνο ο κόμβος προορισμού ο οποίος είναι υπεύθυνος για την ανίχνευση του λάθους. Το overhead που προκαλεί η απαίτηση των ενδιάμεσων κόμβων να παρακολουθούν τα δεδομένα που προωθούνται, δικαιολογείται στα δίκτυα αισθητήρων, επειδή οι περισσότερες μεταδόσεις προορίζονται για ομάδες αισθητήρων και έτσι οι ενδιάμεσοι κόμβοι είναι επίσης προοριζόμενοι παραλήπτες.

Το PSFQ αποτελείται από τρεις λειτουργίες: την αναμετάδοση μηνύματος (pump), την ανάκαμψη από λάθη (fetch) και την επιλεκτική αναφορά κατάστασης (report). Η λειτουργία pump διαδίδει τα δεδομένα σε όλους τους κόμβους στόχους, εκτελεί έλεγχο ροής και περιορίζει την απώλεια εξασφαλίζοντας την αποθήκευση σε μνήμες (caching) στους ενδιάμεσους κόμβους. Έτσι τα λάθη σε μία ζεύξη διορθώνονται τοπικά χωρίς να χρειάζεται η διάδοση τους σε ολόκληρο το κανάλι. Όταν ένας παραλήπτης ανιχνεύσει κενά στους σειριακούς αριθμούς που λαμβάνονται, υποδηλώνεται μία απώλεια και εισέρχεται στην κατάσταση fetch. Στην συνέχεια κάνει αίτηση για επαναμετάδοση από τους γειτονικούς κόμβους. Επίσης γίνεται μια προσπάθεια για την συγκέντρωση των απωλειών, δηλαδή, πολλά μηνύματα απωλειών μαζεύονται σε μία και μόνο λειτουργία fetch, πράγμα που είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για καταιγιστικές απώλειες (bursty losses). Το PSFQ υποστηρίζει μια λειτουργία αναφοράς για να παρέχει ανάδραση της κατάστασης παράδοσης των δεδομένων στην πηγή. Ο πιο μακρινός κόμβος στόχος (target node) δημιουργεί την αναφορά του στο αντίστροφο μονοπάτι των δεδομένων και όλοι οι ενδιάμεσοι κόμβοι επισυνάπτουν τις αναφορές τους στο ίδιο. Έτσι, το PSFQ

εξασφαλίζει ότι τα τμήματα των δεδομένων θα παραδοθούν σε όλους τους προοριζόμενους παραλήπτες κατά ένα αυξομειούμενο και αξιόπιστο τρόπο, ακόμα και σε ένα περιβάλλον όπου η ποιότητα της ραδιοζεύξης είναι ανεπαρκής. Παρατηρήθηκε ότι ο λόγος ανάμεσα στους ρυθμούς fetch και pump θα πρέπει να είναι περίπου 5 για μέγιστη αποτελεσματικότητα.



Σηματοδοσία εντός ζώνης

Ένα πρόσφατο πρωτόκολλο, το ESRT (event-to-sink reliable transport), μελετά μία νέα αντίληψη στην αξιοπιστία των δικτύων αισθητήρων. Ορίζει την αξιοπιστία γεγονότος προς πηγή (event-to-sink) στην θέση της παραδοσιακής αξιοπιστίας μεταξύ των δύο άκρων (end-to-end) που παρέχεται από το στρώμα μεταφοράς. Αυτό σημαίνει ότι, τα δεδομένα για το γεγονός θα μεταφερθούν αξιόπιστα στην δεξαμενή (sink), με την ελάχιστη δαπάνη ενέργειας. Η δεξαμενή (sink) θα πρέπει να παρακολουθεί αξιόπιστα μόνο την συγκεντρωτική αναφορά για ένα γεγονός και όχι τις ξεχωριστές αναφορές από κάθε αισθητήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μία χαλάρωση της αυστηρής αξιοπιστίας που υπάρχει μεταξύ των άκρων (end-to-end) για κάθε ροή. Τα βασικά χαρακτηριστικά του ESRT είναι η ικανότητα αυτόματης ρύθμισης, η επίγνωση της διαθέσιμης ενέργειας και ο έλεγχος συμφόρησης. Το ESRT χρησιμοποιεί τον όρο παρατηρούμενη αξιοπιστία για να ορίσει τον αριθμό των πακέτων που δρομολογούνται από το γεγονός (event) στην δεξαμενή (sink) και τον όρο απαιτούμενη αξιοπιστία για να ορίζει τον επιθυμητό αριθμό τέτοιων πακέτων για το γεγονός, που απαιτούνται ώστε να παρακολουθείται επιτυχώς. Αν η παρατηρούμενη αξιοπιστία ενός γεγονότος πέσει κάτω από το απαιτούμενο όριο, το ESRT αυξάνει την συχνότητα των αναφορών. Αφετέρου, αν το επίπεδο αξιοπιστίας που απαιτείται, ξεπεραστεί, το ESRT μειώνει την συχνότητα των αναφορών για να εξοικονομήσει ενέργεια. Η συχνότητα με την οποία οι αισθητήρες θα πρέπει να στέλνουν τις αναφορές τους μεταφέρεται σε αυτούς μέσω εκπομπών από την δεξαμενή (sink), μετά από κατάλληλους υπολογισμούς, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η απαιτούμενη αξιοπιστία. Ο έλεγχος

συμφόρησης επιτυγχάνεται ελέγχοντας τα επίπεδα των καταχωρητών (buffers) στους αισθητήρες προώθησης.

Έχει επίσης μελετηθεί και η αξιοπιστία στην αντίστροφη κατεύθυνση, από την δεξαμενή (sink) προς τους αισθητήρες. Σε αυτές τις μελέτες παρουσιάζονται τα διάφορα είδη αξιοπιστίας που απαιτούνται σε αυτή την κατεύθυνση. Από την μία πλευρά, στέλνονται μικρά queries σε ένα και μόνο πακέτο, ενώ το λογισμικό που χρειάζεται να ενημερωθεί στους αισθητήρες μπορεί να σταλεί μέσω πολλαπλών πακέτων. Αναλόγως, η αξιοπιστία θα πρέπει να εξασφαλιστεί για ένα ή για πολλά πακέτα, ανάλογα με το περιεχόμενο. Επιπλέον ταξινόμηση γίνεται με βάση το προοριζόμενο σύνολο των παραληπτών. Ένα μήνυμα ίσως χρειαστεί να σταλεί σε όλους τους κόμβους του δικτύου, ή σε όλους τους κόμβους εντός μίας υπο-περιοχής (όπως σε ένα query που βασίζεται στην τοποθεσία), ή ίσως σε ένα υποσύνολο αισθητήρων το οποίο καλύπτει μία συγκεκριμένη περιοχή. Στην τελευταία περίπτωση, δεν χρειάζεται να λάβουν όλοι οι κόμβοι της περιοχής το μήνυμα, αλλά μόνο ένα μικρό υποσύνολο κόμβων, των οποίων η ένωση των περιοχών κάλυψης συμποσούται στην απαιτούμενη περιοχή, χρειάζεται να λάβει αξιόπιστα το μήνυμα. Ένας τρόπος για να εξασφαλιστεί οποιοσδήποτε από αυτούς τους τύπους αξιοπιστίας είναι να χρησιμοποιηθούν μερικοί κόμβοι ως εξυπηρετητές ανάκαμψης (recovery servers), οι οποίοι θα μεταδίδουν ξανά το μήνυμα στους αισθητήρες που δεν το έλαβαν.

Ασφάλεια

Τα δίκτυα αισθητήρων, που βασίζονται σε ένα ασύρματο μέσο το οποίο είναι εκ φύσεως εκπομπής, είναι ευάλωτα σε πολλές επιθέσεις. Η ασφάλεια είναι πρωταρχικής σημασίας στα δίκτυα αισθητήρων, επειδή οι κόμβοι θεωρούν ότι υπάρχει μεγάλη αξιοπιστία ανάμεσα τους κατά την συγκέντρωση δεδομένων και την ανίχνευση γεγονότων. Από ένα σύνολο κόμβων αισθητήρων σε μία δεδομένη θέση, μόνο ένα τελικό συγκεντρωτικό μήνυμα θα σταλεί στον BS και έτσι είναι απαραίτητο να εξασφαλιστεί ότι οι επικοινωνιακές ζεύξεις θα είναι ασφαλείς για την ανταλλαγή δεδομένων. Τα βασικά είδη επιθέσεων στα δίκτυα αισθητήρων και στο επίπεδο του στρώματος δικτύου έχουν αναφερθεί σε αρκετές μελέτες. Οι κρυπτογραφικές λύσεις που βασίζονται σε συμμετρική κρυπτογραφία ή κρυπτογραφία δημοσίου κλειδιού δεν είναι κατάλληλες για τα δίκτυα αισθητήρων, εξαιτίας των υψηλών απαιτήσεων επεξεργασίας των αλγορίθμων αυτών.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να επηρεαστούν, εξαπατώντας ή αλλάζοντας την πληροφορία δρομολόγησης που ανταλλάσσεται ανάμεσα στους κόμβους. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε λάθη στην δρομολόγηση, υψηλότερη λανθάνουσα κατάσταση ή ακόμα και διαμερισμό του δικτύου. Η επίθεση Sybil συμβαίνει όταν ένας και μόνο κόμβος παρουσιάζει τον εαυτό του ως πολλαπλές οντότητες του δικτύου. Αυτό μπορεί να επηρεάσει την ανοχή σε λάθη του δικτύου και να παραπλανήσει τους γεωγραφικούς αλγορίθμους δρομολόγησης. Η κρυπτογράφηση και η πιστοποίηση με χρήση ενός ολικά (globally) κοινού κλειδιού μπορεί να αποτρέψει τέτοιες επιθέσεις

που προκαλούνται από κάποιον παρείσακτο ο οποίος προσπαθεί να διαφθείρει τα μηνύματα του δικτύου.

Μία επίθεση επιλεκτικής προώθησης είναι η κατάσταση κατά την οποία συγκεκριμένοι κόμβοι δεν προωθούν πολλά από τα μηνύματα που λαμβάνουν. Τα δίκτυα αισθητήρων βασίζονται στην επαναληπτική προώθηση μέσω εκπομπής έτσι ώστε τα μηνύματα να διαδίδονται σε όλο το δίκτυο. Οι επιθέσεις Sinkhole είναι εκείνες οι οποίες κάνουν έναν κακόβουλο κόμβο να μοιάζει ιδιαίτερα πλεονεκτικός στον αλγόριθμο δρομολόγησης έτσι ώστε τα περισσότερα δεδομένα να δρομολογούνται μέσω αυτού. Έπειτα αυτός ο κόμβος εκτελεί επιλεκτική προώθηση, ή δρα ως δεξαμενή (sink). Τα δίκτυα αισθητήρων είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε επιθέσεις sinkhole επειδή η περισσότερη κίνηση είναι προς τον BS. Έτσι, η παροχή μιας και μόνο "πλεονεκτικής" διαδρομής είναι πιθανό να επηρεάσει ένα μεγάλο αριθμό κόμβων ώστε να δρομολογήσουν τα δεδομένα τους μέσα από τον κακόβουλο κόμβο. Η επίθεση wormhole παρασύρει την κίνηση μέσα από ένα μεγάλο μονοπάτι δίνοντας λανθασμένη πληροφορία στους κόμβους για την απόσταση ανάμεσά τους. Αυτό αυξάνει την λανθάνουσα κατάσταση (latency) αποφεύγοντας μερικά άλλα πιθανά συντομότερα μονοπάτια.

Οι επιθέσεις wormhole και sinkhole είναι δύσκολο να αντιμετωπιστούν επειδή η πληροφορία δρομολόγησης που παρέχεται από ένα κόμβο είναι δύσκολο να επιβεβαιωθεί. Ωστόσο, τα γεωγραφικά πρωτόκολλα δρομολόγησης δεν επηρεάζονται από αυτές τις επιθέσεις καθώς οι διαδρομές θεωρείται ότι προκύπτουν κατ' απαίτηση (on demand) χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες τοποθεσίας και έτσι οι ψεύτικες αποστάσεις μπορούν να επαληθευτούν.

Οι επιθέσεις πλημμύρας με πακέτα Hello μπορούν να προκληθούν από ένα κόμβο ο οποίος εκπέμπει πακέτα Hello με πολύ υψηλή ενέργεια, έτσι ώστε ένας μεγάλος αριθμός κόμβων που βρίσκεται ακόμα και πολύ μακριά μέσα στο δίκτυα να το διαλέγουν ως γονέα (parent). Όλα τα μηνύματα τώρα απαιτούν να δρομολογηθούν μέσω πολλαπλών hop σε αυτόν τον γονέα, γεγονός που αυξάνει την καθυστέρηση. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί ελέγχοντας την δικατευθυντικότητα μιας ζεύξης, έτσι ώστε οι κόμβοι να εξασφαλίζουν ότι μπορούν να φτάσουν τον γονέα τους με μόνο ένα hop. Το υπόλοιπο αυτής της ενότητας ασχολείται με μερικά πρωτόκολλα τα οποία προτάθηκαν για την βελτίωση της ασφάλειας των δικτύων αισθητήρων.

Πρωτόκολλο τοπικής Κρυπτογράφησης και Πιστοποίησης LEAP (Localized Encryption and Authentication Protocol)

Το πρωτόκολλο τοπικής κρυπτογράφησης και πιστοποίησης είναι ένα πρωτόκολλο διαχείρισης κλειδιών (ένα πρωτόκολλο διανομής κρυπτογραφικών κλειδιών) για τα δίκτυα αισθητήρων το οποίο βασίζεται σε αλγορίθμους συμμετρικού κλειδιού, που σημαίνει ότι, το ίδιο κλειδί χρησιμοποιείται και από τον αποστολέα και από τον παραλήπτη. Σε ένα δίκτυο, η απαίτηση από κάθε ζεύγος κόμβων να έχει ένα κοινό κλειδί το οποίο θα χρησιμοποιείται για επικοινωνία ανάμεσά τους είναι ιδανικό για την ασφάλεια, επειδή μία επίθεση σε οποιονδήποτε κόμβο δεν εκθέτει σε κίνδυνο την ασφάλεια των

άλλων κόμβων. Ωστόσο, στα δίκτυα αισθητήρων, οι γείτονες ενός κόμβου μπορεί να μην είναι γνωστοί εκ των προτέρων, και έτσι αυτό το μοίρασμα των κλειδιών μπορεί να γίνει αφότου το δίκτυο τεθεί σε λειτουργία, γεγονός το οποίο προκαλεί ένα υψηλό overhead. Επίσης, τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιούν συγκεκριμένες βελτιστοποιήσεις επεξεργασίας, όπως είναι για παράδειγμα η απόφαση ενός κόμβου να μην αναφέρει ένα γεγονός όταν ακούσει κατά τύχη τον γείτονά του να αναφέρει το ίδιο. Τέτοιες βελτιστοποιήσεις μπορούν να αποφευχθούν αν χρησιμοποιηθεί ένα ξεχωριστό κλειδί για κάθε ζεύγος γειτόνων. Αφετέρου, η απόκτηση ενός κοινού κλειδιού για όλους τους κόμβους του δικτύου έχει χαμηλότερο overhead, όμως η ενδοτικότητα ενός κόμβου θα επηρεάσει ολόκληρο το σύστημα.

Το LEAP χρησιμοποιεί διάφορους μηχανισμούς διανομής κλειδιών για διαφορετικά πακέτα, ανάλογα με τις απαιτήσεις τους για ασφάλεια. Για παράδειγμα, η πληροφορία δρομολόγησης, η οποία συνήθως είναι σε κατάσταση εκπομπής, δεν απαιτεί εμπιστευτικότητα, ενώ τα συγκεντρωμένα δεδομένα τα οποία στέλνονται στον BS θα πρέπει να είναι απόρρητα. Κάθε κόμβος αισθητήρας διατηρεί τέσσερις τύπους κλειδιών: ένα ξεχωριστό κλειδί (individual key) το οποίο μοιράζεται με τον BS, ένα κλειδί ομάδας (group key) το οποίο μοιράζεται με όλους τους κόμβους του δικτύου και τον BS, ένα κλειδί συστάδας (cluster key) το οποίο μοιράζεται ανάμεσα σε ένα κόμβο και τους γείτονές του και ένα κοινό κλειδί ζεύγους (pairwise shared key) το οποίο μοιράζεται με κάθε ένα από τους γείτονές του. Το ξεχωριστό κλειδί φορτώνεται στον κόμβο πριν από την λειτουργία του και χρησιμοποιείται για την μετάδοση κάθε ειδικής πληροφορίας ανάμεσα στον BS και τον κόμβο, όπως είναι για παράδειγμα αποκλειστικές οδηγίες προς ένα κόμβο ή μία αναφορά από ένα κόμβο στον BS για μία αφύσικη συμπεριφορά ενός γειτονικού κόμβου.

Υποτίθεται ότι ο χρόνος που απαιτείται για την επίθεση σε ένα κόμβο είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο δημιουργίας του δικτύου, κατά τον οποίο ένας κόμβος μπορεί να ανιχνεύσει όλους τους άμεσους γείτονές του. Πριν την ανάπτυξη σε λειτουργία, σε κάθε κόμβο φορτώνεται ένα κοινό αρχικό κλειδί (common key). Κάθε κόμβος αποκτά ένα κυρίαρχο κλειδί (master key) το οποίο βασίζεται στο κοινό κλειδί και την μοναδική ταυτότητα του (identifier). Στην συνέχεια οι κόμβοι ανταλλάσσουν μηνύματα Hello, τα οποία πιστοποιούνται από τους παραλήπτες (καθώς το κοινό κλειδί και η ταυτότητα είναι γνωστά, το κυρίαρχο κλειδί θα πρέπει να υπολογιστεί). Έπειτα υπολογίζουν ένα κοινό κλειδί (shared key) το οποίο βασίζεται στα κυρίαρχα κλειδιά τους. Το κοινό κλειδί (common key) διαγράφεται από όλους τους κόμβους μετά την αποκατάσταση του δικτύου, και βάσει υπόθεσης, κανένας κόμβος δεν έχει εκτεθεί σε κίνδυνο μέχρι τώρα. Καθώς κανένας αντίπαλος δεν μπορεί να πάρει το κοινό κλειδί (common key), είναι απίθανη η εισαγωγή ψεύτικων δεδομένων ή η αποκρυπτογράφηση τον προηγούμενων μηνυμάτων που ανταλλάχθηκαν. Επίσης, κανένας κόμβος δεν μπορεί αργότερα να πλαστογραφήσει το κυρίαρχο κλειδί (master key) ενός οποιουδήποτε άλλου κόμβου. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται και τα κοινά κλειδιά ζεύγους (pairwise shared keys) ανάμεσα σε όλους τους άμεσους γείτονες. Το κλειδί συστάδας (cluster key) δημιουργείται από ένα κόμβο μετά την δημιουργία του κλειδιού ζεύγους (pairwise key). Το κλειδί ομάδας (group key) μπορεί να φορτωθεί από πριν, αλλά θα πρέπει να ενημερώνεται όποτε ανιχνεύεται ένας ενδοτικός κόμβος.

Αυτό θα μπορούσε να γίνει, κατά ένα εύπιστο τρόπο, στέλνοντας ο BS ένα νέο κλειδί ομάδας (group key) σε κάθε κόμβο που χρησιμοποιεί το δικό του ξεχωριστό κλειδί (individual key) ή σε hop-by-hop βάση χρησιμοποιώντας τα κλειδιά συστάδας (cluster keys). Για την επίλυση του ίδιου προβλήματος έχουν προταθεί και άλλοι, περισσότερο περίπλοκοι αλγόριθμοι. Επιπλέον έχουν προταθεί μέθοδοι για την δημιουργία κοινών κλειδιών (shared keys) ανάμεσα σε γείτονες πολλαπλών hop.

Πρωτόκολλο INSENS (Intrusion Tolerant Routing in Wireless Sensor Networks)

Το INSENS, για την ασφάλεια των δικτύων αισθητήρων υιοθετεί μια προσέγγιση που βασίζεται στην δρομολόγηση. Κατασκευάζει πίνακες δρομολόγησης σε κάθε κόμβο, παρακάμπτοντας τους κακόβουλους κόμβους του δικτύου. Το πρωτόκολλο δεν μπορεί να ελέγξει πλήρως τις επιθέσεις στους κόμβους, αλλά ελαχιστοποιεί την ζημιά που προκαλείται στο δίκτυο. Οι απαιτήσεις για υπολογισμό, επικοινωνία, αποθήκευση και εύρος ζώνης τους κόμβους, μειώνονται, αλλά εις βάρος του μεγαλύτερου υπολογιστικού και επικοινωνιακού φορτίου που ανατίθεται στον BS. Για να εμποδιστούν οι επιθέσεις DoS (Denial of Service), ξεχωριστά οι κόμβοι δεν επιτρέπεται να εκπέμπουν σε ολόκληρο το δίκτυο. Μόνο ο BS επιτρέπεται να εκπέμπει και κανένας κόμβος ξεχωριστά δεν μπορεί να προσποιηθεί ότι είναι ο BS, καθώς πιστοποιείται χρησιμοποιώντας συναρτήσεις κατακερματισμού μίας κατεύθυνσης (δηλαδή, μία συνάρτηση κατακερματισμού της οποίας η αντίστροφη συνάρτηση δεν είναι εύκολο να αποκτηθεί). Η πληροφορία ελέγχου που αφορά την δρομολόγηση θα πρέπει να πιστοποιείται από τον BS έτσι ώστε να αποτρέπεται η είσοδος ψεύτικων δεδομένων δρομολόγησης. Ο BS υπολογίζει και διαδίδει πίνακες δρομολόγησης, καθώς δεν αντιμετωπίζει τους περιορισμούς στην υπολογιστική ισχύ και την ενέργεια τους οποίους αντιμετωπίζουν οι κόμβοι. Ακόμα κι αν ένας εισβολέας αναλάβει τον έλεγχο ενός κόμβου και δεν προωθεί πακέτα, το INSENS χρησιμοποιεί πλεονάζουσα δρομολόγηση πολλαπλών μονοπατιών (redundant multipath routing), έτσι ώστε ο προορισμός να μπορεί και πάλι να προσεγγιστεί χωρίς να απαιτείται διέλευση από τον κακόβουλο κόμβο.

Το INSENS έχει δύο φάσεις: ανακάλυψη διαδρομής και προώθηση δεδομένων. Κατά την φάση ανακάλυψης διαδρομής, ο BS στέλνει ένα μήνυμα αίτησης σε όλους τους κόμβους του δικτύου προωθώντας το μέσα από πολλαπλά hop (δεν χρησιμοποιεί εκπομπή). Κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα μήνυμα αίτησης καταγράφει την ταυτότητα του αποστολέα και στέλνει το μήνυμα σε όλους τους άμεσους γείτονές του, αν δεν το έχει ήδη κάνει. Για την αναγνώριση των αποστολέων ως γείτονες χρησιμοποιούνται κι άλλα μεταγενέστερα μηνύματα αίτησης, αλλά δεν πραγματοποιείται επαναληπτική πλημμύρα (repeated flooding). Οι κόμβοι απαντούν με την τοπική τους τοπολογία στέλνοντας μηνύματα ανάδρασης. Η ακεραιότητα των μηνυμάτων προστατεύεται χρησιμοποιώντας κρυπτογράφηση μέσω ενός μηχανισμού κοινού κλειδιού (shared key). Ένας κακόβουλος κόμβος μπορεί να προκαλέσει ζημιά μόνο με το να μη προωθεί τα πακέτα, αλλά τα μηνύματα στέλνονται μέσω διαφορετικών γειτόνων και έτσι είναι πιθανό να φτάσει σε ένα κόμβο μέσα από τουλάχιστον ένα μονοπάτι. Συνεπώς, η επίδραση των κακόβουλων κόμβων δεν εξαλείφεται πλήρως αλλά

περιορίζεται σε μόνο λίγους κόμβους που δέχονται δεδομένα (downstream nodes) στην χειρότερη περίπτωση. Οι κακόβουλοι κόμβοι μπορούν επίσης να στείλουν ψεύτικα μηνύματα, προκαλώντας εξάντληση της μπαταρίας στους λίγους κόμβους στους οποίους στέλνουν δεδομένα (upstream nodes). Τέλος, ο BS υπολογίζει τους πίνακες προώθησης για όλους τους κόμβους, με δύο ανεξάρτητα μονοπάτια για κάθε κόμβο και τους στέλνει στους κόμβους. Η δεύτερη φάση της προώθησης δεδομένων γίνεται με βάση τους πίνακες προώθησης που υπολογίζονται από τον BS.

Πρωτόκολλα Ασφάλειας για τα Δίκτυα Αισθητήρων SPINS (Security Protocols for Sensor Networks)

Το SPINS αποτελείται από μία σουίτα πρωτοκόλλων ασφαλείας τα οποία έχουν βελτιστοποιηθεί για δίκτυα αισθητήρων εξαιρετικά περιορισμένων πόρων. Το SPINS αποτελείται από δύο κύριες ενότητες: το πρωτόκολλο SNEP (Sensor Network Encryption Protocol) και το πρωτόκολλο μTESLA (micro-version of timed, efficient, streaming, loss-tolerant authentication protocol). Το SNEP παρέχει πιστοποίηση δεδομένων, προστασία από επιθέσεις επανάληψης (replay attacks) και σημασιολογική ασφάλεια, όλα με χαμηλό overhead επικοινωνίας των οκτώ bytes ανά μήνυμα. Η σημασιολογική ασφάλεια σημαίνει ότι ένας αντίπαλος δεν μπορεί να έχει ιδέα για το μη κωδικοποιημένο κείμενο (plaintext) ακόμα κι αν βλέπει πολλαπλές κρυπτογραφημένες εκδοχές του ίδιου plaintext. Η κρυπτογράφηση του plaintext χρησιμοποιεί ένα κοινό μετρητή (counter) (κοινός ανάμεσα στον αποστολέα και τον παραλήπτη). Έτσι, το ίδιο μήνυμα κρυπτογραφείται διαφορετικά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Η ακεραιότητα των μηνυμάτων και η εμπιστευτικότητα διατηρούνται χρησιμοποιώντας ένα κώδικα πιστοποίησης μηνύματος MAC (message authentication code). Αυτό είναι παρόμοιο με ένα άθροισμα ελέγχου (checksum) το οποίο προκύπτει εφαρμόζοντας μία μέθοδο πιστοποίησης με ένα μυστικό κοινό κλειδί στο μήνυμα. Το μήνυμα μπορεί να αποκρυπτογραφηθεί μόνο αν είναι παρών το ίδιο κοινό κλειδί (shared key). Επίσης το μήνυμα μεταφέρει την τιμή του μετρητή κατά την στιγμή της μετάδοσης (όπως είναι η χρονική σφραγίδα), για προστασία απέναντι στις επιθέσεις επανάληψης (replay attacks).

Το μTESLA εξασφαλίζει μία πιστοποιημένη εκπομπή, που σημαίνει ότι οι κόμβοι που λαμβάνουν ένα πακέτο μπορούν να διαβεβαιωθούν για την ταυτότητα του αποστολέα. Απαιτεί ένα χαλαρό χρόνο συγχρονισμού ανάμεσα στον BS και τους κόμβους, βάζοντας ένα άνω όριο στο μέγιστο σφάλμα συγχρονισμού. Τα κλειδιά MAC προκύπτουν από μία αλυσίδα κλειδιών, η οποία αποκτάται εφαρμόζοντας μια συνάρτηση μονής κατεύθυνσης συνάρτηση (μια μονής κατεύθυνσης συνάρτηση είναι εκείνη της οποίας η αντίστροφη συνάρτηση δεν υπολογίζεται εύκολα). Όλοι οι κόμβοι έχουν ένα αρχικό κλειδί K_0, το οποίο είναι κάποιο κλειδί της αλυσίδας κλειδιών. Η σχέση ανάμεσα στα κλειδιά προχωρά ως $K_0 = F(K_1)$, $K_1 = F(K_2)$, και γενικά, $K_i = F(K_{i+1})$. Δεδομένων των K_0, K_1, ...,K_i, είναι περισσότερο πιθανός ο υπολογισμός του K_{i+1}. Το κλειδί που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί αλλάζει περιοδικά και καθώς οι κόμβοι είναι συγχρονισμένοι σε ένα κοινό χρόνο, εντός ενός περιορισμένου

λάθους, μπορούν να ανιχνεύσουν ποιό κλειδί πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την κρυπτογράφηση/ αποκρυπτογράφηση ενός πακέτου σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Ο BS περιοδικά αποκαλύπτει το επόμενο κλειδί επαλήθευσης (verification key) σε όλους τους κόμβους, ενώ αυτή η περίοδος είναι γνωστή σε όλους τους κόμβους. Επίσης υπάρχει μία καθορισμένη καθυστέρηση συγκεκριμένου διαστήματος, ανάμεσα στην χρήση ενός κλειδιού για την κρυπτογράφηση και την αποκάλυψη του σε όλους τους παραλήπτες. Όταν ο BS μεταδίδει ένα πακέτο, χρησιμοποιεί ένα MAC κλειδί το οποίο είναι ακόμα κρυφό (δεν έχει ακόμα αποκαλυφθεί). Οι κόμβοι οι οποίοι λαμβάνουν αυτό το πακέτο το καταχωρούν (buffer) μέχρι να αποκαλυφθεί το κατάλληλο κλειδί επαλήθευσης. Ωστόσο, όταν ληφθεί ένα πακέτο, το MAC ελέγχεται για να εξασφαλιστεί ότι το κλειδί το οποίο χρησιμοποιείται στο MAC δε έχει ακόμα αποκαλυφθεί, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι μόνο ο BS που γνωρίζει το ακόμα κρυφό κλειδί, μπορεί να έχει στείλει το πακέτο. Τα πακέτα αποκρυπτογραφούνται όταν το πακέτο αποκάλυψης κλειδιού ληφθεί από τον BS. Αν χαθεί ένα από τα πακέτα αποκάλυψης κλειδιού, τα πακέτα δεδομένων καταχωρούνται (buffer) μέχρι το επόμενο χρονικό διάστημα και μετά πιστοποιούνται. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι το πακέτο αποκάλυψης του K_j δεν φτάνει σε ένα κόμβο. Περιμένει μέχρι να λάβει το K_{j+1}, μετά υπολογίζει το $K_j = F(K_{j+1})$ και αποκρυπτογραφεί τα πακέτα τα οποία λαμβάνονται στο προηγούμενο χρονικό διάστημα.

Επικοινωνία πραγματικού χρόνου

Συχνά στα δίκτυα αισθητήρων είναι βασική η υποστήριξη για πραγματικού χρόνου επικοινωνία η οποία χρησιμοποιείται για συστήματα παρακολούθησης ή συστήματα κρίσιμα σε θέματα ασφάλειας. Η επικοινωνιακή καθυστέρηση ανάμεσα στην ανίχνευση ενός εισβολέα και την ανάληψη της κατάλληλης δράσης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα της ανίχνευσης που παρέχεται από το σύστημα παρακολούθησης. Παρόμοια, σε ένα εργοστάσιο πυρηνικής ενέργειας, η ανίχνευση κάποιας ανωμαλίας στην θερμοκρασία ή την πίεση θα πρέπει να διαβιβαστεί σε πραγματικό χρόνο στο σύστημα ελέγχου έτσι ώστε να γίνει μία άμεση ενέργεια. Επομένως, οι εγγυήσεις στην καθυστέρηση για την δρομολόγηση θα ήταν εξαιρετικά χρήσιμες για τέτοια συστήματα. Δύο πρωτόκολλα τα οποία υποστηρίζουν πραγματικού χρόνου επικοινωνία στα δίκτυα αισθητήρων είναι το SPEED και το RAP και αναλύονται στην συνέχεια.

SPEED

Το SPEED είναι ένας τοπικός αλγόριθμος ο οποίος παρέχει πραγματικού χρόνου μονοεκπομπή (unicast), πραγματικού χρόνου πολυεκπομπή περιοχής (area-multicast) (πολυεκπομπή σε όλους τους κόμβους μιας συγκεκριμένης περιοχής) και πραγματικού χρόνου υποστήριξη εκπομπής σε οποιαδήποτε κατεύθυνση (anycast) για την μετάδοση των πακέτων. Το SPEED έχει τα ελάχιστα overheads, καθώς δεν απαιτεί πίνακες δρομολόγησης. Είναι συμβατό με το best-effort MAC στρώμα, ενώ δεν απαιτεί κάποια ειδική υποστήριξη από το MAC. Επίσης διανέμει την κίνηση και το φορτίο εξίσου σε όλο το δίκτυο χρησιμοποιώντας μη ντετερμινιστική προώθηση.

Το πρωτόκολλο SPEED απαιτεί περιοδικές μεταδόσεις από beacons ανάμεσα στους γείτονες. Επίσης χρησιμοποιεί δύο ειδικούς κατ' απαίτηση (on demand) beacons για τον υπολογισμό της καθυστέρησης και ανίχνευση της συμφόρησης. Αυτά χρησιμοποιούνται για να γίνουν αλλαγές στο δίκτυο. Το φορτίο σε ένα κόμβο προσεγγίζεται χρησιμοποιώντας καθυστέρηση ενός hop. Η μέτρηση γίνεται χρησιμοποιώντας πακέτα δεδομένων τα οποία περνούν από ένα κόμβο, αντί για ξεχωριστά πακέτα διερεύνησης (probe packets). Αυτό ελαχιστοποιεί το overhead. Οι κόμβοι επίσης απαντούν χρησιμοποιώντας ένα beacon υπολογισμού της καθυστέρησης για να πληροφορήσουν τους γείτονές τους για την καθυστέρηση που υπολογίζεται. Η δρομολόγηση των πακέτων εκτελείται από τον αλγόριθμο SNGF (stateless non-deterministic geographic forwarding). Χρησιμοποιώντας γεωγραφική πληροφορία, τα πακέτα προωθούνται μόνο στους κόμβους οι οποίοι είναι πιο κοντά στον προορισμό. Ανάμεσα στους υποψήφιους κοντινότερους κόμβους, αυτοί που έχουν την ελάχιστη υπολογισμένη καθυστέρηση έχουν υψηλότερη πιθανότητα να επιλεχθούν ως ενδιάμεσοι κόμβοι. Αν δεν υπάρχουν κόμβοι οι οποίοι να ικανοποιούν τον περιορισμό στην καθυστέρηση, το πακέτο απορρίπτεται.

Το SPEED χρησιμοποιεί ένα βρόχο ανάδρασης γείτονα NFL (neighbor feedback loop) για να διατηρεί την υπολογιζόμενη καθυστέρηση όσο πιο σταθερή γίνεται, έτσι ώστε να μην απαιτούνται συχνές ενημερώσεις σε αυτούς τους υπολογισμούς. Όταν πρέπει να απορριφθεί ένα πακέτο, δηλαδή, όταν δεν υπάρχει ένα μονοπάτι το οποίο να μπορεί να ανταποκριθεί στον περιορισμό της καθυστέρησης, ο ρυθμός αποστολής των downstream κόμβων (κόμβοι οι οποίοι είναι πιο κοντά στον παραλήπτη) μειώνεται έτσι ώστε να αποφευχθεί η συμφόρηση, διατηρώντας με αυτό τον τρόπο την καθυστέρηση. Ο NFL χρησιμοποιεί ένα back-pressure beacon ο οποίος υποδεικνύει την μέση καθυστέρηση. Η αυξημένη καθυστέρηση σημειώνεται, και το SNGF μειώνει ανάλογα την πιθανότητα επιλογής για δρομολόγηση των downstream κόμβων που έχουν υποστεί συμφόρηση, μέχρις ότου τελικά χαλαρώσει η συμφόρηση και μειωθεί η καθυστέρηση. Αυτό μπορεί να συνεχιστεί επαναληπτικά, διαδίδοντας τον back-pressure beacon από τους downstream στους upstream κόμβους (κόμβοι οι οποίοι είναι πιο κοντά στον αποστολέα), έτσι ώστε να ανακουφιστεί η συμφόρηση στο επίμαχο σημείο.

Πολλοί γεωγραφικοί αλγόριθμοι δρομολόγησης μπορεί να αντιμετωπίσουν μία κατάσταση κατά την οποία δεν υπάρχει κανένας κόμβος κοντά στον προορισμό για να προωθήσει το πακέτο. Αυτό αποκαλείται "κενό". Το SPEED χρησιμοποιεί μία τεχνική αποφυγής του κενού κυκλοφορώντας ένα back-pressure beacon ο οποίος έχει ως τιμή υπολογισμένης καθυστέρηση το άπειρο. Αυτό θα πυροδοτήσει μία έρευνα για εναλλακτικά μονοπάτια. Συνεπώς, αν υπάρχει οποιοδήποτε μονοπάτι προς ένα προορισμό ο οποίος να ικανοποιεί τον περιορισμό της καθυστέρησης, θα ανιχνευθεί από το SPEED. Το πρωτόκολλο παρέχει υποστήριξη σε επικοινωνία πραγματικού χρόνου πάνω από τα δίκτυα αισθητήρων παρέχοντας εγγυήσεις για την μέγιστη καθυστέρηση.

RAP

Το RAP παρέχει APIs για εφαρμογές έτσι ώστε να αντιμετωπίσει τα queries τους. Ένα πρόγραμμα του στρώματος εφαρμογής στο BS μπορεί να ορίσει το είδος της πληροφορίας γεγονότων που απαιτείται,

την περιοχή στην οποία αντιμετωπίζεται ένα query και το χρονικό όριο εντός του οποίου απαιτείται η πληροφορία. Τα υποκείμενα στρώματα του RAP εγγυώνται ότι το query στέλνεται σε όλους τους κόμβους της συγκεκριμένης περιοχής, ενώ τα αποτελέσματα στέλνονται πίσω στον BS. Η στοίβα πρωτοκόλλων του RAP αποτελείται από το LAP (location addressed protocol) στο στρώμα μεταφοράς, το VMS (velocity monitoring scheduling) ως το πρωτόκολλο γεωγραφικής δρομολόγησης και μία μέθοδο MAC η οποία βασίζεται στον ανταγωνισμό και η οποία υποστηρίζει τον καθορισμό προτεραιοτήτων.

Το LAP είναι ένα χωρίς σύνδεση πρωτόκολλο του στρώματος μεταφοράς το οποίο χρησιμοποιεί την τοποθεσία για να δίνει διευθύνσεις στους κόμβους αντί για μία μοναδική μέθοδο διευθυνσιοδότησης όπως είναι η IP διεύθυνση. Υποστηρίζει τρία είδη επικοινωνίας: μονοεκπομπή (unicast), πολυεκπομπή περιοχής (area multicast), και εκπομπή περιοχής (area anycast). Το VMS βασίζεται στην ιδέα της ταχύτητας του αιτούμενου πακέτου (packet-requested velocity), το οποίο αντιπροσωπεύει τόσο τους χρονικούς περιορισμούς όσο και τους περιορισμούς στην απόσταση. Έτσι, η απαιτούμενη ταχύτητα είναι ένα μέτρο του πόσο επείγον είναι το πακέτο. Αν ένα πακέτο μπορεί να ταξιδέψει με την απαιτούμενη ταχύτητά του, δηλαδή, αν μπορεί να καλύψει την απαιτούμενη απόσταση μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρόνο, τότε μπορεί να συναντήσει το χρονικό του όριο (deadline). Το VMS δίνει μεγαλύτερη προτεραιότητα στα πακέτα τα οποία έχουν ζητήσει υψηλότερες ταχύτητες. Η ταχύτητα ενός πακέτου υπολογίζεται ως ο λόγος της γεωγραφικής απόστασης ανάμεσα στον αποστολέα και τον παραλήπτη, προς το χρονικό όριο. Το δυναμικό VMS υπολογίζει ξανά την ταχύτητα σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο, έτσι ώστε να μπορεί να δοθεί υψηλότερη προτεραιότητα σε ένα πακέτο το οποίο είναι αργότερο από την ζητούμενη ταχύτητά του μέχρι τότε. Αυτό αντιστοιχίζεται σε μία προτεραιότητα του MAC στρώματος, την οποία διαχειρίζεται ένα MAC στρώμα το οποίο βασίζεται σε ανταγωνισμό. Έτσι, το πρωτόκολλο παρέχει τις κατάλληλες υπηρεσίες στα προγράμματα του στρώματος εφαρμογών τα οποία απαιτούν υποστήριξη πραγματικού χρόνου.

ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΙΑ AD HOC ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

Στο κεφάλαιο αυτό, που αποτελεί και το κυριότερο μέρος της διπλωματικής μαζί με την εξομοίωση, ταξινομούνται και αναλύονται όλα τα πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία έχουν προταθεί για τα ad hoc ασύρματα δίκτυα.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα ad hoc ασύρματο δίκτυο αποτελείται από ένα σύνολο κινητών κόμβων (hosts) οι οποίοι συνδέονται με ασύρματες ζεύξεις. Η τοπολογία του δικτύου (ο φυσικός τρόπος σύνδεσης του δικτύου επικοινωνίας) σε ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να αλλάζει τυχαία. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που βρίσκουν ένα μονοπάτι το οποίο θα ακολουθήσουν τα πακέτα από τον κόμβο πηγή σε ένα κόμβο προορισμού και που χρησιμοποιήθηκαν στα παραδοσιακά ενσύρματα δίκτυα, δεν μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα στα ad hoc ασύρματα δίκτυα εξαιτίας της εξαιρετικά δυναμικής τοπολογίας, της απουσίας καθιερωμένης υποδομής για κεντρική διαχείριση (π.χ., σταθμοί βάσης ή σημεία πρόσβασης), των περιορισμένου εύρους ζώνης ασύρματων ζεύξεων και των περιορισμένων όσον αφορά την ενέργεια, κόμβων. Στο πρόσφατο παρελθόν έχουν προταθεί αρκετά πρωτόκολλα δρομολόγησης για τα ad hoc δίκτυα. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν πρώτα τα προβλήματα που προκύπτουν κατά τον σχεδιασμό ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης και έπειτα οι διάφορες κατηγορίες των πρωτοκόλλων δρομολόγησης για τα ad hoc ασύρματα δίκτυα. Στην συνέχεια θα αναλυθούν τα διάφορα υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΙΑ AD HOC ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

Τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο είναι σχεδιασμένο για ad hoc ασύρματα δίκτυα είναι η κινητικότητα των κόμβων, οι περιορισμοί στους πόρους (resources), η επιρρεπής σε λάθη κατάσταση του καναλιού και τα προβλήματα των κρυμμένων (hidden) και εκτεθειμένων (exposed) τερματικών. Μια περισσότερο λεπτομερή παρουσίαση τους γίνεται στην συνέχεια.

Κινητικότητα

Η τοπολογία του δικτύου σε ένα ad hoc ασύρματο δίκτυο είναι ιδιαίτερα δυναμική εξαιτίας της κίνησης των κόμβων και έτσι μια συνεδρία που βρίσκεται σε εξέλιξη θα υποφέρει από συχνές ρήξεις του μονοπατιού (path breaks). Η διακοπή συμβαίνει είτε εξαιτίας της κίνησης των ενδιάμεσων κόμβων οι οποίοι βρίσκονται στο μονοπάτι ή εξαιτίας της κίνησης των τελικών κόμβων. Στα

ενσύρματα δίκτυα τέτοιες καταστάσεις δεν εμφανίζονται εξαιτίας των αξιόπιστων ζεύξεων όπου όλοι οι κόμβοι είναι στατικοί. Αν και τα πρωτόκολλα των ενσύρματων δικτύων βρίσκουν εναλλακτικές διαδρομές όταν σπάσει το μονοπάτι, η σύγκλιση τους είναι εξαιρετικά αργή. Έτσι, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης των ενσύρματων δικτύων δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα ad hoc ασύρματα δίκτυα όπου η κινητικότητα των κόμβων έχει ως αποτέλεσμα την συχνή αλλαγή της τοπολογίας του δικτύου. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για τα ad hoc ασύρματα δίκτυα θα πρέπει να μπορούν να εκτελούν ικανή και αποδοτική διαχείριση της κινητικότητας.

Περιορισμοί στο εύρος ζώνης

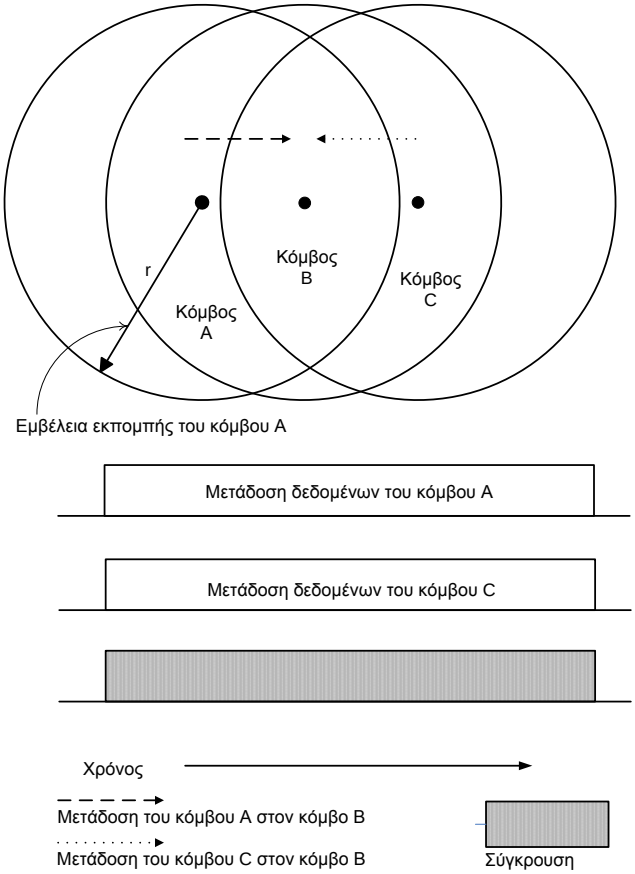
Στα ενσύρματα δίκτυα υπάρχει άφθονο εύρος ζώνης λόγω των οπτικών ινών και εξαιτίας της εκμετάλλευσης των τεχνολογιών πολύπλεξης με επιμερισμό του μήκους κύματος WDM (wavelength division multiplexing). Όμως στα ασύρματα δίκτυα, η ζώνη των ραδιοσυχνοτήτων είναι περιορισμένη και συνεπώς οι ρυθμοί δεδομένων που μπορεί να προσφέρει είναι πολύ μικρότεροι από αυτούς που μπορεί να προσφέρει ένα ενσύρματο δίκτυο. Αυτό απαιτεί από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης να χρησιμοποιούν το εύρος ζώνης κατά τον καλύτερο τρόπο, κρατώντας το overhead όσο το δυνατόν μικρότερο. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα στο εύρος ζώνης επιβάλει επίσης περιορισμό στα πρωτόκολλα δρομολόγησης στο να διατηρούν πληροφορίες τοπολογίας. Εξαιτίας των συχνών αλλαγών στην τοπολογία, η διατήρηση μιας σταθερής πληροφορίας για αυτή σε όλους τους κόμβους απαιτεί περισσότερο overhead ελέγχου, το οποίο με την σειρά του έχει ως αποτέλεσμα σπατάλη εύρους ζώνης. Καθώς τα αποδοτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης των ενσύρματων δικτύων απαιτούν την πλήρη πληροφορία τοπολογίας, δεν είναι κατάλληλα για την δρομολόγηση σε ένα περιβάλλον ad hoc ασύρματου δικτύου.

Κανάλι μετάδοσης το οποίο είναι επιρρεπές σε λάθη

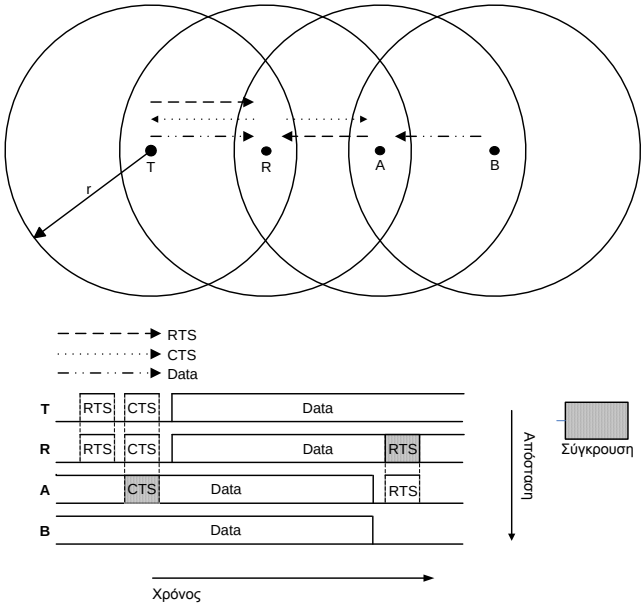
Η ευρείας εκπομπής φύση του ραδιοδιαύλου θέτει μια μοναδική πρόκληση για τα ad hoc ασύρματα δίκτυα. Οι ασύρματες ζεύξεις έχουν χαρακτηριστικά που μεταβάλλονται με το χρόνο, όπως είναι η χωρητικότητα της ζεύξης και η πιθανότητα να συμβεί λάθος σε αυτή. Αυτό απαιτεί ότι το πρωτόκολλο δρομολόγησης του ad hoc ασύρματου δικτύου θα αλληλεπιδρά με το στρώμα MAC έτσι ώστε να βρίσκει εναλλακτικές διαδρομές μέσα από καλύτερης ποιότητας ζεύξεις. Επίσης, οι μεταδόσεις στα ad hoc ασύρματα δίκτυα έχουν ως αποτέλεσμα συγκρούσεις στα πακέτα δεδομένων και ελέγχου. Αυτό αποδίδεται στο πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού. Συνεπώς, απαιτείται από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης των ad hoc ασύρματων δικτύων να βρίσκουν τα μονοπάτια με την μικρότερη συμφόρηση.

Προβλήματα του κρυμμένου και του εκτεθειμένου τερματικού

Το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού αναφέρεται στην σύγκρουση των πακέτων στον κόμβο παραλήπτη, εξαιτίας της ταυτόχρονης μετάδοσης εκείνων των κόμβων οι οποίοι δεν βρίσκονται εντός του άμεσου εύρους μετάδοσης του αποστολέα, αλλά είναι εντός του εύρους μετάδοσης του παραλήπτη. Η σύγκρουση προκύπτει όταν και οι δύο κόμβοι μεταδίδουν πακέτα την ίδια στιγμή χωρίς να γνωρίζει ο ένας για την μετάδοση του άλλου. Για παράδειγμα ας θεωρηθεί η παρακάτω εικόνα. Εδώ, αν ο κόμβος Α και ο κόμβος C μεταδώσουν στον κόμβο Β την ίδια χρονική στιγμή, τα πακέτα τους θα συγκρουστούν στον κόμβο Β. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι και οι δύο κόμβοι Α και C είναι κρυμμένοι ο ένας από τον άλλο καθώς δεν είναι εντός του άμεσου εύρους μετάδοσης τους και συνεπώς δεν γνωρίζουν την παρουσία του ενός για τον άλλο. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα περιλαμβάνει τα πρωτόκολλα MACA (medium access collision avoidance), MACAW (medium access collision avoidance for wireless), FAMA (floor acquisition multiple access) και DBTMA (dual busy tone multiple access). Το MACA απαιτεί ο κόμβος που εκπέμπει να γνωστοποιεί ρητά όλους τους πιθανούς κρυμμένους κόμβους για την επερχόμενη μετάδοση μέσω ενός αμφίδρομου πρωτοκόλλου ελέγχου χειραψίας (handshake control protocol) που ονομάζεται πρωτόκολλο ανταλλαγής RTS-CTS. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η μέθοδος ίσως δεν λύνει τελείως το πρόβλημα, ωστόσο μειώνει την πιθανότητα των συγκρούσεων. Για να αυξηθεί η απόδοση, προτάθηκε μια βελτιωμένη έκδοση του πρωτοκόλλου MACA, η οποία είναι γνωστή ως MACAW. Το πρωτόκολλο αυτό απαιτεί από τον παραλήπτη να βεβαιώνει την κάθε επιτυχή λήψη ενός πακέτου δεδομένων. Επομένως, η επιτυχή μετάδοση είναι ένας μηχανισμός ανταλλαγής με τέσσερις τρόπους, ο οποίος ονομάζεται RTS-CTS-Data-ACK. Ακόμη και με την απουσία των λαθών στα bit και της κινητικότητας, ο έλεγχος ανταλλαγής πακέτων RTS-CTS δεν μπορεί να εξασφαλίσει μετάδοση δεδομένων χωρίς συγκρούσεις, η οποία δεν θα έχει παρεμβολές από τα κρυμμένα τερματικά. Μια πολύ σημαντική υπόθεση που γίνεται είναι ότι κάθε κόμβος στην περιοχή κάλυψης του παραλήπτη (πομπού) λαμβάνει το CTS (RTS) καθαρά. Οι κόμβοι οι οποίοι δεν ακούν καθαρά κανένα από αυτά μπορεί να εμποδίσουν την επιτυχή μετάδοση του πακέτου δεδομένων ή του πακέτου ACK. Μια ειδική προβληματική κατάσταση προκύπτει όταν ο κόμβος Α, ο οποίος είναι κρυμμένος από τον πομπό Τ και εντός της περιοχής κάλυψης του παραλήπτη R, δεν ακούει σωστά το CTS επειδή είναι εντός της περιοχής κάλυψης του κόμβου Β ο οποίος μεταδίδει και είναι κρυμμένος τόσο από τον R όσο και από τον Τ, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Σε αυτή την περίπτωση, ο κόμβος Α δεν λαμβάνει επιτυχώς το CTS που δημιούργησε ο κόμβος R και συνεπώς υποθέτει ότι δεν υπάρχει σε εξέλιξη μετάδοση στην γειτονιά του. Εφόσον ο κόμβος Α είναι κρυμμένος από τον κόμβο Τ, κάθε προσπάθεια να δημιουργήσει το δικό του RTS θα είχε ως αποτέλεσμα την σύγκρουση της εν εξελίξει μετάδοσης μεταξύ των κόμβων Τ και R.

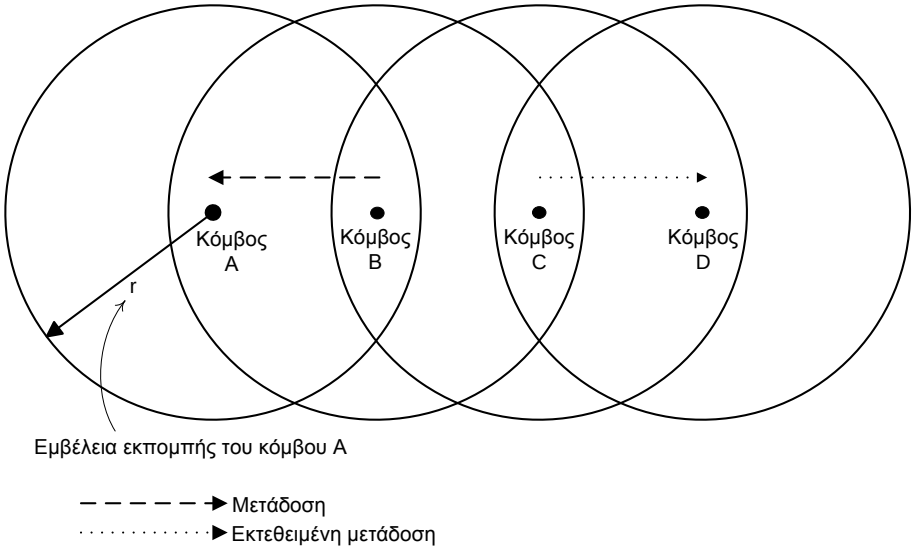


Το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού



Το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού, με χρήση των RTS-CTS-Data-ACK

Το πρόβλημα του εκτεθειμένου τερματικού αναφέρεται στην ανικανότητα ενός κόμβου, που είναι μπλοκαρισμένος λόγω της μετάδοσης από ένα γειτονικό κόμβο, να μεταδώσει σε έναν άλλο κόμβο. Ας θεωρηθεί το παράδειγμα της επόμενης εικόνας. Εδώ, αν η μετάδοση από τον κόμβο B σε έναν άλλο κόμβο A είναι ήδη σε εξέλιξη, ο κόμβος C δεν μπορεί να μεταδώσει στον κόμβο D καθώς συμπεραίνει ότι ο γείτονας του, κόμβος B, είναι σε κατάσταση μετάδοσης και συνεπώς δεν πρέπει να παρέμβει στην εν εξελίξει μετάδοση. Έτσι επηρεάζεται η επαναχρησιμοποίηση του ραδιοφάσματος. Για να μεταδώσει ταυτόχρονα ο κόμβος C όταν μεταδίδει ο κόμβος B, θα πρέπει η συχνότητα μετάδοσης του κόμβου C να είναι διαφορετική από την συχνότητα στην οποία λαμβάνει.



Το πρόβλημα του εκτεθειμένου τερματικού

Περιορισμοί στους πόρους

Δυο βασικοί πόροι οι οποίοι συνιστούν τον κύριο περιορισμό των κόμβων στα ad hoc ασύρματα δίκτυα είναι η διάρκεια της μπαταρίας και η επεξεργαστική ισχύς. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται στα ad hoc ασύρματα δίκτυα απαιτούν στις περισσότερες περιπτώσεις φορητότητα και συνεπώς έχουν περιορισμούς στο μέγεθος και το βάρος καθώς και περιορισμούς στην πηγή ενέργειας. Η αύξηση της ισχύς της μπαταρίας και της ικανότητας επεξεργασίας κάνει τους κόμβους ογκώδεις και λιγότερο φορητούς. Έτσι τα πρωτόκολλα δρομολόγησης των ad hoc ασύρματων δικτύων θα πρέπει να διαχειρίζονται με τον καλύτερο τρόπο αυτούς τους πόρους.

Χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει ένα ιδανικό πρωτόκολλο δρομολόγησης για ad hoc ασύρματα δίκτυα

Εξαιτίας των προβλημάτων που προκύπτουν στο περιβάλλον ενός ad hoc ασύρματου δικτύου και τα οποία αναλύθηκαν προηγουμένως, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης των ενσύρματων δικτύων δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα ad hoc ασύρματα δίκτυα. Συνεπώς τα ad hoc ασύρματα δίκτυα απαιτούν εξειδικευμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία θα επιλύουν τα προβλήματα που συζητήθηκαν παραπάνω. Ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης για ad hoc ασύρματα δίκτυα θα πρέπει να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. Θα πρέπει να είναι πλήρως κατανεμημένο, καθώς η κεντρική δρομολόγηση απαιτεί υψηλό overhead ελέγχου και συνεπώς δεν είναι αποδοτική. Η κατανεμημένη δρομολόγηση είναι περισσότερο ανεκτική σε σφάλματα απ' ότι η κεντρική δρομολόγηση, γεγονός που εμπεριέχει τον κίνδυνο του μοναδιαίου σημείου λάθους (single point of failure).
2. Θα πρέπει να είναι προσαρμόσιμο σε συχνές αλλαγές της τοπολογίας λόγω της κινητικότητας των κόμβων.
3. Ο υπολογισμός και η διατήρηση της διαδρομής θα πρέπει να χρησιμοποιεί ένα ελάχιστο αριθμό κόμβων. Κάθε κόμβος του δικτύου θα πρέπει να έχει γρήγορη πρόσβαση στις διαδρομές, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι απαιτείται ένας ελάχιστος χρόνος αποκατάστασης της σύνδεσης.
4. Θα πρέπει να διαχειρίζεται τοπική πληροφορία, καθώς η διατήρηση μιας καθολικής κατάστασης χρειάζεται ένα τεράστιο overhead ελέγχου για την διάδοση των καταστάσεων.
5. Θα πρέπει να είναι ελεύθερος από βρόχους (loop-free) καθώς επίσης και από πεπαλαιωμένες διαδρομές (stale routes).
6. Ο αριθμός των συγκρούσεων των πακέτων θα πρέπει να διατηρηθεί όσο το δυνατόν μικρότερος, περιορίζοντας τον αριθμό των μεταδόσεων που γίνονται από κάθε κόμβο. Οι μεταδόσεις θα πρέπει να είναι αξιόπιστες έτσι ώστε να μειωθεί η απώλεια των μηνυμάτων και να εμποδιστεί η εμφάνιση πεπαλαιωμένων διαδρομών.
7. Θα πρέπει να συγκλίνει στις βέλτιστες διαδρομές όταν η τοπολογία του δικτύου σταθεροποιηθεί. Η σύγκλιση θα πρέπει να είναι γρήγορη.
8. Θα πρέπει να χρησιμοποιεί με τον βέλτιστο τρόπο τους ανεπαρκείς πόρους όπως είναι το εύρος ζώνης, η υπολογιστική ισχύς, η μνήμη και η ισχύς της μπαταρίας.
9. Κάθε κόμβος του δικτύου θα πρέπει να μπορεί να αποθηκεύει την πληροφορία η οποία αφορά μόνο στην σταθερή τοπική τοπολογία. Οι συχνές αλλαγές στην τοπική τοπολογία, και οι αλλαγές στην τοπολογία σε μέρη του δικτύου με τα οποία ο κόμβος δε έχει καθόλου επικοινωνία, δεν θα πρέπει να επηρεάζουν με κανένα τρόπο τον κόμβο, γεγονός που σημαίνει ότι οι αλλαγές σε απομακρυσμένα μέρη του δικτύου δεν θα πρέπει να προκαλούν την ενημέρωση της πληροφορίας που διατηρεί ο κόμβος για την τοπολογία.
10. Θα πρέπει να μπορεί να παρέχει ένα συγκεκριμένο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας (QoS) όπως αυτό απαιτείται από τις εφαρμογές και θα πρέπει να προσφέρει υποστήριξη σε κίνηση η οποία είναι ευαίσθητη στο χρόνο.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για τα ad hoc ασύρματα δίκτυα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε διάφορους τύπους βασιζόμενοι σε διαφορετικά κριτήρια. Ένα δέντρο κατηγοριοποίησης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Μερικές από τις κατηγορίες, οι ιδιότητες τους καθώς και η βάση τους αναλύονται παρακάτω. Η κατηγοριοποίηση δεν είναι αμοιβαία αποκλειόμενη και μερικά πρωτόκολλα μπορούν να υπάρχουν σε περισσότερες από μια κατηγορίες. Η απόκλιση από τα παραδοσιακά μέτρα δρομολόγησης και τις διεργασίες εύρεσης διαδρομής που εμφανίζονται στα ασύρματα δίκτυα δημιουργεί την ανάγκη για περαιτέρω εξερεύνηση προς αυτή την κατεύθυνση. Τα πρωτόκολλα

δρομολόγησης για τα ad hoc ασύρματα δίκτυα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ευρέως σε τέσσερις κατηγορίες με βάση τα εξής:

- Τον μηχανισμό ενημέρωσης της πληροφορίας δρομολόγησης
- Την χρήση προσωρινής πληροφορίας για την δρομολόγηση
- Την τοπολογία δρομολόγησης
- Την χρήση εξειδικευμένων πόρων

Κατηγοριοποίηση με βάση τον μηχανισμό ενημέρωσης της πληροφορίας δρομολόγησης

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης των ad hoc ασύρματων δικτύων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες με βάση τον μηχανισμό ενημέρωσης της πληροφορίας δρομολόγησης. Αυτές είναι:

1. **Proactive ή Table-driven πρωτόκολλα δρομολόγησης:** Στα table-driven πρωτόκολλα δρομολόγησης, κάθε κόμβος διατηρεί την πληροφορία για την τοπολογία του δικτύου υπό την μορφή πινάκων δρομολόγησης, ανταλλάσσοντας περιοδικά πληροφορίες δρομολόγησης. Η πληροφορία δρομολόγησης διαδίδεται με την μέθοδο της πλημμύρας σε όλο το δίκτυο. Όποτε ένας κόμβος απαιτεί ένα μονοπάτι σε κάποιο προορισμό, τρέχει ένα κατάλληλο αλγόριθμο εύρεσης διαδρομής πάνω στην πληροφορία τοπολογίας την οποία διατηρεί.
2. **Reactive ή On-demand πρωτόκολλα δρομολόγησης:** Τα πρωτόκολλα τα οποία εμπίπτουν σε αυτή την κατηγορία δεν διατηρούν πληροφορία για την τοπολογία του δικτύου. Αποκτούν την απαραίτητη διαδρομή όταν απαιτείται χρησιμοποιώντας μια διαδικασία αποκατάστασης σύνδεσης. Έτσι αυτά τα πρωτόκολλα δεν ανταλλάσσουν περιοδικά πληροφορία δρομολόγησης.
3. **Υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης:** Τα πρωτόκολλα τα οποία ανήκουν σε αυτή την κατηγορία συνδυάζουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά από τις δύο παραπάνω κατηγορίες. Οι κόμβοι οι οποίοι βρίσκονται σε μια συγκεκριμένη απόσταση από τον κόμβο αναφοράς, ή εντός μιας συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής, λέγεται ότι βρίσκονται εντός της ζώνης δρομολόγησης του δεδομένου κόμβου. Για την δρομολόγηση εντός αυτής της ζώνης, χρησιμοποιείται η table-driven προσέγγιση. Για τους κόμβους οι οποίοι βρίσκονται έξω από αυτή την ζώνη, χρησιμοποιείται η on-demand προσέγγιση.

