ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ
ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ
ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ
ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΚΑΙ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ
ΜΕ ΔΙΑΔΕΙΨΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΕΜΒΟΛΕΣ**

Θεόφιλος Κ. Χρυσικός

Διπλ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Τεχνολογίας Υπολογιστών Πανεπιστημίου Πατρών

Αριθμός Διδακτορικής Διατριβής: 292

ΠΑΤΡΑ
2012

Πιστοποίηση

Πιστοποιείται ότι η παρούσα διδακτορική διατριβή με θέμα:

“ Μετρήσεις Χαρακτηρισμού και Στατιστική Μοντελοποίηση Ασύρματου Καναλιού σε Εσωτερικούς & Εξωτερικούς Χώρους με Διαλείψεις και Παρεμβολές ”

του Θεόφιλου Χρυσικού του Κων/νου, Διπλ. Ηλεκτρολόγου Μηχανικού & Τεχνολογίας Υπολογιστών του Παν. Πατρών παρουσιάστηκε δημοσίως στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών την 29^η Ιουνίου 2012 και εξετάστηκε και εγκρίθηκε από την ακόλουθη Εξεταστική Επιτροπή:

Σταύρος Κωτσόπουλος, Καθηγητής, Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών, Συντονιστής Συμβουλευτικής Επιτροπής

Γρηγόριος Καλύβας, Αναπληρωτής Καθηγητής, Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών, Μέλος Συμβουλευτικής Επιτροπής

Βασίλειος Στυλιανάκης, Λέκτορας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών, Μέλος Συμβουλευτικής Επιτροπής

Κων/νος Σώρρας, Αναπληρωτής Καθηγητής της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών

Γεώργιος Καραγιαννίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΑΠΘ

Σταύρος Κουλουρίδης, Λέκτορας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών

Ανδρέας Μαράς, Καθηγητής του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου

Πάτρα 29^η Ιουνίου 2012

Ο ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ

Σταύρος Κωτσόπουλος, Καθηγητής

Ο ΠΡΟΕΔΡΟΣ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ

Αντώνιος Τζες, Καθηγητής

Πρόλογος

Το παρόν κείμενο αποτελεί την συμπυκνωμένη παρουσίαση της ερευνητικής μου δραστηριότητας και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν κατά την διάρκεια αυτής, στην χρονική περίοδο από τον Μάρτιο του 2006 μέχρι και τον Ιούνιο του 2012. Στη διάρκεια αυτών των έξι ετών σχεδιάστηκε, αναπτύχθηκε, αξιολογήθηκε και δημοσιεύτηκε ένα σύνολο εργασιών σε συνέδρια και περιοδικά που αποτελεί τον κορμό της συνεισφοράς μας στην θεματική περιοχή του χαρακτηρισμού του ασύρματου διαύλου (Wireless Channel Characterization) σε περιβάλλοντα ανοικτών και κλειστών χώρων με διαλείψεις και παρεμβολές, μέσω μετρήσεων χαρακτηρισμού και στατιστικής μοντελοποίησης.

Η εκπόνηση και ολοκλήρωση της διδακτορικής διατριβής, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Σταύρου Α. Κωτσόπουλου, δεν αποτέλεσε απλά μία ερευνητική πράξη, αλλά βοήθησε σημαντικά τον γράφοντα στο να αποκτήσει πολύτιμη εμπειρία σχετικά με άμεσα πρακτικά, επαγγελματικά, και ερευνητικά ζητήματα, να εντυπώσει στην διαδικασία οργάνωσης και εκπόνησης εργαστηριακών ασκήσεων και φροντιστηρίων, να αποκτήσει πολύτιμη εμπειρία μέσα από την παρακολούθηση και ενεργό συμμετοχή σε διεθνή συνέδρια, και να έλθει σε επαφή με τις διαδικασίες αξιολόγησης του ερευνητικού έργου σε έγκριτα συνέδρια και περιοδικά. Εδόθη επίσης η δυνατότητα για την συμμετοχή σε σεμινάρια, ημερίδες αλλά και σε ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα, όπου η σημασία των προθεσμιών, της συλλογικής δουλειάς και του επιμερισμού εργασίας σε ευρωπαϊκή κλίμακα αποτέλεσε πρωτόγνωρη εμπειρία. Τέλος, δεν είναι υπερβολή να ειπωθεί ότι η τέλεση της διδακτορικής διατριβής έλυσε τον γόρδιο δεσμό για πολλά θέματα που για έναν διδάκτορα ή ακαδημαϊκό φαντάζουν πλέον απλοϊκά, όπως για παράδειγμα η οικονομία λόγου και ο τρόπος γραφής μίας επιστημονικής εργασίας, ή ακόμα και η οργάνωση μίας συνοπτικής παρουσίασης με διαφάνειες. Πράγματι, μπορεί κανείς να πει πως η εκπόνηση και διεκπεραίωση μίας τέτοιας δουλειάς αποτελεί εμπειρία ζωής.

Αρωγός, αδιάλειπτος υποστηρικτής και ανεκτίμητης αξίας επιβλέπων σε αυτό το ταξίδι ήταν ο Καθηγητής του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών Σταύρος Α. Κωτσόπουλος, στον οποίον οφείλω ευγνωμοσύνη και ανυπολόγιστης αξίας ευχαριστίες για την άψογη συνεργασία, την βοήθεια, την παροχή οδηγιών, την στήριξη και τις πάντα εύστοχες μα και αναγκαίες επισημάνσεις σε κάθε βήμα της ερευνητικής μου προσπάθειας.

Εξάιρετος συνομιλητής, παιδαγωγός, δάσκαλος και επιβλέπων με την πιο ουσιαστική και συνάμα ευγενική έννοια του όρου, ο κ. Κωτσόπουλος παρέδωσε ειρήσθω εν παρόδω, με την όλη στάση του, μαθήματα ζωής για την προώθηση της έρευνας και την ανάληψη πρωτοβουλιών. Σε ένα περιβάλλον τόσο στοχαστικό όσο αυτό της ελληνικής εκπαίδευσης, ο Καθηγητής Σταύρος Κωτσόπουλος αποτελούσε ένα σημείο αναφοράς που βοηθούσε στην αποβολή του όποιου άγχους και την απρόσκοπτη προσήλωση στο ερευνητικό και εργαστηριακό έργο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Γρηγόριο Καλύβα και τον Λέκτορα του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Βασίλειο Στυλιανάκη, μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, για τις συμβουλές, τις παρατηρήσεις τους αλλά και για την στήριξή τους στην προσωπική απώλεια που υπέστην την περίοδο ολοκλήρωσης και παρουσίασης της Διατριβής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων και Δικτύων του ΤΕΙ Μεσολογγίου και Επιστημονικό Συνεργάτη του Εργαστηρίου Ασύρματης Τηλεπικοινωνίας κ. Τάσο Νταγιούκλα για την άψογη συνεργασία μας στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος PEACE, παράγωγο του οποίου ήταν το σύνολο των εργασιών και αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας εργασίας, και για τον καθοριστικό ρόλο του ως συντονιστής μίας αψεγάδιαστης πανευρωπαϊκής προσπάθειας με εξάιρετο έργο και δείγματα γραφής.

Επίσης να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Δημήτριο Τουμπακάρη και την Λέκτορα του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Βάσω Περράκη για την αρμονική συνεργασία και τις συμβουλές στη διάρκεια όλων αυτών των ετών, τον Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών και πρώην Πρύτανη του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Σταύρο Κουμπιά, τον Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Δημήτριο Σερπάνο, τον Ομότιμο Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Χρήστο Γεωργόπουλο για την συνεργασία μας στα πλαίσια διεκπεραίωσης των μεταπτυχιακών μαθημάτων.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω τον συνάδελφο Διπλωματούχο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό κ. Ιωάννη Γεωργόπουλο για την αψεγάδιαστη συνεργασία μας όλα αυτά τα χρόνια, την προθυμία και την αμεσότητα στην λήψη αποφάσεων και επίλυση προβλημάτων, την θετική σκέψη και το θετικό πνεύμα δουλειάς και συνεργασίας που τον ξεχώρισε από την πρώτη στιγμή, όπως και τον συνάδελφο Διπλωματούχο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Κωνσταντίνο Μπίρκο για την αψεγάδιαστη συνεργασία, την καθημερινή επικοινωνία σε συναδελφικό αλλά και ανθρώπινο επίπεδο, το ήθος, την αξιοπρέπεια, την υποδειγματική στάση ζωής. Οι ευχαριστίες μου επεκτείνονται σε όλους τους συναδέλφους στο Εργαστήριο Ασύρματης Τηλεπικοινωνίας, τους νυν Υποψήφιους Διδάκτορες μα και όσους ολοκλήρωσαν το έργο τους. Στην γραμματέα κ. Αλέκα Κωτσοπούλου-Μπαλλού.

Τέλος, ας μου επιτραπούν ορισμένες προσωπικές αναφορές: στην Όλγα Παπαδημητρίου, για την διαδρομή. Στις Άννα Φλωρή και Κατερίνα Κομιανού, επειδή ήταν εκεί όταν χρειάστηκε. Στον Γεώργιο Γιαννάκη, για την βοήθεια. Στην Ευτυχία Μεσισκή, για όλα. Στην Ντίνα Παπαδημητρίου, για την επιμονή. Στην Ίριδα-Ειρήνη Φραγκουλοπούλου, για το ήθος και την ψυχή. Στην Μαντώ Τζεφρίου, για την έμπρακτη στήριξη. Στον Νίκο Σεμπεκόπουλο. Στην Μαίρη Αγγελιδάκη. Στην Φωτεινή. Στον εκδότη και σκηνοθέτη Γιάννη Σολδάτο, με εκτίμηση και σεβασμό. Στους αείμνηστους Θόδωρο Αγγελόπουλο, Θανάση Βέγγο και Δημήτριο Κατσαγάνη, για τους στίχους, τις εικόνες και τα όνειρα, το ανεκπλήρωτο και τα ζωντανά οράματα. Στην Ειρήνη Γκάγκα, που έδωσε υπόσταση στην άνοιξη και νόημα στις πυρκαγιές, επαναπροσδιορίζοντας ορίζοντες και προοπτική.

Στα μέλη της οικογένειάς μου. Στην αείμνηστη γιαγιά μου Εύχαρη Γατοπούλου που κηδέψαμε λίγες ώρες μετά την παρουσίαση της Διατριβής ενώπιον της τριμελούς επιτροπής. Στον πατέρα μου, Κωνσταντίνο Χρυσικό, που μου έμαθε ότι η σκληρή δουλειά, η καθαρή συνείδηση και η τιμιότητα είναι αναγκαία συνθήκη για ένα καλύτερο μέλλον. Στην μητέρα μου, Αικατερίνη Γατοπούλου, για όλα τα χρόνια, όλη την αγάπη και όλη την έμπρακτη και πνευματική, υλική και εγκεφαλική στήριξη ανυπολόγιστης αξίας με θυσίες και αυταπάρνηση, όντας κυματοθραύστης και λιμάνι. Στον αδερφό μου Ανδρέα Χρυσικό, υποδειγματικό συνοδοιπόρο ζωής, πρότυπο φιλίας και εντιμότητας και ανεκτίμητη παρουσία.

Θεόφιλος Κ. Χρυσικός

Πάτρα, Ιούνιος 2012

Περίληψη

Το πρόβλημα της μοντελοποίησης του ασύρματου διαύλου συνίσταται σε ένα ολοένα και αυξανόμενο πλήθος παραμέτρων και ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και να ενσωματώνονται στα πλαίσια του RF σχεδιασμού (Radio-Frequency planning) ενός ασύρματου δικτύου εύρωστης παροχής υπηρεσιών. Ο χαρακτηρισμός του ασύρματου καναλιού προϋποθέτει κάτι περισσότερο από μία ντετερμινιστική εξίσωση που υπολογίζει τις απώλειες οδεύσεως ελεύθερου χώρου συναρτήσει της απόστασης πομπού-δέκτη και της συχνότητας. Ένα αξιόπιστο μοντέλο απωλειών σε μία τέτοια περίπτωση απαιτεί τον συνυπολογισμό των απωλειών λόγω των διάφορων μηχανισμών διάδοσης και εξασθένησης της Η/Μ ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών λόγω εμποδίων, αλλά και των φαινομένων σκίασης λόγω ανθρώπινης παρεμβολής.

Η σημασία της συμβολής της διατριβής έγκειται στην συγκριτική αντιπαράβολή των βασικότερων μοντέλων απωλειών οδεύσεως και στην αριθμητική διόρθωση και επαναξιολόγηση του μοντέλου της ITU για ένα σύνολο τοπολογιών σύνθετης ράδιο-διάδοσης. Οι προτεινόμενες μας αλλαγές στο μοντέλο ITU αύξησαν σημαντικά την αξιοπιστία του όχι μόνο σε σχέση με την αρχική του απόδοση αλλά και συγκριτικά με τα υπόλοιπα μοντέλα. Επιπρόσθετα, υπολογίσαμε αναλυτικά για κάθε τοπολογία την εξασθένηση ανά απόσταση και προβήκαμε στην μοντελοποίηση της γεωγραφικής διασποράς της εξασθένησης ανά απόσταση με τρόπο που μπορεί να αποτελέσει το θεμέλιο ενός προγνωστικού εργαλείου για την παράμετρο αυτή.

Επίσης, εξετάσαμε τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας και καταλήξαμε σε μία καινοτόμο μέθοδο για τον υπολογισμό του βάθους σκίασης απευθείας από τα εμπόδια της εκάστοτε τοπολογίας. Η μέθοδος αυτή προτάθηκε και ελέγχθηκε για την ακρίβειά της στα 2.4 GHz, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε συχνότητα ενδιαφέροντος εφόσον ακολουθηθούν οι διαδικασίες καταμέτρησης των απωλειών σκίασης των εμποδίων κάθε τύπου και πλήθους. Με τη μέθοδο αυτή μπορεί να υπολογιστεί και η εξασθένηση ανά απόσταση μέσω του βάθους σκίασης, συνεπώς είναι εφικτός ο χαρακτηρισμός της εξασθένησης εντός της τοπολογίας χωρίς την αναγκαιότητα πραγματοποίησης εκτεταμένων μετρήσεων. Επιπρόσθετα, εξετάσαμε πώς διαφορετικοί μηχανισμοί ράδιο-διάδοσης οδηγούν σε διαφορετική γεωγραφική διασπορά των τοπικών τιμών της λαμβανόμενης ισχύος.

Τέλος, παρουσιάστηκε η λύση της Ασφάλειας Φυσικού Επιπέδου (Wireless Information-Theoretic Security, WITS) με διερεύνηση της επίδρασης των ρεαλιστικών απωλειών οδεύσεων ενός ασύρματου διαύλου με εμπόδια και διαλείψεις στα όρια των τιμών των παραμέτρων, ενώ επίσης εξετάστηκε για πρώτη φορά σε κλειστή μορφή η Αποκοπή Χωρητικότητας Ασφαλείας (Outage Secrecy Capacity). Μελετήσαμε την επίδραση της κινητικότητας των χρηστών στην αξιοπιστία της μεθόδου σε επίπεδο προσομοιώσεων αλλά και με πειραματικές μετρήσεις, αξιολογώντας ποσοτικά και ποιοτικά την επίδρασή τους στα όρια τιμών των παραμέτρων υπό την παρουσία ενός ωτακουστή, και εν συνεχεία σε καθεστώς πολλαπλών ωτακουστών, θεωρώντας μέθοδο συνεργασίας ωτακουστών SC και MRC.

Abstract

Wireless Channel Modeling consists of an even more increasing number of factors and parameters that need to be accounted for, in the context of RF planning. Wireless Channel Characterization requires more than a deterministic formula for calculating free space path loss in relation to frequency and distance. A reliable path loss model needs to incorporate in its formula the various propagation mechanisms that influence signal attenuation, including losses due to obstacles and human body shadowing.

The importance of our contribution lies in the comparative evaluation and validation of the most fundamental RF path loss models and in the numerical adjustment and re-evaluation of the ITU path loss model for a number of different complex propagation topologies. Our suggested correction to the ITU model has significantly increased its prediction precision compared not only to the initial ITU model but also to all other path loss models in question. In addition, we have calculated the attenuation over distance and modeled the distribution of the local mean values versus distance throughout each topology, in a way that can serve as the foundation of a prediction method for this parameter.

The large-scale fading of the received signal has also been characterized and a new empirical method for the calculation of the shadow depth has been introduced. This method has been validated for the 2.4 GHz frequency, but it can be applied to any frequency of interest as long as the respective obstacle-caused losses are measured. Extending this method can be applied in order to calculate the attenuation over distance as a function of shadow depth, therefore allowing us to predict this parameter without extensive measurements. The impact of different propagation mechanisms on the variation of distribution of local mean values of received signal power throughout the topology has also been studied.

Finally, the concept of Wireless Information-Theoretic Security (WITS) was discussed, by investigating the impact of channel-dependent variation of path loss on the boundaries of secure communications as defined by WITS parameters, whereas a closed-form expression for Outage Secrecy Capacity was introduced. The impact of user mobility on the range of these parameters was investigated in terms of simulations and experimental measurements, in the presence of a single eavesdropper and also for a multiple eavesdroppers scenario, assuming SC and MRC schemes.

Λίστα Εικόνων

2.1. Υπολογισμός απόστασης πομπού-δέκτη (d) με βάση τα ύψη των κεραιών.....	20
2.2. Τοπολογία γραφείου (μετρήσεις ιδίου ορόφου)	21
2.3. Τοπολογία γραφείου (μετρήσεις διαφοράς ενός ορόφου)	21
2.4. Τοπολογία γραφείου (μετρήσεις διαφοράς δύο ορόφων)	22
2.5. Σύγκριση προβλέψεων θεωρητικών μοντέλων με μετρήσεις (ίδιος όροφος)	23
2.6. Σύγκριση προβλέψεων εμπειρικών μοντέλων με μετρήσεις (ίδιος όροφος)	23
2.7. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλου One-Slope με μετρήσεις (πολλαπλοί όροφοι).	24
2.8. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλου λογαριθμικής απόστασης με μετρήσεις (πολλαπλοί όροφοι)	25
2.9. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλου ITU με μετρήσεις (πολλαπλοί όροφοι)	25
2.10. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλου MWF με μετρήσεις (πολλαπλοί όροφοι)	26
2.11. Τοπολογία βιβλιοθήκης (μετρήσεις ιδίου ορόφου)	29
2.12. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλων με μετρήσεις	30
2.13. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλου MWF με μετρήσεις.....	30
2.14. Τοπολογία αεροδρομίου (μετρήσεις ιδίου ορόφου)	33
2.15. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλων με μετρήσεις (AP1)	34
2.16. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλων με μετρήσεις (AP2)	36
2.17. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλων με μετρήσεις (AP3)	38
2.18. Τοπολογία οικίας (μετρήσεις ιδίου ορόφου)	40
2.19. Τοπολογία οικίας (μετρήσεις διαφοράς ενός ορόφου)	40
2.20. Σύγκριση προβλέψεων θεωρητικών μοντέλων με μετρήσεις (ίδιος όροφος) ...	42
2.21. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλου MWF με μετρήσεις (ίδιος όροφος)	42
2.22. Σύγκριση προβλέψεων θεωρητικών μοντέλων με μετρήσεις (διαφορά 1 ορόφου).....	44
2.23. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλου MWF με μετρήσεις (διαφορά 1 ορόφου)	44

2.24. Σύγκριση προβλέψεων αρχικού μοντέλου ITU με μετρήσεις (πολλαπλοί όροφοι)	48
2.25. Σύγκριση προβλέψεων προτεινόμενου μοντέλου ITU-1 με μετρήσεις (πολλαπλοί όροφοι)	49
2.26. Σύγκριση προβλέψεων προτεινόμενου μοντέλου ITU-2 με μετρήσεις (πολλαπλοί όροφοι)	49
2.27. Σύγκριση προβλέψεων προτεινόμενου μοντέλου ITU-3 με μετρήσεις (πολλαπλοί όροφοι)	50
2.28. Σύγκριση προβλέψεων αρχικού και προτεινόμενου μοντέλου ITU με μετρήσεις (AP1)	53
2.29. Σύγκριση προβλέψεων αρχικού και προτεινόμενου μοντέλου ITU με μετρήσεις (AP2)	54
2.30. Σύγκριση προβλέψεων αρχικού και προτεινόμενου μοντέλου ITU με μετρήσεις (AP3)	54
2.31. Curve-fitting για τοπολογία γραφείου (ίδιος όροφος)	73
2.32. Curve-fitting για τοπολογία γραφείου (πολλαπλοί όροφοι)	73
2.33. Curve-fitting για τοπολογία αεροδρομίου (AP1)	75
2.34. Curve-fitting για τοπολογία αεροδρομίου (AP2)	76
2.35. Curve-fitting για τοπολογία αεροδρομίου (AP3)	76
2.36. Curve-fitting για τοπολογία βιβλιοθήκης.....	77
2.37. Curve-fitting για τοπολογία οικίας (ίδιος όροφος)	79
2.38. Curve-fitting για τοπολογία οικίας (πολλαπλοί όροφοι)	79
3.1. Σύγκριση εμπειρικής CDF και Gaussian (dBm) για τοπολογία γραφείου (ίδιος όροφος)	88
3.2. Σύγκριση εμπειρικής CDF και Gaussian (dBm) για τοπολογία γραφείου (πολλαπλοί όροφοι)	88
3.3. Σύγκριση εμπειρικής CDF και Gaussian (dBm) για τοπολογία βιβλιοθήκης.....	89
3.4. Σύγκριση εμπειρικής CDF και Gaussian (dBm) για τοπολογία αεροδρομίου (AP1)	89
3.5. Σύγκριση εμπειρικής CDF και Gaussian (dBm) για τοπολογία αεροδρομίου (AP2)	90

3.6. Σύγκριση εμπειρικής CDF και Gaussian (dBm) για τοπολογία αεροδρομίου (AP3)	90
3.7. Σύγκριση εμπειρικής CDF και Gaussian (dBm) για τοπολογία οικίας (ίδιος όροφος)	91
3.8. Σύγκριση εμπειρικής CDF και Gaussian (dBm) για τοπολογία οικίας (πολλαπλοί όροφοι)	91
3.9. Τοπολογία γραφείου με βάθος σκίασης (ίδιος όροφος)	102
3.10. Τοπολογία γραφείου με βάθος σκίασης (διαφορά ενός ορόφου)	102
3.11. Τοπολογία γραφείου με βάθος σκίασης (διαφορά δύο ορόφων)	103
3.12. Τοπολογία βιβλιοθήκης με βάθος σκίασης.....	103
3.13. Σύγκριση μεθόδου Devasirvatham και βάθους σκίασης για τοπολογία γραφείου (ίδιος όροφος)	105
3.14. Σύγκριση μεθόδου Devasirvatham και βάθους σκίασης για τοπολογία γραφείου (πολλαπλοί όροφοι)	105
3.15. Σύγκριση μεθόδου Devasirvatham και βάθους σκίασης για τοπολογία βιβλιοθήκης.....	106
3.16. Curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss (AP1)	110
3.17. Curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss (AP2)	110
3.18. Curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss (AP3)	111
3.19. Curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss ως προς το λογάριθμο της απόστασης (AP1)	113
3.20. Curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss ως προς το λογάριθμο της απόστασης (AP2)	113
3.21. Curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss ως προς το λογάριθμο της απόστασης (AP3)	114
3.22. Curve-fitting της λαμβανόμενης ισχύος ως προς την απόσταση (AP1)	116
3.23. Curve-fitting της λαμβανόμενης ισχύος ως προς την απόσταση (AP2)	116
3.24. Curve-fitting της λαμβανόμενης ισχύος ως προς την απόσταση (AP3)	117
3.25. Curve-fitting της λαμβανόμενης ισχύος ως προς την απόσταση για τοπολογία οικίας (ίδιος όροφος)	119

3.26. Curve-fitting της λαμβανόμενης ισχύος ως προς την απόσταση για τοπολογία οικίας (πολλαπλοί όροφοι)	119
4.1. Πιθανότητα μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας για διάφορες τιμές του εκθέτη απωλειών οδεύσεως.....	131
4.2. Πιθανότητα αποκοπής για διάφορες τιμές του n ($\text{SNR} = -10 \text{ dB}$)	134
4.3. Πιθανότητα αποκοπής για διάφορες τιμές του n ($\text{SNR} = 0 \text{ dB}$)	134
4.4. Πιθανότητα αποκοπής για διάφορες τιμές του n ($\text{SNR} = 10 \text{ dB}$)	135
4.5. Πιθανότητα αποκοπής για διάφορες τιμές του n ($\text{SNR} = 20 \text{ dB}$)	135
4.6. Outage Probability versus Secrecy Rate για $n=2$ και μέσο $\text{SNR}=10 \text{ dB}$	140
4.7. Outage Probability vs Secrecy Rate για $n=2$ και μέσο $\text{SNR}=10 \text{ dB}$ (Taylor approx.)	140
4.8. Outage Probability vs Secrecy Rate για $n=3.8$ και μέσο $\text{SNR}=0 \text{ dB}$	142
4.9. Outage Probability vs Secrecy Rate για $n=3.8$ και μέσο $\text{SNR}=0 \text{ dB}$ (Taylor approx.)	142
4.10. Outage Secrecy Capacity για $n=2$ και μέσο $\text{SNR}=10 \text{ dB}$	143
4.11. Outage Secrecy Capacity για $n=3.8$ και μέσο $\text{SNR}=0 \text{ dB}$	143
4.12. Πιθανότητα μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας πριν και μετά την κίνηση του χρήστη για $\text{DRF}<1$	147
4.13. Πιθανότητα μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας πριν και μετά την κίνηση του χρήστη για $\text{DRF}>1$	147
4.14. Συσχετισμός κίνησης ωτακουστή και μείωσης πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας.....	149
4.15. Αποκοπή Χωρητικότητας Ασφαλείας πριν και μετά την κίνηση του ωτακουστή.....	150
4.16. PDF της πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας για παρουσία ενός ωτακουστή (προσομοίωση)	152
4.17. Τοπολογία μετρήσεων για τα OLOS σενάρια.....	153
4.18. Τοπολογία μετρήσεων για το NLOS σενάριο.....	153
4.19. PDF της πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας για παρουσία 4 ωτακουστών (προσομοίωση)	161

4.20. CDF της πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας για παρουσία 4 ωτακουστών (προσομοίωση)	161
4.21. Τιμές της $P(C_s > 0)$ για σενάριο πολλαπλών ωτακουστών.....	164
4.22. Εμπειρική CDF της πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας για παρουσία 4 ωτακουστών	166
4.23. Εμπειρική PDF της πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας για παρουσία 4 ωτακουστών	166
4.24. Data-fitting PDF των τιμών της $P(C_s > 0)$ για το SC σενάριο.....	167
4.25. Data-fitting PDF των τιμών της $P(C_s > 0)$ για το MRC σενάριο.....	167
4.26. Outage Probability vs. Secrecy Rate για την επανάληψη 1.....	169
4.27. Outage Probability vs. Secrecy Rate για την επανάληψη 2.....	170
4.28. Outage Probability vs. Secrecy Rate για την επανάληψη 3.....	170
4.29. Outage Probability vs. Secrecy Rate για την επανάληψη 4.....	171
4.30. Outage Probability vs. Secrecy Rate για την επανάληψη 5.....	171
4.31. Outage Probability vs. Secrecy Rate για την επανάληψη 6.....	172
4.32. Outage Probability vs. Secrecy Rate για την επανάληψη 7.....	172
4.33. Outage Probability vs. Secrecy Rate για την επανάληψη 8.....	173
4.34. Outage Probability vs. Secrecy Rate για την επανάληψη 9.....	173
4.35. Outage Probability vs. Secrecy Rate για την επανάληψη 10.....	174
4.36. Outage Probability vs. Secrecy Rate για την επανάληψη 11.....	174
4.37. Outage Probability vs. Secrecy Rate για την επανάληψη 12.....	175
4.38. Outage Probability vs. Secrecy Rate για την επανάληψη 13.....	175
4.39. Outage Probability vs. Secrecy Rate για την επανάληψη 14.....	176
4.40. Outage Probability vs. Secrecy Rate για την επανάληψη 15.....	176

Λίστα Πινάκων

1.1. Εκθέτης απωλειών οδεύσεως για διάφορα περιβάλλοντα ράδιο-διάδοσης.....	3
1.2. Τυπικές τιμές της παραμέτρου N και της απόκλισης σ (dB) για το μοντέλο λογαριθμικής απόστασης.....	6
1.3. Συντελεστής απωλειών N για το μοντέλο ITU.....	8
1.4. Συντελεστής απωλειών λόγω πατωμάτων για το μοντέλο ITU.....	8
1.5. Συνοπτική περιγραφή μοντέλων απωλειών οδεύσεως εσωτερικών χώρων.....	10
2.1. Σύγκριση προβλέψεων του μοντέλου MWF με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία (ίδιος όροφος)	27
2.2. Σύγκριση προβλέψεων του μοντέλου MWF με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία (διαφορά ενός ορόφου)	28
2.3. Σύγκριση προβλέψεων του μοντέλου MWF με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία (διαφορά δύο ορόφων)	28
2.4. Σύγκριση προβλέψεων των μοντέλων με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία.....	31
2.5. Σφάλματα των RF μοντέλων.....	32
2.6. Σύγκριση προβλέψεων των μοντέλων με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία (AP1)	35
2.7. Σύγκριση προβλέψεων των μοντέλων με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία (AP2)	37
2.8. Σύγκριση προβλέψεων των μοντέλων με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία (AP3)	38
2.9. Σύγκριση προβλέψεων των μοντέλων με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία (ίδιος όροφος)	41
2.10. Σύγκριση προβλέψεων των μοντέλων με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία (διαφορά ενός ορόφου)	43
2.11. Σφάλματα των RF μοντέλων.....	45
2.12. Σύγκριση προβλέψεων του μοντέλου ITU με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία (ίδιος όροφος)	47
2.13. Προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου ITU (ίδιος όροφος)	48
2.14. Προτεινόμενες τιμές του μοντέλου ITU (πολλαπλοί όροφοι)	51

2.15. Σύγκριση προβλέψεων προτεινόμενων μοντέλων ITU με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία (πολλαπλοί όροφοι)	51
2.16. Προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου ITU.....	52
2.17. Προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου ITU.....	53
2.18. Σύγκριση προβλέψεων αρχικού και προτεινόμενου μοντέλου ITU και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία.....	55
2.19. Προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου ITU.....	56
2.20. Εξασθένιση ανά απόσταση για περιβάλλον γραφείου (μετρήσεις ιδίου ορόφου).....	59
2.21. Εξασθένιση ανά απόσταση για περιβάλλον γραφείου (μετρήσεις πολλαπλών ορόφων)	60
2.22. Εξασθένιση ανά απόσταση για περιβάλλον αεροδρομίου.....	61
2.23. Μέση εξασθένιση ανά απόσταση για περιβάλλον αεροδρομίου.....	62
2.24. Εξασθένιση ανά απόσταση για περιβάλλον βιβλιοθήκης.....	62
2.25. Εξασθένιση ανά απόσταση για περιβάλλον οικίας (μετρήσεις ιδίου ορόφου)..	64
2.26. Εξασθένιση ανά απόσταση για περιβάλλον οικίας (μετρήσεις πολλαπλών ορόφων)	65
2.27. Μέση εξασθένιση ανά απόσταση για όλες τις τοπολογίες.....	66
2.28. Μέση εξασθένιση ανά απόσταση για όλες τις μεθόδους (τοπολογία γραφείου).....	69
2.29. Μέση εξασθένιση ανά απόσταση για όλες τις μεθόδους (τοπολογία βιβλιοθήκης)	70
2.30. Μέση εξασθένιση ανά απόσταση για όλες τις μεθόδους (τοπολογία αεροδρομίου, AP1)	70
2.31. Μέση εξασθένιση ανά απόσταση για όλες τις μεθόδους (τοπολογία αεροδρομίου, AP2)	71
2.32. Μέση εξασθένιση ανά απόσταση για όλες τις μεθόδους (τοπολογία αεροδρομίου, AP3)	71
2.33. Μέση εξασθένιση ανά απόσταση για όλες τις μεθόδους (τοπολογία αεροδρομίου, συγκεντρωτικά)	71

2.34. Curve-fitting για τοπολογία γραφείου (ίδιος όροφος)	72
2.35. Curve-fitting για τοπολογία γραφείου (πολλαπλοί όροφοι)	74
2.36. Curve-fitting για τοπολογία αεροδρομίου (AP1)	74
2.37. Curve-fitting για τοπολογία αεροδρομίου (AP2)	74
2.38. Curve-fitting για τοπολογία αεροδρομίου (AP3)	75
2.39. Curve-fitting για τοπολογία βιβλιοθήκης.....	77
2.40. Curve-fitting για τοπολογία οικίας (ίδιος όροφος)	78
2.41. Curve-fitting για τοπολογία οικίας (πολλαπλοί όροφοι)	78
3.1. Στατιστικές ιδιότητες λαμβανόμενης ισχύος	87
3.2. Απώλειες λόγω εμποδίων (τοπολογία γραφείου)	95
3.3. Απώλειες λόγω εμποδίων (τοπολογία βιβλιοθήκης)	95
3.4. Απώλειες λόγω εμποδίων (τοπολογία οικίας)	96
3.5. Μέσο σφάλμα μοντέλου MWF για κάθε τοπολογία με εμπόδια.....	96
3.6. Βάθος σκίασης (dB) για τοπολογία γραφείου (ίδιος όροφος)	97
3.7. Βάθος σκίασης (dB) για τοπολογία γραφείου (διαφορά 1 ορόφου)	98
3.8. Βάθος σκίασης (dB) για τοπολογία γραφείου (διαφορά 2 ορόφων)	98
3.9. Βάθος σκίασης (dB) για τοπολογία βιβλιοθήκης.....	99
3.10. Βάθος σκίασης (dB) για τοπολογία οικίας (ίδιος όροφος)	100
3.11. Βάθος σκίασης (dB) για τοπολογία οικίας (διαφορά 1 ορόφου)	101
3.12. Μέσο σφάλμα μοντέλου βάθους σκίασης σε σχέση με τις μετρήσεις για τον υπολογισμό της εξασθένησης ανά απόσταση.....	107
3.13. Αξιολόγηση curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss (AP1)..	109
3.14. Αξιολόγηση curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss (AP2)..	109
3.15. Αξιολόγηση curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss (AP3)..	109
3.16. Αξιολόγηση curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss ως προς το λογάριθμο της απόστασης (AP1)	112

3.17. Αξιολόγηση curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss ως προς το λογάριθμο της απόστασης (AP2)	112
3.18. Αξιολόγηση curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss ως προς το λογάριθμο της απόστασης (AP3)	112
3.19. Μεταβλητές μοντέλων για curve-fitting της λαμβανόμενης ισχύος ως προς την απόσταση (τοπολογία αεροδρομίου)	115
3.20. Αξιολόγηση curve-fitting της λαμβανόμενης ισχύος ως προς την απόσταση (AP1)	118
3.21. Αξιολόγηση curve-fitting της λαμβανόμενης ισχύος ως προς την απόσταση (AP2)	118
3.22. Αξιολόγηση curve-fitting της λαμβανόμενης ισχύος ως προς την απόσταση (AP3)	118
4.1. Πιθανότητα Αποκοπής για διάφορες τιμές του μέσου SNR του νόμιμου καναλιού και του εκθέτη απωλειών οδεύσεως.....	136
4.2. Υπολογισμός της πιθανότητας αποκοπής για $n=2$ και μέσο SNR=10 dB.	139
4.3. Μέσο σφάλμα (%) της προσέγγισης Taylor για $n=2$ και μέσο SNR=10 dB. ...	139
4.4. Υπολογισμός της πιθανότητας αποκοπής για $n=3.8$ και μέσο SNR=0 dB.	141
4.5. Μέσο σφάλμα (%) της προσέγγισης Taylor για $n=3.8$ και μέσο SNR=0 dB. ..	141
4.6. Τοπική μέση ισχύς και μέσο SNR για το OLOS-1 σενάριο.....	154
4.7. Τιμές της $P(C_s>0)$ για το OLOS-1 σενάριο.....	155
4.8. Τοπική μέση ισχύς και μέσο SNR για το OLOS-2 σενάριο.....	156
4.9. Τιμές της $P(C_s>0)$ για το OLOS-2 σενάριο.....	157
4.10. Τοπική μέση ισχύς και μέσο SNR για το NLOS σενάριο.....	158
4.11. Τιμές της $P(C_s>0)$ για το NLOS σενάριο.....	158
4.12. Τιμές μέσου SNR και της $P(C_s>0)$ για όλα τα σενάρια	159
4.13. Τιμές μέσου SNR για τους κινούμενους χρήστες.....	162
4.14. Πλήθος ‘ενεργών’ ωτακουστών σε κάθε επανάληψη του πειράματος.....	163
4.15. Στατιστική ‘ενεργών’ ωτακουστών.....	164
4.16. Τοπικές μέσες τιμές της $P(C_s>0)$ για τις πειραματικές επαναλήψεις.....	165
4.17. Μέση τιμή της $P(C_s>0)$ για το σύνολο των επαναλήψεων.....	165
4.18. Στατιστικές ιδιότητες των κατανομών που περιγράφουν την $P(C_s>0)$	168

Ακρωνύμια

AP Access Point

CDF Cumulative Distribution Function

DRF Distance Ratio Factor

FSL Free Space Model

HAP High Altitude Platforms

HUMO Human Mobility Model

ITU International Telecommunications Union

LDPC Low-density parity-check

LOS Line-of-Sight

MRC Maximal-Ratio Combining

MWF Multi-Wall-Floor

NGN next-generation networks

NLOS Non-Line-of-Sight

OLOS Obstructed-Line-of-Sight

OSL One-Slope Model

PDF Probability Density Function

RD Random Direction

RF Radio Frequency

RWP Random Way-Point

SC Selection Combining

SNR Signal-to-Noise Ratio

WITS Wireless Information-Theoretic Security

WLAN Wireless Local Area Networks

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή

1.1 Μοντελοποίηση Ασύρματου Διαύλου.....	1
1.1.1 Στοιχειοθέτηση του προβλήματος μοντελοποίησης ασύρματου διαύλου	1
1.1.2 Διάδοση H/M ακτινοβολίας στον ελεύθερο χώρο.....	1
1.1.3 Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (large-scale fading) λόγω σκίασης.....	4
1.1.4 Μοντέλα απωλειών οδεύσεως εσωτερικών χώρων.....	7
1.2 Τοπολογίες ράδιο-διάδοσης εσωτερικών χώρων.....	11
1.3 Ασφάλεια Φυσικού Επιπέδου.....	12
1.4 Διάρθρωση και Συνοπτική Συμβολή της Διατριβής.....	13

2 Μοντελοποίηση Ασύρματου Διαύλου σε περιβάλλοντα διαλείψεων

2.1 Εισαγωγή.....	15
2.1.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	15
2.1.2 Συμβολή και Επισκόπηση Κεφαλαίου.....	16
2.2 Αξιολόγηση των μοντέλων απωλειών οδεύσεως εσωτερικών χώρων βάσει μετρήσεων.....	18
2.2.1 Εισαγωγή	18
2.2.2 Διαδικασία μετρήσεων.....	18
2.2.2 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία γραφείου.....	20
2.2.3 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία βιβλιοθήκης.....	29

2.2.4 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία αεροδρομίου.....	33
2.2.5 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία οικίας.....	39
2.3 Αριθμητική διόρθωση του μοντέλου ITU για περιβάλλοντα εσωτερικών χώρων.....	46
2.3.1 Εισαγωγή.....	46
2.3.2 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία γραφείου.....	46
2.3.3 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία βιβλιοθήκης.....	52
2.3.4 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία αεροδρομίου.....	52
2.3.5 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία οικίας.....	56
2.4 Ποσοτικός και ποιοτικός προσδιορισμός της εξασθένησης ανά απόσταση για περιβάλλοντα εσωτερικών χώρων.....	57
2.4.1 Εισαγωγή.....	57
2.4.2 Εξασθένηση ανά απόσταση.....	57
2.4.3 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία γραφείου.....	59
2.4.4 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία αεροδρομίου.....	61
2.4.5 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία βιβλιοθήκης.....	62
2.4.6 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία οικίας.....	64
2.4.7 Μεθοδολογίες υπολογισμού της εξασθένησης ανά απόσταση.....	68
2.4.8 Χαρακτηρισμός της εξασθένησης ανά απόσταση.....	72
2.5 Συμβολή στη μοντελοποίηση ασύρματου καναλιού με διαλείψεις και σκίαση σε HAP δίκτυα με παρεμβολές.....	80
2.5.1 Εισαγωγή.....	80
2.5.2 Συμβολή στην μοντελοποίηση ασύρματου διαύλου HAP δικτύου.....	80
2.6 Σύνοψη κεφαλαίου.....	81

3 Ποσοτικός και ποιοτικός προσδιορισμός βάθους σκίασης και διαλείψεων μεγάλης κλίμακας για τοπολογίες ράδιο-διάδοσης

3.1 Εισαγωγή.....	83
3.1.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	83
3.1.2 Συμβολή και Επισκόπηση Κεφαλαίου.....	84
3.2 Χαρακτηρισμός των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας για τοπολογίες ράδιο-διάδοσης εσωτερικών χώρων.....	86
3.2.1 Εισαγωγή.....	86
3.2.2 Αριθμητικά αποτελέσματα.....	86
3.3 Καινοτόμος μέθοδος για τον υπολογισμό του βάθους σκίασης σε τοπολογίες με εμπόδια.....	93
3.3.1 Εισαγωγή.....	93
3.3.2 Αριθμητικά αποτελέσματα.....	93
3.4 Μεθοδολογία υπολογισμού της πλεονάζουσας απώλειας οδεύσεως (excess path loss)	104
3.4.1 Εισαγωγή.....	104
3.4.2 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογίες με εμπόδια.....	104
3.4.3 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία αεροδρομίου.....	108
3.5 Χαρακτηρισμός γεωγραφικής κατανομής των τοπικών μέσων τιμών της λαμβανόμενης ισχύος.....	115
3.5.1 Εισαγωγή.....	115
3.5.2 Αριθμητικά αποτελέσματα.....	115
3.6 Σύνοψη κεφαλαίου.....	120

4 Διερεύνηση της επίδρασης των χαρακτηριστικών του Ασύρματου Καναλιού στην Ασφάλεια Φυσικού Επιπέδου

4.1 Εισαγωγή.....	121
4.1.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	121
4.1.2 Συμβολή και Επισκόπηση Κεφαλαίου.....	122
4.2 Διερεύνηση της επίδρασης των απωλειών οδεύσεως του ασύρματου καναλιού στην WITS.....	123
4.2.1 Παραμετροποίηση WITS.....	123
4.2.2 Επίδραση των χαρακτηριστικών του ασύρματου διαύλου στην WITS.....	124
4.2.3 Αριθμητικά αποτελέσματα.....	129
4.3 Απόδοση Σχέσης Κλειστού Τύπου (Closed-Form) για την Outage Secrecy Capacity.....	137
4.3.1 Ορισμός.....	137
4.3.2 Αριθμητικά αποτελέσματα.....	137
4.4 Επίδραση της κινητικότητας των χρηστών στην Ασφάλεια Φυσικού Επιπέδου.....	144
4.4.1 Στοιχειοθέτηση προβλήματος.....	144
4.4.2 Μοντέλα Κινητικότητας (Mobility Models)	144
4.4.3 Αριθμητικά αποτελέσματα.....	146
4.5 Διερεύνηση των παραμέτρων WITS σε περιβάλλον με εμπόδια, διαλείψεις και παρεμβολές για σενάριο ενός ωτακουστή.....	151
4.5.1 Διερεύνηση επίδρασης εμποδίων στις παραμέτρους WITS.....	151

4.5.2 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης.....	151
4.5.3 Πειραματικά αριθμητικά αποτελέσματα	152
4.6 Διερεύνηση των παραμέτρων WITS σε περιβάλλον με εμπόδια, διαλείψεις και παρεμβολές για σενάριο πολλαπλών ωτακουστών.....	160
4.6.1 Σενάριο πολλαπλών ωτακουστών.....	160
4.6.2 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης.....	160
4.6.3 Πειραματικά αριθμητικά αποτελέσματα.....	162
4.7 Σύνοψη Κεφαλαίου.....	177
 5 Συμπεράσματα	
5.1 Ανακεφαλαίωση.....	179
5.2 Μελλοντικές προεκτάσεις.....	183
 Βιβλιογραφία.....	 185

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Μοντελοποίηση Ασύρματου Διαύλου

1.1.1 Στοιχειοθέτηση του προβλήματος μοντελοποίησης ασύρματου διαύλου

Το πρόβλημα της μοντελοποίησης του ασύρματου διαύλου συνίσταται σε ένα ολοένα και αυξανόμενο πλήθος παραμέτρων και ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και να ενσωματώνονται στα πλαίσια του RF σχεδιασμού (Radio-Frequency planning) ενός ασύρματου δικτύου εύρωστης παροχής υπηρεσιών. Πιο συγκεκριμένα, τόσο οι απώλειες μεγάλης κλίμακας που είναι ντετερμινιστικές ως προς την απόσταση πομπού – δέκτη και την φέρουσα συχνότητα, όσο και τα στοχαστικά φαινόμενα απωλειών και διαλείψεων, γίνονται όλο και πιο σύνθετα στο σύγχρονο περιβάλλον ράδιο-διάδοσης με συνύπαρξη πολλών διαφορετικών τεχνολογιών και δικτύων, ανάγκη για ευρύτερη, ταχύτερη και ασφαλέστερη συνδεσιμότητα.

1.1.2 Διάδοση H/M ακτινοβολίας στον ελεύθερο χώρο

Ο βασικός μηχανισμός ράδιο-διάδοσης περιγράφεται μαθηματικά από τον τύπο του Friis και βασίζεται στην φυσική αντίληψη της διάδοσης της H/M ακτινοβολίας ως μία ιδανική σφαίρα με διαρκώς αυξανόμενη ακτίνα στον χώρο. Η εξήγηση της απώλειας ισχύος σε συνδυασμό με την ανάγκη τήρησης της αρχής διατήρησης της ενέργειας έγκειται στο ότι αυτό το μοντέλο θεωρεί πως όσο αυξάνεται η ακτίνα αυτής της ιδανικής σφαίρας – δηλαδή η απόσταση από τον πομπό, που θεωρούμε ότι βρίσκεται στο κέντρο της ιδανικής σφαίρας, και τον δέκτη, που βρίσκεται επί της επιφάνειας της σφαίρας – μειώνεται η πυκνότητα ακτινοβολίας ανά μονάδα όγκου (J/m^3). Θεωρώντας την

ταχύτητα διάδοσης της H/M ακτινοβολίας (δηλαδή τον ρυθμό αύξησης της σφαίρας) ίση με την ταχύτητα του φωτός, τότε θεωρούμε πως ο ρυθμός αύξησης της σφαίρας οδηγεί σε μείωση της πυκνότητας ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας (W/m^2). Ως εκ τούτου, εξηγείται η εξασθένηση της ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος αναλογικά με το τετράγωνο της απόστασης (μονάδα επιφάνειας), που αποτελεί θεμέλιο λίθο του τύπου του Friis, ο οποίος στην λογαριθμική του μορφή διατυπώνεται ως εξής [1]:

$$PL(d) = 32.45 + 20 \log_{10} f (MHz) + 20 \log_{10} d (km) \quad (1.1)$$

Οι συντελεστές 20 στον λογάριθμο της απόστασης και της συχνότητας αντίστοιχα υποδηλώνουν μία σχέση του νόμου του «αντιστρόφου τετραγώνου» ανάμεσα στην μέση λαμβανόμενη ισχύ και την απόσταση αλλά και την συχνότητα. Η λογαριθμική διατύπωση του τύπου του Friis, γνωστή ευρύτερα και ως *μοντέλο ελεύθερου χώρου* (Free Space Model), υπολογίζει (σε dB) την μέση απώλεια (average path loss) συναρτήσει της απόστασης ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη (σε χλμ), την συχνότητα λειτουργίας του συστήματος. Γνωρίζοντας την μέση απώλεια οδούσεως και την ολική μεταδιδόμενη ισχύ από τον πομπό, μπορούμε να υπολογίσουμε (σε dBm) την μέση λαμβανόμενη ισχύ.

Ο παραπάνω τύπος εκφράζει την εξάρτηση της μέσης απώλειας οδούσεως από την απόσταση υπολογισμένη σε χιλιόμετρα. Πολλές φορές μας είναι πιο χρήσιμος ο τύπος που υπολογίζει την απώλεια οδούσεως σε σχέση με την απόσταση εκπεφρασμένη σε μέτρα (για παράδειγμα, σε συνθήκες μετάδοσης σε εσωτερικό περιβάλλον, ή όταν εξετάζουμε δίκτυα περιορισμένης εμβέλειας, πχ ένα δημοτικό Wi-Fi σε μία πλατεία μίας πόλης, όπως το δίκτυο του Δήμου Πατρέων στην πλ. Γεωργίου). Μία τέτοια σχέση δίδεται από την παρακάτω εξίσωση [2]:

$$L_{total} = PL(d_0) + N \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (1.2)$$

Όπου $P_{L_0}(dB)$ είναι η απώλεια οδούσεως για την απόσταση αναφοράς d_0 , η οποία θεωρείται ίση με 100 μέτρα ή 1 χλμ για περιβάλλοντα εξωτερικών χώρων και ίση με 1

μέτρο για περιβάλλοντα εσωτερικών χώρων, N ισούται με $10n$ όπου n είναι ο εκθέτης απωλειών οδεύσεως (path loss exponent) ο οποίος ισούται με 2 για το μοντέλο ελεύθερου χώρου (νόμος αντιστρόφου τετραγώνου). Η εξάρτηση από την συχνότητα εισέρχεται στον συντελεστή $PL(d_0)$ ο οποίος υπολογίζεται από την εξίσωση 1, θεωρώντας απόσταση ίση με την απόσταση αναφοράς d_0 .

Στον πίνακα 1.1 βλέπουμε ενδεικτικές τιμές του εκθέτη απωλειών οδεύσεως για διάφορα περιβάλλοντα ράδιο-διάδοσης.

Πίνακας 1.1. Εκθέτης απωλειών οδεύσεως για διάφορα περιβάλλοντα ράδιο-διάδοσης.

Περιβάλλον	Path loss exponent n
Αστικό macrocell	3.7-6.5
Αστικό microcell	2.7-3.5
Γραφείο (ίδιος όροφος)	1.6-3.5
Γραφείο (πολλαπλοί όροφοι)	2-6
Κατάστημα	1.8-2.2
Εργοστάσιο	1.6-3.3
Σπίτι	3

Η μέση λαμβανόμενη ισχύς αντιστοιχεί στις απώλειες μεγάλης κλίμακας (path loss, large-scale attenuation) που, όπως προαναφέρθηκε, εξαρτώνται από την απόσταση ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη (T-R separation) και την συχνότητα λειτουργίας του υπό εξέταση ασύρματου συστήματος. Επιπλέον, οι απώλειες αυτές δύνανται, σε πιο πολύπλοκα μοντέλα, να εξαρτώνται και από τις όποιες γεωγραφικές ιδιαιτερότητες και την ύπαρξη εμποδίων, καθώς και από τα ύψη των κεραιών εκπομπής και λήψης σήματος. Αξίζει να σημειωθεί πως το μοντέλο ελεύθερου χώρου θεωρεί αδιάστατες κεραίες, και γεωγραφική επιφάνεια χωρίς εμπόδια και ανωμαλίες [3].

1.1.3 Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (large-scale fading) λόγω σκίασης

Σε πραγματικές συνθήκες ράδιο-διάδοσης, εκτός από τις ντετερμινιστικές απώλειες λόγω απόστασης, συχνότητας, και γεωγραφικών ανωμαλιών και εμποδίων, συναντώνται και φαινόμενα διαλείψεων (fading) λόγω εμποδίων (obstruction) και πολύ-όδευσης (multipath) [4]. Διακρίνουμε αντίστοιχα τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (large-scale fading) και μικρής κλίμακας (small-scale fading). Οι διαλείψεις αυτές αφορούν την μεταβολή της στιγμιαίας τιμής του πλάτους του σήματος γύρω από την προαναφερθείσα μέση τιμή. Ως αποτέλεσμα αυτών των φαινομένων, η πραγματική στιγμιαία τιμή του πλάτους του σήματος δεν μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια, παρά μόνο μέσα σε ένα διάστημα τιμών που ορίζει η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function – PDF) που περιγράφει την κατανομή του πλάτους του σήματος γύρω από την εκάστοτε τοπική μέση τιμή (local mean value). Οι κατανομές που περιγράφουν στα φαινόμενα διαλείψεων μικρής κλίμακας λόγω πολύ-όδευσης εκφράζουν μία πιο ταχεία μεταβολή στο πλάτος του σήματος (κλίμακα ms) από ό,τι οι κατανομές για τα φαινόμενα διαλείψεων μεγάλης κλίμακας λόγω σκίασης (κλίμακα sec ή λεπτών – σε περιπτώσεις μόνιμων εμποδίων σκίασης και κλίμακα ωρών) [5].

Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας της λαμβανόμενης ισχύος, δηλαδή το σύνολο των τοπικών μέσων τιμών της λαμβανόμενης ισχύος, σε μία δεδομένη περιοχή ράδιο-διάδοσης, ακολουθούν την log-normal κατανομή, η σ.π.π της οποίας δίδεται από την σχέση [6]:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (1.3)$$

Όπου x είναι η λογαριθμική τιμή της λαμβανόμενης ισχύος σε κάθε σημείο μέτρησης (τοπική μέση ισχύς), $\bar{x}$ είναι η μέση λαμβανόμενη ισχύς (λογαριθμική τιμή) για το σύνολο των σημείων μέτρησης (ολική μέση ισχύς, area-mean value), και σ είναι η κανονική απόκλιση (standard deviation) των απωλειών σκίασης (shadowing losses) σε dB.

Η μέση τιμή και η κανονική απόκλιση των τοπικών μεταβολών της μέσης λαμβανόμενης ισχύος μπορούν να υπολογιστούν από ένα σύνολο πειραματικά καταγεγραμμένων τιμών από τις σχέσεις [1]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.4)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (1.5)$$

Ένας μεγάλος αριθμός δειγμάτων είναι αναγκαίος για αξιόπιστα αποτελέσματα [1].

Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας της λαμβανόμενης ισχύος αποδίδονται σε απώλειες λόγω εμποδίων οι διαστάσεις των οποίων είναι σημαντικά μεγαλύτερες από το μήκος κύματος της μεταδιδόμενης H/M ακτινοβολίας. Η κανονική απόκλιση, γνωστή και ως απόκλιση σκίασης (shadowing deviation) ή βάθος σκίασης (shadow depth), ορίζεται από τον Jakes ως «η διαφορά (σε decibels) ανάμεσα στην υπολογισθείσα τιμή της λαμβανόμενης έντασης του σήματος στον ελεύθερο χώρο και την πραγματική μετρηθείσα τιμή της τοπικής μέσης τιμής του λαμβανόμενου σήματος» [6].

Όταν οι απώλειες λόγω σκίασης οφείλονται σε μόνιμα εμπόδια, η επίδραση των οποίων στην εξασθένηση του σήματος για ορισμένη θέση του πομπού και του δέκτη υπερβαίνει την χρονική κλίμακα των δευτερολέπτων ή των λεπτών, τότε οι απώλειες αυτές δύνανται να συνυπολογισθούν στις απώλειες ελεύθερου χώρου και με βάση τον ορισμό του Jakes, το βάθος σκίασης να υπολογισθεί εντός του μοντέλου απωλειών οδεύσεως.

Η μαθηματική έκφραση του *μοντέλου λογαριθμικής απόστασης* (Log-Distance path loss model) δίδεται από την σχέση [1]:

$$L_{total} = PL(d_0) + N \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma} \quad (1.6)$$

Όπου $PL(d_0)$ είναι οι απώλειες οδεύσεως για την απόσταση αναφοράς (όπως και στο μοντέλο ελεύθερου χώρου, η απόσταση αναφοράς λαμβάνεται ίση με 1 μέτρο για περιβάλλοντα εσωτερικών χώρων), N είναι ο εκθέτης απωλειών οδεύσεως (x10), και X_{σ}

μία Gaussian τυχαία μεταβλητή με μηδενική μέση τιμή και κανονική απόκλιση ίση με σ dB. Τα N and σ υπολογίζονται από εμπειρικά δεδομένα (μετρήσεις).

Θεωρώντας ποσοστό κάλυψης ίσο με 95% (sub-optimal σενάριο), η σχέση ανάμεσα στην Gaussian τυχαία μεταβλητή και την απόκλιση σκίασης ισούται με [4]:

$$X_{\sigma} = z \times \sigma(dB) = 1.645 \times \sigma(dB) \quad (1.7)$$

Το βασικό μειονέκτημα του μοντέλου λογαριθμικής απόστασης συνίσταται στην ανάγκη προσδιορισμού δύο παραμέτρων (εκθέτης απωλειών οδεύσεως και βάθος σκίασης). Επειδή και οι δύο αυτές παράμετροι προσδιορίζονται από πειραματικά δεδομένα, αλλά αναφέρονται αμφότερες σε απώλειες διάδοσης, η βέλτιστη απόδοση τιμών δεν αφορά μόνο την ποσοτική αντιστοίχιση του μοντέλου λογαριθμικής απόστασης στις μετρηθείσες πειραματικές τιμές της λαμβανόμενης ισχύος, αλλά και στην ποιοτική ερμηνεία των απωλειών οδεύσεως και των συγκεκριμένων μηχανισμών που τις προκαλούν. Στον πίνακα 1.2 διακρίνονται τυπικές τιμές της παραμέτρου N και της απόκλισης σ (dB) για το μοντέλο λογαριθμικής απόστασης.

Πίνακας 1.2. Τυπικές τιμές της παραμέτρου N και της απόκλισης σ (dB) για το μοντέλο λογαριθμικής απόστασης.

Τύπος Κτιρίου	Συχνότητα(MHz)	N	σ (dB)
Μικρό Κατάστημα	914	22	8.7
Μανάβικο	914	18	5.2
Γραφείο (Τοίχοι)	1500	30	7.0
Σπίτι	2000	30	6/12
Γραφείο(Ψευδότοιχοι)	1900	26	14.1
Υφασμα/Χημικές Ουσίες	1300	20	3.0
Υφασμα/Χημικές Ουσίες	4000	21	7.0/9.7
Χαρτί	1300	18	6.0
Μέταλλο	1300	16/33	5.8/6.8

Βασική προϋπόθεση για μία ορθολογική ποσοτικοποίηση του προβλήματος των απωλειών οδεύσεως αποτελεί η πληρέστερη καταγραφή και διερεύνηση της επίδρασης των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών (intrinsic characteristics) των τοπολογιών ράδιο-διάδοσης στην εξασθένηση της μεταδιδόμενης H/M ακτινοβολίας [5].

1.1.4 Μοντέλα απωλειών οδεύσεως εσωτερικών χώρων

Ορισμένα από τα πλέον διαδεδομένα και ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα απωλειών οδεύσεως εσωτερικών χώρων είναι το μοντέλο της ITU (International Telecommunications Union) και το μοντέλο Multi-Wall-Floor (MWF). Το πρώτο αποτελεί κλασική περίπτωση site-general μοντέλου, θεωρητικά προσδιορισμένου μοντέλου που επαληθεύεται μέσα από πειραματικές μετρήσεις, ενώ το MWF μοντέλο αποτελεί τον ορισμό του site-specific μοντέλου, που αντλεί την μαθηματική του υπόσταση από τα δεδομένα και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της εκάστοτε τοπολογίας.

Το μοντέλο της ITU για διάδοση σε κλειστούς χώρους δίνεται από τον τύπο [4]:

$$P_L = 20 \log_{10}(f) + N \log_{10}(d) + Lf(n) - 28dB \quad (1.8)$$

Όπου:

N είναι ο συντελεστής απωλειών (slope factor) σε σχέση με την απόσταση

f είναι η συχνότητα σε MHz

d είναι η απόσταση σε μέτρα ($d > 1m$)

Lf(n) είναι ο παράγοντας απωλειών λόγω της διείσδυσης πατωμάτων

n είναι ο αριθμός των πατωμάτων ανάμεσα σε πομπό και δέκτη.

Οι πίνακες που ακολουθούν, δίνουν τις τιμές που δίνονται από την ITU σχετικά με τον συντελεστή απωλειών σε σχέση με την απόσταση (N), καθώς και για τον παράγοντα απωλειών λόγω της διείσδυσης πατωμάτων [4]:

Το ITU μοντέλο μπορεί να παρουσιαστεί ως ισοδύναμο προς το FSL με τον παράγοντα απωλειών απόστασης να είναι ίσος με $N=20$ (όταν το σήμα δεν διέρχεται από πατώματα). Έτσι βλέπουμε πως ουσιαστικά το μοντέλο που παρουσιάζουμε εδώ είναι ένα τροποποιημένο power law model.

Πίνακας 1.3. Συντελεστής απωλειών N για το μοντέλο ITU

Frequency	Residential	Office	Commercial
900MHz	-	33	20
1.2–1.3GHz	-	32	22
1.8–2GHz	28	30	22
4GHz	-	28	22
5.2GHz	-	31	-
60GHz ^a	-	22	17

^a 60 GHz is assumed to be in the same room.

Πίνακας 1.4. Συντελεστής απωλειών λόγω πατωμάτων για το μοντέλο ITU

Frequency	Residential	Office	Commercial
900MHz	—	9 ($n = 1$)	—
>>		19 ($n = 2$)	
		24 ($n = 3$)	
1.8–2GHz	4n	15 + 4($n - 1$)	6 + 3($n - 1$)
5.2GHz	—	16 ($n = 1$ only)	—

n is the number of floors penetrated ($n \geq 1$).

Το Multi-Wall-Floor (MWF) μοντέλο θεωρεί ότι οι τοίχοι και τα πατώματα αποτελούν παραμέτρους στο OLOS (Obstructed Line-Of-Sight) μονοπάτι.