Κατηγοριοποίηση η οποία γίνεται με βάση την χρήση χρονικής πληροφορίας για δρομολόγηση

Αυτή η κατηγοριοποίηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης βασίζεται στην χρήση χρονικής πληροφορίας για την δρομολόγηση. Καθώς τα ad hoc ασύρματα δίκτυα είναι εξαιρετικά δυναμικά και οι ρήξεις στις διαδρομές (path breaks) συμβαίνουν περισσότερο συχνά απ' ότι στα ενσύρματα δίκτυα, η χρήση χρονικής πληροφορίας σχετικά με την διάρκεια ζωής των ασύρματων ζεύξεων και την

διάρκεια ζωής των διαδρομών που επιλέγονται είναι σημαντική. Τα πρωτόκολλα τα οποία εμπίπτουν σε αυτή την κατηγορία μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω σε δύο τύπους:

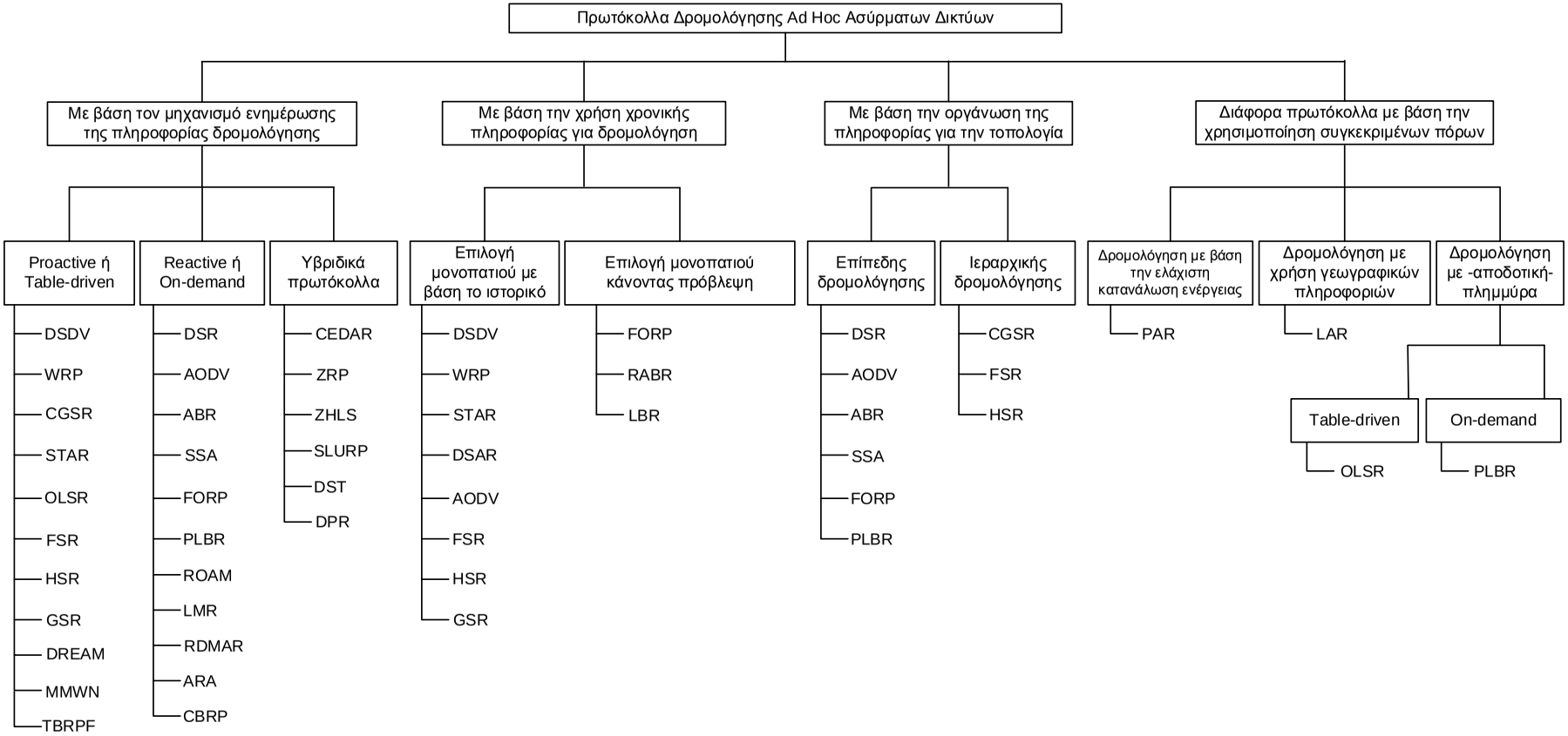
1. **Πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία χρησιμοποιούν παρελθούσα πληροφορία:** Αυτά τα πρωτόκολλα δρομολόγησης, για να αποφασίσουν τις κατάλληλες διαδρομές χρησιμοποιούν πληροφορία για την κατάσταση των ζεύξεων στο παρελθόν ή την κατάσταση των ζεύξεων την στιγμή της δρομολόγησης. Για παράδειγμα, το κριτήριο δρομολόγησης που βασίζεται στην διαθεσιμότητα των ασύρματων ζεύξεων (η οποία εδώ είναι η παρούσα πληροφορία), μαζί με τον αλγόριθμο εύρεσης της συντομότερης διαδρομής, παρέχει ένα μονοπάτι αποδοτικό και σταθερό κατά την διάρκεια της εύρεσης της διαδρομής. Οι αλλαγές στην τοπολογία μπορούν άμεσα να σπάσουν το μονοπάτι, επιβάλλοντας μια διαδικασία αποκατάστασης της διαδρομής ιδιαίτερα δαπανηρή όσον αφορά στους πόρους.
2. **Πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία χρησιμοποιούν μελλοντική πληροφορία:** Τα πρωτόκολλα που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία, για να αποφασίσουν τις κατάλληλες διαδρομές, χρησιμοποιούν πληροφορία για την αναμενόμενη μελλοντική κατάσταση των ασύρματων ζεύξεων. Εκτός από την διάρκεια ζωής των ασύρματων ζεύξεων, η πληροφορία μελλοντικής κατάστασης περιλαμβάνει επίσης πληροφορία σχετικά με την διάρκεια ζωής του κόμβου (η οποία βασίζεται στο υπολειπόμενο φορτίο της μπαταρίας και τον ρυθμό με τον οποίο αδειάζουν οι μη ανανεώσιμοι πόροι), την πρόβλεψη της τοποθεσίας και την πρόβλεψη για την διαθεσιμότητα της ζεύξης.

<u>Κατηγοριοποίηση με βάση την τοπολογία δρομολόγησης</u>

Η τοπολογία δρομολόγησης η οποία χρησιμοποιείται στο Internet είναι ιεραρχική έτσι ώστε να μειωθεί η πληροφορία κατάστασης η οποία διατηρείται στους κεντρικούς δρομολογητές. Τα ad hoc ασύρματα δίκτυα, εξαιτίας του σχετικά μικρότερου αριθμού των κόμβων, μπορούν να χρησιμοποιήσουν είτε επίπεδη τοπολογία ή ιεραρχική.

1 **Πρωτόκολλα δρομολόγησης επίπεδης τοπολογίας:** Τα πρωτόκολλα που εμπίπτουν σε αυτή την κατηγορία χρησιμοποιούν μια επίπεδη μέθοδο διευθυνσιοδότησης παρόμοια με εκείνη που χρησιμοποιείται στα IEEE 802.3 LANs. Υποθέτει την παρουσία ενός γενικά (globally) μοναδικού (ή τουλάχιστον μοναδικού στο συνδεδεμένο μέρος του δικτύου) μηχανισμού διευθυνσιοδότησης για τους κόμβους του ad hoc ασύρματου δικτύου.

2 **Πρωτόκολλα δρομολόγησης ιεραρχικής τοπολογίας:** Τα πρωτόκολλα που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία χρησιμοποιούν την λογική ιεραρχία του δικτύου σε συνδυασμό με μία μέθοδο διευθυνσιοδότησης. Η ιεραρχία θα μπορούσε να βασίζεται στην γεωγραφική πληροφορία ή στην απόσταση των hop.



Εικόνα 5.4 Κατηγοριοποίηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης

Κατηγοριοποίηση με βάση την χρήση ειδικών πόρων

1 **Δρομολόγηση που έχει επίγνωση της ισχύος:** Αυτή η κατηγορία των πρωτοκόλλων δρομολόγησης έχει ως στόχο να μειώσει την κατανάλωση ενός πολύ σημαντικού πόρου των ad hoc ασύρματων δικτύων ο οποίος είναι η ισχύς της μπαταρίας. Οι αποφάσεις για την δρομολόγηση βασίζονται στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος είτε τοπικά ή σε όλο το δίκτυο.
2 **Δρομολόγηση με βοήθεια γεωγραφικής πληροφορίας:** Τα πρωτόκολλα που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία βελτιώνουν την απόδοση της δρομολόγησης και μειώνουν το overhead ελέγχου, χρησιμοποιώντας με αποδοτικό τρόπο την διαθέσιμη γεωγραφική πληροφορία.

TABLE-DRIVEN ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ

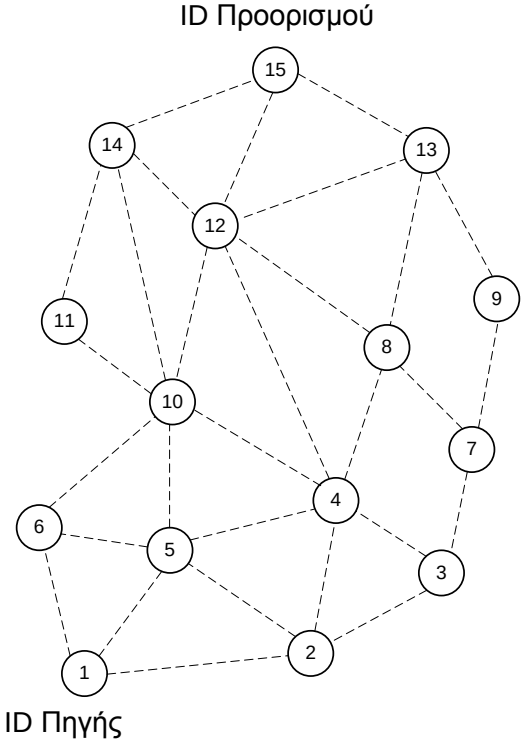
Τα πρωτόκολλα αυτά είναι επεκτάσεις των πρωτοκόλλων δρομολόγησης των ενσύρματων δικτύων. Διατηρούν πληροφορία για την γενική τοπολογία σε κάθε κόμβο υπό την μορφή πινάκων οι οποίοι ενημερώνονται συχνά έτσι ώστε να διατηρούν συνεπής και ακριβή πληροφορία για την κατάσταση του δικτύου. Μερικά παραδείγματα πρωτοκόλλων που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι το destination sequenced distance-vector routing protocol (DSDV), το wireless routing protocol (WRP), το source-tree adaptive routing protocol (STAR) και το cluster-head gateway switch routing protocol (CGSR).

Πρωτόκολλο Destination Sequenced Distance-Vector Routing

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης Destination sequenced distance vector (DSDV) είναι ένα από τα πρώτα πρωτόκολλα τα οποία προτάθηκαν για τα ad hoc ασύρματα δίκτυα. Είναι μια αναβαθμισμένη έκδοση του κατανεμημένου Bellman-Ford αλγόριθμου, όπου κάθε κόμβος διατηρεί ένα πίνακα, ο οποίος περιέχει την συντομότερη διαδρομή και τον πρώτο κόμβο της συντομότερης διαδρομής για κάθε άλλο κόμβο του δικτύου. Ενσωματώνει ενημερώσεις του πίνακα χρησιμοποιώντας μια πινακίδα αυξανόμενου σειριακού αριθμού έτσι ώστε να αποφύγει τον σχηματισμό βρόχων, να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της μέτρησης μέχρι το άπειρο και να συγκλίνει γρηγορότερα.

Καθώς είναι ένα table-driven πρωτόκολλο δρομολόγησης, οι διαδρομές για όλους τους προορισμούς είναι άμεσα διαθέσιμες σε κάθε κόμβο ανά πάσα στιγμή. Οι πίνακες ανταλλάσσονται μεταξύ των γειτόνων σε κανονικά χρονικά διαστήματα έτσι ώστε να διατηρείται μια ενημερωμένη άποψη για την τοπολογία του δικτύου. Επίσης οι πίνακες ανταλλάσσονται και όταν ένας κόμβος παρατηρήσει μια σημαντική αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου. Οι ενημερώσεις των πινάκων είναι δύο τύπων: αυξητικές ενημερώσεις (incremental) και ολοκληρωτικές ενημερώσεις (full dumps). Μια αυξητική

ενημέρωση απαιτεί μια μόνο μονάδα πακέτου δεδομένων δικτύου NDPU (network data packet unit), ενώ η πλήρης ενημέρωση μπορεί να χρειαστεί πολλές NDPUs. Οι αυξητικές ενημερώσεις χρησιμοποιούνται όταν ο κόμβος δεν παρατηρεί σημαντικές αλλαγές στην τοπική τοπολογία. Η πλήρης ενημέρωση γίνεται είτε όταν η τοπική τοπολογία αλλάξει σημαντικά ή όταν η αυξητική ενημέρωση απαιτεί περισσότερες από μία NDPU. Οι ενημερώσεις των πινάκων ξεκινούν από κάποιον προορισμό με καινούριο σειριακό αριθμό ο οποίος είναι πάντα μεγαλύτερος από τον προηγούμενο. Μόλις λάβει έναν ενημερωμένο πίνακα, ένας κόμβος είτε ενημερώνει τους πίνακές του βασιζόμενος στην ληφθείσα πληροφορία ή τον κρατάει για λίγο χρόνο μέχρι να επιλέξει το καλύτερο κριτήριο (metric) (το οποίο μπορεί να είναι ο μικρότερος αριθμός hop), το οποίο λαμβάνεται από πολλές εκδοχές του ίδιου πίνακα ενημέρωσης από διαφορετικούς γειτονικούς κόμβους. Με βάση τον σειριακό αριθμό του, ο πίνακας ενημέρωσης μπορεί να προωθηθεί ή να απορριφθεί. Ας θεωρήσουμε το παράδειγμα της παρακάτω εικόνας (a). Εδώ ο κόμβος 1 είναι ο κόμβος πηγή και ο κόμβος 15 είναι ο προορισμός. Καθώς όλοι οι κόμβοι περιέχουν πληροφορία για την πλήρη τοπολογία η διαδρομή είναι άμεσα διαθέσιμη, όπως φαίνεται και στην εικόνα (b). Εδώ ο πίνακας δρομολόγησης του κόμβου 1 δείχνει ότι η συντομότερη διαδρομή για τον κόμβο προορισμού (κόμβος 15) είναι διαθέσιμη μέσω του κόμβου 5 και η απόσταση προς αυτό είναι 4 hops, όπως απεικονίζεται στην εικόνα (b).



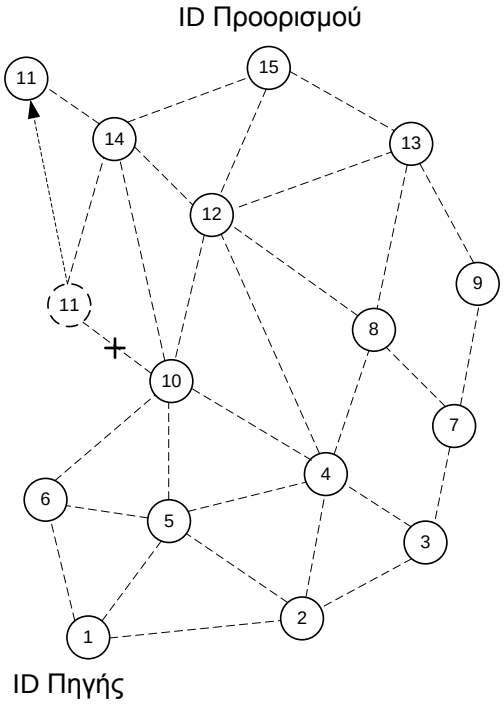
(a) Γράφος της τοπολογίας του δικτύου

Προορισμ	Επόμ. Κόμβος	Απόσταση	Σειριακός Αριθμός
2	2	1	22
3	2	2	26
4	5	2	32
5	5	1	134
6	6	1	144
7	2	3	162
8	5	3	170
9	2	4	186
10	6	2	142
11	6	3	176
12	5	3	190
13	5	4	198
14	6	3	214
15	5	4	256

(b) Πίνακας δρομολόγησης του κόμβου 1

Δημιουργία διαδρομής στο DSDV

Ο επανασχηματισμός της διαδρομής, η οποία χρησιμοποιείται από μια εν εξελίξει συνεδρία μεταφοράς δεδομένων, χειρίζεται από το πρωτόκολλο με τον ακόλουθο τρόπο. Ο τελικός κόμβος της σπασμένης ζεύξης δημιουργεί ένα μήνυμα ενημέρωσης πίνακα με το βάρος της σπασμένης ζεύξης να τίθεται στο άπειρο και με σειριακό αριθμό μεγαλύτερο από τον αποθηκευμένο σειριακό αριθμό που χρησιμοποιείται για αυτόν τον προορισμό. Κάθε κόμβος, λαμβάνοντας ένα μήνυμα ενημέρωσης με βάρος ∞, το διαδίδει γρήγορα στους γείτονές του, έτσι ώστε η πληροφορία για την σπασμένη ζεύξη να εξαπλωθεί σε όλο το δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο, ένα μόνο σπάσιμο ζεύξης οδηγεί στην μετάδοση της πληροφορίας ενημέρωσης του πίνακα σε ολόκληρο το δίκτυο. Ένας κόμβος πάντα θέτει περιττό σειριακό αριθμό στο μήνυμα ενημέρωσης για το σπάσιμο της ζεύξης, έτσι ώστε να το διαχωρίσει από τον άρτιο σειριακό αριθμό ο οποίος παράγεται από τον προορισμό. Ας θεωρηθεί η περίπτωση όπου ο κόμβος 11 μετακινείται από την παρούσα τοποθεσία του, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Όταν ο γειτονικός κόμβος αντιληφθεί το σπάσιμο της ζεύξης, θέτει σε όλα τα μονοπάτια που περνούν από την σπασμένη ζεύξη απόσταση ίση με ∞. Για παράδειγμα, όταν ο κόμβος 10 μάθει για το σπάσιμο της ζεύξης, θέτει την διαδρομή προς τον κόμβο 11 ίση με ∞ και εκπέμπει τον πίνακα δρομολόγησης του στους γείτονες του. Οι γείτονες αυτοί, εντοπίζοντας τις σημαντικές αλλαγές στους πίνακες δρομολόγησης τους τον επανεκπέμπουν στους δικούς τους γείτονες. Με αυτό τον τρόπο, η πληροφορία για την σπασμένη ζεύξη διαδίδεται σε ολόκληρο το δίκτυο. Ο κόμβος 1 επίσης θέτει την απόσταση προς τον κόμβο 11 ίση με ∞. Όταν ο κόμβος 14 λάβει ένα μήνυμα ενημέρωσης του πίνακα από τον κόμβο 11, πληροφορεί τους γείτονες για την συντομότερη διαδρομή προς αυτόν τον κόμβο. Αυτή η πληροφορία διαδίδεται επίσης σε ολόκληρο το δίκτυο. Όλοι οι κόμβοι, λαμβάνοντας το νέο μήνυμα ενημέρωσης με τον μεγαλύτερο σειριακό αριθμό θέτουν την νέα απόσταση προς τον κόμβο 11 στους αντίστοιχους πίνακές τους. Ο ενημερωμένος πίνακας του κόμβου 1 δείχνεται στην παρακάτω εικόνα, όπου η παρούσα απόσταση από τον κόμβο 1 στον κόμβο 11 έχει αυξηθεί από τα τρία στα τέσσερα hops.



(a) Γράφος της τοπολογίας του δικτύου

Προορισμ	Επόμ. Κόμβος	Απόσταση	Σειριακός Αριθμός
2	2	1	22
3	2	2	26
4	5	2	32
5	5	1	134
6	6	1	144
7	2	3	162
8	5	3	170
9	2	4	186
10	6	2	142
11	5	4	180
12	5	3	190
13	5	4	198
14	6	3	214
15	5	4	256

(b) Πίνακας δρομολόγησης του κόμβου 1

Διατήρηση της διαδρομής στο DSDV

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Η διαθεσιμότητα των διαδρομών προς όλους τους προορισμούς ανά πάσα στιγμή συνεπάγεται ότι για την διαδικασία αποκατάστασης μιας διαδρομής απαιτείται πολύ μικρή καθυστέρηση. Ο μηχανισμός αυξητικής ενημέρωσης με πινακίδες σειριακών αριθμών κάνει τα υπάρχοντα πρωτόκολλα για ενσύρματα δίκτυα εύκολα προσαρμόσιμα στα ad hoc ασύρματα δίκτυα. Έτσι, ένα ήδη υπάρχον πρωτόκολλο ενσύρματου δικτύου μπορεί να εφαρμοστεί στα ad hoc ασύρματα δίκτυα με πολύ λιγότερες μετατροπές. Οι ενημερώσεις διαδίδονται σε ολόκληρο το δίκτυο έτσι ώστε να διατηρούν μια ενημερωμένη άποψη για την τοπολογία του δικτύου σε όλους τους κόμβους. Όταν υπάρχει μεγάλη κινητικότητα, οι ενημερώσεις, εξαιτίας των σπασμένων ζεύξεων, παράγουν ένα πολύ βαρύ overhead ελέγχου. Ακόμα και σε ένα μικρό δίκτυο με υψηλή κινητικότητα ή ένα μεγάλο δίκτυο με χαμηλή κινητικότητα, οι ενημερώσεις μπορούν να καταναλώσουν όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Έτσι, αυτό το πρωτόκολλο υποφέρει από υπερβολικό overhead ελέγχου το οποίο είναι ανάλογο με τον αριθμό των κόμβων στο δίκτυο και συνεπώς δεν είναι κατάλληλο για τα ad hoc ασύρματα δίκτυα, τα οποία έχουν περιορισμένο εύρος ζώνης και των οποίων η τοπολογίες είναι ιδιαίτερα δυναμικές. Άλλο ένα μειονέκτημα του DSDV είναι ότι, ένας κόμβος, για να αποκτήσει πληροφορία για ένα συγκεκριμένο κόμβο προορισμού, θα πρέπει να περιμένει να ξεκινήσει ένα μήνυμα ενημέρωσης

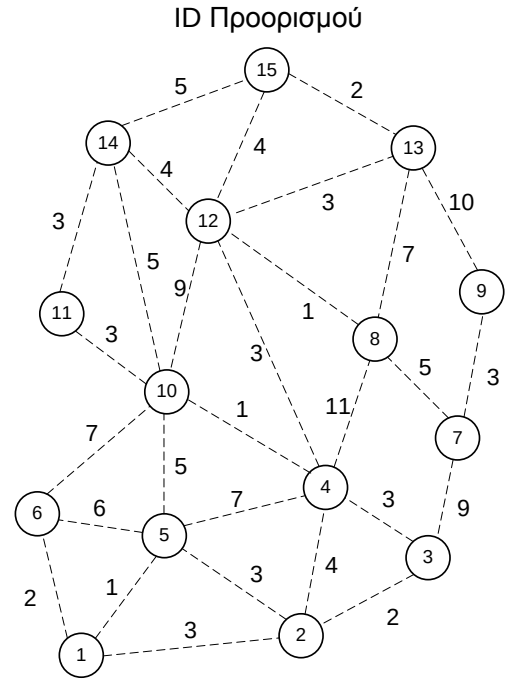
πίνακα από τον ίδιο τον κόμβο προορισμού. Αυτή η καθυστέρηση έχει ως αποτέλεσμα στους κόμβους να υπάρχει μπαγιάτικη πληροφορία δρομολόγησης.

Wireless Routing Protocol

Το Wireless Routing Protocol (WRP), παρόμοια με το DSDV, κληρονομεί τις ιδιότητες του κατανεμημένου Bellman-Ford αλγορίθμου. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα του μετρήματος ως το άπειρο και για να υπάρξει ταχύτερη σύγκλιση, χρησιμοποιεί μια μοναδική μέθοδο για να διατηρεί πληροφορία σχετικά με την συντομότερη διαδρομή προς κάθε κόμβο προορισμού στο δίκτυο και τον κόμβο του προτελευταίου hop στην διαδρομή προς κάθε κόμβο προορισμού. Καθώς το WRP, όπως και το DSDV, διατηρεί μια ενημερωμένη άποψη για το δίκτυο, κάθε κόμβος έχει μια άμεσα διαθέσιμη διαδρομή προς κάθε κόμβο προορισμού του δικτύου. Διαφέρει από το DSDV στον τρόπο που διατηρεί τον πίνακα και στις διαδικασίες ενημέρωσης. Ενώ το DSDV διατηρεί μόνο ένα πίνακα τοπολογίας, το WRP χρησιμοποιεί ένα σύνολο πινάκων για να διατηρεί περισσότερο ακριβή πληροφορία. Οι πίνακες οι οποίοι διατηρούνται από ένα κόμβο είναι οι ακόλουθοι: πίνακας αποστάσεων DT (distance table), πίνακας δρομολόγησης RT (routing table), πίνακας για τα κόστη κάθε ζεύξης LCT (link cost table) και μία λίστα αναμετάδοσης μηνυμάτων MRL (message retransmission list). Ο DT περιέχει την άποψη του δικτύου που έχουν οι γείτονες ενός κόμβου. Περιέχει ένα πίνακα όπου κάθε στοιχείο περιέχει την απόσταση και τον προτελευταίο κόμβο, ο οποίος αναφέρεται από ένα γείτονα για ένα συγκεκριμένο προορισμό. Ο RT περιέχει την ενημερωμένη άποψη του δικτύου για όλους τους γνωστούς προορισμούς. Περιέχει την συντομότερη διαδρομή, τον προηγούμενο κόμβο (προτελευταίος κόμβος), τον διάδοχο κόμβο (ο επόμενος κόμβος για να φτάσει στον προορισμό) και μια σημαία (flag) η οποία δείχνει την κατάσταση της διαδρομής. Η κατάσταση της διαδρομής μπορεί να είναι ένα απλό μονοπάτι (σωστή κατάσταση), ή ένας βρόχος (λανθασμένη κατάσταση) ή ο κόμβος προορισμού να μην είναι σημαδεμένος (μηδενική κατάσταση). Ο LCT περιέχει το κόστος (π.χ., τον αριθμό των hops που απαιτούνται για να φτάσει στον προορισμό) των μεταδιδόμενων μηνυμάτων μέσω κάθε ζεύξης. Το κόστος μιας σπασμένης ζεύξης είναι ίσο με άπειρο. Επίσης περιέχει τον αριθμό των περιόδων ενημέρωσης (που είναι τα διαστήματα ανάμεσα σε δύο διαδοχικές περιοδικές ενημερώσεις) που πέρασαν από την τελευταία επιτυχή ενημέρωση που ελήφθη από αυτή την ζεύξη. Αυτό γίνεται για να ανιχνευτούν οι ρήξεις των ζεύξεων. Η MRL περιέχει μία καταχώριση για κάθε μήνυμα ενημέρωσης το οποίο πρέπει να επαναμεταδοθεί ενώ για κάθε καταχώριση διατηρεί ένα μετρητή. Αυτός ο μετρητής ελαττώνεται μετά από κάθε αναμετάδοση ενός μηνύματος ενημέρωσης. Κάθε μήνυμα ενημέρωσης περιέχει μια λίστα από ενημερώσεις. Επίσης, ένας κόμβος σημαδεύει κάθε κόμβο στον RT ο οποίος πρέπει να επιβεβαιώσει το μήνυμα ενημέρωσης που μετέδωσε. Όταν ο μετρητής φτάσει στο μηδέν, οι καταχωρίσεις του μηνύματος ενημέρωσης για τις οποίες δεν έχει ληφθεί επιβεβαίωση θα πρέπει να επαναμεταδοθούν και το μήνυμα ενημέρωσης διαγράφεται. Έτσι, ένας κόμβος ανιχνεύει την ρήξη μιας ζεύξης από τον αριθμό των περιόδων ενημέρωσης που χάθηκαν από την τελευταία επιτυχή μετάδοση. Μετά από την λήψη ενός μηνύματος ενημέρωσης, ένας κόμβος, όχι μόνο ενημερώνει την απόσταση για τους γείτονες που

μεταδίδει, αλλά ελέγχει επίσης την απόσταση για τους άλλους γείτονες και συνεπώς η σύγκλιση είναι πολύ γρηγορότερη από αυτή του DSDV. Ας θεωρήσουμε το παράδειγμα το οποίο δείχνεται στην παρακάτω εικόνα, όπου η πηγή της διαδρομής είναι ο κόμβος 1 και ο προορισμός είναι ο κόμβος 15. Καθώς το WRP διατηρεί εκ των προτέρων την διαδρομή προς όλες τις κατευθύνσεις, η διαδρομή προς κάθε κατεύθυνση είναι άμεσα διαθέσιμη στον κόμβο πηγή. Από τον πίνακα δρομολόγησης της παρακάτω εικόνας, η διαδρομή από τον κόμβο 1 στον κόμβο 15 έχει ως επόμενο κόμβο τον κόμβο 2. Ο προηγούμενος κόμβος του 15 ο οποίος αντιστοιχεί σε αυτή την διαδρομή είναι ο κόμβος 12. Η προηγούμενη πληροφορία βοηθά το WRP να συγκλίνει γρηγορότερα όταν συμβαίνουν ρήξεις ζεύξεων.

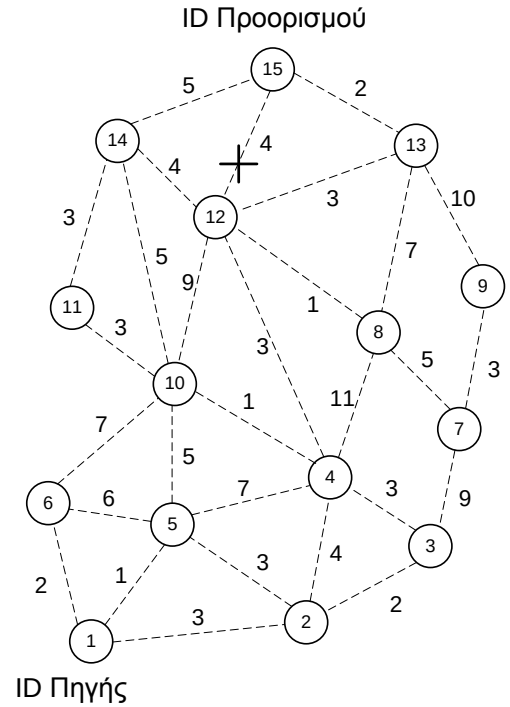
Όταν ένας κόμβος ανιχνεύει την ρήξη μιας ζεύξης, στέλνει ένα μήνυμα ενημέρωσης στον γείτονα του, το οποίο έχει ως κόστος ζεύξης για την σπασμένη ζεύξη ίσο με ∞. Μετά την λήψη του μηνύματος ενημέρωσης, όλοι οι επηρεαζόμενοι κόμβοι ενημερώνουν τις ελάχιστες αποστάσεις τους προς τους αντίστοιχους κόμβους (συμπεριλαμβανομένης και της απόστασης προς τον προορισμό). Ο κόμβος ο οποίος ξεκίνησε το μήνυμα ενημέρωσης βρίσκει, έπειτα, μια εναλλακτική διαδρομή, αν αυτή είναι διαθέσιμη από τον DT του. Αυτή η νέα διαδρομή που υπολογίστηκε δεν θα περιέχει την σπασμένη ζεύξη. Ας θεωρήσουμε το σενάριο που δείχνεται στην παρακάτω εικόνα. Όταν η ζεύξη μεταξύ των κόμβων 12 και 15 σπάσει, όλοι οι κόμβοι οι οποίοι έχουν μια διαδρομή προς τον προορισμό με προηγούμενο τον κόμβο 12, διαγράφουν τις αντίστοιχες καταχωρίσεις δρομολόγησης που έχουν. Τόσο ο κόμβος 12 όσο και ο κόμβος 15 στέλνουν μηνύματα ενημέρωσης στους γείτονές τους υποδεικνύοντας ότι το κόστος της ζεύξης ανάμεσα στους κόμβους 12 και 15 είναι ∞. Αν οι κόμβοι έχουν κάποια άλλη εναλλακτική διαδρομή προς τον κόμβο προορισμού 15, ενημερώνουν τους πίνακες δρομολόγησης τους και υποδεικνύουν την αλλαγμένη διαδρομή στους γείτονές τους στέλνοντας ένα μήνυμα ενημέρωσης. Ένας γειτονικός κόμβος, αφού λάβει ένα μήνυμα ενημέρωσης, ενημερώνει τον πίνακα δρομολόγησης του μόνο αν η καινούρια διαδρομή είναι καλύτερη από τις προηγούμενες υπάρχουσες διαδρομές. Για παράδειγμα, όταν ο κόμβος 12 βρει μια εναλλακτική διαδρομή προς τον προορισμό μέσω του κόμβου 13, εκπέμπει ένα μήνυμα ενημέρωσης το οποίο υποδεικνύει το αλλαγμένο μονοπάτι. Μετά την λήψη του μηνύματος ενημέρωσης από τον κόμβο 12, οι γειτονικοί κόμβοι 8, 14, 15 και 13 δεν αλλάζουν την καταχώριση δρομολόγησης που αντιστοιχεί στον προορισμό 15, ενώ οι κόμβοι 4 και 10 τροποποιούν τις καταχωρίσεις τους έτσι ώστε να συμπεριλαμβάνουν το νέο ενημερωμένο μονοπάτι. Οι κόμβοι 4 και 10 στέλνουν ξανά ένα μήνυμα ενημέρωσης για να υποδείξουν το σωστό μονοπάτι προς τον προορισμό για τους αντίστοιχους γείτονές τους. Όταν ο κόμβος 10 λάβει το μήνυμα ενημέρωσης του κόμβου 4, τροποποιεί και πάλι την καταχώριση δρομολόγησης του έτσι ώστε να βελτιώσει το μονοπάτι προς τον κόμβο προορισμού (15), ενώ ο κόμβος 4 πετά την καταχώριση ενημέρωσης που έλαβε από τον κόμβο 10.



Καταχώριση του πίνακα δρομολόγησης σε κάθε κόμβο για τον προορισμό με ID 15

Κόμβος	Επόμ. Κόμβος	Προηγ. Κόμβος	Κόστος
15	15	15	0
14	15	14	5
13	15	13	2
12	15	12	4
11	14	14	8
10	4	12	8
9	13	13	12
8	12	12	5
7	8	12	10
6	10	12	15
5	10	12	13
4	12	12	10
3	4	12	7
2	4	12	11
1	2	12	14

Δημιουργία διαδρομής στο WRP



Καταχώριση του πίνακα δρομολόγησης σε κάθε κόμβο για τον προορισμό με ID 15

Κόμβος	Επόμ. Κόμβος	Προηγ. Κόμβος	Κόστος
15	15	15	0
14	15	14	5
13	15	13	2
12	15	13	5
11	14	14	8
10	4	13	9
9	13	13	12
8	12	13	6
7	8	13	11
6	10	13	14
5	10	13	14
4	12	13	8
3	4	13	11
2	4	13	12
1	2	13	15

Διατήρηση διαδρομής στο WRP

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Το WRP έχει τα ίδια πλεονεκτήματα με το DSDV. Επιπλέον, συγκλίνει ταχύτερα και χρησιμοποιεί λιγότερες ενημερώσεις για τους πίνακες. Όμως η πολυπλοκότητα της διατήρησης πολλαπλών πινάκων απαιτεί μεγαλύτερη μνήμη και περισσότερη επεξεργαστική ισχύ από τους κόμβους ενός ad hoc ασύρματου δικτύου. Σε καταστάσεις υψηλής κινητικότητας, το overhead ελέγχου λόγω των ενημερώσεων των καταχωρίσεων των πινάκων είναι σχεδόν το ίδιο με αυτό του DSDV και συνεπώς δεν είναι κατάλληλο για ιδιαίτερα δυναμικά και επίσης πολύ μεγάλα ad hoc ασύρματα δίκτυα.

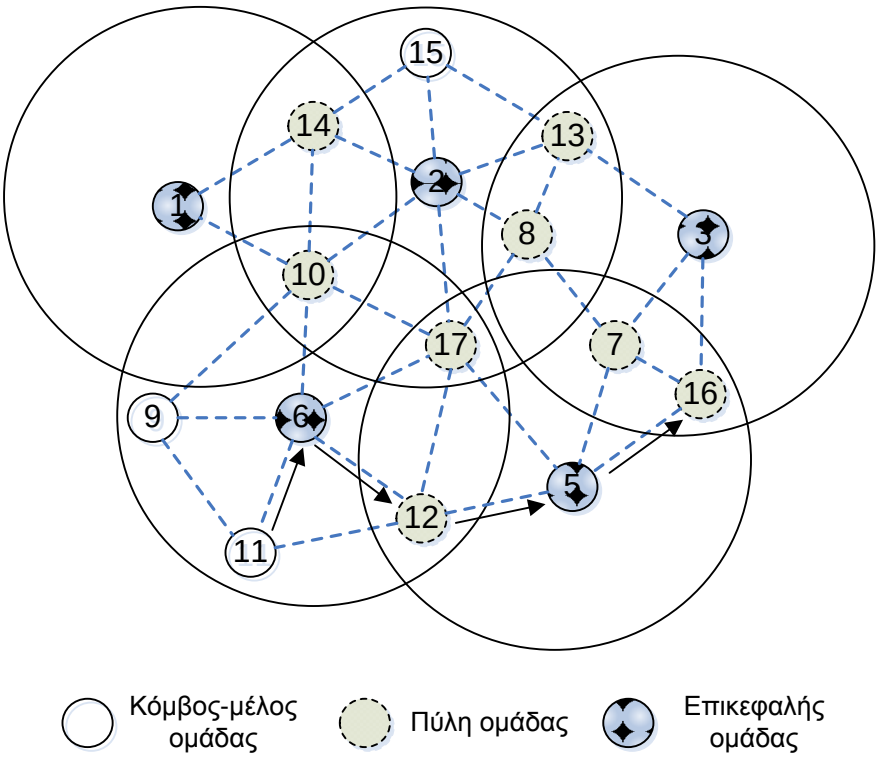
Πρωτόκολλο Cluster-Head Gateway Switch Routing

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης cluster-head gateway switch (CGSR) χρησιμοποιεί ιεραρχική τοπολογία δικτύου, αντίθετα με τα άλλα table-driven πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία χρησιμοποιούν επίπεδες τοπολογίες. Το CGSR οργανώνει τους κόμβους σε ομάδες (clusters) ενώ ο συντονισμός μεταξύ των μελών κάθε ομάδας ανατίθεται σε ένα ειδικό κόμβο ο οποίος ονομάζεται επικεφαλής κόμβος (cluster-head). Ο επικεφαλής κόμβος εκλέγεται δυναμικά, με την βοήθεια του αλγορίθμου least cluster change (LCC). Σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτό, ένας κόμβος παύει να είναι επικεφαλής μόνο αν βρεθεί υπό το εύρος ενός άλλου επικεφαλής κόμβου, όπου επιλέγεται ένας εκ των δύο με βάση τον αλγόριθμο χαμηλότερου ID ή υψηλότερης ικανότητας σύνδεσης. Η ομαδοποίηση παρέχει ένα μηχανισμό ανάθεσης εύρους ζώνης (το οποίο είναι ένας περιορισμένος πόρος) ανάμεσα σε διαφορετικές ομάδες, βελτιώνοντας έτσι την επαναχρησιμοποίηση. Για παράδειγμα, διαφορετικοί επικεφαλείς κόμβοι μπορούν να λειτουργούν σε διαφορετικούς κωδικούς (spreading codes) σε ένα CDMA σύστημα. Μέσα σε μια ομάδα, ο επικεφαλής κόμβος μπορεί να συντονίσει την πρόσβαση στο κανάλι με βάση ένα πρωτόκολλο εκλογής με σκυτάλη. Όλοι οι κόμβοι μέλη της ομάδας απέχουν απόσταση ενός hop από τον επικεφαλής κόμβο, δίνοντας του την δυνατότητα να συντονίζει κατά τον καλύτερο τρόπο τους κόμβους της ομάδας. Ο βασισμένος σε σκυτάλη προγραμματισμός (με ανάθεση της σκυτάλης πρόσβασης στους κόμβους της ομάδας) χρησιμοποιείται εντός της ομάδας για να μοιράζεται το εύρος ζώνης ανάμεσα στα μέλη. Το CGSR υποθέτει ότι όλη η επικοινωνία περνά μέσα από τον επικεφαλής κόμβο. Η επικοινωνία ανάμεσα σε δύο ομάδες γίνεται μέσω των κοινών κόμβων μελών οι οποίοι είναι μέλη και στις δύο ομάδες. Αυτοί οι κόμβοι οι οποίοι είναι μέλη σε περισσότερες από μια ομάδες ονομάζονται πύλες (gateways). Μια πύλη θα πρέπει να είναι ικανή να ακούει σε πολλούς κωδικούς (spreading codes) που βρίσκονται σε λειτουργία στις ομάδες στις οποίες είναι μέλος. Λέγεται ότι συμβαίνει σύγκρουση μιας πύλης, όταν ο κόμβος επικεφαλής δίνει την σκυτάλη σε ένα κόμβο, σε κάποιο συγκεκριμένο κωδικό, ενώ η πύλη είναι συντονισμένη σε κάποιο άλλο κωδικό. Οι πύλες οι οποίες είναι ικανές να επικοινωνούν ταυτόχρονα σε δύο διεπαφές μπορούν να αποφύγουν τις συγκρούσεις.

Η απόδοση της δρομολόγησης επηρεάζεται από τον προγραμματισμό της σκυτάλης και τον προγραμματισμό των κωδικών (η ανάθεση των κατάλληλων κωδικών σε δύο διαφορετικές ομάδες) οι οποίοι διαχειρίζονται από τους επικεφαλής κόμβους και τις πύλες αντίστοιχα. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται στο CGSR είναι μία επέκταση του DSDV. Κάθε κόμβος μέλος διατηρεί ένα πίνακα δρομολόγησης που περιέχει τον επικεφαλής κόμβο προορισμού για κάθε κόμβο του δικτύου. Επίσης, μαζί με τον πίνακα των μελών της ομάδας, κάθε κόμβος διατηρεί ένα πίνακα δρομολόγησης που κρατά τη λίστα των κόμβων του επόμενου hop (next hop nodes) για να φτάσει σε κάθε ομάδα προορισμού. Εδώ χρησιμοποιείται το (ιεραρχικό) πρωτόκολλο δρομολόγησης ομάδας. Σε αυτό το πρωτόκολλο, όταν ένας κόμβος που έχει να μεταδώσει πακέτα σε ένα προορισμό λάβει την σκυτάλη από τον επικεφαλής κόμβο, αποκτά την πληροφορία για τον επικεφαλής κόμβο του προορισμού και τον κόμβο του επόμενου hop από τον πίνακα των μελών της ομάδας και τον πίνακα δρομολόγησης αντίστοιχα. Το CGSR βελτιώνει την απόδοση της δρομολόγησης, δρομολογώντας τα πακέτα μέσω των επικεφαλείς κόμβων και των πυλών. Το μονοπάτι από ένα οποιονδήποτε κόμβο a σε οποιονδήποτε κόμβο b θα μοιάζει ως εξής: a – C_1 - G_1 – C_2 – G_2 - … C_i – G_j… G_n – b, όπου τα G_i και C_j είναι η i-οστή πύλη και ο j-οστός επικεφαλής κόμβος, αντίστοιχα, στο μονοπάτι. Η παρακάτω εικόνα δείχνει τους επικεφαλής κόμβους, τις πύλες της ομάδας και τους κανονικούς κόμβους μέλη της ομάδας σε ένα ad hoc ασύρματο δίκτυο. Ένα μονοπάτι ανάμεσα στον κόμβο 11 και στον κόμβο 16 θα ακολουθούσε την διαδρομή 11 – 6 – 12 – 5 – 16. Καθώς οι επικεφαλής κόμβοι έχουν περισσότερες ευκαιρίες να μεταδώσουν, μπορούν, μέσω ενός μηχανισμού δυναμικού προγραμματισμού, να κάνουν το CGSR να έχει καλύτερη απόδοση όσον αφορά την καθυστέρηση για ροές πραγματικού χρόνου. Ο ανασχηματισμός των διαδρομών επιβάλλεται για δύο λόγους κυρίως: πρώτος είναι η αλλαγή του επικεφαλής κόμβου και δεύτερος είναι οι μπαγιάτικες καταχωρίσεις στον πίνακα των μελών της ομάδας και στον πίνακα δρομολόγησης. Το CGSR βασίζεται στον μηχανισμό ενημέρωσης των πινάκων έτσι ώστε να επιλύσει το τελευταίο πρόβλημα, ενώ το πρώτο επιλύεται από τον αλγόριθμο least cluster change.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Το CGSR είναι μια ιεραρχική μέθοδος δρομολόγησης η οποία χρησιμοποιεί μερικό συντονισμό ανάμεσα στους κόμβους, εκλέγοντας επικεφαλείς κόμβους. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η καλύτερη διαχείριση του εύρους ζώνης. Επίσης είναι εύκολη η υλοποίηση σχημάτων προγραμματισμού προτεραιοτήτων με προγραμματισμό σκυτάλης (token scheduling) και προγραμματισμό των κόμβων πυλών (gateway node scheduling). Τα κύρια μειονεκτήματα του CGSR είναι η αύξηση του μήκους του μονοπατιού και η αστάθεια του συστήματος σε κατάσταση υψηλής κινητικότητας όπου ο ρυθμός αλλαγής των επικεφαλείς κόμβων είναι υψηλός. Για να αποφευχθούν οι συγκρούσεις στις πύλες απαιτούνται περισσότεροι πόροι (όπως για παράδειγμα επιπρόσθετες διεπαφές). Η κατανάλωση ισχύος από έναν επικεφαλής κόμβο είναι επίσης ένα ενδιαφέρον θέμα καθώς ο ρυθμός κατανάλωσης της μπαταρίας στον επικεφαλής κόμβο είναι πολύ υψηλότερη απ’ ότι σε ένα κανονικό κόμβο. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε συχνές αλλαγές στους επικεφαλής κόμβους, γεγονός που μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα πολλές ρήξεις διαδρομών.



Δημιουργία διαδρομής στο CGSR

Πρωτόκολλο Source-Tree Adaptive Routing

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης Source-tree adaptive (STAR), το οποίο προτάθηκε από τους Garcia-Luna-Aceves και Spohn είναι μια παραλλαγή των table-driven πρωτοκόλλων δρομολόγησης, η οποία βασίζεται στην προσέγγιση LORA (least overhead routing approach) αντί της προσέγγισης ORA (optimum routing approach) η οποία χρησιμοποιήθηκε από τα πρώτα table-driven πρωτόκολλα δρομολόγησης. Τα πρωτόκολλα ORA προσπαθούν να ενημερώσουν την πληροφορία δρομολόγησης αρκετά γρήγορα έτσι ώστε να παρέχουν τις βέλτιστες διαδρομές αναφορικά με το καθορισμένο κριτήριο (το οποίο μπορεί να είναι ο ελάχιστος αριθμός των hops), ενώ με το LORA, το πρωτόκολλο δρομολόγησης προσπαθεί να παρέχει εφικτές διαδρομές, οι οποίες δεν είναι εγγυημένο ότι είναι οι βέλτιστες, ωστόσο έχουν πολύ μικρότερο overhead ελέγχου. Στο πρωτόκολλο STAR, κάθε κόμβος εκπέμπει την πληροφορία source-tree. Η πληροφορία source-tree ενός κόμβου αποτελείται από τις ασύρματες ζεύξεις οι οποίες χρησιμοποιούνται από τον κόμβο στα προτιμώμενα μονοπάτια που έχει για κάποιους προορισμούς. Κάθε κόμβος, χρησιμοποιώντας τις γειτονικές του ζεύξεις και την

εκπομπή πληροφορίας source-tree από τους γείτονες του, δημιουργεί ένα μερικό γράφο της τοπολογίας. Κατά την έναρξη, ένας κόμβος στέλνει ένα μήνυμα ενημέρωσης στους γείτονές του. Επίσης, κάθε κόμβος θα πρέπει να δημιουργήσει μηνύματα ενημέρωσης για καινούριες διαδρομές, για το ενδεχόμενο βρόχων δρομολόγησης και για το κόστος των διαδρομών που υπερβαίνουν ένα δεδομένο κατώφλι. Έτσι, κάθε κόμβος θα έχει μια διαδρομή προς κάθε κόμβο προορισμού. Το μονοπάτι, στις περισσότερες περιπτώσεις δεν θα είναι το βέλτιστο.

Υπό την απουσία ενός αξιόπιστου μηχανισμού εκπομπής στο στρώμα ζεύξης, το STAR χρησιμοποιεί την ακόλουθη προσέγγιση εύρεσης διαδρομής. Όταν ένας κόμβος s έχει να στείλει πακέτα σε ένα συγκεκριμένο προορισμό d, για τον οποίο δεν υπάρχει μονοπάτι στην source-tree πληροφορία που διαθέτει, δημιουργεί ένα μήνυμα ενημέρωσης το οποίο στέλνει σε όλους τους γείτονες του και τους υποδεικνύει την απουσία μιας διαδρομής προς τον d. Αυτό το μήνυμα ενημέρωσης πυροδοτεί άλλο ένα μήνυμα ενημέρωσης από ένα γείτονα ο οποίος έχει ένα μονοπάτι προς τον d. Ο κόμβος s αναμεταδίδει το μήνυμα ενημέρωσης όσο δεν έχει ένα μονοπάτι προς τον d, με αυξανόμενα διαστήματα ανάμεσα σε διαδοχικές αναμεταδόσεις. Αφού πάρει την πληροφορία ενημέρωσης source-tree από ένα γείτονα, ο κόμβος s ενημερώνει το δικό του source-tree και χρησιμοποιώντας αυτό, βρίσκει μια διαδρομή προς όλους τους κόμβους του δικτύου. Το πακέτο δεδομένων περιέχει πληροφορία για την διαδρομή την οποία θα πρέπει να διασχίσει έτσι ώστε να εμποδίσει τον σχηματισμό ενός βρόχου δρομολόγησης.

Υπό την παρουσία ενός αξιόπιστου μηχανισμού εκπομπής, το STAR υποθέτει απόλυτη διατήρηση της διαδρομής. Το μήνυμα ενημέρωσης της ζεύξης για την μη διαθεσιμότητα του κόμβου του επόμενου hop πυροδοτεί ένα μήνυμα ενημέρωσης από ένα γείτονα ο οποίος έχει μια εναλλακτική πληροφορία source-tree με την οποία υποδεικνύει ένα εναλλακτικό κόμβο του επόμενου hop προς τον προορισμό. Μαζί με τις ρήξεις των ζεύξεων, οι ενδιάμεσοι κόμβοι είναι υπεύθυνοι στην διαχείριση των βρόχων δρομολόγησης. Όταν ένας ενδιάμεσος κόμβος k λάβει ένα πακέτο δεδομένων για τον προορισμό d και ένας από τους κόμβους στο μονοπάτι που διασχίζει το πακέτο, είναι παρών στο μονοπάτι του κόμβου k προς τον προορισμό d, απορρίπτει το πακέτο και στέλνεται με αξιόπιστο τρόπο ένα μήνυμα ενημέρωσης RouteRepair στον κόμβο που βρίσκεται στην αρχή του μονοπατιού αποκατάστασης διαδρομής (route repair path). Το μονοπάτι αποκατάστασης διαδρομής αντιστοιχεί στο μονοπάτι από τον k προς τον x, όπου ο x είναι ο τελευταίος δρομολογητής στο μονοπάτι που διασχίζει το πακέτο δεδομένων ο οποίος είναι ο πρώτος που βρίσκεται στο μονοπάτι από τον k στον d, που ανήκει στο source tree του k. Το πακέτο RouteRepair περιέχει το πλήρες source-tree του κόμβου k κα το μονοπάτι που διασχίζει το πακέτο.

Όταν ένας ενδιάμεσος κόμβος λάβει ένα μήνυμα ενημέρωσης RouteRepair, βγάζει τον εαυτό του από την κορυφή του μονοπατιού αποκατάστασης διαδρομής και το στέλνει με αξιόπιστο τρόπο στην κεφαλή του μονοπατιού αποκατάστασης διαδρομής.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Το STAR έχει πολύ χαμηλό overhead επικοινωνίας σχετικά με τα υπόλοιπα table-driven πρωτόκολλα δρομολόγησης. Επίσης η χρήση της προσέγγισης LORA μειώνει το μέσο overhead ελέγχου σε σύγκριση με τα άλλα on-demand πρωτόκολλα δρομολόγησης.

Άλλα Table-Driven Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούν συνοπτικά μερικά ακόμα λιγότερο σημαντικά table-driven πρωτόκολλα δρομολόγησης.

Πρωτόκολλο Global State Routing

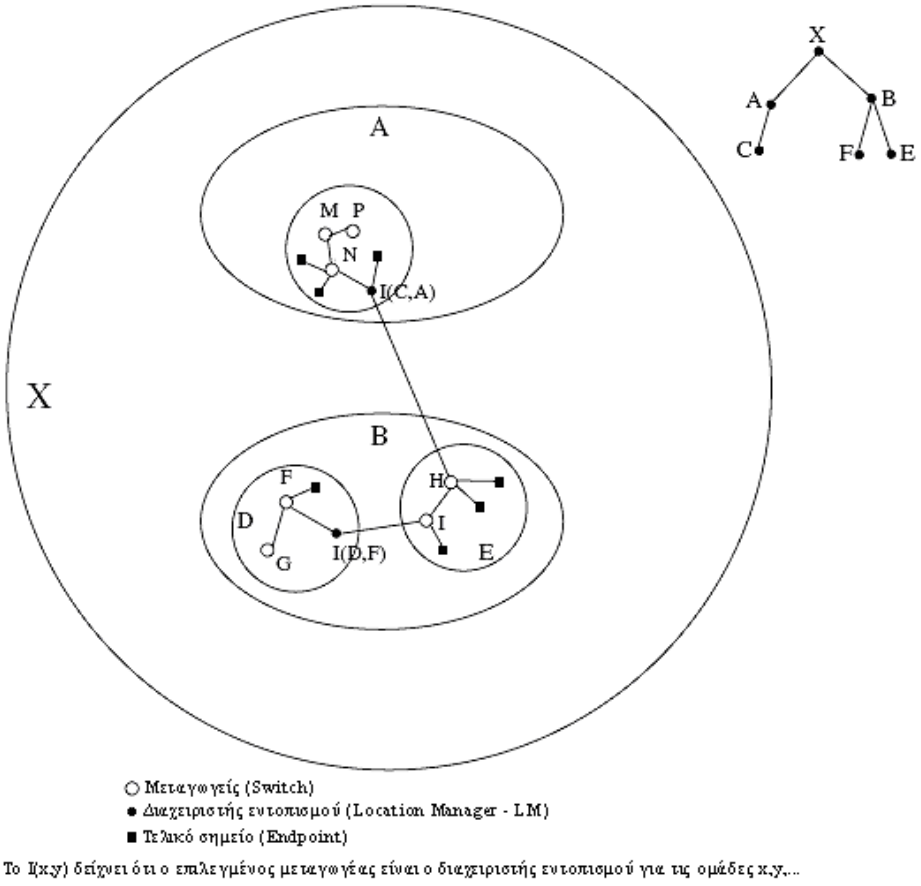
Το πρωτόκολλο GSR βασίζεται στον παραδοσιακό αλγόριθμο κατάστασης ζεύξεων (Link State algorithm). Παρόλα αυτά, το GSR έχει βελτιώσει τον τρόπο με τον οποίο διαδίδεται η πληροφορία στον αλγόριθμο κατάστασης ζεύξεων,περιορίζοντας τα μηνύματα ενημέρωσης μόνο μεταξύ των ενδιάμεσων κόμβων. Στο GSR, κάθε κόμβος διατηρεί ένα πίνακα κατάστασης ζεύξεων, ο οποίος βασίζεται στην ενημερωμένη πληροφορία την οποία πήρε από τους γειτονικούς κόμβους και περιοδικά ανταλλάσσει την πληροφορία αυτή μόνο με τους γειτονικούς κόμβους. Αυτό μειώνει σημαντικά τον αριθμό των μηνυμάτων ελέγχου τα οποία μεταδίδονται στο δίκτυο. Παρόλα αυτά, το μέγεθος των μηνυμάτων ενημέρωσης είναι σχετικά μεγάλο και καθώς το μέγεθος του δικτύου αυξάνει, αυτά γίνονται ακόμα μεγαλύτερα. Έτσι, ένα μεγάλο μέρος του εύρους ζώνης καταναλώνεται από τέτοια μηνύματα ενημέρωσης.

Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM)

Στο DREAM, κάθε κόμβος γνωρίζει τις γεωγραφικές συντεταγμένες του μέσω ενός GPS. Αυτές οι συντεταγμένες ανταλλάσσονται περιοδικά μεταξύ των κόμβων και αποθηκεύονται σε ένα πίνακα δρομολόγησης (ο οποίος αποκαλείται πίνακας εντοπισμού – location table). Το πλεονέκτημα της ανταλλαγής πληροφοριών τοποθεσίας είναι ότι καταναλώνεται σημαντικά λιγότερο εύρος ζώνης, απ' ότι αν γινόταν ανταλλαγή της πλήρους πληροφορίας κατάστασης ζεύξεων ή διανύσματος αποστάσεων. Αυτό κάνει το πρωτόκολλο πολύ περισσότερο αποδοτικό και ευέλικτο. Επίσης, στο DREAM το overhead δρομολόγησης μειώνεται ακόμη περισσότερο, σχετίζοντας την συχνότητα διάδοσης των μηνυμάτων ενημέρωσης με την κινητικότητα και την απόσταση. Αυτό σημαίνει ότι οι στατικοί κόμβοι δεν χρειάζεται να στείλουν καθόλου μηνύματα ενημέρωσης.

Multimedia support in mobile Wireless Networks (MMWN)

Στο πρωτόκολλο αυτό το δίκτυο λειτουργεί χρησιμοποιώντας μια ιεραρχία συστάδων (clustering hierarchy). Κάθε συστάδα έχει δύο τύπους κινητών κόμβων: μεταγωγείς (switches) και τελικά σημεία (endpoints). Επίσης σε κάθε συστάδα βρίσκεται ένας διαχειριστής εντοπισμού (Location Manager - LM), ο οποίος διαχειρίζεται την τοποθεσία κάθε συστάδας (βλ. παρακάτω εικόνα). Στο MMWN όλες οι πληροφορίες αποθηκεύονται σε μία δυναμικά κατανεμημένη βάση δεδομένων.



Παράδειγμα της ιεραρχίας των συστάδων στο πρωτόκολλο MMWN

Το πλεονέκτημα του MMWN είναι ότι μόνο οι LMs κάνουν ενημέρωση και εύρεση τοποθεσίας, πράγμα που σημαίνει ότι το overhead δρομολόγησης είναι σημαντικά μειωμένο συγκρινόμενο με τους παραδοσιακούς αλγόριθμους οι οποίοι καθοδηγούνται από πίνακες (table driven algorithms) (όπως είναι ο DSDV και ο WRP). Ωστόσο, η διαχείριση εντοπισμού έχει ιδιαίτερη σχέση με την ιεραρχική δομή του δικτύου, γεγονός που κάνει την εύρεση και ενημέρωση τοποθεσίας ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία. Αυτό συμβαίνει διότι, κατά την διαδικασία εύρεσης και ενημέρωσης της τοποθεσίας, τα μηνύματα θα πρέπει να ταξιδέψουν μέσα από το ιεραρχικό δέντρο των LMs. Επιπλέον, οι αλλαγές στα LM της κάθε συστάδας επηρεάζουν το ιεραρχικό δέντρο διαχείρισης

περιπλέκοντας ακόμα περισσότερο την κατάσταση. Αυτό το χαρακτηριστικό θέτει προβλήματα υλοποίησης τα οποία είναι δύσκολο να ξεπεραστούν.