Έχουμε λοιπόν [7]:

$$L = L_0 + 10n \log_{10}(d) + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^{K_{wi}} L_{wik} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{K_{fj}} L_{fjk} \quad (1.9)$$

Όπου:

I, J πλήθος τύπων τοίχων και πατωμάτων

L_{wik} απώλειες λόγω k-οστού τοίχου τύπου i

L_{fjk} απώλειες λόγω k-οστού πατώματος τύπου j

K_{wi} αριθμός διερχόμενων τοίχων τύπου i

K_{fj} αριθμός διερχομένων πατωμάτων τύπου j

Το MWF μοντέλο θεωρεί πως η ολική απώλεια οδεύσεως αποτελεί το λογαριθμικό άθροισμα δύο ανεξάρτητων μεταξύ τους διαδικασιών ράδιο-διάδοσης: των απωλειών ελευθέρου χώρου και των απωλειών που οφείλονται σε τοίχους και πατώματα που παρεμβάλλονται στο μονοπάτι οδεύσεως ανάμεσα στον πομπό και στο δέκτη. Σύμφωνα με το μοντέλο MWF, διαφορετικοί τύποι υλικών σε τοίχους και πατώματα οδηγούν σε διαφορετικές απώλειες για δεδομένη συχνότητα λειτουργίας.

Το MWF μοντέλο θεωρεί πως καθώς αυξάνεται το πλήθος των εμποδίων ιδίου τύπου, μειώνεται η απώλεια που προκαλείται στην H/M ακτινοβολία [7]. Αυτό αποτελεί μία διαφοροποίηση από το μοντέλο Motley-Keenan [8], το οποίο θεωρεί αμετάβλητες τις απώλειες κάθε εμποδίου ανεξαρτήτως του πλήθους των εμποδίων του ιδίου τύπου.

Συνοψίζοντας στον πίνακα 1.5 για τα μοντέλα απωλειών οδεύσεως εσωτερικών χώρων, έχουμε τα εξής:

Πίνακας 1.5. Συνοπτική περιγραφή μοντέλων απωλειών οδεύσεως εσωτερικών χώρων

ΜΟΝΤΕΛΑ	ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
Ελεύθερου χώρου	Το μοντέλο ελεύθερου χώρου αποτελεί τα βασικό θεωρητικό μοντέλο για τον υπολογισμό της απώλειας οδεύσεως. Θεωρούμε ιδανική περιοχή χωρίς γεωγραφικούς περιορισμούς και εμπόδια α όλα τα υπόλοιπα. Αποτελεί μοντέλο αναφοράς για όλα τα υπόλοιπα
One-Slope Model	Το μοντέλο αυτό υποθέτει μια γραμμική σχέση μεταξύ του Path Loss και της λογαριθμικής απόστασης
The Log-Distance Path Loss Model	Το μοντέλο αυτό υποθέτει μια γραμμική σχέση μεταξύ του Path Loss και της λογαριθμικής απόστασης και συνυπολογίζει τις απώλειες λόγω φαινομένων σκίασης
Ray Tracing	Μοντέλο πολλών επιβατικών ακτίνων, χρήσιμο τόσο για outdoor όσο και για indoor propagation. Όσο πιο πολλές ακτίνες χρησιμοποιούμε στην προσομοίωση, τόσο πιο αξιόπιστο καθίσταται το μοντέλο. Συνήθως γίνεται χρήση 8 επιβατικών ακτίνων.
ITU Indoor Path Loss Model	Πρόκειται για μοντέλο που στηρίζεται στην απώλεια ισχύος σε σχέση με την απόσταση πομπού-δέκτη και τη συχνότητα λειτουργίας χρησιμοποιώντας επιπλέον δείκτες για τον αριθμό των πατωμάτων.
To MFW model	Το μοντέλο αυτό, υπολογίζει το αυξανόμενο Path Loss ανάλογα με τον αριθμό και το είδος των επιπέδων που διαπερνά το σήμα.
To Motley-Keenan μοντέλο	Αποτελεί πρόιμη μορφή του ανωτέρου. Υπολογίζει τις απώλειες διείσδυσης από πατώματα και τοίχους ανάλογα με το υλικό και το πάχος τους, θεωρώντας τα σταθερά, χωρίς να μας ενδιαφέρει αν έχουν προηγηθεί άλλοι τοίχοι ή πατώματα.

1.2 Τοπολογίες ράδιο-διάδοσης εσωτερικών χώρων

Το αυξημένο πλήθος και η πολυμορφία των εμποδίων σε ένα περιβάλλον εσωτερικού χώρου καθιστούν την μελέτη της τοπολογίας από πλευράς RF σχεδιασμού πιο σύνθετη από ό,τι μία τοπολογία εξωτερικού χώρου. Αντικείμενα που οι διαστάσεις τους είναι συγκρίσιμες με το μήκος κύματος της μεταδιδόμενης H/M ακτινοβολίας προκαλούν σκέδαση σήματος (signal scattering) [1], αυξάνοντας την πολυπλοκότητα του χαρακτηρισμού του ασύρματου καναλιού (wireless channel characterization).

Επιπρόσθετα, περαιτέρω εξασθένηση υπεισέρχεται από τις απορροφήσεις σε τοίχους και πατώματα, ενώ ταυτόχρονα έχουμε και φαινόμενα ανακλάσεων [6].

Είναι εμφανές ότι ο χαρακτηρισμός του ασύρματου καναλιού για τοπολογίες εσωτερικών χώρων προϋποθέτει κάτι περισσότερο από μία ντετερμινιστική εξίσωση που υπολογίζει τις απώλειες οδεύσεως ελεύθερου χώρου συναρτήσει της απόστασης πομπού-δέκτη και της συχνότητας. Ένα αξιόπιστο μοντέλο απωλειών σε μία τέτοια περίπτωση απαιτεί τον συνυπολογισμό των απωλειών λόγω των διάφορων μηχανισμών διάδοσης και εξασθένησης της H/M ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένων, όπως προαναφέρθηκε, των εμποδίων, των τοίχων, των πατωμάτων αλλά και των φαινομένων σκίασης λόγω ανθρώπινης παρεμβολής, φαινόμενο ευρύτερα γνωστό ως “human body shadowing” [9].

Για την βέλτιστη μοντελοποίηση του ασύρματου καναλιού σε μία δεδομένη τοπολογία ραδιο-διάδοσης, απαιτείται καταρχάς η διερεύνηση της αξιοπιστίας των μοντέλων απωλειών οδεύσεως χωρίς την παρουσία ανθρώπινης παρεμβολής, και εν συνεχεία η μελέτη των επιπλέον απωλειών σε συνθήκες έντονης ανθρώπινης παρουσίας, που θα έχει ως αποτέλεσμα τον προσδιορισμό της κατανομής των διαλείψεων του πλάτους του λαμβανόμενου σήματος λόγω ανθρώπινης παρεμβολής [9].

1.3 Ασφάλεια Φυσικού Επιπέδου

Κατά τις τρεις τελευταίες δεκαετίες, διάφορες τεχνικές κρυπτογράφησης υψηλού επιπέδου έχουν προταθεί και αναπτυχθεί προκειμένου να εγγυηθούν την ασφαλή επικοινωνία μέσω ασύρματης σύνδεσης. Η ανάπτυξη των διαφόρων ειδών ασύρματων δικτύων ωστόσο, και κυρίως η εμφάνιση των ad-hoc δικτύων, ανοίγει το δρόμο για την αναβίωση αποκεντρωμένων λύσεων για σενάρια ασύρματης σύνδεσης. Ακόμη περισσότερο δε, η σύγκλιση πολλών διαφορετικών ασύρματων δικτύων προς μια πλατφόρμα συνεργασίας και διαλειτουργικότητας (που είναι μεταξύ των πρωταρχικών στόχων της επικείμενης τεχνολογίας 4G), θέτει τις βάσεις για μια εντελώς νέα φιλοσοφία σχεδιασμού του δικτύου. Το μέλλον της αρχιτεκτονικής ετερογενών συνεργαζόμενων δικτύων, επιβάλλει την ανάγκη να επανεξεταστούν οι στρατηγικές για την παροχή λύσεων για πολλά κρίσιμα θέματα, συμπεριλαμβανομένου του πολυσυζητημένου προβλήματος της ασφάλειας των ασύρματων επικοινωνιών.

Σε ένα τέτοιο πολύπλοκο σενάριο ασύρματης σύνδεσης, πολλά δίκτυα διαφορετικής αρχιτεκτονικής και σχεδιασμού συν-υπάρχουν σε ένα ασύρματο περιβάλλον που χαρακτηρίζεται από εξασθένηση και άλλες διαλείψεις λόγω τυχαία στοχαστικών διαδικασιών. Είναι η αποκεντρωμένη φύση των επιμέρους δικτύων (η πιθανή ύπαρξη ενός δικτύου ad-hoc), αλλά και η φύση του περιβάλλοντος διαλειτουργικότητας στο σύνολό του, που καθιστά την καθιερωμένη επί δεκαετίες μεθόδους κρυπτογράφησης του στρώματος εφαρμογής, ακατάλληλη για τέτοια σενάρια. Ταυτόχρονα, η συσσωρευμένη εμπειρία και ανάλυση των ιδιαίτερων φαινομένων του ασύρματου καναλιού, φανερώνει ένα σύνολο χαρακτηριστικών και δυνατοτήτων για την οποία οι σημερινές μέθοδοι κρυπτογράφησης είναι ανεπαρκείς. Για τους λόγους αυτούς, είναι απαραίτητο να επεκταθεί περαιτέρω η έρευνα πάνω στην έννοια των ασφαλών ασύρματων επικοινωνιών, έτσι ώστε να διατηρηθούν στο φυσικό επίπεδο καθώς και, με έναν τρόπο που θα αποδειχθεί άκρως χρήσιμη για την επίτευξη μιας απόλυτα ασφαλούς επικοινωνίας σε ένα ασύρματο κανάλι. Σε μια τέτοια κατεύθυνση, η μέθοδος της Ασφάλειας Φυσικού Επιπέδου (Wireless Information-Theoretic Security, WITS), πρέπει να σχεδιαστεί και να αναπτυχθεί σε βάθος, στο εγγύς μέλλον – της εποχής της επερχόμενης τεχνολογίας 4G.

1.4 Διάρθρωση και Συνοπτική Συμβολή της Διατριβής

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή διαρθρώνεται ως εξής:

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται διεξοδικά οι τοπολογίες ράδιο-διάδοσης εσωτερικών χώρων που εξετάστηκαν κατ' αντιστοιχία με την κατηγοριοποίηση των εσωτερικών τοπολογιών της ITU. Καταγράφεται η μεθοδολογία πραγματοποίησης των μετρήσεων για τα υφιστάμενα δίκτυα 802.11g που μελετήθηκαν και παρουσιάζεται η αξιολόγηση των πλέον διαδεδομένων μοντέλων απωλειών οδεύσεως για τα 2.4 GHz. Αναλύονται οι ανακρίβειες των μοντέλων και συσχετίζονται με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε τοπολογίας και τον επικρατούντα κάθε φορά μηχανισμό εξασθένησης σήματος. Στη βάση αυτών των ευρημάτων πραγματοποιείται η αριθμητική διόρθωση του μοντέλου ITU που είναι ένα θεωρητικό, site-general μοντέλο που πλέον, μετά την επαλήθευση της αξιοπιστίας των προτεινόμενων διορθώσεών μας, μπορεί να αποτελέσει μία εναλλακτική απέναντι στο μοντέλο MWF που αναδείχτηκε ως το πλέον αξιόπιστο μοντέλο απωλειών οδεύσεως. Επίσης, υπολογίστηκε αναλυτικά για κάθε τοποθεσία η εξασθένηση ανά απόσταση και προσδιορίστηκε η φύση της γεωγραφικής διασποράς των τιμών της εντός έκαστης τοπολογίας. Τέλος, στα πλαίσια μίας ευρύτερης συνεργασίας για μελέτη αστερισμού HAPs (High Altitude Platforms), προτάθηκε η μοντελοποίηση του ασύρματου διαύλου ανάμεσα στις πλατφόρμες και τους χρήστες εδάφους που υποθέτει απώλειες σκίασης log-normal φύσεως και διαλείψεις τύπου Rayleigh, θεωρώντας δηλαδή δυσμενές σενάριο απώλειας επαφής οπτικής ζεύξης (Line-of-Sight, LOS).

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται μία καινοτόμος μέθοδος για τον υπολογισμό του βάθους σκίασης (απόκλιση σκίασης) από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε τοπολογίας με εμπόδια, δηλαδή απευθείας από τις απώλειες σκίασης των εμποδίων των οποίων οι διαστάσεις είναι συγκριτικά μεγαλύτερες από το μήκος κύματος της H/M ακτινοβολίας. Η μέθοδος αυτή δεν απαιτεί εκτεταμένες μετρήσεις στην τοπολογία υπό εξέταση. Αντιθέτως, χρειαζόμαστε μονάχα τις απώλειες των εμποδίων κάθε τύπου, και οι μόνες μετρήσεις αφορούν στον εμπειρικό προσδιορισμό αυτών των απωλειών. Η μέθοδος αυτή

δεν αφορά μόνο στους τοίχους και τα πατώματα, όπως το ούτως ή άλλως αξιόπιστο μοντέλο MWF αλλά επεκτείνεται σε κάθε εμπόδιο που μπορεί να επιφέρει εξασθένηση σήματος και να συνεισφέρει στις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας. Η μέθοδος αυτή δεν αναιρεί το ότι οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας ακολουθούν γενικά την log-normal κατανομή, αντιθέτως, είναι στη βάση αυτής της διαπίστωσης που επιτρέπει τον προσδιορισμό και υπολογισμό της πλεονάζουσας απώλειας οδεύσεως (excess path loss) όχι ως «περίσσειμα» των απωλειών ελεύθερου χώρου, αλλά ως ανεξάρτητη διαδικασία απωλειών που για τοπολογίες με εμπόδια μπορεί, σύμφωνα τα ευρήματά μας να συσχετιστεί και με το βάθος σκίασης, και ως εκ τούτου να είναι επίσης log-normal φύσεως. Για τις τοπολογίες όπου ο βασικός μηχανισμός ράδιο-διάδοσης δεν είναι οι απώλειες σκίασης λόγω εμποδίων αλλά οι ανακλάσεις, οι απώλειες ελεύθερου χώρου και φαινόμενα πολύ-όδευσης, παρουσιάζονται και αξιολογούνται μία σειρά από προσεγγιστικές μέθοδοι στη βάση συναρτήσεων curve-fitting.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται η λύση της Ασφάλειας Φυσικού Επιπέδου (Wireless Information-Theoretic Security, WITS) που επιδιώκει να αποτελεί συμπληρωματική λύση προς την κρυπτογραφία ανωτέρου επιπέδου ή και αυτόνομη λύση, ιδιαίτερα σε αυτόνομα δίκτυα. Παρουσιάζεται η μέθοδος και οι βασικές της παράμετροι και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι καινοτόμες συνεισφορές μας στη διερεύνηση της επίδρασης των ρεαλιστικών απωλειών οδεύσεων ενός ασύρματου διαύλου με εμπόδια και διαλείψεις στα όρια των τιμών των παραμέτρων της WITS. Επίσης παρουσιάζεται για πρώτη φορά σε κλειστή μορφή η παράμετρος της Αποκοπής Χωρητικότητας Ασφαλείας (Outage Secrecy Capacity) και επαληθεύεται η ακρίβεια της μεθόδου μας για ρεαλιστικές τιμές των εμπλεκόμενων παραμέτρων. Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση της κινητικότητας των χρηστών στην βιωσιμότητα της μεθόδου. Τέλος, εξετάζονται, σε επίπεδο προσομοιώσεων αλλά και με πειραματικές μετρήσεις σε πραγματικό περιβάλλον με εμπόδια και διαλείψεις, τα όρια τιμών των παραμέτρων της WITS υπό την παρουσία ενός ωτακουστή, και εν συνεχεία σε καθεστώς πολλαπλών ωτακουστών.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται η ανακεφαλαίωση της Διατριβής με τα βασικά συμπεράσματα και σκιαγραφείται η άμεση μελλοντική ερευνητική δραστηριότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Μοντελοποίηση Ασύρματου Διαύλου σε περιβάλλοντα διαλείψεων

2.1 Εισαγωγή

2.1.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στα πλαίσια του χαρακτηρισμού του ασύρματου καναλιού (wireless channel characterization), διάφορα μοντέλα απωλειών οδεύσεως έχουν αναπτυχθεί και αξιολογηθεί μέσα από μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί. Η συντριπτική πλειοψηφία των εργασιών αυτών όμως είτε αφορά σε συχνότητες κινητής τηλεφωνίας διαφόρων γενιών, είτε αφορά μεν σε υψηλότερες συχνότητες αλλά επικεντρώνεται κυρίως σε φαινόμενα διαλείψεων μικρής κλίμακας (small-scale fading) λόγω πολύ-όδευσης [10-19]. Εκτός αυτού απουσιάζει μία συγκριτική, εκτεταμένη αντιπαραβολή των μοντέλων απωλειών οδεύσεως για συχνότητες υψηλού ενδιαφέροντος όπως πχ τα 2.4 GHz.

Στα πλαίσια της εργασίας μας επικεντρώνουμε σε τοπολογίες εσωτερικού χώρου και πιο συγκεκριμένα στα 2.4 GHz καθότι οι τοπολογίες εσωτερικών χώρων αποτελούν πεδίο πολλών εφαρμογών και θα αφορούν και στο μέλλον στο σχεδιασμό και στην υλοποίηση των δικτύων επόμενης γενιάς (next-generation networks, NGN), ενώ η συχνότητα των 2.4 GHz είναι κομβικής σημασίας, όχι μόνο για τα ισχύοντα WLANs (Wireless Local Area Networks), αλλά και για μελλοντικά δίκτυα, πχ 4G. Εκτός αυτού το περιβάλλον εσωτερικής διάδοσης προσφέρει σωρεία εμποδίων και ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που επιδρούν καθοριστικά στην εξασθένηση σήματος και χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης και μοντελοποίησης.

2.1.2 Συμβολή και Επισκόπηση Κεφαλαίου

Η συμβολή του κεφαλαίου συνίσταται στα εξής καινοτόμα αποτελέσματα:

- Στην ενότητα 2.2 παρουσιάζεται η αναλυτική αξιολόγηση των μοντέλων απωλειών οδεύσεως για τέσσερις χαρακτηριστικές τοπολογίες εσωτερικών χώρων (γραφείο, οικία, βιβλιοθήκη, αεροδρόμιο) με σύνθετο περιβάλλον ράδιο-διάδοσης, με διαλείψεις μεγάλης κλίμακας και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά σε κάθε περίπτωση. Τα μοντέλα αξιολογούνται σε σχέση με τις ληφθείσες μετρήσεις και αντιπαραβάλλονται συγκριτικά ως προς το μέσο σφάλμα τους. Παράλληλα διερευνάται ο ρόλος του επικρατούντος μηχανισμού εξασθένησης σήματος σε κάθε περίπτωση στην δυνατότητα πρόβλεψης των μοντέλων. Οι μετρήσεις αφορούν και σε σενάρια πολλαπλών ορόφων, όπου δηλαδή ο πομπός και ο δέκτης δεν βρίσκονται στον ίδιο όροφο, ενώ έχουν πραγματοποιηθεί με τέτοιο τρόπο που εξαλείφονται τα φαινόμενα διαλείψεων μικρής κλίμακας με averaging για αποστάσεις ίσες με δέκα μήκη κύματος γύρω από το εκάστοτε σημείο μέτρησης και χωρίς την παρουσία κόσμου που θα προσέθετε ‘ανθρώπινη σκίαση’.
- Στην ενότητα 2.3 παρουσιάζεται για πρώτη φορά μία αριθμητική διόρθωση του μοντέλου ITU στη βάση των πραγματοποιηθέντων μετρήσεων. Καθώς οι αρχικές συστάσεις του μοντέλου ITU για όλες σχεδόν τις εξετασθείσες περιπτώσεις ράδιο-διάδοσης αποδείχτηκαν αναξιόπιστες, προχωρήσαμε σε προτεινόμενες διορθώσεις οι οποίες διερευνήθηκαν για την αξιοπιστία τους η οποία επαληθεύτηκε τόσο σε σχέση με την ακρίβεια του αρχικού μοντέλου ITU όσο και σε σύγκριση με τα άλλα μοντέλα για την εκάστοτε τοπολογία. Καταφέραμε έτσι να μετατρέψουμε το μοντέλο ITU σε μία εναλλακτική, on-the-fly λύση απέναντι στο μοντέλο MWF.

- Στην ενότητα 2.4 παρουσιάζεται ένας ολοκληρωμένος ποσοτικός και ποιοτικός προσδιορισμός της εξασθένησης ανά απόσταση, που αποτελεί κρίσιμη παράμετρο στον υπολογισμό των μέσων απωλειών οδεύσεως σε μία τοποθεσία αλλά και στην αξιολόγηση των μηχανισμών ράδιο-διάδοσης. Υπολογίζεται αναλυτικά η τιμή της παραμέτρου για το σύνολο των τοποθεσιών σε κάθε τοπολογία, προτείνονται δύο εναλλακτικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της παραμέτρου ως προς τον διαχωρισμό απωλειών ελευθέρου χώρου και πλεοναζουσών απωλειών οδεύσεως (excess path loss) – κατά τον κλασικό ορισμό του Jakes – και εν τέλει μελετάται η προσέγγιση της γεωγραφικής διασποράς των τιμών της εξασθένησης ανά απόσταση εντός κάθε τοπολογίας μέσα από κλασικές συναρτήσεις curve-fitting.
- Στην ενότητα 2.5 διερευνάται η μοντελοποίηση του ασύρματου καναλιού σε δίκτυα HAPs αν θεωρήσουμε worst-case σενάριο με διαλείψεις Rayleigh (απουσία οπτικής επαφής ανάμεσα στις πλατφόρμες και τους χρήστες εδάφους) και ταυτόχρονα φαινόμενα σκίασης που ακολουθούν την κλασική log-normal κατανομή στα πλαίσια συμβολής σε εργασίες που εξέτασαν ουσιαστικά το μοντέλο Suzuki στα πλαίσια διερεύνησης των παρεμβολών και της αποδοτικότητας αστερισμού HAPs.

2.2 Αξιολόγηση των μοντέλων απωλειών οδεύσεως εσωτερικών χώρων βάσει μετρήσεων

2.2.1 Εισαγωγή

Τέσσερις τοπολογίες εσωτερικών χώρων επιλέχθηκαν προκειμένου να διερευνηθεί διεξοδικά η επίδραση των εμποδίων και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών κάθε περιβάλλοντος στην εξασθένηση της H/M ακτινοβολίας, ως βασική προϋπόθεση για την περαιτέρω διερεύνηση για τα ζητήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε μία τοπολογία γραφείου (office topology) [20], μία «εμπορικής» τοπολογίας (commercial topology), η Βιβλιοθήκη του Πανεπιστημίου Πατρών [21] και η αίθουσα αναχωρήσεων του Διεθνούς Αεροδρομίου Αθηνών «Ελευθέριος Βενιζέλος» [22], καθώς και μία τοπολογία κατοικίας (home topology) [23]. Η επιλογή των τοπολογιών έγινε κατ' αντιστοιχία με την κατηγοριοποίηση εσωτερικών χώρων από την ITU (International Telecommunication Union, 1999).

2.2.2 Διαδικασία μετρήσεων

Στις διάφορες τοπολογίες που εξετάζουμε, μία σειρά μετρήσεων έχουν αποκτηθεί ως προς τις τιμές λαμβανόμενης ισχύος (μέση τιμή) σε διάφορες αποστάσεις από τον εκάστοτε πομπό μετάδοσης. Καθόσον οι μετρήσεις αφορούν συστήματα Wi-Fi στα 2.4 GHz, ο πομπός ήταν το εκάστοτε Access Point (AP), που λειτουργεί σε συγκεκριμένο σημείο, σε συγκεκριμένο ύψος από το έδαφος, και με δεδομένη ισχύ μετάδοσης (Pt).

Ως δέκτης θεωρήθηκε ένας φορητός υπολογιστής (laptop) εξοπλισμένος με το κατάλληλο λογισμικό για την απόκτηση των μετρήσεων. Το εν λόγω λογισμικό είναι το NETSTUMBLER 0.40, που έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στην διεθνή έρευνα για την απόκτηση τιμών μέσης ισχύος σε δίκτυα Wi-Fi. Οι τιμές δίδονται σε dBm, γεγονός που διευκολύνει τους υπολογισμούς μας καθότι τα μοντέλα απωλειών οδεύσεως αλλά και το μοντέλο γραμμικής εξασθένησης που είναι το αντικείμενο μελέτης της παρούσης εργασίας, χρησιμοποιούν λογαριθμικές τιμές ισχύος και λοιπών παραμέτρων. Οι μετρήσεις μας επιβεβαιώθηκαν (cross-checking) με τη χρήση ενός δεύτερου φορητού

υπολογιστή που ήταν εξοπλισμένος με το VISTUMBLER (η αντίστοιχη έκδοση του λογισμικού για λειτουργικό σύστημα Windows Vista). Τέλος, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων επιβεβαιώθηκε με τις αντίστοιχες τιμές πυκνότητας ισχύος (mW/cm^2) που δίνει για την αντίστοιχη συχνότητα στις αντίστοιχες τοποθεσίες ο εξοπλισμός μετρήσεως στάθμης H/M ακτινοβολίας της Narda: ο εξοπλισμός ευρυζωνικών μετρήσεων (Narda Broadband Field Meter – NBM 550) και ο εξοπλισμός επιλογής συχνότητας (Narda Selective Radiation Meter – SRM 3006). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε βραδυνές ώρες στις αντίστοιχες τοπολογίες, ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθεί η εξασθένιση λόγω ανθρώπινης παρουσίας (body shadowing).

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί πως για την καταγραφή της τοπικής μέσης ισχύος σε κάθε μία από τις επιλεγμένες τοποθεσίες μετρήσεως έγινε averaging των καταγεγραμμένων τιμών για μία απόσταση ίση με 10λ γύρω από το σημείο μέτρησης, ούτως ώστε να απαλειφθούν οι συνιστώσες της πολύ-όδευσης και να ενσωματωθούν μονάχα οι απώλειες μεγάλης κλίμακας.

Ο ακριβής υπολογισμός της απόστασης πομπού-δέκτη, λαμβάνοντας υπόψη την πραγματική διαφορά ύψους ανάμεσα στον πομπό (Wi-Fi AP) και τον δέκτη (φορητός υπολογιστής) γίνεται με χρήση του παρακάτω μαθηματικού τύπου:

$$d = \sqrt{x^2 + (h_1 - h_2)^2} \quad (2.1)$$

Όπου h_1 είναι το ύψος του Wi-Fi πομπού (δίδεται για κάθε τοπολογία από την τεχνική υπηρεσία συντήρησης του δικτύου), h_2 είναι το ύψος του δέκτη (φορητός υπολογιστής) που θεωρείται ίσο με 1 m, και το x προκύπτει από τον χάρτη (σε συγκεκριμένη κλίμακα) της τοπολογίας που εξετάζουμε. Σε κάθε σημείο λήψης μετρήσεων σημειώνουμε την αντίστοιχη θέση στον χάρτη. Η απόσταση ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη όπως απεικονίζεται πάνω στον χάρτη ισούται με x . Αυτή όμως δεν είναι ταυτόσημη με την πραγματική απόσταση πομπού-δέκτη, αλλά αποτελεί την προβολή της στις διαστάσεις του χαρτιού. Για τον υπολογισμό της πραγματικής απόστασης d , είναι απαραίτητη η χρήση της (2.1) που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Η Εικόνα 2.1 αποτυπώνει την σχέση ανάμεσα στα ύψη των κεραίων και την πραγματική απόσταση πομπού-δέκτη.

Εικόνα 2.1. Υπολογισμός απόστασης πομπού-δέκτη (d) με βάση τα ύψη των κεραιών.

2.2.2 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία γραφείου

Η τοπολογία γραφείου (Εικ. 2.2) βρίσκεται στον 2^ο όροφο του κτιρίου προέκτασης του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών. Στον όροφο αυτό στεγάζεται το Εργαστήριο Ασύρματης Τηλεπικοινωνίας.

Όπως φαίνεται και από την κάτοψη της τοπολογίας, το εν λόγω περιβάλλον υπερβαίνει κατά πολύ την «παραδοσιακή» αντίληψη για το περιβάλλον γραφείου εμπεριέχοντας ένα μεγάλο δωμάτιο περίπου 100 τ.μ όπου βρίσκεται και ο πομπός (που μεταδίδει στα 17 dBm), γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα της τοπολογίας. Πέριξ του δωματίου αυτού βρίσκονται τα γραφεία των μεταπτυχιακών φοιτητών, ο διάδρομος του ορόφου και τα γραφεία των μελών ΔΕΠ ενώ στα δεξιά της κάτοψης διακρίνεται ο χώρος όπου φυλάσσεται ο εργαστηριακός εξοπλισμός. Στην πάνω αριστερή γωνία διακρίνεται η κουζίνα του εργαστηρίου και οι τουαλέτες.

Καταρχάς, 22 μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη τοπολογία, εντός του ιδίου ορόφου. Επιπρόσθετα, 10 μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τον δέκτη στον τρίτο όροφο του κτιρίου, καθιστώντας μία διαφορά ενός ορόφου ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη (one-floor T-R separation). Επιπλέον 7 μετρήσεις ελήφθησαν με τον δέκτη στο ισόγειο του κτιρίου, εγκαθιδρύοντας μία διαφορά δύο ορόφων ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη (two-floor T-R separation).

Συνολικά 39 σημεία μετρήσεων επιλέχθηκαν στην ευρύτερη τοπολογία γραφείου.

Κεφάλαιο 2

Εικόνα 2.2. Τοπολογία γραφείου (μετρήσεις ιδίου ορόφου)

Εικόνα 2.3. Τοπολογία γραφείου (μετρήσεις διαφοράς ενός ορόφου)

Εικόνα 2.4. Τοπολογία γραφείου (μετρήσεις διαφοράς δύο ορόφων)

Ο εκθέτης απωλειών οδεύσεως λαμβάνει την τιμή 1.73 (με μέθοδο μέσου τετραγωνικού σφάλματος) για τα σημεία μετρήσεως εντός του μεγάλου δωματίου που βρίσκεται το AP και 1.8 για κάθε OLOS μονοπάτι οδεύσεως.

Παρατηρούμε επίσης πως η Gaussian τυχαία μεταβλητή στο μοντέλο λογαριθμικής απόστασης (που εκφράζει τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας) δεν αυξάνει κατ' ανάγκη ανάλογα με την απόσταση. Εντός του δωματίου που βρίσκεται το AP δεν υπάρχει σκίαση. Συνεπώς, για μία τοποθεσία που απέχει 6 μέτρα από τον πομπό και βρίσκεται σε ένα εκ των παράπλευρων δωματίων, έχω μη-μηδενική μεταβλητή σκίασης, αλλά για απόσταση 11 μέτρων εντός του μεγάλου δωματίου με το AP έχω μηδενική σκίαση. Ως αποτέλεσμα, ο δείκτης εξασθένησης ισχύος ισούται με 18 για το μοντέλο ελεύθερου χώρου, 26 για το μοντέλο λογαριθμικής απόστασης, 28 για το μοντέλο ITU και 30.6 αν θεωρήσω παραμετρικό εκθέτη απωλειών οδεύσεως (one-slope μοντέλο).

Η κανονική απόκλιση για το μοντέλο λογαριθμικής απόκλισης κυμαίνεται από 3 έως 7.9 dB, που για ποσοστό κάλυψης ίσο με 95% οδηγεί σε βάθος σκίασης X_s ανάμεσα σε 4.935 και 12.99 dB αντίστοιχα.

Εικόνα 2.5. Σύγκριση προβλέψεων θεωρητικών μοντέλων με μετρήσεις (ίδιος όροφος)

Εικόνα 2.6. Σύγκριση προβλέψεων εμπειρικών μοντέλων με μετρήσεις (ίδιος όροφος)

Στο σενάριο πολλαπλών ορόφων, το μοντέλο One-Slope αποδίδει εκθέτη απωλειών οδεύσεως ίσο με 4.12 και 4.58 για διαφορά 1 ή 2 ορόφων. Η κανονική απόκλιση σ για το μοντέλο λογαριθμικής απόστασης κυμαίνεται ανάμεσα σε 7.7 και 11.9 dB, για διαφορά ενός ή δύο ορόφων αντίστοιχα. Οι εικόνες 2.7 και 2.8 δείχνουν το μοντέλο One-Slope και το μοντέλο λογαριθμικής απόστασης σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις.

Το μοντέλο ITU χρησιμοποιεί έναν παράγοντα εξασθένησης ορόφων. Για περιβάλλον γραφείου η προβλεπόμενη τιμή ισούται με $15 + 4(n - 1)$ (όπου n το πλήθος των ορόφων που διαπερνά το σήμα κατά το μονοπάτι οδεύσεως). Οι πειραματικές τιμές όμως της μετρηθείσας τοπικής μέσης ισχύος δείχνουν πως το μοντέλο αποκλίνει από τα εμπειρικά δεδομένα αν χρησιμοποιηθεί αυτός ο τύπος. Η χρήση του αντίστοιχου τύπου για περιβάλλον κατοικίας αποδίδει καλύτερα αποτελέσματα. Η αριθμητική διόρθωση του μοντέλου ITU θα μας απασχολήσει και στην επόμενη ενότητα του κεφαλαίου.

Εικόνα 2.7. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλου One-Slope με μετρήσεις (πολλαπλοί όροφοι)

Εικόνα 2.8. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλου λογαριθμικής απόστασης με μετρήσεις (πολλαπλοί όροφοι)

Εικόνα 2.9. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλου ITU με μετρήσεις (πολλαπλοί όροφοι)

Εικόνα 2.10. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλου MWF με μετρήσεις (πολλαπλοί όροφοι)

Το μοντέλο ελεύθερου χώρου αποδείχτηκε αξιόπιστο μόνο όταν υπήρχε οπτική επαφή (LOS) ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη. Σε κάθε άλλη περίπτωση η απόκλιση από τις τιμές των μετρήσεων είναι σημαντική και καθιστά το μοντέλο αναξιόπιστο.

Το μοντέλο One-Slope παρέχει ικανοποιητικές προβλέψεις, καθώς ο εκθέτης απωλειών οδεύσεως επιλέγεται βάσει τεχνικής ελαχιστοποίησης σφάλματος. Κατά περιπτώσεις όμως, η επιλογή ενός τέτοιου εκθέτη οδηγεί σε προβλέψεις υπερβολικά δυσμενείς για το ασύρματο κανάλι.

Το μοντέλο λογαριθμικής απόστασης μένει εγκλωβισμένο σε μία γενικώς ικανοποιητική πρόβλεψη που όμως αδυνατεί να παρακολουθήσει την δυναμική κατανομή της απόκλισης σκίασης (βάθους σκίασης) κατά μήκος της τοπολογίας, κάτι που θα μας απασχολήσει στο επόμενο κεφάλαιο.

Τέλος, το μοντέλο MWF παρέχει τις πιο αξιόπιστες και ακριβείς προβλέψεις, τόσο για μετρήσεις ιδίου ορόφου, όσο και για μετρήσεις πολλαπλών ορόφων. Στην πρώτη περίπτωση, το μέσο σφάλμα είναι 2.405%. Αν μάλιστα παραβλεφθούν οι 3 LOS τοποθεσίες (Q, R, S), τότε το μέσο σφάλμα μειώνεται ακόμα περισσότερο, στο 1.74%.

Πίνακας 2.1. Σύγκριση προβλέψεων του μοντέλου MWF με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία (ίδιος όροφος)

Location	T-R (m)	Pr (dBm)	MWF (dBm)	Error (%)
A	8	-48	-48	0
B	11.5	-55	-56	1.81
C	13	-53	-52	1.88
D	15	-54	-53	1.85
E	5	-45	-45	0
F	13	-51	-52	1.96
G	20	-66	-66	0
H	21	-71	-71	0
I	18	-71	-70	1.4
J	16	-59	-61	3.38
M	20	-65	-65	0
N	22	-75	-77	2.66
O	20	-74	-71	4.05
P	10.5	-55	-55	0
Q	10.5	-41	-43	4.87
R	10	-40	-43	7.5
S	10	-40	-43	7.5
T	16.5	-63	-62	1.58
U	17	-68	-69	1.47
V	11	-49	-51	4.08
W	15	-54	-53	1.85
X	16.5	-59	-62	5.08

Στην περίπτωση των πολλαπλών ορόφων, το μοντέλο MWF είναι εξίσου αξιόπιστο στις προβλέψεις του: το μέσο σφάλμα είναι 1.88% για διαφορά ενός ορόφου και 2.217% για διαφορά δύο ορόφων.

Πίνακας 2.2. Σύγκριση προβλέψεων του μοντέλου MWF με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία (διαφορά ενός ορόφου)

Location	T-R (m)	Pr (dBm)	MWF (dBm)	Error (%)
A'	5.8	-60	-60	0
B'	11.4	-67	-64	4.47
C'	10.9	-62	-58	6.45
D'	10.4	-58	-58	0
E'	11.4	-67	-67	0
F'	20.2	-77	-78	1.29
G'	17.7	-77	-79	2.59
H'	17.7	-75	-76	1.33
I'	16.7	-73	-72	1.36
J'	17.7	-76	-77	1.31

Πίνακας 2.3. Σύγκριση προβλέψεων του μοντέλου MWF με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία (διαφορά δύο ορόφων)

Location	T-R (m)	Pr (dBm)	MWF (dBm)	Error (%)
A''	9.6	-78	-78	0
B''	15.2	-76	-78	2.63
C''	17.9	-76	-73	3.94
D''	18.9	-81	-80	1.23
E''	24.2	-81	-82	1.23
F''	12.9	-76	-80	5.26
G''	17.5	-81	-82	1.23

2.2.3 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία βιβλιοθήκης

Η εμπορική τοπολογία (Εικ.2.11) αφορά εν πρώτοις στην κεντρική αίθουσα (αναγνωστήριο) της Βιβλιοθήκης του Πανεπιστημίου Πατρών. Ο πομπός (AP) βρίσκεται πάνω από το γραφείο πληροφοριών και μεταδίδει στα 15 dBm. Τραπέζια, βιβλιοθήκες και άλλα εμπόδια βρίσκονται περίξ του πομπού, σε όλη την τοπολογία. Συνολικά, 32 μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν εντός του αναγνωστηρίου.

Παρόλο που η βιβλιοθήκη δεν αποτελεί εξ ορισμού μία «εμπορική» τοπολογία, εν τούτοις κατατάσσεται σε αυτές βάσει των χαρακτηριστικών που προσδιορίζουν μία εμπορική τοπολογία σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση της ITU. Στην πραγματικότητα, πέραν της αξιολόγησης και τροποποίησης των μοντέλων απωλειών οδεύσεως, μας ενδιαφέρει, στα πλαίσια του χαρακτηρισμού του ασύρματου διαύλου, και ο ενδεχόμενος επαναπροσδιορισμός της κατηγοριοποίησης των εσωτερικών τοπολογιών σύμφωνα με τις αρχικές συστάσεις της ITU, αν τα εμπειρικά αποτελέσματα συγκλίνουν προς μία τέτοια κατεύθυνση.

Εικόνα 2.11. Τοπολογία βιβλιοθήκης (μετρήσεις ιδίου ορόφου)

Εικόνα 2.12. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλων με μετρήσεις

Εικόνα 2.13. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλου MWF με μετρήσεις

Καθώς πρόκειται για μία τοπολογία με έντονα φαινόμενα σκίασης, το μοντέλο ελεύθερου χώρου καθίσταται αναξιόπιστο. Το μοντέλο One-Slope παρέχει καλύτερες προβλέψεις. Το αρχικό μοντέλο ITU εμφανίζει υψηλό ποσοστό σφάλματος και για αυτό προβαίνουμε σε αριθμητική διόρθωση (βλέπε επόμενη ενότητα). Το MWF μοντέλο με εκθέτη απωλειών οδεύσεως 1.8 είναι εκ νέου το πιο αξιόπιστο.

Στον πίνακα 2.4 αποτυπώνεται αναλυτικά η σύγκριση των προβλέψεων κάθε μοντέλου με τις τιμές των μετρήσεων σε κάθε τοποθεσία εντός της τοπολογίας βιβλιοθήκης, με το μέσο σφάλμα να χαρακτηρίζει την απόδοση κάθε μοντέλου. Το μοντέλο ITU που χρησιμοποιείται στον πίνακα 2.4 αποτελεί την αριθμητική διόρθωση του αρχικού μοντέλου ITU το οποίο όπως φαίνεται στον συγκεντρωτικό πίνακα 2.5 ήταν πολύ πιο αναξιόπιστο με αποτέλεσμα να επέλθει μεταβολή στις παραμέτρους του.

Πίνακας 2.4. Σύγκριση προβλέψεων των μοντέλων με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία

Location	T-R (m)	Pr (dBm)	FSL Error (%)	OSL Error (%)	ITU Error (%)	MWF Error (%)
A	7	-39	6.53	26.28	8.65	0
B	8	-37	14.93	36.98	17.30	8.11
C	9	-38	16.32	39.84	18.84	10.53
D	16	-43	14.74	41.09	31.72	6.98
E	12	-45	3.00	25.08	5.37	2.22
F	14	-49	2.71	18.82	11.17	14.29
G	8	-58	26.72	12.68	25.21	6.90
H	13	-69	31.36	16.28	29.74	1.45
I	13	-62	23.62	6.83	21.81	8.06
J	26	-66	19.37	0.54	8.43	4.55
K	22	-66	21.39	2.44	9.18	7.58
L	24	-58	9.20	13.00	5.10	3.45
M	16	-56	11.89	8.34	1.14	5.36

N	20	-54	5.78	16.53	8.60	16.67
O1	15	-51	5.18	16.14	8.56	7.84
O2	16	-54	8.95	11.89	4.48	12.96
O3	17	-56	11.16	9.42	2.10	5.36
O4	16	-52	5.40	16.25	8.55	5.77
O5	18	-63	20.78	2.37	8.92	14.29
O6	19	-62	18.77	0.27	6.50	8.06
O7	19	-63	19.93	1.12	7.81	9.52
P	4	-54	33.46	24.04	32.45	7.41
Q	4	-65	44.06	35.92	43.18	10.77
R	18	-58	13.28	7.02	0.20	6.90
S	27	-65	17.56	2.92	11.03	1.54
T	28	-75	28.08	10.11	2.99	1.33
U	29	-77	29.63	11.98	4.99	0
V	32	-78	29.36	11.39	4.27	0
W	42	-81	29.16	10.55	3.17	2.47
X	40	-78	26.91	7.81	0.24	1.28
Y	41	-68	15.81	6.26	15.01	2.94
Z	29	-55	1.13	23.74	33.59	9.09

Πίνακας 2.5. Σφάλματα των RF μοντέλων

RF Model	Mean Error (%)	RMSE (%)
FSL	17.69	13.66
OSL	14.81	9.47
ITU	12.51	9.66
ITU (orig.)	15.43	11.96
MWF	6.36	4.32

2.2.4 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία αεροδρομίου

Εικόνα 2.14. Τοπολογία αεροδρομίου (μετρήσεις ιδίου ορόφου)

Ένα σετ μετρήσεων πραγματοποιήθηκε στο Διεθνές Αεροδρόμιο Αθηνών «Ελευθέριος Βενιζέλος» προκειμένου να αντληθούν εμπειρικά πειραματικά δεδομένα για αξιολόγηση των μοντέλων απωλειών οδεύσεως σε μία έτερη εμπορική τοπολογία σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση της ITU η οποία διαφοροποιείται ωστόσο, όπως θα δούμε, από την εμπορική τοπολογία της βιβλιοθήκης που εξετάσαμε προηγουμένως.

Συνολικά 26 σημεία επιλέχθηκαν εντός του χωλ αναχωρήσεων του αεροδρομίου. Για λόγους ασφαλείας, και ύστερα από συνεννόηση με τις αρμόδιες αρχές του αεροδρομίου, δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε δημοσίως μία πιο αναλυτική κάτοψη της αίθουσας αναχωρήσεων και ως εκ τούτου τα σημεία μετρήσεων και τα μετρούμενα APs ενσωματώνονται στο διαθέσιμο εμπορικό γράφημα της Εικόνας 2.14.

Κάθε Access Point καλύπτει ένα διαφορετικό κομμάτι της αίθουσας αναχωρήσεων και μεταδίδει σε διαφορετικό επίπεδο ισχύος. Συνολικά μετρήσαμε 3 διαφορετικά APs, έτσι που κάθε περίπτωση να αντιστοιχεί σε διαφορετικό υπο-σενάριο ράδιο-διάδοσης. Πιο συγκεκριμένα, το AP1 αντιστοιχεί σε μία τοπολογία με LOS και OLOS τοποθεσίες, με το OLOS σενάριο να είναι επικρατέστερο. Το AP2 αντιστοιχεί σε μία παραδοσιακά LOS τοπολογία, ενώ το AP3 αντιστοιχεί σε τοπολογία με επίσης LOS και OLOS τοποθεσίες, με το LOS σενάριο να είναι επικρατέστερο. Η μέση περιοχή κάλυψης κάθε AP φτάνει μέχρι και τα 100 μέτρα, ξεπερνώντας την κλασική εμβέλεια ενός συνήθους 802.11g δικτύου εσωτερικού χώρου. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν αργά το βράδυ για ελαχιστοποίηση των φαινομένων σκίασης από ανθρώπινη παρουσία.

Τρία βασικά μοντέλα απωλειών οδεύσεως χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη τοπολογία: το μοντέλο ελεύθερου χώρου, το μοντέλο One-Slope και το μοντέλο ITU. Η φύση της τοπολογίας είναι τέτοια που έχουμε φαινόμενα ανακλάσεως και πολύ-όδευσης. Πιο συγκεκριμένα, έχουμε φαινόμενα bouncing ανάμεσα στο πάτωμα και το ταβάνι του αεροδρομίου (στα σημεία όπου βρίσκονται τα APs το ταβάνι δεν ξεπερνάει τα 5 μέτρα). Συνεπώς ο βασικός μηχανισμός εξασθένησης στην συγκεκριμένη τοπολογία είναι οι ανακλάσεις και η πολύ-όδευση και όχι η σκίασης όπως στις υπόλοιπες τοπολογίες εσωτερικού χώρου που εξετάσαμε. Συνεπώς για την συγκεκριμένη τοπολογία παραβλέπουμε το μοντέλο λογαριθμικής απόστασης και το μοντέλο MWF που βασίζουν τις προβλέψεις τους για την μέση απώλεια οδεύσεως σε απώλειες λόγω σκίασης από εμπόδια.

Η ισχύς μετάδοσης του AP1 είναι 19 dBm. Η σύγκριση των προβλέψεων των μοντέλων με τις μετρήσεις φαίνεται στην Εικόνα 2.15.

Εικόνα 2.15. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλων με μετρήσεις (AP1)

Παρατηρούμε πως τα μοντέλα One-Slope και ITU παρέχουν πολύ παραπλήσιες προβλέψεις, καθώς θεωρούν αμφότερα εκθέτη απωλειών οδεύσεως $n > 2$ (2.11 για το μοντέλο One-Slope και 2.2 για το μοντέλο ITU αντίστοιχα). Το μοντέλο ελεύθερου χώρου υιοθετεί εκθέτη απωλειών οδεύσεως ίσο με 1.8 και ως εκ τούτου είναι πιο αξιόπιστο για αποστάσεις κάτω των 40 μέτρων. Για αποστάσεις άνω των 40 μέτρων όμως, το μοντέλο ελεύθερου χώρου αποκλίνει ως υπερβολικά «αισιόδοξο», ενώ οι προβλέψεις των μοντέλων ITU και One-Slope προσεγγίζουν καλύτερα τις μετρήσεις.

Πίνακας 2.6. Σύγκριση προβλέψεων των μοντέλων με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία (AP1)

Location	T-R (m)	Pr (dBm)	FSL Error (%)	OSL Error (%)	ITU Error (%)
A	7.8	-48	24.880	19.118	17.446
B	32.6	-53	10.872	2.021	0.549
C	39.6	-58	15.934	7.394	4.915
D	46.4	-64	21.879	13.807	11.463
E	71.2	-72	25.910	17.934	15.619
L	19.8	-42	3.190	12.761	15.540
M	44.5	-43	15.513	27.396	30.846
N	36.5	-50	3.757	5.929	8.741
O	67.2	-55	3.832	6.468	9.458
P	64.3	-64	17.894	9.136	6.593
Q	21.7	-44	0.128	9.544	12.278
R	39.5	-47	3.699	14.230	17.288
S	30.6	-45	3.873	14.108	17.080
T	52.4	-53	3.872	6.185	9.104
U	63.3	-54	2.916	7.425	10.428
V	76.1	-67	10.225	0.505	2.317

Για το AP1, το μοντέλο ελεύθερου χώρου εμφανίζει μέσο σφάλμα 10.523%, ενώ το μοντέλο One-Slope εμφανίζει μέσο σφάλμα 10.873%. Το μέσο σφάλμα του μοντέλου ITU ισούται με 11.854%.

Η ισχύς μετάδοσης του AP2 είναι 21 dBm. Η σύγκριση των προβλέψεων των μοντέλων με τις μετρήσεις φαίνεται στην Εικόνα 2.16.

Το μοντέλο ελεύθερου χώρου υιοθετεί εκ νέου έναν εκθέτη απωλειών οδεύσεως ίσο με 1.8. Το μοντέλο ITU έχει εκθέτη απωλειών οδεύσεως ίσο με 2.2 και σε αυτήν την περίπτωση, ενώ το μοντέλο One-Slope υιοθετεί έναν εκθέτη απωλειών οδεύσεως ίσο με 1.98.

Σύμφωνα με τον πίνακα 2.7, το μέσο σφάλμα του μοντέλου ελεύθερου χώρου ισούται με 10.745%, ενώ το μέσο σφάλμα του μοντέλου One-Slope είναι 9.745%. Το μοντέλο ITU εμφανίζεται ανακριβές για αποστάσεις μικρότερες από 70 μέτρα, με μέσο σφάλμα 12.008%.

Εικόνα 2.16. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλων με μετρήσεις (AP2)

Πίνακας 2.7. Σύγκριση προβλέψεων των μοντέλων με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία (AP2)

Location	T-R (m)	Pr (dBm)	FSL Error (%)	OSL Error (%)	ITU Error (%)
L	74.2	-58	10.918	5.114	1.981
N	101.5	-68	20.417	15.106	8.614
Q	54.5	-50	1.490	4.761	12.401
R	33.6	-50	9.052	3.557	3.159
S	36.5	-47	1.870	4.114	11.426
T	18.7	-50	18.214	13.635	8.039
U	12.8	-30	26.433	33.076	41.195
V	15.8	-37	6.962	12.793	19.920
W	34.6	-42	8.818	15.414	23.475
X	37.5	-52	10.899	5.450	1.209
Y	61.3	-55	8.774	2.924	4.226
Z	62.3	-53	5.093	1.002	8.450

Η ισχύς μετάδοσης του AP3 είναι 16 dBm. Η σύγκριση των προβλέψεων των μοντέλων με τις μετρήσεις φαίνεται στην Εικόνα 2.17.

Τα μοντέλα ελεύθερου χώρου και ITU παραμένουν όπως και στις προηγούμενες 2 περιπτώσεις. Το μοντέλο One-Slope υιοθετεί εκθέτη απωλειών οδεύσεως ίσο με 1.87. Το μέσο σφάλμα του μοντέλου ελεύθερου χώρου ισούται με 8.121%, ενώ το μέσο σφάλμα του μοντέλου One-Slope είναι 7.824%. Το μοντέλο ITU εμφανίζει το υψηλότερο μέσο σφάλμα, ίσο με 12.3%.

Εικόνα 2.17. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλων με μετρήσεις (AP3)

Πίνακας 2.8. Σύγκριση προβλέψεων των μοντέλων με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία (AP3)

Location	T-R (m)	Pr (dBm)	FSL Error (%)	OSL Error (%)	ITU Error (%)
A	64.3	-69	19.496	17.662	9.014
B	62.3	-58	4.654	2.488	7.722
C	32.6	-51	1.494	0.583	10.374
D	30.6	-46	8.137	10.398	21.056
E	5.8	-41	10.386	9.083	2.938
F	19.8	-42	10.333	12.494	22.682
G	36.5	-46	11.133	13.511	24.718
H	39.6	-53	2.342	0.232	9.716
I	60.3	-58	5.094	2.945	7.184
J	67.2	-53	5.458	7.871	19.249
K	55.6	-61	10.801	8.799	0.642

2.2.5 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία οικίας

Η τοπολογία οικίας αποτελεί την πλέον σύνθετη περίπτωση ράδιο-διάδοσης εσωτερικού χώρου λόγω των πολλών εμποδίων, αντικειμένων αλλά και των συχνών τοίχων που παρεμβάλλονται ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη, που δύναται να απέχει αρκετά δωμάτια από το AP, όσο το επιτρέπει ασφαλώς ο φυσικός περιορισμός της εμβέλειας του 802.11g δικτύου.

Η συγκεκριμένη τοπολογία που επιλέξαμε είναι ένα διαμέρισμα με εγκατεστημένο Wi-Fi στο κέντρο των Πατρών. Η πλειοψηφία των σημείων μέτρησης κατανέμεται στους χώρους πέριξ του δωματίου που εμπεριέχει τον router (πομπό), ο οποίος μεταδίδει στα 17 dBm. Με το σύμβολο 'R' περιγράφουμε το σημείο μέτρησης που επιλέχτηκε στην απόσταση αναφοράς (1 μέτρο απόσταση πομπού-δέκτη). Το σημείο μέτρησης Q βρίσκεται στην είσοδο του διαμερίσματος. Τέσσερις μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στον κοινόχρηστο χώρο του ορόφου, έξω από τα διαμερίσματα (V, W, X, Y). Οι μετρήσεις αυτές ήταν οι πιο απομακρυσμένες από τον πομπό. Επίσης, οι τοποθεσίες Z, A2 and A3 αφορούν στο γειτονικό διαμέρισμα.

Συνολικά, 28 μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν επί του ιδίου ορόφου, ενώ 15 μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο ισόγειο της πολυκατοικίας (διαφορά 1 ορόφου πομπού-δέκτη). Οι τοπολογίες απεικονίζονται στα σχήματα 2.18 και 2.19 αντίστοιχα για σενάριο ιδίου ορόφου και διαφοράς ενός ορόφου.

Η αξιολόγηση των μοντέλων σε σύγκριση με τις τιμές των μετρήσεων απεικονίζεται στον πίνακα 2.9 για κάθε τοποθεσία μέτρησης στο σενάριο ιδίου ορόφου. Η γραφική απεικόνιση των προβλέψεων των μοντέλων σε σύγκριση με τις μετρήσεις πραγματοποιείται στις εικόνες 2.20 και 2.21. Είναι εμφανής η περιορισμένη εμβέλεια του 802.11g δικτύου σε σχέση με τις προηγούμενες τοπολογίες που εξετάσαμε. Καθοριστικό ρόλο σε αυτό παίζουν τα υλικά και τα εμπόδια που παρεμβάλλονται στο μονοπάτι οδεύσεως της H/M ακτινοβολίας και επιδρούν σημαντικά στην εξασθένηση του σήματος.

Εικόνα 2.18. Τοπολογία οικίας (μετρήσεις ιδίου ορόφου)

Εικόνα 2.19. Τοπολογία οικίας (μετρήσεις διαφοράς ενός ορόφου)

Πίνακας 2.9. Σύγκριση προβλέψεων των μοντέλων με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία (ίδιος όροφος)

Location	T-R (m)	Pr (dBm)	FSL Error (%)	OSL Error (%)	ITU Error (%)	MWF Error (%)
R	1	-23	0.00	0.00	0.00	0.00
E	2.4	-37	17.29	8.71	1.56	4.32
F	2.7	-42	24.70	1.29	8.98	3.81
B	3.2	-34	2.64	34.95	20.09	2.65
J	3.4	-35	3.92	34.50	19.32	4.00
M	3.9	-53	34.30	6.08	17.24	7.17
A	4.9	-36	2.23	50.74	31.57	2.22
C	4.9	-48	23.33	13.05	1.33	2.50
P	4.9	-57	35.43	4.80	16.91	3.86
I	5.1	-53	29.90	3.87	9.48	3.58
D	5.4	-45	16.34	24.84	8.56	7.56
L	5.4	-45	16.34	24.84	8.56	1.33
K	5.6	-48	20.91	18.53	2.94	4.38
O	6.5	-46	14.66	30.05	12.38	2.17
G	6.5	-57	31.13	4.96	9.31	3.86
N	7.2	-51	21.28	21.25	4.44	2.24
H	7.7	-56	27.27	12.78	3.05	4.82
U	8.3	-57	27.40	13.39	2.73	4.04
S	9.3	-55	22.96	21.59	3.98	2.36
Q	9.5	-59	27.87	14.05	2.52	4.24
T	10.8	-62	29.57	12.60	4.06	2.58
A2	11.5	-80	44.73	11.19	8.40	2.50
V	12.7	-77	41.46	5.19	2.18	2.60
Z	13.05	-72	37.07	2.13	5.39	4.58
A3	13.8	-81	43.46	7.86	4.90	6.54
W	14	-76	39.58	1.42	1.75	0.00
X	14.7	-74	37.37	2.54	5.85	3.16
Y	15.75	-87	46.04	11.22	8.33	3.33

Εικόνα 2.20. Σύγκριση προβλέψεων θεωρητικών μοντέλων με μετρήσεις (ίδιος όροφος)

Εικόνα 2.21. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλου MWF με μετρήσεις (ίδιος όροφος)

Πίνακας 2.10. Σύγκριση προβλέψεων των μοντέλων με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία (διαφορά ενός ορόφου)

Location	T-R (m)	Pr (dBm)	FSL Error (%)	OSL Error (%)	ITU Error (%)	MWF Error (%)
R'	3	-47	30.76	11.98	25.71	1.15
I	3.05	-58	43.64	8.49	2.37	2.07
L	3.2	-62	46.61	12.31	2.89	3.39
C	3.75	-64	46.12	8.36	1.62	2.31
N	3.81	-51	32.12	15.83	23.99	2.73
M	4.43	-73	50.78	13.50	9.79	2.47
J	5.12	-69	46.11	2.83	0.91	1.19
H	5.22	-74	49.52	8.69	7.15	3.18
K	5.31	-68	44.85	0.04	1.48	0.74
G	6.17	-76	48.94	5.16	5.77	2.37
B	8.09	-74	44.38	7.28	3.13	2.50
A	8.3	-78	46.95	2.66	1.59	3.05
F	8.4	-79	47.49	1.77	2.57	1.87
E	10.34	-84	48.46	2.38	4.07	2.02
D	12.73	-85	46.95	7.78	0.95	1.06

Στον πίνακα 2.10 παρουσιάζονται αναλυτικά οι προβλέψεις των μοντέλων απωλειών οδεύσεως για το σενάριο μετρήσεων με διαφορά ενός ορόφου, όπου ο πομπός βρίσκεται στο ισόγειο της πολυκατοικίας. Η ραγδαία εξασθένηση του σήματος είναι εμφανής. Οι γραφικές παραστάσεις στις εικόνες 2.22 και 2.23 δίνουν μία πιο εύγλωττη απεικόνιση της εξασθένησης του σήματος και καταδεικνύουν την ακαταλληλότητα του μοντέλου ελεύθερου χώρου και, από την άλλη πλευρά, την ακρίβεια και αξιοπιστία του μοντέλου MWF.

Εικόνα 2.22. Σύγκριση προβλέψεων θεωρητικών μοντέλων με μετρήσεις (διαφορά 1 ορόφου)

Εικόνα 2.23. Σύγκριση προβλέψεων μοντέλου MWF με μετρήσεις (διαφορά 1 ορόφου)

Ο πίνακας 2.11 παρουσιάζει συγκεντρωτικά το μέσο σφάλμα κάθε μοντέλου για το σενάριο ιδίου ορόφου και για το σενάριο διαφοράς ενός ορόφου.

Το μοντέλο ελεύθερου χώρου είναι μακράν το πιο αναξιόπιστο, καθώς θεωρεί ιδανική διάδοση στον χώρο σε μια τοπολογία που βρίθει εμποδίων και απωλειών σκίασης.

Το μοντέλο One-Slope ήταν πιο αξιόπιστο, καθώς ο εκθέτης απωλειών οδεύσεως προέκυψε στη βάση των πειραματικών μετρήσεων. Αδυνατεί παρόλα αυτά να προσδώσει δυναμικότητα στις προβλέψεις του και να παρακολουθήσει τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας του σήματος. για τον εκθέτη απωλειών οδεύσεως παρά μόνο αν υπάρχουν προηγούμενες μετρήσεις.

Το μοντέλο ITU στην διορθωμένη έκδοσή του ήταν αρκετά ακριβές, με μέσο σφάλμα μικρότερο του 10% και στις δύο περιπτώσεις, μέσω μίας τροποποίησης που πραγματοποιήσαμε και η οποία θα συζητηθεί διεξοδικά στην επόμενη ενότητα, παραβλέποντας τις ανακριβείς αρχικές συστάσεις του μοντέλου.

Τέλος, το μοντέλο MWF αποδεικνύεται και σε αυτήν την περίπτωση το πλέον αξιόπιστο μοντέλο απωλειών οδεύσεως, με μέσο σφάλμα μικρότερο του 3.5% και για τις δύο περιπτώσεις.

Πίνακας 2.11. Σφάλματα των RF μοντέλων

RF Model	Same Floor	Multiple Floor
FSL	25.68 %	44.91 %
OSL	14.23 %	7.27 %
ITU (adj)	8.06 %	6.27 %
MWF	3.44 %	2.14 %

2.3 Αριθμητική διόρθωση του μοντέλου ITU για περιβάλλοντα εσωτερικών χώρων

2.3.1 Εισαγωγή

Όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα, όλες σχεδόν οι αρχικές συστάσεις για το μοντέλο ITU για πρόβλεψη των απωλειών οδεύσεως σε τοπολογίες εσωτερικών χώρων αποδείχτηκαν αναξιόπιστες.

Στα πλαίσια της αξιολόγησης και βελτιστοποίησης των μοντέλων απωλειών οδεύσεως βάσει των μετρήσεων που ελήφθησαν στις υπό εξέταση τοπολογίες εσωτερικής ράδιο-διάδοσης, πραγματοποιήθηκε αριθμητική διόρθωση και επαναξιολόγηση του μοντέλου ITU.