Topology Broadcast Reverse Path Forwarding (TBRPF)

Το TBPRF είναι άλλο ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο βασίζεται στον αλγόριθμο κατάστασης ζεύξεων και το οποίο πραγματοποιεί δρομολόγηση κατά ένα βήμα (hop-by-hop). Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί την ιδέα της προώθησης στην αντίθετη διαδρομή (reverse-path forwarding - RPF) έτσι ώστε να διαδώσει τα πακέτα ενημέρωσης στην αντίθετη κατεύθυνση κατά μήκος του spanning tree, το οποίο δημιουργείται από το μονοπάτι ελαχίστου βήματος (minimum-hop path) των κόμβων οι οποίοι οδηγούν στην πηγή του μηνύματος ενημέρωσης. Σε αυτή την στρατηγική δρομολόγησης, κάθε κόμβος υπολογίζει ένα δέντρο πηγή (source tree), το οποίο δίνει ένα μονοπάτι για όλους τους δυνατούς προορισμούς. Αυτό γίνεται εφαρμόζοντας μία τροποποιημένη εκδοχή του αλγόριθμου του Dijkstra στην πληροφορία μερικής τοπολογίας η οποία είναι αποθηκευμένη στον πίνακα τοπολογίας που έχουν. Στο TBPRF, κάθε κόμβος ελαχιστοποιεί το overhead αναφέροντας μόνο ένα μέρος του δέντρου πηγής του στους γείτονες του. Το μέρος κάθε δέντρου πηγής το οποίο αναφέρεται, ανταλλάσσεται με τους γειτονικούς κόμβους μέσω περιοδικών και έκτακτων hello μηνυμάτων. Τα έκτακτα hello μηνύματα αναφέρουν μόνο τις αλλαγές στην κατάσταση των γειτονικών κόμβων. Ως αποτέλεσμα, τα hello μηνύματα στο TBPRF είναι μικρότερα απ' ότι στα πρωτόκολλα τα οποία αναφέρουν την πλήρη πληροφορία κατάστασης ζεύξεων.

ON-DEMAND ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ

Αντίθετα με τα table-driven πρωτόκολλα δρομολόγησης, τα on-demand πρωτόκολλα εκτελούν την διαδικασία εύρεσης διαδρομής και την ανταλλαγή πληροφοριών δρομολόγησης μόνο κατά την στιγμή που ένας κόμβος που θέλει να επικοινωνήσει με ένα προορισμό απαιτεί μια διαδρομή. Σε αυτή την ενότητα θα εξεταστούν λεπτομερώς μερικά από τα υπάρχοντα on-demand πρωτόκολλα δρομολόγησης.

Πρωτόκολλο Dynamic Source Routing (DSR)

Το πρωτόκολλο Dynamic Source Routing (DSR) είναι ένα on-demand πρωτόκολλο το οποίο σχεδιάστηκε για να περιορίσει το εύρος ζώνης που καταναλώνεται από τα πακέτα ελέγχου, εξαλείφοντας τα περιοδικά μηνύματα ενημέρωσης των πινάκων, τα οποία απαιτούνται στην table-driven προσέγγιση.

Η βασική διαφορά ανάμεσα σε αυτό και τα άλλα on-demand πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι ότι λειτουργεί χωρίς σηματοδοσία (beacon-less) και έτσι δεν απαιτεί μεταδόσεις περιοδικών hello πακέτων (beacon), τα οποία χρησιμοποιούνται από ένα κόμβο για να πληροφορήσει τους γείτονες

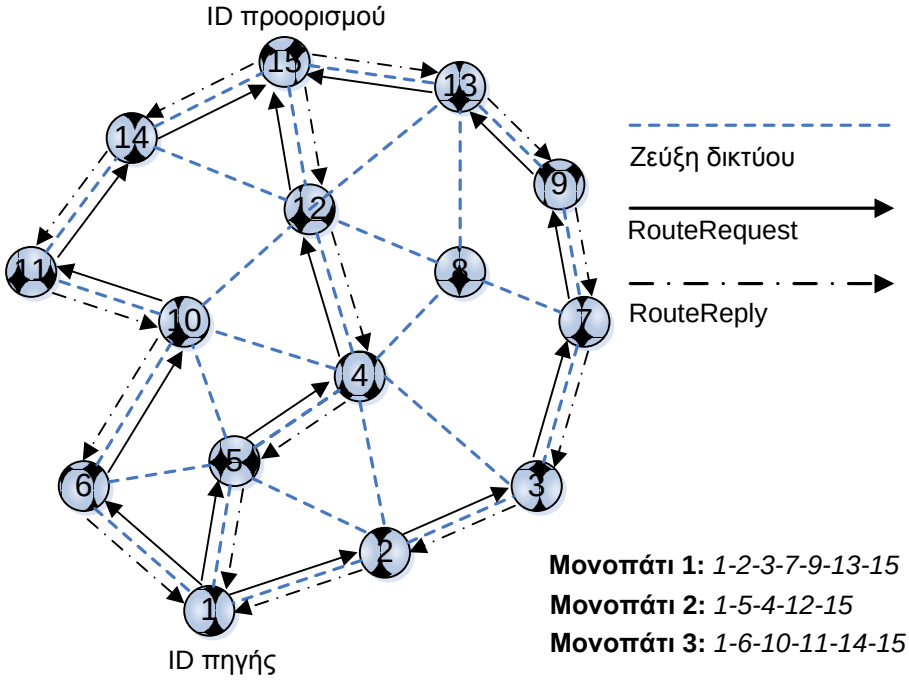
του για την παρουσία του. Η βασική προσέγγιση αυτού του πρωτοκόλλου (και όλων των άλλων on-demand πρωτοκόλλων δρομολόγησης) είναι ότι κατά την φάση κατασκευής της διαδρομής πλημμυρίζει το δίκτυο με πακέτα RouteRequest. Ο κόμβος προορισμού, λαμβάνοντας ένα πακέτο RouteRequest, αποκρίνεται στέλνοντας ένα πακέτο RouteReply πίσω στην πηγή, το οποίο μεταφέρει την διαδρομή που διέσχισε το πακέτο RouteRequest που έλαβε.

Ας θεωρήσουμε ένα κόμβο πηγή ο οποίος δεν έχει ένα μονοπάτι προς κάποιο προορισμό. Όταν έχει πακέτα δεδομένων για να στείλει στον προορισμό αυτό, δημιουργεί ένα πακέτο RouteRequest. Με αυτό το πακέτο RouteRequest πλημμυρίζει ολόκληρο το δίκτυο. Κάθε κόμβος, λαμβάνοντας ένα πακέτο RouteRequest, μεταδίδει το πακέτο στους γείτονές του αν δεν έχει ήδη προωθηθεί ή αν ο κόμβος δεν είναι ο κόμβος προορισμού, δεδομένου ότι δεν έχει λήξει ο χρόνος ζωής του πακέτου (TTL). Κάθε πακέτο RouteRequest μεταφέρει ένα σειριακό αριθμό ο οποίος παράγεται από τον κόμβο πηγή και από το μονοπάτι που διέσχισε. Ένας κόμβος που λαμβάνει ένα πακέτο RouteRequest, πριν το προωθήσει ελέγχει τον σειριακό του αριθμό. Το πακέτο προωθείται μόνο αν δεν υπάρχει άλλο αντίγραφο του ίδιου πακέτου. Ο σειριακός αριθμός του πακέτου χρησιμοποιείται για να αποτρέψει τον σχηματισμό βρόχων και για να εμποδίσει πολλαπλές αναμεταδόσεις του ίδιου πακέτου RouteRequest από έναν ενδιάμεσο κόμβο ο οποίος το λαμβάνει από πολλαπλές διαδρομές. Έτσι, κατά την φάση της κατασκευής μιας διαδρομής, όλοι οι κόμβοι εκτός από τον προορισμό προωθούν το πακέτο RouteRequest. Ο κόμβος προορισμού μετά από την λήψη του πρώτου πακέτου RouteRequest, απαντά στον κόμβο πηγή μέσω της αντίστροφης διαδρομής που διέσχισε το πακέτο RouteRequest. Στην παρακάτω εικόνα, ο κόμβος πηγή 1 δημιουργεί ένα πακέτο RouteRequest για να αποκτήσει ένα μονοπάτι για τον κόμβο προορισμού 15. Αυτό το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί μια προσωρινή μνήμη (cache) διαδρομών όπου αποθηκεύει όλη την πιθανή πληροφορία που εξάγεται από την πληροφορία της διαδρομής από την πηγή η οποία περιέχεται στο πακέτο δεδομένων. Οι κόμβοι μπορούν επίσης να μάθουν για τις γειτονικές διαδρομές οι οποίες διασχίζονται από τα πακέτα δεδομένων αν λειτουργούν με ανομοιογενή τρόπο (promiscuous mode) (είναι η κατάσταση λειτουργίας στην οποία ένας κόμβος μπορεί να λάβει πακέτα τα οποία δεν εκπέμπονται ούτε απευθύνονται προς αυτόν). Αυτή η προσωρινή μνήμη χρησιμοποιείται επίσης και κατά την φάση κατασκευής μιας διαδρομής. Αν ένας ενδιάμεσος κόμβος που λαμβάνει ένα πακέτο RouteRequest έχει μια διαδρομή προς τον κόμβο προορισμού στην δική του προσωρινή μνήμη διαδρομών, απαντά στον κόμβο πηγή στέλνοντας του ένα πακέτο RouteReply με ολόκληρη την πληροφορία δρομολόγησης από τον κόμβο πηγή μέχρι τον κόμβο προορισμού.

Βελτιστοποιήσεις

Για να βελτιωθεί η απόδοση, στο βασικό DSR πρωτόκολλο έχουν ενσωματωθεί διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης. Το DSR χρησιμοποιεί την προσωρινή μνήμη διαδρομών στους ενδιάμεσους κόμβους. Η προσωρινή μνήμη περιέχει διαδρομές οι οποίες μπορούν να εξαχθούν από την πληροφορία η οποία περιέχεται στα πακέτα δεδομένων που προωθούνται. Αυτή η πληροφορία της μνήμης χρησιμοποιείται από τους ενδιάμεσους κόμβους έτσι ώστε να απαντήσουν στην πηγή όταν λάβουν ένα πακέτο RouteRequest και αν έχουν μια διαδρομή προς τον αντίστοιχο προορισμό.

Λειτουργώντας με ανομοιογενή τρόπο (promiscuous mode), ο ενδιάμεσος κόμβος μπορεί να μάθει για τις ρήξεις των ζεύξεων. Έτσι, η πληροφορία που αποκτάται, χρησιμοποιείται για να ενημερώσει την προσωρινή μνήμη διαδρομών έτσι ώστε οι ενεργές διαδρομές που διατηρεί στην μνήμη να μην περιλαμβάνουν σπασμένες ζεύξεις. Όταν το δίκτυο υπόκειται σε κατατμήσεις, οι επηρεαζόμενοι κόμβοι δημιουργούν πακέτα RouteRequest. Όταν ο κόμβος προορισμού βρίσκεται σε ένα άλλο μέρος του δικτύου χρησιμοποιείται ένας backoff εκθετικός αλγόριθμος έτσι ώστε να αποφευχθούν το συχνό πλημμύρισμα του δικτύου με πακέτα RouteRequest. Το DSR επίσης επιτρέπει την μεταφορά ενός πακέτου δεδομένων μέσα σε ένα πακέτο RouteRequest (piggy-backing) έτσι ώστε το πακέτο δεδομένων να στέλνεται μαζί με το πακέτο RouteRequest.

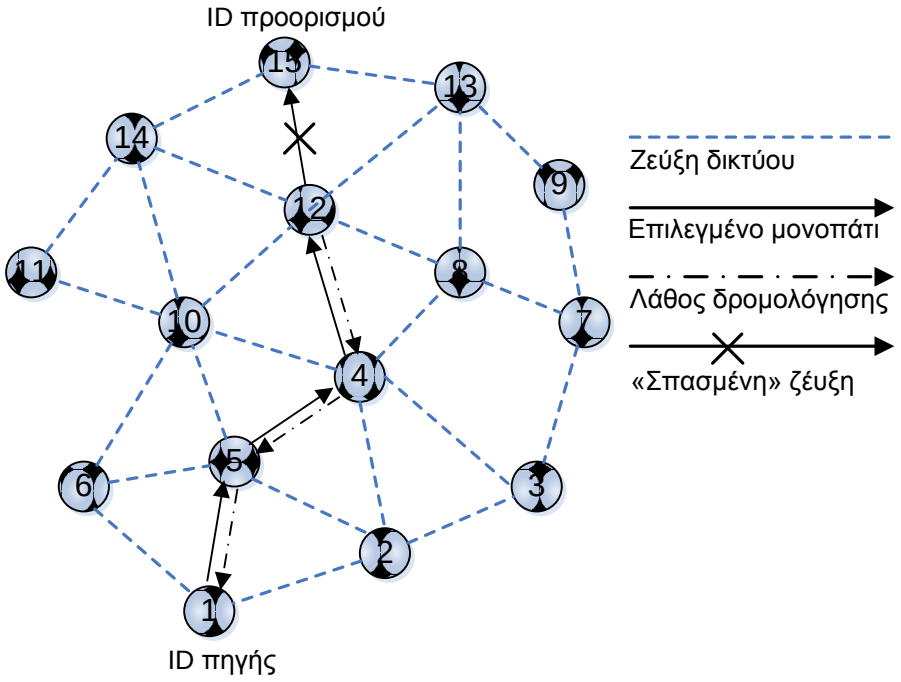


Δημιουργία διαδρομής στο DSR

Αν δεν επιτρέπεται κάποια βελτιστοποίηση στο πρωτόκολλο DSR, η φάση της δημιουργίας μια διαδρομής είναι πολύ απλή. Όλοι οι ενδιάμεσοι κόμβοι πλημμυρίζουν το δίκτυο με το πακέτο RouteRequest αν αυτό δεν είναι πλεονάζων. Για παράδειγμα, μετά την λήψη του πακέτου RouteRequest από τον κόμβο 1 (βλ. παρακάτω εικόνα), όλοι οι γειτονικοί του κόμβοι, δηλαδή οι κόμβοι 2, 5, και 6, το προωθούν. Ο κόμβος 4 λαμβάνει το πακέτο RouteRequest τόσο από τον κόμβο 2 όσο και από τον 5 και έτσι προωθεί το πρώτο πακέτο RouteRequest που λαμβάνει από έναν εκ των 2 και 5, απορρίπτοντας το πακέτο που περισσεύει. Το πακέτο RouteRequest διαδίδεται μέχρις ότου φτάσει τον προορισμό, ο οποίος δημιουργεί το πακέτο RouteReply. Αν υπάρχει βελτιστοποίηση και οι ενδιάμεσοι κόμβοι επιτρέπεται να δημιουργούν πακέτα RouteReply, ο κόμβος πηγή μπορεί να λάβει πολλαπλές απαντήσεις από τους ενδιάμεσους κόμβους. Για παράδειγμα, στην παρακάτω εικόνα, αν ο

ενδιάμεσος κόμβος 10 έχει μια διαδρομή προς τον προορισμό μέσω του κόμβου 14, στέλνει επίσης ένα πακέτο RouteReply στον κόμβο πηγή. Ο κόμβος πηγή επιλέγει την τελευταία και καλύτερη διαδρομή και την χρησιμοποιεί για να στείλει πακέτα δεδομένων. Κάθε πακέτο δεδομένων μεταφέρει το πλήρες μονοπάτι προς τον προορισμό του.

Όταν ένας ενδιάμεσος κόμβος του μονοπατιού αλλάζει θέση προκαλώντας ρήξη στην ασύρματη ζεύξη, όπως για παράδειγμα στην ζεύξη ανάμεσα στους κόμβους 12 και 15 της εικόνας 5.12, δημιουργείται ένα μήνυμα RouteError από τον κόμβο ο οποίος είναι δίπλα στην σπασμένη ζεύξη έτσι ώστε να ενημερώσει την πηγή. Ο κόμβος πηγή ξαναρχίζει την διαδικασία αποκατάστασης της διαδρομής. Όταν ληφθεί ένα πακέτο RouteError, οι καταχωρίσεις που βρίσκονται στην μνήμη των ενδιάμεσων κόμβων και στον κόμβο πηγή σβήνονται. Ο κόμβος πηγή αρχίζει την διαδικασία εύρεσης διαδρομής και όταν σπάσει μια ζεύξη εξαιτίας της κίνησης των ακραίων κόμβων (κόμβοι 1 και 15).



Διατήρηση διαδρομής στο DSR

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Το πρωτόκολλο αυτό χρησιμοποιεί μια reactive προσέγγιση η οποία εξαλείφει την ανάγκη περιοδικής πλημμύρας του δικτύου με μηνύματα ενημέρωσης πινάκων τα οποία απαιτούνται στην table-driven προσέγγιση. Σε μια reactive (on-demand) προσέγγιση όπως αυτή, μια διαδρομή αποκαθίσταται μόνο όταν απαιτείται και έτσι εξαλείφεται η ανάγκη εύρεσης διαδρομών προς όλους τους άλλους κόμβους του δικτύου όπως γίνεται στην table-driven προσέγγιση. Επίσης, οι ενδιάμεσοι κόμβοι αξιοποιούν την

πληροφορία της προσωρινής μνήμης διαδρομών αποδοτικά, έτσι ώστε να μειώσουν το overhead ελέγχου. Το μειονέκτημα αυτού του πρωτοκόλλου είναι ότι ο μηχανισμός διατήρησης διαδρομών δεν μπορεί να αποκαταστήσει τοπικά μια σπασμένη ζεύξη. Επίσης, κατά την φάση της ανακατασκευής μια διαδρομής, οι μπαγιάτικες πληροφορίες της μνήμης μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα ασταθή συμπεριφορά. Η καθυστέρηση αποκατάστασης σύνδεσης είναι υψηλότερη απ' ότι στα table-driven πρωτόκολλα. Αν και το πρωτόκολλο έχει καλή συμπεριφορά σε στατικά και χαμηλής κίνησης περιβάλλοντα, η απόδοση μειώνεται ραγδαία καθώς αυξάνει η κινητικότητα. Επίσης, εξαιτίας του μηχανισμού δρομολόγησης πηγής (source-routing mechanism) που υπάρχει στο DSR, υπεισέρχεται σημαντικό overhead δρομολόγησης. Αυτό το overhead δρομολόγησης είναι άμεσα ανάλογο με το μήκος του μονοπατιού.

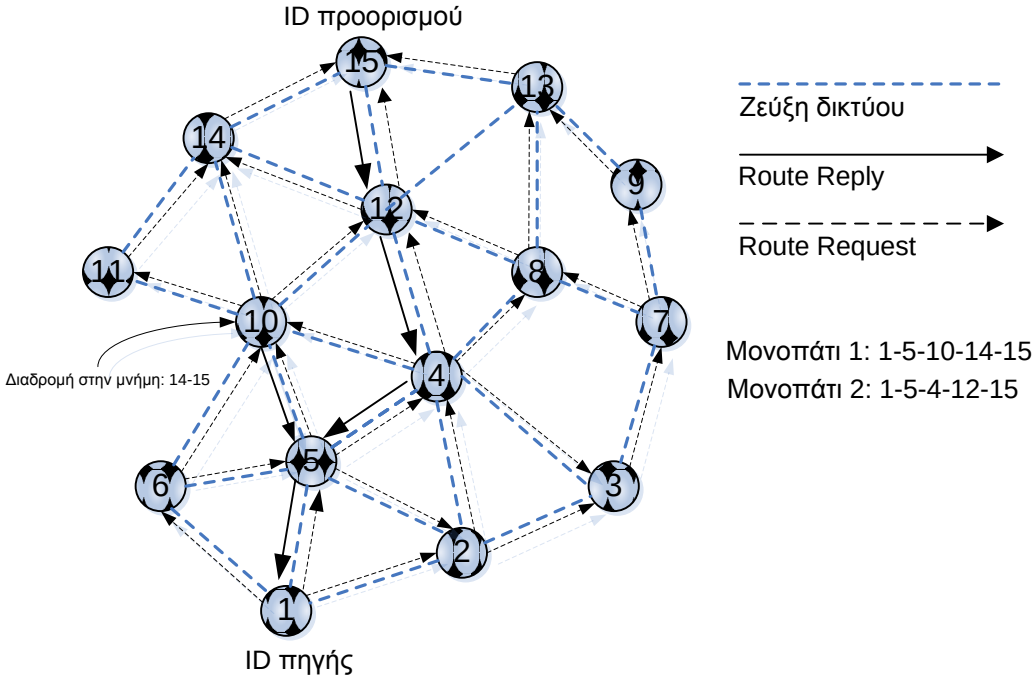
Πρωτόκολλο Ad Hoc On-Demand Distance-Vector Routing

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης ad hoc on-demand distance vector χρησιμοποιεί μια on-demand προσέγγιση για να βρίσκει διαδρομές, δηλαδή, μια διαδρομή δημιουργείται μόνο όταν ένας κόμβος πηγή πρέπει να μεταδώσει πακέτα δεδομένων. Για να αναγνωρίζεται το πιο πρόσφατο μονοπάτι χρησιμοποιούνται σειριακοί αριθμοί προορισμού. Η βασική διαφορά ανάμεσα στο AODV και στο DSR προκύπτει από το γεγονός ότι το DSR χρησιμοποιεί δρομολόγηση πηγής (source routing) κατά την οποία ένα πακέτο δεδομένων μεταφέρει το πλήρες μονοπάτι που θα πρέπει να διασχίσει. Ωστόσο, στο AODV, ο κόμβος πηγή και οι ενδιάμεσοι κόμβοι αποθηκεύουν την πληροφορία για το επόμενο hop η οποία αντιστοιχεί σε κάθε ροή για μετάδοση πακέτων δεδομένων. Σε ένα on-demand πρωτόκολλο δρομολόγησης, όταν μια διαδρομή προς έναν επιθυμητό προορισμό δεν είναι διαθέσιμη, ο κόμβος πηγή πλημμυρίζει το δίκτυο με το πακέτο RouteRequest. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να αποκτήσει πολλαπλές διαδρομές για διάφορους προορισμούς με μόνο ένα πακέτο RouteRequest. Η βασική διαφορά ανάμεσα στο AODV και τα άλλα on-demand πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι ότι για να καθορίσει ένα ενημερωμένο μονοπάτι προς τον προορισμό χρησιμοποιεί ένα σειριακό αριθμό προορισμού (DestSeqNum). Ο κόμβος ενημερώνει την πληροφορία για το μονοπάτι του μόνο αν ο DestSeqNum του καινούριου πακέτου που λαμβάνεται είναι μεγαλύτερος από το προηγούμενο DestSeqNum που είναι αποθηκευμένο στον κόμβο.

Ένα πακέτο RouteRequest μεταφέρει τα πεδία της ταυτότητας της πηγής SrcID (source identifier), της ταυτότητας προορισμού DestID, του σειριακού αριθμού πηγής SrcScqNum, του σειριακού αριθμού προορισμού DestSeqNum, της ταυτότητας εκπομπής BcastID και του χρόνου ζωής TTL. Το πεδίο DestSeqNum υποδεικνύει το πόσο πρόσφατη είναι η διαδρομή που έγινε αποδεκτή από την πηγή. Όταν ένας ενδιάμεσος κόμβος λάβει ένα πακέτο RouteRequest, είτε το προωθεί ή ετοιμάζει ένα πακέτο RouteReply αν έχει μια έγκυρη διαδρομή προς τον προορισμό. Η εγκυρότητα μιας διαδρομής στον ενδιάμεσο κόμβο, καθορίζεται συγκρίνοντας τον σειριακό αριθμό στον ενδιάμεσο κόμβο με τον σειριακό αριθμό του προορισμού στο πακέτο RouteRequest. Αν ένα RouteRequest ληφθεί πολλές φορές, το οποίο υποδεικνύεται από το ζεύγος BcastID-SrcID, τα διπλά αντίγραφα απορρίπτονται.

Πακέτα RouteReply επιτρέπεται να στείλουν στην πηγή όλοι οι ενδιάμεσοι κόμβοι που έχουν έγκυρες διαδρομές για τον προορισμό ή ο ίδιος ο κόμβος προορισμού. Κάθε ενδιάμεσος κόμβος, καθώς προωθεί το πακέτο RouteRequest εισάγει την διεύθυνση του προηγούμενου κόμβου και την δική του BcastID. Σε περίπτωση που δεν ληφθεί πακέτο RouteReply προτού λήξει το χρονόμετρο, χρησιμοποιείται ένας χρονοδιακόπτης ο οποίος έχει ως στόχο να διαγράψει την συγκεκριμένη καταχώριση. Αυτό βοηθά στην αποθήκευση μιας ενεργούς διαδρομής στον ενδιάμεσο κόμβο καθώς το AODV δεν χρησιμοποιεί δρομολόγηση πηγής για τα πακέτα δεδομένων. Όταν ένας κόμβος λάβει ένα πακέτο RouteReply, αποθηκεύεται επίσης η πληροφορία για τον προηγούμενο κόμβο από τον οποίο ελήφθη το πακέτο έτσι ώστε να προωθήσει το πακέτο δεδομένων σε αυτό τον επόμενο κόμβο ως το επόμενο hop προς τον προορισμό.

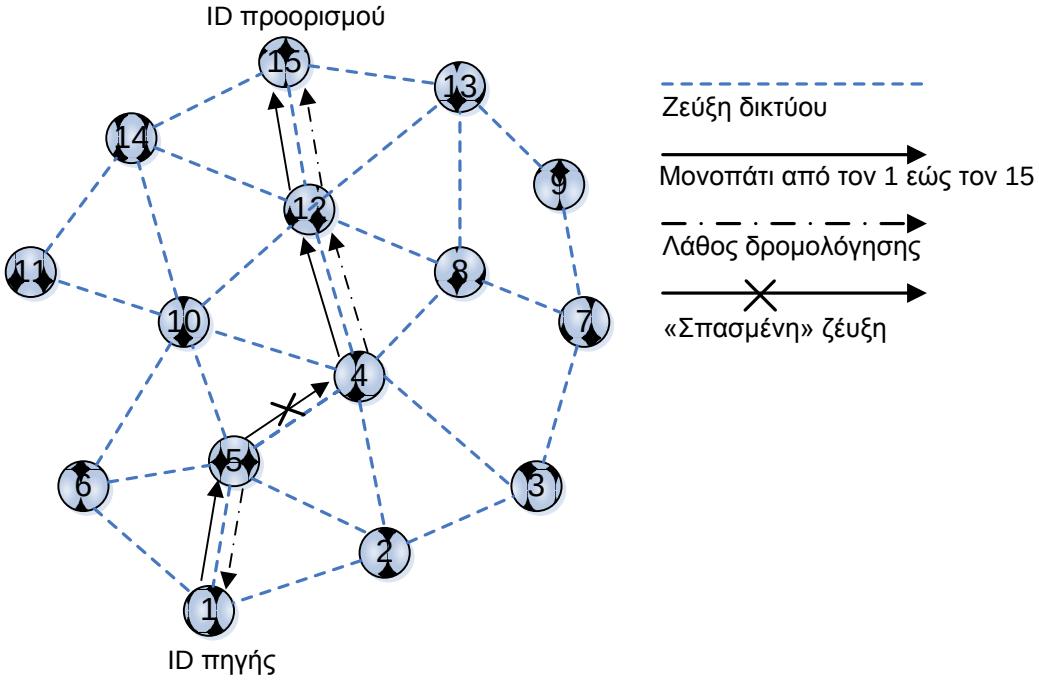
Ας θεωρηθεί το παράδειγμα της εικόνας 5.13. Σε αυτή την εικόνα ο κόμβος πηγή 1 δημιουργεί μια διαδικασία εύρεσης διαδρομής πλημμυρίζοντας το δίκτυο με ένα πακέτο RouteRequest για τον κόμβο προορισμού 15, υποθέτοντας ότι το πακέτο RouteRequest έχει σειριακό αριθμό προορισμού ίσο με 3 και σειριακό αριθμό πηγής ίσο με 1. Όταν οι κόμβοι 2, 5 και 6 λάβουν το πακέτο RouteRequest, ελέγχουν τις διαδρομές τους προς τον προορισμό. Σε περίπτωση που μια διαδρομή προς τον προορισμό δεν είναι διαθέσιμη, το προωθούν περαιτέρω στους γείτονές τους. Εδώ, οι κόμβοι 3, 4 και 10 είναι οι γείτονες των κόμβων 2, 5 και 6. Αυτό γίνεται με την υπόθεση ότι οι ενδιάμεσοι κόμβοι 3 και 10 έχουν ήδη διαδρομές προς τον κόμβο προορισμού, δηλαδή τον κόμβο 15, μέσα από τα μονοπάτια 10-14-15 και 3-7-9-13-15 αντίστοιχα. Αν ο σειριακός αριθμός προορισμού στον ενδιάμεσο κόμβο 10 είναι 4 και στον ενδιάμεσο κόμβο 3 είναι 1, τότε μόνο ο κόμβος 10 επιτρέπεται να απαντήσει στην πηγή με την διαδρομή που έχει στην μνήμη του. Αυτό συμβαίνει επειδή ο κόμβος 3 έχει παλιότερη διαδρομή προς τον κόμβο 15 σε σύγκριση με την διαδρομή που είναι διαθέσιμη στον κόμβο πηγή (ο σειριακός αριθμός προορισμού στον κόμβο 3 είναι 1, ενώ ο σειριακός αριθμός προορισμού στον κόμβο πηγή είναι 3), ενώ ο κόμβος 10 έχει μια πιο πρόσφατη διαδρομή (ο σειριακός αριθμός προορισμού είναι 4) προς τον προορισμό. Αν το πακέτο RouteRequest φτάσει στον προορισμό (κόμβος 15) μέσω του μονοπατιού 4-12-15 ή μιας άλλης εναλλακτικής διαδρομής, ο προορισμός στέλνει επίσης ένα πακέτο RouteReply στην πηγή. Σε αυτή την περίπτωση, στην πηγή φτάνουν πολλαπλά πακέτα RouteReply. Όλοι οι ενδιάμεσοι κόμβοι που λαμβάνουν ένα μήνυμα RouteReply ενημερώνουν τους πίνακες δρομολόγησης τους με τον τελευταίο σειριακό αριθμό προορισμού. Ενημερώνουν επίσης την πληροφορία δρομολόγησης αν οδηγεί σε μια συντομότερη διαδρομή ανάμεσα στην πηγή και τον προορισμό.



Δημιουργία διαδρομής στο AODV

Το AODV δεν επισκευάζει τοπικά μια σπασμένη ζεύξη. Όταν σπάσει μια ζεύξη, γεγονός που καθορίζεται παρατηρώντας τα περιοδικά μηνύματα σηματοδοσίας (beacons) ή μέσω επιβεβαιώσεων επιπέδου ζεύξεων, ειδοποιούνται οι τελικοί κόμβοι (δηλ., οι κόμβοι πηγής και προορισμού). Όταν ένας κόμβος πηγή μάθει για την ρήξη μιας διαδρομής, δημιουργεί ξανά την διαδρομή προς τον προορισμό, αν αυτό απαιτείται από τα ανώτερα στρώματα. Αν ανιχνευτεί η ρήξη μιας ζεύξης σε ένα ενδιάμεσο κόμβο, ο κόμβος πληροφορεί τους τελικούς κόμβους στέλνοντάς τους ένα αυτόκλητο μήνυμα RouteReply που έχει ως αριθμό hop (hop count) το ∞.

Ας θεωρηθεί το παράδειγμα της εικόνας 5.14. Όταν σπάσει ένα μονοπάτι, για παράδειγμα, ανάμεσα στους κόμβους 4 και 5, τότε και οι δύο κόμβοι δημιουργούν μηνύματα RouteError για να πληροφορήσουν τους τελικούς τους κόμβους για την ρήξη της ζεύξης. Οι τελικοί κόμβοι διαγράφουν τις αντίστοιχες καταχωρήσεις από τους πίνακές τους και ο κόμβος πηγή ξαναρχίζει την διαδικασία εύρεσης διαδρομής με την νέα BcastID και τον προηγούμενο σειριακό αριθμό προορισμού.



Διατήρηση διαδρομής στο AODV

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του πρωτοκόλλου είναι ότι οι διαδρομές δημιουργούνται κατ' απαίτηση (on demand) και ότι χρησιμοποιούνται σειριακοί αριθμοί προορισμού για να βρεθεί η τελευταία διαδρομή προς τον προορισμό. Η καθυστέρηση αποκατάστασης της σύνδεσης είναι μικρότερη. Ένα από τα μειονεκτήματα είναι ότι οι ενδιάμεσοι κόμβοι μπορεί να οδηγήσουν σε ασταθείς διαδρομές όταν ο σειριακός αριθμός πηγής είναι πολύ παλιός, ενώ επίσης έχουν ένα υψηλότερο αλλά όχι τον τελευταίο σειριακό αριθμό και συνεπώς έχουν μπαγιάτικες καταχωρίσεις. Επίσης, τα πολλαπλά πακέτα RouteReply που στέλντονται σε απόκριση σε ένα και μόνο πακέτο RouteRequest μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλο overhead ελέγχου. Άλλο ένα μειονέκτημα του AODV είναι ότι η περιοδική σηματοδοσία (beaconing) οδηγεί σε περιττή κατανάλωση του εύρους ζώνης.

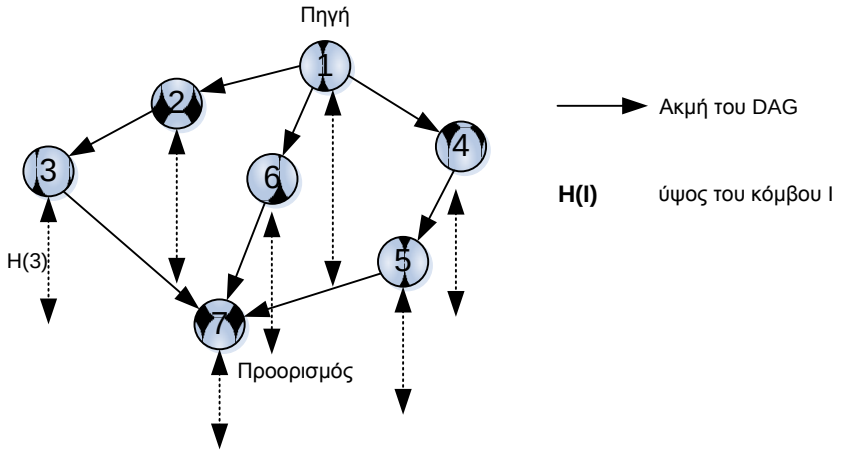
Temporally Ordered Routing Algorithm

Ο Temporally ordered routing algorithm (TORA) είναι ένα on-demand πρωτόκολλο δρομολόγησης που δημιουργείται στην πηγή (source-initiated) και το οποίο χρησιμοποιεί ένα αλγόριθμο αναστροφής ζεύξεων (link reversal algorithm), ενώ παρέχει πολλαπλές διαδρομές (multipath routes) προς ένα κόμβο προορισμού οι οποίες είναι απαλλαγμένες από βρόχους (loop-free). Στο TORA, κάθε κόμβος διατηρεί την, ενός hop, πληροφορία τοπολογίας του ενώ έχει επίσης και την δυνατότητα να ανιχνεύει κατατμήσεις του δικτύου. Το TORA επίσης, έχει την μοναδική ιδιότητα να περιορίζει τα πακέτα ελέγχου σε μια μικρή περιοχή κατά την διαδικασία ανακατασκευής της διαδρομής, η οποία αρχίζει

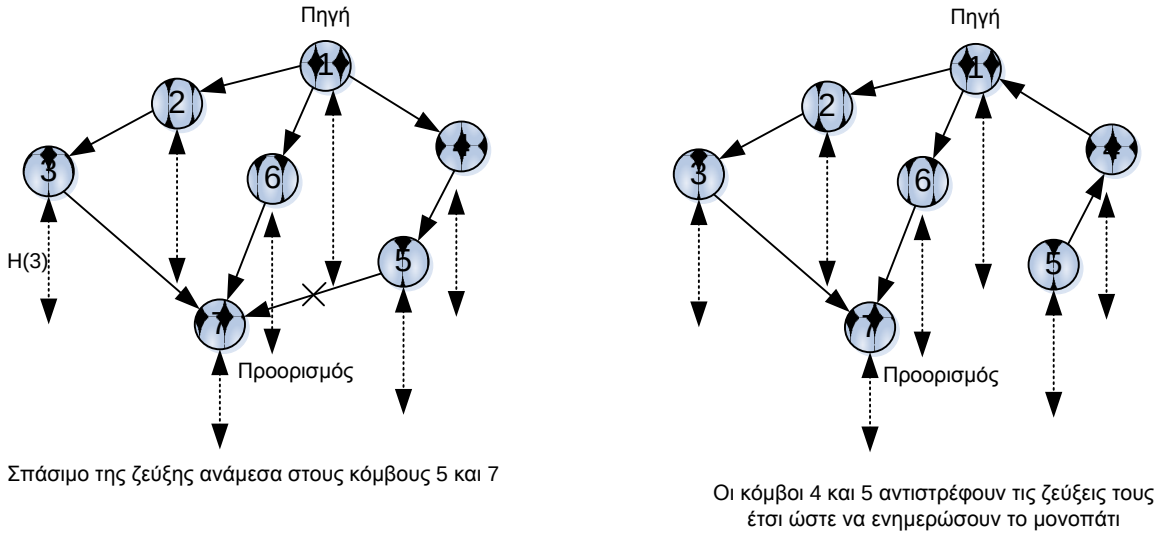
όταν συμβεί η ρήξη ενός μονοπατιού (path break). Η παρακάτω εικόνα δείχνει το κριτήριο της απόστασης που χρησιμοποιείται στο TORA, το οποίο δεν είναι παρά το μήκος του μονοπατιού ή το ύψος από τον προορισμό. Το H(N) δηλώνει το ύψος του N από τον προορισμό. Το TORA έχει τρεις κύριες λειτουργίες: δημιουργία, συντήρηση και διαγραφή διαδρομών.

Η λειτουργία της δημιουργίας μιας διαδρομής εκτελείται μόνο όταν ένας κόμβος απαιτεί ένα μονοπάτι προς κάποιο προορισμό αλλά δεν έχει κάποια κατευθυνόμενη ζεύξη. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί ένα κατευθυνόμενο ακυκλικό γράφο DAG (directed acyclic graph) προσανατολισμένο προς τον προορισμό, χρησιμοποιώντας ένα μηχανισμό Ερώτησης/Ενημέρωσης (Query/Update). Ας θεωρήσουμε την τοπολογία του δικτύου που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Όταν ο κόμβος 1 έχει να στείλει πακέτα δεδομένων στον κόμβο προορισμού 7, δημιουργεί ένα πακέτο Query το οποίο περιέχει την διεύθυνση του προορισμού. Το πακέτο Query προωθείται από τους ενδιάμεσους κόμβους 2, 3, 4 ,5 και 6 και φτάνει στον κόμβο προορισμού 7, ή σε οποιονδήποτε άλλο κόμβο ο οποίος έχει μια διαδρομή προς τον προορισμό. Ο κόμβος στον οποίο τερματίζει το πακέτο Query (σε αυτή την περίπτωση ο κόμβος 7) απαντά με ένα μήνυμα Update το οποίο περιέχει την απόστασή του από τον προορισμό (είναι μηδέν στον κόμβο προορισμού). Στο παράδειγμα αυτό, ο κόμβος προορισμού 7 δημιουργεί ένα πακέτο Update. Κάθε κόμβος που λαμβάνει το πακέτο Update θέτει την απόσταση του σε μία τιμή υψηλότερη από την απόσταση του αποστολέα του πακέτου Update. Κάνοντας το αυτό, δημιουργείται ένα σύνολο κατευθυνόμενων ζεύξεων από τον κόμβο που δημιούργησε το πακέτο Query προς τον προορισμό. Αυτό δημιουργεί τον DAG που απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα. Όταν δημιουργηθεί το μονοπάτι προς τον προορισμό, θεωρείται ότι υπάρχει όσο καιρό είναι διαθέσιμο, ανεξάρτητα από το αν αλλάξει το μήκος του εξαιτίας των ανασχηματισμών που μπορεί να συμβούν κατά την διάρκεια της συνεδρίας μεταφοράς δεδομένων.

Όταν ένας ενδιάμεσος κόμβος (π.χ., ο κόμβος 5) ανακαλύψει ότι η διαδρομή προς τον προορισμό δεν είναι έγκυρη, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, αλλάζει την τιμή της απόστασης του σε μια υψηλότερη τιμή απ’ ότι αυτή που έχουν οι γείτονές του και δημιουργεί ένα πακέτο Update. Ο γειτονικός κόμβος 4 ο οποίος λαμβάνει το πακέτο Update αναστρέφει την ζεύξη ανάμεσα στους 1 και 4 και προωθεί το πακέτο Update. Αυτό γίνεται για να ενημερώσει τον DAG που αντιστοιχεί στον κόμβο προορισμού 7 και έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή του. Αν ο κόμβος πηγή δεν έχει άλλο γείτονα ο οποίος να έχει ένα μονοπάτι προς τον προορισμό, δημιουργεί μια νέα διαδικασία Query/Update. Ας υποθέσουμε ότι η ζεύξη ανάμεσα στους κόμβους 1 και 4 σπάει. Ο κόμβος 4 αναστρέφει το μονοπάτι ανάμεσα στον εαυτό του και τον κόμβο 5 και του στέλνει ένα μήνυμα ενημέρωσης. Εφόσον αυτό συγκρούεται με την προηγούμενη αναστροφή, μπορεί να έχουμε διχοτόμηση του δικτύου. Αν ένας κόμβος ανιχνεύσει μια τέτοια διχοτόμηση, δημιουργεί ένα μήνυμα Clear το οποίο σβήνει την υπάρχουσα πληροφορία για το μονοπάτι σε εκείνο το διαμέρισμα το οποίο σχετίζεται με τον προορισμό.



Απεικόνιση της χρονικής τακτοποίησης (temporal ordering) στο TORA



Διατήρηση της διαδρομής στο TORA

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Περιορίζοντας τα πακέτα ελέγχου για ανακατασκευές διαδρομών, σε μια μικρή περιοχή, το TORA υφίσταται λιγότερο overhead ελέγχου. Η ταυτόχρονη ανίχνευση των κατατμήσεων και η επακόλουθη διαγραφή των διαδρομών μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα προσωρινές διακυμάνσεις και παροδικούς βρόχους. Η τοπική ανακατασκευή των μονοπατιών οδηγεί σε μη βέλτιστες διαδρομές.

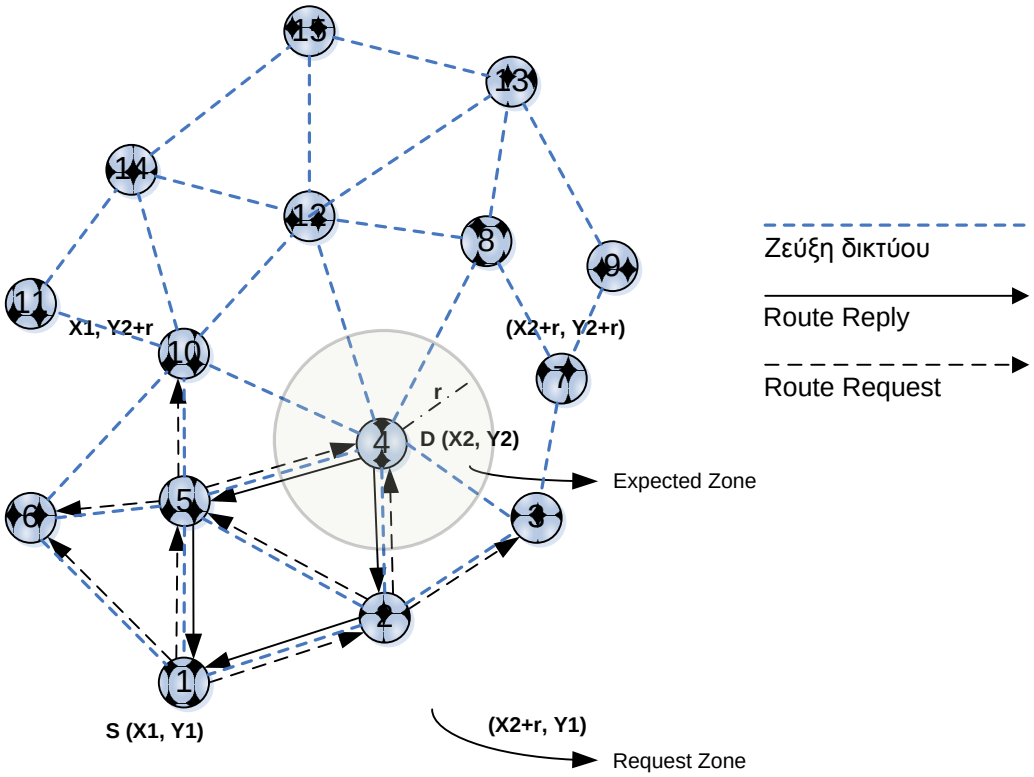
Location-Aided Routing

Το πρωτόκολλο Location-aided routing (LAR) για να βελτιώσει την αποδοτικότητα της δρομολόγησης χρησιμοποιεί πληροφορία για την τοποθεσία, μειώνοντας έτσι το overhead ελέγχου. Το LAR προυποθέτει την διαθεσιμότητα ενός GPS συστήματος με το οποίο θα μπορεί να αποκτήσει την πληροφορία της γεωγραφικής θέσης η οποία είναι απαραίτητη για την δρομολόγηση. Το LAR ορίζει δυο γεωγραφικές περιοχές για επιλεκτική προώθηση των πακέτων, οι οποίες είναι οι ExpectedZone και η RequestZone. Η ExpectedZone είναι η περιοχή στην οποία ο κόμβος προορισμού αναμένεται να είναι παρών, δεδομένης της πληροφορίας σχετικά με την θέση του στο παρελθόν και την κινητικότητα του (βλ. παρακάτω εικόνα). Όταν δεν είναι διαθέσιμη προηγούμενη πληροφορία για τον προορισμό, ExpectedZone του κόμβου προορισμού θεωρείται ολόκληρη η περιοχή που καλύπτει το δίκτυο. Παρόμοια, όταν είναι διαθέσιμη περισσότερη πληροφορία για την κινητικότητα του, η ExpectedZone του προορισμού μπορεί να καθοριστεί με περισσότερη ακρίβεια και βελτιωμένη αποδοτικότητα. Η RequestZone είναι μια γεωγραφική περιοχή εντός της οποίας τα πακέτα ελέγχου εύρεσης διαδρομής επιτρέπεται να διαδίδονται. Αυτή η περιοχή καθορίζεται από τον αποστολέα μιας συνεδρίας μεταφοράς δεδομένων. Τα πακέτα ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την εύρεση του μονοπατιού προωθούνται από κόμβους οι οποίοι βρίσκονται στην RequestZone και απορρίπτονται από τους κόμβους οι οποίοι είναι εκτός της ζώνης. Σε περιπτώσεις όπου ο αποστολέας ή οι ενδιάμεσοι κόμβοι δεν βρίσκονται στην RequestZone, περιλαμβάνεται επιπρόσθετη περιοχή έτσι ώστε να προωθηθούν τα πακέτα. Αυτό γίνεται όταν η πρώτη προσπάθεια για την απόκτηση ενός μονοπατιού προς την διαδρομή, χρησιμοποιώντας την αρχική RequestZone, αποτυγχάνει να παράγει ένα μονοπάτι μέσα σε ένα αρκετά μεγάλο χρόνο αναμονής. Σε αυτή την περίπτωση, η δεύτερη προσπάθεια επαναλαμβάνει την διαδικασία με αυξημένο μέγεθος της RequestZone έτσι ώστε να λάβει υπόψη του την κινητικότητα και τα λάθη στον υπολογισμό της θέσης. Το LAR χρησιμοποιεί την πλημμύρα, όμως εδώ η πλημμύρα είναι περιορισμένη σε μια μικρή γεωγραφική περιοχή. Οι κόμβοι αποφασίζουν να προωθήσουν ή να απορρίψουν τα πακέτα ελέγχου βασιζόμενοι σε δύο αλγορίθμους, τον LAR1 και τον LAR2.

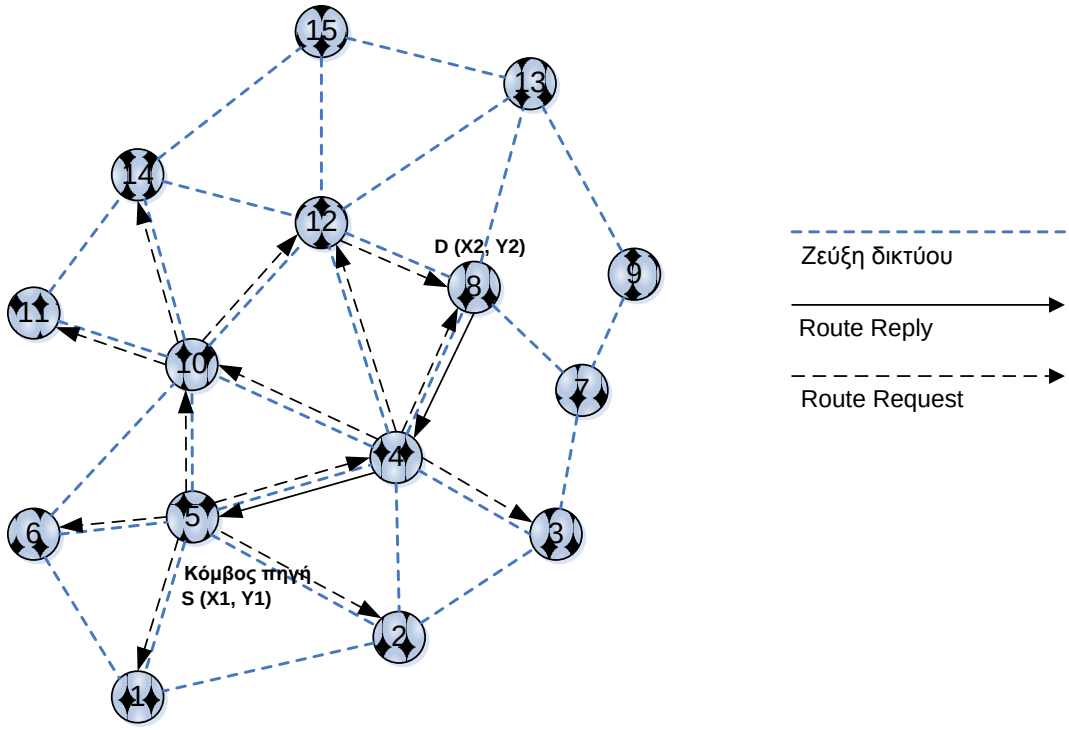
Στον αλγόριθμο LAR1, ο κόμβος πηγή (π.χ., ο S) καθορίζει ρητά την RequestZone στο πακέτο RouteRequest. Για τον LAR1, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, η RequestZone είναι το μικρότερο ορθογώνιο το οποίο περιέχει τον κόμβο πηγή (S) και την ζώνη ExpectedZone, οι πλευρές του οποίου είναι παράλληλες με τους άξονες X και Y, όταν ο κόμβος S είναι εκτός της ExpectedZone. Όταν ο κόμβος S είναι εντός της ExpectedZone, η RequestZone μειώνεται μόνο στην ExpectedZone. Κάθε ενδιάμεσος κόμβος ο οποίος λαμβάνει ένα πακέτο RouteRequest εξακριβώνει την πληροφορία RequestZone η οποία περιέχεται στο πακέτο και το προωθεί περαιτέρω αν ο κόμβος είναι εντός της RequestZone, αλλιώς το πακέτο απορρίπτεται. Στην παρακάτω εικόνα, ο κόμβος πηγή (κόμβος 1) δημιουργεί ένα RouteRequest πακέτο το οποίο εκπέμπεται στους γείτονές του (2, 5 και 6). Αυτοί οι κόμβοι εξακριβώνουν τις δικές τους γεωγραφικές θέσεις για να ελέγξουν αν ανήκουν στην ExpectedZone. Οι κόμβοι 2 και 5 βρίσκουν ότι είναι εντός της ExpectedZone και συνεπώς προωθούν

το πακέτο RouteRequest, όμως ο κόμβος 6 το απορρίπτει. Τελικά, όταν το πακέτο RouteRequest φτάσει στον κόμβο προορισμού (κόμβος 4), δημιουργεί ένα πακέτο RouteReply το οποίο περιέχει την παρούσα τοποθεσία και την παρούσα χρονική στιγμή του κόμβου. Επίσης, επιλεκτικά, μπορεί στο πακέτο RouteReply να συμπεριληφθεί και η παρούσα ταχύτητα της κίνησης, αν αυτή η πληροφορία είναι διαθέσιμη στον κόμβο. Αυτή η πληροφορία που περιέχεται στο πακέτο RouteReply χρησιμοποιείται από τον κόμβο πηγή για μελλοντικές διαδικασίες δημιουργίας διαδρομών.

Στον αλγόριθμο LAR2 (παρακάτω εικόνα), ο κόμβος πηγή S (κόμβος 5) περιέχει στο πακέτο RouteRequest, αντί της ρητής πληροφορίας για την ExpectedZone, την απόσταση ανάμεσα στον εαυτό του και τον κόμβο προορισμού D (κόμβος 8) μαζί με τις συντεταγμένες (X,Y) του κόμβου προορισμού. Όταν ένας ενδιάμεσος κόμβος λάβει αυτό το πακέτο RouteRequest, υπολογίζει την απόσταση από τον κόμβο D. Αν αυτή η απόσταση είναι μικρότερη απ' ότι η απόσταση από τον S ως τον κόμβο D+δ, όπου δ είναι μια παράμετρος του αλγορίθμου που καθορίζεται με βάση το λάθος στον υπολογισμό της τοποθεσίας και την κινητικότητα, τότε το πακέτο RouteRequest προωθείται, ειδάλλως απορρίπτεται. Ας θεωρηθεί το παράδειγμα της εικόνας 5.18. Υποθέτουμε ότι η τιμή του δ εδώ είναι 0. Το πακέτο RouteRequest που δημιουργήθηκε από τον κόμβο 5 λαμβάνεται από τους κόμβους 1, 2, 4, 6 και 10. Μόνο οι κόμβοι 4 και 10 βρίσκουν ότι η απόσταση ανάμεσα σε αυτούς και τον προορισμό είναι μικρότερη απ' ότι η απόσταση ανάμεσα στον κόμβο 5 και τον κόμβο προορισμού ενώ οι υπόλοιποι κόμβοι απορρίπτουν το πακέτο. Το πακέτο RouteRequest προωθείται μόνο μία φορά και η απόσταση ανάμεσα στον κόμβο προώθησης και τον D ενημερώνεται σε αυτό το πακέτο για περαιτέρω αναμετάδοση. Όταν ο κόμβος 4 προωθήσει το πακέτο RouteRequest, ενημερώνει το πακέτο με την απόσταση ανάμεσα στον εαυτό του και τον κόμβο προορισμού D. Το πακέτο αυτό, αφού ληφθεί από τον γειτονικό κόμβο 3, απορρίπτεται λόγω του γεγονότος ότι η απόσταση ανάμεσα στον κόμβο 3 και στον κόμβο 8 είναι μεγαλύτερη απ' ότι η απόσταση ανάμεσα στους κόμβους 4 και 8. Όταν το πακέτο RouteRequest φτάσει στον κόμβο 6, δημιουργεί ένα πακέτο RouteReply το οποίο στέλνει πίσω στον κόμβο πηγή 5 και το οποίο περιέχει το μονοπάτι μέσω του οποίου θα μεταδοθούν τα μελλοντικά πακέτα δεδομένων. Για να αντισταθμιστεί το σφάλμα εντοπισμού (εξαιτίας της ανακρίβειας της GPS πληροφορίας ή εξαιτίας των αλλαγών στην κινητικότητα των κόμβων), θεωρείται μια μεγαλύτερη RequestZone, η οποία μπορεί να διορθώσει το λάθος.



Η Expected Zone και η Request Zone στο LAR1



Δημιουργία διαδρομής στο LAR2

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Το LAR μειώνει το overhead ελέγχου περιορίζοντας την περιοχή αναζήτησης για την εύρεση μιας διαδρομής. Η αποτελεσματική χρήση της πληροφορίας γεωγραφικής τοποθεσίας, το μειωμένο overhead ελέγχου και η αυξημένη αξιοποίηση του εύρους ζώνης, είναι τα κύρια πλεονεκτήματα του πρωτοκόλλου αυτού. Η ικανότητα εφαρμογής του πρωτοκόλλου βασίζεται ιδιαίτερα στην διαθεσιμότητα της υποδομής GPS ή παρόμοιων πηγών για πληροφορίες εντοπισμού. Έτσι, το πρωτόκολλο αυτό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις στις οποίες δεν υπάρχει πρόσβαση σε τέτοιες πληροφορίες.

Associativity-Based Routing

Το πρωτόκολλο Associativity-based routing (ABR) είναι ένα κατανεμημένο πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο επιλέγει διαδρομές με βάση την σταθερότητα των ασύρματων ζεύξεων. Είναι ένα on-demand πρωτόκολλο δρομολόγησης που βασίζεται σε σηματοδοσία (beacon-based). Μια ζεύξη χαρακτηρίζεται σταθερή ή ασταθής με βάση την χρονική σταθερότητα. Η χρονική σταθερότητα καθορίζεται μετρώντας τα περιοδικά σήματα beacons που λαμβάνει ένας κόμβος από τους γείτονες του. Κάθε κόμβος διατηρεί τον αριθμό των beacons που παίρνει από τους γείτονες του και ταξινομεί

κάθε ζεύξη ως σταθερή ή ασταθή με βάση τον αριθμό των beacons που αντιστοιχεί στον σχετικό γειτονικό κόμβο. Η ζεύξη που αντιστοιχεί σε ένα σταθερό γείτονα ορίζεται ως σταθερή ζεύξη, ενώ η ζεύξη σε ένα ασταθή γείτονα ονομάζεται ασταθής ζεύξη.

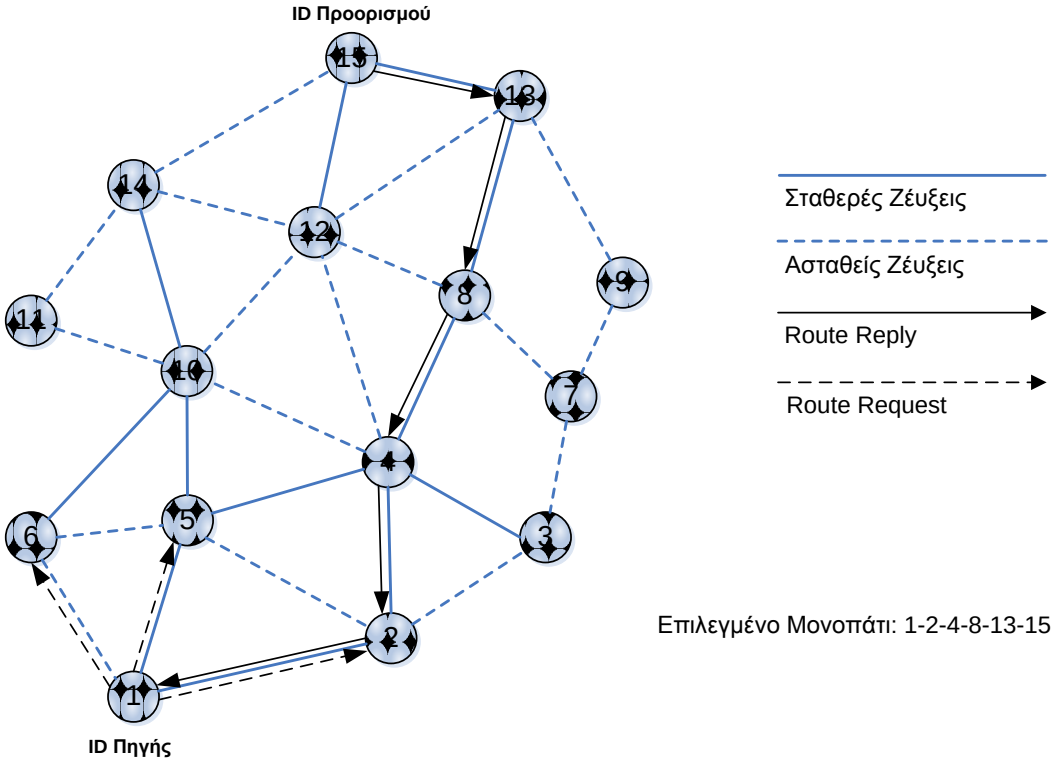
Ένας κόμβος πηγή πλημμυρίζει με πακέτα RouteRequest ολόκληρο το δίκτυο αν η διαδρομή δεν είναι διαθέσιμη στην προσωρινή μνήμη διαδρομών (route cache). Όλοι οι ενδιάμεσοι κόμβοι προωθούν το πακέτο RouteRequest, το οποίο περιέχει το μονοπάτι που διέσχισε και τον αριθμό των beacons για τον αντίστοιχο κόμβο στο συγκεκριμένο μονοπάτι. Όταν το πρώτο πακέτο RouteRequest φτάσει στον προορισμό, ο προορισμός περιμένει για μια χρονική περίοδο $T_{RouteSelectTime}$ για να λάβει πολλαπλά RouteRequests από διαφορετικά μονοπάτια. Μετά από αυτό το χρονικό διάστημα, ο προορισμός επιλέγει το μονοπάτι το οποίο έχει τον μέγιστο λόγο σταθερών ζεύξεων. Αν τα μονοπάτια έχουν τον ίδιο λόγο σταθερών ζεύξεων, επιλέγεται το συντομότερο από αυτά, ενώ αν είναι διαθέσιμα περισσότερα από ένα σύντομα μονοπάτια, τότε ως μονοπάτι ανάμεσα στην πηγή και τον προορισμό επιλέγεται ένα τυχαίο μονοπάτι ανάμεσα σε αυτά.

Ας θεωρηθεί η παρακάτω εικόνα, στην οποία ο κόμβος πηγή (κόμβος 1) δημιουργεί ένα πακέτο RouteRequest με το οποίο πλημμυρίζει το δίκτυο για να βρει μια διαδρομή προς τον κόμβο προορισμού (κόμβος 15). Οι συνεχείς γραμμές αναπαριστούν τις σταθερές ζεύξεις οι οποίες ταξινομούνται με βάση τον αριθμό των beacons, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν τις ασταθείς ζεύξεις. Το ABR δεν περιορίζει τους ενδιάμεσους κόμβους στην προώθηση ενός πακέτου RouteRequest με βάση το κριτήριο της σταθερής ή ασταθούς ζεύξης. Χρησιμοποιεί την πληροφορία για την σταθερότητα μόνο κατά την διάρκεια της διαδικασίας επιλογής διαδρομής στον κόμβο προορισμού. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, το πακέτο RouteRequest φτάνει στον προορισμό μέσα από τρεις διαφορετικές διαδρομής. Η διαδρομή 1 είναι η 1-5-10-14-15, η διαδρομή 2 είναι η 1-5-4-12-15 και η διαδρομή 3 είναι η 1-2-4-8-13-15. Το ABR επιλέγει την διαδρομή 3 καθώς περιέχει το μεγαλύτερο ποσοστό σταθερών ζεύξεων σε σύγκριση με την διαδρομή 1 και την διαδρομή 2. Το ABR δίνει μεγαλύτερη προτεραιότητα στις σταθερές διαδρομές παρά στις συντομότερες διαδρομές. Έτσι, η διαδρομή 3 επιλέγεται αν και το μήκος της είναι πολύ μεγαλύτερο απ’ ότι των άλλων δύο διαδρομών.