Δόθηκε ιδιαίτερο βάρος σε 2 τοπολογίες: στην τοπολογία γραφείου, όπου και διαπιστώθηκε η πιο εκτεταμένη αριθμητική διόρθωση στον αρχικά προτεινόμενο συντελεστή εξασθένησης πατωμάτων, και στην τοπολογία του αεροδρομίου, όπου, ελλείψει φαινομένου σκίασης λόγω εξασθένησης από εμπόδια και άρα ασυμβατότητα χρήσης του μοντέλου MWF (ή και ακόμα του μοντέλου λογαριθμικής απόστασης), το μοντέλο ITU αποτελεί την πιο ενδεδειγμένη χρήση για *a priori* πρόβλεψη μέσης απώλειας οδεύσεως σε ένα περιβάλλον όπου ο βασικός μηχανισμός ράδιο-διάδοσης είναι οι ανακλάσεις και η πολύ-όδευση.

2.3.2 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία γραφείου

Η αναγκαιότητα εκτεταμένης διορθωτικής παρέμβασης στις προτεινόμενες τιμές για τις παραμέτρους του μοντέλου ITU για την τοπολογία γραφείου, όπως αναδείχτηκε ανάγλυφα στην προηγούμενη ενότητα, οδήγησε σε μία ξεχωριστή μελέτη με αποκλειστικό σκοπό μία αξιόπιστη αριθμητική διόρθωση του μοντέλου και των προτεινόμενων παραμέτρων για τα 2.4 GHz για τοπολογίες εσωτερικών χώρων [24].

Στον πίνακα 2.12 απεικονίζεται η σύγκριση των προβλέψεων του μοντέλου ITU με τις μετρήσεις, για το σενάριο του ιδίου ορόφου, και το αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία μετρήσεως.

Πίνακας 2.12. Σύγκριση προβλέψεων του μοντέλου ITU με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία (ίδιος όροφος)

Location	T-R (m)	Pr (dBm)	ITU (dBm)	Error %
A	8	-48	-47.3	1.45833
B	11.5	-55	-51.6	6.18182
C	13	-53	-53	0
D	15	-54	-54.7	1.296296
E	5	-45	-41.8	7.11111
F	13	-51	-53	3.921569
G	20	-66	-69	4.545455
H	21	-71	-70	1.40845
I	18	-71	-67.7	4.64789
J	16	-59	-65.7	11.35593
M	20	-65	-69	6.153846
N	22	-75	-71	5.33333
O	20	-74	-69	6.75676
P	10.5	-55	-50.5	8.18182
Q	10.5	-41	-50.5	23.17073
R	10	-40	-50	25
S	10	-40	-50	25
T	16.5	-63	-66	4.761905
U	17	-68	-66.7	1.91176
V	11	-49	-51.1	4.285714
W	15	-54	-54.7	1.296296
X	16.5	-59	-63	6.779661

Οι παραπάνω προβλέψεις του μοντέλου ITU προέκυψαν ύστερα από αριθμητική διόρθωση στον προτεινόμενο συντελεστή εξασθένησης ισχύος ($10n$, όπου n ο εκθέτης απωλειών οδεύσεως), σύμφωνα με τις προτεινόμενες τιμές πίνακα 2.13.

Πίνακας 2.13. Προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου ITU (ίδιος όροφος)

Distance (m)	Power decay index (N)	Site-specific ITU indoor model at 2.4 GHZ
$1 < d < 16$	28	$P_L = 39.9 + 28 \log d$
$d > 16$	38	$P_L = 39.9 + 38 \log d$

Η απόδοση του διορθωμένου μοντέλου ITU είναι σαφέστατα πιο ικανοποιητική, καθώς το μέσο σφάλμα επί συνόλου 22 μετρήσεων στο σενάριο ιδίου ορόφου ισούται με 7.299%. Αν θεωρηθεί πως μπορούν να παραβλεφθούν οι 3 LOS τοποθεσίες εντός του δωματίου του AP που επηρεάζουν σημαντικά το ποσοστό σφάλματος και δεν αντιστοιχούν στην συνολική OLOS θεώρηση της τοπολογίας, τότε το μέσο σφάλμα πέφτει στο 4.599%.

Για το σενάριο πολλαπλών ορόφων (διαφορά ενός και δύο ορόφων), το αρχικό μοντέλο ITU για διάδοση πολλαπλών ορόφων αποδίδει ως εξής:

Εικόνα 2.24. Σύγκριση προβλέψεων αρχικού μοντέλου ITU με μετρήσεις (πολλαπλοί όροφοι)

Εικόνα 2.25. Σύγκριση προβλέψεων προτεινόμενου μοντέλου ITU-1 με μετρήσεις (πολλαπλοί όροφοι)

Αν χρησιμοποιήσουμε την αντίστοιχη τιμή του συντελεστή εξασθένησης πατωμάτων για περιβάλλοντα οικίας, $L_f(n) = 4n$, τότε λαμβάνουμε τις προβλέψεις της Εικόνας 2.25 (προτεινόμενο μοντέλο ITU-1). Με την προσθήκη ενός συντελεστή διόρθωσης (1.375, δηλαδή συντελεστής $5.5n$), προκύπτει το προτεινόμενο μοντέλο ITU-2 (Εικόνα 2.26).

Εικόνα 2.26. Σύγκριση προβλέψεων προτεινόμενου μοντέλου ITU-2 με μετρήσεις (πολλαπλοί όροφοι)

Εικόνα 2.27. Σύγκριση προβλέψεων προτεινόμενου μοντέλου ITU-3 με μετρήσεις (πολλαπλοί όροφοι)

Αν χρησιμοποιήσουμε μία τιμή του συντελεστή εξασθένησης πατωμάτων, δηλαδή $7.5(n+1)$, προκύπτει το προτεινόμενο μοντέλο ITU-3 (Εικόνα 2.27).

Στον πίνακα 2.14 απεικονίζονται συγκεντρωτικά τα τρία προτεινόμενα μοντέλα ITU για ράδιο-διάδοση πολλαπλών ορόφων σε τοπολογία γραφείου και τα συγκριτικά μέσα σφάλματα κάθε προτεινόμενης λύσης. Μπορούμε να θεωρήσουμε πως κάθε μία από τις 3 λύσεις αντιστοιχεί σε μία βέλτιστη πρόταση για κάθε μία από τις εξής υποπεριπτώσεις:

Αν υπάρχει σταθερή διαφορά 1 ορόφου ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη, συνίσταται το μοντέλο ITU-1. Αν υπάρχει διαφορά 2 ορόφων ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη, συνίσταται το μοντέλο ITU-3. Αν υπάρχει μεταβλητός αριθμός ορόφων, δηλαδή ο δέκτης δεν είναι πάντα στον ίδιο όροφο, τότε το μοντέλο ITU-2 παρέχει την πλέον αξιόπιστη λύση για το σύνολο των μετρήσεων που αφορούν και στους 2 ορόφους. Σε κάθε περίπτωση, όλες οι προτεινόμενες λύσεις είναι πιο αξιόπιστες από την αρχικά προτεινόμενη τιμή του συντελεστή εξασθένησης πατωμάτων της ITU για τοπολογίες γραφείου.

Τέλος, στον πίνακα 2.15 απεικονίζονται οι προβλέψεις των προτεινόμενων μοντέλων ITU για σενάριο πολλαπλών ορόφων και τα αντίστοιχα μέσα σφάλματα σε σύγκριση με τις μετρήσεις.

Πίνακας 2.14. Προτεινόμενες τιμές του μοντέλου ITU (πολλαπλοί όροφοι)

Average Error (%)	4n	5.5n	7.5(n+1)
1-floor difference	2,606	3,566	4,186
2-floor difference	4,607	3,654	3,05
multiple floor	3,607	3,602	3,618

Πίνακας 2.15. Σύγκριση προβλέψεων προτεινόμενων μοντέλων ITU με τις μετρήσεις και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία (πολλαπλοί όροφοι)

Location	T-R distance (m)	Pr (dBm)	ITU 1 Lf(n)=4n	Error-1 %	ITU 2 Lf(n)=5.5n	Error - 2 %	ITU 3 Lf(n)=7.5*(n+1)	Error - 3 %
A' (1-f)	5.8	-60	-55.2	8	-56.7	5.5	-59.3	1.16
B'	11.4	-67	-66.1	1.34	-67.6	0.89	-67.5	0.74
C'	10.9	-62	-65.3	5.32	-66.8	7.74	-67.05	8.14
D'	10.4	-58	-64.6	11.37	-66.1	13.96	-66.48	14.62
E'	11.4	-67	-66.1	1.34	-67.6	0.89	-67.5	0.74
F'	20.2	-77	-75.3	2.2	-76.8	0.25	-74.55	3.18
G'	17.7	-77	-73.1	5.06	-74.6	3.11	-72.9	5.32
H'	17.7	-75	-73.1	2.53	-74.6	0.53	-72.9	2.8
I'	16.7	-73	-72.2	1.09	-73.7	0.95	-72.2	1.09
J'	17.7	-76	-73.1	3.81	-74.6	1.84	-72.9	4.07
A'' (2-f)	9.6	-78	-67.3	13.71	-70.4	9.74	-73	6.41
B''	15.2	-76	-74.7	1.71	-77.7	2.23	-78.4	3.15
C''	17.9	-76	-77.3	1.71	-80.3	5.65	-80.5	5.92
D''	18.9	-81	-78.2	3.45	-81.2	0.24	-81.24	0.29
E''	24.2	-81	-82.2	1.48	-85.2	5.18	-84.2	3.95
F''	12.9	-76	-72	5.26	-75	1.31	-76.6	0.78
G''	17.5	-81	-77	4.93	-80	1.23	-80.31	0.85

2.3.3 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία βιβλιοθήκης

Για την τοπολογία της βιβλιοθήκης που αντιμετωπίζουμε σενάρια μετρήσεων ιδίου ορόφου σε μία τοπολογία με εμπόδια, OLOS μονοπάτια οδεύσεως και απώλειες σκίασης, το πρόβλημα αριθμητικής διόρθωσης του μοντέλου ITU ανάγεται στην ίδια μεθοδολογία όπως στην περίπτωση της τοπολογίας γραφείου (σενάριο μετρήσεων ιδίου ορόφου).

Σκοπός μας δηλαδή είναι η παροχή ενός συντελεστή εξασθένησης ισχύος που θα μεταβάλλεται ανάλογα με την απόσταση πομπού-δέκτη (distance dependent power decay index) και ο οποίος θα βελτιώσει την αξιοπιστία των προβλέψεων του μοντέλου με βάσει τις μετρήσεις.

Στον πίνακα 2.16 απεικονίζονται οι προτεινόμενες διορθώσεις στον συντελεστή εξασθένησης ισχύος ανάλογα με την τιμή της απόστασης πομπού-δέκτη.

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, η διόρθωση αυτή στο μοντέλο ITU επιφέρει μία μείωση του μέσου σφάλματος από 15.43% σε 12.51%.

Πίνακας 2.16. Προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου ITU

d (m)	N adj
$d < 13.5$	21
$13.5 < d < 25$	26
$d > 25$	33

2.3.4 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία αεροδρομίου

Όπως διαπιστώσαμε στην προηγούμενη ενότητα, οι αρχικές συστάσεις του μοντέλου ITU για την τοπολογία του αεροδρομίου αποδείχτηκαν αναξιόπιστες. Καθοριστικό ρόλο έπαιξε η αδυναμία των συστάσεων, να ακολουθήσουν την ιδιαιτερότητα της τοπολογίας σε ό,τι αφορά στον μηχανισμό ράδιο-διάδοσης (ανακλάσεις), την εκτεταμένη περιοχή κάλυψης κάθε AP και το κυρίαρχο στοιχείο της LOS τοπολογίας με OLOS συμπληρωματικές (ή επικρατούσες ανά περίπτωση) τοποθεσίες. Στον πίνακα 2.17 απεικονίζονται οι προτεινόμενες διορθώσεις στον συντελεστή εξασθένησης ισχύος ανάλογα με την τιμή της απόστασης πομπού-δέκτη.

Πίνακας 2.17. Προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου ITU

AP1		AP2		AP3	
d (m)	N	d (m)	N	d (m)	N
d<30	18	d<25	16	d<30	16
30<d<55	20	25<d<65	19	30<d<55	18
55<d<70	22	65<d<80	22	55<d<70	20
d>70	27	d>80	24	d>70	22

Η βελτιστοποίηση της αξιοπιστίας του μοντέλου ITU είναι ιδιαίτερα σημαντική για την εν λόγω τοπολογία καθώς, όπως προαναφέραμε, η ακαταλληλότητα χρήσης του μοντέλου λογαριθμικής απόστασης και του μοντέλου MWF καθιστούν το μοντέλο ITU ως το πλέον κατάλληλο για να περιγράψει μία τέτοια τοπολογία. Στις εικόνες 2.28 έως 2.30 πραγματοποιείται η σύγκριση των προβλέψεων του αρχικού και του προτεινόμενου μοντέλου ITU με τις μετρήσεις για ένα AP.

Εικόνα 2.28. Σύγκριση προβλέψεων αρχικού και προτεινόμενου μοντέλου ITU με μετρήσεις (AP1)

Εικόνα 2.29. Σύγκριση προβλέψεων αρχικού και προτεινόμενου μοντέλου ITU με μετρήσεις (AP2)

Εικόνα 2.30. Σύγκριση προβλέψεων αρχικού και προτεινόμενου μοντέλου ITU με μετρήσεις (AP3)

Πίνακας 2.18. Σύγκριση προβλέψεων αρχικού και προτεινόμενου μοντέλου ITU και αντίστοιχο μέσο σφάλμα για κάθε τοποθεσία

Commercial Scenarios	Original ITU Model Error (%)	Proposed ITU Model Error (%)
AP1	11.854	9.488
AP2	12.008	6.963
AP3	12.3	6.396

Ο πίνακας 2.18 παρουσιάζει συγκεντρωτικά το μέσο σφάλμα για το αρχικό και το προτεινόμενο μέσο σφάλμα για κάθε σενάριο ράδιο-διάδοσης. Σε κάθε περίπτωση, το προτεινόμενο μοντέλο ITU επιφέρει μείωση του μέσου σφάλματος.

Για το AP2 και το AP3, επέρχεται μία βελτίωση της τάξης του 42% και 48% αντίστοιχα σε σχέση με το αρχικό μοντέλο ITU. Για το AP1, το σφάλμα του προτεινόμενου μοντέλου είναι υψηλότερο από ό,τι στις άλλες 2 περιπτώσεις, αλλά και πάλι είναι μικρότερο από 10% (9.488%) και επιφέρει μία βελτίωση της τάξης του 20% σε σχέση με το αρχικό μοντέλο της ITU. Συνολικά, το προτεινόμενο διορθωμένο μοντέλο ITU επιφέρει μία βελτίωση της τάξης του 37% σε σχέση με το αρχικό μοντέλο ITU.

Αξίζει επίσης να επισημάνουμε πως σε σχέση με το μοντέλο ελεύθερου χώρου, το προτεινόμενο διορθωμένο μοντέλο ITU επιφέρει μία βελτίωση της τάξης του 10%, του 35% και του 21% για τα AP1, AP2, AP3 αντίστοιχα. Συνολικά, το προτεινόμενο διορθωμένο μοντέλο ITU επιφέρει μία βελτίωση της τάξης του 22% σε σχέση με το μοντέλο ελεύθερου χώρου.

Τέλος, σε σύγκριση με το μοντέλο One-Slope, το προτεινόμενο μοντέλο ITU επιφέρει μία βελτίωση της τάξης του 13%, 29% και 18% για τα AP1, AP2, AP3 αντίστοιχα και μία συνολική βελτίωση της τάξης του 20%.

2.3.5 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία οικίας

Η τοπολογία οικίας αποτελεί παραπλήσια περίπτωση με την τοπολογία γραφείου και βιβλιοθήκης, όπου το πρόβλημα συνίσταται στην εύρεση ενός κατάλληλου συντελεστή εξασθένησης ισχύος για να εκφράσει τις απώλειες οδεύσεως που διακρίνονται σε απώλειες ελεύθερου χώρου και σε απώλειες λόγω σκίασης.

Παρατηρούμε ιδιαίτερα για την τοπολογία οικίας πως οι απώλειες λόγω εμποδίων είναι ιδιαίτερα αυξημένες και πως η εξασθένηση είναι υψηλότερη από τις υπόλοιπες τοπολογίες που εξετάσαμε. Ενδεικτικό είναι πως η εμβέλεια του 802.11g δικτύου είναι μικρότερη στην τοπολογία οικίας από ό,τι στις άλλες περιπτώσεις.

Η αρχική τιμή του συντελεστή εξασθένησης ισχύος αποδείχτηκε ακατάλληλη. Ταυτόχρονα, επιβεβαιώθηκε πως και σε αυτήν την τοπολογία ο συντελεστής εξασθένησης ισχύος είναι distance-dependent. Ως εκ τούτου, πραγματοποιήθηκε η διορθωτική παραμετροποίηση που απεικονίζεται στον πίνακα 2.19.

Για το σενάριο πολλαπλών ορόφων, ο συντελεστής εξασθένησης ισχύος υιοθετεί την τιμή 40.

Όπως φάνηκε και από την συγκεντρωτική καταγραφή των μέσων σφαλμάτων στον πίνακα 2.11 στην προηγούμενη ενότητα, το διορθωμένο προτεινόμενο μοντέλο ITU παρουσιάζει και στις μετρήσεις ιδίου ορόφου και στις μετρήσεις πολλαπλών ορόφων ένα μέσο σφάλμα μικρότερο του 10%, αποτελώντας την καλύτερη εναλλακτική απέναντι στο μοντέλο MWF.

Πίνακας 2.19. Προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου ITU

d (m)	N adj
d < 11	35.3
d > 11	47.4

2.4 Ποσοτικός και ποιοτικός προσδιορισμός της εξασθένησης ανά απόσταση για περιβάλλοντα εσωτερικών χώρων

2.4.1 Εισαγωγή

Η εξασθένηση ανά απόσταση έχει απασχολήσει επανειλημμένα στο παρελθόν τους ερευνητές [25-28] που επιθυμούν, υπολογίζοντας την εξασθένηση ανά απόσταση σε dB/m, να παράσχουν μία παράμετρο χαρακτηρισμού του ασύρματου διαύλου και έκφρασης των απωλειών που υπεισέρχονται λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της εκάστοτε τοπολογίας υπό εξέταση. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, υπολογίστηκε ποσοτικά και χαρακτηρίστηκε ποιοτικά η εξασθένηση ανά απόσταση στο σύνολο των προαναφερθέντων τοπολογιών [29-30].

2.4.2 Εξασθένηση ανά απόσταση

Το μοντέλο γραμμικής εξασθένησης, γνωστό και ως μοντέλο Devasirvatham υπολογίζει, την μέση απώλεια οδεύσεως σε dB ($P_L(dB)$) βάσει της απώλειας οδεύσεως αναφοράς ($P_{L0}(dB)$, reference path loss), που υπολογίζεται με βάση το κλασικό μοντέλο ελεύθερου χώρου για απόσταση αναφοράς ίση με 1 m για περιβάλλον εσωτερικού χώρου και 100 m ή συνηθέστερα 1 km για περιβάλλον εξωτερικού χώρου, της απόστασης πομπού-δέκτη d (m), του εκθέτη απώλειας οδεύσεως n , και της παραμέτρου a (dB/m) που ορίζεται ως η εξασθένηση ανά απόσταση και περιγράφει ποιοτικά και ποσοτικά, την εξασθένηση που υπεισέρχεται στο μεταδιδόμενο σήμα για την συγκεκριμένη τοπολογία που εξετάζουμε:

$$P_L(dB) = P_{L0}(dB) + 10n \log_{10}(d) + ad \quad (2.2)$$

Σε ό,τι αφορά στο μοντέλο γραμμικής εξασθένησης, η αρχική προτεινόμενη τιμή που δίδεται στον εκθέτη απώλειας οδεύσεως είναι $n = 2$, όπως και στο μοντέλο ελεύθερου χώρου. Όπως όμως εξετάσαμε στις προηγούμενες ενότητες, η τιμή που πρέπει

να αποδοθεί στον εκθέτη απώλειας οδεύσεως για περιπτώσεις που αντιστοιχούν στο μοντέλο ελεύθερου χώρου (όπως διατυπώνεται για περιβάλλοντα ανοιχτών χώρων, δηλαδή ιδανική περίπτωση χωρίς εμπόδια, με οπτική ζεύξη πομπού-δέκτη, χωρίς ανωμαλίες του εδάφους ή άλλες γεωγραφικές ιδιαιτερότητες) είναι $n = 1.8$.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως δεν χρησιμοποιούμε το μοντέλο γραμμικής εξασθένησης προκειμένου να υπολογίσουμε την μέση απώλεια οδεύσεως βάσει ενός δεδομένου εκθέτη απώλειας οδεύσεως και μίας δεδομένης εξασθένησης ανά απόσταση αλλά το αντίστροφο: χρησιμοποιούμε τις καταγεγραμμένες τιμές μέσης λαμβανόμενης ισχύος ως είσοδο (input data) στο σύστημά μας και βάσει αυτών υπολογίζουμε την εξασθένηση ανά απόσταση. Η εύρεση της βέλτιστης τιμής του εκθέτη απώλειας οδεύσεως προκύπτει από την συνθήκη:

$$n = ? \Rightarrow a > 0 \quad (2.3)$$

Ξεκινώντας με την τιμή $n = 1.8$, υπολογίζουμε την εξασθένηση ανά απόσταση a (dB/m) με δεδομένα εισόδου την απόσταση πομπού-δέκτη d (m) και τις τιμές της μέσης απώλειας οδεύσεως όπως προκύπτουν από την γνωστή ισχύ μετάδοσης του πομπού (Wi-Fi Access Point) και τις αποκτηθείσες μέσω του NETSTUMBLER τιμές της μέσης λαμβανόμενης ισχύος:

$$a = \frac{P_L(dB) - P_{L0}(dB) - 10n \log_{10}(d)}{d} \quad (2.4)$$

$$P_L(dB) = P_{t(Wi-Fi-AP)}(dBm) - P_{r(measured)}(dBm) \quad (2.5)$$

$$a = \frac{P_{t(Wi-Fi-AP)}(dBm) - P_{r(measured)}(dBm) - 10n \log_{10}(d) - 40dB}{d} \quad (2.6)$$

2.4.3 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία γραφείου

Οι μετρήσεις της μέσης λαμβανόμενης ισχύος και ο υπολογισμός της εξασθένησης ανά απόσταση παρατίθενται στον πίνακα 2.20. Ο εκθέτης της απώλειας οδεύσεως βάσει της συνθήκης της (2.3) ισούται με $n = 1.7$. Η μέση τιμή της εξασθένησης ανά απόσταση ισούται με $a = 0.985 \text{ dB} / m$.

Πίνακας 2.20. Εξασθένηση ανά απόσταση για περιβάλλον γραφείου
(μετρήσεις ιδίου ορόφου)

Pr (dBm)	a (dB/m)
-48,000	1.206
-55,000	1.215
-53,000	0.851
-54,000	0.734
-45,000	2.024
-51,000	0.697
-66,000	1.044
-71,000	1.215
-71,000	1.481
-59,000	0.971
-65,000	0.994
-75,000	1.326
-74,000	1.444
-55,000	1.394
-41,000	0.061
-40,000	0.010
-40,000	0.010
-63,000	1.170
-68,000	1.417
-49,000	0.754
-54,000	0.734
-59,000	0.927

Για τις μετρήσεις πολλαπλών ορόφων (τοποθεσίες με γράμματα χωρίς τόνο συνιστούν παρεμβολή 1 ορόφου ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη, τοποθεσίες με γράμματα και τόνο συνιστούν παρεμβολή 2 ορόφων ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη), ο εκθέτης απώλειας οδεύσεως ισούται με $n=1.8$ και έχουμε τα εξής αποτελέσματα. Η μέση τιμή της εξασθένησης ανά απόσταση ισούται με $a=1.922\text{dB}/m$:

Πίνακας 2.21. Εξασθένηση ανά απόσταση για περιβάλλον γραφείου
(μετρήσεις πολλαπλών ορόφων)

Pr (dBm)	a (dB/m)
-60,000	4.010
-64,000	1.928
-62,000	1.865
-58,000	1.605
-67,000	2.191
-77,000	1.510
-77,000	1.782
-75,000	1.669
-73,000	1.676
-76,000	1.725
-78,000	3.887
-76,000	2.087
-76,000	1.701
-81,000	1.853
-81,000	1.367
-76,000	2.559
-81,000	2.036

2.4.4 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία αεροδρομίου

Με δεδομένη την συνθήκη της (2.3), για τον υπολογισμό της εξασθένησης ανά απόσταση, ο εκθέτης απώλειας οδεύσεως στο μοντέλο γραμμικής εξασθένησης λαμβάνει την τιμή $n = 1.4$, ενώ τα αποτελέσματα για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις δίνονται στον κάτωθι πίνακα:

Πίνακας 2.22. Εξασθένηση ανά απόσταση για περιβάλλον αεροδρομίου

AP1			AP2			AP3		
Θέση	Pr (dBm)	a (dB/m)	Θέση	Pr (dBm)	a (dB/m)	Θέση	Pr (dBm)	a (dB/m)
A	-48,000	1.989	L	-58,000	0,186	A	-69,000	0.322
B	-53,000	0.362	N	-68,000	0,216	B	-58,000	0.159
C	-58,000	0.395	Q	-50,000	0,141	C	-51,000	0.209
D	-64,000	0.445	R	-50,000	0,316	D	-46,000	0.072
E	-72,000	0.366	S	-47,000	0,195	E	-41,000	1.261
L	-42,000	0.194	T	-50,000	0,759	F	-42,000	0.043
M	-43,000	0.002	U	-30,000	0,000	G	-46,000	0.031
N	-50,000	0.223	V	-37,000	0,140	H	-53,000	0.193
O	-55,000	0.140	W	-42,000	0,071	I	-58,000	0.167
P	-64,000	0.291	X	-52,000	0,319	J	-53,000	0.066
Q	-44,000	0.244	Y	-55,000	0,195	K	-61,000	0.244
R	-47,000	0.118	Z	-53,000	0,159			
S	-45,000	0.137						
T	-53,000	0.170						
U	-54,000	0.139						
V	-60,000	0.180						

Για κάθε Access Point η μέση τιμή της εξασθένησης ανά απόσταση δίνεται από τον παρακάτω πίνακα. Η ολική μέση τιμή της εξασθένησης ανά απόσταση για την τοπολογία του Διεθνούς Αεροδρομίου ισούται με $a = 0.271dB/m$.

Πίνακας 2.23. Μέση εξασθένηση ανά απόσταση για περιβάλλον αεροδρομίου

Πομποί μετάδοσης	Μέση εξασθένηση ανά απόσταση (dB/m)
AP1 (Pt=19 dBm)	0.337
AP2 (Pt=21 dBm)	0.225
AP3 (Pt=16 dBm)	0.251

2.4.5 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία βιβλιοθήκης

Ο εκθέτης απώλειας οδεύσεως κατ' εφαρμογή της συνθήκης της (2.3) ισούται, όπως και στην περίπτωση του Αεροδρομίου, με $n = 1.4$, ενώ τα αποτελέσματα για κάθε μία από τις τοποθεσίες μετρήσεων δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί. Η μέση εξασθένηση ανά απόσταση ισούται με $a = 1.242 \text{ dB} / m$:

Πίνακας 2.24. Εξασθένηση ανά απόσταση για περιβάλλον βιβλιοθήκης

Pr(dBm)	a (dB/m)
-54	6.065
-65	8.661
-39	0.360
-58	2.767
-37	0.011
-38	0.004
-45	0.433
-62	1.627
-69	2.161
-49	0.598
-51	0.656
-54	0.748

Κεφάλαιο 2

-52	0.621
-43	0.058
-56	0.847
-56	0.791
-63	1.168
-58	0.831
-62	1.038
-63	1.078
-54	0.553
-66	1.005
-58	0.564
-66	0.825
-65	0.744
-75	1.062
-77	1.096
-55	0.320
-78	0.998
-78	0.768
-68	0.499
-81	0.801

2.4.6 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία οικίας

Ο εκθέτης απώλειας οδεύσεως βάσει της συνθήκης της (2.3) ισούται με $n = 1.8$ που είναι η «μέγιστη» τιμή που μπορεί να λάβει ο εκθέτης στο μοντέλο γραμμικής εξασθένησης για περιβάλλοντα εσωτερικών χώρων. Όπως θα δούμε στη συνέχεια, αυτό το γεγονός δεν είναι τυχαίο αλλά σχετίζεται με τα αποτελέσματα που προέκυψαν και τα οποία παρατίθενται στους πίνακες που ακολουθούν.

Η μέση τιμή της εξασθένησης ανά απόσταση για τις μετρήσεις του ιδίου ορόφου ισούται με $a = 2.246 \text{ dB} / m$.

Πίνακας 2.25. Εξασθένηση ανά απόσταση για περιβάλλον οικίας
(μετρήσεις ιδίου ορόφου)

Pr(dBm)	a (dB/m)
-23	0.000
-37	2.982
-42	4.161
-34	0.596
-35	0.716
-53	4.964
-36	0.118
-48	2.567
-57	4.403
-53	3.385
-45	1.633
-45	1.633
-48	2.059
-46	1.287
-57	2.980
-51	1.746
-56	2.213

-57	2.103
-55	1.566
-59	1.937
-62	1.889
-80	3.296
-77	2.688
-72	2.216
-81	2.716
-76	2.312
-74	2.040
-87	2.695

Στις μετρήσεις πολλαπλού ορόφου ανάμεσα στο ισόγειο και τον πρώτο όροφο όπου βρίσκεται το διαμέρισμα και το εγκατεστημένο Wi-Fi δίκτυο που εξετάζουμε, παρατηρούμε πως ο εκθέτης απώλειας οδεύσεως λαμβάνει και πάλι την τιμή $n = 1.8$, ενώ η μέση τιμή της εξασθένησης ανά απόσταση είναι ακόμα μεγαλύτερη και ισούται, για το σενάριο πολλαπλών ορόφων, με $a = 6.112dB / m$.

Πίνακας 2.26. Εξασθένηση ανά απόσταση για περιβάλλον οικίας
(μετρήσεις πολλαπλών ορόφων)

Pr(dBm)	a (dB/m)
-47	5.137
-58	8.617
-62	9.346
-64	8.178
-51	4.605
-73	8.660
-69	6.491

-74	7.295
-68	6.017
-76	6.284
-74	4.284
-78	4.633
-79	4.686
-84	4.133
-85	3.308

Έχοντας ολοκληρώσει την παράθεση των μετρήσεων και των υπολογισμών μας για τις διαφορετικές τοπολογίες που εξετάσαμε, μπορούμε να συνοψίσουμε τα ευρήματα και τα συμπεράσματά μας.

Στον πίνακα 2.27 συνοψίζονται τα βασικότερα αριθμητικά ευρήματά μας ως προς την μέση εξασθένηση ανά απόσταση (dB/m) και τον εκθέτη απώλειας οδεύσεως, αναφορικά με την τιμή του στο μοντέλο γραμμικής εξασθένησης βάσει της συνθήκης της (2.3).

Πίνακας 2.27. Μέση εξασθένηση ανά απόσταση για όλες τις τοπολογίες

Τοπολογίες εσωτερικών χώρων	n	Μέση εξασθένηση ανά απόσταση (dB/m)
Αεροδρόμιο	1.4	0.271
Γραφείο (ίδιος όροφος)	1.7	0.985
Βιβλιοθήκη	1.4	1.242
Γραφείο (πολλαπλοί όροφοι)	1.8	1.922
Οικία (ίδιος όροφος)	1.8	2.246
Οικία (πολλαπλοί όροφοι)	1.8	6.112

Παρατηρούμε ότι οι εμπορικές τοπολογίες (Αεροδρόμιο, Βιβλιοθήκη) εμφανίζουν κοινό εκθέτη απώλειας οδεύσεως ίσο με $n = 1.4$, τιμή αρκετά χαμηλότερη από αυτή που συνηθίζεται ακόμα και σε περιπτώσεις βέλτιστου ασύρματου διαύλου (LOS). Η εξήγηση έγκειται στην απαρέγκλιτη τήρηση της συνθήκης της (2.3) για θετική (οριακά μηδενική) τιμή της εξασθένησης ανά απόσταση, που δεσμεύει την μέγιστη επιτρεπτή τιμή του εκθέτη απώλειας οδεύσεως, ξεκινώντας από την τιμή του μοντέλου ελεύθερου χώρου (ιδανική περίπτωση) $n = 1.8$, που εφαρμόζεται όπως βλέπουμε στις τοπολογίες γραφείου και οικίας, για μετρήσεις ιδίου αλλά και πολλαπλών ορόφων.

Ως προς τις τιμές της μέσης εξασθένησης ανά απόσταση για κάθε τοπολογία, παρατηρούμε πως οι δύο εμπορικές τοπολογίες διαφοροποιούνται αισθητά μεταξύ τους, με το Αεροδρόμιο να δίνει την πιο χαμηλή εξασθένηση ανά απόσταση, επιβεβαιώνοντας τα ευρήματά μας ως προς την ενισχυτική δράση των φαινομένων ανάκλασης στην ευρύχωρη αίθουσα αναχωρήσεων. Από την άλλη πλευρά, η Βιβλιοθήκη δίνει μία αισθητά μεγαλύτερη εξασθένηση, αν και κάτω από τις τιμές που παρατηρούνται σε τοπολογίες επιχειρήσεων και σπιτιών, κάτι που επιβεβαιώνεται και στην παρούσα εργασία.

Η τοπολογία γραφείου για τις μετρήσεις του ιδίου ορόφου δίνει βέβαια μία μέση εξασθένηση ανά απόσταση συγκρίσιμη και μάλιστα οριακά χαμηλότερη από αυτήν της Βιβλιοθήκης. Αυτό όμως εξηγείται από την ιδιομορφία της συγκεκριμένης τοπολογίας με την μεγάλη αίθουσα συσκέψεων στο μέσο του ορόφου, που διαφοροποιείται από το κλασικό σενάριο των ομοιογενών σταθμών εργασίας (office cubicles) που απαρτίζουν την συνήθη εικόνα μίας τοπολογίας γραφείου. Αυτό αντανακλάται και στην μικρή αλλά υπαρκτή διαφοροποίηση του εκθέτη απώλειας οδεύσεως που ισούται με $n = 1.7$.

Στις μετρήσεις πολλαπλών ορόφων για την τοπολογία γραφείου και για όλες τις περιπτώσεις της τοπολογίας οικίας, έχουμε $n = 1.8$. Η μέση εξασθένηση ανά απόσταση αυξάνεται αισθητά, σε σύμπνοια και με άλλα δημοσιευμένα αποτελέσματα στη βιβλιογραφία [25-28].

2.4.7 Μεθοδολογίες υπολογισμού της εξασθένησης ανά απόσταση

Η συνθήκη (2.3) έχει ως σκοπό τον υπολογισμό μίας αυστηρά θετικής εξασθένησης ανά απόσταση, όπου όλες οι απώλειες της τοπολογίας θα εκφράζονται από την παράμετρο a (dB/m) και ο εκθέτης απωλειών οδεύσεως που προκύπτει από την σχέση (2.3) θα είναι εκφραστής μονάχα των απωλειών λόγω μετάδοσης στο κενό (ελεύθερου χώρου). Στην πραγματικότητα όμως, η συνθήκη αυτή δεν μπορεί να εξασφαλίσει έναν σαφή ποιοτικό διαχωρισμό των απωλειών αλλά επιφέρει μία ποσοτική προσπάθεια έκφρασης αυτού του διαχωρισμού.

Στα πλαίσια της περαιτέρω διερεύνησης της εξασθένησης ανά απόσταση και του εμπλουτισμού της μεθοδολογίας υπολογισμού της σε τοπολογίες εσωτερικών χώρων με σύνθετο περιβάλλον ράδιο-διάδοσης, υιοθετήσαμε [30] μία διαφοροποίηση από την αρχική συνθήκη της σχέσης (2.3) και προκρίναμε τον υπολογισμό της εξασθένησης ανά απόσταση με 3 διαφορετικούς τρόπους αναλόγως την θεώρηση που κάνουμε για τον εκθέτη απωλειών οδεύσεως:

(α) θεωρώντας σταθερό (fixed) εκθέτη απωλειών οδεύσεως, ίσο με 1.8, σε σύμπτωση με το μοντέλο ελεύθερου χώρου για τοπολογίες εσωτερικών χώρων (αλλά και το μοντέλο MWF)

(β) θεωρώντας μεταβλητό (variable) εκθέτη απωλειών οδεύσεως, όπου η συνθήκη (2.3) θα εφαρμόζεται σε κάθε μία τοποθεσία μετρήσεως ξεχωριστά και ανεξάρτητα από την τιμή του εκθέτη απωλειών οδεύσεως στις υπόλοιπες τοποθεσίες της ίδιας τοπολογίας

(γ) θεωρώντας έναν οικουμενικό (universal) εκθέτη απωλειών οδεύσεως που θα προκύπτει από την σχέση (2.3) για το σύνολο της τοπολογίας, όπως εφαρμόστηκε στην προηγούμενη ενότητα [29].

Εφαρμόζοντας την μέθοδο (α) με τον σταθερό εκθέτη απωλειών οδεύσεως είναι αναπόφευκτο να οδηγηθούμε σε αρνητικές τιμές της εξασθένησης ανά απόσταση. Η φυσική σημασία μίας τέτοιας αρνητικής τιμής είναι πως σε αυτήν την περίπτωση φαινόμενα ανάκλασης μπορούν να λειτουργήσουν ενισχυτικά στο σήμα σε σχέση με την απλή διάδοση στο κενό, όπως άλλωστε προκύπτει και το ότι η τιμή 1.8 του εκθέτη απωλειών οδεύσεως για εσωτερικούς χώρους σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή 2 για εξωτερικούς χώρους εκφράζει μία πιο ενισχυμένη, από άποψη στάθμης σήματος, φύση της LOS μετάδοσης για εσωτερικά περιβάλλοντα σε σχέση με ανοικτούς χώρους.

Εφαρμόζοντας τις τρεις παραπάνω μεθόδους σε έκαστη τοπολογία εσωτερικού χώρου, έχουμε κατ' αρχάς για την τοπολογία οικίας, την απλούστερη περίπτωση όπου οι 3 μέθοδοι ταυτίζονται και ο εκθέτης απωλειών οδεύσεως είναι σε κάθε περίπτωση ίσος με 1.8. Η μέση τιμή της εξασθένησης ανά απόσταση δίδεται από την προηγούμενη ενότητα.

Για την τοπολογία γραφείου, τα αποτελέσματα για κάθε μέθοδο απεικονίζονται στον πίνακα 2.28. Παρατηρούμε πως για την περίπτωση μετρήσεων ιδίου ορόφου, και οι 3 μέθοδοι εμφανίζουν πρακτικά ταυτόσημα αποτελέσματα, με την μέση εξασθένηση ανά απόσταση να είναι περίπου ίση με 0.94 dB/m.

Στην περίπτωση διάδοσης σε πολλαπλούς ορόφους, ο εκθέτης απωλειών οδεύσεως είναι ίσος με 1.8 και αυτό συνεπάγεται μία σημαντική αύξηση στην μέση τιμή της εξασθένησης ανά απόσταση, που ισούται με 1.92 dB/m.

Πίνακας 2.28. Μέση εξασθένηση ανά απόσταση για όλες τις μεθόδους
(τοπολογία γραφείου)

Scheme	n	a (dB/m)
same floor/fixed n	1.8	0.90
same floor/variable n	1.7-1.8	0.92
same floor/universal n	1.7	0.99
multiple floors	1.8	1.92

Για την τοπολογία της βιβλιοθήκης, τα αποτελέσματα για κάθε μέθοδο απεικονίζονται στον πίνακα 2.29. Παρατηρούμε πως στην περίπτωση του μεταβλητού εκθέτη απωλειών οδεύσεως έχουμε ένα αξιοσημείωτο εύρος τιμών, από 1.4 έως 1.8. Αυτή η διακύμανση του εκθέτη απωλειών οδεύσεως απεικονίζεται και στην διαφορά στην μέση εξασθένηση ανά απόσταση ανάμεσα στον σταθερό εκθέτη απωλειών οδεύσεως και τον οικουμενικό.

Πίνακας 2.29. Μέση εξασθένηση ανά απόσταση για όλες τις μεθόδους
(τοπολογία βιβλιοθήκης)

Scheme	n	a (dB/m)
fixed n	1.8	0.93
variable n	1.4-1.8	0.98
universal n	1.4	1.24

Για την τοπολογία του αεροδρομίου, τα αποτελέσματα για κάθε μέθοδο απεικονίζονται στους πίνακες 2.30 έως 2.32. Παρατηρούμε πως όπως και στην περίπτωση της βιβλιοθήκης, για τον μεταβλητό εκθέτη απωλειών οδεύσεως έχουμε ένα αξιοσημείωτο εύρος τιμών, από 1.4 έως 1.8. Αυτή η διακύμανση του εκθέτη απωλειών οδεύσεως απεικονίζεται και στην διαφορά στην μέση εξασθένηση ανά απόσταση ανάμεσα στον σταθερό εκθέτη απωλειών οδεύσεως και τον οικουμενικό. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την τοπολογία αεροδρομίου παρουσιάζονται στον πίνακα 2.33.

Πίνακας 2.30. Μέση εξασθένηση ανά απόσταση για όλες τις μεθόδους
(τοπολογία αεροδρομίου, AP1)

Scheme	n	a (dB/m)
fixed n	1.8	0.16
variable n	1.4-1.8	0.19
universal n	1.4	0.34

Πίνακας 2.31. Μέση εξασθένηση ανά απόσταση για όλες τις μεθόδους
(τοπολογία αεροδρομίου, AP2)

Scheme	n	a (dB/m)
fixed n	1.8	0.02
variable n	1.4-1.8	0.08
universal n	1.4	0.23

Πίνακας 2.32. Μέση εξασθένηση ανά απόσταση για όλες τις μεθόδους
(τοπολογία αεροδρομίου, AP3)

Scheme	n	a (dB/m)
fixed n	1.8	0.06
variable n	1.4-1.8	0.12
universal n	1.4	0.25

Πίνακας 2.33. Μέση εξασθένηση ανά απόσταση για όλες τις μεθόδους
(τοπολογία αεροδρομίου, συγκεντρωτικά)

Scheme	n	a (dB/m)
fixed n	1.8	0.08
variable n	1.4-1.8	0.13
universal n	1.4	0.27

2.4.8 Χαρακτηρισμός της εξασθένησης ανά απόσταση

Για τον χαρακτηρισμό της κατανομής της εξασθένησης ανά απόσταση σε κάθε τοπολογία ράδιο-διάδοσης, υπολογίζουμε την συνάρτηση που περιγράφει καλύτερα την σχέση της εξασθένησης ανά απόσταση με την απόσταση κάθε σημείου μετρήσεως από τον πομπό. Πραγματοποιούμε δηλαδή ένα Goodness-of-fit για την διασπορά των τιμών της εξασθένησης ανά απόσταση εντός της τοπολογίας.

Ξεκινώντας από την τοπολογία γραφείου, για το περιβάλλον μετρήσεων ιδίου ορόφου, θα χρησιμοποιήσουμε την εκθετική συνάρτηση (Power model), το πολυώνυμο τρίτου βαθμού (cubic polynomial) και το άθροισμα ημιτόνων (sum of sin functions) τα οποία απεικονίζονται στις κάτωθι εξισώσεις:

$$f(x) = ax^b + c \quad (2.7)$$

$$f(x) = p_1x^3 + p_2x^2 + p_3x + p_4 \quad (2.8)$$

$$f(x) = a_1 \sin(b_1x + c_1) + a_2 \sin(b_2x + c_2) \quad (2.9)$$

Τα αποτελέσματα του curve-fitting απεικονίζονται στον πίνακα 2.34 και στην εικόνα 2.31. Η αξιολόγηση του curve-fitting γίνεται με βάση το τετραγωνικό σφάλμα (R-Square) και το προσαρμοσμένο τετραγωνικό σφάλμα (adjusted R-Square).

Πίνακας 2.34. Curve-fitting για τοπολογία γραφείου (ίδιος όροφος)

Goodness-of-Fit	Power Model	Cubic Polynomial	Sum of Sin Function
R-Square	0.134	0.496	0.664
Adjusted R-Square	0.043	0.412	0.4573

Εικόνα 2.31. Curve-fitting για τοπολογία γραφείου (ίδιος όροφος)

Εικόνα 2.32. Curve-fitting για τοπολογία γραφείου (πολλαπλοί όροφοι)

Πίνακας 2.35. Curve-fitting για τοπολογία γραφείου (πολλαπλοί όροφοι)

Goodness-of-Fit	Power Model	5th degree Polynomial
R-Square	0.645	0.689
Adjusted R-Square	0.622	0.548

Τα αποτελέσματα του curve-fitting για το περιβάλλον πολλαπλών ορόφων της τοπολογίας γραφείου απεικονίζονται στον πίνακα 2.35 και στην εικόνα 2.32. Χρησιμοποιήθηκε εκ νέου το power model και το πολυώνυμο 5^{ου} βαθμού (5th degree polynomial) που δίδεται από την εξής σχέση:

$$f(x) = p_1x^5 + p_2x^4 + p_3x^3 + p_4x^2 + p_5x + p_6 \quad (2.10)$$

Για την τοπολογία αεροδρομίου χρησιμοποιείται για curve-fitting το power model και το πολυώνυμο 4^{ου} βαθμού (2.11). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στους πίνακες 2.36-2.38.

$$f(x) = p_1x^4 + p_2x^3 + p_3x^2 + p_4x + p_5 \quad (2.11)$$

Πίνακας 2.36. Curve-fitting για τοπολογία αεροδρομίου (AP1)

Goodness-of-Fit	Power Model	4-th degree Polynomial
R-Square	0.890	0.869
Adjusted R-Square	0.873	0.822

Πίνακας 2.37. Curve-fitting για τοπολογία αεροδρομίου (AP2)

Goodness-of-Fit	Power Model	4-th degree Polynomial
R-Square	0.647	0.443
Adjusted R-Square	0.569	0.125

Πίνακας 2.38. Curve-fitting για τοπολογία αεροδρομίου (AP3)

Goodness-of-Fit	Power Model	4-th degree Polynomial
R-Square	0.771	0.905
Adjusted R-Square	0.713	0.842

Για την τοπολογία αεροδρομίου, οι γραφικές παραστάσεις που απεικονίζουν το curve-fitting για κάθε AP αντιστοιχούν στις εικόνες 2.33 έως 2.35.

Εικόνα 2.33. Curve-fitting για τοπολογία αεροδρομίου (AP1)

Εικόνα 2.34. Curve-fitting για τοπολογία αεροδρομίου (AP2)

Εικόνα 2.35. Curve-fitting για τοπολογία αεροδρομίου (AP3)

Πίνακας 2.39. Curve-fitting για τοπολογία βιβλιοθήκης

Goodness-of-Fit	Power Model	5-th degree Polynomial
R-Square	0.790	0.786
Adjusted R-Square	0.775	0.744

Για την τοπολογία της βιβλιοθήκης, χρησιμοποιήθηκε για curve-fitting της εξασθένησης ανά απόσταση με την απόσταση το power model και το πολυώνυμο 5^{ου} βαθμού. Στον πίνακα 2.39 απεικονίζονται το τετραγωνικό σφάλμα και το προσαρμοσμένο τετραγωνικό σφάλμα για κάθε μοντέλο και στην εικόνα 2.36 οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις.

Εικόνα 2.36. Curve-fitting για τοπολογία βιβλιοθήκης

Τέλος, για την τοπολογία οικίας, για το περιβάλλον μετρήσεων ιδίου ορόφου, θα χρησιμοποιήσουμε την εκθετική συνάρτηση (Power model), το πολυώνυμο πέμπτου βαθμού (cubic polynomial) και το άθροισμα ημιτόνων (sum of sin functions). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στον πίνακα 2.40 και στην εικόνα 2.37.

Για το σενάριο μετρήσεων πολλαπλών ορόφων της τοπολογίας οικίας, χρησιμοποιείται το γραμμικό πολυώνυμο (2.12) και το άθροισμα ημιτόνων (sum of sin functions). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στον πίνακα 2.41 και στην εικόνα 2.38.

$$f(x) = p_1 x + p_2 \quad (2.12)$$

Πίνακας 2.40. Curve-fitting για τοπολογία οικίας (ίδιος όροφος)

Goodness-of-Fit	Power Model	Sum of Sin Function
R-Square	0.141	0.4367
Adjusted R-Square	0.072	0.04947

Πίνακας 2.41. Curve-fitting για τοπολογία οικίας (πολλαπλοί όροφοι)

Goodness-of-Fit	Linear Pol.	Sum of Sin Function
R-Square	0.549	0.577
Adjusted R-Square	0.514	0.341

Εικόνα 2.37. Curve-fitting για τοπολογία οικίας (ίδιος όροφος)

Εικόνα 2.38. Curve-fitting για τοπολογία οικίας (πολλαπλοί όροφοι)

2.5 Συμβολή στη μοντελοποίηση ασύρματου καναλιού με διαλείψεις και σκίαση σε HAP δίκτυα με παρεμβολές

2.5.1 Εισαγωγή

Οι πλατφόρμες μεγάλου υψομέτρου (High Altitude Platforms - HAPs), είναι μη επανδρωμένα αεροσκάφη τα οποία μεταφέρουν επικοινωνιακό εξοπλισμό και παρέχουν μια μεγάλη ποικιλία ασύρματων υπηρεσιών σε μια συγκεκριμένη περιοχή στο έδαφος. Οι τοπικές πολυσημειακές διανομές υπηρεσιών (LMDS), συμπεριλαμβανομένης της Ευρυζωνικής Σταθερής Ασύρματης Πρόσβασης (BFWA), πλοήγησης, εντοπισμού, 3G και επιπλέον, η περιβαλλοντική επιτήρηση, είναι μερικές από τις δυνατότητες που μπορεί να παρέχει αυτή η τεχνολογία.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των HAPs είναι περισσότερο εμφανή στην περίπτωση των περιοχών που πάσχουν από έλλειψη υποδομών τηλεπικοινωνιών εδάφους ή σε περιπτώσεις αναδυόμενης ανάγκης για την ασύρματη κάλυψη, που υπερβαίνουν τις δυνατότητες των σταθερών δικτύων. Τα Συστήματα Επικοινωνιών Πολλαπλών HAPs (Systems of multiple HAPS), παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, δεδομένου ότι βελτιώνουν την απόδοση του δικτύου, προσφέροντας ευέλικτες αρχιτεκτονικές δομές. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέρος εκτεταμένων ετερογενών δικτύων και μπορούν να συμβάλουν στην ολοκλήρωση των διαφόρων ασύρματων δικτύων.

2.5.2 Συμβολή στην μοντελοποίηση ασύρματου διαύλου HAP δικτύου

Στα πλαίσια εργασιών που εξέτασαν έναν αστερισμό τεσσάρων HAPs στη στρατόσφαιρα, που εξυπηρετεί μια περιοχή στο έδαφος [31-32], διερευνήσαμε μεταξύ άλλων το ενδεχόμενο να έχουμε ένα “worst-case” σενάριο σε ο,τι αφορά την ασύρματη ζεύξη ανάμεσα στα HAPs και τους χρήστες εδάφους. Οι πλατφόρμες μοιράζονται το ίδιο εύρος ζώνης και χρησιμοποιούν κατευθυντικές κεραίες για να φωτίσουν την περιοχή, συνεπώς οι χρήστες στο έδαφος μπορεί να είναι είτε σε σταθερή είτε σε κινητή θέση και

πρέπει να φέρουν κατευθυντικές κεραίες. Η κατευθυντικότητα καθιστά δυνατή τη χρήση των κοινών πόρων από τα συστήματα μετάδοσης HAPs.

Στα πλαίσια και άλλων εργασιών που έχουν θεωρήσει εφικτή την απουσία LOS σε δορυφορικά δίκτυα ή σε δίκτυα HAPs [33-34], μοντελοποιήσαμε τον ασύρματο διάυλο θεωρώντας διαλείψεις τύπου Rayleigh και ταυτόχρονα φαινόμενα σκίασης (διαλείψεις μεγάλης κλίμακας) που ακολουθούν την Log-normal κατανομή. Ουσιαστικά υλοποιήσαμε το μοντέλο Suzuki σε περιβάλλον HAPs εξετάζοντας παράλληλα φαινόμενα παρεμβολών από τα γειτονικά HAP του αστερισμού και ζητήματα fairness κατά τη μετάδοση (broadcasting) προς συνδρομητές εδάφους.

2.6 Σύνοψη κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο διερευνήθηκε εκτενώς η αξιοπιστία και η ακρίβεια πρόβλεψης των πλέον διαδεδομένων μοντέλων απωλειών οδούσεως για 3 τοπολογίες εσωτερικών χώρων με σύνθετο περιβάλλον ράδιο-διάδοσης και έντονα φαινόμενα σκίασης και εξασθενήσεων. Παράλληλα, εξετάστηκε και μία τέταρτη τοπολογία, του Διεθνούς Αεροδρομίου Αθηνών «Ελευθέριος Βενιζέλος», με εξίσου σύνθετα χαρακτηριστικά που διαφοροποιούνται όμως από τις υπόλοιπες τοπολογίες και δη από την βιβλιοθήκη που σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση της ITU ανήκει στην ίδια «οικογένεια» τοπολογιών με το αεροδρόμιο.

Η αξιολόγηση των μοντέλων στη βάση των μετρήσεων, που ελήφθησαν με συγκεκριμένη διαδικασία, οδήγησε στην αριθμητική διόρθωση του μοντέλου ITU ούτως ώστε να αποτελεί αξιόπιστη εναλλακτική πρόταση για το μοντέλο MWF που σε κάθε περίπτωση αποδείχτηκε το πλέον αξιόπιστο πλην της τοπολογίας του αεροδρομίου που δεν χρησιμοποιήθηκε λόγω ακαταλληλότητας.

Επίσης παρουσιάστηκε εκτενής μεθοδολογία και υπολογισμός της εξασθένησης ανά απόσταση για κάθε τοπολογία και παρουσιάστηκε το curve-fitting για την γεωγραφική διασπορά των τιμών της εξασθένησης ανά απόσταση εντός κάθε τοπολογίας. Τέλος, συζητήθηκε η συμβολή στην μοντελοποίηση ασύρματου διαύλου HAP δικτύων θεωρώντας worst-case σενάριο διαλείψεων πολύ-όδευσης και σκίασης.

Κεφάλαιο 2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ποσοτικός και ποιοτικός προσδιορισμός βάθους σκίασης και διαλείψεων μεγάλης κλίμακας για τοπολογίες ράδιο-διάδοσης

3.1 Εισαγωγή

3.1.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Μία σειρά εργασιών έχουν ασχοληθεί με τα φαινόμενα σκίασης ή αλλιώς τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας [35-51]. Μετρήσεις αλλά και προσομοιώσεις που εξετάζουν τα φαινόμενα σκίασης σε επίπεδο μεγάλης κλίμακας, έτσι που η επίδραση των απωλειών να μπορεί να εκφραστεί ποσοτικά και ποιοτικά στις απώλειες οδεύσεως και να συμβάλλει στον προσδιορισμό της μέσης λαμβανόμενης ισχύς, παρέχοντας ταυτόχρονα εργαλεία για τον χαρακτηρισμό της κατανομής της τοπικής μέσης ισχύος.

Στα πλαίσια της εργασίας μας εστιάζουμε στον χαρακτηρισμό των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας για τις μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε στις τοπολογίες εσωτερικών χώρων που παρουσιάστηκαν διεξοδικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Σκοπός μας να αποσυνδέσουμε την log-normal φύση των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας με την αντίληψη της κανονικής απόκλισης ως αποκλειστικά στατιστικού μεγέθους επί καταγεγραμμένων τιμών και να αναπτύξουμε μία δυναμική μέθοδο για υπολογισμό του βάθους σκίασης από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της τοπολογίας. Η συνήθης αντίληψη στην έρευνα και την βιβλιογραφία αντιμετωπίζει τον ποσοτικό προσδιορισμό των απωλειών σκίασης ως το «υπόλοιπο» των απωλειών ελεύθερου χώρου. Στην παρούσα εργασία ανεξαρτητοποιούμε τις απώλειες σκίασης από τις απώλειες ελεύθερου χώρου.

3.1.2 Συμβολή και Επισκόπηση Κεφαλαίου

Η συμβολή του κεφαλαίου συνίσταται στα εξής καινοτόμα αποτελέσματα:

- Στην ενότητα 3.2 παρουσιάζεται ο χαρακτηρισμός των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας για τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στις τοπολογίες εσωτερικών χώρων. Διαπιστώθηκε πως σε γενικές γραμμές οι διαλείψεις αυτές ακολουθούν το log-normal μοντέλο που παραδοσιακά χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα φαινόμενα σκίασης, αλλά αποσυνδέεται από την τιμή της κανονικής απόκλισης, όπως αυτή προκύπτει από τις στατιστικές ιδιότητες των τιμών της λαμβανόμενης ισχύος. Παρατηρείται ότι η log-normal φύση των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας είναι ανεξάρτητη του αν αυτές οι διαλείψεις προκαλούνται από φαινόμενα σκίασης ή άλλους μηχανισμούς εξασθένησης σήματος.
- Στην ενότητα 3.3 παρουσιάζεται μία καινοτόμος μέθοδος για τον υπολογισμό του βάθους σκίασης (απόκλιση σκίασης) από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε τοπολογίας με εμπόδια, δηλαδή απευθείας από τις απώλειες σκίασης των εμποδίων των οποίων οι διαστάσεις είναι συγκριτικά μεγαλύτερες από το μήκος κύματος της H/M ακτινοβολίας. Η μέθοδος αυτή δεν απαιτεί εκτεταμένες μετρήσεις στην τοπολογία υπό εξέταση. Αντιθέτως, χρειαζόμαστε μονάχα τις απώλειες των εμποδίων κάθε τύπου, και οι μόνες μετρήσεις αφορούν στον εμπειρικό προσδιορισμό αυτών των απωλειών. Η μέθοδος αυτή δεν αφορά μόνο στους τοίχους και τα πατώματα, όπως το ούτως ή άλλως αξιόπιστο μοντέλο MWF αλλά επεκτείνεται σε κάθε εμπόδιο που μπορεί να επιφέρει εξασθένηση σήματος και να συνεισφέρει στις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας.

- Στην ενότητα 3.4 επεκτείνεται η εφαρμογή της προαναφερθείσας μεθόδου για τον προσδιορισμό και υπολογισμό της πλεονάζουσας απώλειας οδεύσεως (excess path loss) όχι ως «περίσσειμα» των απωλειών ελεύθερου χώρου, αλλά ως ανεξάρτητη διαδικασία απωλειών που για τοπολογίες με εμπόδια. Υπολογίζεται αναλυτικά η τιμή της εξασθένησης ανά απόσταση από το βάθος σκίασης για το σύνολο των τοποθεσιών σε κάθε τοπολογία, συγκρίνεται με τις αντίστοιχες υπολογισθείσες τιμές από τις μετρήσεις (μοντέλο γραμμικής εξασθένησης) και παρατηρούμε πως η μέθοδος είναι ακριβής για τοπολογίες με εμπόδια όπου δεν υπάρχει ή είναι αμελητέα η LOS οπτική ζεύξη. Για την τοπολογία αεροδρομίου που δεν εφαρμόζεται ο υπολογισμός του βάθους σκίασης, προτείνονται δύο εναλλακτικές μέθοδοι για τον υπολογισμό και προσδιορισμό των πλεονάζουσών απωλειών οδεύσεως (excess path loss) και της γεωγραφικής διασποράς των τιμών της εξασθένησης ανά απόσταση εντός της τοπολογίας μέσα από κλασικές συναρτήσεις curve-fitting.
- Στην ενότητα 3.5 διερευνάται η γεωγραφική διασπορά των τιμών της λαμβανόμενης ισχύος εντός της τοπολογίας του αεροδρομίου μέσα από κλασικές συναρτήσεις curve-fitting και συγκρίνεται αντιπαραθετικά με την αντίστοιχη κατανομή των τοπικών τιμών της λαμβανόμενης ισχύος ως προς την απόσταση για την τοπολογία οικίας, προκειμένου να βγουν συμπεράσματα για την διαφορετική επίδραση διαφορετικών κυρίαρχων μηχανισμών ράδιο-διάδοσης στην γεωγραφική διασπορά των τιμών της λαμβανόμενης ισχύος εντός εκάστης τοπολογίας.

3.2 Χαρακτηρισμός των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας για τοπολογίες ράδιο-διάδοσης εσωτερικών χώρων

3.2.1 Εισαγωγή

Στις τέσσερις τοπολογίες εσωτερικών χώρων που διερευνήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση των εμποδίων και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών κάθε περιβάλλοντος στην εξασθένηση της H/M ακτινοβολίας, έχει ιδιαίτερη σημασία να δούμε ποια είναι η φύση των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας (large-scale fading) και ποια είναι η κατανομή που περιγράφει τις διαλείψεις αυτές, δηλαδή τις μεταβολές της τοπικής ισχύος γύρω από την μέση τιμή (area-mean value). Ο προσδιορισμός αυτός είναι απαραίτητος προκειμένου να επαληθευτεί η ορθότητα της μεθόδου που θα παρουσιαστεί στην συνέχεια για έναν καινοτόμο υπολογισμό του βάθους σκίασης (shadow depth) που δύναται να επεκταθεί στον υπολογισμό της πλεονάζουσας απώλειας οδεύσεως (excess path loss) και της εξασθένησης ανά απόσταση.

3.2.2 Αριθμητικά αποτελέσματα

Βασισμένοι στις μετρήσεις που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, καταστρώσαμε την εμπειρική CDF (Cumulative Distribution Function, αθροιστική συνάρτηση κατανομής) για κάθε τοπολογία [52-53]. Ο πίνακας 3.1 συνοψίζει τις στατιστικές ιδιότητες της λαμβανόμενης ισχύος για κάθε περιβάλλον ράδιο-διάδοσης.

Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν (εικόνες 3.1 έως 3.8) παρατίθενται συγκριτικά η εμπειρική CDF που έχει σχεδιαστεί από τις συλλεχθείσες τιμές των μετρήσεων με την Gaussian CDF που προκύπτει από την μέση τιμή (σε dBm) και την κανονική απόκλιση (σε dB) που παρέχει ο πίνακας 3.1 για κάθε σενάριο ράδιο-διάδοσης. Σκοπός της σύγκρισης είναι να διερευνηθεί κατά πόσο οι πραγματικές μετρήσεις της τοπικής μέσης ισχύος ακολουθούν την log-normal κατανομή, σύμφωνα και με την κλασική αντίληψη για την φύση του φαινομένου διαλείψεων μεγάλης κλίμακας.