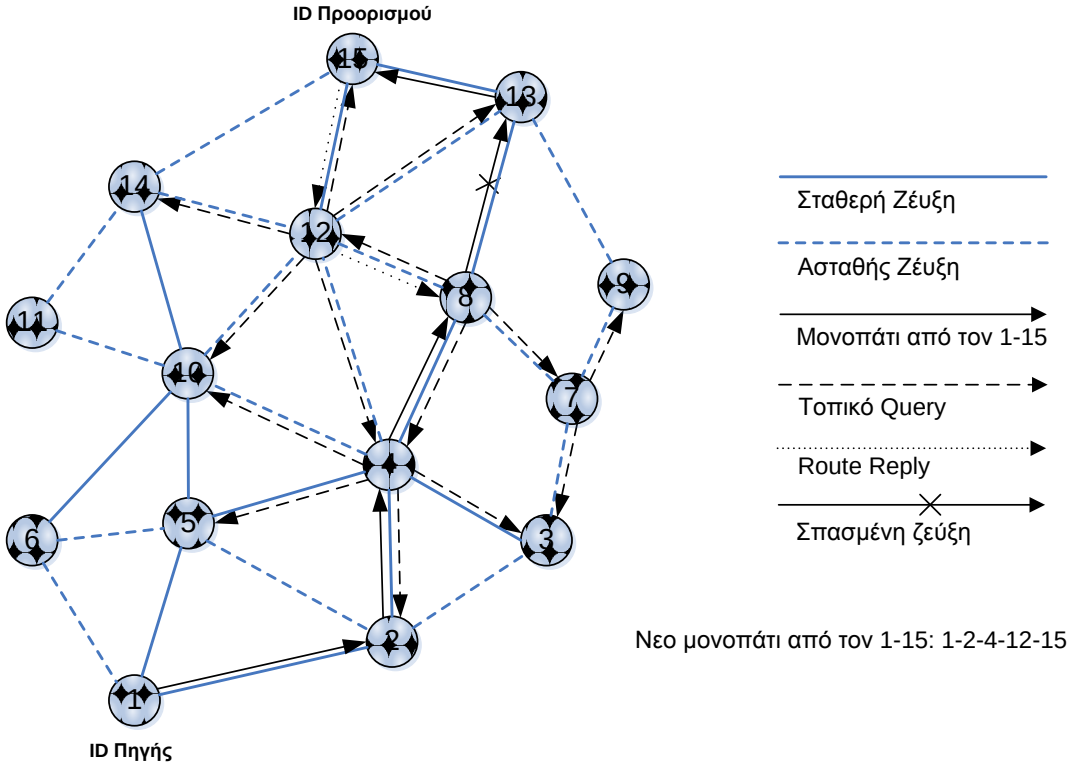
Αν συμβεί η ρήξη μιας ζεύξης σε ένα ενδιάμεσο κόμβο, ο κόμβος που ανιχνεύει το σπάσιμο και ο οποίος είναι πλησιέστερα προς την πηγή, αρχίζει μια διαδικασία αποκατάστασης της τοπικής διαδρομής. Σε αυτή την διαδικασία, ο κόμβος εκπέμπει τοπικά ένα πακέτο επισκευής διαδρομής, το οποίο ονομάζεται εκπομπή τοπικής ερώτησης LQ (local query), με έναν περιορισμένο χρόνο ζωής TTL, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, όπου η τιμή TTL είναι ίση με 2. Με αυτό τον τρόπο μια σπασμένη ζεύξη παρακάμπτεται τοπικά χωρίς να χρειαστεί να πλημμυρίσει ολόκληρο το δίκτυο με ένα νέο πακέτο RouteRequest. Αν ένας κόμβος αποτύχει να επισκευάσει την σπασμένη ζεύξη, τότε ο κόμβος της άνω ζεύξης του (ο προηγούμενος κόμβος στο μονοπάτι, ο οποίος είναι πλησιέστερα στον κόμβο πηγή) ξαναρχίζει την εκπομπή του LQ. Αυτή η διαδικασία αποκατάστασης της διαδρομής συνεχίζεται σε όλους τους ενδιάμεσους κόμβους προς τον κόμβο πηγή, μέχρις ότου να διασχίσει το μισό μήκος του σπασμένου μονοπατιού ή μέχρις ότου αποκατασταθεί η διαδρομή. Στην πρώτη

περίπτωση, ο κόμβος πηγή πληροφορείται, γεγονός που ξεκινά μια νέα φάση δημιουργίας διαδρομής.

Ας θεωρηθεί το παράδειγμα της εικόνας 5.20. Όταν συμβεί η ρήξη ενός μονοπατιού ανάμεσα στους κόμβους 8 και 13, ο κόμβος ο οποίος είναι δίπλα στην σπασμένη ζεύξη προς την πλευρά του κόμβου πηγή, δηλαδή ο κόμβος 8, ξεκινά την εκπομπή μιας τοπικής αναζήτησης (local query) έτσι ώστε να αποκαταστήσει τοπικά το σπασμένο μονοπάτι. Η τοπική αναζήτηση έχει περιορισμένο πεδίο με την μέγιστη τιμή TTL να τίθεται στο μήκος του μονοπατιού που απέμεινε από την σπασμένη ζεύξη ως τον προορισμό. Στην ίδια εικόνα, το σπασμένο μονοπάτι αποκαθίσταται τοπικά παρακάμπτοντας το τμήμα 8-13-15 μέσω του τμήματος 8-12-15.



Δημιουργία διαδρομής στο ABR



Διατήρηση διαδρομής στο ABR

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Στο ABR, οι σταθερές διαδρομές προτιμώνται περισσότερο απ' ότι οι συντομότερες διαδρομές. Αυτές έχουν ως αποτέλεσμα λιγότερες ρήξεις μονοπατιών, το οποίο, με τη σειρά του, οδηγεί σε μείωση του εύρους της πλημμύρας για την αναδημιουργία των μονοπατιών. Ένα από τα μειονεκτήματα του πρωτοκόλλου αυτού είναι ότι το επιλεγμένο μονοπάτι μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το συντομότερο μονοπάτι ανάμεσα στην πηγή και τον προορισμό εξαιτίας της προτίμησης που δείχνεται στα σταθερά μονοπάτια. Άλλο ένα μειονέκτημα του είναι ότι οι επαναληπτικές εκπομπές LQ μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα υψηλές καθυστερήσεις κατά την αποκατάσταση των διαδρομών.

Πρωτόκολλο Signal Stability-Based Adaptive Routing

Το πρωτόκολλο signal stability-based adaptive routing (SSA) είναι ένα on-demand πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο χρησιμοποιεί ως βέλτιστο παράγοντα για την εύρεση σταθερών διαδρομών την σταθερότητα του σήματος. Το πρωτόκολλο αυτό βασίζεται επίσης σε σηματοδοσία (beacon-based), όπου για να καθοριστεί η σταθερότητα της ζεύξης μετριέται η ένταση του σήματος του beacon. Η ένταση του σήματος χρησιμοποιείται για να ταξινομηθεί μια ζεύξη ως σταθερή ή ασταθής. Το πρωτόκολλο αυτό αποτελείται από δύο μέρη: το πρωτόκολλο προώθησης FP (forwarding protocol) και το πρωτόκολλο δυναμικής δρομολόγησης DRP (dynamic routing protocol). Τα πρωτόκολλα αυτά

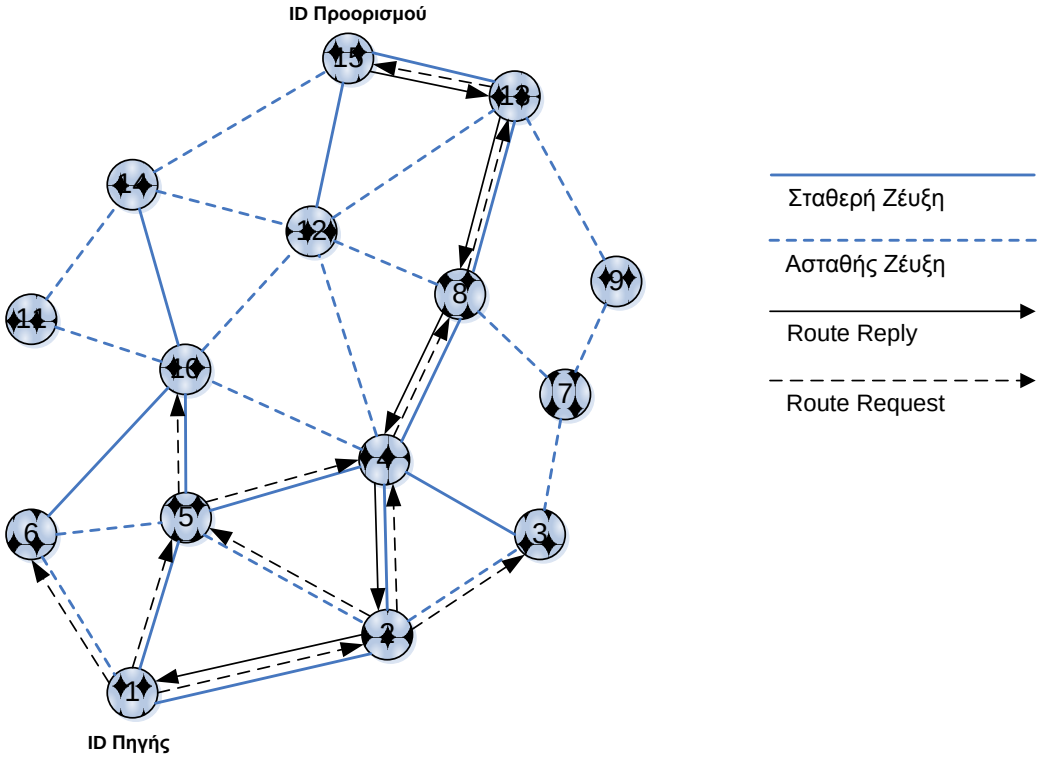
χρησιμοποιούν μια εκτεταμένη ραδιο-διεπαφή (extended radio interface) η οποία μετρά την ένταση του σήματος από τους beacons. Το DRP διατηρεί τον πίνακα δρομολόγησης αλληλεπιδρώντας με τις διεργασίες DRP των άλλων hosts. Το FP εκτελεί την πραγματική δρομολόγηση για να προωθήσει ένα πακέτο προς τον προορισμό.

Κάθε κόμβος διατηρεί ένα πίνακα ο οποίος περιέχει τον αριθμό των beacon και την ένταση του σήματος καθενός από τους γείτονές του. Αν ένας κόμβος έχει λάβει δυνατά beacons μεταξύ των τελευταίων beacons, χαρακτηρίζει την ζεύξη ως δυνατή/σταθερή, αλλιώς την χαρακτηρίζει αδύναμη/ασταθή. Κάθε κόμβος διατηρεί ένα πίνακα ο οποίος ονομάζεται πίνακας σταθερότητας σήματος SST (signal stability table), που βασίζεται στις εντάσεις των σημάτων των beacons των γειτόνων του. Ο πίνακας αυτός χρησιμοποιείται από τους κόμβους στο μονοπάτι προς τον προορισμό, για να προωθήσουν το εισερχόμενο πακέτο RouteRequest μέσα από δυνατές ζεύξεις, έτσι ώστε να βρεθεί το περισσότερο σταθερό μονοπάτι μεταξύ των άκρων. Αν η προσπάθεια προώθησης ενός RouteRequest πάνω από τις σταθερές ζεύξεις αποτύχει να αποκτήσει κάποιο μονοπάτι προς τον προορισμό, το πρωτόκολλο πλημμυρίζει με το RouteRequest ολόκληρο το δίκτυο χωρίς να θεωρεί ως κριτήριο προώθησης την σταθερότητα των ζεύξεων.

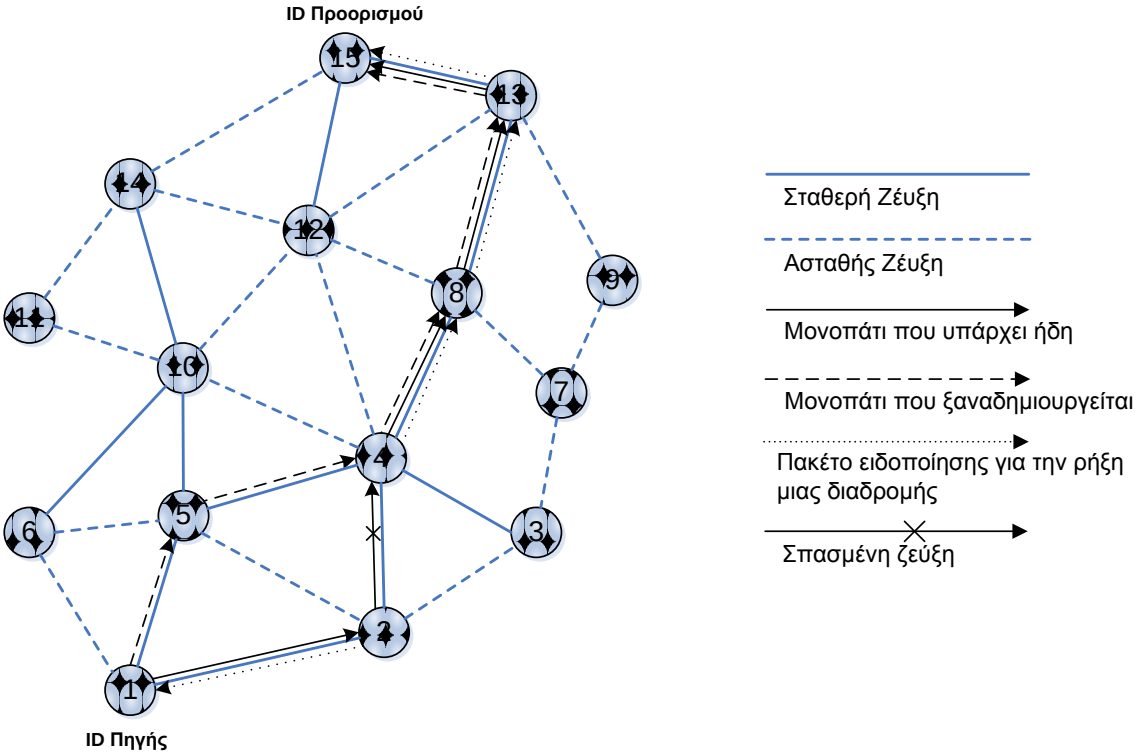
Ένας κόμβος πηγή ο οποίος δεν έχει μια διαδρομή προς τον προορισμό πλημμυρίζει το δίκτυο με πακέτα RouteRequest. Όμως, αντίθετα με τα άλλα πρωτόκολλα δρομολόγησης, οι κόμβοι οι οποίοι χρησιμοποιούν το SSA πρωτόκολλο, επεξεργάζονται το RouteRequest μόνο αν έχει ληφθεί από μια δυνατή ζεύξη. Ένα RouteRequest το οποίο ελήφθη από μία ασθενή ζεύξη απορρίπτεται χωρίς να επεξεργαστεί. Ο προορισμός επιλέγει το πρώτο πακέτο RouteRequest το οποίο έλαβε από τις ισχυρές ζεύξεις και δημιουργεί ένα RouteReply πακέτο για να γνωστοποιήσει την επιλεγμένη διαδρομή στην πηγή. Ας θεωρηθεί η παρακάτω εικόνα, όπου ο κόμβος πηγή (κόμβος 1) εκπέμπει ένα πακέτο RouteRequest για να βρει την διαδρομή προς τον κόμβο προορισμού (κόμβος 15). Στην εικόνα αυτή, οι συνεχείς γραμμές αναπαριστούν τις σταθερές ζεύξεις, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν τις ασθενείς ζεύξεις. Αντίθετα με το ABR, το SSA περιορίζει τους ενδιάμεσους κόμβους από το να προωθούν ένα πακέτο RouteRequest αν το πακέτο έχει ληφθεί πάνω από μία ασθενή ζεύξη. Προωθεί μόνο τα πακέτα τα οποία ελήφθησαν πάνω από σταθερές ζεύξεις. Στην παρακάτω εικόνα, όταν δημιουργείται ένα πακέτο RouteRequest από την πηγή, θα πρέπει να επεξεργαστεί από όλους τους γείτονες του. Όμως, πριν την επεξεργασία, κάθε γειτονικός κόμβος ελέγχει αν το πακέτο RouteRequest ελήφθη μέσα από μια σταθερή ζεύξη. Αν το πακέτο RouteRequest έχει ληφθεί μέσα από μία σταθερή ζεύξη και δεν έχει ήδη σταλεί (δηλαδή δεν είναι ένα διπλότυπο RouteRequest), προωθείται από τον κόμβο, αλλιώς απορρίπτεται. Για παράδειγμα, όταν το πακέτο RouteRequest από τον κόμβο 1 φτάσει στους κόμβους 2, 5 και 6, προωθείται μόνο από τους κόμβους 2 και 5 καθώς η ζεύξη ανάμεσα στους κόμβους 1 και 6 είναι ασθενής. Παρόμοια, το πακέτο RouteRequest που προωθείται από τον κόμβο 2 απορρίπτεται από τους κόμβους 3 και 5, ενώ ο κόμβος 4 το προωθεί στους γείτονές του δεδομένου ότι δεν έχει ήδη προωθηθεί. Με αυτό τον τρόπο, οι κόμβοι προωθούν το πακέτο RouteRequest μέχρις ότου φτάσει στον προορισμό. Σε αυτό το παράδειγμα, μόνο μια διαδρομή δημιουργείται με βάση το κριτήριο της ισχυρής ζεύξης. Ένα πακέτο RouteRequest που

διαδίδεται μέσω του μονοπατιού 1-5-10-14-15, απορρίπτεται από τον προορισμό, καθώς λαμβάνει ένα RouteRequest από τον κόμβο 14 σε μία ασθενή ζεύξη. Το σταθερό μονοπάτι που αποτελείται από ισχυρές ζεύξεις είναι το 1-2 (ή 5)-4-8-13-15. Το πρώτο RouteRequest πακέτο το οποίο φτάνει τον προορισμό πάνω από ένα σταθερό μονοπάτι επιλέγεται από τον προορισμό.

Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, όταν σπάσει μια ζεύξη, οι τελικοί κόμβοι της σπασμένης ζεύξης (δηλαδή οι κόμβοι 2 και 4) ειδοποιούν τους αντίστοιχους τελικούς κόμβους του μονοπατιού (δηλαδή τους κόμβους 1 και 15). Ένας κόμβος πηγή, αφού λάβει ένα πακέτο που ειδοποιεί για την σπασμένη διαδρομή, επανεκπέμπει το πακέτο RouteRequest για να βρει άλλο σταθερό μονοπάτι προς τον προορισμό. Οι μπαγιάτικες καταχωρίσεις αφαιρούνται μόνο αν τα πακέτα δεδομένων που χρησιμοποιούν την παλιωμένη πληροφορία δρομολόγησης αποτύχουν να φτάσουν τον επόμενο κόμβο. Αν η ζεύξη ανάμεσα στους κόμβους 2 και 4 σπάσει, δημιουργείται ένα νέο ισχυρό μονοπάτι μέσω των 1-5-4-8-13-15. Αν δεν είναι διαθέσιμο κανένα ισχυρό μονοπάτι όταν σπάσει μια ζεύξη (π.χ., η ζεύξη 8-13), τότε η νέα διαδρομή δημιουργείται λαμβάνοντας υπόψιν και ασθενείς ζεύξεις. Αυτό γίνεται όταν πολλές προσπάθειες RouteRequest αποτύχουν να αποκτήσουν μια διαδρομή προς τον προορισμό με τη χρήση μόνο σταθερών ζεύξεων.



Δημιουργία διαδρομής στο SSA



Διατήρηση διαδρομής στο SSA

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του πρωτοκόλλου είναι ότι βρίσκει περισσότερες σταθερές διαδρομές σε σύγκριση με τα πρωτόκολλα επιλογής της συντομότερης διαδρομής, όπως είναι τα πρωτόκολλα DSR και AODV. Το πρωτόκολλο αυτό χρησιμοποιεί χρονική σταθερότητα μετρώντας beacons έτσι ώστε να χαρακτηρίσει μια ζεύξη σταθερή ή ασθενής. Το κύριο μειονέκτημα του πρωτοκόλλου αυτού είναι ότι θέτει την συνθήκη προώθησης μόνο των ισχυρών RouteRequest πακέτων, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα αποτυχίες των RouteRequest. Μια αποτυχημένη προσπάθεια RouteRequest δημιουργεί μια παρόμοια διαδικασία εύρεσης διαδρομής για ένα νέο μονοπάτι χωρίς να λαμβάνει υπόψιν το κριτήριο της σταθερότητας. Τέτοιες πολλαπλές πλημμύρες RouteRequest πακέτων καταναλώνουν ένα σημαντικό ποσό του εύρους ζώνης στο ήδη περιορισμένου εύρους ζώνης δίκτυο ενώ επίσης, αυξάνουν τον χρόνο αποκατάστασης ενός μονοπατιού. Άλλο ένα μειονέκτημα είναι ότι το κριτήριο των ισχυρών ζεύξεων αυξάνει το μήκος του μονοπατιού, καθώς τα συντομότερα μονοπάτια μπορεί να αγνοηθούν για περισσότερο σταθερά μονοπάτια.

Πρωτόκολλο Flow-Oriented Routing

Το πρωτόκολλο Flow-oriented routing (FORP) είναι ένα on-demand πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο για να υποστηρίξει τα ευαίσθητα στον χρόνο δεδομένα των ad hoc ασύρματων δικτύων χρησιμοποιεί ένα multi-hop-handoff μηχανισμό που βασίζεται στην πρόβλεψη. Το πρωτόκολλο αυτό έχει προταθεί για τα ad hoc ασύρματα δίκτυα που βασίζονται στο IPv6 όπου πρέπει να παρέχεται συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Ο μηχανισμός multi-hop-handoff αποσκοπεί στον μετριασμό των επιδράσεων που έχουν οι ρήξεις των ζεύξεων στις πραγματικού χρόνου ροές δεδομένων. Ένας αποστολέας ή ένας ενδιάμεσος κόμβος ξεκινά την διαδικασία διατήρησης της διαδρομής, μόνο αφού ανιχνεύσει την ρήξη μιας ζεύξης. Αυτή η αντενεργή (reactive) διαδικασία διατήρησης διαδρομής μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα υψηλό ρυθμό απώλειας πακέτων ο οποίος οδηγεί σε παροχή χαμηλής ποιότητας υπηρεσίας προς τον χρήστη. Το FORP χρησιμοποιεί ένα μοναδικό μηχανισμό που βασίζεται στην πρόβλεψη και που αξιοποιεί την πληροφορία της κινητικότητας και της τοποθεσίας των κόμβων για να υπολογίσει τον χρόνο εκπνοής της ζεύξης LET (link expiration time). Ο LET είναι ο προσεγγιστικός χρόνος ζωής μιας δεδομένης ασύρματης ζεύξης. Η ελάχιστη από τις τιμές LET όλων των ασύρματων ζεύξεων του μονοπατιού αναφέρεται ως χρόνος εκπνοής της διαδρομής RET (route expiry time). Κάθε κόμβος υποτίθεται ότι μπορεί να προβλέψει τον LET καθενός από τις ζεύξεις με τους γείτονές του. Ο LET ανάμεσα σε δύο κόμβους μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας πληροφορίες όπως η παρούσα θέση των κόμβων, η κατεύθυνση της κίνησης τους και τα εύρη εκπομπής τους. Το FORP απαιτεί διαθεσιμότητα της GPS πληροφορίας για να αναγνωρίσει την τοποθεσία των κόμβων.

Όταν ένα κόμβος αποστολέας χρειαστεί να δημιουργήσει μια πραγματικού χρόνου ροή προς ένα συγκεκριμένο προορισμό, ελέγχει τον πίνακα δρομολόγησης του για την διαθεσιμότητα μιας διαδρομής προς αυτό τον προορισμό. Αν η διαδρομή είναι διαθέσιμη, τότε χρησιμοποιείται για να στείλει πακέτα προς τον προορισμό αυτό. Αλλιώς, ο αποστολέας στέλνει ένα πακέτο Flow-REQ το οποίο μεταφέρει πληροφορία σχετικά με τους κόμβους πηγής και προορισμού. Το πακέτο Flow-REQ μεταφέρει επίσης ένα αναγνωριστικό/σειριακό αριθμό ροής ο οποίος είναι μοναδικός για κάθε συνεδρία. Ένας γειτονικός κόμβος, λαμβάνοντας αυτό το πακέτο, ελέγχει πρώτα αν ο σειριακός αριθμός του ληφθέντος Flow-REQ είναι μεγαλύτερος από τον σειριακό αριθμό που αντιστοιχεί σε ένα πακέτο το οποίο ανήκει στην ίδια συνεδρία και το οποίο είχε προηγουμένως προωθηθεί από τον κόμβο. Αν συμβαίνει κάτι τέτοιο, ενημερώνει την διεύθυνση του στο πακέτο και αποσπά την απαραίτητη πληροφορία κατάστασης. Αν ο σειριακός αριθμός του πακέτου είναι μικρότερος από αυτός του πακέτου που προωθήθηκε προηγουμένως, τότε το πακέτο απορρίπτεται. Αυτό γίνεται για να αποφευχθούν σχηματισμοί βρόχων των πακέτων Flow-REQ. Ένα Flow-REQ με τον ίδιο σειριακό αριθμό με αυτόν ενός Flow-REQ που ανήκει στην ίδια συνεδρία και το οποίο έχει ήδη προωθηθεί από τον κόμβο, θα εκπεμφθεί περαιτέρω μόνο αν έχει φτάσει μέσα από ένα συντομότερο (και επομένως καλύτερο) μονοπάτι. Προτού προωθήσει ένα Flow-REQ, ο ενδιάμεσος κόμβος επισυνάπτει την διεύθυνση του και τον LET της τελευταίας ζεύξης που διέσχισε το πακέτο. Το πακέτο Flow-REQ, όταν

ληφθεί από τον κόμβο προορισμού, περιέχει την λίστα των κόμβων στο μονοπάτι που διέσχισε μαζί με τις τιμές LET κάθε ασύρματης ζεύξης πάνω σε αυτό το μονοπάτι. Το FORP υποθέτει ότι όλοι οι κόμβοι στο δίκτυο είναι συγχρονισμένοι σε έναν κοινό χρόνο μέσω της GPS πληροφορίας. Αν η υπολογισμένη τιμή του RET, η οποία αντιστοιχεί στο νέο Flow-REQ πακέτο που λαμβάνεται στον προορισμό, είναι καλύτερη από την τιμή RET του μονοπατιού που χρησιμοποιείται κατά την παρούσα στιγμή, ο προορισμός δημιουργεί ένα πακέτο Flow-SETUP. Το LET μια ζεύξης μπορεί να υπολογιστεί δεδομένης της πληροφορίας για την τοποθεσία, την ταχύτητα και το εύρος μετάδοσης των σχετικών κόμβων. Ο LET της ασύρματης ζεύξης ανάμεσα σε δύο κόμβους a και b με εύρος μετάδοσης T_x, οι οποίοι κινούνται με ταχύτητες V_a και V_b σε γωνίες T_a και T_b αντίστοιχα (βλ. παρακάτω εικόνα (a)) μπορεί να υπολογιστεί με τον παρακάτω τρόπο:

$$LET_{ab} = \frac{-(pq+rs)+(p^2+r^2)T_x^{\,2}-(ps-qr)^2}{p^2+q^2} \qquad (7.5.1)$$

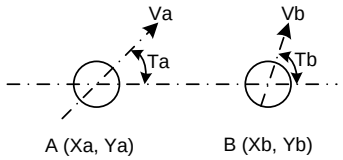
$$p = V_a \cos T_a - V_b \cos T_b \qquad (7.5.2)$$

$$q = X_a - X_b \qquad (7.5.3)$$

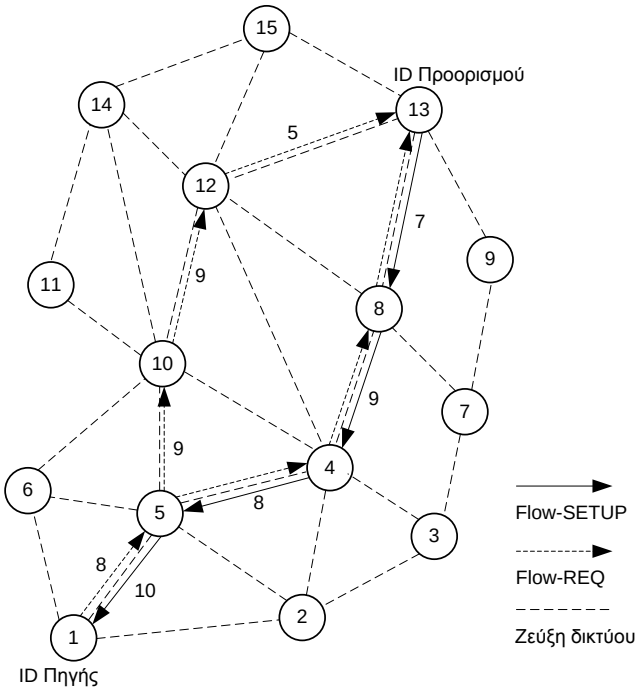
$$r = V_a \sin T_a - V_b \sin T_b \qquad (7.5.4)$$

$$s = Y_a - Y_b \qquad (7.5.5)$$

Η διαδικασία δημιουργίας της διαδρομής δείχνεται στην παρακάτω εικόνα (b). Σε αυτή την περίπτωση, το μονοπάτι 1-5-4-8-13 (μονοπάτι 1) έχει τιμή RET ίση με 7, ενώ το μονοπάτι 1-5-10-12-13 (μονοπάτι 2) έχει τιμή RET ίση με 5. Αυτό υποδεικνύει ότι το μονοπάτι 1 μπορεί να διαρκέσει περισσότερο από το μονοπάτι 2. Έτσι ο κόμβος αποστολέας δημιουργεί ένα Flow-SETUP μέσω του αντίστροφου μονοπατιού 13-8-4-5-1.



(a) Υπολογισμός του LET



Μονοπάτι Α: 1-5-10-12-13
RET=5
Μονοπάτι Β: 1-5-4-8-13
RET=7

(b) Διαδικασία Δημιουργίας διαδρομής

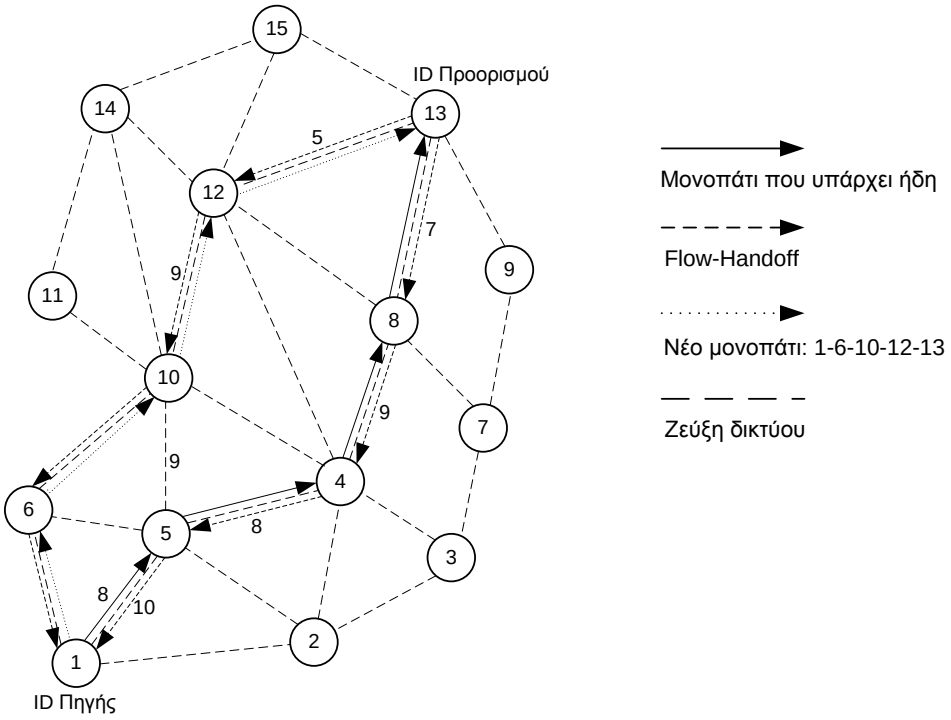
Δημιουργία διαδρομής στο FORP

Το FORP χρησιμοποιεί ένα μηχανισμό proactive διατήρησης διαδρομής ο οποίος χρησιμοποιεί τον αναμενόμενο RET του παρόντος μονοπατιού που είναι διαθέσιμο στον προορισμό. Η διατήρηση της διαδρομής φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Όταν ο κόμβος προορισμού διαπιστώσει (χρησιμοποιώντας τον RET του παρόντος μονοπατιού) ότι πρόκειται να συμβεί η ρήξη μιας διαδρομής μέσα σε μία κρίσιμη χρονική περίοδο (t_c), δημιουργεί ένα πακέτο Flow-HANDOFF προς τον κόμβο πηγή, το οποίο προωθείται από τους ενδιάμεσους κόμβους. Ο μηχανισμός με τον οποίο προωθούνται τα πακέτα Flow-HANDOFF είναι παρόμοιος με τον μηχανισμό προώθησης των πακέτων Flow-REQ. Όταν φτάσουν στον κόμβο πηγή πολλά πακέτα Flow-HANDOFF, ο κόμβος πηγή υπολογίζει τις τιμές RET που παίρνει από το καθένα, επιλέγει το καλύτερο μονοπάτι και χρησιμοποιεί το νέο αυτό μονοπάτι για να στείλει πακέτα προς τον προορισμό. Στο παράδειγμα της εικόνας 5.24, τα πακέτα Flow-HANDOFF προωθούνται από κάθε ενδιάμεσο κόμβο αφού επισυναφθεί η πληροφορία LET της προηγούμενης ζεύξης που διασχίστηκε. Το υπάρχον μονοπάτι 1-5-4-8-13 διαγράφεται και επιλέγεται ένα νέο μονοπάτι από τον κόμβο πηγή με βάση τους RETs που αντιστοιχούν σε διαφορετικά μονοπάτια που διέσχισαν τα πακέτα Flow-HANDOFF. Σε αυτή την περίπτωση, επιλέγεται το μονοπάτι 1-6-10-12-13. Η κρίσιμη τιμή (t_c) λαμβάνεται ως η διαφορά ανάμεσα στον RET και την καθυστέρηση

στην οποία υποβάλλεται το τελευταίο πακέτο το οποίο διέσχισε το υπάρχον μονοπάτι από την πηγή προς τον προορισμό.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Η χρήση των υπολογισμών LET και RET μειώνει τις ρήξεις των μονοπατιών και τα επιβλαβή τους αποτελέσματα, όπως η μείωση του ρυθμού παράδοσης των πακέτων, η αύξηση του αριθμού των εκτός σειράς πακέτων και τα μη βέλτιστα μονοπάτια που προκύπτουν από προσπάθειες τοπικού ανασχηματισμού. Ο μηχανισμός proactive ανασχηματισμού της διαδρομής ο οποίος υιοθετείται εδώ, λειτουργεί καλά, όταν η τοπολογία είναι ιδιαίτερα δυναμική. Οι απαιτήσεις για συγχρονισμό αυξάνουν το overhead ελέγχου, ενώ η εξάρτηση από την υποδομή GPS επηρεάζει την δυνατότητα εφαρμογής αυτού του πρωτοκόλλου σε περιβάλλοντα όπου τέτοια υποδομή δεν είναι διαθέσιμη.



Διατήρηση διαδρομής στο FORP

Άλλα On-demand πρωτόκολλα δρομολόγησης

Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούν συνοπτικά μερικά ακόμα, λιγότερο σημαντικά, on-demand πρωτόκολλα δρομολόγησης.

Routing On-demand Acyclic Multi-path (ROAM)

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης ROAM χρησιμοποιεί διακομβικό (internodal) συντονισμό σε κατευθυνόμενους ακυκλικούς υπό-γράφους (directed acyclic sub-graphs), οι οποίοι προέρχονται από την απόσταση των δρομολογητών από τον προορισμό. Αυτή η λειτουργία αναφέρεται συχνά ως "διάχυτος υπολογισμός" (diffusing computation). Το πλεονέκτημα αυτού του πρωτοκόλλου είναι ότι εξουδετερώνει το πρόβλημα της αναζήτησης επ' άπειρον (search-to-infinity), το οποίο είναι παρών σε μερικά από τα reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης, σταματώντας τις πολλαπλές αναζητήσεις με πλημμύρα όταν ο απαιτούμενος προορισμός δεν είναι πια προσβάσιμος. Άλλο ένα πλεονέκτημα είναι ότι, κάθε δρομολογητής διατηρεί καταχωρήσεις (σε ένα πίνακα δρομολόγησης) για προορισμούς, οι οποίοι στέλνουν τα πακέτα δεδομένων μέσω αυτών (για παράδειγμα ο δρομολογητής είναι ένας κόμβος ο οποίος ολοκληρώνει ή συνδέει ένα δρομολογητή σε ένα προορισμό). Αυτό, μειώνει σημαντικά τον χώρο αποθήκευσης και το εύρος ζώνης το οποίο χρειάζεται για την διατήρηση ενός ενημερωμένου πίνακα δρομολόγησης. Μία άλλη καινοτομία του ROAM είναι ότι, κάθε φορά που η απόσταση ενός δρομολογητή από έναν προορισμό αλλάζει πέρα από ένα συγκεκριμένο κατώφλι, τότε αυτός εκπέμπει μηνύματα ενημέρωσης στους γειτονικούς του κόμβους, όπως περιγράφηκε και προηγουμένως. Αν και αυτό έχει το πλεονέκτημα της αύξησης της ικανότητας σύνδεσης του δικτύου, σε ιδιαίτερα δυναμικά δίκτυα ίσως εμποδίσει τους κόμβους να εισέλθουν σε sleep mode έτσι ώστε να μπορούν να συντηρήσουν ενέργεια.

Light-weight Mobile Routing (LMR)

Το πρωτόκολλο LMR είναι άλλο ένα κατ' απαίτηση (on-demand ή reactive) πρωτόκολλο δρομολόγησης, το οποίο χρησιμοποιεί την τεχνική της πλημμύρας για να καθορίσει τις διαδρομές του. Οι κόμβοι στο LMR διατηρούν πολλαπλές διαδρομές για κάθε απαιτούμενο προορισμό. Αυτό αυξάνει την αξιοπιστία του πρωτοκόλλου επιτρέποντας στους κόμβους να επιλέξουν την επόμενη διαθέσιμη διαδρομή για ένα συγκεκριμένο προορισμό, χωρίς να χρειαστεί να ξεκινήσουν μια διαδικασία εξεύρεσης διαδρομής. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτού του πρωτοκόλλου είναι ότι κάθε κόμβος διατηρεί μόνο την πληροφορία δρομολόγησης για τους γείτονές του. Αυτό σημαίνει ότι αποφεύγονται οι επιπλέον καθυστερήσεις και τα overhead αποθήκευσης τα οποία σχετίζονται με την διατήρηση των πλήρων διαδρομών. Ωστόσο, το LMR ίσως δώσει προσωρινά μη έγκυρες διαδρομές, γεγονός που εισάγει επιπλέον καθυστερήσεις για να αποφασιστεί ο σωστός βρόχος.

Relative Distance Micro-discovery Ad hoc Routing (RDMAR)

Το RDMAR προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει τα overheads δρομολόγησης, υπολογίζοντας την απόσταση μεταξύ πηγής και προορισμού και συνεπώς περιορίζοντας κάθε πακέτο αίτησης να επιλέξει μια διαδρομή σε ένα συγκεκριμένο αριθμό βημάτων (hops). Αυτό σημαίνει ότι η διαδικασία εξεύρεσης διαδρομής μπορεί να περιοριστεί σε μια τοπική περιοχή (στην οποία για παράδειγμα δεν θα έχει γενική (global) επιρροή). Το RDMAR χρησιμοποιεί επίσης, την ίδια τεχνική όταν συμβεί ένα σφάλμα ζεύξης (π.χ. διατήρηση διαδρομής). Έτσι, εξοικονομείται ένα σημαντικό μέρος του εύρους ζώνης και της ισχύος της μπαταρίας. Άλλο ένα πλεονέκτημα του RDMAR είναι ότι δεν απαιτεί τεχνολογία εύρεσης τοποθεσίας (όπως είναι το GPS) για να καθορίσει την δομή των διαδρομών. Ωστόσο, η διαδικασία relative-distance micro-discovery μπορεί να εφαρμοστεί μόνο αν η πηγή και οι προορισμοί έχουν προηγουμένως επικοινωνήσει. Αν δεν υπάρχει προηγούμενη επικοινωνία για ένα συγκεκριμένο ζεύγος πηγής-προορισμού, τότε το πρωτόκολλο θα συμπεριφερθεί με τον ίδιο τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρονται οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν την πλημμύρα (για παράδειγμα η εξεύρεση διαδρομής θα έχει global επιρροή).

Ant colony-based Routing Algorithm (ARA)

Το ARA προσπαθεί να μειώσει τα overheads δρομολόγησης υιοθετώντας την συμπεριφορά που έχουν τα μυρμήγκια όταν ψάχνουν για τροφή. Όταν τα μυρμήγκια ψάχνουν για φαγητό, ξεκινούν από την φωλιά τους και περπατούν προς το φαγητό, αφήνοντας πίσω τους ένα προσωρινό ίχνος το οποίο αποκαλείται φερομόνη. Αυτό υποδεικνύει το μονοπάτι που διάλεξαν τα μυρμήγκια και επιτρέπει και σε άλλα να ακολουθήσουν έως ότου εξαφανισθεί η φερομόνη. Παρόμοια με τα AODV και DSR, το ARA έχει και αυτό δύο φάσεις (εξεύρεση διαδρομής και διατήρηση της). Κατά την διάρκεια εξεύρεσης διαδρομής ένα μήνυμα Forwarding ANT (FANT) διαδίδεται στο δίκτυο (παρόμοιο με το Route Request). Σε κάθε hop, κάθε κόμβος υπολογίζει μια τιμή φερομόνης η οποία εξαρτάται από τον αριθμό των hops που πρέπει να πάρει το FANT για να τους φθάσει. Έπειτα, οι κόμβοι προωθούν το FANT στους γείτονες τους. Όταν προσεγγιστεί ο προορισμός, δημιουργείται ένα μήνυμα Backward ANT (BANT) και επιστρέφεται στην πηγή. Όταν η πηγή λάβει το BANT από τον κόμβο προορισμού, καθορίζεται ένα μονοπάτι και αρχίζει η μετάδοση των δεδομένων. Για την διατήρηση κάθε διαδρομής, κάθε φορά που ένα πακέτο δεδομένων περνά από τους ενδιάμεσους κόμβους, η τιμή της φερομόνης αυξάνεται. Ειδάλλως η τιμή της φερομόνης μειώνεται συνεχώς μέχρις ότου εκπνεύσει. Για την διόρθωση μιας σπασμένης ζεύξης (broken link), οι κόμβοι ελέγχουν αρχικά τον πίνακα δρομολόγησης τους και αν δεν βρεθεί καμία διαδρομή πληροφορούν τους γείτονες τους για μια εναλλακτική διαδρομή. Αν προσεγγιστεί ο κόμβος πηγή και δεν έχει βρεθεί κάποια διαδρομή, ξεκινά μια νέα διαδικασία εξεύρεσης διαδρομής. Το πλεονέκτημα αυτής της στρατηγικής είναι ότι το μέγεθος κάθε FANT και BANT είναι μικρό και επομένως το overhead ανά πακέτο ελέγχου το οποίο εισάγεται στο δίκτυο ελαχιστοποιείται. Παρόλα αυτά, η διαδικασία εξεύρεσης διαδρομής βασίζεται

στην πλημμύρα, πράγμα που σημαίνει ότι το πρωτόκολλο δεν θα είναι ιδιαίτερα αποδοτικό καθώς μεγαλώνει ο αριθμός των κόμβων στο δίκτυο.

Cluster-Based Routing Protocol (CBRP)

Σε αντίθεση με τα reactive πρωτόκολλα τα οποία περιγράφηκαν έως τώρα, στο CBRP οι κόμβοι είναι οργανωμένοι με μία ιεραρχία. Όπως και τα περισσότερα ιεραρχικά πρωτόκολλα, οι κόμβοι στο CBRP είναι ομαδοποιημένοι κατά συστάδες. Κάθε συστάδα έχει τον επικεφαλής συστάδας (cluster-head), ο οποίος συντονίζει την μετάδοση των δεδομένων εντός της συστάδας και με άλλες συστάδες. Το πλεονέκτημα του CBRP είναι ότι μόνο οι επικεφαλής των συστάδων ανταλλάσσουν πληροφορίες δρομολόγησης και έτσι το overhead ελέγχου το οποίο μεταδίδεται στο δίκτυο είναι κατά πολύ μικρότερο από αυτό που έχουν οι παραδοσιακές μέθοδοι πλημμύρας. Ωστόσο, όπως και σε άλλα ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης, υπάρχουν overheads τα οποία σχετίζονται με τον σχηματισμό και την διατήρηση των συστάδων. Το πρωτόκολλο υποφέρει επίσης και από προσωρινούς βρόχους δρομολόγησης. Αυτό συμβαίνει επειδή μερικοί κόμβοι μπορεί να μεταφέρουν ασταθείς πληροφορίες για την τοπολογία εξαιτίας μεγάλων καθυστερήσεων διάδοσης.

ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ

Σε αυτό το μέρος, θα αναλυθεί η λειτουργία των πρωτοκόλλων δρομολόγησης τα οποία ορίζονται ως υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης. Σε αυτά, κάθε κόμβος περιέχει την πληροφορία για την τοπολογία του δικτύου μέχρι και m hops. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διάφορα υβριδικά πρωτόκολλα που υπάρχουν.

Πρωτόκολλο Core Extraction Distributed Ad Hoc Routing (CEDAR)

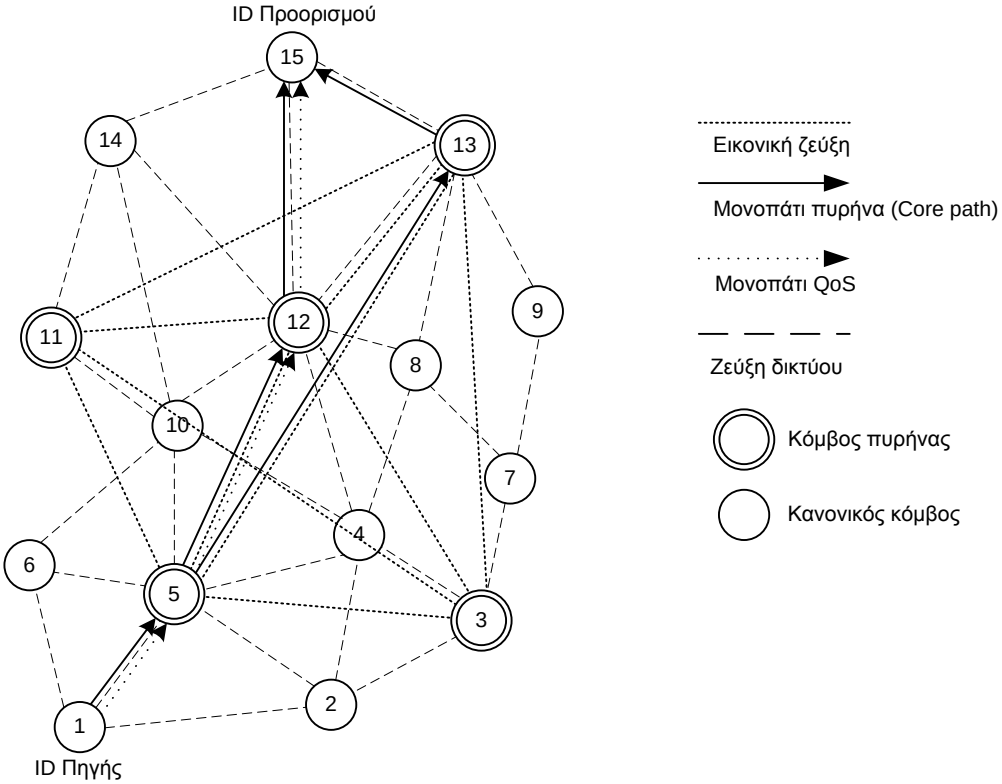
Το πρωτόκολλο Core Extraction Distributed Ad Hoc Routing (CEDAR) ενοποιεί την δρομολόγηση και την υποστήριξη σε QoS. Βασίζεται σε κόμβους αποσπώμενου πυρήνα (extracting core nodes οι οποίοι λέγονται και κυρίαρχοι κόμβοι – dominator nodes) του δικτύου, οι οποίοι μαζί δημιουργούν το ελάχιστο κυρίαρχο σύνολο DS. Ένα κυρίαρχο σύνολο DS (dominating set) ενός γράφου ορίζεται ως ένα σύνολο κόμβων του γράφου τέτοιο ώστε κάθε κόμβος του να είναι είτε παρόν στο DS ή να είναι γείτονας μερικών κόμβων οι οποίοι είναι παρόντες στο DS. Υπάρχει τουλάχιστον ένας κόμβος πυρήνας (core node) εντός τριών hops. Το DS που έχει την μικρότερη σημασία στον γράφο αναφέρεται ως ελάχιστο κυρίαρχο σύνολο. Οι κόμβοι που επιλέγουν ένα κόμβο πυρήνα ως τον κυρίαρχο κόμβο τους λέγονται κόμβοι μέλη πυρήνα (core member nodes) του κόμβου πυρήνα αναφοράς. Το μονοπάτι ανάμεσα σε δύο κόμβους πυρήνα ορίζεται ως εικονική ζεύξη. Το CEDAR χρησιμοποιεί ένα κατανεμημένο αλγόριθμο για να επιλέγει κόμβους πυρήνα. Η επιλογή των κόμβων πυρήνα αποτελεί την φάση της απόσπασης του πυρήνα (core extraction phase).

Το CEDAR χρησιμοποιεί τον μηχανισμό εκπομπής πυρήνα για να μεταδώσει ένα οποιοδήποτε πακέτο στο δίκτυο κατά unicast τρόπο, εμπλέκοντας όσο το δυνατόν λιγότερους κόμβους. Οι κόμβοι αυτοί οι οποίοι παίρνουν μέρος στην διαδικασία εκπομπής πυρήνα λέγονται κόμβοι πυρήνα. Για να γίνει αποδοτικά η εκπομπή πυρήνα, κάθε κόμβος πυρήνα θα πρέπει να ξέρει για τους γειτονικούς του κόμβους πυρήνα. Η μεταφορά της πληροφορίας για τους γειτονικούς κόμβους πυρήνα έχει ως αποτέλεσμα σημαντικό overhead ελέγχου σε περίπτωση υψηλής κινητικότητας. Όταν ένας κόμβος πυρήνα, στον οποίο είναι συνδεδεμένοι πολλοί κόμβοι, μετακινείται μακριά από αυτούς, κάθε ένας από αυτούς τους κόμβους θα πρέπει να επιλέξει ξανά ένα νέο κόμβο πυρήνα. Η επιλογή των κόμβων πυρήνα, η οποία είναι παρόμοια με την κατανεμημένη διαδικασία εκλογής ηγέτη, έχει ως αποτέλεσμα ένα σημαντικό overhead ελέγχου.

Κάθε κόμβος πυρήνα διατηρεί πληροφορία τοπικής τοπολογίας για την γειτονιά του. Το CEDAR χρησιμοποιεί έναν αποδοτικό μηχανισμό διάδοσης κατάστασης ζεύξεων στον οποίο η πληροφορία σχετικά την παρουσία υψηλού εύρους ζώνης και σταθερών ζεύξεων διαδίδεται σε πολλούς περισσότερους κόμβους, σε σύγκριση με την διάδοση πληροφορίας σχετικά με τις χαμηλού εύρους και ασταθών ζεύξεων, η οποία αποκρύπτεται και διατηρείται τοπικά. Για να διαδοθεί η πληροφορία της ζεύξης, χρησιμοποιούνται αργά κινούμενα κύματα αύξησης (slow-moving increase-waves) και γρήγορα κινούμενα κύματα μείωσης (fast-moving decrease-waves). Ένα αυξανόμενο κύμα το οποίο μεταφέρει πληροφορία ενημέρωσης δημιουργείται όταν το εύρος ζώνης της σχετικής ζεύξης αυξηθεί πάνω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι. Τα γρήγορα κινούμενα κύματα μείωσης διαδίδόνται για να ειδοποιήσουν γρήγορα τους γειτονικούς κόμβους (κόμβοι πυρήνες οι οποίοι χωρίζονται το πολύ από τρία hops) για την μείωση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Καθώς η πληροφορία για την αύξηση του εύρους ζώνης κινείται αργά, μόνο η πληροφορία για σταθερή κατάσταση ζεύξης υψηλού εύρους ζώνης διασχίζει μεγάλες αποστάσεις. Αν η υψηλού εύρους ζώνης ζεύξη είναι ασταθής, τότε το αντίστοιχο αυξανόμενο κύμα (increase-wave) ξεπερνιέται από γρήγορα κινούμενα κύματα μείωσης τα οποία αναπαριστούν την μείωση στο διαθέσιμο εύρος ζώνης της αντίστοιχης ζεύξης. Αυτά τα κύματα είναι ιδιαίτερα προσαρμόσιμα στην δυναμική τοπολογία των ad hoc ασύρματων δικτύων. Τα κύματα αύξησης και μείωσης δημιουργούνται μόνο όταν οι αλλαγές στην χωρητικότητα της ζεύξης φτάσουν σε συγκεκριμένα κατώφλια, δηλαδή, μόνο όταν υπάρχει σημαντική αλλαγή στην χωρητικότητα της ζεύξης. Τα γρήγορα κινούμενα, κύματα μείωσης εμποδίζονται να κινούνται σε ολόκληρο το δίκτυο, περιορίζοντας την χαμηλού εύρους ζώνης, ασταθή πληροφορία μόνο στους τοπικούς κόμβους. Η δημιουργία μιας διαδρομής στο CEDAR εκτελείται σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση βρίσκει ένα μονοπάτι πυρήνα (core path) από την πηγή στον προορισμό. Το μονοπάτι πυρήνας ορίζεται ως ένα μονοπάτι από τον κυρίαρχο του κόμβου πηγή (πυρήνας πηγής – source core) στον κυρίαρχο του κόμβου προορισμού (πυρήνας προορισμού – destination core). Κατά την δεύτερη φάση, βρίσκεται πάνω στο μονοπάτι πυρήνα ένα μονοπάτι που υλοποιεί και το απαιτούμενο QoS. Ένας κόμβος δημιουργεί ένα πακέτο RouteRequest αν ο προορισμός δεν είναι στον τοπικό πίνακα τοπολογίας του δικού του κόμβου πυρήνα, αλλιώς, το μονοπάτι δημιουργείται αμέσως. Για την δημιουργία μιας διαδρομής, ο πυρήνας πηγής (source core) αρχίζει μια εκπομπή πυρήνα στην οποία το πακέτο RouteRequest στέλνεται σε όλους τους γειτονικούς κόμβους πυρήνα ως unicast δεδομένα.

Κάθε ένας από αυτούς τους παραλήπτες κόμβους πυρήνα (core nodes) προωθεί με τη σειρά του το πακέτο RouteRequest στους γειτονικούς του κόμβους πυρήνα αν ο προορισμός δεν είναι δικό του μέλος πυρήνα (core member). Ένας κόμβος πυρήνας (core node) ο οποίος έχει τον κόμβο προορισμού ως το δικό του μέλος πυρήνα (core member) απαντά στον πυρήνα πηγής (source core). Όταν δημιουργηθεί το μονοπάτι πυρήνα (core path), επιλέγεται ένα μονοπάτι με την απαιτούμενη υποστήριξη QoS.

Για να βρει ένα μονοπάτι το οποίο θα μπορεί να παρέχει το απαιτούμενο QoS, ο πυρήνας πηγής (source node) βρίσκει πρώτα ένα μονοπάτι στην περιοχή του μακρινότερου δυνατού κόμβου πυρήνα (core node), ο οποίος μπορεί να παρέχει το απαιτούμενο εύρος ζώνης. Ανάμεσα στα διαθέσιμα μονοπάτια αυτής της περιοχής, ο πυρήνας πηγής (source core) επιλέγει το συντομότερο και ευρύτερο μονοπάτι (συντομότερο μονοπάτι με το υψηλότερο εύρος ζώνης). Ας υποθέσουμε ότι το MidCore είναι ο μακρινότερος δυνατός κόμβος πυρήνα (core node) που βρίσκει ο πυρήνας πηγής (source core). Στην επόμενη επανάληψη (iteration), το MidCore γίνεται ο νέος πυρήνας πηγής (source node) και βρίσκει άλλο MidCore κόμβο ο οποίος ικανοποιεί τις απαιτήσεις για την υποστήριξη του QoS. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί το μονοπάτι προς τον προορισμό με το απαιτούμενο εύρος ζώνης. Αν δεν είναι διαθέσιμο κανένα πραγματοποιήσιμο μονοπάτι, ο κόμβος πηγή πληροφορείται για την μη διαθεσιμότητα ενός QoS μονοπατιού.



Δημιουργία διαδρομής στο CEDAR

Ας θεωρηθεί η παρακάτω εικόνα όπου ο κόμβος πηγή είναι ο 1 και ο προορισμός είναι ο κόμβος 15. Οι κόμβοι πυρήνες (core nodes) στου δικτύου είναι οι κόμβοι 3, 5, 11, 12 και 13. Σε αυτή την εικόνα, ο κόμβος 5 είναι ο κυρίαρχος των κόμβων 1 και 6. Παρόμοια, ο κόμβος 12 είναι ο κυρίαρχος του κόμβου 15. Όταν ο κόμβος 1 δημιουργεί ένα πακέτο RouteRequest, για να το στείλει σε ολόκληρο το δίκτυο γνωστοποιεί στον κόμβο πυρήνα του το ζευγάρι πληροφορίας <source id, destination id>. Αν ο κόμβος πυρήνα (core node) 5 δεν έχει καμία πληροφορία για τον κυρίαρχο του κόμβου 15, ο οποίος είναι ο κόμβος προορισμού, ξεκινά μια εκπομπή πυρήνα (core broadcast). Εξαιτίας αυτού, όλοι οι κοντινοί κόμβοι λαμβάνουν την αίτηση σε κατάσταση unicast εκπομπής. Αυτή η unicast εκπομπή πραγματοποιείται στις εικονικές ζεύξεις. Για τον κόμβο πυρήνα 5, η εικονική ζεύξη με κόμβο πυρήνα (core node) 3 αποτελείται από τις ζεύξεις 5-2 και 2-3, ενώ η εικονική ζεύξη ανάμεσα στους κόμβους πυρήνα 5 και 13 αντιπροσωπεύεται από το μονοπάτι 5-4-8-13. Όταν ένας κόμβος πυρήνα (core node) λάβει το μήνυμα εκπομπής πυρήνα (core broadcast message), ελέγχει αν ο προορισμός είναι δικό του μέλος πυρήνα (core member). Ένας κόμβος πυρήνα (core node) που έχει τον προορισμό ως ένα από τα μέλη πυρήνα του απαντά στον κόμβο πυρήνα πηγής (source core node). Στην περίπτωση που εξετάζουμε, ο κόμβος πυρήνα (core node) 12 απαντά στον κόμβο πυρήνα 5. Το μονοπάτι ανάμεσα στους κόμβους πυρήνα (core nodes) 12 και 5 αποτελεί ένα μονοπάτι πυρήνα (core path). Από την στιγμή που θα δημιουργηθεί ένα μονοπάτι πυρήνα, ελέγχεται η δυνατότητα πραγματοποίησης του μονοπατιού αναφορικά με την διαθεσιμότητα του απαιτούμενου εύρους ζώνης. Αν το απαιτούμενο εύρος ζώνης είναι διαθέσιμο στο μονοπάτι, δημιουργείται η σύνδεση, αλλιώς απορρίπτεται το μονοπάτι πυρήνας. (core path)

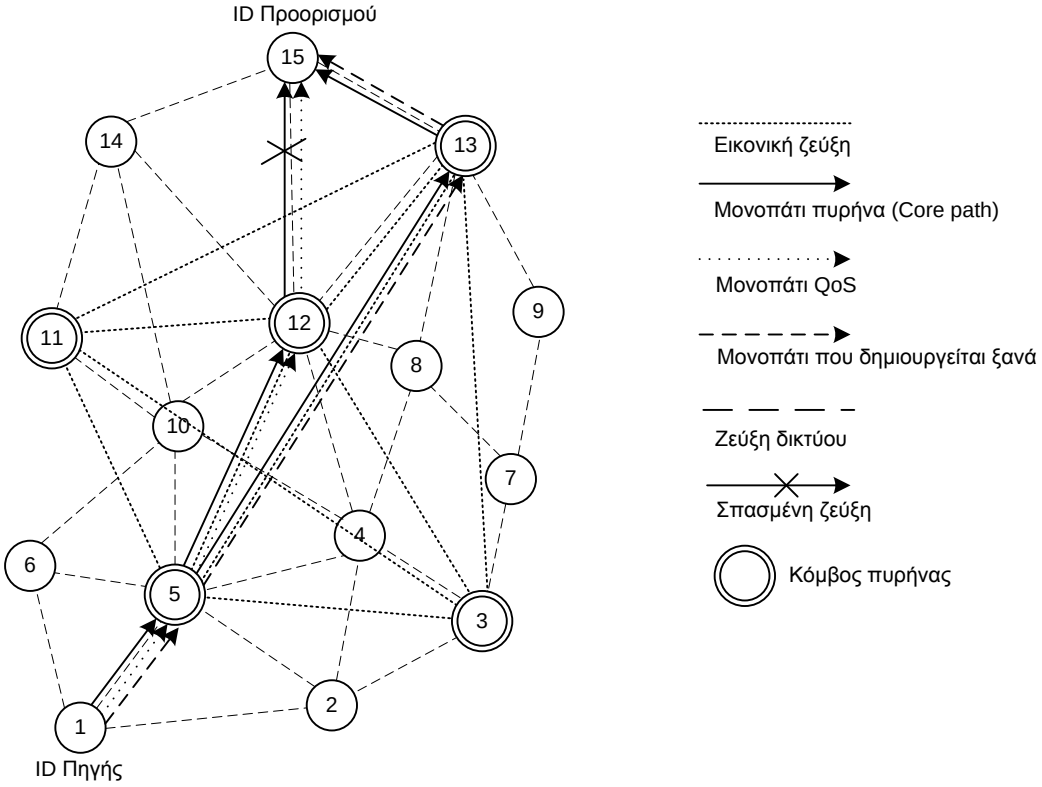
Το CEDAR όταν συμβεί μια ρήξη μονοπατιού προσπαθεί να αποκαταστήσει την σπασμένη διαδρομή τοπικά. Όταν αποτύχει μια ζεύξη u-v στο μονοπάτι από την πηγή προς τον προορισμό, ο κόμβος u στέλνει πίσω στην πηγή μια ειδοποίηση και αρχίζει ξανά τον υπολογισμό μιας διαδρομής από τον εαυτό του ως τον κόμβο προορισμού. Μέχρι να ολοκληρωθεί ο επανα-υπολογισμός της διαδρομής, ο κόμβος u απορρίπτει κάθε επόμενο πακέτο που λαμβάνει. Όταν ο κόμβος πηγή λάβει την ειδοποίηση που στέλνεται από τον κόμβο u, σταματάει αμέσως να μεταδίδει τα πακέτα που ανήκουν στην αντίστοιχη ροή και αρχίζει να υπολογίζει μια νέα διαδρομή προς τον προορισμό. Αν η ρήξη της ζεύξης συμβεί κοντά στην πηγή, ο επανα-υπολογισμός της διαδρομής στον κόμβο u μπορεί να πάρει αρκετό χρόνο, όμως η ειδοποίηση που στέλνεται από τον κόμβο u φτάνει στον κόμβο πηγή πολύ γρήγορα και αποτρέπει μεγάλες απώλειες πακέτων. Αν η σπασμένη ζεύξη είναι κοντά στον προορισμό, η ειδοποίηση που στέλνεται από τον κόμβο u μπορεί να χρειαστεί περισσότερο χρόνο για να φτάσει στην πηγή, όμως ο χρόνος επανα-υπολογισμού διαδρομής στον κόμβο u είναι μικρός και συνεπώς αποτρέπονται και πάλι οι μεγάλες απώλειες πακέτων. Αν η ρήξη της ζεύξης συμβεί κάπου κοντά στο μέσο του μονοπατιού, τότε ο μηχανισμός τοπικού επανα-υπολογισμού διαδρομής και ο μηχανισμός ειδοποίησης για ρήξη ζεύξης δεν είναι αρκετά γρήγοροι και συνεπώς στην περίπτωση αυτή χάνεται ένα σημαντικό ποσό πακέτων.

Ας θεωρηθεί η τοπολογία δικτύου που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Όταν η ζεύξη ανάμεσα στους κόμβους 12 και 15 σπάσει, ο κόμβος 12 προσπαθεί να συνδεθεί ξανά στον προορισμό

χρησιμοποιώντας ένα εναλλακτικό μονοπάτι που ικανοποιεί την απαίτηση για το εύρος ζώνης. Επίσης ειδοποιεί τον κόμβο πηγή για την ρήξη της ζεύξης. Ο κόμβος πηγή προσπαθεί να συνδεθεί ξανά στον προορισμό αρχίζοντας και πάλι την διαδικασία δημιουργίας διαδρομής. Σε περίπτωση που ο κόμβος 12 δεν έχει κάποιο άλλο εφικτό μονοπάτι, τότε για περαιτέρω δρομολόγηση των πακέτων χρησιμοποιείται το εναλλακτικό μονοπάτι 1-5-4-8-13-15.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Το κύριο πλεονέκτημα του CEDAR είναι ότι με την βοήθεια των κόμβων πυρήνων (core nodes), υπολογίζει αποδοτικά το μονοπάτι τόσο όσον αφορά την δρομολόγηση όσο και όσον αφορά το QoS. Τα κύματα αύξησης (increase-waves) και τα κύματα μείωσης (decrease-waves) βοηθούν στην κατάλληλη διάδοση της πληροφορίας για την σταθερή και υψηλού εύρους ζώνης ζεύξη και της πληροφορίας για την ασταθή και χαμηλού εύρους ζώνης ζεύξης, αντίστοιχα. Οι μεταδόσεις πυρήνα (core broadcasts) παρέχουν έναν αξιόπιστο μηχανισμό για την δημιουργία διαδρομών με υποστήριξη QoS. Ένα μειονέκτημα του πρωτοκόλλου αυτού είναι ότι, εφόσον ο υπολογισμός της διαδρομής εκτελείται μόνο στους κόμβους πυρήνα (core nodes), η κίνηση τους επηρεάζει αρνητικά την απόδοση του πρωτοκόλλου. Επίσης, η πληροφορία ενημέρωσης του κόμβου πυρήνα θα μπορούσε να προκαλέσει ένα σημαντικό overhead ελέγχου.

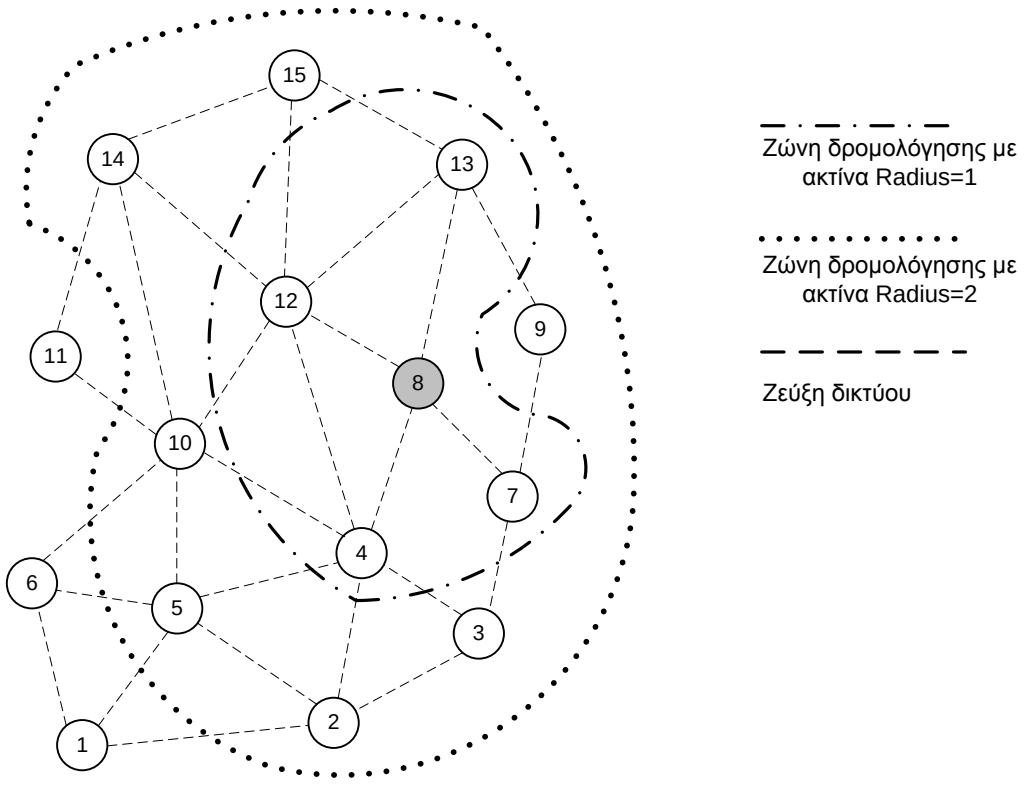


Διατήρηση διαδρομής στο CEDAR

Zone Routing Protocol

Το Zone Routing Protocol (ZRP) είναι ένα υβριδικό πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο συνδυάζει αποτελεσματικά τα καλύτερα χαρακτηριστικά των proactive και reactive πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Η βασική ιδέα που χρησιμοποιείται σε αυτό το πρωτόκολλο είναι η χρήση μιάς μεθόδου proactive δρομολόγησης εντός μιας περιορισμένης ζώνης στην r-hop γειτονιά κάθε κόμβου και η χρήση μιάς μεθόδου reactive δρομολόγησης για τους κόμβους εκτός αυτής της ζώνης. Στην ζώνη όπου ένας συγκεκριμένος κόμβος χρησιμοποιεί proactive δρομολόγηση χρησιμοποιείται ένα intra-zone routing protocol (IARP). Το reactive πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται εκτός αυτής της ζώνης αναφέρεται ως inter-zone routing protocol (IERP). Η ζώνη δρομολόγησης ενός δεδομένου κόμβου είναι ένα υποσύνολο του δικτύου, εντός του οποίου, όλοι οι κόμβοι φτάνονται σε λιγότερα ή ίσα με την ακτίνα της ζώνης, hops. Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει τις ζώνες δρομολόγησης του κόμβου 8, με ακτίνα r = 1 hop και r = 2 hops. Με ακτίνα ζώνης ίση με 2, οι κόμβοι 7, 4, 12 και 13 είναι εσωτερικοί κόμβοι, ενώ οι κόμβοι 2, 3, 5, 9, 10, 13 και 15 είναι περιφερειακοί κόμβοι (κόμβοι με την συντομότερη απόσταση ίση με την ακτίνα της ζώνης). Κάθε κόμβος διατηρεί την πληροφορία για τις διαδρομές, σε όλους τους κόμβους εντός της ζώνης δρομολόγησης του,

ανταλλάσσοντας πακέτα περιοδικής ενημέρωσης διαδρομής (μέρος του IARP). Επομένως, όσο πιο μεγάλη είναι η ζώνη δρομολόγησης τόσο υψηλότερη είναι η κίνηση λόγω των ενημερώσεων και του ελέγχου.



Ζώνη δρομολόγησης για τον κόμβο 8

Ζώνη δρομολόγησης για τον κόμβο 8 στο ZRP

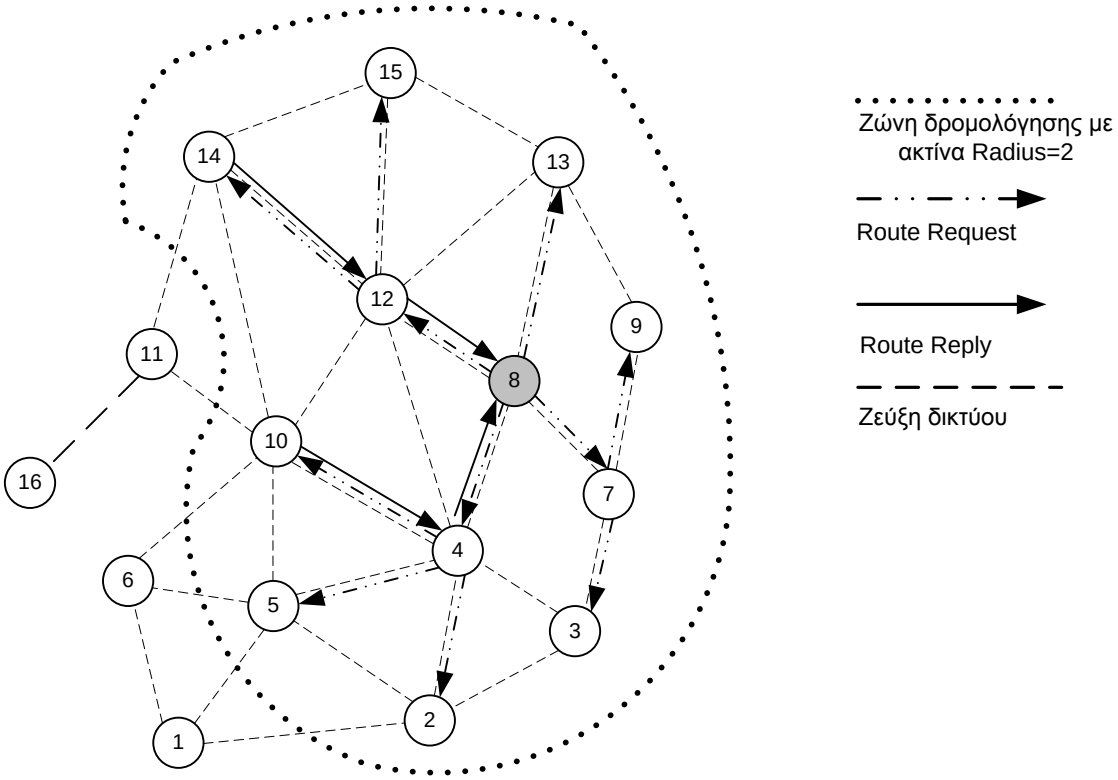
Το IERP είναι υπεύθυνο για την εύρεση μονοπατιών στους κόμβους οι οποίοι δεν είναι εντός της ζώνης δρομολόγησης. Το IERP χρησιμοποιεί αποδοτικά την πληροφορία η οποία είναι διαθέσιμη στην ζώνη δρομολόγησης κάθε κόμβου. Όταν ένας κόμβος πηγή s (ο κόμβος 8 της εικόνας 5.28) έχει να στείλει πακέτο σε ένα κόμβο προορισμού d (κόμβος 15 της εικόνας 5.28), ελέγχει αν ο κόμβος d είναι μέσα στην ζώνη του. Αν ο προορισμός ανήκει στην δική του ζώνη τότε παραδίδει το πακέτο άμεσα. Αλλιώς, ο κόμβος s κάνει bordercast (bordercast ονομάζεται η χρήση unicast δρομολόγησης για την παράδοση πακέτων απευθείας στους συνοριακούς κόμβους) το πακέτο RouteRequest στους περιφερειακούς του κόμβους. Στην παρακάτω εικόνα ο κόμβος 8 κάνει bordercast του RouteRequest στους κόμβους 2, 3, 5, 7, 9, 10, 13, 14 και 15. Αν κάποιος περιφερειακός κόμβος βρει τον κόμβο d εντός της ζώνης δρομολόγησης του, στέλνει ένα πακέτο RouteReply πίσω στον κόμβο s ο οποίος υποδεικνύει το μονοπάτι, αλλιώς ο κόμβος εκπέμπει ξανά το πακέτο RouteRequest στους περιφερειακούς κόμβους. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρις ότου εντοπιστεί ο κόμβος d. Οι

κόμβοι 10 και 14 βρίσκουν την πληροφορία για τον κόμβο 16 στους πίνακες δρομολόγησης οι οποίοι είναι διαθέσιμοι εντός της ζώνης και έτσι δημιουργούν πακέτα RouteReply τα οποία στέλνουν πίσω στον κόμβο 8. Κατά την διάδοση του RouteRequest, κάθε κόμβος που προωθεί το RouteRequest επισυνάπτει σε αυτό την διεύθυνσή του. Αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται για την παράδοση του πακέτου RouteReply πίσω στην πηγή. Η διαδικασία εύρεσης μονοπατιού μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα να φτάσουν στην πηγή πολλά πακέτα RouteReply και σε αυτή την περίπτωση ο κόμβος πηγή μπορεί να επιλέξει το καλύτερο μονοπάτι ανάμεσα σε αυτά. Το κριτήριο για την επιλογή του καλύτερου μονοπατιού μπορεί να είναι το πόσο σύντομο είναι, το πιο έχει την λιγότερη καθυστέρηση κτλ.

Όταν ένας ενδιάμεσος κόμβος σε ένα ενεργό μονοπάτι ανιχνεύσει μια σπασμένη ζεύξη πάνω στο μονοπάτι, εκτελεί ένα τοπικό ανασχηματισμό του μονοπατιού κατά τον οποίο η σπασμένη ζεύξη παρακάμπτεται μέσω ενός σύντομου εναλλακτικού μονοπατιού το οποίο συνδέει τα άκρα της σπασμένης ζεύξης. Έπειτα στέλνεται ένα μήνυμα ενημέρωσης μονοπατιού στον κόμβο αποστολέα για να τον ενημερώσει για την αλλαγή στο μονοπάτι. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ένα μη βέλτιστο (sub-optimal) μονοπάτι ανάμεσα σε δύο άκρα, όμως επιτυγχάνει γρήγορο ανασχηματισμό (reconfiguration) στην περίπτωση της αποτυχίας μιας ζεύξης. Για την απόκτηση ενός βέλτιστου μονοπατιού, ο αποστολέας αρχίζει ξανά την διαδικασία γενικής (global) εύρεσης μονοπατιού μετά από έναν αριθμό τοπικών ανασχηματισμών (reconfigurations).

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Συνδυάζοντας τα καλύτερα χαρακτηριστικά των proactive και reactive σχημάτων δρομολόγησης, το ZRP μειώνει το overhead ελέγχου σε σχέση με τον μηχανισμό πλημμύρας των RouteRequest που χρησιμοποιείται στις on-demand προσεγγίσεις και την περιοδική πλημμύρα των πακέτων πληροφορίας δρομολόγησης στις table-driven προσεγγίσεις. Όμως, λόγω της απουσίας ελέγχου ερωτημάτων (query control), το ZRP τείνει να παράγει μεγαλύτερο overhead ελέγχου απ’ ότι οι προαναφερθείσες μέθοδοι. Αυτό μπορεί να συμβεί εξαιτίας της μεγάλης επικάλυψης των ζωνών δρομολόγησης των κόμβων. Ο έλεγχος ερωτημάτων πρέπει να εξασφαλίσει ότι δεν θα προωθούνται περιττά ή διπλά πακέτα RouteRequest. Επίσης, η απόφαση για την ακτίνα της ζώνης έχει σημαντική επίπτωση στην απόδοση του πρωτοκόλλου.



Ζώνη δρομολόγησης για τον κόμβο 8

Διαδικασία εύρεσης μονοπατιού ανάμεσα στους κόμβους 8 και 16

Πρωτόκολλο δρομολόγησης Zone-Based Hierarchical Link State (ZHLS)

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης Zone-based Hierarchical Link State (ZHLS) είναι ένα υβριδικό πρωτόκολλο ιεραρχικής δρομολόγησης το οποίο χρησιμοποιεί την πληροφορία γεωγραφικής τοποθεσίας των κόμβων έτσι ώστε να σχηματίσει μη επικαλυπτόμενες ζώνες. Χρησιμοποιείται μια ιεραρχική διευθυνσιοδότηση η οποία αποτελείται από την ID της ζώνης (zone ID) και την ID του κόμβου (node ID). Η πληροφορία για την τοπολογία μέσα σε μια ζώνη διατηρείται σε κάθε κόμβο που βρίσκεται μέσα στην ζώνη, ενώ για περιοχές εκτός της ζώνης διατηρείται μόνο η πληροφορία για την δυνατότητα σύνδεσης της ζώνης (zone connectivity). Το ZHLS διατηρεί υψηλού επιπέδου ιεραρχία για την διαζωνική (inter-zone) δρομολόγηση. Η προώθηση των πακέτων βοηθιέται από την ιεραρχική διεύθυνση η οποία αποτελείται από την ID της ζώνης και την ID του κόμβου. Παρόμοια με το ZRP, το ZHLS χρησιμοποιεί επίσης proactive προσέγγιση μέσα στην γεωγραφική ζώνη και reactive προσέγγιση έξω από αυτή. Η παρούσα τοποθεσία ενός κόμβου προορισμού αναγνωρίζεται από την ID της ζώνης στην οποία είναι παρών και αποκτάται από ένα μηχανισμό αναζήτησης διαδρομής.

Στο ZHLS, κάθε κόμβος απαιτεί GPS ή παρόμοια υποδομή για να αποκτά την δική του γεωγραφική τοποθεσία η οποία χρησιμοποιείται για να προσδιορίζει την θέση του στην αντίστοιχη ζώνη. Η

ανάθεση διευθύνσεων ζωνών σε γεωγραφικές περιοχές είναι σημαντική και γίνεται κατά την διάρκεια μιας φάσης η οποία λέγεται φάση σχεδιασμού δικτύου ή φάση ανάπτυξης δικτύου. Η περιοχή της ζώνης καθορίζεται από διάφορους παράγοντες όπως είναι η κάλυψη ενός και μόνο κόμβου, το σενάριο της εφαρμογής, η κινητικότητα των κόμβων και το μέγεθος του δικτύου. Για παράδειγμα, το ad hoc δίκτυο το οποίο σχηματίζεται από ένα σύνολο κινητών συσκευών με περιορισμένη κινητικότητα μπορεί να απαιτεί ακτίνα ζώνης μερικών εκατοντάδων μέτρων, ενώ η περιοχή ζώνης που απαιτείται σε ένα δίκτυο που σχηματίζεται από ένα σύνολο πλοίων, αεροπλάνων ή στρατιωτικών αρμάτων μάχης μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερο.

Ο εντός ζώνης (intra-zone) πίνακας δρομολόγησης ενημερώνεται εκτελώντας τον αλγόριθμο συντομότερου μονοπατιού στην τοπολογία επιπέδου κόμβων (node-level topology) της ζώνης. Η τοπολογία επιπέδου ζώνης αποκτάται χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό ενδοζωνικής ομαδοποίησης (intra-zone clustering), ο οποίος είναι παρόμοιος με τις ενημερώσεις κατάστασης ζεύξεων, περιοριζόμενος μόνο στους κόμβους που είναι παρόντες στην ζώνη. Κάθε κόμβος δημιουργεί μια τοπολογία ενός hop μέσω ενός μηχανισμού αίτησης και απόκρισης ζεύξης (link request και link response). Όταν η τοπολογία ενός hop είναι διαθέσιμη, κάθε κόμβος ετοιμάζει πακέτα κατάστασης ζεύξεων και τα διαδίδει σε όλους τους κόμβους της ζώνης. Αυτά τα πακέτα ενημέρωσης περιέχουν τις node IDs όλων των κόμβων οι οποίοι ανήκουν στην ζώνη και τις node IDs και zone IDs όλων των κόμβων οι οποίοι ανήκουν σε άλλες ζώνες. Οι κόμβοι οι οποίοι λαμβάνουν αποκρίσεις ζεύξης από κόμβους που ανήκουν σε άλλες ζώνες λέγονται κόμβοι πύλες (gateway nodes). Η κίνηση δεδομένων ανάμεσα σε δύο ζώνες θα μεταδοθεί μέσω αυτών των κόμβων πυλών. Για παράδειγμα οι κόμβοι 5, 8, 10 και 12 είναι οι κόμβοι πύλες για την ζώνη A της εικόνας 5.29 (a). Κάθε κόμβος σε μία ζώνη γνωρίζει τις γειτονικές ζώνες οι οποίες συνδέονται στην ζώνη του και τους κόμβους πύλες που πρέπει να χρησιμοποιήσει για να φτάσει σε αυτές. Όταν ανταλλάσσονται τα πακέτα κατάστασης ζεύξεων επιπέδου κόμβων και η τοπολογία επιπέδου κόμβων ενημερώνεται, κάθε κόμβος της ζώνης παράγει ένα πακέτο κατάστασης ζεύξεων ζώνης (zone link state packet). Το πακέτο κατάστασης ζεύξεων ζώνης περιέχει πληροφορία για την δυνατότητα σύνδεσης επιπέδου ζώνης (zone-level connectivity). Αυτά τα πακέτα κατάστασης ζεύξεων ζώνης διαδίδονται σε ολόκληρο το δίκτυο μέσα από τους κόμβους πύλες. Η τοπολογία επιπέδου ζώνης δείχνεται στην παρακάτω εικόνα (b). Τα πακέτα κατάστασης ζεύξεων ζώνης που δημιουργούνται από κάθε ζώνη φαίνονται στον πίνακα 5.1.

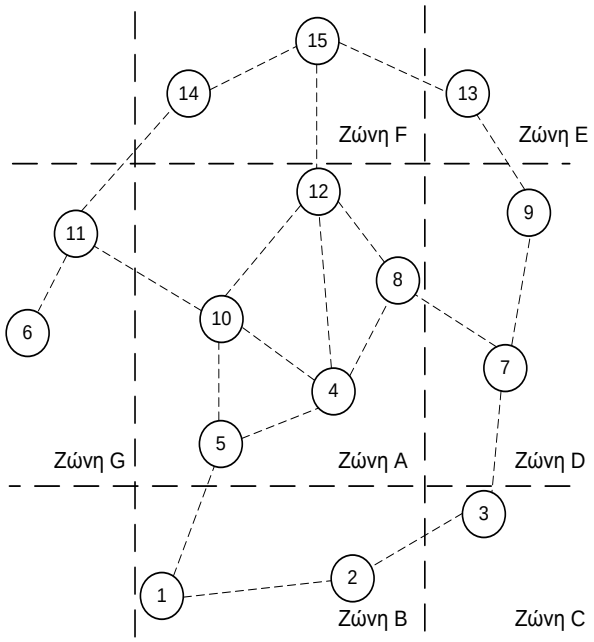
Πίνακας 5.1

Ζώνη πηγή	Πακέτο κατάστασης ζεύξεων ζώνης
A	B, D, F και G
B	C και A
C	B και D

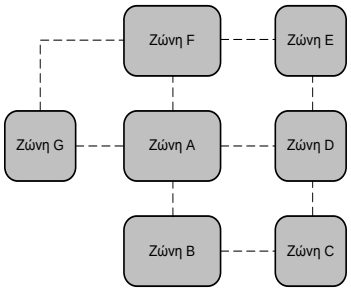
D	A, C και E
E	A, D και F
F	A, E και G
G	A και F

Χρησιμοποιώντας την πληροφορία που λαμβάνεται από τα πακέτα κατάστασης ζεύξεων ζώνης, ένας κόμβος μπορεί να δημιουργήσει την τοπολογία της ζώνης. Ο πίνακας δρομολόγησης ζώνης μπορεί να σχηματιστεί για κάθε ζώνη προορισμού εκτελώντας τον αλγόριθμο συντομότερου μονοπατιού στην τοπολογία επιπέδου ζώνης. Τα πακέτα κατάστασης ζεύξεων ζώνης είναι αριθμημένα με βάση την σειρά των πηγών ενώ περιλαμβάνεται και ένα πεδίο χρονοσφραγίδας (time-stamp) για να αποφευχθούν μπαγιάτικα πακέτα κατάστασης ζεύξεων. Η συσχέτιση των κόμβων με τις αντίστοιχες ζώνες βοηθά στην μείωση του overhead δρομολόγησης όπως στο ZRP, όμως περιλαμβάνει την επιπρόσθετη απαίτηση του καθορισμού της παρούσας θέσης ενός δεδομένου κόμβου προορισμού. Αν ένας κόμβος Src θέλει να επικοινωνήσει με ένα κόμβο προορισμού Dest, ο Src ελέγχει αν ο Dest βρίσκεται στην δική του ζώνη. Αν ο Dest ανήκει στην ίδια ζώνη, τότε τα πακέτα παραδίδονται στον Dest κατά τον πίνακα δρομολόγησης της εσωτερικής ζώνης. Αν ο προορισμός Dest δεν ανήκει στην ζώνη, τότε ο κόμβος Src δημιουργεί ένα πακέτο αίτησης τοποθεσίας το οποίο περιέχει την πληροφορία του αποστολέα και του προορισμού. Αυτό το πακέτο αίτησης τοποθεσίας προωθείται σε κάθε άλλη ζώνη. Ο κόμβος πύλη μιας ζώνης στον οποίο λαμβάνεται το πακέτο αίτησης τοποθεσίας, επαληθεύει τον πίνακα δρομολόγησης του για τον κόμβο προορισμού για τον οποίο δημιουργήθηκε η αίτηση τοποθεσίας. Ο κόμβος πύλη που βρίσκει τον κόμβο προορισμού που απαιτείται από ένα πακέτο αίτησης τοποθεσίας, δημιουργεί ένα πακέτο απόκρισης τοποθεσίας το οποίο περιέχει την πληροφορία ζώνης και το στέλνει στον αποστολέα.

Η διατήρηση της διαδρομής είναι ευκολότερη με την παρουσία πολλαπλών κόμβων πυλών (gateway nodes) ανάμεσα στις ζώνες. Αν ένας δεδομένος κόμβος πύλη μετακινηθεί, δημιουργώντας αποτυχία σύνδεσης στο επίπεδο ζώνης, η δρομολόγηση μπορεί να γίνει με την βοήθεια των άλλων κόμβων πυλών. Αυτό οφείλεται στην ιεραρχική διευθυνσιοδοτηση η οποία κάνει χρήση του zone ID και του node ID. Έτσι, προωθεί τα πακέτα δεδομένων σε κάθε ενδιάμεση ζώνη, με τον περισσότερο ενημερωμένο διαζωνικό (inter-zonal) πίνακα δρομολόγησης.



(a) Τοπολογία σε επίπεδο κόμβου για το ZHLS



(b) Τοπολογία ζώνης για την τοπολογία σε επίπεδο κόμβου της εικόνας (a)

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης ZHLS

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Η ιεραρχική προσέγγιση που χρησιμοποιείται σε αυτό το πρωτόκολλο μειώνει σημαντικά τις απαιτήσεις για αποθήκευση και το overhead επικοινωνίας που δημιουργείται εξαιτίας της κινητικότητας. Η τοπολογία επιπέδου ζώνης είναι δυνατή και ελαστική σε ρήξεις μονοπατιών λόγω της κινητικότητας των κόμβων. Οι ενδοζωνικές (intra-zonal) αλλαγές στην τοπολογία δεν παράγουν μεταδόσεις πακέτων ελέγχου σε ολόκληρο το δίκτυο. Ένα κύριο μειονέκτημα του πρωτοκόλλου αυτού είναι το επιπρόσθετο overhead κατά την δημιουργία της τοπολογίας του επιπέδου ζώνης (zone-level topology). Επίσης, το μονοπάτι προς τον προορισμό δεν είναι το βέλτιστο (sub-optimal). Τέλος, η γεωγραφική πληροφορία που απαιτείται για την δημιουργία της τοπολογίας του επιπέδου ζώνης μπορεί να μην είναι διαθέσιμη σε όλα τα περιβάλλοντα.

Άλλα Υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης

Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούν μερικά ακόμα, λιγότερο σημαντικά, υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης

Scalable Location Update Routing Protocol (SLURP)

Παρόμοια με το ZHLS, στο SLURP οι κόμβοι είναι οργανωμένοι σε έναν αριθμό από μη επικαλυπτόμενες ζώνες. Εντούτοις, το SLURP μειώνει ακόμα περισσότερο το κόστος της διατήρησης της πληροφορίας δρομολόγησης, με το να μην χρησιμοποιεί γενική εξεύρεση διαδρομών (global route discovery). Αυτό επιτυγχάνεται με την ανάθεση μιας οικείας περιοχής (home region) σε κάθε κόμβο του δικτύου. Η οικεία περιοχή για κάθε κόμβο είναι μια ειδική ζώνη (ή περιοχή), η οποία καθορίζεται χρησιμοποιώντας μια στατική συνάρτηση αντιστοίχισης, $f(NodeID) \rightarrow regionID$, όπου το f είναι μια πολλά-προς-ένα συνάρτηση, η οποία είναι στατική και γνωστή σε όλους τους κόμβους. Ένα παράδειγμα συνάρτησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαρτογράφηση στατικής ζώνης είναι η $f(NodeID) \rightarrow g(NodeID) \bmod K$, όπου η $g(NodeID)$ είναι μια συνάρτηση γεννήτρια τυχαίων αριθμών, η οποία χρησιμοποιεί την node ID σαν σπόρο (seed) και βγάζει ένα μεγάλο αριθμό, ενώ k είναι ο συνολικός αριθμός των οικείων περιοχών που υπάρχουν στο δίκτυο. Εφόσον η node ID για κάθε κόμβο είναι σταθερή (για παράδειγμα μια MAC address), τότε η συνάρτηση θα υπολογίζει πάντα την ίδια οικεία περιοχή. Επομένως, όλοι οι κόμβοι μπορούν να καθορίσουν την οικεία περιοχή για κάθε κόμβο, χρησιμοποιώντας αυτή την συνάρτηση με δεδομένο ότι έχουν την αντίστοιχη node ID. Κάθε κόμβος διατηρεί την παρούσα τοποθεσία του (παρούσα ζώνη) με βάση την οικεία περιοχή, στέλνοντας ένα μήνυμα ενημέρωσης τοποθεσίας (location update message) στην οικεία περιοχή του. Όταν το πακέτο ενημέρωσης τοποθεσίας φτάσει στην οικεία περιοχή, εκπέμπεται σε όλους τους κόμβους της οικείας περιοχής. Άρα, για να καθοριστεί η παρούσα τοποθεσία οποιουδήποτε κόμβου, κάθε κόμβος μπορεί να στείλει ένα πακέτο εξεύρεσης τοποθεσίας (location discovery packet) στην οικεία περιοχή των ζητούμενων κόμβων (ή στην περιοχή που περιβάλει την οικεία περιοχή) για να βρει την παρούσα τοποθεσία του. Εφόσον βρεθεί η τοποθεσία, η πηγή μπορεί να αρχίσει να στέλνει δεδομένα προς τον προορισμό χρησιμοποιώντας τον MFR (most forward with fixed radius) γεωγραφικό αλγόριθμο προώθησης. Όταν ένα πακέτο δεδομένων φτάσει την περιοχή στην οποία βρίσκεται ο προορισμός, τότε την μεταφορά του προς τον προορισμό χρησιμοποιείται ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης πηγής (εδώ το DSR). Το μειονέκτημα του SLURP είναι ότι βασίζεται και αυτό (όπως το ZHLS) σε ένα προκαθορισμένο στατικό χάρτη ζωνών.

Distributed spanning trees based routing protocol (DST)

Στο DST οι κόμβοι του δικτύου ομαδοποιούνται σε έναν αριθμό από δέντρα. Κάθε δέντρο έχει δύο τύπους κόμβων: τον κόμβο διαδρομής (route node) και τον εσωτερικό κόμβο (internal node). Η ρίζα του (root) ελέγχει την δομή του δέντρου και το αν το δέντρο μπορεί να συγχωνευθεί με άλλο δέντρο, ενώ οι υπόλοιποι κόμβοι κάθε δέντρου είναι οι κανονικοί κόμβοι. Κάθε κόμβος μπορεί να βρεθεί σε μία από τρεις δυνατές καταστάσεις: είτε σε κατάσταση δρομολόγησης, είτε σε κατάσταση συγχώνευσης ή σε κατάσταση διαμόρφωσης. Σε τι κατάσταση θα είναι, εξαρτάται από την εργασία την οποία προσπαθεί να εκτελέσει. Για να καθορίσει μια διαδρομή, το DST προτείνει δυο διαφορετικές στρατηγικές δρομολόγησης: την Hybrid Tree-Flooding (HFT) και την Distributed Spanning Tree shuttling (DST). Στην HTF, τα πακέτα ελέγχου στέλνονται σε όλους τους γείτονες και σε όλες τις γέφυρες ένωσης (adjoining bridges) του spanning tree, ενώ κάθε πακέτο κρατείται για μια χρονική περίοδο η οποία καλείται χρόνος συγκράτησης (holding time). Η ιδέα πίσω από τον holding time είναι ότι καθώς αυξάνει η συνδεσιμότητα και το δίκτυο γίνεται περισσότερο σταθερό, θα ήταν χρήσιμο τα πακέτα να κρατούνται σε ένα buffer και να δρομολογούνται όταν η συνδεσιμότητα του δικτύου αυξάνεται καθώς περνά ο χρόνος. Στο DST, τα πακέτα ελέγχου τα οποία μεταδίδονται από την πηγή, επανεκπέμπονται έως τις άκρες του δέντρου. Όταν ένα πακέτο ελέγχου φτάσει σε ένα κόμβο φύλλο, στέλνεται ξανά προς τα πάνω μέχρι να φτάσει σε ένα καθορισμένο ύψος το οποίο λέγεται επίπεδο shuttling. Όταν φτάσει στο shuttling level, το πακέτο ελέγχου μπορεί να σταλεί είτε προς τα φύλλα του δέντρου ή προς τις γέφυρες ένωσης (adjoining bridges). Το κύριο μειονέκτημα του αλγορίθμου DST είναι ότι βασίζεται σε ένα κόμβο-ρίζα για να σχηματίσει το δέντρο, γεγονός που δημιουργεί ένα και μόνο σημείο σφάλματος. Επιπλέον, ο holding time που χρησιμοποιείται για να κάνει buffer στα πακέτα ίσως εισάγει επιπλέον καθυστερήσεις στο δίκτυο.

Distributed Dynamic Routing (DDR)

Το DDR είναι επίσης ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο βασίζεται σε δέντρα. Ωστόσο, αντίθετα με το DST, στο DDR τα δέντρα δεν απαιτούν να έχουν ένα κόμβο-ρίζα. Με αυτή την στρατηγική, το δέντρο δημιουργείται χρησιμοποιώντας περιοδικά μηνύματα σηματοδοσίας τα οποία ανταλλάσσονται μόνο μεταξύ των γειτονικών κόμβων. Τα δέντρα στο δίκτυο δημιουργούν ένα δάσος, μέσα στο οποίο συνδέονται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας κόμβους-πύλες (για παράδειγμα κόμβοι οι οποίοι είναι σε ακτίνα επαφής αλλά ανήκουν σε διαφορετικά δέντρα). Κάθε δέντρο του δάσους σχηματίζει μία ζώνη, στην οποία δίνεται ένα zone ID τρέχοντας ένα αλγόριθμο ονοματοδοσίας ζωνών (zone naming algorithm). Επιπλέον, εφόσον κάθε κόμβος μπορεί να ανήκει σε μία και μόνο ζώνη (ή δέντρο), το δίκτυο μπορεί να αντιμετωπιστεί και ως ένας αριθμός από μη επικαλυπτόμενες ζώνες. Ο αλγόριθμος DDR αποτελείται από έξι φάσεις: εκλογή προτιμώμενου γείτονα (preferred neighbor election), δημιουργία δάσους, ομαδοποίηση εντός του δέντρου (intra-tree clustering), ομαδοποίηση

μεταξύ δέντρων (inter-tree clustering), ονοματοδοσία ζωνών και καταμερισμός ζωνών. Κάθε μία από αυτές τις φάσεις εκτελείται με βάση τις πληροφορίες οι οποίες λαμβάνονται από τα μηνύματα σηματοδοσίας. Κατά την φάση της αρχικοποίησης, κάθε κόμβος αρχίζει με την φάση της εκλογής του προτιμώμενου γείτονα. Ο προτιμώμενος γείτονας ενός κόμβου είναι ένας κόμβος ο οποίος έχει τον μεγαλύτερο αριθμό γειτόνων. Μετά από αυτό, δημιουργείται ένα δάσος, συνδέοντας κάθε κόμβο με τον προτιμώμενο γείτονά του. Στην συνέχεια, αρχίζει ο αλγόριθμος ομαδοποίησης εντός του δέντρου έτσι ώστε να καθοριστεί η δομή της ζώνης (ή του δέντρου, όπου οι όροι ζώνη και δέντρο χρησιμοποιούνται κατ' εναλλαγή) και να κατασκευαστεί ο πίνακας της εντός ζώνης δρομολόγησης (intra-zone routing table). Στη συνέχεια ακολουθεί η εκτέλεση του αλγορίθμου ομαδοποίησης μεταξύ δέντρων (inter-tree algorithm) για να καθοριστεί η ικανότητα σύνδεσης με τις γειτονικές ζώνες. Έπειτα σε κάθε ζώνη δίνεται ένα όνομα τρέχοντας έναν αλγόριθμο ονοματοδοσίας ζωνών και το δίκτυο καταμερίζεται ες έναν αριθμό από μη επικαλυπτόμενες ζώνες.Για να καθοριστούν οι διαδρομές χρησιμοποιούνται υβριδικά ad hoc πρωτόκολλα δρομολόγησης (hybrid ad hoc routing protocols - HARP) για να δουλέψουν πάνω από το DDR. Το HARP χρησιμοποιεί τους ενδοζωνικούς (intra-zone) και διαζωνικούς (inter-zone) πίνακες δρομολόγησης που δημιουργήθηκαν από το DDR για να καθορίσει ένα σταθερό μονοπάτι μεταξύ της πηγής και του προορισμού. Το πλεονέκτημα του DDR είναι ότι, σε αντίθεση με το ZHLS, δεν βασίζεται σε ένα στατικό χάρτη ζωνών για να κάνει την δρομολόγηση και δεν απαιτεί ένα κόμβο-ρίζα (root node) ή έναν επικεφαλής συστάδας (cluster head) για να συντονίσει την μετάδοση των πακέτων δεδομένων και ελέγχου, μεταξύ διαφορετικών ζωνών και κόμβων. Ωστόσο, οι κόμβοι οι οποίοι επελέγησαν ως προτιμώμενοι γείτονες ίσως περιορίσουν την απόδοση. Αυτό μπορεί να συμβεί επειδή θα μετέδιδαν περισσότερα πακέτα δρομολόγησης και δεδομένων απ' ότι όλοι οι άλλοι κόμβοι, πράγμα που σημαίνει ότι αυτοί οι κόμβοι θα απαιτούσαν περισσότερη επαναφόρτιση καθώς θα είχαν λιγότερο χρόνο ανενεργής κατάστασης απ' ότι οι άλλοι κόμβοι. Επιπλέον, αν ένας κόμβος είναι ο προτιμώμενος γείτονας για πολλούς από τους γείτονες του, τότε πολλοί κόμβοι ίσως θέλουν να επικοινωνήσουν μαζί του. Αυτό σημαίνει ότι ο ανταγωνισμός για την πρόσβαση στο κανάλι θα αυξανόταν γύρω από τον προτιμώμενο γείτονα, πράγμα το οποίο θα είχε ως αποτέλεσμα οι γειτονικοί κόμβοι να υφίστανται μεγάλες καθυστερήσεις πριν μπορέσουν να καταλάβουν το μέσο μετάδοσης. Στα δίκτυα με υψηλή κίνηση, αυτό ίσως έχει ως αποτέλεσμα μια σημαντική μείωση στην απόδοση, λόγω των πακέτων που χάνονται όταν γεμίζουν οι buffers.

ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΕ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΥΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ

Πολλά από τα υπάρχοντα on-demand πρωτόκολλα δρομολόγησης χρησιμοποιούν την πλημμύρα (flooding) των πακέτων RouteRequest για να αποκτήσουν ένα εφικτό μονοπάτι με τους απαιτούμενους περιορισμούς όσον αφορά την προώθηση των πακέτων. Η πλημμύρα των πακέτων ελέγχου έχει ως αποτέλεσμα ένα σημαντικό ποσό πλεονασμού, σπατάλης του εύρους ζώνης, αύξησης του αριθμού των συγκρούσεων και εκπομπής αναταραχών (storms) (η εκπομπή αναταραχών αναφέρεται στην παρουσία/δημιουργία ενός μεγάλου αριθμού πακέτων ελέγχου εκπομπής για δρομολόγηση, εξαιτίας της υψηλής αστάθειας στην τοπολογία του δικτύου ως αποτέλεσμα της

κινητικότητας) σε περιόδους συχνών αλλαγών στην τοπολογία. Μερικά από τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης που χρησιμοποιούν αποδοτικούς μηχανισμούς πλημμύρας για να αντιμετωπίσουν την απαίτηση για πλημμύρα, είναι τα πρωτόκολλα Preferred Link-Based Routing (PLBR) και Optimized Link State Routing (OLSR). Το πρώτο ανήκει στην κατηγορία των on-demand πρωτοκόλλων δρομολόγησης και το τελευταίο στην κατηγορία των table-driven πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Αυτά τα δύο πρωτόκολλα χρησιμοποιούν αλγόριθμούς οι οποίοι απαιτούν μόνο έναν ελάχιστο αριθμό μεταδόσεων για να πλημμυρίσουν ολόκληρο το δίκτυο.

Πρωτόκολλο Preferred Link-Based Routing

Το SSA χρησιμοποιεί την προσέγγιση της προτιμώμενης ζεύξης (preferred link) κατά ένα αυτονόητο τρόπο κάνοντας επεξεργασία σε ένα πακέτο RouteRequest μόνο αν αυτό έχει ληφθεί μέσα από μια δυνατή ζεύξη. Τα ενσύρματα δίκτυα επίσης χρησιμοποιούν μηχανισμούς προτιμώμενης ζεύξης, αλλά αυτοπεριορίζονται επιλέγοντας μία και μόνο προτιμώμενη ζεύξη, βασιζόμενα σε ευρετικές μεθόδους (heuristics) οι οποίοι ικανοποιούν πολλούς περιορισμούς, όπως για παράδειγμα, απαίτηση διαδρομής με ελάχιστο κόστος και ελάχιστη καθυστέρηση. Στα ad hoc δίκτυα, το μοντέλο μοναδικής προτιμώμενης ζεύξης δεν είναι κατάλληλο εξαιτίας λόγων όπως είναι η έλλειψη πληροφορίας για την τοπολογία, τα συνεχώς μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά των ζεύξεων, η φύση εκπομπής του ραδιοδιαύλου και η κινητικότητα των κόμβων.

Οι Sisodia et al. πρότειναν δυο αλγορίθμους οι οποίοι είναι γνωστοί ως πρωτόκολλα δρομολόγησης που βασίζονται στην προτιμώμενη ζεύξη (preferred link-based routing – PLBR) και οι οποίοι χρησιμοποιούν μια διαφορετική προσέγγιση κατά την οποία ένας κόμβος επιλέγει ένα υποσύνολο κόμβων από την λίστα των γειτόνων του NL (neighbors list). Αυτό το υποσύνολο αναφέρεται ως προτιμώμενη λίστα PL (preferred list). Η επιλογή αυτού του υποσυνόλου μπορεί να βασίζεται στα χαρακτηριστικά της ζεύξης ή του κόμβου. Κάθε πακέτο RouteRequest μεταφέρει την λίστα του επιλεγμένου υποσυνόλου γειτόνων. Όλοι οι γείτονες λαμβάνουν πακέτα RouteRequest εξαιτίας της εκπομπής του ραδιοδιαυλου, όμως μόνο οι γείτονες που είναι παρόντες στην PL τα προωθούν περαιτέρω. Το πακέτο προωθείται από K γείτονες, όπου K είναι ο μέγιστος αριθμός των γειτόνων που επιτρέπονται στο PL. Το PLBR έχει ως στόχο να ελαχιστοποιήσει το overhead ελέγχου των ad hoc ασύρματων δικτύων. Όλοι οι κόμβοι λειτουργούν με ανομοιογενή τρόπο. Κάθε κόμβος περιέχει πληροφορία για τους γείτονές του και τους γείτονές τους, σε ένα πίνακα ο οποίος λέγεται πίνακας των γειτόνων του γείτονα NNT (neighbor's neighbor table) και περιοδικά μεταδίδει ένα beacon ο οποίος περιέχει την αλλαγμένη πληροφορία του γείτονα. Το PLBR έχει τρεις κύριες φάσεις: δημιουργία διαδρομής, επιλογή διαδρομής και διατήρηση διαδρομής.

Η φάση της δημιουργίας διαδρομής ξεκινά όταν ένας κόμβος πηγή (Src) λάβει πακέτα από το στρώμα εφαρμογής τα οποία προορίζονται για ένα κόμβο προορισμού (Dest) για τον οποίο δεν είναι διαθέσιμη κάποια διαδρομή. Αν ο Dest είναι στο NNT του Src, η διαδρομή δημιουργείται αμέσως. Στην αντίθετη περίπτωση, ο Src μεταδίδει ένα πακέτο RouteRequest το οποίο περιέχει την διεύθυνση

του κόμβου πηγή (SrcID), την διεύθυνση του κόμβου προορισμού (DestID), ένα μοναδικό σειριακό αριθμό (SeqNum) (ο οποίος αποτρέπει τον σχηματισμό βρόχων και την προώθηση πολλών αντιγράφων του ίδιου πακέτου RouteRequest το οποίο λαμβάνεται από διαφορετικούς γείτονες), το μονοπάτι που διασχίζει TP (traversed path) (το οποίο περιέχει την λίστα των κόμβων μέσα από τους οποίους έχει περάσει το πακέτο μέχρι τώρα και το βάρος που ανατίθεται στις σχετικές ζεύξεις) και μία PL (preferred list). Επίσης περιέχει ένα πεδίο χρόνου ζωής TTL (time to live) το οποίο χρησιμοποιείται έτσι ώστε τα πακέτα να μην υπάρχουν στο δίκτυο για πάντα και μια σημαία (flag) NoDelay, η χρήση της οποίας θα περιγραφεί αργότερα σε αυτή την ενότητα. Κάθε κόμβος με τις απαραίτητες προϋποθέσεις πριν προωθήσει ένα πακέτο RouteRequest, υπολογίζει ξανά τον πίνακα της προτιμώμενης λίστας PLT (preferred list table) ο οποίος περιέχει την λίστα των γειτόνων κατά σειρά προτίμησης. Ο κόμβος εισάγει τις πρώτες K εγγραφές του PLT στο πεδίο PL του πακέτου RouteRequest (το K είναι μια global παράμετρος η οποία δείχνει το μέγιστο μέγεθος της PL). Η παλιά PL ενός ληφθέντος πακέτου αντικαθίσταται κάθε φορά με μία νέα PL από τον κόμβο προώθησης. Ένας κόμβος έχει τις απαραίτητες προϋποθέσεις για να προωθήσει ένα πακέτο RouteRequest μόνο αν ικανοποιεί όλα τα ακόλουθα κριτήρια: η node ID θα πρέπει να είναι παρούσα στην PL του ληφθέντος πακέτου RouteRequest, το πακέτο RouteRequest δεν θα πρέπει να έχει ήδη προωθηθεί από τον κόμβο και το TTL του πακέτου θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το μηδέν. Αν ο Dest είναι στον NNT του κόμβου που έχει τις απαραίτητες προϋποθέσεις, το πακέτο RouteRequest προωθείται σαν unicast πακέτο στον γείτονα, ο οποίος είτε είναι ο Dest ή η NL του περιέχει τον Dest. Αν υπάρχουν πολλοί γείτονες των οποίων η NL έχει τον Dest, το πακέτο RouteRequest προωθείται σε μόνο έναν τυχαία επιλεγμένο γείτονα. Σε αντίθετη περίπτωση, το πακέτο εκπέμπεται ευρέως (broadcast), ενώ υπολογίζεται μια νέα PL από τον NNT του κόμβου. Ο PLT υπολογίζεται μέσω ενός από τους δύο αλγορίθμους που συζητήθηκαν προηγουμένως σε αυτή την ενότητα. Αν ο υπολογισμένος PLT είναι άδειος, δηλαδή, δεν υπάρχουν καθόλου γείτονες με τις απαιτούμενες προϋποθέσεις, το πακέτο RouteRequest απορρίπτεται και χαρακτηρίζεται σταλμένο. Αν το πακέτο RouteRequest φτάσει στον προορισμό, η διαδρομή επιλέγεται με την διαδικασία επιλογής διαδρομής που δίνεται παρακάτω.

Όταν πολλά πακέτα RouteRequest φτάσουν στον Dest, η διαδικασία επιλογής διαδρομής επιλέγει την καλύτερη διαδρομή ανάμεσά τους. Το κριτήριο για την επιλογή της καλύτερης διαδρομής μπορεί να είναι το συντομότερο μονοπάτι ή το μονοπάτι ελάχιστης καθυστέρησης ή το περισσότερο σταθερό μονοπάτι. Ο Dest ξεκινά ένα χρονοδιακόπτη αφού λάβει το πρώτο πακέτο RouteRequest. Ο χρονοδιακόπτης λήγει μετά από μία συγκεκριμένη περίοδο RouteSelectWait, μετά από την οποία δεν γίνονται δεκτά άλλα πακέτα RouteRequest. Από τα ληφθέντα πακέτα RouteRequest μια διαδρομή επιλέγεται όπως περιγράφεται παρακάτω.

Για κάθε RouteRequest i που έφτασε στον Dest κατά την περίοδο RouteSelectWait, επιλέγεται το $Max(W^i_{min})$, όπου το W^i_{min} είναι το ελάχιστο βάρος μιας ζεύξης στο μονοπάτι που ακολουθεί το i πακέτο. Αν δύο ή περισσότερα μονοπάτια έχουν την ίδια τιμή για το $Max(W^i_{min})$, επιλέγεται το συντομότερο μονοπάτι. Αφού επιλεγεί μια διαδρομή, όλα τα επόμενα πακέτα RouteRequest από την ίδια Src και με SeqNum μικρότερο από ή ίσο με το SeqNum του επιλεγμένου RouteRequest

απορρίπτονται. Αν η σημαία NoDelay είναι ενεργοποιημένη (set), η διαδικασία επιλογής διαδρομής παραλείπεται και το TP του πρώτου RouteRequest που φτάνει στον Dest επιλέγεται ως η διαδρομή. Η σημαία NoDelay μπορεί να ενεργοποιηθεί αν χρειαστεί μια γρήγορη αποκατάσταση σύνδεσης.

Η κινητικότητα των κόμβων προκαλεί συχνές ρήξεις μονοπατιών οι οποίες θα πρέπει να αποκατασταθούν τοπικά έτσι ώστε να μειωθεί η εκπομπή των πακέτων RouteRequest. Ο μηχανισμός εκπομπής τοπικής αποκατάστασης διαδρομής που χρησιμοποιείται στο ABR έχει υψηλό ρυθμό λαθών εξαιτίας της χρήσης περιορισμένων TTL, γεγονός το οποίο αυξάνει την μέση καθυστέρηση στην επαναδημιουργία των διαδρομών. Το PLBR χρησιμοποιεί ένα γρήγορο μηχανισμό αποκατάστασης διαδρομής ο οποίος παρακάμπτει τον κόμβο κάτω ζεύξης (πλευρά του Dest) του σπασμένου μονοπατιού, χρησιμοποιώντας πληροφορία για τα επόμενα δύο hops από τον NNT.

Αλγόριθμοι για τον υπολογισμό των Προτιμώμενων Ζεύξεων

Δύο διαφορετικοί αλγόριθμοι έχουν προταθεί από τους Sisodia et al. για την εύρεση των προτιμώμενων ζεύξεων. Ο πρώτος αλγόριθμος επιλέγει την διαδρομή βασιζόμενος στον βαθμό των γειτονικών κόμβων (βαθμός ενός κόμβου είναι ο αριθμός των γειτόνων του). Προτίμηση δείχνεται στους κόμβους των οποίων ο βαθμός των γειτόνων τους είναι μεγαλύτερος. Καθώς οι υψηλότερου βαθμού κόμβοι καλύπτουν περισσότερους κόμβους, μόνο μερικοί από αυτούς απαιτούνται για να καλύψουν όλους τους κόμβους ενός NNT. Αυτό μειώνει τον αριθμό των εκπομπών. Ο δεύτερος αλγόριθμος δίνει προτεραιότητα στις σταθερές ζεύξεις. Οι ζεύξεις δεν ταξινομούνται ρητά ως σταθερές ή μη σταθερές. Η αντίληψη της σταθερότητας βασίζεται στο βάρος που δίνεται στις ζεύξεις.

Αλγόριθμος Neighbor Degree-Based Preferred Link (NDPL)

Ας πούμε ότι ο d είναι ο κόμβος που υπολογίζει τον πίνακα της προτιμώμενης λίστας PLT (preferred list table). Το TP είναι το μονοπάτι που διασχίζεται και το OLD_{PL} είναι η προτιμώμενη λίστα του ληφθέντος πακέτου RouteRequest. Ο NNT του κόμβου d υποδηλώνεται από το NNT_d. Το N(i) υποδηλώνει τους γείτονες του κόμβου i και τον εαυτό του. Η λίστα συμπεριλαμβανομένων INL (include list) είναι ένα σύνολο το οποίο περιέχει όλους τους προσεγγίσιμους γείτονες με διάδοση του πακέτου RouteRequest ύστερα από την εκτέλεση του αλγορίθμου, και η λίστα αποκλειόμενων EXL (exclude list) είναι ένα σύνολο που περιλαμβάνει όλους του γείτονες οι οποίοι δεν είναι προσεγγίσιμοι μετά την διάδοση του πακέτου RouteRequest ύστερα από την εκτέλεση του αλγορίθμου.

1. Στο βήμα αυτό, ο κόμβος d σημειώνει τους κόμβους οι οποίοι δεν έχουν τις απαραίτητες προϋποθέσεις για περαιτέρω προώθηση του πακέτου RouteRequest.

   (a) Αν ένας κόμβος i του TP είναι γείτονας του κόμβου d, σημείωσε όλους τους γείτονες του i ως προσεγγίσιμους, δηλαδή, πρόσθεσε το N(i) στην INL.

(b) Αν ένας κόμβος i του OLD_{PL}, είναι γείτονας του κόμβου d και i<d, σημείωσε όλους τους γείτονες του κόμβου i ως προσεγγίσιμους, δηλαδή, πρόσθεσε το N(i) στην INL.
(c) Αν ο γείτονας i του κόμβου d έχει ένα γείτονα n παρόντα στο TP, σημείωσε όλους τους γείτονες του i ως προσεγγίσιμους προσθέτοντας το N(i) στην INL.
(d) Αν ο γείτονας i του κόμβου d έχει ένα γείτονα n παρών στην OLD_{PL} και n<d, πρόσθεσε και εδώ το N(i) στην INL, σημειώνοντας όλους τους γείτονες του κόμβου i ως προσεγγίσιμους.

2. Αν ο γείτονας i του κόμβου d δεν είναι στην INL, βάλε τον i στον πίνακα προτιμώμενης λίστας PLT και σημείωσε όλους τους γείτονες του i ως προσεγγίσιμους. Αν ο i είναι παρών στην INL, σημείωσε τους γείτονες του i ως μη προσεγγίσιμους προσθέτοντας τους στην EXL, καθώς το N(i) μπορεί να μην συμπεριληφθεί σε αυτό το βήμα. Εδώ οι γείτονες i του d επεξεργάζονται κατά την φθίνουσα σειρά των βαθμών τους. Μετά την εκτέλεση του βήματος αυτού, το πακέτο RouteRequest είναι εγγυημένο ότι θα φτάσει σε όλους τους γείτονες του d. Αν η EXL δεν είναι άδεια, μερικοί γείτονες του γείτονα n του κόμβου d είναι προς το παρών μη προσεγγίσιμοι και συμπεριλαμβάνονται στο επόμενο βήμα.
3. Αν ο γείτονας i του d έχει ένα γείτονα n παρόντα στην EXL, βάλε τον i στην PLT και σημείωσε όλους τους γείτονες του i ως προσεγγίσιμους. Διέγραψε όλους τους γείτονες του i από την EXL. Οι γείτονες επεξεργάζονται κατά την φθίνουσα σειρά των βαθμών τους. Μετά την εκτέλεση αυτού του βήματος, όλοι οι κόμβοι στον NNT_d είναι προσεγγίσιμοι. Εφάρμοσε βήματα μείωσης για να αφαιρεθούν οι επικαλυπτόμενοι γείτονες από τον PLT χωρίς να υπάρξει συμβιβασμός στην δυνατότητα προσέγγισης.
4. Τα βήματα μείωσης εφαρμόζονται εδώ για να αφαιρεθούν οι επικαλυπτόμενοι γείτονες από τον PLT χωρίς να υπάρχει συμβιβασμός στην δυνατότητα προσέγγισης.

(a) Αφαίρεσε κάθε κόμβο i από τον PLT αν ο N(i) καλύπτεται από τους υπόλοιπους κόμβους του PLT. Εδώ, ο ελάχιστος βαθμός γειτόνων επιλέγεται κάθε στιγμή.
(b) Αφαίρεσε τον γείτονα i από τον PLT του οποίου ο N(i) καλύπτεται από τον ίδιο τον κόμβο d.

<u>Αλγόριθμος Weight-Based Preferred Link (WBPL)</u>

Σε αυτό τον αλγόριθμο, ένας κόμβος βρίσκει τις προτιμώμενες ζεύξεις με βάση την σταθερότητα, η οποία επισημαίνεται από ένα βάρος, το οποίο με την σειρά του βασίζεται στην χρονική και χωρική σταθερότητα των γειτόνων του.

1. Θεώρησε το $BCnt_i$ ως τον αριθμό των beacons που λαμβάνονται από ένα γείτονα i και TH_{bcon} τον αριθμό των beacons που δημιουργούνται σε διάρκεια μιας περιόδου ίσης με αυτής που

απαιτείται για να καλυφθεί δύο φορές το εύρος ζώνης ($TH_{bcon} = \frac{2 \times transmission\ range}{\max imum\ velocity \times period\ of\ beacon}$).

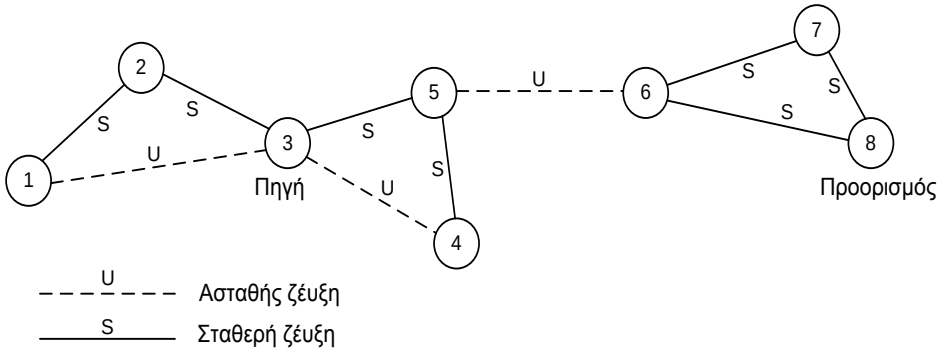
Το βάρος που δίνεται στον i βασίζεται στην χρονική σταθερότητα (WT^{i}_{time}) είναι: $WT_{time} = \begin{cases} 1 & if \quad BCnt_i > TH_{bcon} \\ BCnt_i / TH_{bcon} & otherwise \end{cases}$

2. Υπολόγισε την απόσταση (D^{i}_{Est}) προς τον i από την ληφθείσα ισχύ των τελευταίων λίγων πακέτων χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα μοντέλα διάδοσης. Το βάρος που βασίζεται στην χωρική σταθερότητα είναι $WT^{i}_{spatial} = \frac{R - D_{Est}}{R}$.

3. Το βάρος που ανατίθεται την ζεύξη i είναι το συνδυασμένο βάρος δεδομένης της χρονικής και χωρικής σταθερότητας. $W_i = WT^{i}_{time} + WT^{i}_{spatial}$

4. Τακτοποίησε τους γείτονες σε μία μη αυξανόμενη σειρά των βαρών τους. Οι κόμβοι μπαίνουν στον PLT με αυτή την σειρά.

5. Αν μια ζεύξη υπερφορτωθεί, διέγραψε τον σχετικό γείτονα από τον PLT. Εκτέλεσε το βήμα 1 του NDPL και διέγραψε $\forall i, \quad i \in PLT \cap i \in INL$. Επίσης, διέγραψε εκείνους τους γείτονες από τον PLT οι οποίοι ικανοποιούν το βήμα 4 του NDPL.