Πίνακας 3.1α. Στατιστικές ιδιότητες λαμβανόμενης ισχύος

Statistical Parameters	Office (same floor)	Office (multi-floor)	Library (same floor)
Min (dBm)	-75	-81	-81
Max (dBm)	-40	-58	-37
Mean (dBm)	-57.09	-73	-59.22
Median (dBm)	-55	-76	-58
standard deviation (dB)	10.95	7.4	11.76

Πίνακας 3.1β. Στατιστικές ιδιότητες λαμβανόμενης ισχύος

Statistical Parameters	Home (same floor)	Home (multiple floor)	Airport (AP1)	Airport (AP2)	Airport (AP3)
Min (dBm)	-90	-90	-72	-68	-69
Max (dBm)	-20	-40	-42	-30	-41
Mean (dBm)	-55	-65	-53.25	-49.33	-52.55
Median (dBm)	-55	-65	-53	-50	-53
standard deviation (dB)	16	11	8.63	9.83	8.57

Εικόνα 3.1. Σύγκριση εμπειρικής CDF και Gaussian (dBm) για τοπολογία γραφείου (ίδιος όροφος)

Εικόνα 3.2. Σύγκριση εμπειρικής CDF και Gaussian (dBm) για τοπολογία γραφείου (πολλαπλοί όροφοι)

Εικόνα 3.3. Σύγκριση εμπειρικής CDF και Gaussian (dBm) για τοπολογία βιβλιοθήκης

Εικόνα 3.4. Σύγκριση εμπειρικής CDF και Gaussian (dBm) για τοπολογία αεροδρομίου (AP1)

Εικόνα 3.5. Σύγκριση εμπειρικής CDF και Gaussian (dBm) για τοπολογία αεροδρομίου (AP2)

Εικόνα 3.6. Σύγκριση εμπειρικής CDF και Gaussian (dBm) για τοπολογία αεροδρομίου (AP3)

Εικόνα 3.7. Σύγκριση εμπειρικής CDF και Gaussian (dBm) για τοπολογία οικίας (ίδιος όροφος)

Εικόνα 3.8. Σύγκριση εμπειρικής CDF και Gaussian (dBm) για τοπολογία οικίας (πολλαπλοί όροφοι)

Ο σκοπός της σύγκρισης είναι να διερευνηθεί κατά πόσο μπορεί η log-normal κατανομή (η Gaussian κατανομή των λογαριθμικών τιμών που προκύπτει από την μέση τιμή και την κανονική απόκλιση των στατιστικών ιδιοτήτων της λαμβανόμενης ισχύος για κάθε τοπολογία) να υπολογίσει την πιθανότητα αποκοπής (Outage Probability) με παρόμοιο τρόπο όπως η CDF που σχεδιάστηκε από τα πειραματικά δεδομένα των μετρήσεων.

Παρατηρούμε με ενδιαφέρον πως η καλύτερη προσέγγιση της εμπειρικής CDF από την Gaussian (dBm) επιτυγχάνεται για την τοπολογία της βιβλιοθήκης και για την τοπολογία οικίας (ίδιος όροφος) όπου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές της κανονικής απόκλισης, δηλαδή το μεγαλύτερο «άπλωμα» τοπικών τιμών της λαμβανόμενης ισχύος γύρω από την μέση τιμή (ανά τοπολογία).

Αντιστρόφως, η πλέον εμφανής απόκλιση ανάμεσα στην εμπειρική CDF και το log-normal σενάριο παρατηρείται στην περίπτωση της τοπολογίας γραφείου (πολλαπλοί όροφοι), όπου η κανονική απόκλιση λαμβάνει την χαμηλότερη τιμή σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις (δηλαδή παρατηρείται το μικρότερο «άπλωμα» τοπικών τιμών της λαμβανόμενης ισχύος γύρω από την μέση τιμή από ό,τι στις υπόλοιπες τοπολογίες).

Σε ό,τι αφορά στις 3 περιπτώσεις της τοπολογίας του αεροδρομίου, το log-normal σενάριο προσεγγίζει καλύτερα την εμπειρική CDF στην περίπτωση του AP1, όπου έχουμε αυξημένες τις OLOS τοποθεσίες. Για τις περιπτώσεις των AP2 και AP3 που το LOS στοιχείο είναι είτε καθολικό είτε επικρατέστερο αντίστοιχα, το fit δεν είναι εξίσου αρμονικό.

Ένα βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από τα παραπάνω είναι πως ενώ σε γενικές γραμμές το log-normal σενάριο περιγράφει ικανοποιητικά την φύση της κατανομής των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας γενικά, εν τούτοις δεν μπορεί να συσχετιστεί με την δυναμική φύση των απωλειών σκίασης. Η κανονική απόκλιση δηλαδή δεν εκφράζει το κατά Jakes ορισθέν βάθος σκίασης (shadow depth) αλλά αποτελεί μονάχα μέτρο του εύρους ‘ανοίγματος’ της ψαλίδας των τοπικών τιμών της λαμβανόμενης ισχύος γύρω από την μέση τιμή (area-mean value).

Στην επόμενη ενότητα στοιχειοθετείται και τεκμηριώνεται μία καινοτόμος μέθοδος που επιτυγχάνει τον υπολογισμό της απόκλισης σκίασης (shadowing deviation) από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της εκάστοτε τοπολογίας ράδιο-διάδοσης.

3.3 Καινοτόμος μέθοδος για τον υπολογισμό του βάθους σκίασης σε τοπολογίες με εμπόδια

3.3.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα τεκμηριώνεται και παρουσιάζεται διεξοδικά μία καινοτόμος μέθοδος για τον υπολογισμό του βάθους σκίασης σε τοπολογίες με εμπόδια (obstacle-dense propagation topologies). Η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε και επαληθεύτηκε πειραματικά σε μία σειρά εργασιών που ασχολήθηκαν με τον εμπειρικό υπολογισμό του βάθους σκίασης απευθείας από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά έκαστης τοπολογίας, ανεξάρτητα από τις απώλειες λόγω διάδοσης στον χώρο, δηλαδή ανεξάρτητα από την εξασθένηση ελεύθερου χώρου και άρα την απόσταση ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη [54].

3.3.2 Αριθμητικά αποτελέσματα

Αν οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας του λαμβανόμενου σήματος είναι log-normal, τότε η πλεονάζουσα απώλεια οδεύσεως (excess path loss) είναι επίσης log-normal ως προς την κατανομή των τιμών της [6].

Με βάση την παραπάνω διαπίστωση του Jakes, μπορούμε να προσεγγίσουμε τον υπολογισμό και προσδιορισμό του excess path loss μέσα από τα φαινόμενα σκίασης. Αυτό προϋποθέτει την επίλυση του «γόρδιου δεσμού» του μοντέλου λογαριθμικής απόστασης, όπου επικρατεί το πρόβλημα της «διπλής» απόδοσης τιμών στον path loss exponent και το shadow depth (Gaussian zero-mean shadow variable). Η δυσκολία αυτή μπορεί να ξεπεραστεί αν θεωρήσουμε τις απώλειες σκίασης ως ανεξάρτητες από τις απώλειες ελεύθερου χώρου. Αυτό σημαίνει πρακτικά πως οι απώλειες σκίασης είναι ανεξάρτητες από την απόσταση πομπού-δέκτη και δεν σχετίζονται με τις ντετερμινιστικές απώλειες οδεύσεως. Η μαθηματική έκφραση αυτής της παραδοχής συνίσταται στο να αποδώσουμε στον path loss exponent τιμή ίση με αυτή που προβλέπει το μοντέλο ελεύθερου χώρου, και να προσδιορίσουμε την zero-mean Gaussian random

variable βάσει των απωλειών σκίασης ως άθροισμα των απωλειών που προκαλεί κάθε εμπόδιο που παρεμβάλλεται ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη.

Μία τέτοια αθροιστική προσέγγιση των απωλειών σκίασης (σε λογαριθμική κλίμακα) έχει ήδη αποτελέσει αντικείμενο συζήτησης και έρευνας σε διεθνές επίπεδο με εργασίες που αφορούν σε μελέτη εξωτερικού χώρου [47-48]. Προεκτείνοντας την φιλοσοφία του μοντέλου-ορόφων-και-τοιχών (multi-wall-floor model) και λαμβάνοντας υπόψη την αθροιστική φύση των απωλειών σκίασης (λογαριθμική κλίμακα), μπορούμε να προβούμε στην διατύπωση μίας καινοτόμου μεθόδου για τον ποσοτικό και ποιοτικό προσδιορισμό του βάθους σκίασης σε μία δεδομένη τοπολογία ράδιο-διάδοσης.

Η βασική φιλοσοφία της μεθόδου αυτής είναι πως τα φαινόμενα σκίασης που συνιστούν και την πλεονάζουσα απώλεια οδεύσεως αποτελούν μεν όντως, σύμφωνα και με τον Jakes, την διαφορά ανάμεσα στις προβλεπόμενες από το μοντέλο ελεύθερου χώρου ντετερμινιστικές απώλειες λόγω απόστασης και συχνότητας και στις μετρούμενες ολικές απώλειες οδεύσεως (όταν υπάρχει ένα πειραματικώς αποκτηθέν δείγμα τιμών λαμβανόμενης ισχύος), αλλά, ακόμα περισσότερο, πως σε επίπεδο a priori RF planning, οι απώλειες σκίασης δεν προκύπτουν ως μαθηματικό υπόλοιπο (residue) των απωλειών ελεύθερου χώρου και ενός προσεγγιστικού υπολογισμού των ολικών απωλειών οδεύσεως. Αντιθέτως, οι απώλειες σκίασης μπορούν να προβλεφθούν με ακρίβεια, με βάση την παρακάτω σχέση [54]:

$$\sigma(dB) = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^{K_{wi}} L_{wik} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{K_{fj}} L_{fjk}}{z} \quad (3.1)$$

Όπου το z αφορά στην πιθανότητα κάλυψης (συνάρτηση σφάλματος) και για sub-optimal σενάριο με πιθανότητα κάλυψης 95%, λαμβάνει την τιμή 1,645. Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, η απόκλιση σκίασης (shadowing deviation) υπολογίζεται απευθείας από τις απώλειες των εμποδίων που υπεισέρχονται στο μονοπάτι οδεύσεως της H/M ακτινοβολίας.

Αυτή η μέθοδος δεν απαιτεί εκτεταμένες μετρήσεις H/M ακτινοβολίας, παρά μόνο έναν περιορισμένο αριθμό μετρήσεων γύρω από τα εμπόδια προκειμένου να καταγραφούν οι απώλειες που προκαλούν στην H/M διάδοση [55].

Η μέθοδός μας δεν περιορίζεται στις προβλεπόμενες από το MWF μοντέλο απώλειες λόγω τοίχων και πατωμάτων αλλά αφορά σε κάθε δυνατή απώλεια κάθε εμποδίου με διαστάσεις συγκριτικά μεγαλύτερες από το μήκος κύματος της H/M ακτινοβολίας.

Συγκεκριμένες μετρήσεις μας επέτρεψαν να συνοψίσουμε για τις τοπολογίες γραφείου, βιβλιοθήκης και οικίας τις παρακάτω απώλειες εμποδίων. Σε ό,τι αφορά στην τοπολογία αεροδρομίου, δεν χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα μέθοδο καθώς, όπως προαναφέραμε, ο βασικός μηχανισμός ράδιο-διάδοσης και απωλειών στην συγκεκριμένη τοπολογία δεν προκύπτει από απώλειες σκίασης λόγω εμποδίων.

Πίνακας 3.2. Απώλειες λόγω εμποδίων (τοπολογία γραφείου)

No.	Internal walls	Pillar	Wide wall	Elevator
1	7-8 dB	10 dB	7-8 dB	10 dB
2	5-6 dB			
3	3-4 dB			
4	1-2 dB			

Πίνακας 3.3. Απώλειες λόγω εμποδίων (τοπολογία βιβλιοθήκης)

No.	Walls	Internal walls	Bookcase
1	15 dB	7 dB	3 dB
2	8 dB	5 dB	
3	3 dB		

Πίνακας 3.4. Απώλειες λόγω εμποδίων (τοπολογία οικίας)

No.	Internal walls (in flat)	Walls separating flats	Floor penetration	Elevator
1	8 dB	15 dB	15 dB	13 dB
2	6 dB	12 dB	12 dB	
3	4 dB			
4	2 dB			
5	1 dB			

Παρατηρούμε πως καθώς αυξάνεται το πλήθος των εμποδίων ιδίου τύπου, μειώνεται η απώλεια που προκαλείται στην H/M ακτινοβολία. Αυτό αποτελεί μία διαφοροποίηση από το μοντέλο Motley-Keenan, το οποίο θεωρεί αμετάβλητες τις απώλειες κάθε εμποδίου ανεξαρτήτως του πλήθους των εμποδίων του ιδίου τύπου. Αποδεικνύεται λοιπόν και μέσα από τις μετρήσεις πως η φιλοσοφία του μοντέλου MWF είναι σωστή. Στον πίνακα 3.5 παρατίθεται αναλυτικά το μέσο σφάλμα του μοντέλου MWF για κάθε τοπολογία εσωτερικού χώρου με εμπόδια, όπως εξετάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η ακρίβεια του μοντέλου MWF αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία επεκτείνουμε την φιλοσοφία της ανεξάρτητης μελέτης και καταγραφής των απωλειών σκίασης λόγω εμποδίων για κάθε εμπόδιο με διαστάσεις συγκριτικά μεγαλύτερες του μήκους κύματος της H/M ακτινοβολίας.

Πίνακας 3.5. Μέσο σφάλμα μοντέλου MWF για κάθε τοπολογία με εμπόδια

Τοπολογία	Μέσο σφάλμα MWF
Γραφείο (ίδιος όροφος)	2.41 %
Γραφείο (διαφορά 1 ορόφου)	1.88 %
Γραφείο (διαφορά 2 ορόφων)	2.22 %
Βιβλιοθήκη	6.36 %
Οικία (ίδιος όροφος)	3.44 %
Οικία (διαφορά 1 ορόφου)	2.14 %

Στους πίνακες που ακολουθούν παρατίθενται αναλυτικά για κάθε τοπολογία εσωτερικού χώρου με εμπόδια οι τιμές του βάθους σκίασης (απόκλιση σκίασης) όπως υπολογίστηκαν από την σχέση (3.1) που προεκτείνεται όμως πέρα από τοίχους και πατώματα, σε κάθε δυνατό εμπόδιο που παρεμβάλλεται στο μονοπάτι οδεύσεως της H/M ακτινοβολίας.

Πίνακας 3.6. Βάθος σκίασης (dB) για τοπολογία γραφείου (ίδιος όροφος)

Location	σ (dB)
A	6.04
B	8.38
C	6.52
D	6.37
E	6.7
F	5.3
G	12.15
H	14.93
I	15.74
J	9.07
M	11.54
N	17.11
O	17.01
P	8.86
Q	0.35
R	0
S	0
T	11.34
U	14.22
V	4.97
W	6.37
X	8.91

Πίνακας 3.7. Βάθος σκίασης (dB) για τοπολογία γραφείου (διαφορά 1 ορόφου)

Location	σ (dB)
A'	15.03
B'	15.72
C'	12.92
D'	10.74
E'	15.72
F'	18.78
G'	19.48
H'	18.26
I'	17.35
J'	18.87

Πίνακας 3.8. Βάθος σκίασης (dB) για τοπολογία γραφείου (διαφορά 2 ορόφων)

Location	σ (dB)
A''	23.32
B''	19.67
C''	18.81
D''	21.56
E''	20.26
F''	20.54
G''	21.97

Παρατηρούμε ότι οι τιμές που λαμβάνουμε για το βάθος σκίασης (απόκλιση σκίασης) διαφοροποιούνται ποσοτικά από τις τιμές της κανονικής απόκλισης (σε dB) που προκύπτουν από τις στατιστικές ιδιότητες της λαμβανόμενης ισχύος (βλέπε πίνακα 3.1). Η διαφοροποίηση αυτή είναι και ποιοτική καθώς εκφράζει μία εντελώς διαφορετική αντίληψη για την παράμετρο της απόκλισης.

Πίνακας 3.9. Βάθος σκίασης (dB) για τοπολογία βιβλιοθήκης

Location	σ (dB)
A	0
B	0
C	0
D	0
E	0.48
F	2.19
G	10.49
H	14.52
I	10.26
J	9.49
K	10.22
L	4.93
M	5.53
N	3.47
O1	3.03
O2	4.41
O3	5.30
O4	3.18
O5	9.47
O6	8.62
O7	9.18
P	11.65
Q	18.10
R	6.22
S	8.67
T	14.56
U	15.64
V	15.75
W	16.33
X	14.71
Y	8.50
Z	2.16

Πίνακας 3.10. Βάθος σκίασης (dB) για τοπολογία οικίας (ίδιος όροφος)

Location	σ (dB)
R	0
E	4.35
F	6.83
B	1.16
J	1.48
M	11.77
A	0.35
C	7.65
P	13.12
I	10.49
D	5.36
L	5.36
K	7.01
O	5.09
G	11.77
N	7.64
H	10.36
U	10.61
S	8.86
Q	11.19
T	12.40
A2	23.04
V	20.75
Z	17.58
A3	22.79
W	19.68
X	18.23
Y	25.80

Πίνακας 3.11. Βάθος σκίασης (dB) για τοπολογία οικίας (διαφορά 1 ορόφου)

Location	σ (dB)
R'	9.37
I	15.98
L	18.18
C	18.64
N	10.66
M	23.32
J	20.20
H	23.15
K	19.42
G	23.57
B	21.07
A	23.38
F	23.93
E	25.98
D	25.60

Τα αποτελέσματα εμφανίζουν μία δυναμική κατανομή των τιμών της απόκλισης σκίασης εντός της κάθε τοπολογίας. Είναι προφανές πως όχι μόνο η απόκλιση σκίασης δεν αυξάνεται με την απόσταση, αλλά είναι ολοκληρωτικά ανεξάρτητη από την απόσταση του δέκτη από τον πομπό. Εξαρτάται όμως από την σχετική θέση των εμποδίων εντός του μονοπατιού οδεύσεως.

Αξίζει να σημειωθεί πως αν και η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε για τα 2.4 GHz, μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε συχνότητα λειτουργίας ενός ασύρματου συστήματος, εφόσον υπολογιστούν οι απώλειες σκίασης των εκάστοτε εμποδίων εντός του μονοπατιού οδεύσεως.

Εικόνα 3.9. Τοπολογία γραφείου με βάθος σκίασης (ίδιος όροφος)

Εικόνα 3.10. Τοπολογία γραφείου με βάθος σκίασης (διαφορά ενός ορόφου)

Εικόνα 3.11. Τοπολογία γραφείου με βάθος σκίασης (διαφορά δύο ορόφων)

Εικόνα 3.12. Τοπολογία βιβλιοθήκης με βάθος σκίασης

3.4 Μεθοδολογία υπολογισμού της πλεονάζουσας απώλειας οδεύσεως (excess path loss)

3.4.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάσαμε τον αναλυτικό υπολογισμό της εξασθένησης ανά απόσταση (dB/m) στη βάση του μοντέλου γραμμικής εξασθένησης (μοντέλο Devasirvatham), το οποίο προϋποθέτει ένα σύνολο μετρήσεων της λαμβανόμενης ισχύος του σήματος ως δεδομένο εισόδου στην σχέση (2.6). Στην παρούσα ενότητα αναπτύσσουμε μία μέθοδο για τον γρήγορο και αξιόπιστο υπολογισμό της εξασθένησης ανά απόσταση, και ως εκ τούτου και της πλεονάζουσας απώλειας οδεύσεως (excess path loss).

3.4.2 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογίες με εμπόδια

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, ο υπολογισμός του βάθους σκίασης για τοπολογίες με εμπόδια από την σχέση (3.1) δεν απαιτεί παρά μόνο έναν περιορισμένο αριθμό μετρήσεων πέριξ των εμποδίων προκειμένου να προσδιοριστεί πειραματικά (αν δεν υπάρχει διαθέσιμη από προηγούμενη εμπειρία) η απώλεια που υπεισέρχεται από τα εμπόδια αυτά στην H/M ακτινοβολία. Αν γνωρίζουμε ή μπορούμε να υπολογίσουμε το βάθος σκίασης σε μία τοπολογία με εμπόδια, τότε ο υπολογισμός της εξασθένησης ανά απόσταση προκύπτει από την σχέση [52]:

$$a = \frac{z}{d} \sigma (dB) \quad (3.2)$$

Οι εικόνες 3.13 έως 3.15 παρουσιάζουν την σύγκριση των αποτελεσμάτων του υπολογισμού της εξασθένησης ανά απόσταση από το μοντέλο γραμμικής εξασθένησης με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από την σχέση (3.2).

Εικόνα 3.13. Σύγκριση μεθόδου Devasirvatham και βάθους σκίασης για τοπολογία γραφείου (ίδιος όροφος)

Εικόνα 3.14. Σύγκριση μεθόδου Devasirvatham και βάθους σκίασης για τοπολογία γραφείου (πολλαπλοί όροφοι)

Εικόνα 3.15. Σύγκριση μεθόδου Devasirvatham και βάθους σκίασης για τοπολογία βιβλιοθήκης

Από τις παραπάνω συγκριτικές CDF είναι προφανές ότι η μεθοδολογία υπολογισμού της εξασθένησης ανά απόσταση που βασίζεται στο βάθος σκίασης ακολουθεί πολύ ικανοποιητικά τις τιμές της εξασθένησης ανά απόσταση που προκύπτουν από τις μετρήσεις και το μοντέλο γραμμικής εξασθένησης για εκθέτη απωλειών οδεύσεως ίσο με 1.8.

Μία εμφανής διαφορά έγκειται στο κάτω άκρο των τιμών της εξασθένησης ανά απόσταση για τις μετρήσεις ιδίου ορόφου της τοπολογίας γραφείου και της τοπολογίας βιβλιοθήκης, όπου η εξασθένηση ανά απόσταση στην CDF των τιμών που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις λαμβάνει αρνητικές τιμές, ενώ οι τιμές από την σχέση (3.2) φτάνουν μέχρι το μηδέν. Αυτές οι περιπτώσεις αφορούν σε LOS τοποθεσίες όπου η εξασθένηση ανά απόσταση μπορεί να λάβει αρνητικές τιμές, οριακά υπό του μηδενός, ενώ στις αντίστοιχες περιπτώσεις για την μέθοδο της σχέσης (3.2) οι προκύπτουσες τιμές είναι μηδενικές καθότι το βάθος σκίασης σε LOS τοποθεσίες θεωρείται μηδενικό.

Πίνακας 3.12. Μέσο σφάλμα μοντέλου βάθους σκίασης σε σχέση με τις μετρήσεις για τον υπολογισμό της εξασθένησης ανά απόσταση

Τοπολογίες	Μέσο σφάλμα
Γραφείο (ίδιος όροφος)	18.63%
Γραφείο (ίδιος όροφος) (χωρίς σημεία LOS)	5.78%
Γραφείο (πολλαπλοί όροφοι)	3.43%
Βιβλιοθήκη	14.71%
Βιβλιοθήκη (χωρίς σημεία LOS)	2.53%

Ο πίνακας 3.12 παρουσιάζει το μέσο σφάλμα (%) του μοντέλου υπολογισμού της εξασθένησης ανά απόσταση από το βάθος σκίασης σε σχέση με το μοντέλο γραμμικής εξασθένησης (Devasirvatham) που βασίζεται στις ληφθείσες τιμές των μετρήσεων για $n=1.8$.

Το σενάριο πολλαπλών ορόφων της τοπολογίας γραφείου εμφανίζει έναν υψηλό βαθμό ακρίβειας με ένα μέσο σφάλμα της τάξης του 3.43%. Οι τοπολογίες γραφείου (σενάριο ίδιου ορόφου) και της βιβλιοθήκης παρέχουν λιγότερο ακριβείς προσεγγίσεις, με μέσο σφάλμα 18.63% και 14.71% αντίστοιχα. Αυτό το μεγαλύτερο σφάλμα οφείλεται στην προαναφερθείσα απόκλιση του μοντέλου μας λόγω των LOS τοποθεσιών. Αν παραλειφθούν αυτές οι LOS τοποθεσίες, που εξάλλου αποτελούν συντριπτική μειοψηφία στο σύνολο των τοποθεσιών αυτών των τοπολογιών με εμπόδια, τότε το μέσο σφάλμα μειώνεται σημαντικά: 5.78% για την τοπολογία γραφείου (ίδιος όροφος) και 2.53% για την τοπολογία βιβλιοθήκης.

Μπορούμε λοιπόν να συμπεράνουμε πως σε τοπολογίες με εμπόδια που οι LOS τοποθεσίες αποτελούν εξαιρετική μειοψηφία ή και δεν υφίστανται καν, η μέθοδος υπολογισμού της εξασθένησης ανά απόσταση και άρα της πλεονάζουσας απώλειας οδεύσεως (excess path loss) από το βάθος σκίασης, χωρίς ανάγκη περαιτέρω μετρήσεων, είναι εξαιρετικά ακριβής και διευκολύνει τον χαρακτηρισμό του ασύρματου καναλιού.

3.4.3 Αριθμητικά αποτελέσματα: τοπολογία αεροδρομίου

Η τοπολογία του αεροδρομίου έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που δεν συνάδουν με την μεθοδολογία που ακολουθούμε στις υπόλοιπες τοπολογίες. Η ακαταλληλότητα του μοντέλου MWF και του μοντέλου λογαριθμικής απόστασης σημαίνουν πως θα χρειαστεί μία διαφορετική μεθοδολογία υπολογισμού της πλεονάζουσας απώλειας οδεύσεως (excess path loss) [56].

Για το λόγο αυτό θα εφαρμόσουμε την τεχνική curve-fitting προσεγγίζοντας τις τιμές της excess path loss, την οποία θεωρούμε ως ίση με το γινόμενο της εξασθένησης ανά απόσταση επί την απόσταση για κάθε τοποθεσία κάθε τοπολογίας (με εκθέτη απωλειών οδεύσεως ίσο με 1.8), με γνωστές συναρτήσεις και συγκρίνοντας το τετραγωνικό σφάλμα και το προσαρμοσμένο τετραγωνικό σφάλμα.

Για το σενάριο του AP1, χρησιμοποιούμε το Power model και το πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού. Για το AP2, χρησιμοποιούμε το γραμμικό πολυώνυμο, το Power model και την Gaussian συνάρτηση (3.3). Για το AP3, χρησιμοποιούμε το πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού, την Gaussian συνάρτηση και την ημιτονοειδή συνάρτηση (3.4).

Η αξιολόγηση του curve-fitting απεικονίζεται στους πίνακες 3.13 – 3.15. Οι γραφικές παραστάσεις αποτυπώνονται στις εικόνες 3.16 – 3.18.

$$f(x) = a_1 e^{-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2} \quad (3.3)$$

$$f(x) = a_1 \sin(b_1 x + c_1) \quad (3.4)$$

Πίνακας 3.13. Αξιολόγηση curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss (AP1)

Goodness-of-Fit	Power Model	Cubic Polynomial
R-Square	0.091	0.250
Adjusted R-Square	0.026	0.063

Πίνακας 3.14. Αξιολόγηση curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss (AP2)

Goodness-of-Fit	Power Model	Linear Polyn.	Gaussian
R-Square	0.446	0.427	0.446
Adjusted R-Square	0.323	0.369	0.323

Πίνακας 3.15. Αξιολόγηση curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss (AP3)

Goodness-of-Fit	Sin. Model	Cubic Polyn.	Gaussian
R-Square	0.442	0.487	0.308
Adjusted R-Square	0.303	0.268	0.134

Εικόνα 3.16. Curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss (AP1)

Εικόνα 3.17. Curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss (AP2)

Εικόνα 3.18. Curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss (AP3)

Μία άλλη προσέγγιση για τον προσδιορισμό του excess path loss μέσα από curve-fitting είναι να θεωρήσουμε το γινόμενο ad σε σχέση με τον λογάριθμο της απόστασης για κάθε AP και να αξιολογήσουμε την προκύπτουσα προσέγγιση με το τετραγωνικό σφάλμα και το προσαρμοσμένο τετραγωνικό σφάλμα.

Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούνται το πολυώνυμο 3^ο και 4^ο βαθμού, η Gaussian συνάρτηση, το Power model και η ημιτονοειδής συνάρτηση.

Οι γραφικές παραστάσεις του curve-fitting σε αυτήν την περίπτωση αποτυπώνονται στις εικόνες 3.19 – 3.21. Η αξιολόγηση του curve-fitting με το τετραγωνικό σφάλμα και το προσαρμοσμένο τετραγωνικό σφάλμα λαμβάνει χώρα στους πίνακες 3.16 έως 3.18.

Πίνακας 3.16. Αξιολόγηση curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss ως προς το λογάριθμο της απόστασης (AP1)

Goodness-of-Fit	Quadr. Polyn	Cubic Polynomial
R-Square	0.283	0.290
Adjusted R-Square	0.173	0.112

Πίνακας 3.17. Αξιολόγηση curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss ως προς το λογάριθμο της απόστασης (AP2)

Goodness-of-Fit	Power Model	Cubic Polynomial
R-Square	0.441	0.697
Adjusted R-Square	0.385	0.583

Πίνακας 3.18. Αξιολόγηση curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss ως προς το λογάριθμο της απόστασης (AP3)

Goodness-of-Fit	Sin. Model	Quadr. Polyn.	Gaussian
R-Square	0.421	0.379	0.304
Adjusted R-Square	0.276	0.224	0.130

Εικόνα 3.19. Curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss ως προς το λογάριθμο της απόστασης (AP1)

Εικόνα 3.20. Curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss ως προς το λογάριθμο της απόστασης (AP2)

Εικόνα 3.21. Curve-fitting για τον προσδιορισμό του excess path loss ως προς το λογάριθμο της απόστασης (AP3)

Συμπερασματικά, θεωρήσαμε το excess path loss ισοδύναμο με το γινόμενο $a(\text{dB}/m) \cdot d(m)$. Προσεγγίζοντας το ad ως προς την απόσταση για το AP1, που εκφράζει ένα OLOS/LOS σενάριο, παρατηρούμε πως το Power model και το πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού αποδεικνύονται αναξιόπιστα. Για το AP2 (με ένα κυρίαρχο LOS σενάριο), το Power model, το γραμμικό πολυώνυμο και η Gaussian συνάρτηση εφαρμόστηκαν με σχεδόν ταυτόσημα, μέτρια αποτελέσματα. Για το AP3 (που εκφράζει ένα LOS/OLOS σενάριο), η επίδοση των προσεγγιστικών συναρτήσεων ήταν εξίσου μέτρια.

Εφαρμόζοντας το curve fitting για το ad ως προς το $\log_{10}(d)$, για το AP1, το πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού αποδίδει καλύτερα από ό,τι στην προηγούμενη περίπτωση. Για το AP2, το πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού αποδίδει καλύτερα από ό,τι το Power model, του οποίου η επίδοση είναι στα ίδια επίπεδα με την προηγούμενη περίπτωση. Για το AP3, η επίδοση των προσεγγιστικών συναρτήσεων παραμένει σε μέτρια επίπεδα.

3.5 Χαρακτηρισμός γεωγραφικής κατανομής των τοπικών μέσων τιμών της λαμβανόμενης ισχύος

3.5.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα εξετάζουμε τον χαρακτηρισμό της γεωγραφικής διασποράς των τιμών της λαμβανόμενης ισχύος, αντιπαραβάλλοντας την τοπολογία αεροδρομίου με την τοπολογία οικίας, συγκρίνοντας την επίπτωση διαφορετικών μηχανισμών ράδιο-διάδοσης στην διασπορά των τιμών της τοπικής μέσης ισχύος εντός έκαστης τοπολογίας.