Παράδειγμα δικτύου

Ας θεωρηθεί για παράδειγμα η παρακάτω εικόνα, όπου ο κόμβος 3 είναι η πηγή και ο κόμβος 8 είναι ο προορισμός. Οι S και U δείχνουν τις σταθερές και ασταθείς ζεύξεις. Στους WBPL και NDPL, η πηγή που δημιουργεί αυτό το RouteRequest ως Dest δεν είναι παρούσα στον NNT και υπολογίζει τον

πίνακα προτιμώμενης ζεύξης (PLT). Ας θεωρηθεί K=2 το μέγεθος της προτιμώμενης λίστας. Στον NDPL, μετά το βήμα 2 ο PLT γίνεται {5, 1} και μετά το βήμα 3 επίσης ο PLT παραμένει {5, 1}. Στο βήμα μείωσης 4b, ο γείτονας 1 διαγράφεται από τον PLT και συνεπώς ο κόμβος 3 στέλνει το πακέτο RouteRequest μόνο στον γείτονα 5. Στον WBPL, τα βάρη ανατίθενται σε όλους τους γείτονες σύμφωνα με τα βήματα 1, 2, και 3 και όλοι οι γείτονες είναι στον PLT. Στο βήμα 5, οι γείτονες 1, 4 και 2 διαγράφονται από τον PLT εξαιτίας των βημάτων 4a και 4b του NDPL και συνεπώς παραμένει μόνο ο κόμβος 5. Τώρα το πακέτο RouteRequest μπορεί να σταλεί σαν unicast πακέτο έτσι ώστε να αποφευχθεί η ευρεία εκπομπή. Αν υπάρξει ευρεία εκπομπή, όλοι οι κόμβοι λαμβάνουν το πακέτο, όμως μόνο ο κόμβος 5 μπορεί να το προωθήσει περαιτέρω. Καθώς ο Dest 8 είναι παρών στον NNT του κόμβου 5, το στέλνει απευθείας στον κόμβο 6 ο οποίος το προωθεί στον Dest. Εδώ μόνο τρία πακέτα μεταδίδονται για την εύρεση της διαδρομής και το μήκος του μονοπατιού είναι 3. Τώρα ας θεωρήσουμε το SSA. Μετά τις εκπομπές από τους κόμβους 3 και 5, το πακέτο RouteRequest φτάνει στον κόμβο 6 όπου απορρίπτεται και συνεπώς το RouteRequest αποτυγχάνει να βρει μια διαδρομή. Μετά την λήξη του χρόνου, θέτει μια σημαία η οποία υποδεικνύει την επεξεργασία από όλους και με αυτό τον τρόπο βρίσκει την ίδια διαδρομή με τους WBPL και NDPL.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

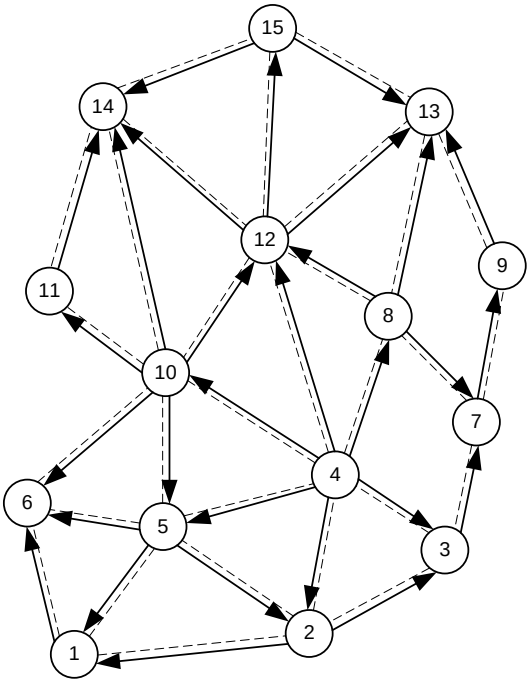
Ο αποδοτικός μηχανισμός πλημμύρας ο οποίος χρησιμοποιείται σε αυτό το πρωτόκολλο ελαχιστοποιεί το πρόβλημα εκπομπής αναταραχών (storms) το οποίο είναι κυρίαρχο στα on-demand πρωτόκολλα δρομολόγησης. Επομένως, το πρωτόκολλο αυτό έχει την υψηλότερη ικανότητα αυξομείωσης (scalability) σε σύγκριση με τα άλλα on-demand πρωτόκολλα δρομολόγησης. Η μείωση στο overhead ελέγχου έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του αριθμού των συγκρούσεων και την βελτίωση στην αποδοτικότητα του πρωτοκόλλου. Το PLBR πετυχαίνει αποδοτικότητα στο εύρος ζώνης έχοντας ως κόστος την αυξημένη υπολογιστική ισχύ. Τόσο ο NDPL όσο και ο WBPL είναι υπολογιστικά περισσότερο πολύπλοκοι από τις άλλες μεθόδους προώθησης πακέτων RouteRequest.

Optimized Link State Routing

Το πρωτόκολλο Optimized link state routing (OLSR) είναι ένα proactive πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο χρησιμοποιεί έναν αποδοτικό μηχανισμό προώθησης πακέτων κατάστασης ζεύξεων (link state packet forward mechanism), ο οποίος αναφέρεται ως πολυσημειακη μεταβίβαση (multipoint relaying). Το πρωτόκολλο αυτό βελτιστοποιεί το καθαρό πρωτόκολλο δρομολόγησης κατάστασης ζεύξεων. Οι βελτιστοποιήσεις γίνονται κατά δύο τρόπους: μειώνοντας το μέγεθος των πακέτων ελέγχου και μειώνοντας τον αριθμό των ζεύξεων που χρησιμοποιούνται για την προώθηση των πακέτων κατάστασης ζεύξεων. Η μείωση στο μέγεθος των πακέτων κατάστασης ζεύξεων γίνεται δηλώνοντας μόνο ένα υποσύνολο των ζεύξεων στις ενημερώσεις κατάστασης ζεύξεων. Αυτό το

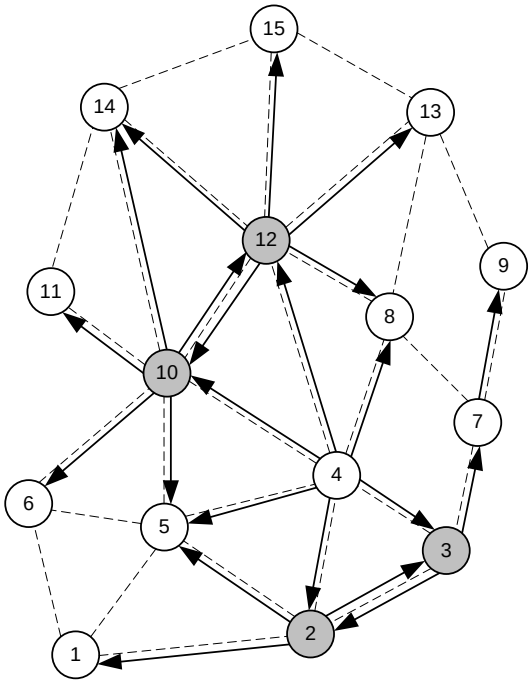
υποσύνολο των ζεύξεων ή των γειτόνων οι οποίοι επιλέχθηκαν για τις ενημερώσεις κατάστασης ζεύξεων και στους οποίους ανατίθεται η ευθύνη για την προώθηση των πακέτων, λέγονται πολυσημειακοί αναμεταδότες (multipoint relays). Η βελτιστοποίηση με χρήση της πολυσημειακης μεταβίβασης διευκολύνει τις περιοδικές ενημερώσεις κατάστασης ζεύξεων. Ο μηχανισμός ενημέρωσης κατάστασης ζεύξεων δεν δημιουργεί άλλα πακέτα ελέγχου όταν σπάσει μια ζεύξη ή όταν μια ζεύξη προστίθεται πρόσφατα. Η βελτιστοποίηση των ενημερώσεων κατάστασης ζεύξεων επιτυγχάνει μεγαλύτερη αποδοτικότητα όταν λειτουργεί σε μεγάλης πυκνότητας δίκτυα. Η παρακάτω εικόνα (a) δείχνει τον αριθμό των μεταδόσεων μηνυμάτων που απαιτούνται όταν χρησιμοποιείται η τυπική προσέγγιση που βασίζεται στην πλημμύρα. Σε αυτή την περίπτωση, ο αριθμός των μεταδόσεων μηνυμάτων είναι περίπου ίσος με τον αριθμό των κόμβων που αποτελούν το δίκτυο. Το σύνολο που αποτελείται από κόμβους οι οποίοι είναι αναμεταδότες πολλαπλών σημείων (multipoint relays) αναφέρεται ως MRPset. Κάθε κόμβος (ας πούμε ο P) του δικτύου επιλέγει ένα MPRset το οποίο επεξεργάζεται και προωθεί κάθε πακέτο κατάστασης ζεύξεων που δημιουργεί ο κόμβος P. Οι γειτονικοί κόμβοι που δεν ανήκουν στο MPRset επεξεργάζονται τα πακέτα κατάστασης ζεύξεων που δημιουργούνται από τον κόμβο P αλλά δεν τα προωθούν. Παρόμοια, κάθε κόμβος διατηρεί ένα υποσύνολο γειτόνων που λέγονται MPRselectors, το οποίο δεν είναι τίποτε άλλο παρά το σύνολο των γειτόνων οι οποίοι επέλεξαν τον κόμβο ως multipoint relay. Ένας κόμβος προωθεί τα πακέτα που λαμβάνονται από τους κόμβους που ανήκουν στο δικό του σύνολο MPRselector. Τα μέλη τόσο του MRPset όσο και των MPRselectors αλλάζουν συνέχεια με το χρόνο. Τα μέλη του MPRset ενός κόμβου επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε κόμβος που βρίσκεται σε απόσταση γειτονίας δύο hops, έχει μια διπλής κατεύθυνσης ζεύξη με τον κόμβο. Η επιλογή των κόμβων που αποτελούν το MRPset επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του OLSR, επειδή ένας κόμβος υπολογίζει διαδρομές προς όλους τους προορισμούς μόνο μέσω των μελών του δικού του MRPset. Κάθε κόμβος εκπέμπει περιοδικά το δικό του σύνολο MPRselector σε κόμβους που βρίσκονται στην άμεση γειτονιά του. Ένας κόμβος, για να αποφασίσει την συμμετοχή άλλων κόμβων ως μέλη στο MRPset, στέλνει περιοδικά μηνύματα Hello τα οποία περιέχουν την λίστα των γειτόνων με τους οποίους ο κόμβος έχει διπλής κατεύθυνσης ζεύξεις και την λίστα των γειτόνων των οποίων οι μεταδόσεις ελήφθησαν στο πρόσφατο παρελθόν αλλά με τους οποίους οι διπλής κατεύθυνσης ζεύξεις δεν έχουν ακόμα επιβεβαιωθεί. Οι κόμβοι που λαμβάνουν αυτό το πακέτο Hello ενημερώνουν τους δικούς τους πίνακες τοπολογίας δύο hop (two-hop topology tables). Στο πακέτο Hello φαίνεται επίσης και η επιλογή των multipoint relays. Για να αποθηκευθεί η λίστα των γειτόνων, των γειτόνων που απέχουν κατά δύο hops και η κατάσταση των γειτονικών κόμβων, χρησιμοποιείται μια δομή δεδομένων η οποία λέγεται πίνακας γειτόνων (neighbor table). Οι γειτονικοί κόμβοι μπορεί να είναι σε μία από τις τρεις πιθανές καταστάσεις κατάστασης ζεύξεων, δηλαδή, μονοκατευθυντική, διπλής κατεύθυνσης και πολυσημειακή αναμετάδοση. Για να αφαιρεθούν οι μπαγιάτικες καταχωρίσεις από τον πίνακα γειτόνων, κάθε καταχώριση έχει μια σχετική τιμή λήξης χρόνου (timeout), η οποία όταν εκπνεύσει, αφαιρεί την καταχώριση του πίνακα. Παρόμοια, με το MPRset επισυνάπτεται ένας σειριακός αριθμός ο οποίος αυξάνεται με κάθε νέο MPRset.

Το MPRset δεν χρειάζεται να είναι το βέλτιστο και κατά την αρχικοποιήση του δικτύου μπορεί να είναι το ίδιο με το σύνολο γειτόνων. Όσο πιο μικρός είναι ο αριθμός των κόμβων στο MPRset, τόσο πιο μεγάλη είναι η αποδοτικότητα του πρωτοκόλλου σε σύγκριση με την δρομολόγηση κατάστασης ζεύξεων. Κάθε κόμβος δημιουργεί περιοδικά πακέτα ελέγχου τοπολογίας TC (topology control packets) τα οποία περιέχουν πληροφορία για την τοπολογία με την οποία ενημερώνεται ο πίνακας δρομολόγησης. Αυτά τα πακέτα TC περιέχουν το σύνολο MPRselector κάθε κόμβου και πλημμυρίζουν ολόκληρο το δίκτυο χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό πολυσημειακής μεταβίβασης (multipoint relaying). Κάθε κόμβος του δικτύου λαμβάνει διάφορα τέτοια TC πακέτα από διαφορετικούς κόμβους και χρησιμοποιώντας την πληροφορία που περιλαμβάνεται σε αυτά τα πακέτα δημιουργεί τον πίνακα τοπολογίας. Ένα μήνυμα TC μπορεί να δημιουργηθεί από ένα κόμβο νωρίτερα από την κανονική περίοδο του αν υπάρξει αλλαγή στο σύνολο MPRselector μετά από την προηγούμενη μετάδοση και αν έχει περάσει ένας ελάχιστος χρόνος μετά από αυτό. Μια καταχώριση στον πίνακα τοπολογίας περιέχει ένα κόμβο προορισμού ο οποίος είναι ο MPRselector και ένα κόμβο τελευταίου hop (last-hop node) προς αυτόν τον προορισμό, ο οποίος είναι ο κόμβος που δημιουργεί το TC πακέτο. Έτσι, ο πίνακας δρομολόγησης περιέχει διαδρομές για όλους τους άλλους κόμβους του δικτύου.



Ζεύξη δικτύου

(a) Για να πλημμυρίσει το δίκτυο χρειάζονται τόσες μεταδόσεις, όσος είναι και ο αριθμός των κόμβων



Ο κόμβος 4 επιλέγει το MPRset <2, 3, 10, 12>

Κόμβος που ανήκει στο MPRset του κόμβου 4

Πακέτα εκπομπής τα οποία προωθούνται από τα μέλη του MPRset

(b) Πλημμύρισμα ολόκληρου του δικτύου με έξι μεταδόσεις, χρησιμοποιώντας την μέθοδο MPR

Ένα παράδειγμα επιλογής του MPRset στο OLSR

Επιλογή των κόμβων πολυσημειακής μεταβίβασης (Multiple Relay Nodes)

Η παρακάτω εικόνα (b) δείχνει την προώθηση των TC πακέτων χρησιμοποιώντας το MPRset του κόμβου 4. Σε αυτό το παράδειγμα, ο κόμβος 4 επιλέγει τους κόμβους 2, 3, 10 και 12 ως μέλη του δικού του MPRset. Η προώθηση από αυτούς τους κόμβους κάνει τα TC πακέτα να φτάνουν σε όλους τους κόμβους εντός της τοπικής τοπολογίας δύο hop του κόμβου που μεταδίδει. Η επιλογή του

βέλτιστου MPRset είναι πλήρους NP. Για την επιλογή του MPRset έχει προταθεί μια ευρετική μέθοδος (heuristic). Η σημειογραφία που χρησιμοποιείται σε αυτή είναι η εξής: το $N_i(x)$ αναφέρεται στο $i^{οστού}$ hop γειτονικό σύνολο του κόμβου x και το MPR(x) αναφέρεται στο MPRset του κόμβου x.

1. MPR(x) ← 0 /* Δημιουργία ενός άδειου MPRset */
2. MPR(x) ← {Εκείνοι οι κόμβοι που ανήκουν στο $N_1(x)$ και οι οποίοι είναι οι μόνοι γείτονες των κόμβων στο N_2 (x).}
3. Εφόσον υπάρχει κάποιος κόμβος στο $N_2(x)$ ο οποίος δεν καλύπτεται από το MPR(x)

   (a) Για κάθε κόμβο του $N_1(x)$, ο οποίος δεν είναι στο MPR(x), υπολόγισε τον μέγιστο αριθμό των κόμβων που καλύπτει ανάμεσα στους ακάλυπτους κόμβους του συνόλου

   (b) Πρόσθεσε στον MPR(x) τον κόμβο που ανήκει στο $N_1(x)$, για τον οποίο αυτός ο αριθμός είναι μέγιστος.

Ένας κόμβος ενημερώνει το MPRset όποτε ανιχνεύει μια νέα διπλής κατεύθυνσης ζεύξη στην γειτονιά του ή στην δύο hop τοπολογία του ή όταν στην γειτονιά του σπάσει μια διπλής κατεύθυνσης ζεύξη.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Το OLSR έχει διάφορα πλεονεκτήματα τα οποία το κάνουν μια καλύτερη επιλογή από τα άλλα table-driven πρωτόκολλα. Μειώνει το overhead δρομολόγησης το οποίο σχετίζεται με την table-driven δρομολόγηση, μειώνοντας επιπλέον τον αριθμό των εκπομπών που γίνονται. Έτσι το OLSR έχει τα πλεονεκτήματα του χαμηλού χρόνου δημιουργίας σύνδεσης και του μειωμένου overhead ελέγχου.

ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΙΕΡΑΡΧΙΚΗΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ

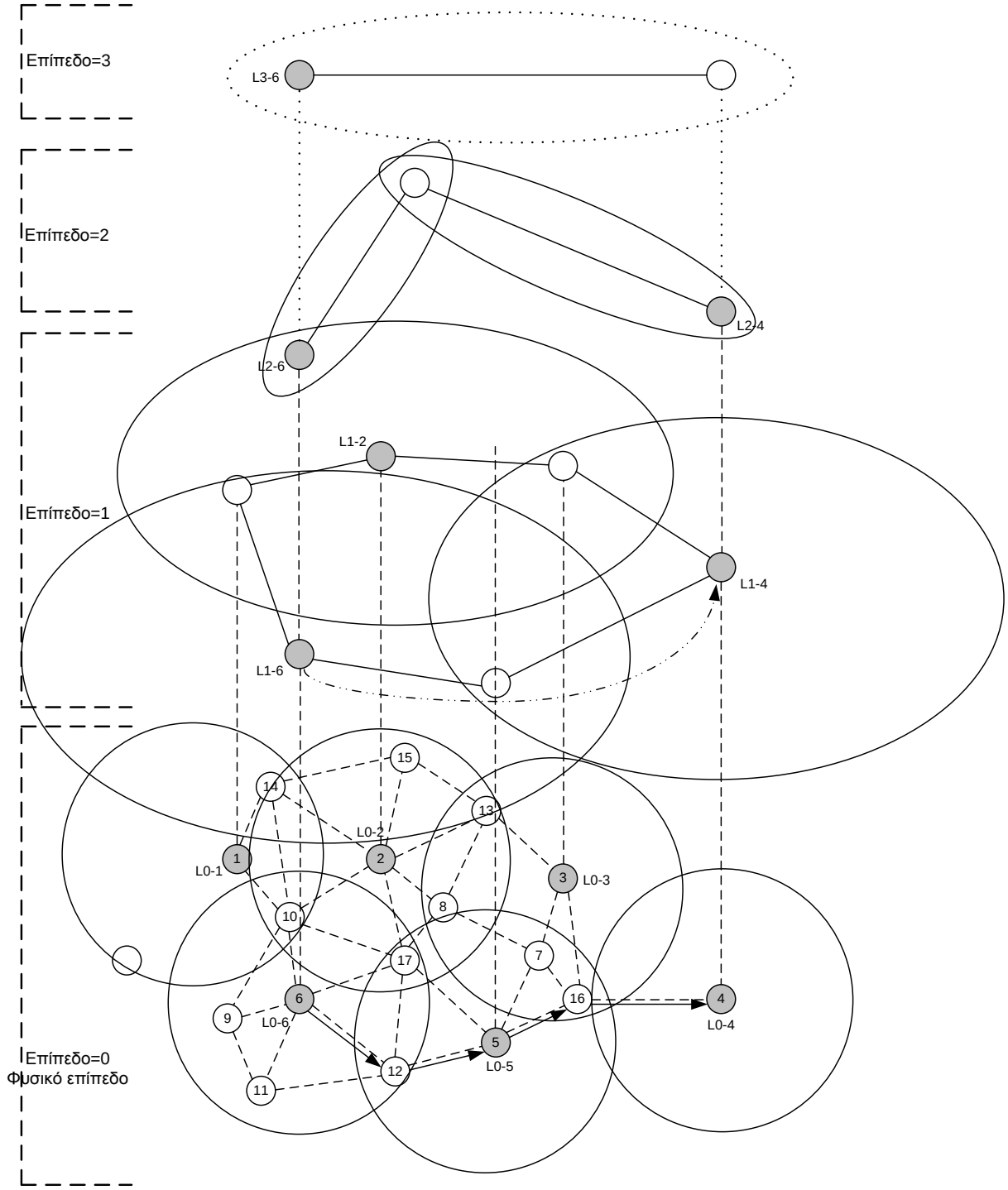
Η χρήση της ιεραρχίας στην δρομολόγηση έχει διάφορα πλεονεκτήματα, τα πιο σημαντικά από τα οποία είναι η μείωση στο μέγεθος των πινάκων δρομολόγησης και η καλύτερη δυνατότητα κλιμάκωσης (scalability). Σε αυτή την ενότητα θα αναλυθούν τα υπάρχοντα πρωτόκολλα ιεραρχικής δρομολόγησης για τα ad hoc ασύρματα δίκτυα.

Πρωτόκολλο Hierarchical State Routing (HSR)

Το πρωτόκολλο hierarchical state routing (HSR) είναι ένα κατανεμημένο πολυεπίπεδο πρωτόκολλο ιεραρχικής δρομολόγησης το οποίο χρησιμοποιεί ομαδοποίηση (clustering) σε διαφορετικά επίπεδα

με αποδοτική διαχείριση της συμμετοχής των μελών (membership) σε κάθε επίπεδο ομαδοποίησης. Η χρήση της ομαδοποίησης βελτιώνει την κατανομή και την διαχείριση των πόρων. Για παράδειγμα, η κατανομή των διαφορετικών συχνοτήτων ή των κωδικών (spreading codes σε ένα CDMA σύστημα) σε διαφορετικές ομάδες μπορεί να βελτιώσει την συνολική επαναχρησιμοποίηση του φάσματος. Το HSR λειτουργεί ταξινομώντας τα διάφορα επίπεδα των ομάδων. Εκλεγμένοι ηγέτες σε κάθε επίπεδο σχηματίζουν τα μέλη του άμεσα υψηλότερου επιπέδου. Για την εκλογή των ηγετών σε κάθε επίπεδο χρησιμοποιούνται διαφορετικοί αλγόριθμοι ομαδοποίησης. Το πρώτο επίπεδο φυσικής ομαδοποίησης γίνεται ανάμεσα στους κόμβους οι οποίοι είναι προσεγγίσιμοι σε ένα μόνο ασύρματο hop. Το επόμενο υψηλότερο επίπεδο φυσικής ομαδοποίησης γίνεται ανάμεσα στους κόμβους που εκλέγονται ως ηγέτες της καθεμιάς από αυτές τις ομάδες του πρώτου επιπέδου. Μαζί με την φυσική ομαδοποίηση, έχει προταθεί και μία μέθοδος λογικής ομαδοποίησης για το HSR, η οποία βασίζεται περισσότερο σε συγκεκριμένες σχέσεις ανάμεσα στους κόμβους παρά στις γεωγραφικές τους θέσεις, όπως στην περίπτωση της φυσικής ομαδοποίησης.

Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει την πολυστρωματική (multilayer) ομαδοποίηση η οποία ορίζεται από το HSR πρωτόκολλο. Στο χαμηλότερο επίπεδο (L=0), υπάρχουν έξι ηγέτες ομάδων (οι κόμβοι 1, 2, 3, 4, 5, και 6). Οι κόμβοι ταξινομούνται ως ηγέτες ομάδων, ή κόμβοι πύλες, ή κανονικοί κόμβοι μέλη. Σε ένα ηγέτη ομάδας ανατίθενται ευθύνες όπως η κατανομή σχισμών/συχνοτήτων/κωδικών, ο έλεγχος εισόδου κλήσης (call admission control), ο προγραμματισμός των μεταδόσεων των πακέτων, η ανταλλαγή της πληροφορίας δρομολόγησης και η διαχείριση των ρήξεων των διαδρομών. Στην παρακάτω εικόνα, ο κόμβος 5 είναι ένας επικεφαλής κόμβος ο οποίος σημειώνεται ως L0-5, το οποίο αναφέρεται στο επίπεδο ομαδοποίησης (L=0) και στην node ID (5). Παρόμοια σημειώνεται κάθε ένας από τους ηγέτες των ομάδων υψηλότερου επιπέδου (π.χ. οι L1-6, L2-6 και L3-6 αναφέρονται στον ίδιο κόμβο 6, αλλά λειτουργούν ως ηγέτες με τα δεδομένα leader IDs στα επίπεδα 1, 2, και 3 αντίστοιχα). Οι μέθοδοι επαναχρησιμοποίησης φάσματος, συμπεριλαμβανομένης της ανάθεσης των κωδικών (spreading codes) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάμεσα στους ηγέτες ομάδων των ομάδων με L=0. Για τους κόμβους που βρίσκονται υπό την ηγεσία του κόμβου 6 στο επίπεδο 0, τα μέλη της ομάδας είναι οι κόμβοι 9, 10, 11, 12 και 17. Αυτοί οι κόμβοι που ανήκουν σε πολλές ομάδες αναφέρονται ως κόμβοι πύλες της ομάδας (cluster gateway nodes). Για την ομάδα του επίπεδου 0 της οποίας ο ηγέτης είναι ο κόμβος 6, οι κόμβοι πύλες είναι οι κόμβοι 10, 12 και 17. Το δεύτερο επίπεδο ομαδοποίησης γίνεται ανάμεσα στους ηγέτες του πρώτου επιπέδου, δηλαδή, οι ηγέτες των ομάδων του επιπέδου 0, L0-1, L0-2, L0-3, L0-4, L0-5 και L0-6 αποτελούν τα μέλη της ομάδας του πρώτου επιπέδου.



Παράδειγμα για την πολυεπίπεδη ομαδοποίηση στο HSR

Κάθε κόμβος διατηρεί πληροφορία για όλους του γείτονές του καθώς και για την κατάσταση των ζεύξεων προς καθένα από αυτούς. Αυτή η πληροφορία εκπέμπεται εντός της ομάδας σε κανονικά διαστήματα. Ο ηγέτης της ομάδας ανταλλάσσει πληροφορίες για την τοπολογία και την δρομολόγηση

κατάστασης ζεύξεων, ανάμεσα στους ομότιμους του κόμβους στις γειτονικές ομάδες, χρησιμοποιώντας την πληροφορία για το ποια ομαδοποίηση του επόμενου υψηλότερου επιπέδου εκτελείται. Αυτή η ανταλλαγή της πληροφορίας κατάστασης ζεύξεων γίνεται πάνω από πολλαπλά hops τα οποία αποτελούνται από κόμβους πύλες και επικεφαλής ομάδων. Το μονοπάτι ανάμεσα σε δύο επικεφαλείς ομάδων το οποίο σχηματίζεται από πολλαπλές ασύρματες ζεύξεις λέγεται εικονική ζεύξη (virtual link). Η κατάσταση της ζεύξης για την εικονική ζεύξη (η οποία λέγεται αλλιώς και σήραγγα) αποκτάται από τις παραμέτρους της κατάστασης της ζεύξης των ασύρματων ζεύξεων που αποτελούν την εικονική ζεύξη.

Στην παρακάτω εικόνα, το μονοπάτι ανάμεσα στις ομάδες του πρώτου επιπέδου L1-6 και L1-4 περιλαμβάνει την ασύρματη ζεύξη 6-12-5-16-4. Η ομαδοποίηση γίνεται περιοδικά προς τα υψηλότερα επίπεδα. Σε κάθε επίπεδο, ο ηγέτης της ομάδας ανταλλάσσει πληροφορίες για την τοπολογία με τους ομότιμούς του. Αφού αποκτήσει την πληροφορία από τους ομότιμούς του, την πλημμυρίζει στα κατώτερα επίπεδα και έτσι την αποκτά κάθε κόμβος. Αυτή η ιεραρχική τοπολογία απαιτεί να υπάρχει ιεραρχική διευθυνσιοδότηση, η οποία βοηθά στην λειτουργία με λιγότερη πληροφορία δρομολόγησης αντί της πλήρους ανταλλαγής της τοπολογίας που απαιτείται στην δρομολόγησης κατάστασης ζεύξεων. Η ιεραρχική διευθυνσιοδότηση που ορίζεται στο HSR περιλαμβάνει την ιεραρχική ID (HID) και την ID του κόμβου. Η HID είναι μία ακολουθία από IDs των ηγετών των ομάδων όλων των επιπέδων, ξεκινώντας από το υψηλότερο επίπεδο προς τον παρόντα κόμβο. Αυτή η ID ενός κόμβου του HSR είναι παρόμοια με την μοναδική διεύθυνση του MAC στρώματος. Οι ιεραρχικές διευθύνσεις αποθηκεύονται σε ένα πίνακα HSR σε κάθε κόμβο και υποδεικνύει την θέση που κατέχει ο κόμβος στην ιεραρχία. Ο πίνακας HSR ενημερώνεται όποτε ο κόμβος λαμβάνει πακέτα ενημέρωσης δρομολόγησης.

Η ιεραρχική διεύθυνση του κόμβου 11 της εικόνας 5.32 είναι <6, 6, 6, 6, 11>, όπου η τελευταία καταχώριση (11) είναι η ID του κόμβου και οι υπόλοιπες καταχωρίσεις αποτελούνται από τις node IDs των ηγετών των ομάδων που αναπαριστούν την θέση του κόμβου 11 στην ιεραρχία. Παρόμοια, η HID του κόμβου 4 είναι <6, 4, 4, 4>. Όταν ο κόμβος 11 χρειάζεται να στείλει ένα πακέτο στον κόμβο 4, το πακέτο προωθείται στον υψηλότερο κόμβο της ιεραρχίας (κόμβος 6). Ο κόμβος 6 παραδίδει το πακέτο στον κόμβο 4, ο οποίος είναι στο ανώτατο επίπεδο της ιεραρχίας.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Το πρωτόκολλο HSR μειώνει το μέγεθος του πίνακα δρομολόγησης χρησιμοποιώντας την πληροφορία ιεραρχίας. Στο HSR, η αποθήκευση που απαιτείται είναι της τάξης O (n x m.) σε σύγκριση με το O (n^m) που απαιτείται για ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης κατάστασης ζεύξεων το οποίο είναι επίπεδης τοπολογίας (n είναι ο μέσος αριθμός των κόμβων μιας ομάδας και m είναι ο αριθμός των επιπέδων). Αν και η μείωση στο ποσό της πληροφορίας δρομολόγησης που αποθηκεύεται στους κόμβους είναι σημαντική, το overhead που δημιουργείται για την ανταλλαγή των πακέτων που περιέχουν

πληροφορία για τα πολλαπλά επίπεδα της ιεραρχίας και την διαδικασία εκλογής ηγετών, κάνει το πρωτόκολλο δύσχρηστο σε ένα περιβάλλον ad hoc ασύρματου δικτύου. Εκτός αυτού, ο αριθμός των κόμβων που συμμετέχουν σε ένα ad hoc ασύρματο δίκτυο δεν φτάνει τις διαστάσεις του αριθμού των κόμβων του Internet, όπου η ιεραρχική δρομολόγηση ταιριάζει καλύτερα. Στις στρατιωτικές εφαρμογές των ad hoc ασύρματων δικτύων, η ιεραρχία της δρομολόγησης θεωρείται σημαντική εκεί όπου οι συσκευές με υψηλότερες δυνατότητες επικοινωνίας μπορούν να λειτουργήσουν ως ηγέτες της ομάδας.

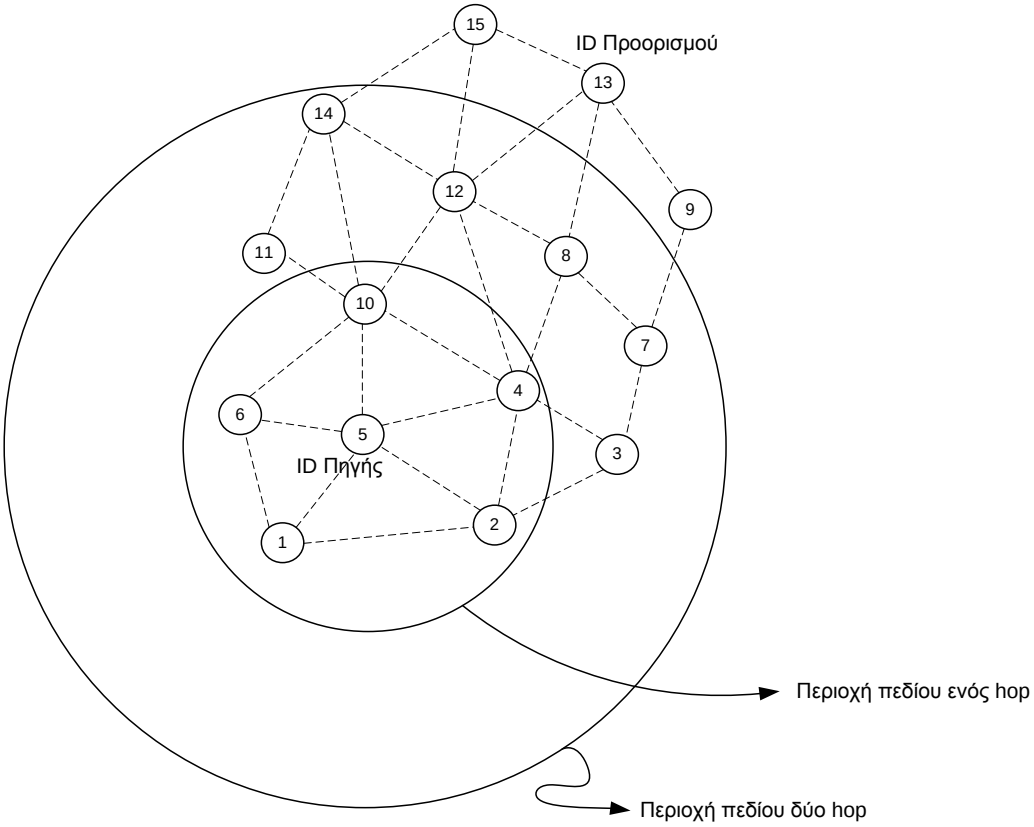
Πρωτόκολλο Fisheye State Routing

Τα table-driven πρωτόκολλα δρομολόγησης παράγουν overhead δρομολόγησης το οποίο εξαρτάται από το μέγεθος του δικτύου και την κινητικότητα των κόμβων, ενώ το overhead δρομολόγησης που παράγεται από τα on-demand πρωτόκολλα δρομολόγησης εξαρτάται από τον αριθμό των συνδέσεων που είναι παρούσες στο σύστημα, μαζί με τους παραπάνω δύο παράγοντες. Επομένως, καθώς ο αριθμός των αποστολέων στο δίκτυο αυξάνει, αυξάνει και το overhead δρομολόγησης. Το ZRP, για να μειώσει το overhead ελέγχου, χρησιμοποιεί μία ενδοζωνική (intra-zone) proactive προσέγγιση. Το πρωτόκολλο Fisheye State Routing (FSR) είναι μια γενίκευση του GSR πρωτοκόλλου. Το FSR χρησιμοποιεί την τεχνική fisheye για να μειώσει την πληροφορία που απαιτείται για να αναπαρασταθούν τα γραφικά δεδομένα, έτσι ώστε να μειώσει το overhead δρομολόγησης. Η βασική αρχή πίσω από αυτή την τεχνική είναι η ιδιότητα που έχει το μάτι του ψαριού να μπορεί να συλλαμβάνει την πληροφορία των pixel με μεγαλύτερη ακρίβεια κοντά στην κόρη του. Αυτή η ακρίβεια μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από το κέντρο της εστίας του ματιού. Αυτή η ιδιότητα μπορεί να εφαρμοστεί στην δρομολόγηση σε ένα ad hoc ασύρματο δίκτυο, από ένα κόμβο ο οποίος κρατά ακριβή πληροφορία για τους κόμβους που βρίσκονται στην γειτονιά του, αλλά όχι τόσο ακριβή πληροφορία για τους κόμβους οι οποίοι βρίσκονται μακριά και έτσι η ακρίβεια της πληροφορίας για το δίκτυο μειώνεται με αυξανόμενη απόσταση. Το FSR διατηρεί την τοπολογία του δικτύου σε κάθε κόμβο αλλά δεν πλημμυρίζει ολόκληρο το δίκτυο με την συγκεκριμένη πληροφορία όπως γίνεται στα πρωτόκολλα δρομολόγησης κατάστασης ζεύξεων. Αντί για την πλημμύρα, ένας κόμβος ανταλλάσσει πληροφορία για την τοπολογία μόνο με τους γείτονές του. Για να αναγνωρίζονται οι πρόσφατες αλλαγές στην τοπολογία χρησιμοποιείται μία μέθοδος σειριακής αρίθμησης. Αυτό αποτελεί μια υβριδική προσέγγιση η οποία αποτελείται από την ανταλλαγή πληροφορίας επιπέδου ζεύξης για τα πρωτόκολλα διανύσματος αποστάσεων (distance vector) και την ανταλλαγή την πληροφορίας για την πλήρη τοπολογία του δικτύου των πρωτοκόλλων κατάστασης ζεύξεων (link state). Η πληροφορία για την πλήρη τοπολογία του δικτύου διατηρείται σε κάθε κόμβο, ενώ υπολογίζονται και τα απαιτούμενα, συντομότερα μονοπάτια. Η ανταλλαγή της πληροφορίας για την τοπολογία εκτελείται κατά περιοδικό τρόπο και δεν οδηγείται από κάποιο γεγονός. Αυτό συμβαίνει επειδή η αστάθεια των ασύρματων ζεύξεων μπορεί να προκαλέσει υπερβολικό overhead ελέγχου όταν χρησιμοποιούνται ενημερώσεις οδηγούμενες από γεγονότα. Το FSR ορίζει ένα πεδίο δρομολόγησης, το οποίο είναι το σύνολο των κόμβων οι οποίοι είναι προσεγγίσιμοι μέσα σε ένα συγκεκριμένο αριθμό hops. Το πεδίο

ενός κόμβου σε δύο hops είναι το σύνολο των κόμβων το οποίο μπορεί να προσεγγιστεί μέσα σε δύο hops. Η παρακάτω εικόνα δείχνει το πεδίο του κόμβου 5 με ένα hop και δύο hops. Το overhead δρομολόγησης μειώνεται σημαντικά όταν επιλέγονται διαφορετικές συχνότητες ενημερώσεων για κόμβους οι οποίοι ανήκουν σε διαφορετικά πεδία.

Η πληροφορία κατάστασης ζεύξεων για τους κόμβους οι οποίοι ανήκουν στο μικρότερο πεδίο ανταλλάσσεται με την υψηλότερη συχνότητα. Η συχνότητα των ανταλλαγών μειώνεται όταν αυξάνεται το πεδίο. Αυτό κρατά περισσότερο ακριβή την πληροφορία για την άμεση γειτονική τοπολογία η οποία διατηρείται στον κόμβο, σε σύγκριση με την πληροφορία για τους κόμβους που βρίσκονται πολύ μακριά από αυτόν. Έτσι, το μέγεθος μηνύματος για ένα τυπικό πακέτο ενημέρωσης της πληροφορίας για την τοπολογία είναι σημαντικά μειωμένο εξαιτίας της αφαίρεσης της πληροφορίας για την τοπολογία που αφορά του απομακρυσμένους κόμβους. Η πληροφορία μονοπατιού για ένα μακρινό κόμβο μπορεί να είναι ανακριβής καθώς μπορεί να μπαγιατέψει. Όμως αυτό αντισταθμίζεται από το γεγονός ότι η διαδρομή γίνεται όλο και περισσότερο ακριβής όσο το πακέτα πλησιάζει προς τον προορισμό. Το FSR αυξομειώνεται αρκετά καλά στα μεγάλα ad hoc ασύρματα δίκτυα εξαιτίας της μείωσης του overhead δρομολόγησης λόγω της χρήσης του μηχανισμού που περιγράφηκε παραπάνω, όπου χρησιμοποιούνται διάφορες συχνότητες ενημερώσεων.

Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει ένα παράδειγμα που περιγράφει την πληροφορία για την τοπολογία του δικτύου που διατηρείται στους κόμβους του. Οι πληροφορίες δρομολόγησης για τους κόμβους οι οποίοι είναι ένα hop μακριά από ένα κόμβο ανταλλάσσονται περισσότερο συχνά απ’ ότι η πληροφορία δρομολόγησης για τους κόμβους οι οποίοι βρίσκονται περισσότερο από ένα hop μακριά. Η πληροφορία που αφορά στους κόμβους οι οποίοι βρίσκονται περισσότερο από ένα hop μακριά από τον παρόντα κόμβο φαίνονται κάτω από την διακεκομμένη γραμμή στον πίνακα τοπολογίας.



Λειτουργία του FSR

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Η ιδέα των πολυεπίπεδων πεδίων που χρησιμοποιούνται στο FSR μειώνει σημαντικά το εύρος ζώνης που καταναλώνεται από τα πακέτα ενημέρωσης κατάστασης ζεύξεων (link state update packets). Έτσι, το FSR είναι κατάλληλο για μεγάλα και υψηλής κινητικότητας ad hoc ασύρματα δίκτυα. Η επιλογή του αριθμού των hops που σχετίζεται με κάθε επίπεδο πεδίου (scope level) έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση του πρωτοκόλλου για διαφορετικές τιμές κινητικότητας και συνεπώς πρέπει να επιλέγεται με μεγάλη προσοχή.

ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΑ ΟΠΟΙΑ ΛΑΜΒΑΝΟΥΝ ΥΠΟΨΙΝ ΤΟΥΣ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ως μία απόκλιση από την παραδοσιακή δρομολόγηση των ενσύρματων δικτύων και την δρομολόγηση των κυτταρικών ασύρματων δικτύων, η κατανάλωση ενέργειας από τους κόμβους είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψιν από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται στα ad hoc ασύρματα δίκτυα. Αυτό συμβαίνει επειδή, στα ad hoc ασύρματα

δίκτυα, οι δρομολογητές είναι επίσης περιορισμένοι όσον αφορά την ενέργεια, όπως είναι και οι κόμβοι. Σε αυτή την ενότητα αναλύονται μερικά από τα πιο σημαντικά κριτήρια που παίρνουν υπόψιν τους αυτό τον παράγοντα ενέργειας.

Κριτήρια δρομολόγησης που λαμβάνουν υπόψιν τους την κατανάλωση ενέργειας

Ο περιορισμός στην διαθεσιμότητα της ισχύος λειτουργίας είναι ένας σημαντικός ανασχετικός παράγοντας, δεδομένων των απαιτήσεων φορητότητας, βάρους και μεγέθους των εμπορικών φορητών συσκευών. Συνεπώς, η χρήση των κριτηρίων δρομολόγησης που λαμβάνουν υπόψιν τους τις δυνατότητες των πηγών ισχύος των κόμβων του δικτύου συνεισφέρουν στην αποδοτική αξιοποίηση της ενέργειας και αυξάνουν την διάρκεια ζωής του δικτύου. Οι Singh et al. πρότειναν ένα σύνολο κριτηρίων δρομολόγησης το οποίο υποστηρίζει την συντήρηση της ισχύος της μπαταρίας. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία επιλέγουν μονοπάτια έτσι ώστε να διατηρήσουν ενέργεια θα πρέπει να γνωρίζουν τις καταστάσεις των μπαταριών στον δεδομένο κόμβο καθώς και στους άλλους ενδιάμεσους κόμβους του μονοπατιού.

Ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας ανά πακέτο

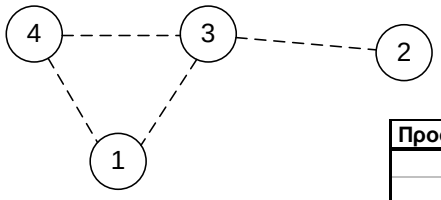
Αυτό το κριτήριο έχει ως στόχο να ελαχιστοποιήσει την ενέργεια που καταναλώνεται από ένα πακέτο το οποίο πηγαίνει από τον κόμβο πηγή στον κόμβο προορισμού. Η ενέργεια που καταναλώνεται από ένα πακέτο όταν διασχίζει ένα μονοπάτι είναι το άθροισμα των ενεργειών που απαιτούνται σε κάθε ενδιάμεσο hop σε αυτό το μονοπάτι. Η ενέργεια που καταναλώνεται σε ένα ενδιάμεσο hop είναι μια συνάρτηση της απόστασης ανάμεσα στους κόμβους που σχηματίζουν την ζεύξη και του φορτίου πάνω σε αυτή την ζεύξη. Αυτό το κριτήριο δεν εξισορροπεί το φορτίο έτσι ώστε να διατηρείται ομοιόμορφη κατανάλωση ισχύος σε όλο το δίκτυο. Τα μειονεκτήματα αυτού του κριτηρίου περιλαμβάνουν την επιλογή μονοπατιών με μεγάλο μήκος hop, την ανικανότητα μέτρησης της κατανάλωσης ισχύος σε μια ζεύξη, εκ των προτέρων, όταν το φορτίο μεταβάλλεται και την ανικανότητα αποτροπής της γρήγορης αποφόρτισης των μπαταριών σε μερικούς κόμβους.

Πληροφορία για την τοπολογία στον κόμβο 3

Προορισμός	Γείτονας	Hops
1	{3, 4}	1
2	{3}	1
3	{1, 2, 4}	0
4	{1, 3}	1

Πληροφορία για την τοπολογία στον κόμβο 4

Προορισμός	Γείτονας	Hops
1	{3, 4}	1
3	{1, 2, 4}	1
4	{1, 3}	0
2	{3}	2



Πληροφορία για την τοπολογία στον κόμβο 2

Προορισμός	Γείτονας	Hops
2	{3}	0
3	{1, 2, 4}	1
1	{3, 4}	2
4	{1, 3}	2

Πληροφορία για την τοπολογία στον κόμβο 1

Προορισμός	Γείτονας	Hops
1	{3, 4}	0
3	{1, 2, 4}	1
4	{1, 3}	1
2	{3}	2

Οι πίνακες δρομολόγησης στο FSR

Μεγιστοποίηση της ικανότητας σύνδεσης του δικτύου (Network Connectivity)

Αυτό το κριτήριο προσπαθεί να εξισορροπήσει το φορτίο δρομολόγησης ανάμεσα στους κόμβους του cut-set (το υποσύνολο των κόμβων του δικτύου, η αφαίρεση των οποίων έχει ως αποτέλεσμα κατατμήσεις (partitions) του δικτύου). Αυτό είναι σημαντικό σε περιβάλλοντα όπου η ικανότητα σύνδεσης του δικτύου πρέπει να εξασφαλιστεί κατανέμοντας ομοιόμορφα το φορτίο δρομολόγησης ανάμεσα στους κόμβους του cut-set. Έχοντας ένα μεταβλητό ρυθμό δημιουργίας κίνησης και απεριόριστο ανταγωνισμό στο δίκτυο, είναι δύσκολο να επιτευχθεί ένας ομοιόμορφος ρυθμός εξάντλησης της μπαταρίας για το cut-set.

Ελάχιστη διαφορά στα επίπεδα ισχύος των κόμβων

Αυτό το κριτήριο προτείνει την διανομή του φορτίου ανάμεσα σε όλους τους κόμβους του δικτύου έτσι ώστε η κατανάλωση ισχύος να παραμένει ομοιόμορφη ανάμεσα τους. Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο όταν ο ρυθμός και το μέγεθος των πακέτων δεδομένων ποικίλλει. Μια σχεδόν βέλτιστη επίδοση μπορεί να επιτευχθεί δρομολογώντας τα πακέτα στον επόμενου hop ελάχιστου φορτίου κόμβο.

Ελάχιστο κόστος ανά πακέτο

Για να μεγιστοποιηθεί η ζωή κάθε κόμβου του δικτύου, αυτό το κριτήριο δρομολόγησης εφαρμόζεται ως συνάρτηση της κατάστασης της μπαταρίας του κόμβου. Το κόστος ενός κόμβου μειώνεται με την αύξηση του φορτίου της μπαταρίας του και το αντίστροφο. Για την δρομολόγηση χρησιμοποιείται η μετάφραση του υπολειπόμενου φορτίου της μπαταρίας σε ένα παράγοντα κόστους. Με την διαθεσιμότητα ενός σχεδίου αποφόρτισης της μπαταρίας, μπορεί να υπολογιστεί το κόστος ενός κόμβου. Αυτό το κριτήριο έχει το πλεονέκτημα της ευκολίας στον υπολογισμό του κόστους ενός κόμβου ενώ ταυτόχρονα γίνεται και η διαχείριση της συμφόρησης.

Ελαχιστοποίηση του μέγιστου κόστους ενός κόμβου

Αυτό το κριτήριο ελαχιστοποιεί το μέγιστο κόστος ανά κόμβο για ένα πακέτο μετά την δρομολόγηση ενός αριθμού πακέτων ή μετά από μια συγκεκριμένη περίοδο. Αυτό καθυστερεί την αποτυχία ενός κόμβου η οποία προκύπτει εξαιτίας της μεγαλύτερης αποφόρτισης λόγω της προώθησης των πακέτων.

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοπτικά, τα περισσότερα πρωτόκολλα επίπεδης proactive δρομολόγησης δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικά. Αυτό συμβαίνει επειδή η διαδικασία ενημέρωσης τους καταναλώνει ένα σημαντικό ποσό του εύρους ζώνης του δικτύου. Από τα επίπεδης διαδρομής πρωτόκολλα τα οποία συζητήθηκαν, το OLSR έχει την καλύτερη απόδοση. Αυτό συμβαίνει λόγω της μείωσης του αριθμού των κόμβων αναμετάδοσης μέσω της χρήσης της πολυσημειακής μετάδοσης (multipoint relaying), η οποία επιλέγει μόνο ένα αριθμό από γειτονικούς κόμβους για να αναμεταδώσει το μήνυμα. Με αυτό τον τρόπο έχουμε μια ξεκάθαρη μείωση στον ανταγωνισμό για το κανάλι μετάδοσης και στον αριθμό των πακέτων ελέγχου που ταξιδεύουν στο δίκτυο, σε σύγκριση με τις στρατηγικές που χρησιμοποιούν την πλημμύρα, όπου όλοι οι κόμβοι αναμεταδίδουν τα μηνύματα. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης DREAM έχει επίσης μια δυναμική ευελιξίας εφόσον μειώνει σημαντικά το ποσό του overhead που μεταδίδεται μέσω του δικτύου, ανταλλάσσοντας κυρίως πληροφορίες εντοπισμού παρά πλήρη (ή μερική) πληροφορία κατάστασης ζεύξεων. Τα proactive πρωτόκολλα δρομολόγησης με ιεραρχικές διαδρομές, είναι περισσότερο αποδοτικά από όλα σχεδόν τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν επίπεδες διαδρομές, εφόσον εισάγουν μία δομή στο δίκτυο, η οποία ελέγχει το μέγεθος του overhead που μεταδίδεται μέσα από αυτό. Αυτό επιτυγχάνεται επιτρέποντας μόνο σε επιλεγμένους κόμβους, όπως είναι οι επικεφαλής κόμβοι, να αναμεταδίδουν την πληροφορία ελέγχου. Το κοινό μειονέκτημα που σχετίζεται με όλα τα ιεραρχικά πρωτόκολλα, είναι η διαχείριση της κινητικότητας. Η διαχείριση της κινητικότητας εισάγει περιττό overhead στο δίκτυο (όπως για παράδειγμα, επιπλέον overheads επεξεργασίας για τον σχηματισμό και την διατήρηση των συστάδων).

Όσον αφορά τα reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης, αυτά έχουν το ίδιο κόστος δρομολόγησης όταν θεωρήσουμε το χειρότερο σενάριο δρομολόγησης (worst-case scenario). Αυτό οφείλεται στην

θεμελιώδη φύση δρομολόγησης που έχουν, καθώς όλα ακολουθούν παρόμοιο τρόπο εξεύρεσης διαδρομής και διαδικασίες συντήρησης. Για παράδειγμα, πρωτόκολλα όπως το RDMR και το LAR, έχουν το ίδιο κόστος με τους παραδοσιακούς αλγορίθμους πλημμύρας κατά την θεώρηση της χειρότερης περίπτωσης. Το worst-case scenario εφαρμόζεται στα περισσότερα πρωτόκολλα δρομολόγησης όταν δεν υπάρχει προηγούμενη επικοινωνία μεταξύ της πηγής και του προορισμού. Αυτή είναι συνήθως η περίπτωση που συμβαίνει κατά τα αρχικά στάδια (για παράδειγμα όταν ένας κόμβος συνδέεται στο δίκτυο). Καθώς οι κόμβοι μένουν περισσότερο μέσα, είναι ικανοί να ενημερώσουν τους πίνακες δρομολόγησης τους και να γνωρίσουν περισσότερο το περιβάλλον τους. Μερικά πρωτόκολλα, το εκμεταλλεύονται αυτό περισσότερο από άλλα. Για παράδειγμα, στο DSR όταν εκπνέει μια διαδρομή για ένα προορισμό στην μνήμη του κόμβου, το πρωτόκολλο ξεκινά μια αναζήτηση σε όλο το δίκτυο με την μέθοδο της πλημμύρας για να βρει μια εναλλακτική διαδρομή. Αυτό δεν συμβαίνει με τα LAR και RDMR, στα οποία η ιστορία των διαδρομών χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της διαδικασίας εξεύρεσης διαδρομής στέλνοντας αιτήσεις για διαδρομές τοπικά σε μία υπολογισμένη περιοχή. Αυτό είναι ένα ξεκάθαρο πλεονέκτημα στα μεγάλα δίκτυα, εφόσον είναι διαθέσιμο περισσότερο εύρος ζώνης για μετάδοση δεδομένων. Άλλη μια μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση του αριθμού των πακέτων ελέγχου, είναι η επιλογή διαδρομών με βάση την σταθερότητα τους. Στα ABR και SSR, οι κόμβοι προορισμού επιλέγουν διαδρομές με βάση την σταθερότητα τους. Επίσης, το ABR επιτρέπει την επιλογή της συντομότερης διαδρομής (αλλά μόνο συμπληρωματικά με την σταθερότητα), πράγμα που σημαίνει ότι το ABR μπορεί να έχει μικρότερες καθυστερήσεις κατά την μετάδοση δεδομένων, απ' ότι το SSR. Αυτά τα πρωτόκολλα μπορούν να έχουν καλύτερες αποδόσεις από ότι τα πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία βασίζονται μόνο στην καθαρή επιλογή του συντομότερου μονοπατιού (shortest path selection), όπως είναι το DSR. Ωστόσο, μπορούν να παρουσιάσουν δυσλειτουργίες σε μεγάλα δίκτυα καθώς κάθε πακέτο πρέπει να μεταφέρει την πλήρη διεύθυνση προορισμού. Αυτό συμβαίνει επειδή η πιθανότητα ένας κόμβος να είναι μη έγκυρος σε μια επιλεγμένη διαδρομή αυξάνει σύμφωνα με την σχέση $O(a \cdot n)$, όπου α είναι η πιθανότητα αποτυχίας της διαδρομής σε ένα κόμβο και n είναι ο αριθμός των κόμβων κατά μήκος της διαδρομής. Έτσι, αυτά τα πρωτόκολλα είναι κατάλληλα για μικρού και μετρίου μεγέθους δίκτυα. Η μείωση στο overhead ελέγχου μπορεί να επιτευχθεί εισάγοντας ιεραρχική δομή στο δίκτυο. Το CBRP είναι ένα ιεραρχικό reactive πρωτόκολλο δρομολόγησης, το οποίο προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει τα overheads ελέγχου τα οποία διαδίδονται στο δίκτυο, χωρίζοντάς το σε συστάδες. Κατά την φάση της εξεύρεσης διαδρομής, οι επικεφαλής κόμβοι (περισσότερο από κάθε έναν από τους ενδιάμεσους κόμβους) ανταλλάσσουν τις πληροφορίες δρομολόγησης. Αυτό μειώνει σημαντικά το overhead ελέγχου το οποίο διαδίδεται στο δίκτυο σε σύγκριση με τους αλγόριθμους πλημμύρας. Σε δίκτυα υψηλής κινητικότητας, το CBRP ίσως επιβαρυνθεί με μεγάλα ποσά overheads επεξεργασίας κατά τον σχηματισμό και τη διατήρηση των συστάδων. Αυτό το πρωτόκολλο υποφέρει επίσης και από προσωρινά μη έγκυρες διαδρομές καθώς οι κόμβοι πηγαίνουν από την μία συστάδα σε άλλη. Έτσι, είναι κατάλληλο για μετρίου μεγέθους δίκτυα με χαμηλή έως μέτρια κινητικότητα. Επίσης, το πρωτόκολλο αυτό, μπορεί να λειτουργήσει

καλύτερα σε σενάρια με κινητικότητα ομάδων, όπου οι κόμβοι εντός της συστάδας είναι περισσότερο πιθανό να μείνουν μαζί.

Τα υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης παρουσιάζουν καλύτερες επιδόσεις απ' ότι τα καθαρά reactive ή proactive πρωτόκολλα. Αυτό συμβαίνει επειδή προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν τον αριθμό των κόμβων επαναμετάδοσης ορίζοντας μια δομή (ή κάποιο είδος ραχοκοκαλιάς), η οποία επιτρέπει στους κόμβους να δουλεύουν μαζί έτσι ώστε να οργανώσουν την δρομολόγηση καλύτερα. Δουλεύοντας μαζί, οι καλύτεροι ή οι πιο κατάλληλοι κόμβοι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ανακαλύψουν διαδρομές. Για παράδειγμα, στο ZHLS μόνο οι κόμβοι οι οποίοι οδηγούν προς κόμβους πύλες δρομολογούν πακέτα εξεύρεσης διαδρομών. Η συνεργασία μεταξύ των κόμβων μπορεί επίσης να βοηθήσει στην διατήρηση της πληροφορίας δρομολόγησης για μεγαλύτερο διάστημα. Για παράδειγμα, στο SLURP, οι κόμβοι που βρίσκονται σε κάθε περιοχή (ή ζώνη) δουλεύουν μαζί έτσι ώστε να διατηρήσουν πληροφορίες τοποθεσίας για τους κόμβους οι οποίοι είναι ορισμένοι σε αυτή την περιοχή. (για παράδειγμα η οικεία περιοχή τους). Αυτό ίσως εξαλείψει ενδεχομένως την ανάγκη για πλημμύρα, εφόσον οι κόμβοι γνωρίζουν επακριβώς πού να ψάξουν για ένα προορισμό ανά πάσα στιγμή. Άλλη μια καινοτομία των υβριδικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης, είναι ότι προσπαθούν να εξαλείψουν τα μοναδικά σημεία σφαλμάτων (single points of failure) κα την δημιουργία κόμβων που δημιουργούν μποτιλιαρίσματα στο δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται, επιτρέποντας οποιονδήποτε αριθμό κόμβων να κάνει δρομολόγηση ή να προωθεί πακέτα αν το προτιμώμενο μονοπάτι δεν είναι διαθέσιμο.

Στην συνέχεια ακολουθούν μερικοί πίνακες που συγκεντρώνουν μερικά από τα χαρακτηριστικά των πρωτοκόλλων που προαναφέρθηκαν και οι οποίοι μπορούν να χρησιμεύσουν για μία γρήγορη σύγκριση των διαφόρων κατηγοριών

Βασικά χαρακτηριστικά μερικών table-driven αλγορίθμων δρομολόγησης

Πρωτόκολλο	RS	Αριθμός πινάκων	Συχνότητα ενημερώσεων	HM	Κρίσιμοι κόμβοι	Χαρακτηριστικό γνώρισμα
DSDV	F	2	Περιοδικές και κατ' απαίτηση	Ναι	Όχι	Χωρίς βρόχους
WRP	F	4	Περιοδικές	Ναι	Όχι	Ελεύθερο από βρόχους χρησιμοποιώντας προηγούμενη πληροφορία
GSR	F	3 και μία λίστα[a]	Περιοδικές και τοπικές[b]	Όχι	Όχι	Τοπικές ενημερώσεις
FSR	F	3 και μία λίστα	Περιοδικές και τοπικές [b]	Όχι	Όχι	Ελεγχόμενη συχνότητα ενημερώσεων
STAR	H	1 και 5 λίστες	Υπό συνθήκη[c]	Όχι	Όχι	Χρησιμοποιεί τις προσεγγίσεις LORA και/ή ORA. Ελαχιστοποιεί το CO
DREAM	F	1	Με βάση την κινητικότητα	Όχι	Όχι	Ελεγχόμενος αριθμός ενημερώσεων από την κινητικότητα και την απόσταση
MMWN	H	Διατηρεί μία βάση δεδομένων	Υπό συνθήκη	Όχι	Ναι, LM	Χρήση της LORA ελαχιστοποίηση του CO
CGSR	H	2	Περιοδικές	Όχι	Ναι, Επικεφαλής κόμβος	Οι επικεφαλής κόμβοι ανταλλάσσουν πληροφορίες δρομολόγησης
HSR	H	2 (πίνακας κατάστασης ζεύξεων και διαχείριση τοποθεσίας)[d]	Περιοδικές, μέσα σε κάθε υποδίκτυο	Όχι	Ναι, Επικεφαλής κόμβος	Χαμηλό CO και ιεραρχική δομή

OLSR	F	3 (πίνακες δρομολόγησης, γειτόνων και τοπολογίας)	Περιοδικές	Ναι	Όχι	Ελάττωση του CO χρησιμοποιώντας MPR
TBRPF	F	1 πίνακας και 4 λίστες	Περιοδικές και διαφορικές	Ναι	Ναι, κόμβος γονέας	Εκπομπή ενημερώσεων της τοπολογίας πάνω από ένα spanning tree

RS = Δομή δρομολόγησης (routing structure); HM = μήνυμα hello (hello message); H = ιεραρχική (hierarchical); F = επίπεδη (flat); CO = overhead ελέγχου (control overhead); LORA = προσέγγιση δρομολόγησης με το ελάχιστο overhead (least overhead routing approach); ORA = βέλτιστη προσέγγιση δρομολόγησης (optimum routing approach); LM = διαχειριστής θέσης (location manager)

[a] Το GSR έχει και αυτό μια λίστα με όλους τους διαθέσιμους γείτονες

[b] Στα GSR και FSR η πληροφορία για την κατάσταση της ζεύξης ανταλλάσσεται περιοδικά ανάμεσα στους γειτονικούς κόμβους

[c] Στις υπό συνθήκη μεθόδους ενημέρωσης, οι ενημερώσεις γίνονται όταν συμβεί κάποιο συγκεκριμένο γεγονός

[d] Ο αριθμός των πινάκων κατάστασης ζεύξεων μπορεί να αλλάζει ανάλογα με τον αριθμό των λογικών επιπέδων

Σύγκριση πολυπλοκότητας για τα table-driven πρωτόκολλα δρομολόγησης

Πρωτόκολλο	CT	MO	CO	Πλεονεκτήματα/ μειονεκτήματα
DSDV	$O(D \cdot I)$	$O(N)$	$O(N)$	Ελεύθερο από βρόχους/ υψηλό overhead
WRP	$O(h)$	$O(N^2)$	$O(N)$	Ελεύθερο από βρόχους/ overhead μνήμης
GSR	$O(D \cdot I)$	$O(N^2)$	$O(N)$	Τοπικές ενημερώσεις/ υψηλό overhead μνήμης
FSR	$O(D \cdot I)$	$O(N^2)$	$O(N)$	Μειώνει το CO/ υψηλό overhead μνήμης, ελαττωμένη ακρίβεια
STAR	$O(D)$	$O(N^2)$	$O(N)$	Χαμηλό CO/υψηλό MO and overhead επεξεργασίας
DREAM	$O(N \cdot I)$	$O(N)$	$O(N)$	Χαμηλό CO και MO/ απαιτεί χρήση του GPS
MMWN	$O(2D)$	$O(N)$	$O(X+E)$	Χαμηλό CO/ απαιτεί διαχείριση της κινητικότητας και συντήρηση ομάδων
CGSR	$O(D)$	$O(2N)$	$O(N)$	Μειωμένο CO/ απαιτεί δημιουργία και συντήρηση συστάδων
HSR	$O(D)$	$O(N^2 \cdot L) + O(S) + O(N/S) + O(N/n)$	$O(n \cdot L)/I + O(1)/J$	Χαμηλό CO/διαχείριση τοποθεσίας
OLSR	$O(D \cdot I)$	$O(N^2)$	$O(N^2)$	Μειωμένο CO και μειωμένος ανταγωνισμός/ γείτονες των 2-

				hop
TBRPF	$O(D)$ or D+2 για βλάβη της ζεύξης	$O(N^2)+O(N)+O(N+V)$	$O(N^2)$	Χαμηλό CO/ Υψηλό MO

CT = χρόνος σύγκλισης (convergence time); MO = overhead μνήμης (memory overhead); CO = overhead ελέγχου (control overhead); (1) =μεταδίδεται ένας σταθερός αριθμός πινάκων ενημέρωσης V = αριθμός γειτονικών κόμβων;

N = αριθμός των κόμβων στο δίκτυο; n = μέσος αριθμός των λογικών κόμβων σε μία συστάδα; I = μέσο χρονικό διάστημα ενημέρωσης; D = διάμετρος του δικτύου; S = αριθμός των εικονικών IP υποδικτύων; h = ύψος ενός δέντρου δρομολόγησης; X = συνολικός αριθμός των LMs (κάθε συστάδα έχει ένα LM); J = κόμβοι στο χρονικό διάστημα καταχώρισης των home agent; L = αριθμός του ιεραρχικού επιπέδου.

Βασικά χαρακτηριστικά των on-demand πρωτοκόλλων δρομολόγησης

Πρωτόκολλο	RS	Πολλαπλές διαδρομές	Beacons	Κριτήριο διαδρομής	Οι διαδρομές διατηρούνται σε	Στρατηγική ανασχηματισμού διαδρομής
AODV	F	Όχι	Ναι , hello μηνύματα	Η πιο νέα & με SP	RT	Διαγραφή διαδρομής και μετά SN ή τοπική επιδιόρθωση της
DSR	F	Ναι	Όχι	Με SP, ή με την επόμενη διαθέσιμη στην RC	RC	Διαγραφή διαδρομής και μετά SN
ROAM	F	Ναι	Όχι	Με SP	RT	Διαγραφή διαδρομής &[a]
LMR	F	Ναι	Όχι	Με SP ή η επόμενη διαθέσιμη	RT	Αντιστροφή ζεύξης & αποκατάσταση διαδρομής
TORA	F	Ναι	Όχι	Με SP ή η επόμενη διαθέσιμη	RT	Αντιστροφή ζεύξης & αποκατάσταση διαδρομής
ABR	F	Όχι	Ναι	Ισχυρή συσχετικότητα (associativity) & με SP &[b]	RT	LBQ
SSA	F	Όχι	Ναι	Ισχυρότερη ένταση σήματος & σταθερότητα	RT	Διαγραφή διαδρομής και μετά SN
RDMAR	F	Όχι	Όχι	Μικρότερη σχετική απόσταση ή SP	RT	Διαγραφή διαδρομής και μετά SN
LAR	F	Ναι	Όχι	SP	RC	Διαγραφή διαδρομής και μετά SN

ARA	F	Ναι	Όχι	SP	RT	Χρήση εναλλακτικής διαδρομής or ανίχνευση προς τα πίσω μέχρι να βρεθεί μια διαδρομή
FORP	F	Όχι	Όχι	RET & σταθερότητα	RT	Για την χρήση εναλλακτικής διαδρομής χρησιμοποιείται ένα Flow_HANDOFF
CBRP	F	Όχι	Όχι	Πρώτη διαθέσιμη διαδρομή (first fit)	RT στον επικεφαλής κόμβο	Διαγραφή διαδρομής και μετά SN & τοπική επιδιόρθωση της

RS = δομή δρομολόγησης (routing structure); H = ιεραρχική (hierarchical); F = επίπεδη (flat); RT = πίνακας δρομολόγησης (route table); RC = μνήμη διαδρομών (route cache); RET = χρόνος λήξης διαδρομής (route expiration time); SP = συντομότερο μονοπάτι (shortest path); SN = ειδοποίηση πηγής (source notification);

LBQ = τοπικό query εκπομπής (localized broadcast query).

[a] Αν είναι διαθέσιμος κάποιος διάδοχος, ξεκινά μία εκτεταμένη έρευνα, αλλιώς στέλνει ένα query με άπειρο κριτήριο (metric)

[b] Φορτίο αναμετάδοσης διαδρομών και συγκεντρωτική προωθούμενη αναμετάδοση (cumulative forwarding relay)

Σύγκριση πολυπλοκότητας για τα on-demand πρωτόκολλα δρομολόγησης

Πρωτόκολλο	TC[RD]	TC[RM]	CC[RD]	CC[RM]	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
AODV	$O(2D)$	$O(2D)$	$O(2N)$	$O(2N)$	Προσαρμόσιμο σε ιδιαίτερα δυναμικές τοπολογίες	Προβλήματα στην δυνατότητα αυξομείωσης, μεγάλες καθυστερήσεις, hello μηνύματα
DSR	$O(2D)$	$O(2D)$	$O(2N)$	$O(2N)$	Πολλαπλές διαδρομές, Ελευθερία overhearing	Προβλήματα στην δυνατότητα αυξομείωσης εξαιτίας της δρομολόγησης πηγής και της πλημμύρας, μεγάλες καθυστερήσεις
ROAM	$O(D)$	$O(A)$	$O(\|E\|)$	$O(6G_A)$	Εξάλειψη του προβλήματος της επ' άπειρον αναζήτησης	Μεγάλο CO σε περιβάλλοντα με υψηλή κινητικότητα
LMR	$O(2D)$	$O(2D)$	$O(2N)$	$O(2A)$	Πολλαπλές διαδρομές	Προσωρινοί βρόχοι δρομολόγησης
TORA	$O(2D)$	$O(2D)$	$O(2N)$	$O(2A)$	Πολλαπλές διαδρομές	Προσωρινοί βρόχοι δρομολόγησης
ABR	$O(D+P)$	$O(B+P)$	$O(N+R)$	$O(A+R)$	Σταθερότητα διαδρομών	Προβλήματα στην δυνατότητα αυξομείωσης
SSA	$O(D+P)$	$O(B+P)$	$O(N+R)$	$O(A+R)$	Σταθερότητα διαδρομών	Προβλήματα στην δυνατότητα αυξομείωσης, μεγάλες καθυστερήσεις κατά την αποτυχία και ανακατασκευή των διαδρομών
RDMAR	$O(2S)$	$O(2S)$	$O(2M)$	$O(2M)$	Τοπική ανακάλυψη διαδρομής	Χρήση πλημμύρας αν δεν υπάρχει προηγούμενη επικοινωνία ανάμεσα στους κόμβους
LAR	$O(2S)$	$O(2S)$	$O(2M)$	$O(2M)$	Τοπική ανακάλυψη διαδρομής	Με βάση την δρομολόγηση πηγής, η πλημμύρα χρησιμοποιείται αν δεν υπάρχει διαθέσιμη κάποια πληροφορία δρομολόγησης
ARA	$O(D+P)$	$O(D+P)$	$O(N+R)$	$O(A+R)$	Χαμηλό overhead, μικρό μέγεθος πακέτων	Πλημμύρα με βάση την διαδικασία εξεύρεσης διαδρομής

					ελέγχου	
FORP	$O(D+P)$	$O(D+P)$	$O(N+R)$	$O(N+R)$	Χρησιμοποιεί μια τεχνική για την ελαχιστοποίηση των αποτυχιών στις διαδρομές	Πλημμύρα με βάση την διαδικασία εξεύρεσης διαδρομής
CBRP	$O(2D)$	$O(2B)$	$O(2X)$	$O(2A)$	Μόνο οι επικεφαλής κόμβοι ανταλλάσουν πληροφορίες δρομολόγησης	Διατήρηση των συστάδων, προσωρινοί βρόχοι

TC = χρονική πολυπλοκότητα (time complexity); CC = επικοινωνιακή πολυπλοκότητα (communication complexity); RD = ανακάλυψη διαδρομής (route discovery); RM = διατήρηση διαδρομής (route maintenance); CO = overhead ελέγχου (control overhead); D = διάμετρος του δικτύου; N = αριθμός των κόμβων στο δίκτυο; A = αριθμός των κόμβων που επηρεάζονται; B = διάμετρος της περιοχής που επηρεάζεται; G = μέγιστος βαθμός του δρομολογητή; S = διάμετρος των κόμβων στην τοπική περιοχή; M = αριθμός των κόμβων στην τοπική περιοχή; X = αριθμός των συστάδων (κάθε συστάδα έχει έναν επικεφαλής κόμβο); R = αριθμός των κόμβων που σχηματίζουν το μονοπάτι απάντησης διαδρομής (route reply path), RREP, BANT or Flow_SETUP; P = διάμετρος του κατευθυνόμενου μονοπατιού (directed path) των RREP, BANT or Flow_SETUP; $|E|$ = αριθμός των ακμών του δικτύου.

Βασικά χαρακτηριστικά των υβριδικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης

Πρωτόκολλο	**RS**	**Πολλαπλές διαδρομές**	**Bc**	**Κριτήριο διαδρομής**	**Οι διαδρομές διατηρούνται σε**	**Στρατηγική ανασχηματισμού διαδρομής**
ZRP	F	Όχι	Ναι	SP	Ενδοζωνικούς και διαζωνικούς πίνακες	Αποκατάσταση διαδρομής στο σημείο βλάβης και SN[a]
ZHLS	H	Ναι, αν υπάρχουν περισσότερες από μία εικονικές ζεύξεις	Όχι	SP ή η επόμενη διαθέσιμη εικονική ζεύξη	Ενδοζωνικούς και διαζωνικούς πίνακες	Αίτηση τοποθεσίας[b]
SLURP	H	Ναι, μόνο αν βρεθεί κάποιος κόμβος ηγέτης	Όχι	MFR για ενδοζωνική προώθηση. DSR fγια διαζωνική προώθηση	Μνήμη τοποθεσίων και μία λίστα κόμβων (node_list)	SN και μετά ανακάλυψη τοποθεσίας
DST	H	Ναι, αν είναι διαθέσιμες	Όχι	Προώθηση με χρήση των δέντρων των γειτόνων και τις γέφυρες που χρησιμοποιούν shuttling	Πίνακες δρομολόγησης	Χρόνος συγκράτησης[c] ή shuttling
DDR	H	Ναι, αν είναι διαθέσιμοι εναλλακτικοί κόμβοι πύλες	Ναι	Σταθερή δρομολόγηση	Ενδοζωνικούς και διαζωνικούς πίνακες	SN, και μετά η πηγή ξεκινά μια νέα διαδικασία ανακάλυψης μονοπατιού

RS = δομή δρομολόγησης (routing structure); H = ιεραρχική (hierarchical); F = επίπεδη (flat); SP = συντομότερο μονοπάτι (shortest path); SN = ειδοποίηση πηγής (source notification); Bc = beacons

[a] Η πηγή είτε μπορεί να ειδοποιηθεί ή όχι

[b] Μία αίτηση τοποθεσίας θα σταλεί αν αλλάξει η zone ID ενός κόμβου

[c] Τα πακέτα κρατούνται για ένα μικρό χρονικό διάστημα κατά το οποίο οι κόμβοι προσπαθούν να δρομολογήσουν τα πακέτα τους απευθείας προς τον προορισμό

Σύγκριση πολυπλοκότητας των υβριδικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης

Πρωτόκολλο	TC[RD]	TC[RM]	CC[RD]	CC[RM]	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
ZRP	Intra: $O(I)$ / Inter: $O(2D)$	$O(I) / O(2D)$	$O(Z_N) / O(N+V)$	$O(Z_N) / O(N+V)$	Μείωση των επανεκπομπών	Επικαλυπτόμενες ζώνες
ZHLS	Intra: $O(I)$ / Inter: $O(D)$	$O(I) / O(D)$	$O(N/M) / O(N+V)$	$O(N/M)$ [a] $/ O(N+V)$	Μείωση του SPF, χαμηλό CO	Απαίτηση για στατικό χάρτη ζωνών
SLURP	Intra: $O(2Z_D)$ Inter: $O(2D)$ [b]	$O(2Z_D) / O(2D)$	$O(2N/M) / O(2Y)$	$O(2N/M) / O(2Y)$	Ανακάλυψη διαδρομής χρησιμοποιώντας τις οικίες περιοχές (home regions)	Απαίτηση για στατικό χάρτη ζωνών
DST	Intra: $O(Z_D)$ Inter: $O(D)$	$O(Z_D) / O(D)$	$O(Z_N) / O(N)$	$O(Z_N) / O(N)$	Μείωση των επανεκπομπών	Κόμβος ρίζα
DDR	Intra: $O(I)$ / Inter: $O(2D)$	$O(I) / O(2D)$	$O(Z_N) / O(N+V)$	$O(Z_N) / O(N+V)$	Δεν υπάρχει χάρτης ή συντονιστής ζωνών	Οι προτιμώμενοι γείτονες μπορεί να δημιουργήσουν συμφόρηση

TC = χρονική πολυπλοκότητα (time complexity); CC = επικοινωνιακή πολυπλοκότητα (communication complexity); RD = ανακάλυψη διαδρομής (route discovery); RM = διατήρηση διαδρομής (route maintenance); I = περιοδικό διάστημα ενημέρωσης; N = αριθμός των κόμβων στο δίκτυο; M = αριθμός των ζωνών ή των συστάδων στο δίκτυο; Z_N = αριθμός των κόμβων σε μία ζώνη, συστάδα ή δέντρο; Z_D = διάμετρος μιας ζώνης, συστάδας ή δέντρου; Y = αριθμός των κόμβων στο μονοπάτι προς την οικία περιοχή; V = αριθμός των κόμβων στο μονοπάτι απάντησης διαδρομής; SPF = μοναδικό σημείο λάθους; CO = control overhead.

[a] Στο ZHLS, η ενδοζώνη διατηρείται με proactive τρόπο. Έτσι, ένας σταθερός αριθμός ενημερώσεων στέλνεται σε ένα σταθερό χρονικό διάστημα.

[b] Στο SLURP, στην χειρότερη περίπτωση, ο κόμβος πηγή και η οικία περιοχή του προορισμού είναι στις αντίθετες άκρες του δικτύου.

Γενική σύγκριση όλων των κατηγοριών των πρωτοκόλλων δρομολόγησης

Τάξη δρομολόγησης	Table-driven	On-demand	Υβριδικά
Δομή δρομολόγησης	Είναι διαθέσιμες τόσο ιεραρχικές όσο και επίπεδες δομές	Κυρίως επίπεδη, εκτός από το CBPR	Κυρίως ιεραρχικά
Διαθεσιμότητα διαδρομής	Πάντα διαθέσιμη[a]	Καθορίζεται όταν χρειάζεται	Εξαρτάται από την θέση του προορισμού
Έλεγχος του όγκου της κίνησης	Συνήθως υψηλός, ενώ γίνεται προσπάθεια για μείωση του. Π.χ.., OLSR, TBRPF	Μικρότερςο από την γενική (global) δρομολόγηση, ενώ βελτιώνεται περισσότερο χρησιμοποιώντας GPS. Π.χ., LAR	Κυρίως χαμηλότερος από τα table-driven ή on-demand πρωτόκολλα
Περιοδικές ενημερώσεις	Ναι, αν και μερικά μπορεί να τις χρησιμοποιούν υπό συνθήκη. Π.χ.., STAR	Δεν απαιτείται. Ωστόσο μερικοί κόμβοι μπορεί να απαιτούν περιοδικούς beacons. Π.χ., ABR	Συνήθως χρησιμοποιείται μέσα σε κάθε ζώνη, ή ανάμεσα σε πύλες
Επιδράσεις από την διαχείριση της κινητικότητας	Συνήθως οι ενημερώσεις γίνονται σε σταθερά χρονικά διαστήματα. Το DREAM αλλάζει τις περιοδικές ενημερώσεις με βάση την κινητικότητα	Το ABR χρησιμοποιεί τον LBQ ενώ το ROAM χρησιμοποιεί ενημερώσεις κατωφλίου. Το AODV χρησιμοποιεί τοπική ανακάλυψη διαδρομής.	Συνήθως περισσότερα από ένα μονοπάτια μπορεί να είναι διαθέσιμα. Τα μοναδιαία σημεία σφάλματος μειώνονται, όταν οι κόμβοι δουλεύουν σαν ομάδα
Απαιτήσεις αποθήκευσης	Υψηλές	Εξαρτάται από τον αριθμό των διαδρομών που διατηρούνται ή απαιτούνται. Συνήθως χαμηλότερες από τα table-driven πρωτόκολλα.	Εξαρτάται από το μέγεθος της κάθε συστάδας ή της ζώνης το οποίο μπορεί να γίνει τόσο μεγάλο όσο και στα table-driven πρωτόκολλα αν οι συστάδες είναι μεγάλες
Επίπεδο καθυστέρησης	Οι μικρές διαδρομές είναι προκαθορισμένες	Υψηλότερο απ' ότι στα table-driven	Μικρό για τοπικούς[b] προορισμούς. Διαζωνικά μπορεί να είναι τόσο μεγάλο όσο και στα on-demand πρωτόκολλα.

Επίπεδο scalability[c]	Συνήθως μέχρι 100 κόμβους. Τα OLSR και TBPRF μπορούν να αυξομειώνονται περισσότερο	Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης πηγής μπορούν να φτάσουν μέχρι και μερικές εκατοντάδες κόμβους. Τα Point-to- point μπορούν να αυξομειωθούν περισσότερο. Επίσης εξαρτάται και από το επίπεδο της κίνησης και τα επίπεδα του multihopping.	Σχεδιασμένα για μέχρι και 1000 ή περισσότερους κόμβους

[a] Αν οι κόμβοι είναι προσεγγίσιμοι

[b] Οι τοπικοί προορισμοί αναπαριστούν τους κόμβους οι οποίοι είναι στην ίδια ζώνη ή συστάδα με την πηγή. Για απομακρυσμένους προορισμούς, είναι σε διαφορετικές συστάδες.

[c] Η ικανότητα εκτέλεσης αποδοτικής δρομολόγησης για ένα χονδρικό αριθμό κόμβων.

Ο εξομοιωτής δικτύου Network Simulator 2

Ο προσομοιωτής δικτύου ns2 είναι ένα αντικειμενοστραφής, οδηγούμενος από διακριτά γεγονότα προσομοιωτής δικτύου. Είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τη διεξαγωγή δικτυακών προσομοιώσεων τοπικών και ευρείας περιοχής δικτύων, αλλά η λειτουργικότητά του έχει αυξηθεί κατά τα τελευταία έτη ώστε να περιλαμβάνει ασύρματα και ad-hoc δίκτυα. Ο ns-2 εξομοιωτής δικτύου έχει αποκτήσει τεράστια δημοτικότητα μεταξύ των συμμετεχόντων της ερευνητικής κοινότητας, κυρίως λόγω της απλότητας και της επεκτασιμότητάς του. Επιτρέπει σενάρια προσομοίωσης να γράφονεται εύκολα σε μια γλώσσα προγραμματισμού την OTcl. Πιο σύνθετες λειτουργίες είναι δυνατές με χρήση C++κώδικα που είτε έρχεται με το ns-2 ή παρέχεται από το χρήστη. Η ευελιξία αυτή διευκολύνει την διαμόρφωση του περιβάλλοντος προσομοίωσης όπως ακριβώς απαιτείται, αν και οι πιο κοινές εφαρμογές έχουν ήδη ενσωματωθεί, όπως ενσύρματοι κόμβοι, κινητοί κόμβοι, συνδέσεις, ουρές, πράκτορες (πρωτόκολλα) και εφαρμογές. Τα περισσότερα στοιχεία δικτύου μπορούν να ρυθμιστούν λεπτομερώς, και μοντέλα για την κυκλοφορία καθώς και μοντέλα λαθών μπορούν να εφαρμοστούν σε μια προσομοίωση για την αύξηση της ρεαλιστικότητας. Υπάρχει ακόμη υπάρχει ένα εργαλείο μοντελοποίησης που επιτρέπει στον προσομοιωτή να αλληλεπιδράσει με ένα πραγματικό δίκτυο.

Οι προσομοιώσεις σε ns-2 μπορεί να συνδεθούν με trace files, τα οποία περιλαμβάνουν λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τα πακέτα στην προσομοίωση και επιτρέπουν την επεξεργασία με κάποιο εργαλείο ανάλυσης. Είναι επίσης δυνατό το ns-2 να παράγει ένα ειδικό trace file που μπορει να χρησιμοποιηθεί από το NAM (Network Animator), ένα εργαλείο απεικόνισης που είναι μέρος του ns-2. Αυτό επιτρέπει μια γραφική απεικόνιση των προσομοιώσεων για να αναπαραχθούν στην οθόνη, η οποία μπορεί να είναι χρήσιμη για πολύπλοκες προσομοιώσεις.

Ένας μεγάλος αριθμός εγχειριδίων και tutorial υπάρχει για το ns-2. Η πρόθεση του κεφαλαίου αυτού είναι να παρέχει μια επισκόπηση του ns-2 και να καταδείξει τη χρήση ορισμένων δικτυακών στοιχείων του.

Εκτελώντας εξομοιώσεις

Το σημείο εκκίνησης για τη διενέργεια προσομοιώσεων σε ns-2 είναι η δημιουργία ενός OTcl script αρχείου που προσδιορίζει τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν και τα γεγονότα που θα συμβούν. Ένα script θα μπορούσε για παράδειγμα να προσομοιώσει μια τοπολογία δικτύου που αποτελείται από δύο κόμβους, που συνδέονται με μια σύνδεση 10 Mbps, η οποία διακινεί FTP πακέτα πάνω από TCP, και να αρχίσει και να σταματήσει αυτή η κυκλοφορία σε ορισμένα χρονικά σημεία.

Σε γενικές γραμμές, ένα σενάριο προσομοίωσης αποτελείται από τρία βασικά συστατικά:

- Μια τοπολογία δικτύου
- Συνδέσεις, φορτίο και agents (πρωτόκολλα)
- Συμβάντα και σφάλματα

Μια τοπολογία δικτύου ορίζει τον αριθμό των κόμβων και τη συνδεσμολογία τους, και μπορεί είτε να δημιουργηθεί χειροκίνητα ή με ειδικές γεννήτριες τοπολογιών. Οι συνδέσεις και η κυκλοφορία παράγονται από πηγές(traffic generators) και πράκτορες (agents) σε έναν κόμβο. Τα συμβάντα και σφάλματα περιλαμβάνουν εγκαθιδρύσεις και αποτυχίες συνδέσεων, τη ροή πακέτων, την απώλεια πακέτων, την κυκλοφοριακή συμφόρηση και την κίνηση κόμβων.

Περιεχόμενα σεναρίου προσομοίωσης

Το περιεχόμενο των περισσότερων σεναρίων προσομοίωσης ακολουθούν ένα συγκεκριμένο μοτίβο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα περισσότερα σενάρια ακολουθούν μια συγκεκριμένη μορφή. Ένα τυπικό σενάριο θα περιλαμβάνει (σε σειρά):

- Δημιουργία πράκτορα προσομοιωτή. Απαιτείται για κάθε προσομοίωση που πρόκειται να εκτελεστεί.
- Έναρξη των trace αρχείων, τόσο ενός «κανονικού» αρχείο trace όσο και ενόςNAM (Network Animator) αρχείου παρακολούθησης.
- Ρύθμιση κόμβων, δηλαδή, ο καθορισμός των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν από τους κόμβους.
- Δημιουργία κόμβων και των συνδέσεων, και τη σύνδεση των κόμβων με τις συνδέσεις.

- Δημιουργία πρακτόρων και εφαρμογών, και προσάρτησή (εγκατάσταση) αυτών.
- Προγραμματισμός φορτίου και γεγονότων, π.χ. έναρξη ή στάση μιας γεννήτριας κυκλοφορίας ή πράκτορα.
- Μια διαδικασία τερματισμού που θα καλείται στο τέλος της προσομοίωσης. Η διαδικασία αυτή θα πρέπει να γράφει το trace file Και να τερματίζει την εξομοίωση.
- Προγραμματισμός μιας κλήσης συστήματος στη διαδικασία τερματισμού στο τέλος της προσομοίωσης.

Εκτέλεση προσομοίωση και ανάλυση

Ένα σενάριο προσομοίωσης εκτελείται (δηλαδή, μια προσομοίωση εκτελείται), παρέχοντας το όνομα του αρχείου για την γραμμή εντολών στον προσομοιωτή ns-2. Ο εξομοιωτής λειτουργεί ως διερμηνέας OTcl, ερμηνεύοντας το σενάριο του γραμμή γραμμή. Οποιαδήποτε μηνύματα λάθους ή μηνύματα που παράγονται από τη δέσμη ενεργειών θα τυπωθούν στην κονσόλα. Όταν η προσομοίωση έχει τελειώσει, ο προσομοιωτής τερματίζεται. Δυστυχώς δεν παρέχεται γραφική διεπαφή χρήστη με το ns-2 για την εκτέλεση προσομοιώσεων.

Μετά την επιτυχή εκτέλεση μιας προσομοίωσης, τα αρχεία trace που μπορεί να έχουν παραχθεί από την προσομοίωση μπορεί να αναλυθούν. Ανάλογα με τους στόχους της προσομοίωσης, αυτό μπορεί να γίνει είτε με ένα ολοκληρωμένο εργαλείο ανάλυσης, όπως η γραφική παράσταση Trace ή με απλούστερα σενάρια γραμμένα σε Perl, sed ή awk γλώσσα.

Το OTcl / C++περιβάλλον

Για να αυξηθεί η ευελιξία και η αποτελεσματικότητα, ns-2 χρησιμοποιεί δύο γλώσσες προγραμματισμού για την λειτουργία του: C++και OTcl. Η c++ χρησιμοποιείται κυρίως για το χειρισμό συμβάντων και των πακέτων, καθήκοντα για τα οποία OTcl θα ήταν πάρα πολύ αργή. Η OTcl χρησιμοποιείται συνήθως για απλούστερα πρωτόκολλα δρομολόγησης, γενικό ns-2 κώδικα και scripts. Η χρήση της OTcl για scripts επιτρέπει στο χρήστη να αλλάξει τις παραμέτρους της προσομοίωσης χωρίς να χρειάζεται να μεταγλωττίσει ξανά τον πηγαίο κώδικα. Οι δύο γλώσσες προγραμματισμού αλληλεπιδρούν, με την έννοια ότι C++ αντικείμενα μπορούν να τίθενται στη διάθεση του OTcl περιβάλλοντος (και αντιστρόφως) μέσω μιας σύνδεσης OTcl. Αυτή η διασύνδεση δημιουργεί OTcl αντικείμενα για C++ αντικειμένα και επιτρέπει μεταβλητές της C++ να χρησιμοποιούνται από κοινού. Επιπλέον, προσφέρει πρόσβαση στον C++ κώδικα στον διερμηνέα OTcl. Αυτό καθιστά δυνατή την υλοποίηση συνιστωσών του δικτύου σε OTcl, C++ ή και στα

δύο. Επιπλέον, τα συστατικά αυτά μπορεί εύκολα να ρυθμιστούν από το script προσομοίωσης λόγω της σύνδεσης OTcl, έτσι ώστε η επιλογή της γλώσσας προγραμματισμού που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση να είναι εντελώς διαφανής στο χρήστη.

Προγραμματισμός Event

Ο προγραμματισμός γεγονότων στο ns-2 γίνεται από ένα διακριτό χρονοπρογραμματιστή, που χρησιμοποιείται για παράδειγμα από σενάρια προσομοίωσης και συστατικά του δικτύου που προσομοιώνουν καθυστερήσεις πακέτων ή χρησιμοποιούν χρονόμετρα για τη λειτουργία τους. Υπάρχουν δύο διάφορετικοί τύποι χρονοπρογραμματιστών: πραγματικού χρόνου και μη πραγματικού χρόνου.

Ο RealTime χρονοπρογραμματιστής χρησιμοποιείται για προσομοίωση, δηλαδή για την «ζωντανή» αλληλεπίδραση μεταξύ του προσομοιωτή και του πραγματικού δικτύου. Για μη-πραγματικού χρόνου εξομοιώσεις, οι τρεις χρονοπρογραμματιστές List, Heap και Calendar είναι διαθέσιμοι, εκ των οποίων ο τρίτος είναι η προεπιλογή. Οι παραπάνω διαφέρουν κυρίως στον τρόπο που αποθηκεύουν τα γεγονότα, παράγοντας διαφορετικές πολυπλοκότητες χρόνου.

Ο χρονοπρογραμματιστής παρακολουθεί τον χρόνο, ένα αναγνωριστικό συμβάντος και ένας handler για κάθε συμβάν. Όταν ένα γεγονός θα πρέπει να να πραγματοποιηθεί, καλείται ο αντίστοιχος handler. Εκδηλώσεις εκτελούνται στην ολοκλήρωσή μία προς μία, δηλαδή, δεν προτίμησης υποστηρίζεται. Αν πολλά συμβάντα έχουν προγραμματιστεί να συμβούν ταυτόχρονα, διενεργούνται με μια FIFO σειρά.

Ο χρονοπρογραμματισμός συμβάντων είναι έμμεσα στη διάθεση των στοιχείων του δικτύου του ns-2 μέσω της χρήσης των χρονομέτρων, ή μέσω της πρόσβασης σε ένα στιγμιότυπο του του OTcl διερμηνέα.

Παράδοση πακέτων

Η παράδοση πακέτων στο ns-2 είναι χτισμένη πάνω στην έννοια των αντικειμένων δικτύου (εξαρτήματα) τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Τα πακέτα δημιουργούνται π.χ. από τους πράκτορες ή τις γεννήτριες κυκλοφορίας και παραδίδονται μέσω των συνδέσμων από το ένα κόμβο στον άλλο. Σε κάθε βήμα της διαδικασίας παράδοσης πακέτων, ένα αντικείμενο δικτύου στέλνει το πακέτο χρησιμοποιώντας μια μέθοδο αποστολής, η οποία προκαλεί τη μέθοδο λήψης ενός άλλου αντικειμένου δικτύου.

Για να λάβει χώρα η παράδοση πακέτων δεδομένων πρέπει να πραγματοποιηθεί μια αναφορά στο αντικείμενο που λαμβάνει τα πακέτα. Αυτό, ωστόσο, δεν αποτελεί πρόβλημα. Όλες οι οι εργασίες που χρησιμοποιούν τα αντικείμενα του δικτύου περιέχονται στο σενάριο προσομοίωσης, και ως εκ τούτου, είναι γνωστές όλες οι αναφορές σε αντικείμενα δικτύου.

Κόμβοι

Οι κόμβοι είναι θεμελιώδεις σε μια προσομοίωση. Εκτελούν την επεξεργασία και τη διαβίβαση των πακέτων, και ως εκ τούτου ίσως οι πιο σημαντικό οντότητες μεταξύ όλων των συνιστωσών του δικτύου του ns-2. Το τμήμα αυτό ασχολείται κυρίως με κόμβους πολυεκπομπής που έχουν μια ενσύρματη σύνδεση με το δίκτυο. Οι κόμβοι με ασύρματες συνδέσεις περιγράφονται σε επόμενο κεφάλαιο.

Βασικά στοιχεία κόμβων

Ένας ενσύρματο κόμβος πολυεκπομπής είναι ένα αντικείμενο που αποτελείται από έναν αντικείμενο-κόμβο και δύο ταξινομητές. Ο κόμβος εισόδου είναι ο κόμβος στον οποίο το πακέτο πρωτοέφτασε. Ο ταξινομητής διεύθυνσης εξετάζει το πεδίο της διεύθυνσης του πακέτων για να καθοριστεί αν το πακέτο προορίζεται για τον τρέχοντα κόμβο. Τέλος, ο ταξινομητής προορισμού καθορίζει ποιος πράκτορας πρέπει να λάβει το πακέτο.

Εάν το πακέτο δεν προορίζεται για την τρέχοντα κόμβο, ο ταξινομητής διεύθυνσης καθορίζει σε ποιον κόμβο πρέπει να προωθηθούν τα πακέτα. Αυτό είναι δυνατό λόγω της λειτουργίας δρομολόγησης που τρέχει συνεχώς στον κόμβο του ταξινομητή διεύθυνσης. Πακέτα προωθούνται σε άλλους κόμβους μέσω των συνδέσεων με αυτούς τους κόμβους.

Διαμόρφωση και δημιουργία κόμβων

Πριν την δημιουργία των κόμβων, πρέπει να δοθούν οι επιθυμητές ρυθμίσεις στον προσομοιωτή. Αυτό γίνεται με την έκδοση μιας εντολής config στο στιγμιότυπο του προσομοιωτή, και περνώντας τις ρυθμίσεις ως ορίσματα.

Αν δεν γίνει καμία ρύθμιση, ισχύουν προκαθορισμένες τιμές, δηλαδή υποθέτουμε ότι έχουμε ενσύρματους κόμβους με επίπεδη πολιτική δρομολόγησης (όπου οι κόμβοι απλώς η αρίθμησή τους από το μηδέν και πάνω)

Διευθυνσιοδότηση κόμβων

Οι διευθύνσεις των κόμβων στο ns-2 αποτελείται από δύο τμήματα: ετικέτες κόμβων και ετικέτες θυρών (ports). Και τα δύο είναι πεδία 32-bit, τα οποία

σχηματίζουν μια πλήρη διεύθυνση. Δύο τύποι διευθυνσιοδότησης είναι διαθέσιμοι που καθορίζουν τον τρόπο για την ερμηνεία των διευθύνσεων. Στην επίπεδη διευθυνσιοδότηση, κάθε κόμβος παίρνει μια ταυτότητας κατά τη στιγμή της δημιουργίας, ξεκινώντας από το μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα διευθύνσεοδότησης εκφυλλίζεται σε ένα σύστημα αρίθμησης χωρίς οποιαδήποτε περαιτέρω ερμηνεία των διευθύνσεων. Στην ιεραρχική διευθυνσιοδότηση, το αναγνωριστικό του κόμβου χωρίζεται σε διαφορετικά επίπεδα ιεραρχίας, με ένα συγκεκριμένο αριθμό bit για κάθε επίπεδο.

Δρομολόγηση

Η δρομολόγηση στους κόμβους γίνεται με modules δρομολόγησης, που αποτελούνται από ένα πράκτορα, τον αλγόριθμο δρομολόγησης και ταξινομητές. Οι πράκτορες δρομολόγησης ανταλλάζουν πακέτα με τους γείτονες, ο αλγόριθμος δρομολόγησης χρησιμοποιεί τις πληροφορίες που συγκέντρωσε από τους πράκτορες προκειμένου να εκτελέσει τον υπολογισμό μιας διαδρομής και οι ταξινομητές χρήσιμοποιούν τον υπολογιζόμενο πίνακα δρομολόγησης για την προώθηση των πακέτων.

Το module της δρομολόγησης αρχικοποιεί τη σύνδεσή του με έναν κόμβο καταχωρώντας το ίδιο στον κόμβο με ειδική εντολή καταχώρησης. Κατά τη διάρκεια της καταχώρησης, το module δρομολόγησης ειδοποιεί τον κόμβο αν ενδιαφέρεται να μάθει σχετικά με ενημερώσεις διαδρομής και πληροφορίες από τους συννημένους πράκτορες, και δημιουργεί και εγκαθιστά ταξινομητές στο εσωτερικό του κόμβου.

Σύνδεσμοι

Μια σύνδεση είναι ένα σύνθετο αντικείμενο που αποτελείται από μια ακολουθία από συνδετήρες. Οι συνδετήρες, σε αντίθεση με τους ταξινομητές, παράγουν δεδομένα μόνο για έναν παραλήπτη, είτε το πακέτο παραδίδεται στο στόχο (έξοδος) του σύνδεσης, είτε όχι.

Οι συνδέσεις ορίζονται από πέντε μεταβλητές. Η μεταβλητή head_ είναι το σημείο εισόδου στο σύνδεσμο και δείχνει προς το πρώτο αντικείμενο στο σύνδεσμο. Η queue_ είναι μια αναφορά στο κύριο στοιχείο ουράς του συνδέσμου. Αν και απλές συνδέσεις μπορεί να περιέχουν μόνο μία ουρά, πιο πολύπλοκες συνδέσεις μπορεί να έχουν πολλαπλές ουρές. Η link_ είναι μια αναφορά στο στοιχείο που όντως μοντέλοποιεί το σύνδεσμο, δίνοντας την καθυστέρηση και το εύρος ζώνης, ενώ η ttl_ είναι μια αναφορά στο στοιχείο που διαχειρίζεται το πεδίο TTL σε κάθε πακέτο. Τέλος, drophead_ είναι μια αναφορά σε ένα αντικείμενο που είναι το πρώτο στοιχείο της ουράς με τα στοιχεία που επεξεργάζονται τις αποτυχίες συνδέσεων.

Το στιγμιότυπο του προσομοιωτή επιτρέπει τη δημιουργία και διαμόρφωση των δεσμών. Με μια εντολή simple-link, δημιουργείται μια απλή σύνδεση ανάμεσα σε δύο κόμβους με ορισμένο εύρος ζώνης, καθυστέρηση και χαρακτηριστικά ουράς. Ομοίως, αμφίδρομοι δεσμοί δημιουργούνται με την εντολή duplex-link. Για να μοντελοποιηθούν οι αλλαγές στις συνδέσεις, οι σύνδεσμοι προσφέρουν μια δυναμική λειτουργία που μπορεί να επιλεγεί με μιας δυναμική εντολή. Μετά από αυτή την εντολή, η κατάσταση του εν λόγω συνδέσμου μπορεί να αλλάξει με την έκδοση καταλλήλων εντολών.

Το κόστος για ένα πακέτο να διασχίσει μια σύνδεση, για το οποίο η προεπιλογή είναι 1, μπορεί να οριστεί χρησιμοποιώντας την εντολή του κόστους. Αυτή η τιμή χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο δρομολόγησης όταν υπολογίζονται ελάχιστες διαδρομές. Άλλες χρήσιμες εντολές για τις συνδέσεις περιλαμβάνουν την errormodule, η οποία εισάγει ένα μοντέλο λάθους και η insert-linklos, η οποία εισάγει ένα μοντέλο σφάλματος μετά το στοιχείο ουράς ενός σύνδεσμου.

Ουρές

Οι ουρές είναι αντικείμενα που προσθέτουν ή απορρίπτουν πακέτα και χρησιμοποιούνται για παράδειγμα σε συνδέσμους και ουρές σε interfaces ασυρμάτων συσκευών. Επί του παρόντος, το ns-2 υποστηρίζει FIFO ουρές, διαχείριση RED buffers(Random Early Detection buffers), classbased ουρές και πολλές παραλλαγές της δίκαιας ουράς (fair queue). Μερικοί από τους διαθέσιμους τύπους ουράς αναφέρονται παρακάτω, μαζί με τις αντίστοιχες OTcl ονόματα κλάσης τους.

- DropTail queues: Υλοποιούν την εφαρμογή απλών ουρών FIFO.
- FQ queues: Εφαρμόσουν δίκαιη αναμονή.
- SFQ queues: Εφαρμογή στοχαστική δίκαιη αναμονή.
- DRR queues: Υλοποιούν τον round robin αλγόριθμο.
- RED queues: Υλοποιούν τον random early detection αλγόριθμο
- CBQ queues: Υλοποιούν τον class based queuing αλγόριθμο

Πακέτα

Τα πακέτα είναι η θεμελιώδης μονάδα ανταλλαγής μεταξύ των αντικειμένων σε μια προσομοίωση. Αποτελούνται από κεφαλίδες, που αντιστοιχούν σε διαφορετικά πρωτόκολλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και από δεδομένα. Η πρόσβαση στις διαφόρες επικεφαλίδες και το τμήμα δεδομένων του πακέτου είναι διαθέσιμη μέσω μεθόδων πρόσβασης. Νέα πρωτοκόλλα μπορούν να προσθέσουν τη δική τους επικεφαλίδα αντί της ήδη υπάρχουσας.

Είδη πακέτων και επικεφαλίδες

Κατά την έναρξη της προσομοίωσης, οι διαθέσιμοι τύποι πακέτων εξετάζονται από την κλάση OTcl PacketHeaderManager, η οποία αποδίδει σε κάθε τύπο πακέτου ένα μοναδικό offset σε πακέτα. Αυτό το offset αποθηκεύεται στην στατική μεταβλητή offset_ σε κάθε κλάση επικεφαλίδας πακέτου και χρησιμοποιείται από τις access () μεθόδους για αυτών των κλάσεων για να παρέχουν ένα δείκτη στην αρχή της επικεφαλίδας του πακέτου.

Αχρησιμοποίητες κεφαλίδες πακέτων μπορεί επιλεκτικά να απενεργοποιηθούν μέσω της έκδοσης εντολών αφαίρεση επικεφαλίδας πακέτου σε OTcl πριν δημιουργηθεί οποιοδήποτε στιγμιότυπο εξομοιωτή. Για τις μεγάλες εξομοιώσεις με σημαντικά φορτία, αυτό θα μπορούσε να εξοικονομήσει ένα σημαντικό μέρος των πόρων (κυρίως, μνήμης).

Η κοινή επικεφαλίδα

Η μόνη υποχρεωτική επικεφαλίδα πακέτου στο ns-2 είναι η κοινή κεφαλίδα, hdr_cmn, που χρησιμοποιείται κυρίως για την ανίχνευση των πακέτων και για να μετρήσει άλλους ποσότητες κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης. Οι πιο σημαντικοί τομείς της κεφαλίδας είναι οι εξής:

- ptype_, ο τύπος του πακέτου
- uid_, ένα μοναδικό αναγνωριστικό πακέτου
- size_, το μέγεθος του πακέτου
- ts_, η χρονική σήμανση του πακέτου. Το πεδίο αυτό χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις καθυστέρησης ουράς
- error_, μια σημαία λάθους αναφέρει εάν το πακέτο είναι κατεστραμμένο ή όχι
- errbitcnt_, ο αριθμός των κατεστραμμένων bits στο πακέτο.
- direction_, η κατεύθυνση του πακέτου κατά τη διάρκεια της διάσχισης της στοίβας του δικτύου
- prev_hop_, η διεύθυνση του προηγούμενου κόμβου. Χρησιμοποιείται για hop-by-hop δρομολόγησης σε ασύρματες προσομοιώσεις
- next_hop_, η διεύθυνση του επόμενου hop. Χρησιμοποιείται για hop-by-hop δρομολόγησεις σε ασύρματες προσομοιώσεις
- num_forwards_, ο αριθμός των φορών που διαβιβάστηκε ένα πακέτο
- iface_, η ετικέτα της παραλαμβάνουσας διεπαφής

Το πεδίο ptype_ χρησιμοποιείται για την αναγνώριση ου τύπου των πακέτων από trace αρχεία, καθιστώντας τα ευκολότερα στην ανάγνωση. Το uid_ πεδίο

χρησιμοποιείται από το χρονοπρογραμματιστή για τον προγραμματισμό των αφίξεων των πακέτων. Το πεδίο size_ καθορίζει το μέγεθος ενός πακέτου που προσομειώνεται σε byte. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του χρόνου που χρειάζεται για ένα πακέτο που πρέπει να παραδοθεί πάνω από μια σύνδεση και πρέπει συνεπώς να οριστεί ίσο με το άθροισμα των μεγεθών των δεδομένων της εφαρμογής και των επικεφαλίδων των επιπέδων IP, transport και application. Τα πεδία error_ και errbitcnt_ χρησιμοποιούνται για να δείχνουν το βαθμό της αλλοίωσης πακέτων. Τα πεδία direction_ και next_hop_ είναι ιδιαίτερα σημαντικά σε ασύρματες προσομοιώσεις. Τέλος, το πεδίο iface_ χρησιμοποιείται από τον προσομοιωτή κατά την εκτέλεση των υπολογισμών των multicast δέντρων διανομής, και δείχνει σε ποιό σύνδεσμο ελήφθη ένα πακέτο.

Πράκτορες (agents)

Οι πράκτορες εκπροσωπούν τελικά σημεία όπου τα πακέτα παράγονται ή καταναλώνονται και χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή πρωτοκόλλων σε διάφορα επίπεδα. Πράκτορες δρομολόγησης και πράκτορες καταβόθρες είναι μερικά παραδείγματα πρακτόρων που χρησιμοποιούνται συχνά σε προσομοιώσεις. Οι κλάσεις OTcl Agent και η C++ Agent υλοποιούν τους πράκτορες από κοινού στο ns-2.

Οι πράκτορες δημιουργούν πακέτα με δύο μεθόδους για, την Packet * allocpkt () και την Packet allocpkt * (int). Αυτές οι μέθοδοι εντοπίζουν χώρο για ένα νέο πακέτο και ορίζουν προκαθορισμένες τιμές στα πεδία χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες κατάστασης του πράκτορα.

Τα πακέτα μπορούν να σταλούν με τη συνάρτηση (Packet * p, Handler * h), η οποία τα παραδίδει στον προκαθορισμένο στόχο του πράκτορα. Συνήθως, αυτός είναι ο κόμβος εισόδου στον οποίο ο πράκτορας επισυνάπτεται. Η αποδοχή των πακέτων γίνεται μέσω της συνάρτησης recv(Packet *p, Handler *h), η οποία θα λαμβάνει όλα τα πακέτα που προορίζονται για τον πράκτορα.

Οι πράκτορες επισυνάπτονται στους κόμβους με την συνάρτηση attach-agent <node> <agent> στον προσομοιωτή. Αυτό εγκαθιστά έναν πράκτορα στο ταξινομητή θύρας του κόμβου, χρησιμοποιώντας προκαθορισμένους αριθμούς θύρας. Μετά την σύνδεση ενός πράκτορα στον κόμβο, ο πράκτορας θα λάβει όλα τα πακέτα που προορίζονται για αυτόν, δηλαδή, όλα τα πακέτα των οποίων ο αριθμός θύρας ταυτίζεται με τον αριθμό θύρας του πράκτορα. Η παράδοση των πακέτων στους πράκτορες διεξάγεται απο τον ταξινομητή θυρών του κόμβου.

Οι πράκτορες δρομολόγησης είναι γενικά ιδιαίτεροι, δεδομένου ότι απαιτούν περισσότερα βήματα για να εγκατασταθούν σε έναν κόμβο. Για παράδειγμα, οι

πράκτορες δρομολόγησης θα πρέπει συνήθως να εγκαθίστανται ως προεπιλεγμένοι στόχοιι του ταξινομητή διευθύνσεων ενός κόμβου για την προώθηση των πακέτων.

Σύνδεση πρακτόρων

Για να καταστεί δυνατή η επικοινωνία δύο πρακτόρων που είναι προσκολλημένοι σε διαφορετικούς κόμβους, ο προσομοιωτή παρέχει την εντολή <src> <dst> για τη σύνδεση τους με το άλλο. Η εντολή αυτή καθορίζει τη θύρα προορισμού του ενός κόμβου ως θύρα υποδοχής του άλλου και αντιστρόφως. Αυτό επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ των δύο πρακτόρων. Ωστόσο, οι κόμβοι στους οποίους συνδέονται οι παράγοντες πρέπει επίσης να συνδέονται μεταξύ τους, π.χ. από μια σύνδεση διπλής όψης.

Οι πράκτορες επιτρέπουν στις εφαρμογές να συνδέονται μαζί τους. Για το σκοπό αυτό, το ns-2 προσφέρει ένα απλό API για την αλληλεπίδραση μεταξύ των πρακτόρων και των εφαρμογών. Ωστόσο, αυτό το API δεν υποστηρίζει τη διοχέτευση δεδομένων μεταξύ των εφαρμογών. Αυτό που κάνει είναι να προσφέρει γνωστοποιήσεις παραλαβής και ολοκλήρωσε αποστολής δεδομένων. Ως εκ τούτου, η αίτηση API χρησιμοποιείται μόνο από σχετικά απλές εφαρμογές, όπως γεννήτριες κυκλοφορίας, FTP εφαρμογές και Telnet εφαρμογές.

Η δημιουργία ενός νέου πράκτορα

Κατά τη δημιουργία ενός νέου φορέα, π.χ. πράκτορα δρομολόγησης, μια συγκεκριμένη ακολουθία βημάτων πρέπει να ακολουθηθεί ώστε να επικονωνήσει ο πράκτορας με το ns2. Τα παρακάτω βήματα είναι θεμελιώδη:

- Η δομή κληρονομιάς του πράκτορα θα πρέπει να αποφασιστεί
- Θα πρέπει να καθοριστεί η εντολή recv(Packet * p, Handler * η) για τη λήψη πακέτου
- Κάθε αναγκαία κλάση χρονομέτρου θα πρέπει να καθοριστεί, εάν ο πράκτορας χρησιμοποιεί χρονόμετρα για τη λειτουργία του.
- Εντολές σύνδεσης σε OTcl θα πρέπει να καθορίζονται για να επιτραπεί η χρήση πρακτόρων από το περιβάλλον OTcl του ns-2.
- Ο πηγαίος κώδικας του πράκτορα πρέπει να ενσωματωθεί στο δέντρο πηγαίου κώδικα του ns-2, και το ns-2 πρέπει να επανασυνθεθεί προκειμένου να υλοποιηθούν οι αλλαγές.

Χρονόμετρα

Τα χρονόμετρα χρησιμοποιούνται από τους πράκτορες και άλλα αντικείμενα στο ns-2 για την παρακολούθηση των καθυστερήσεων και την εκτέλεση περιοδικών εκτελέσεων του κώδικα του προγράμματος. Μπορούν να εφαρμοστούν είτε σε C++ ή σε OTcl και χρησιμοποιούν το χρονοπρογραμματιστή του ns-2. Για C++χρονόμετρα, η αφηρημένη κλάση TimerHandlers πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Τα χρονόμετρα της κλάσης αυτής προσφέρουν την ακόλουθη λειτουργικότητα:

- void sched(double delay) προγραμματίζει το χρονόμετρο να λήξει μετά από delay δευτερόλεπτα
- void resched(double delay) επαναπρογραμματίζει το χρονόμετρο να λήξει μετά από delay δευτερόλεπτα
- void cancel()ακυρώνει το χρονόμετρο
- int status()επιστρέφει την τρέχουσα κατάσταση του χρονοδιακόπτη, δηλαδή, ένα από τα TIMER_IDLE, TIMER_PENDING και TIMER_HANDLING.

Γεννήτριες κυκλοφορίας

Οι γεννήτριες κυκλοφορίας είναι ειδικές εφαρμογές που προσομοιώνουν την κίνηση του δικτύου. Θα πρέπει να επισυνάπτονται σε ένα πράκτορα μεταφοράς, π.χ. ένα πράκτορα TCP, για την αποστολή της παραγόμενης κυκλοφορίας. Επί του παρόντος, υπάρχουν τεσσάρων ειδών παραγωγοί κυκλοφορίας:

- Application/Traffic/Exponential δημιουργεί φορτίο με χρονικά χαρακτηριστικά που καθορίζονται από την εκθετική κατανομή
- Application/Traffic/Pareto δημιουργεί φορτίο με χρονικά χαρακτηριστικά που καθορίζονται από την κατανομή pareto
- Application/Traffic/CBR δημιουργεί συνεχές φορτίο
- Application/Traffic/Trace χρησιμοποιείται για την παραγωγή φορτίου με βάση trace αρχεία που προέκυψαν από τις υπάρχουσες προσομοιώσεις. Αυτή η γεννήτρια κυκλοφορίας επιλέγει ένα τυχαίο σημείο εκκίνησης στο trace αρχείο, από το οποίο αρχίζει να τη δημιουργία της κυκλοφορίας.

Μοντέλα σφαλμάτων

Τα μοντέλα σφαλμάτων χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή σφαλμάτων σε επίπεδο συνδέσμου ή σε επίπεδο απώλειας πακέτων σε μια προσομοίωση. Τα σφάλματα μοντελοποιούνται με τη σημαία error_ των πακέτων, ενώ η απώλεια πακέτων μοντελοποιείται με τη ρίψη πακέτα σε ένα κόμβο καταβόθρα. Μερικά από τα πιο κοινά πρότυπα σφάλματος περιγράφονται παρακάτω:

- ErrorModel: Αυτό είναι το βασικό μοντέλο λάθους. Επιτρέπει στη μονάδα του σφάλματος να είναι είτε bit ή πακέτο και στην τυχαία μεταβλητή πιθανότητας σφάλματος που θα καθοριστεί καταλλήλως. Αν ένας κόμβος καταβόθρα έχει καθοριστεί,αυτός θα λαμβάνει όλα τα κατεστραμμένα πακέτα. Διαφορετικά τα κατεστραμμένα πακέτα θα επιβαρύνουν τον στόχο

του μοντέλου σφάλματος, επιτρέποντας στον κόμβο προορισμού να διαχειρίζεται τα λάθη.

- Μοντέλο σφαλμάτων Multi-state: Αυτό το μοντέλο σφαλμάτων χρησιμοποιεί μεταβάσεις μεταξύ καταστάσεων για την αλλαγή μεταξύ των διαφόρων μοντέλων σφαλμάτων. Τέτοιες μεταβάσεις συμβαίνουν σύμφωνα με ένα πίνακα που προσδιορίζοντας τις πιθανότητες της μετάβασης από το ένα μοντέλο σφαλμάτων στο άλλο.
- Μοντέλο σφαλμάτων δύο καταστάσεων: Το μοντέλο αυτό εισάγει σφάλματα (ή όχι), ανάλογα με την τρέχουσα κατάσταση του μοντέλου σφαλμάτων.
- Μοντέλο σφαλμάτων λίστας: Το μοντέλο αυτό το εισάγει απορρίπτει bits ή πακέτα ανάλογα με τους αριθμούς ακολουθίας τους.
- Περιοδικό μοντέλο σφαλμάτων: Αυτό το μοντέλο σφαλμάτων εισάγει σφάλματα περιοδικά.
- SelectErrorModel: Το μοντέλο αυτό απορρίπτει πακέτα ενός συγκεκριμένου τύπου όταν το μοναδικό αναγνωριστικό του πακέτου έχει μια συγκεκριμένη τιμή με κάποια απόκλιση από την αρχή του κύκλου.

Χρήση σε ενσύρματα δίκτυα

Για να χρησιμοποιήθεί ένα πρότυπο λάθους σε ένα ενσύρματο δίκτυο, πρέπει να εισαχθεί σε μια απλή σύνδεση. Δεδομένου ότι οι απλές συνδέσεις είναι σύνθετα αντικείμενα, τα μοντέλα σφάλμα μπορεί να παρεμβάλλονται σε διάφορα σημεία:

- Πριν από την ουρά του συνδέσμου. Αυτό μπορεί να γίνει είτε με τη μέθοδο errormodule <errmod>, η οποία εισάγει το μοντέλο σφάλματος πριν από την ουρά του συνδέσμου.
- Μετά την ουρά ενός συνδέσμου, αλλά πριν από το στοιχείο καθυστέρησης. Αυτό μπορεί να γίνει είτε με την insertlinkloss <args> μέθοδο ή τη link-lossmodel <errmod> <src> <dst> μέθοδο του στιγμιότυπου του προσομοιωτή.
- Μετά το στοιχείο καθυστέρηση μιας σύνδεσης. Αυτό μπορεί να γίνει με τη μέθοδο install-error.

Χρήση σε ασύρματα δίκτυα

Σε ασύρματα δίκτυα, τα μοντέλα σφαλμάτων μπορεί να εφαρμόζονται τόσο στις εισερχόμενες όσο και στις εξερχόμενες κινήσεις του δικτύου σε ένα ασύρματο κανάλι. Τα μοντέλα σφαλμάτων τοποθετούνται μεταξύ της διεπαφής δικτύου και το MAC στρώμα, ενώ επιτρέπουν στα εισερχόμενα και εξερχόμενα πακέτα να καταστρέφονται ανεξάρτητα. Η εγκατάσταση των μοντέλων λάθος σε ένα ασύρματο κόμβο γίνεται μέσω της node-config εντολής του στιγμιότυπου του προσομοιωτή.

Δικτύωση κινητών κόμβων

Η δικτύωση κινητών κόμβων στο ns-2 βασίζεται σε διάφορα μοντέλα που αναπτύχθηκαν από την ομάδα CMU Monarch. Αυτές οι επεκτάσεις εισάγουν την έννοια των κινητών κόμβων που συνδέονται με ασύρματα κανάλια και επιτρέπουν την προσομοίωση ασύρματων δικτύων και ad-hoc δικτύων.

Κινητοί κόμβοι

Ένας κινητός κόμβος είναι ένας κόμβος με επιπλέον λειτουργίες για την προσαρμογή του στην κινητή δικτύωση. Η πιο σημαντική διαφορά μεταξύ των ενσύρματων κόμβων και των κινητών κόμβων είναι ότι οι κινητοί κόμβοι συνδέονται σε ασύρματα κανάλια για την επικοινωνία τους, ενώ οι ενσύρματοι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους με συνδέσμους. Επίσης, οι κινητοί κόμβοι μπορούν να μετακινούνται εντός της συνδεσμολογίας, σε αντίθεση με τους ενσύρματους κόμβους που παραμένουν σταθεροί. Ο κινητός κόμβος είναι ένα σύνθετο αντικείμενο, που χτίστηκε από τα εξής μέρη:

- Ένας ταξινομητής διευθύνσεων που χρησιμοποιείται για την παράδοση πακέτων προς το ταξινομητή θύρας ή τον πράκτορα δρομολόγησης. Ο στόχος προεπιλογής του ταξινομητή είναι συχνά ο πράκτορας δρομολόγησης, ώστε να καταστεί δυνατή η προώθηση των πακέτων.
- Ένας ταξινομητής θυρών, που χρησιμοποιείται για την παράδοση πακέτων στους πράκτορες που συνδέονται με το κινητό κόμβο.
- Ένας πράκτορας δρομολόγησης για τη διαχείριση της δρομολόγησης και προώθηση των πακέτων.
- Ένα στρώμα συνδέσμου υπεύθυνο για τη μετατροπή διευθύνσεων δικτύου σε διευθύνσεις υλικού και την προετοιμασία των πακέτων πριν τεθούν πάνω στο ασύρματο κανάλι.
- Μια μονάδα ARP που μεταφράζει τις δικτυακές διευθύνσεις σε διευθύνσεις υλικού (MAC).
- Μια ουρά interface, η οποίο χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των πακέτων που πρόκειτα να σταλούν.
- Ένα MAC στρώμα για τη διαχείριση της πρόσβασης στο ασύρματο κανάλι.
- Μια διασύνδεση δικτύου που στέλνει και λαμβάνει πακέτα πάνω από το ασύρματο δίκτυο.
- Ένα μοντέλο ασύρματης μετάδοσης το οποίο καθορίζει την ισχύ του σήματος των ληφθέντων πακέτων, και ως εκ τούτου, εάν ένα πακέτο μπορεί να παραληφθούν από μια διεπαφή δικτύου ή όχι.
- Ένα ασύρματο κανάλι πάνω από το οποίο κατανέμονται τα πακέτα.

Packet μετάδοση

Τα πακέτα μεταδίδονται από ένα κινητό κόμβο με τον ακόλουθο τρόπο. Το πακέτο αρχικά παράγεται από έναν πράκτορα ή από μια γεννήτρια φορτίου στον κινητό κόμβο. Κάθε πακέτο που παράγεται παραδίδεται στην είσοδο του κινητού κόμβου, δηλαδή, στον ταξινομητή διευθύνσεων. Αυτό ο ταξινομητής αποφασίζει αν το πακέτο προοριζόταν για το τρέχον κόμβο, ή αν θα πρέπει να να προωθηθεί. Τα πακέτα που θα πρέπει να προωθηθούν διαβιβάζονται στον πράκτορα δρομολόγησης του κινητού κόμβου μέσω ενός προεπιλεγμένου στόχος του ταξινομητή διευθύνσεων. Ο πράκτορας δρομολόγησης επεξεργάζεται το πακέτο, συμπληρώνει το πεδίο next_hop και το περνάει κάτω στο επίπεδο συνδέσμου.

Το επίπεδο συνδέσμου μεταφράζει την διεύθυνση προορισμού σε διεύθυνση υλικού (MAC), αφήνοντας μία μονάδα ARP να δημιουργήσει αιτήσεις ARP, να επεξεργαστεί ARP αιτήσεις και να συμπληρώσει την επικεφαλίδα MAC του πακέτου. Το πακέτο παραδίδεται στη συνέχεια κάτω στην ουρά διεπαφής, η οποία κατέχει πακέτα που πρέπει να διαβιβαστούν. Το μήκος της ουράς διεπαφής μπορεί να καθοριστεί και ανάλογα με τον τύπο ουράς που χρησιμοποιείται μπορεί να δοθεί προτεραιότητα στα πακέτα ελέγχου δρομολόγησης.

Το στρώμα MAC ανακτά τα πακέτα από την ουρά διεπαφής εφόσον κρίνεται σκόπιμο, δηλαδή όταν το ασύρματο κανάλι είναι ελεύθερο να χρησιμοποιηθεί. Τα πακέτα παραδίδονται στη διεπαφή του δικτύου, η οποία θέτει τα πακέτα επάνω στο ασύρματο κανάλι. Αντίγραφα των πακέτων στη συνέχεια παραδίδονται σε όλες τις διεπαφές δικτύου που συνδέονται με το κανάλι, τη στιγμή που ένα πακέτο θα ξεκινήσει να φθάνει σε ένα φυσικό σύστημα (βάση της ταχύτητας του φωτός και της απόστασης μεταξύ των κόμβων). Ωστόσο, αυτό δεν σημαίνει απαραίτητα ότι το πακέτο μπορεί να ληφθεί σωστά από όλους τους.Τα μοντέλα ασύρματης διάδοσης διάδοσης το καθορίζουν αυτό τη στιγμή της λήψης ενός πακέτου.

Πακέτο υποδοχής

Όταν ένα πακέτο παραλαμβάνεται από τη διεπαφή δικτύου που συνδέεται με ένα ασύρματο κανάλι, η διεπαφή δικτύου συμβουλεύεται το ασύρματο μοντέλο διάδοσης για να αποφανθεί εάν το πακέτο μπορεί να ληφθεί σωστά ή όχι.

Εάν ένα πακέτο έχει παραληφθεί σωστά, παραδίδεται στο στρώμα MAC από τη διεπαφή του δικτύου. Το στρώμα MAC παραδίδει το πακέτο στο επίπεδο συνδέσμου, το οποίο με τη σειρά του παραδίδει το πακέτο στην είσοδο του κινητού κόμβου, δηλαδή στον ταξινομητή διευθύνσεων. Ο ταξινομητής διεύθυνσεων ελέγχει την διεύθυνση προορισμού του πακέτου για να δεί αν ταιριάζει με τη διεύθυνση του τρέχοντος κόμβου. Αν συμβεί αυτό, το πακέτο παραδίδεται στον ταξινομητή θυρών. Διαφορετικά, το πακέτο παραδίδεται σε έναν προκαθορισμένο στόχο - συνήθως το πράκτορα δρομολόγησης- για περαιτέρω επεξεργασία και πιθανή αποστολή. Ο ταξινομητής θύρας παραδίδει το πακέτο σε έναν πράκτορα

που συνδέεται στο κινητό κόμβο, με βάση τον αριθμό θύρας που περιέχεται στο πακέτο. Αυτό ολοκληρώνει την παράδοση πακέτων.

Ρύθμιση και δημιουργία κινητού κόμβου

Οι κινητοί κόμβοι δημιουργούνται και ρυθμίζονται ως συνήθως με τις εντολές node-config και node. Ωστόσο, μετά τη δημιουργία ενός κινητού κόμβου, πρέπει να απενεργοποιηθεί η τυχαία κίνηση του κόμβου για να το αποτρέψει από την εκτέλεση τυχαίων κινήσεων.

Κίνηση κόμβων

Οι κινητοί κόμβοι μπορούν να μετακινηθούν εντός της τοπογραφίας της προσομοίωσης, και να παρακολουθούν τις τρέχουσες θέσεις τους. Επί του παρόντος, οι κινήσεις είναι δυνατές μόνο σε δύο διαστάσεις (X και Y), αν και θέσεις συμπεριλαμβάνουν και μια τρίτη διάσταση, η οποία αγνοείται. Αυτός ο περιορισμός σημαίνει ότι μόνο επίπεδες τοπολογίες δικτύου επί του παρόντος έχουν νόημα σε ns-2 προσομοιώσεις.

Η αρχική θέση του κινητού κόμβου καθορίζεται από τη X_ της, Y_ και Z_ μεταβλητές παράδειγμα:

```
$ns_ initial_node_pos $mobilenode1_ 10
$ns_ initial_node_pos $mobilenode2_ 10
...
```

Οι κινήσεις των κινητών κόμβων εκτελούνται μέσω της setdest εντολής, η οποία λαμβάνει τις επιθυμητές x και y συντεταγμένες και μια ταχύτητα (σε m/s) ως εισόδους. Αν κάποιος επιθυμεί να κινήσει τον κινητό κόμβο σε αυτές τις συντεταγμένες σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, η ταχύτητα για να γίνει αυτό πρέπει να υπολογιστεί το χέρι.

$ Mobilenode_ setdest <x> <y> <velocity>

Τυχαία κίνηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί με την εντολή random motion 1 εντολή σε έναν κινητό κόμβο. Αυτή η εντολή θα διατάξει τον κινητό κόμβο να εκτελέσει κινήσεις σύμφωνα με ένα μοντέλο τυχαίου-σημείου αναφοράς, αμέσως μόλις ο κόμβος δεχθεί μια εντολή εκκίνησης. Σε ένα τέτοιο μοντέλο, ο κόμβος εκτελεί κινήσεις σε τυχαίες κατευθύνσεις με παύσεις στο ενδιάμεσο.

Είναι επίσης δυνατή η μετακίνηση των κόμβων σύμφωνα με ένα αρχείο κίνησης. Ένα τέτοιο αρχείο περιέχει OTcl κώδικα με εντολές setdest προγραμματισμένες σε κατάλληλα χρονικά διαστήματα και μπορεί να παραχθεί είτε με το χέρι ή με την setdest δυνατότητα του ns-2.

Η δρομολόγηση σε κινητά δίκτυα

Η δρομολόγηση στο κινητό κόμβων είναι πολύ διαφορετική από τη δρομολόγηση σε ενσύρματα κόμβους. Ο ενσύρματος κόμβος διατηρεί ένα πίνακα δρομολόγησης, ο οποίος χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο δρομολόγησης για την εκτέλεση υπολογισμών διαδρομής. Αυτοί οι υπολογισμοί χρησιμοποιούνται στη συνέχεια από ταξινομητές ενός κόμβου για να βρουν μια ενσύρματη σύνδεση να διαβιβάσουν τα πακέτα.

Στους κινητούς κόμβους, ο πράκτορας δρομολόγησης αναλαμβάνει όλη την ευθύνη για τη δρομολόγηση και την προώθηση. Δεν διατηρείται πίνακας δρομολόγησης στον κινητό κόμβο. Αντ 'αυτού, ο πράκτορας διατηρεί εσωτερικά έναν πίνακα δρομολόγησης. Δεν απαιτείται ξεχωριστός αλγόριθμος δρομολόγησης για την εκτέλεση υπολογισμών διαδρομής, καθώς όλοι οι υπολογισμοί πρέπει να εκτελούνται από το πράκτορα δρομολόγησης. Επίσης, δεν υπολογίζονται διαδρομές τροποποιώντας ένα ταξινομητή διεύθυνσης. Αντ 'αυτού, ο ταξινομητής διεύθυνσης συνήθως έχει το πράκτορα δρομολόγησης ως προεπιλεγμένο στόχο, και ο πράκτορας δρομολόγησης πρέπει να προωθεί μόνος του το πακέτο. Τέλος, η διαβίβαση αυτή δεν διεξάγεται μέσω ενσύρματων συνδέσεων, αλλά πάνω από ένα ασύρματο κανάλι. Είναι ευθύνη του πράκτορα δρομολόγησης να συμπληρώνει το πεδίο next_hop_ κάθε πακέτου που θα πρέπει να προωθηθεί, πριν το παραδώσει στο link layer του κινητού κόμβου. Η δημιουργία ενός πράκτορα δρομολόγησης δεν είναι πολύ διαφορετική από τη δημιουργία οποιουδήποτε άλλου πράκτορα. Συνδέεται απλά με μια ειδική θύρα (RT_PORT) στον ταξινομητή θύρας του κινητού κόμβου.

Χαρακτηριστικά διεπαφής δικτύου

Οι παράμετροι της Phy/WirelessPhy διεπαφής δικτύου που πρέπει να τεθούν είναι οι εξής:

- Pt_, η ισχύς μετάδοσης σε W (Watt).
- freq_, η συχνότητα που χρησιμοποιείται για την ασύρματη επικοινωνία.
- CPThresh_, το όριο λήψης. Αυτή η τιμή καθορίζει πόσο ισχυρότερο πρέπει να είναι ένα ραδιοφωνικό σήμα πρέπει από αυτό που λαμβάνεται τώρα προκειμένου να γίνει σωστά η λήψη. Μετριέται σε dB.
- CSThresh_, το κατώτατο όριο ισχύος. Αυτή η τιμή καθορίζει την ελάχιστη ισχύ σε W που απαιτείται για την ανίχνευση μετάδοσης.
- L_, η απώλεια του συστήματος. Κανονικά ορίζεται σε 1,0.

- RXThresh_, το όριο λήψης. Αυτή η τιμή καθορίζει την ελάχιστη λαμβανόμενη ισχύ σε W για να ληφθεί ένα πακέτο.
- bandwidth_, το εύρος ζώνης της διεπαφής δικτύου. Αυτό δεν επηρεάζει το εύρος της επικοινωνίας,αλλά θα πρέπει να οριστεί σωστά ούτως ή άλλως.

Trace αρχεία

Τα trace αρχεία είναι ένα σημαντικό κομμάτι της εξομοίωσης καθώς παρέχουν πληροφορία για τα γεγονότα που συνέβησαν. Αυτή τη στιγμή, το ns2 παρέχει τρεις διαφορετικές μορφές trace αρχείων: μια παλιά μορφή trace αρχείου, μια καινούργια μορφή και μια tagged μορφή.

Ανάλυση Κώδικα

Παρακάτω αναλύουμε το κώδικα του αρχείου .tcl που χρησιμοποιήσαμε, κατά την εξομοίωση όπου χρησιμοποιήσαμε 802.11 MAC πρωτόκολλο. Όπως φαίνεται παρακάτω, έχουμε 100 κινητούς κόμβους οι οποίοι κινούνται μέσα σε ένα γήπεδο 600 επί 600 μέτρων. Η εξομοίωση διαρκεί 500 μονάδες χρόνου. Αργότερα θέτουμε τις εξασθενήσεις των ασύρματων μεταδόσεων για μερικές συγκεκριμένες αποστάσεις. Για ενδιάμεσες αποστάσεις το εργαλείο υπολογίζει μόνο του τις αντίστοιχες εξασθενίσεις.

```
set val(chan)        Channel/WirelessChannel      ;# channel type
set val(prop)        Propagation/TwoRayGround  ;# radio-propagation model
set val(netif)       Phy/WirelessPhy              ;# network interface type
set val(mac)         Mac/802_11                   ;# MAC type
set val(ifq)         Queue/DropTail/PriQueue      ;# interface queue type
set val(ll)          LL                          ;# link layer type
set val(ant)         Antenna/OmniAntenna          ;# antenna model
set val(ifqlen)      100                          ;# max packet in ifq
set val(nn)          100                          ;# number of mobilenodes
set val(rp)          AODV                         ;# protocol type
set val(x)           600                          ;# X dimension of topography
set val(y)           600                          ;# Y dimension of topography
set val(stop)        500                          ;# simulation period
set val(energymodel)   EnergyModel                ;# Energy Model
set val(initialenergy)   100                      ;# value

set ns                  [new Simulator]
set tracefd      [open trace-aodv1-802-11.tr w]
set namtrace            [open nam-aodv1-802-11.nam w]

$ns trace-all $tracefd
$ns namtrace-all-wireless $namtrace $val(x) $val(y)


set dist(5m)  8.69113e-06
set dist(9m)  2.76381e-06
set dist(10m) 1.72278e-06
set dist(11m) 1.68908e-06
set dist(12m) 1.43527e-06
set dist(13m) 1.23774e-06
set dist(14m) 9.91011e-07
set dist(15m) 8.64570e-07
set dist(16m) 7.43857e-07
set dist(20m) 4.23696e-07
set dist(25m) 3.07645e-07
```

```
set dist(30m) 2.13643e-07
set dist(35m) 1.36962e-07
set dist(40m) 1.60174e-07
Phy/WirelessPhy set CSThresh_ $dist(40m)
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ $dist(40m)


# set up topography object
set topo       [new Topography]
$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)

create-god $val(nn)

# configure the nodes
$ns node-config -adhocRouting $val(rp) \
          -llType $val(ll) \
           -macType $val(mac) \
           -ifqType $val(ifq) \
           -ifqLen $val(ifqlen) \
           -antType $val(ant) \
           -propType $val(prop) \
           -phyType $val(netif) \
           -channel [new $val(chan)] \
           -topoInstance $topo \
           -agentTrace ON \
           -routerTrace ON \
           -macTrace  OFF \
           -movementTrace OFF \
           -energyModel $val(energymodel) \
           -initialEnergy $val(initialenergy) \
           -rxPower 35.28e-3 \
           -txPower 31.32e-3 \
               -idlePower 712e-6 \
               -sleepPower 144e-9

           #-IncomingErrProc MultistateErrorProc \
           #-OutgoingErrProc MultistateErrorProc

for {set i 0} {$i < $val(nn) } { incr i } {
       set mnode_($i) [$ns node]
}



for {set i 1} {$i < $val(nn) } { incr i } {
```

```
        $mnode_($i) set X_ [ expr {$val(x) * rand()} ]
        $mnode_($i) set Y_ [ expr {$val(y) * rand()} ]
        $mnode_($i) set Z_ 0
}
```

Με τις πιο πάνω διαμορφώσεις καθορίζουμε τον τύπο των επιπέδων στο stack του κόμβου, καθώς και κάποιες άλλες δυνατότητες που παρέχονται στον κόμβο. Τα κυριότερα είναι ότι:

- Στο φυσικό επίπεδο υποστηρίζεται wireless channel, ο τύπος του link layer είναι LL, στο επίπεδο Mac ακολουθήσαμε το πρωτόκολλο 802_11 και 802_15_4 στο επίπεδο δικτύου είναι WirelessPhy. Συνολικά το δίκτυο αποτελείται από 100 κόμβους τοποθετημένους σε τυχαία διάταξη και ο συνολικός χρόνος εξομοίωσης του παρόντος δικτύου είναι 500 sec.
- Τα adhoc πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι τα AODV /DSDV /DSR.
- Το μοντέλο του Propagation είναι Two Ray Ground και της κεραίας είναι Omni Antenna.

Επίσης θα καθορίζουμε ποιοι κόμβοι αποτελούν sources για το δίκτυό μας και ποιός είναι ο κόμβος sink στον οποίο καταλήγουν τα πακέτα από τους διάφορους κόμβους sources.

```
# Position of Sink

$mnode_(10) set X_ [ expr {$val(x)/3 + 17} ]
$mnode_(10) set Y_ [ expr {$val(y)/8 + 17} ]
$mnode_(10) set Z_ 0.0

$mnode_(20) set X_ [ expr {$val(x)/3 + 33} ]
$mnode_(20) set Y_ [ expr {$val(y)/4 + 33} ]
$mnode_(20) set Z_ 0.0

$mnode_(30) set X_ [ expr {$val(x)/5 + 19} ]
$mnode_(30) set Y_ [ expr {$val(y)/3 + 14} ]
$mnode_(30) set Z_ 0.0

$mnode_(40) set X_ [ expr {$val(x)/1 + 36} ]
$mnode_(40) set Y_ [ expr {$val(y)/2 + 36} ]
$mnode_(40) set Z_ 0.0


$mnode_(0) set X_ [ expr {$val(x)/3} ]
$mnode_(0) set Y_ [ expr {$val(y)/4} ]
$mnode_(0) set Z_ 0.0
$mnode_(0) label "Sink"
```

```
for {set i 0} {$i < $val(nn)} { incr i } {
        $ns initial_node_pos $mnode_($i) 10
}
```

Στα σενάρια που υλοποίησα είναι σημαντικό να καθορίσω την εμβέλεια επικοινωνίας των sources nodes , αυτό μπορεί να καθοριστεί δίνοντας την κατάλληλη τιμή στο Received Threshold στο επίπεδο δικτύου. Ο Ns παρέχει ένα πρόγραμμα το οποίο τρέχοντας το εκτελέσιμο του με παραμέτρους τον τύπο του propagation και το μήκος της ακτίνας από τον AR, απαντά με τις κατάλληλες τιμές που πρέπει να δοθούν για τον καθορισμό της εμβέλειας επικοινωνίας. Στα σενάρια χρειάζεται να υπάρχει επικάλυψη στην εμβέλειας των AR. Η maximum απόσταση μεταξύ των sources και sink nodes είναι 40m.

```
set dist(5m)  8.69113e-06
set dist(9m)  3.37381e-06
set dist(10m) 2.92278e-06
set dist(11m) 2.58908e-06
set dist(12m) 2.33527e-06
set dist(13m) 2.13774e-06
set dist(14m) 10.81011e-07
set dist(15m) 9.54570e-07
set dist(16m) 8.51087e-07
set dist(20m) 5.80696e-07
set dist(25m) 4.07645e-07
set dist(30m) 3.13643e-07
set dist(35m) 2.56962e-07
set dist(40m) 1.20174e-07
Phy/WirelessPhy set CSThresh_ $dist(40m)
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ $dist(40m)
```

Και στα δυο σενάρια που επεξεργαστήκαμε τόσο για το 802.11 όσο και για το 802.15.4 το ρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων είναι το UDP και η εφαρμογή που τρέχουν είναι CBR. Επίσης καθορίζεται πώς το flow id έχει τον αριθμό 2, και τα πακέτα έχουν μέγεθος 20 bytes και με συχνότητα αποστολής 0.15Mb σε κάθε δευτερόλεπτο.

```
#Setup a UDP connection
set udp [new Agent/UDP]
$ns attach-agent $mnode_(10) $udp
```

```
set sink [new Agent/Null]
$ns attach-agent $mnode_(0) $sink

$ns connect $udp $sink
$udp set fid_ 2

#Setup a UDP connection
set udp1 [new Agent/UDP]
$ns attach-agent $mnode_(20) $udp1

set sink1 [new Agent/Null]
$ns attach-agent $mnode_(0) $sink1

$ns connect $udp1 $sink1
$udp1 set fid_ 2

#Setup a UDP connection
set udp2 [new Agent/UDP]
$ns attach-agent $mnode_(30) $udp2

set sink2 [new Agent/Null]
$ns attach-agent $mnode_(0) $sink2

$ns connect $udp2 $sink2
$udp2 set fid_ 2

#Setup a UDP connection
set udp3 [new Agent/UDP]
$ns attach-agent $mnode_(40) $udp3

set sink3 [new Agent/Null]
$ns attach-agent $mnode_(0) $sink3

$ns connect $udp3 $sink3
$udp3 set fid_ 2

#Setup a CBR over UDP connection
set cbr [new Application/Traffic/CBR]
$cbr attach-agent $udp
$cbr set type_ CBR
$cbr set packet_size_ 20
#$cbr set rate_ 0.15Mb
$cbr set interval_ 1.0
#$cbr set random_ false
```

```
#Setup a CBR over UDP connection
set cbr1 [new Application/Traffic/CBR]
$cbr1 attach-agent $udp1
$cbr1 set type_ CBR
$cbr1 set packet_size_ 20
#$cbr set rate_ 0.15Mb
$cbr1 set interval_ 1.0
#$cbr set random_ false

#Setup a CBR over UDP connection
set cbr2 [new Application/Traffic/CBR]
$cbr2 attach-agent $udp2
$cbr2 set type_ CBR
$cbr2 set packet_size_ 20
#$cbr set rate_ 0.15Mb
$cbr2 set interval_ 1.0
#$cbr set random_ false

#Setup a CBR over UDP connection
set cbr3 [new Application/Traffic/CBR]
$cbr3 attach-agent $udp3
$cbr3 set type_ CBR
$cbr3 set packet_size_ 20
#$cbr set rate_ 0.15Mb
$cbr3 set interval_ 1.0
#$cbr set random_ false


$ns at 5.0 "$cbr start"
$ns at [expr $val(stop) - 5] "$cbr stop"

$ns at 5.0 "$cbr1 start"
$ns at [expr $val(stop) - 5] "$cbr1 stop"

$ns at 5.0 "$cbr2 start"
$ns at [expr $val(stop) - 5] "$cbr2 stop"

$ns at 5.0 "$cbr3 start"
$ns at [expr $val(stop) - 5] "$cbr3 stop"

# Telling nodes when the simulation ends
for {set i 0} {$i < $val(nn) } { incr i } {
   $ns at $val(stop) "$mnode_($i) reset;"
}
```

```
# ending nam and the simulation
$ns at $val(stop) "$ns nam-end-wireless $val(stop)"
$ns at $val(stop) "stop"
$ns at [expr $val(stop) + 0.01] "puts \"end simulation\"; $ns halt"
proc stop {} {
   global ns tracefd namtrace
   $ns flush-trace
   close $tracefd
   close $namtrace
}

$ns run
```

Παράθεση Κώδικα 802.15.4

```
# Generated by Topology Generator for Network Simulator
set val(chan)         Channel/WirelessChannel      ;# channel type
set val(prop)         Propagation/TwoRayGround     ;# radio-propagation model
set val(netif)        Phy/WirelessPhy/802_15_4     ;# network interface type
set val(mac)          Mac/802_15_4                 ;# MAC type
set val(ifq)          Queue/DropTail/PriQueue      ;# interface queue type
set val(ll)           LL                           ;# link layer type
set val(ant)          Antenna/OmniAntenna          ;# antenna model
set val(ifqlen)       100                ;# max packet in ifq
set val(nn)           100                          ;# number of mobilenodes
set val(rp)           AODV                         ;# protocol tye
set val(x)            600                          ;# X dimension of topography
set val(y)            600                          ;# Y dimension of topography
set val(stop)         500                          ;# simulation period
set val(energymodel)   EnergyModel                 ;# Energy Model
set val(initialenergy) 100                         ;# value

set ns                [new Simulator]
set tracefd       [open trace-aodv2-802-15-4.tr w]
set namtrace          [open nam-aodv2-802-15-4.nam w]

$ns trace-all $tracefd
$ns namtrace-all-wireless $namtrace $val(x) $val(y)

set dist(5m)  7.69113e-06
set dist(9m)  2.76381e-06
set dist(10m) 1.72278e-06
set dist(11m) 1.68908e-06
set dist(12m) 1.43527e-06
set dist(13m) 1.23774e-06
set dist(14m) 9.91011e-07
```

```
set dist(15m) 8.64570e-07
set dist(16m) 7.43857e-07
set dist(20m) 4.23696e-07
set dist(25m) 3.07645e-07
set dist(30m) 2.13643e-07
set dist(35m) 1.36962e-07
set dist(40m) 1.60174e-07
Phy/WirelessPhy set CSThresh_ $dist(40m)
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ $dist(40m)


# set up topography object
set topo       [new Topography]
$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)

create-god $val(nn)

# configure the nodes
$ns node-config -adhocRouting $val(rp) \
          -llType $val(ll) \
           -macType $val(mac) \
           -ifqType $val(ifq) \
           -ifqLen $val(ifqlen) \
           -antType $val(ant) \
           -propType $val(prop) \
           -phyType $val(netif) \
           -channel [new $val(chan)] \
           -topoInstance $topo \
           -agentTrace ON \
           -routerTrace ON \
           -macTrace  OFF \
           -movementTrace OFF \
           -energyModel $val(energymodel) \
           -initialEnergy $val(initialenergy) \
           -rxPower 35.28e-3 \
           -txPower 31.32e-3 \
               -idlePower 712e-6 \
               -sleepPower 144e-9

           #-IncomingErrProc MultistateErrorProc \
           #-OutgoingErrProc MultistateErrorProc

for {set i 0} {$i < $val(nn) } { incr i } {
       set mnode_($i) [$ns node]
}
```

```
for {set i 1} {$i < $val(nn) } { incr i } {
        $mnode_($i) set X_ [ expr {$val(x) * rand()} ]
        $mnode_($i) set Y_ [ expr {$val(y) * rand()} ]
        $mnode_($i) set Z_ 0
}
# Position of Sink

$mnode_(10) set X_ [ expr {$val(x)/3 + 17} ]
$mnode_(10) set Y_ [ expr {$val(y)/8 + 17} ]
$mnode_(10) set Z_ 0.0

$mnode_(20) set X_ [ expr {$val(x)/3 + 33} ]
$mnode_(20) set Y_ [ expr {$val(y)/4 + 33} ]
$mnode_(20) set Z_ 0.0

$mnode_(30) set X_ [ expr {$val(x)/5 + 19} ]
$mnode_(30) set Y_ [ expr {$val(y)/3 + 14} ]
$mnode_(30) set Z_ 0.0

$mnode_(40) set X_ [ expr {$val(x)/1 + 36} ]
$mnode_(40) set Y_ [ expr {$val(y)/2 + 36} ]
$mnode_(40) set Z_ 0.0


$mnode_(0) set X_ [ expr {$val(x)/3} ]
$mnode_(0) set Y_ [ expr {$val(y)/4} ]
$mnode_(0) set Z_ 0.0
$mnode_(0) label "Sink"


for {set i 0} {$i < $val(nn)} { incr i } {
        $ns initial_node_pos $mnode_($i) 10
}


set dist(5m)  8.69113e-06
set dist(9m)  3.37381e-06
set dist(10m) 2.92278e-06
set dist(11m) 2.58908e-06
set dist(12m) 2.33527e-06
set dist(13m) 2.13774e-06
set dist(14m) 10.81011e-07
```

```
set dist(15m) 9.54570e-07
set dist(16m) 8.51087e-07
set dist(20m) 5.80696e-07
set dist(25m) 4.07645e-07
set dist(30m) 3.13643e-07
set dist(35m) 2.56962e-07
set dist(40m) 1.20174e-07
Phy/WirelessPhy set CSThresh_ $dist(40m)
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ $dist(40m)

#Setup a UDP connection
set udp [new Agent/UDP]
$ns attach-agent $mnode_(10) $udp

set sink [new Agent/Null]
$ns attach-agent $mnode_(0) $sink

$ns connect $udp $sink
$udp set fid_ 2

#Setup a UDP connection
set udp1 [new Agent/UDP]
$ns attach-agent $mnode_(20) $udp1

set sink1 [new Agent/Null]
$ns attach-agent $mnode_(0) $sink1

$ns connect $udp1 $sink1
$udp1 set fid_ 2

#Setup a UDP connection
set udp2 [new Agent/UDP]
$ns attach-agent $mnode_(30) $udp2

set sink2 [new Agent/Null]
$ns attach-agent $mnode_(0) $sink2

$ns connect $udp2 $sink2
$udp2 set fid_ 2

#Setup a UDP connection
set udp3 [new Agent/UDP]
$ns attach-agent $mnode_(40) $udp3

set sink3 [new Agent/Null]
```

```
$ns attach-agent $mnode_(0) $sink3

$ns connect $udp3 $sink3
$udp3 set fid_ 2

#Setup a CBR over UDP connection
set cbr [new Application/Traffic/CBR]
$cbr attach-agent $udp
$cbr set type_ CBR
$cbr set packet_size_ 20
#$cbr set rate_ 0.15Mb
$cbr set interval_ 1.0
#$cbr set random_ false

#Setup a CBR over UDP connection
set cbr1 [new Application/Traffic/CBR]
$cbr1 attach-agent $udp1
$cbr1 set type_ CBR
$cbr1 set packet_size_ 20
#$cbr set rate_ 0.15Mb
$cbr1 set interval_ 1.0
#$cbr set random_ false

#Setup a CBR over UDP connection
set cbr2 [new Application/Traffic/CBR]
$cbr2 attach-agent $udp2
$cbr2 set type_ CBR
$cbr2 set packet_size_ 20
#$cbr set rate_ 0.15Mb
$cbr2 set interval_ 1.0
#$cbr set random_ false

#Setup a CBR over UDP connection
set cbr3 [new Application/Traffic/CBR]
$cbr3 attach-agent $udp3
$cbr3 set type_ CBR
$cbr3 set packet_size_ 20
#$cbr set rate_ 0.15Mb
$cbr3 set interval_ 1.0
#$cbr set random_ false


$ns at 5.0 "$cbr start"
$ns at [expr $val(stop) - 5] "$cbr stop"
```

```
$ns at 5.0 "$cbr1 start"
$ns at [expr $val(stop) - 5] "$cbr1 stop"

$ns at 5.0 "$cbr2 start"
$ns at [expr $val(stop) - 5] "$cbr2 stop"

$ns at 5.0 "$cbr3 start"
$ns at [expr $val(stop) - 5] "$cbr3 stop"

# Telling nodes when the simulation ends
for {set i 0} {$i < $val(nn) } { incr i } {
   $ns at $val(stop) "$mnode_($i) reset;"
}

# ending nam and the simulation
$ns at $val(stop) "$ns nam-end-wireless $val(stop)"
$ns at $val(stop) "stop"
$ns at [expr $val(stop) + 0.01] "puts \"end simulation\"; $ns halt"
proc stop {} {
   global ns tracefd namtrace
   $ns flush-trace
   close $tracefd
   close $namtrace
}

$ns run
```

Trace file

Παρακάτω παραθέτουμε ένα ενδεικτικό τμήμα ενός trace αρχείου που προκύπτει από την εξομοίωση του tcl αρχείου για 802.15.11:

```
s 5.000000000 _10_ AGT  --- 0 cbr 20 [0 0 0 0] [energy 100.000000 ei 0.000 es 0.000
et 0.000 er 0.000] ------- [10:0 0:0 32 0] [0] 0 0
r 5.000000000 _10_ RTR  --- 0 cbr 20 [0 0 0 0] [energy 100.000000 ei 0.000 es 0.000
et 0.000 er 0.000] ------- [10:0 0:0 32 0] [0] 0 0
s 5.000000000 _20_ AGT  --- 1 cbr 20 [0 0 0 0] [energy 100.000000 ei 0.000 es 0.000
et 0.000 er 0.000] ------- [20:0 0:1 32 0] [0] 0 0
r 5.000000000 _20_ RTR  --- 1 cbr 20 [0 0 0 0] [energy 100.000000 ei 0.000 es 0.000
et 0.000 er 0.000] ------- [20:0 0:1 32 0] [0] 0 0
s 5.000000000 _30_ AGT  --- 2 cbr 20 [0 0 0 0] [energy 100.000000 ei 0.000 es 0.000
et 0.000 er 0.000] ------- [30:0 0:2 32 0] [0] 0 0
r 5.000000000 _30_ RTR  --- 2 cbr 20 [0 0 0 0] [energy 100.000000 ei 0.000 es 0.000
et 0.000 er 0.000] ------- [30:0 0:2 32 0] [0] 0 0
s 5.000000000 _40_ AGT  --- 3 cbr 20 [0 0 0 0] [energy 100.000000 ei 0.000 es 0.000
et 0.000 er 0.000] ------- [40:0 0:3 32 0] [0] 0 0
```

```
r 5.000000000 _40_ RTR  --- 3 cbr 20 [0 0 0 0] [energy 100.000000 ei 0.000 es 0.000
et 0.000 er 0.000] ------- [40:0 0:3 32 0] [0] 0 0
s 5.000000000 _10_ RTR  --- 0 AODV 48 [0 0 0 0] [energy 100.000000 ei 0.000 es
0.000 et 0.000 er 0.000] ------- [10:255 -1:255 30 0] [0x2 1 1 [0 0] [10 4]] (REQUEST)
s 5.000000000 _20_ RTR  --- 0 AODV 48 [0 0 0 0] [energy 100.000000 ei 0.000 es
0.000 et 0.000 er 0.000] ------- [20:255 -1:255 30 0] [0x2 1 1 [0 0] [20 4]] (REQUEST)
s 5.000000000 _30_ RTR  --- 0 AODV 48 [0 0 0 0] [energy 100.000000 ei 0.000 es
0.000 et 0.000 er 0.000] ------- [30:255 -1:255 30 0] [0x2 1 1 [0 0] [30 4]] (REQUEST)
s 5.000000000 _40_ RTR  --- 0 AODV 48 [0 0 0 0] [energy 100.000000 ei 0.000 es
0.000 et 0.000 er 0.000] ------- [40:255 -1:255 30 0] [0x2 1 1 [0 0] [40 4]] (REQUEST)
N -t 5.000115 -n 40 -e 99.996410
N -t 5.000115 -n 74 -e 99.996410
N -t 5.000115 -n 10 -e 99.996410
N -t 5.000635 -n 78 -e 99.996410
r 5.000988071 _40_ RTR  --- 0 AODV 48 [0 ffffffff 14 800] [energy 99.996410 ei 0.004
es 0.000 et 0.000 er 0.000] ------- [20:255 -1:255 30 0] [0x2 1 1 [0 0] [20 4]]
(REQUEST)
r 5.000988093 _74_ RTR  --- 0 AODV 48 [0 ffffffff 14 800] [energy 99.996410 ei 0.004
es 0.000 et 0.000 er 0.000] ------- [20:255 -1:255 30 0] [0x2 1 1 [0 0] [20 4]]
(REQUEST)
r 5.000988094 _10_ RTR  --- 0 AODV 48 [0 ffffffff 14 800] [energy 99.996410 ei 0.004
es 0.000 et 0.000 er 0.000] ------- [20:255 -1:255 30 0] [0x2 1 1 [0 0] [20 4]]
(REQUEST)
N -t 5.001273 -n 74 -e 99.996380
N -t 5.001273 -n 20 -e 99.996383
N -t 5.001433 -n 0 -e 99.996409
N -t 5.001433 -n 92 -e 99.996409
N -t 5.001433 -n 20 -e 99.996378
N -t 5.001433 -n 70 -e 99.996409
N -t 5.001433 -n 99 -e 99.996409
```

Script αρχείο για την ανάλυση του trace αρχείου

```
BEGIN {
        recv = 0
        currTime = prevTime = 0
     min=2; max=20; # Changed: I use this to calculate the flow from node2 to
node20 (cause my base station and my rnc are nodes 0 and 1)
        #variables to calculate the RTT
        #tcpsend = ackrecv = RTT = conta = seqtcp = seqack = 0

        printf("# %10s %10s %5s %5s %15s %18s\n\n", \
            "flow","flowType","src","dst","time","throughput")
}
```

```
{
	# Trace line format: normal
	if ($2 != "-t") {
		event = $1
		time = $2
		if (event == "+" || event == "-") node_id = $3
		if (event == "r" || event == "d") node_id = $4
		flow_id = $8
		pkt_id = $12
		pkt_size = $6
		flow_t = $5
		level = "AGT"
		pkt_name= $5 #Changed: I use it to count only one type of packet.

	}
	# Trace line format: new
	if ($2 == "-t") {
		event = $1
		time = $3
		node_id = $5
		flow_id = $39
		pkt_id = $41
		pkt_size = $37
		flow_t = $45
		level = $19

	}

	# Init prevTime to the first packet recv time
	if(prevTime == 0)
		prevTime = time



	# Calculates the total number of packets
	# I use node_id to indicate which flows I want to check (in this case all of the
ues)
    # I use the condition: (pkt_name == "AM_Data") only to select a kind of packet
from the bs to all the ues, so I calculate the throughput.
	if ((level == "AGT") &&  (event == "r") && (node_id >= min ) && (node_id <=
max) && (pkt_size >= pkt) && (pkt_name == "AM_Data")) {


		# Rip off the header
```

```
                hdr_size = pkt_size % pkt
                pkt_size -= hdr_size
                # Store received packet's size
                recv += pkt_size
                # This 'if' is introduce to obtain clearer
                # plots from the output of this script


                if((time - prevTime) >= tic*10) {
                        printf("  %10g %10s %5d %5d %15g %18g\n", \
                                flow,flow_t,src,dst,(prevTime+1.0),0)
                        printf("  %10g %10s %5d %5d %15g %18g\n", \
                                flow,flow_t,src,dst,(time-1.0),0)
                }
                currTime += (time - prevTime)
                if (currTime >= tic) {
                        printf("  %10g %10s %5d %5d %15g %18g\n", \
                             flow,flow_t,src,dst,time,(recv/currTime)*(8/1000))
                        recv = 0
                        currTime = 0
                }
                prevTime = time
        }


}
END {
        printf("\n\n")
}
```

Ανάλυση Trace File

Παρακάτω παραθέτουμε ένα παράδειγμα εγγραφής από το trace file που αντιπροσωπεύει γεγονός κίνησης πακέτου σε ασύρματη ένωση.

```
s -t 5.141242471 -Hs 20 -Hd 10 -Ni 20 -Nx 270.00 -Ny 145.00 -Nz 0.00 -Ne 99.994707 -Nl RTR -Nw --- -Ma 0 -Md 0 -Ms 0 -Mt 0 -Is 20.0 -Id 0.1 -It cbr -Il 40 -If 2 -Ii 1 -Iv 30 -Pn cbr -Pi 0 -Pf 0 -Po 0
```

Η πιο πάνω εγγραφή μας δίνει τις ακόλουθες σημαντικές πληροφορίες:

- Το πακέτο στάλθηκε (s) από τον κόμβο με id 20 (-Hs 20) και ο επόμενος κόμβος προς τον προορισμό είναι ο κόμβος (-Hd 10) στον χρόνο 5.141242471 (-t 5.141242471).
- Ο κόμβος που παρέλαβε το πακέτο έχει id 20 (-Ni 20) βρίσκεται στην θέση 270.00 στον άξονα X, 145.00 στον άξονα Y και 0 στον άξονα Z (-Nx 270.00 -Ny 145.00 -Nz 0.00) .
- Το πακέτο ανήκει στην εφαρμογή CBR (-It cbr), ο κόμβος πηγής του έχει την διεύθυνση 1.1.0 και έχει προορισμό την διεύθυνση 20.1.1 (-Is 20.0 -Id 0.1), ανήκει στην ροή με το id 2 (-If 2) , το μέγεθος του πακέτου είναι 40 byte (-Il 40)
- Έχει μοναδικό αναγνωριστικό 1 (-Ii 1) και ο ακολουθιακός αριθμός είναι το 0 (-Pi 0).

```
r -t 5.204562024 -Hs 20 -Hd -2 -Ni 20 -Nx 270.00 -Ny 145.00 -Nz 0.00 -Ne 99.994375 -Nl RTR -Nw --- -Ma 0 -Md ffffffff -Ms 1e -Mt 800 -Is 30.255 -Id -1.255 -It AODV -Il 48 -If 0 -Ii 0 -Iv 30 -P aodv -Pt 0x2 -Ph 1 -Pb 1 -Pd 0 -Pds 0 -Ps 30 -Pss 4 -Pc REQUEST
```

- Το πακέτο λήφθηκε (r) από τον κόμβο με id 20 (-Hs 20) και ο επόμενος κόμβος προς τον προορισμό είναι ο κόμβος (-Hd 2) στον χρόνο 5.204562024 (-t 5.204562024)
- Ο κόμβος που παρέλαβε το πακέτο έχει id 20 (-Ni 20) βρίσκεται στην θέση 270.00 στον άξονα X, 145.00 στον άξονα Y και 0 στον άξονα Z (-Nx 270.00 -Ny 145.00 -Nz 0.00)
- Το πακέτο ανήκει στην εφαρμογή AODV(-It aodv), και έχει προορισμό την διεύθυνση (-Is 30.255 -Id -1.255), ανήκει στην ροή με το id 0 (-If 0 , το μέγεθος του πακέτου είναι 48 byte (-Il 48)
- Έχει μοναδικό αναγνωριστικό 0 (-Ii 0).

```
d -t 34.324523047 -Hs 30 -Hd 20 -Ni 30 -Nx 275.00 -Ny 150.00 -Nz 0.00 -Ne 99.953612 -Nl RTR -Nw CBK -Ma 0 -Md 14 -Ms 1e -Mt 800 -Is 40.0 -Id 0.3 -It cbr -Il 40 -If 2 -Ii 119 -Iv 29 -Pn cbr -Pi 29 -Pf 1 -Po 0
```

- Το πακέτο απορρίφθηκε (d) από τον κόμβο με id 20 (-Hs 30) και ο επόμενος

κόμβος προς τον προορισμό είναι ο κόμβος (-Hd 20) στον χρόνο 34.324523047 (-t 34.324523047)

• Ο κόμβος που απέρριψε το πακέτο έχει id 20 (-Ni 30) βρίσκεται στην θέση 275.00 στον άξονα X, 150.00 στον άξονα Y και 0 στον άξονα Z (-Nx 275.00 –Ny 150.00 -Nz 0.00)

• Το πακέτο ανήκει στην εφαρμογή cbr (-It cbr), και έχει προορισμό την διεύθυνση (-Is 40.0 -Id 0.3), ανήκει στην ροή με το id 2 (-If 2 , το μέγεθος του πακέτου είναι 40 byte (-Il 40)

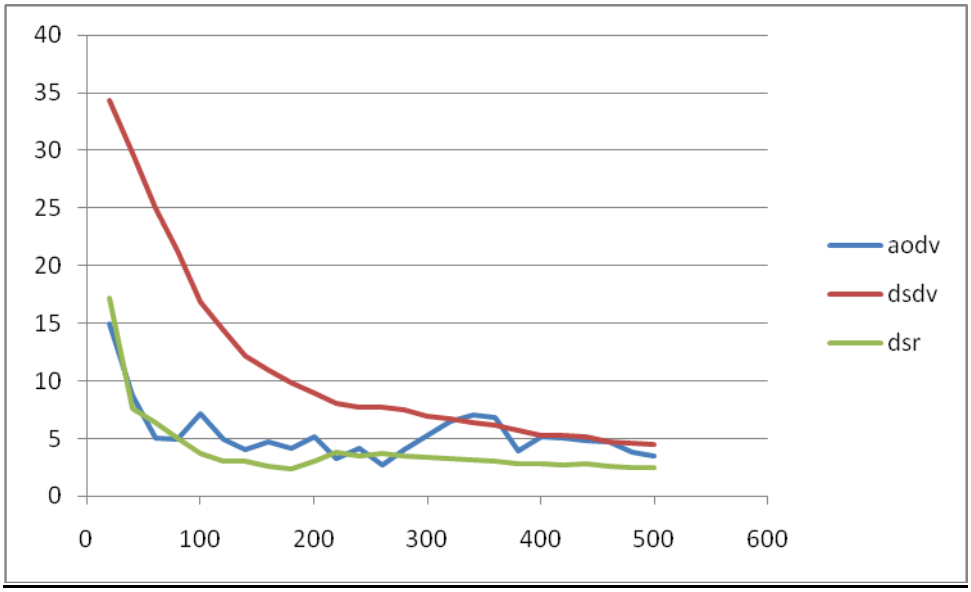
• Έχει μοναδικό αναγνωριστικό 119 (-Ii 119) και ο ακολουθιακός αριθμός είναι το 29 (-Pi 29).

Event	Abbreviation	Flag	Type	Value
Wireless Event	s: Send r: Receive d: Drop f: Forward	-t	double	Time (* For Global Setting)
		-Ni	int	Node ID
		-Nx	double	Node X Coordinate
		-Ny	double	Node Y Coordinate
		-Nz	double	Node Z Coordinate
		-Ne	double	Node Energy Level
		-Nl	string	Network trace Level (AGT, RTR, MAC, etc.)
		-Nw	string	Drop Reason
		-Hs	int	Hop source node ID
		-Hd	int	Hop destination Node ID, -1, -2
		-Ma	hexadecimal	Duration
		-Ms	hexadecimal	Source Ethernet Address
		-Md	hexadecimal	Destination Ethernet Address
		-Mt	hexadecimal	Ethernet Type
		-P	string	Packet Type (arp, dsr, imep, tora, etc.)
		-Pn	string	Packet Type (cbr, tcp)

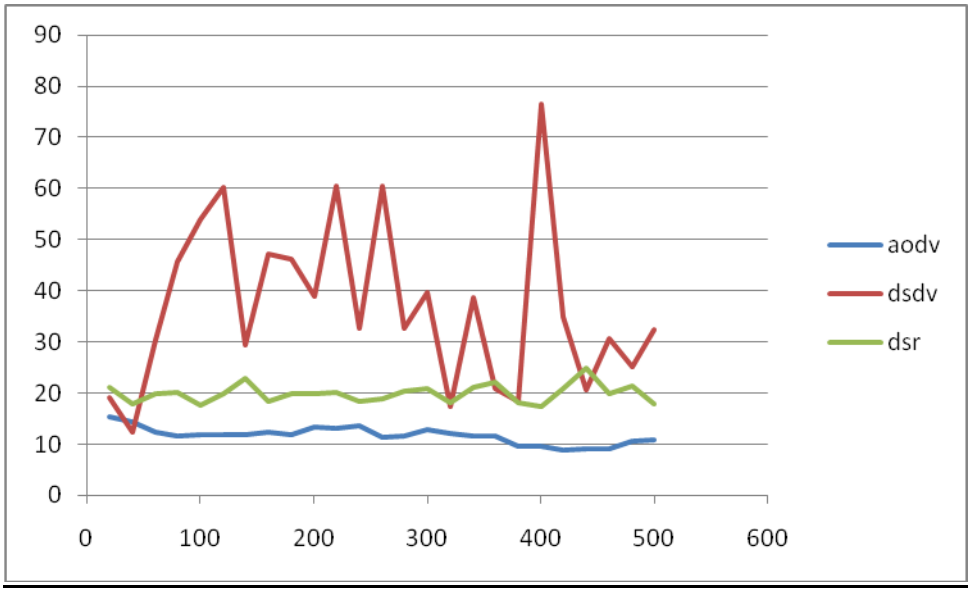
Πίνακας επεξήγησης των συμβόλων του trace αρχείου

Αποτελέσματα

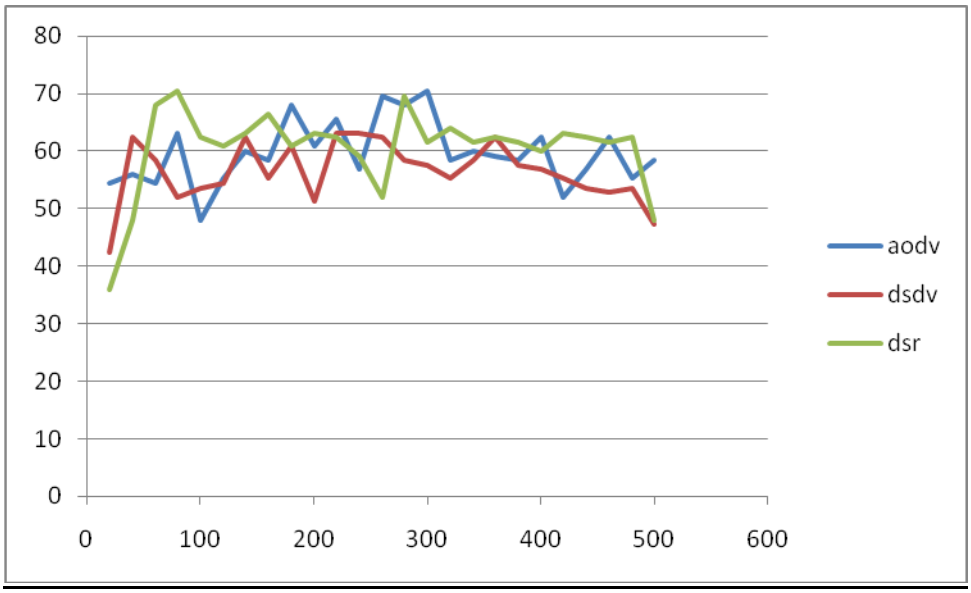
1) Σύγκριση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης ως προς το ποσοστό πακέτων που απέτυχαν να μεταδοθούν για το 802.11 πρωτόκολλο



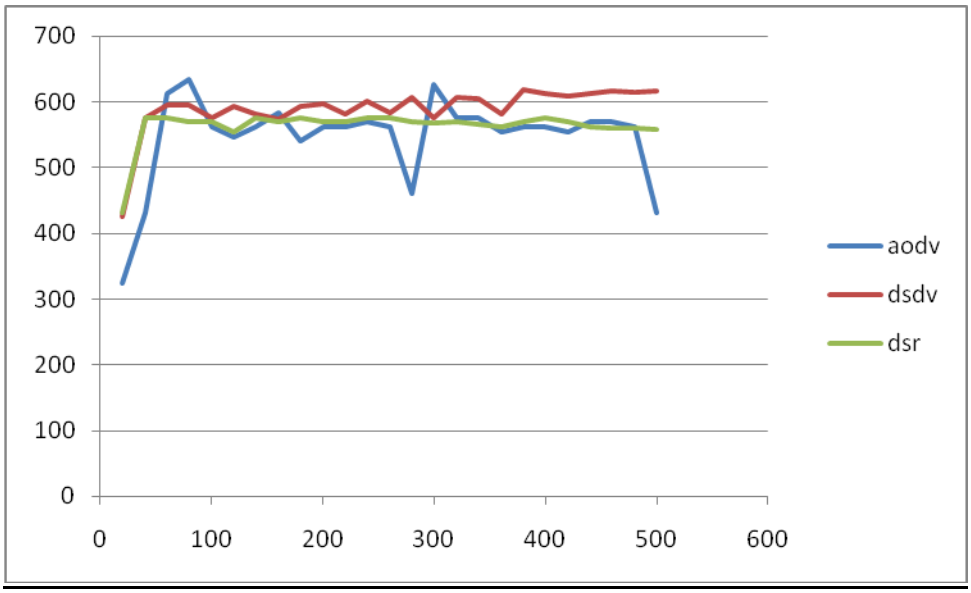
2) Σύγκριση των πρωτοκόλλων ως προς την καθυστέρηση μετάδοσης από άκρο σε άκρο για το 802.11 πρωτόκολλο



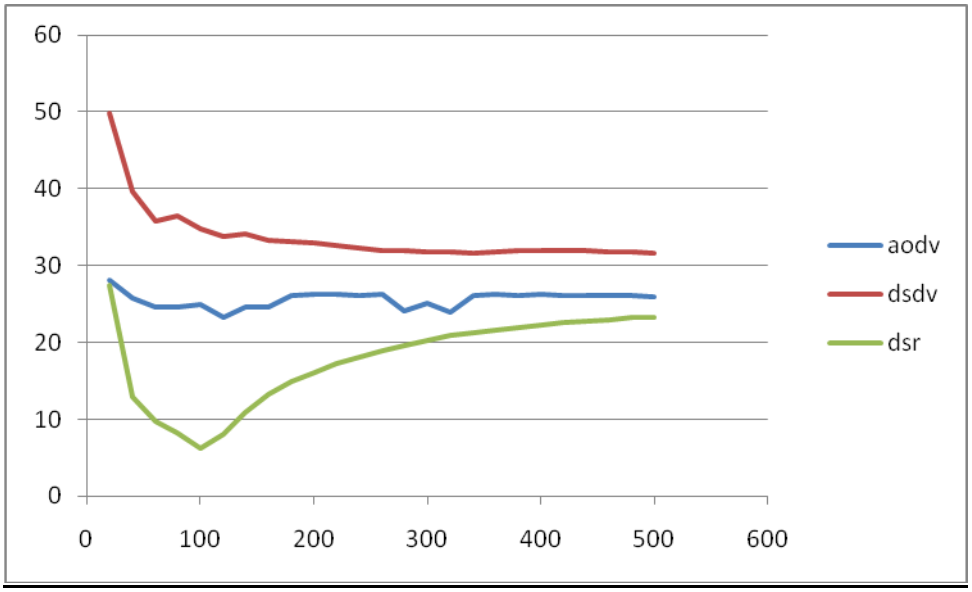
3) <u>Σύγκριση των πρωτοκόλλων ως προς το ποσοστό των πακέτων που παρελήφθησαν ορθά από τον κόμβο προορισμού για το 802.11 πρωτόκολλο</u>



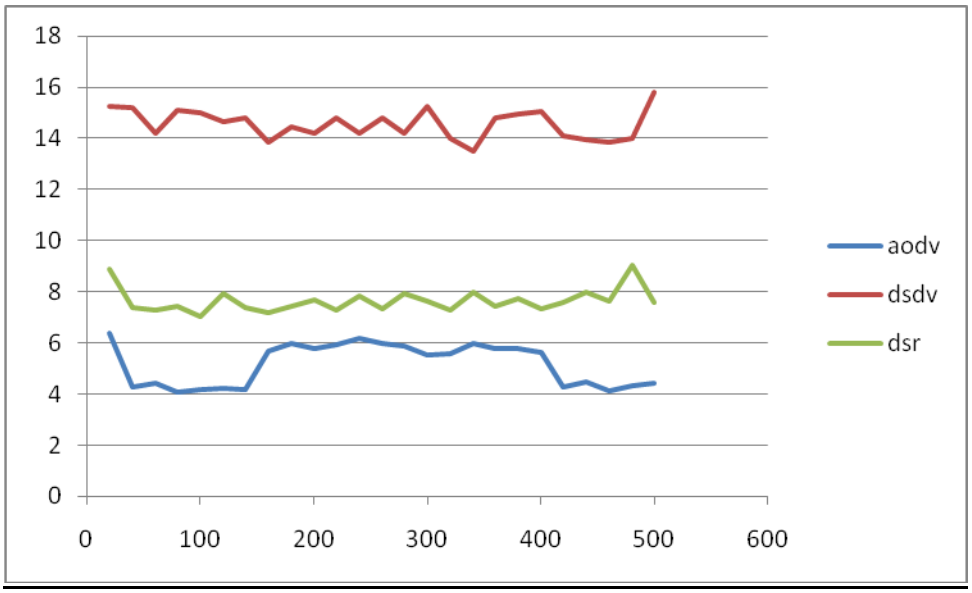
4) <u>Σύγκριση των πρωτοκόλλων ως προς το μέσο ρυθμό μετάδοσης πακέτων για το 802.11 πρωτόκολλο</u>



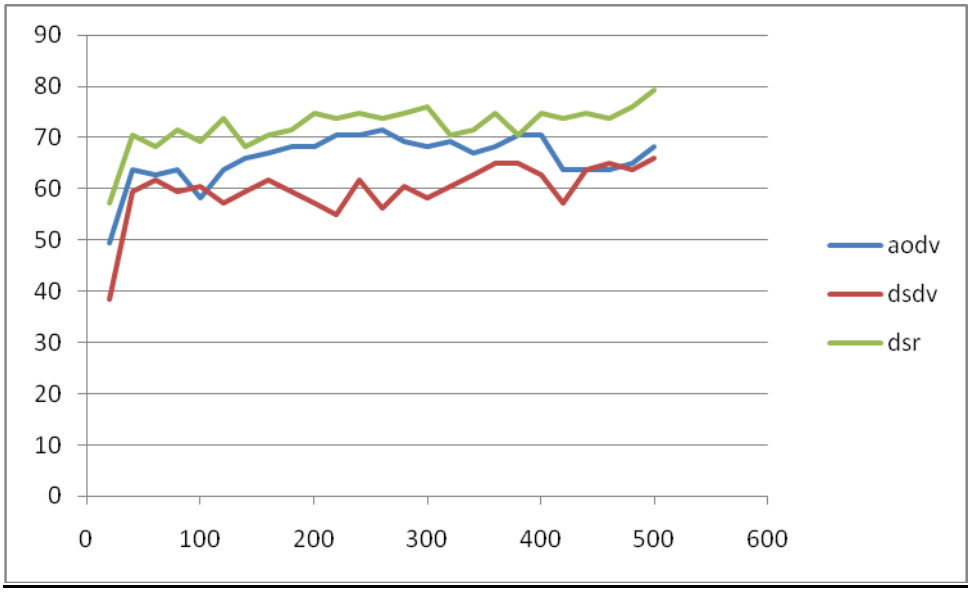
5) <u>Σύγκριση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης ως προς το ποσοστό πακέτων που απέτυχαν να μεταδοθούν για το 802.15.4 πρωτόκολλο</u>



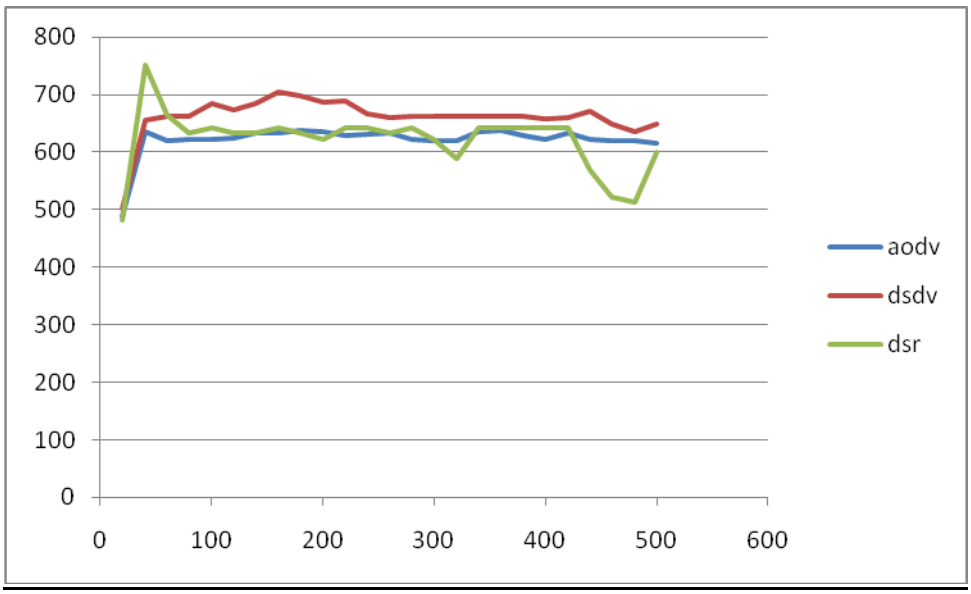
6) <u>Σύγκριση των πρωτοκόλλων ως προς την καθυστέρηση μετάδοσης από άκρο σε άκρο για το 802.15.4 πρωτόκολλο</u>



7) Σύγκριση των πρωτοκόλλων ως προς το ποσοστό των πακέτων που παρελήφθησαν ορθά από τον κόμβο προορισμού για το 802.15.4 πρωτόκολλο



8) Σύγκριση των πρωτοκόλλων ως προς το μέσο ρυθμό μετάδοσης πακέτων για το 802.15.4 πρωτόκολλο



Παρατηρήσεις

Αρχικά παρατηρούμε ότι η συγκριτική απόδοση των πρωτοκόλλων είναι ίδια τόσο για το πρωτόκολλο 802.11 όσο και για το 802.15.4. Συνεπώς τα συμπεράσματα που εξάγουμε παρακάτω είναι ανεξάρτητα του πρωτοκόλλου φυσικού μέσου.

Όπως παρατηρούμε από τα διαγράμματα ρυθμού μετάδοσης, ο DSDV υπερτερεί των άλλων δύο αλγορίθμων, ενώ οι άλλοι δύο αλγόριθμοι έχουν παρόμοια απόδοση. Αυτό οφείλεται στην ικανότητα του DSDV να αποφεύγει τη δημιουργία φαύλων κύκλων. Το κλασικό πρόβλημα της μέτρησης στο άπειρο που παρουσιάζουν οι αλγόριθμοι δρομολόγησης αντιμετωπίζεται στον DSDV με αριθμούς ακολουθίας, επιτρέποντας στους κόμβους να διακρίνουν μεταξύ παλιών και νέων διαδρομών, ώστε να αποφεύγονται οι ατέρμονες βρόγχοι.

Όσο αφορά την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, ο AODV είναι ο καλύτερος αλγόριθμος, ενώ ο DSDV ο χειρότερος. Αυτό είναι λογικό καθώς ο DSDV είναι proactive αλγόριθμος. Η καθυστέρηση αυτή σχετίζεται με το μέγεθος των καταχωρητών και επηρεάζει σημαντικά τις απαιτήσεις του συστήματος σε υλικό.

Σχετικά με το ποσοστό πακέτων που φτάνουν επιτυχώς στον προορισμό, ο DSR έχει την καλύτερη απόδοση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο DSR βασίζεται στη τεχνική της δρομολόγησης πηγής. Δρομολόγηση πηγής σημαίνει ότι κάθε πακέτο περιέχει στην επικεφαλίδα του μια ταξινομημένη λίστα διευθύνσεων μέσα από την οποία το πακέτο βρίσκει το δρόμο του προς τον προορισμό. Η λίστα αυτή δημιουργείται από τον κόμβο που δημιουργεί το πακέτο. Συνεπώς είναι απίθανο ένα πακέτο να μην βρει τον προορισμό του.

Βιβλιογραφία

- Andrew S. Tanenbaum, “Computer Networks”.
- Cormen, Leiserson, Rivest, Stein, “Introduction to algorithms”.
- Kennedy, Davis, “Electronic Communication Systems”.
- Jakob Eriksson, Michalis Faloutsos, Srikanth Krishnamurthy, “Scalable Ad Hoc Routing: The Case of Dynamic Addressing”.
- Sylvia Ratnasamy, Paul Francis, Mark Handley, Richard Karp, Scott Shenker, “A Sclable Content-Addessable Network”.
- Petar Maymounkov, David Mazieres, “Kademlia: A Peer-to-peer Information System Based on the XOR Metric”.
- Karl Aberer, Magdalena Punceva, “Improving Data Access in P2P Systems”.
- M. Frans Kaashoek, David R. Karger, “Koorde: A simple degree-optimal distributed hash table”.
- Anh-Tuan Gai, Laurent Viennot, “Broose: a Practical Distributed Hashtable based on the De-Bruijn Topology”.
- “The Gnutella Protocol Specification v0.4”, http://www.clip2.com.
- Dahlia Malkhi, Moni Naor, David Ratajczak, “Viceroy: A Scalable and Dynamic Emulation of the Butterfly”.
- Haiying Shen, Cheng-Zhong Xu, Guihai Chen, “Cycloid: A constant-degree and lookup-efficient p2p overlay network”.
- Bernard Traversat, Ahkil Arora, Mohamed Abdelaziz, Mike Duigou, Carl Haywood, Jean-Christophe Hugly, Eric Pouyoul, Bill Yeager, “Project JXTA 2.0 Super-Peer Virtual Network”.
- Jorge Nuevo, “A Comprehensible GloMoSim Tutorial”.
- Charles E. Perkins, Pravin Bhagwat, “Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers”.
- Charles E. Perkins, Elizabeth M. Royer, “Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing”.
- David B. Johnson, David A. Maltz, “Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks”.
- Tracy Camp, Jeff Boleng, Vanessa Davies, “A survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research”.

- Ion Stoica, Robert Morris, David Liben-Nowell, David R. Karger, M. Frans Kaashoek, Frank Dabek, Hari Balakrishnan, “Chord: A Scalable Peer-to-peer Lookup Protocol for Internet Applications”.

- Antony Rowstron, Peter Druschel, “Pastry: Scalable, decentralized object location and routing for large-scale peer-to-peer systems”.

- Ben Y. Zhao, John Kubiatowicz, Anthony D. Joseph, “Tapestry: An Infrastructure for fault-tolerant Wide-area Location and Routing”.