3.5.2 Αριθμητικά αποτελέσματα

Για την τοπολογία του αεροδρομίου καταρχάς, πραγματοποιούμε το curve-fitting για το σύνολο των καταγεγραμμένων από την πειραματική διαδικασία τιμών της τοπικής μέσης ισχύος ως προς την απόσταση [53]. Οι παράμετροι των μοντέλων παρατίθενται στον πίνακα 3.19, οι εικόνες 3.22-3.24 δείχνουν το curve-fitting και τέλος η αξιολόγηση της διαδικασίας λαμβάνει χώρα στους πίνακες 3.20 – 3.22.

Πίνακας 3.19. Μεταβλητές μοντέλων για curve-fitting της λαμβανόμενης ισχύος ως προς την απόσταση (τοπολογία αεροδρομίου)

AP1	AP2	AP3
<i>Power Model</i>	<i>Power Model</i>	<i>Power Model</i>
a = -25.65 (-39.24, -12.06)	a = -17.25 (-24.53, -9.972)	a = -24.49 (-36.35, -12.64)
b = 0.1973 (0.05836, 0.3363)	b = 0.2845 (0.1758, 0.3932)	b = 0.2095 (0.0819, 0.337)
<i>Linear Polynomial</i>	<i>Linear Polynomial</i>	<i>Linear Polynomial</i>
p1 = -0.3073 (-0.482, -0.1325)	p1 = -0.3274 (-0.453, -0.2018)	p1 = -0.3603 (-0.5273, -0.1933)
p2 = -39.55 (-48.04, -31.06)	p2 = -34.51 (-41.02, -28)	p2 = -37 (-44.89, -29.1)

Εικόνα 3.22. Curve-fitting της λαμβανόμενης ισχύος ως προς την απόσταση (AP1)

Εικόνα 3.23. Curve-fitting της λαμβανόμενης ισχύος ως προς την απόσταση (AP2)

Εικόνα 3.24. Curve-fitting της λαμβανόμενης ισχύος ως προς την απόσταση (AP3)

Είναι προφανές πως η καλύτερη προσέγγιση πραγματοποιείται για τα AP2 και AP3, όπου υπάρχει ένα επικρατέστερο LOS σενάριο, με το Power model να παρέχει οριακά καλύτερο fit για το AP2. Η επίδοση και των δύο μοντέλων για το AP1 είναι λιγότερο ακριβής από τις άλλες δύο περιπτώσεις, λόγω της αυξημένης παρουσίας OLOS τοποθεσιών.

Σε κάθε περίπτωση, το curve-fitting της λαμβανόμενης ισχύος ως προς την απόσταση για την τοπολογία του αεροδρομίου είναι κατά πολύ διαφορετικό, ως προς την φύση της γεωγραφικής διασποράς των τιμών της τοπικής μέσης ισχύος εντός της τοπολογίας, σε σχέση με την τοπολογία οικίας, ενδεικτικό παράδειγμα περιβάλλοντος με εμπόδια. Το αντίστοιχο curve-fitting παρατίθεται στις εικόνες 3.26 και 3.26.

Πίνακας 3.20. Αξιολόγηση curve-fitting της λαμβανόμενης ισχύος ως προς την απόσταση (AP1)

Goodness-of-Fit	Power Model	Linear Polynomial
R-Square	0.410	0.504
Adjusted R-Square	0.3681	0.469

Πίνακας 3.21. Αξιολόγηση curve-fitting της λαμβανόμενης ισχύος ως προς την απόσταση (AP2)

Goodness-of-Fit	Power Model	Linear Polynomial
R-Square	0.785	0.771
Adjusted R-Square	0.763	0.748

Πίνακας 3.22. Αξιολόγηση curve-fitting της λαμβανόμενης ισχύος ως προς την απόσταση (AP3)

Goodness-of-Fit	Power Model	Linear Polynomial
R-Square	0.642	0.726
Adjusted R-Square	0.603	0.695

Εικόνα 3.25. Curve-fitting της λαμβανόμενης ισχύος ως προς την απόσταση για τοπολογία οικίας (ίδιος όροφος)

Εικόνα 3.26. Curve-fitting της λαμβανόμενης ισχύος ως προς την απόσταση για τοπολογία οικίας (πολλαπλοί όροφοι)

3.6 Σύνοψη κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε μία καινοτόμος μέθοδος για τον υπολογισμό του βάθους σκίασης απευθείας από τις απώλειες των εμποδίων της εκάστοτε τοπολογίας ράδιο-διάδοσης, ανεξάρτητα από τις απώλειες ελεύθερου χώρου. Η μέθοδος αυτή δεν απαιτεί παρά περιορισμένο αριθμό μετρήσεων εντός της τοπολογίας, και αν είναι γνωστές οι απώλειες των υλικών, δεν απαιτείται καμία μέτρηση. Η μέθοδος αυτή δεν αναιρεί τον γενικό χαρακτηρισμό των απωλειών σκίασης ως log-normal, αλλά αντιθέτως ανεξαρτητοποιεί την φύση των φαινομένων σκίασης από τον χαρακτηρισμό τους ως «υπολοιπόμενες απώλειες» των απωλειών ελεύθερου χώρου.

Η μέθοδος αυτή επαληθεύτηκε για την ακρίβειά της και επεκτάθηκε για τον υπολογισμό της εξασθένησης ανά απόσταση και άρα και της πλεονάζουσας απώλειας οδεύσεως (excess path loss) σε τοπολογίες με εμπόδια, με υψηλό βαθμό αξιοπιστίας σε σχέση με τις προκύπτουσες τιμές της εξασθένησης ανά απόσταση από τις πειραματικές μετρήσεις. Για τοπολογίες όπως αυτή του αεροδρομίου, παρουσιάστηκε εκτεταμένο curve-fitting με αποτελέσματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης ως προς την επίδραση του μηχανισμού ράδιο-διάδοσης (ανακλάσεις, πολύ-όδευση) στην γεωγραφική διασπορά του excess path loss και της εξασθένησης ανά απόσταση.

Τέλος, εξετάστηκε η γεωγραφική διασπορά των τιμών της τοπικής μέσης ισχύος εντός της τοπολογίας αεροδρομίου σε αντιπαραβολή με την τοπολογία οικίας και επισημάνθηκε η διαφορετική φύση κάθε περιπτώσεως.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Διερεύνηση της επίδρασης των χαρακτηριστικών του Ασύρματου Καναλιού στην Ασφάλεια Φυσικού Επιπέδου

4.1 Εισαγωγή

4.1.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η αποφυγή της υποκλοπής πληροφορίας (information wiretapping) δια μέσω ενός ωτακουστή (eavesdropper) προϋποθέτει την έννοια και τις συνθήκες της τέλει ασφάλειας [57]. Η Ασφάλεια Φυσικού Επιπέδου (Wireless Information-Theoretic Security, WITS) είναι μία μέθοδος επιπέδου φυσικού Επιπέδου (physical layer) που υπερβαίνει τις αδυναμίες του κλασικού Gaussian wiretap καναλιού [58-62], θεωρώντας Rayleigh fading τόσο για τους νόμιμους χρήστες όσο και για τους ωτακουστές.

Η μέθοδος αυτή μπορεί να λειτουργήσει συμπληρωματικά ή αυτοτελώς από μία κλασική μέθοδο κρυπτογραφίας ανωτέρου επιπέδου [61-64]. Οι βασικές έννοιες και παράμετροι της μεθόδου αυτής αναπτύχθηκαν σε μία σειρά δημοσιεύσεων [65-66] που τεκμηρίωσαν την καινοτόμο αντίληψη πως η τέλεια ασφάλεια είναι επιτεύξιμη ακόμα και όταν ο μέσος SNR του νόμιμου δέκτη είναι χαμηλότερος από αυτόν του ωτακουστή.

Τα θεωρητικά ευρήματα της Ασφάλειας Φυσικού Επιπέδου μπορούν να επεκταθούν ενσωματώνοντας κώδικα καναλιού LDPC (Low-density parity-check) προκειμένου να υπάρξει ομορπονιστική χρήση καναλιού [67-68]. Η απουσία πειραματικών μετρήσεων αλλά και η ανάγκη για μία πιο ρεαλιστική θεώρηση των συνθηκών ράδιο-διάδοσης υπό τις οποίες ζητείται η ασφάλεια των επικοινωνιών με την μέθοδο WITS αποτέλεσε μία ερευνητική πρόκληση, στην οποία ανταποκριθήκαμε.

4.1.2 Συμβολή και Επισκόπηση Κεφαλαίου

Η συμβολή του κεφαλαίου συνίσταται στα εξής καινοτόμα αποτελέσματα:

- Στην ενότητα 4.2 παρουσιάζεται για πρώτη φορά η καταγραφή των επιπτώσεων των μεταβολών του εκθέτη απωλειών οδεύσεως, δηλαδή η διαφοροποίηση των απωλειών οδεύσεως σε σχέση με το μοντέλο ελεύθερου χώρου υιοθετώντας ρεαλιστικές συνθήκες ράδιο-διάδοσης, και η διερεύνηση αυτών των μεταβολών στα όρια τιμών και εν τέλει στην αξιοπιστία της Ασφάλειας Φυσικού Επιπέδου.
- Στην ενότητα 4.3 παρουσιάζεται για πρώτη φορά μία μαθηματική σχέση κλειστής μορφής για την Αποκοπή Χωρητικότητας Ασφαλείας, για αποδεκτό περιθώριο σφάλματος και για ρεαλιστικές τιμές των παραμέτρων της Ασφάλειας Φυσικού Επιπέδου αλλά και του ασύρματου καναλιού για διάφορες συνθήκες ράδιο-διάδοσης.
- Στην ενότητα 4.4 διερευνάται η επίδραση της σχετικής θέσης των χρηστών, με βάσει συγκεκριμένα μοντέλα κινητικότητας, στην μεταβολή των παραμέτρων της Ασφάλειας Φυσικού Επιπέδου.
- Στην ενότητα 4.5 διερευνάται η αξιοπιστία της Ασφάλειας Φυσικού Επιπέδου σε ένα περιβάλλον ρεαλιστικής ράδιο-διάδοσης με εμπόδια, διαλείψεις και παρεμβολές, για σενάριο ενός ωτακουστή, με προσομοίωση και πειραματικές μετρήσεις.
- Στην ενότητα 4.6 διερευνάται η αξιοπιστία της Ασφάλειας Φυσικού Επιπέδου σε ένα περιβάλλον ρεαλιστικής ράδιο-διάδοσης με εμπόδια, διαλείψεις και παρεμβολές, για σενάριο πολλαπλών ωτακουστών, με προσομοίωση και πειραματικές μετρήσεις.

4.2 Διερεύνηση της επίδρασης των απωλειών οδεύσεως του ασύρματου καναλιού στην WITS

4.2.1 Παραμετροποίηση WITS

Η αποφυγή της υποκλοπής πληροφορίας (information wiretapping) δια μέσω ενός ωτακουστή (eavesdropper) προϋποθέτει ασφάλεια και αξιοπιστία επικοινωνιών. Η Ασφάλεια Φυσικού Επιπέδου (Wireless Information-Theoretic Security, WITS) είναι μία μέθοδος επιπέδου φυσικού Επιπέδου (physical layer) που μπορεί να λειτουργήσει συμπληρωματικά ή αυτοτελώς από μία κλασική μέθοδο κρυπτογραφίας ανωτέρου επιπέδου, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες του ασύρματου καναλιού, αλλά και την γεωγραφική κατανομή και ενδεχόμενη μεταβολή θέσης των χρηστών που επιθυμούν να ανταλλάξουν πληροφορίες με ασφάλεια και αξιοπιστία υπό την παρουσία πιθανών παθητικών υποκλοπέων – ωτακουστών.

Πιο συγκεκριμένα, η Ασφάλεια Φυσικού Επιπέδου στοιχειοθετείται στη βάση των κάτωθι παραμέτρων:

1. Η χωρητικότητα ασφαλείας (*secrecy capacity* C_s), που ορίζεται ως ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης υπό τον οποίο ο ωτακουστής δεν μπορεί να αποκωδικοποιήσει πληροφορία.
2. Οι χωρητικότητες του κυρίως καναλιού και του καναλιού υποκλοπής (*capacity of the main and the wiretap channels*), C_M και C_W αντίστοιχα, εκπεφρασμένες συναρτήσει των στοχαστικών παραμέτρων του ασύρματου καναλιού.
3. Η πιθανότητα μη-μηδενικής (αυστηρά θετικής) χωρητικότητας ασφαλείας (*probability of a non-zero (strictly positive) secrecy capacity*) $P(C_s > 0)$, δηλαδή ο προσδιορισμός των προϋποθέσεων υπό τις οποίες υπάρχει

αξιοπιστία επικοινωνιών σε έναν ασύρματο δίαυλο που εμπεριέχει και ένα (τουλάχιστον) κανάλι υποκλοπής.

4. Η πιθανότητα αποκοπής (*outage probability*) $P_{out}(R_s)$ συναρτήσει ενός ρυθμού ασφαλείας (*target secrecy rate*) $R_s > 0$.
5. Η πιθανότητα αποκοπής συναρτήσει της χωρητικότητας ασφαλείας, που ορίζεται ως η χωρητικότητα ασφαλείας αποκοπής (*outage secrecy capacity*) $P_{out}(C_{out})$.

4.2.2 Επίδραση των χαρακτηριστικών του ασύρματου διαύλου στην WITS

Προσεγγίζοντας το πρόβλημα προσδιορισμού της χωρητικότητας ασφαλείας, αλλά διαφοροποιούμενοι από την κλασική προσέγγιση που προϋποθέτει Gaussian κανάλια τόσο για τους νόμιμους χρήστες όσο και για τους ωτακουστές, θεωρούμε κανάλι με διαλείψεις (Rayleigh fading). Οι έξοδοι των αντίστοιχων χρονικά-διακριτών (time-discrete) καναλιών ισούνται με:

$$y_M(i) = h_M(i)x_M(i) + n_M(i) \quad (4.1)$$

$$y_W(i) = h_W(i)x_W(i) + n_W(i) \quad (4.2)$$

Τα main and wiretap Rayleigh κανάλια θεωρούνται power limited και quasi-static, δηλαδή οι παράμετροι διαλείψεων καναλιού (fading coefficients) είναι μεν τυχαίες αλλά παραμένουν σταθερές για την μετάδοση κάθε κωδικής λέξης (codeword) και ανεξάρτητες για κάθε κωδική λέξη. Μπορούμε λοιπόν να θεωρήσουμε ότι οι παράμετροι διαλείψεων παραμένουν σταθερές για το συνολικό χρονικό διάστημα ενεργούς επικοινωνίας:

$$h_M(i) = h_M, \forall i \quad (4.3)$$

$$h_W(i) = h_W, \forall i \quad (4.4)$$

Ο στιγμιαίος και ο μέσος SNR στην είσοδο του νόμιμου δέκτη δίνονται από:

$$\gamma_M(i) = P \frac{|h_M(i)|^2}{N_M} = P \frac{|h_M|^2}{N_M} = \gamma_M \quad (4.5)$$

$$\bar{\gamma}_M(i) = P \frac{E[|h_M(i)|^2]}{N_M} = P \frac{E[|h_M|^2]}{N_M} = \bar{\gamma}_M \quad (4.6)$$

Κατ' αντιστοιχία, ο στιγμιαίος και ο μέσος SNR στην είσοδο του ωτακουστή δίνονται από:

$$\gamma_W(i) = P \frac{|h_W(i)|^2}{N_W} = P \frac{|h_W|^2}{N_W} = \gamma_W \quad (4.7)$$

$$\bar{\gamma}_W(i) = P \frac{E[|h_W(i)|^2]}{N_W} = P \frac{E[|h_W|^2]}{N_W} = \bar{\gamma}_W \quad (4.8)$$

Η χωρητικότητα ασφαλείας προκύπτει από την διαφορά της χωρητικότητας κυρίως καναλιού μείον την χωρητικότητα του καναλιού υποκλοπής. Κάθε χωρητικότητα έκαστου καναλιού εξαρτάται από την μέση ισχύ μετάδοσης και την στάθμη του θορύβου.

Θεωρώντας quasi-static Rayleigh fading με προσθετικό θόρυβο, η χωρητικότητα κυρίως καναλιού δίδεται από:

$$C_M = \log_2 \left(1 + |h_M|^2 \frac{P}{N_M} \right) \quad (4.9)$$

Η χωρητικότητα καναλιού υποκλοπής υπολογίζεται ως εξής:

$$C_W = \log_2 \left(1 + |h_W|^2 \frac{P}{N_W} \right) \quad (4.10)$$

Συνεπώς η χωρητικότητα ασφαλείας ισούται με:

$$C_s = C_M - C_W \quad (4.11)$$

$$C_s = \log_2 \left(1 + |h_M|^2 \frac{P}{N_M} \right) - \log_2 \left(1 + |h_W|^2 \frac{P}{N_W} \right) \quad (4.12)$$

$$C_s = \log_2 (1 + \gamma_M) - \log_2 (1 + \gamma_W) \quad (4.13)$$

Για να έχουμε μη-μηδενική τιμή της χωρητικότητας ασφαλείας, θα πρέπει $\gamma_M > \gamma_W$.

Θα πρέπει επίσης να ισχύει:

$$P(C_s > 0) = P(\gamma_M > \gamma_W) \quad (4.14)$$

Τα main και wiretap κανάλια θεωρούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους. Και στις δύο περιπτώσεις, ο SNR ακολουθεί την εκθετική κατανομή (Rayleigh fading). Συνεπώς η πιθανότητα μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας ισούται με:

$$P(C_s > 0) = \int_0^\infty \int_0^{\gamma_M} p(\gamma_M, \gamma_W) d\gamma_W d\gamma_M = \int_0^\infty \int_0^{\gamma_M} p(\gamma_M) p(\gamma_W) d\gamma_W d\gamma_M \quad (4.15)$$

Και άρα:

$$P(C_s > 0) = \frac{\bar{\gamma}_M}{\bar{\gamma}_M + \bar{\gamma}_W} \quad (4.16)$$

Παρατηρούμε ότι η πιθανότητα μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας υφίσταται ακόμα και για την περίπτωση όπου ο μέσος SNR του κυρίως καναλιού είναι μικρότερος από τον SNR του καναλιού υποκλοπής.

Για την πιθανότητα αποκοπής έχουμε:

$$P_{out}(R_s) = P(C_s < R_s | \gamma_M > \gamma_W) P(\gamma_M > \gamma_W) + P(C_s < R_s | \gamma_M \leq \gamma_W) P(\gamma_M \leq \gamma_W) \quad (4.17)$$

Άρα:

$$P(\gamma_M > \gamma_W) = \frac{\bar{\gamma}_M}{\bar{\gamma}_M + \bar{\gamma}_W} \quad (4.18)$$

$$P(\gamma_M \leq \gamma_W) = 1 - P(\gamma_M > \gamma_W) = \frac{\bar{\gamma}_W}{\bar{\gamma}_M + \bar{\gamma}_W} \quad (4.19)$$

$$P(C_s < R_s | \gamma_M > \gamma_W) = 1 - \frac{\bar{\gamma}_M + \bar{\gamma}_W}{\bar{\gamma}_M + 2^{R_s} \bar{\gamma}_W} e^{\left(\frac{2^{R_s} - 1}{\bar{\gamma}_M} \right)} \quad (4.20)$$

$$P(C_s < R_s | \gamma_M \leq \gamma_W) = 1 \quad (4.21)$$

Και τελικά:

$$P_{out}(R_s) = 1 - \frac{\bar{\gamma}_M}{\bar{\gamma}_M + 2^{R_s} \bar{\gamma}_W} e^{\left(\frac{2^{R_s} - 1}{\bar{\gamma}_M} \right)} \quad (4.22)$$

Για μικρές τιμές του target secrecy rate:

$$R_s \rightarrow 0, P_{out}(R_s) \rightarrow \frac{\bar{\gamma}_W}{\bar{\gamma}_M + \bar{\gamma}_W} \quad (4.23)$$

Για πολύ μεγάλες τιμές του target secrecy rate:

$$R_s \rightarrow \infty, P_{out}(R_s) \rightarrow 1 \quad (4.24)$$

Όπου έχουμε αποκοπή επικοινωνίας ανάμεσα στον πομπό και τον νόμιμο δέκτη.

Για τις ακραίες τιμές του μέσου SNR και για τα δύο κανάλια, έχουμε:

$$\gamma_M \gg \gamma_W, P_{out}(R_s) \rightarrow 1 - e^{\left(\frac{2^{R_s} - 1}{\bar{\gamma}_M} \right)} \quad (4.25)$$

$$\gamma_M \ll \gamma_W, P_{out}(R_s) \rightarrow 1 \quad (4.26)$$

Αξίζει να σημειωθεί πως σε ένα τέτοιο περιβάλλον διαλείψεων, είναι πιθανό να επιτευχθεί πλήρης ασφάλεια ανάμεσα στον πομπό και τον νόμιμο δέκτη, με κόστος να υπάρξει ορισμένη αποκοπή (outage). Ακόμα και σε μία τέτοια περίπτωση, η επιτευχθείσα χωρητικότητα ασφαλείας μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ενός Gaussian σεναρίου.

4.2.3 Αριθμητικά αποτελέσματα

Η πραγματική αξιολόγηση της επίδρασης των χαρακτηριστικών του ασύρματου διαύλου στα όρια τιμών των παραμέτρων της Ασφάλειας Φυσικού Επιπέδου προϋποθέτει μία λεπτομερέστερη διερεύνηση των πιθανών μεταβολών των παραμέτρων που εκφράζουν τις απώλειες οδεύσεως και συνεπακόλουθα την επίδραση των ιδιαιτεροτήτων του ασύρματου καναλιού πάνω στο εύρος των τιμών των παραμέτρων της Ασφάλειας Φυσικού Επιπέδου.

Θεωρώντας την απλούστερη, ιδεαλιστική περίπτωση του μοντέλου ελεύθερου χώρου, υιοθετούμε τον νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου:

$$\gamma \propto 1/d^2 \quad (4.27)$$

Εφαρμόζοντας την σχέση αυτή στο the quasi-static Rayleigh fading wiretap σενάριο, λαμβάνουμε για την χωρητικότητα ασφαλείας:

$$P(C_s > 0) = \frac{\bar{\gamma}_M}{\bar{\gamma}_M + \bar{\gamma}_W} \quad (4.28)$$

$$P(C_s > 0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\bar{\gamma}_W}{\bar{\gamma}_M} \right)} \quad (4.29)$$

$$P(C_s > 0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_M}{d_W} \right)^2} \quad (4.30)$$

$$d_W \gg d_M, P(C_s > 0) \rightarrow 1 \quad (4.31)$$

$$d_W \ll d_M, P(C_s > 0) \rightarrow 0 \quad (4.32)$$

Για την πιθανότητα αποκοπής

$$P_{out}(R_s) = 1 - \frac{\bar{\gamma}_M}{\bar{\gamma}_M + 2^{R_s} \bar{\gamma}_W} e^{\left(\frac{2^{R_s} - 1}{\bar{\gamma}_M} \right)} \quad (4.33)$$

$$P_{out}(R_s) = 1 - \frac{1}{1 + 2^{R_s} \left(\frac{\bar{\gamma}_W}{\bar{\gamma}_M} \right)} e^{\left(\frac{2^{R_s} - 1}{\bar{\gamma}_M} \right)} \quad (4.34)$$

$$P_{out}(R_s) = 1 - \frac{1}{1 + 2^{R_s} \left(\frac{d_M}{d_W} \right)^2} e^{\left(\frac{2^{R_s} - 1}{\bar{\gamma}_M} \right)} \quad (4.35)$$

$$d_W \gg d_M, P_{out}(R_s) \rightarrow 1 - e^{\left(\frac{2^{R_s} - 1}{\bar{\gamma}_M} \right)} \quad (4.36)$$

$$d_W \ll d_M, P_{out}(R_s) \rightarrow 1 \quad (4.37)$$

Διαφορετικοί τύποι ασύρματου καναλιού ενδέχεται να οδηγήσουν σε αξιοσημείωτη αλλαγή της τιμής του εκθέτη απωλειών οδεύσεως, ο οποίος χρειάζεται για τον υπολογισμό της μέσης λαμβανόμενης ισχύος κι επομένως του μέσου SNR . Ακόμη, η ύπαρξη των διαλείψεων καθιστά την προκειμένη εξέταση ακόμα πιο ουσιώδη καθώς ο εκθέτης απωλειών οδεύσεως μας εξυπηρετεί ως δεδομένο για τις στοχαστικές κατανομές οι οποίες χαρακτηρίζουν το κανάλι . Ως αποτέλεσμα, μια λανθασμένη ή ιδεαλιστική προσέγγιση θα καθιστούσε τους υπολογισμούς μας ως αναξιόπιστους.

Προκειμένου να εξετάσουμε τις συνέπειες των μεταβολών του εκθέτη path loss όταν εξαρτάται από το κανάλι, στην ασφάλεια της μεταδιδόμενης πληροφορίας (WITS), καθώς επίσης και στην χωρητικότητα ασφάλειας και πιθανότητα αποκοπής, κρίθηκε αναγκαία η θεώρηση των ακόλουθων τιμών [69]:

- $n=2$, η προαναφερθείσα περίπτωση του μοντέλου ελεύθερου χώρου με βάσει τον νόμο του αντίστροφου τετραγώνου
- $n=1.8$, η πιο αποδεκτή τιμή για εσωτερικούς χώρους με βάσει το μοντέλο του ελεύθερου χώρου (βλέπε Κεφάλαιο 2)
- $n = 3.8$, η οποία είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη τιμή τόσο για εσωτερικούς χώρους με εμπόδια, όσο και για ασύρματα αστικά περιβάλλοντα όπου υπάρχει το φαινόμενο της σκίασης (shadowing).

Παραμετροποιώντας τον εκθέτη απωλειών οδεύσεως στον τύπο υπολογισμού της μη-μηδενικής πιθανότητας χωρητικότητας ασφαλείας, έχουμε:

$$P(C_s > 0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_M}{d_W}\right)^n} \quad (4.38)$$

Εικόνα 4.1. Πιθανότητα μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας για διάφορες τιμές του εκθέτη απωλειών οδεύσεως

Σε ό,τι αφορά στην χωρητικότητα ασφάλειας, παρατηρούμε την σχεδόν κατακόρυφη πτώση της τιμής από το 0.8 στο 0.2, για μικρή μεταβολή του λόγου αποστάσεων γύρω στην τιμή 1 όταν ο εκθέτης n παίρνει την τιμή 3.8 (σενάριο διαδρόμου σε εσωτερικό χώρο με εμπόδια, σενάριο αστικής περιοχής με σκίαση). Πιο συγκεκριμένα, όταν η απόσταση μεταξύ του πομπού και του νόμιμου δέκτη είναι ελαφρώς μικρότερη από την απόσταση μεταξύ του πομπού και του ωτακουστή, τότε η πιθανότητα μη μηδενικής αυστηρά θετικής χωρητικότητας ασφάλειας τείνει στο 0.8 (για $n=3.8$). Από την άλλη μεριά, όσο η απόσταση μεταξύ του πομπού και του νόμιμου δέκτη αυξάνεται και ξεπερνά ελαφρώς την απόσταση μεταξύ του πομπού και του ωτακουστή, τότε η χωρητικότητα ασφάλειας πέφτει απότομα στην τιμή 0.2. Για $n=1.8$ και $n=2$, η μείωση είναι λιγότερο απότομη, ξεκινώντας από 0.6 και καταλήγοντας στο 0.35 περίπου.

Όταν ο λόγος αποστάσεων είναι μικρότερος από 1, τότε η απόσταση μεταξύ πομπού και του παράνομου δέκτη είναι μεγαλύτερη από την απόσταση μεταξύ του πομπού και του νόμιμου δέκτη (κύριο κανάλι), τότε η πιθανότητα της μη μηδενικής χωρητικότητας υπερβαίνει το 0.5 και είναι περίπου ίση με την μονάδα για $d_w > 10d_M$, με την καμπύλη που αντιστοιχεί στο σενάριο $n=3.8$ να δίνει τις υψηλότερες τιμές χωρητικότητας ασφαλείας. Για $d_w < d_M < 10d_w$, η πιθανότητα μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας μειώνεται απότομα από 0.5 μέχρι το μηδέν, με το σενάριο $n=3.8$ να δίνει την πιο απότομη μείωση.

Η πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται συναρτήσει ενός δεδομένου target secrecy rate $R_s = 0.1$ bits per second, ως συνάρτηση του μέσου SNR του κύριου (νόμιμου) καναλιού, του λόγου αποστάσεων και του εκθέτη απωλειών οδεύσεως:

$$P_{out} = 1 - \frac{1}{1 + 1.0718 \left(\frac{d_M}{d_w} \right)^n} e^{\left(\frac{0.0718}{\bar{\gamma}_M} \right)} \quad (4.39)$$

Εξετάζουμε 4 σενάρια για τις τιμές του μέσου SNR του νόμιμου καναλιού: -10 dB, 0 dB, 10 dB, 20 dB, που αντιστοιχούν σε 4 περιπτώσεις ποιότητας μετάδοσης για το κυρίως κανάλι.

(a) Average main channel SNR = -10 dB:

$$P_{out} = 1 - \frac{0.4877}{1 + 1.0718 \left(\frac{d_M}{d_W} \right)^n} \quad (4.40)$$

(b) Average main channel SNR = 0 dB:

$$P_{out} = 1 - \frac{0.9307}{1 + 1.0718 \left(\frac{d_M}{d_W} \right)^n} \quad (4.41)$$

(c) Average main channel SNR = 10 dB:

$$P_{out} = 1 - \frac{0.9928}{1 + 1.0718 \left(\frac{d_M}{d_W} \right)^n} \quad (4.42)$$

(d) Average main channel SNR = 20 dB:

$$P_{out} = 1 - \frac{0.9993}{1 + 1.0718 \left(\frac{d_M}{d_W} \right)^n} \quad (4.43)$$

Εικόνα 4.2. Πιθανότητα αποκοπής για διάφορες τιμές του n (SNR = -10 dB)

Εικόνα 4.3. Πιθανότητα αποκοπής για διάφορες τιμές του n (SNR = 0 dB)

Εικόνα 4.4. Πιθανότητα αποκοπής για διάφορες τιμές του n (SNR = 10 dB)

Εικόνα 4.5. Πιθανότητα αποκοπής για διάφορες τιμές του n (SNR = 20 dB)

Όσον αφορά στην πιθανότητα αποκοπής, οι καμπύλες που παρουσιάστηκαν στα διαγράμματα 2-5 και τα αποτελέσματα του πίνακα 2 παρέχουν μία σαφή εικόνα του αντίκτυπου των διαφορετικών εκθετών n για διάφορες τιμές του λόγου αποστάσεων. Όταν ο νόμιμος και παράνομος δέκτης βρίσκονται στην ίδια απόσταση από την εκπεμπόμενη κεραία, η πιθανότητα αποκοπής είναι η ίδια για όλες τις τιμές του n και υπερβαίνει ελαφρώς την τιμή 0.5 για όλες τις περιπτώσεις SNR, εκτός του SNR=-10dB, για το οποίο είναι το χειρότερο σενάριο, όπου η πιθανότητα αποκοπής υπερβαίνει το 0.75.

Όταν $d_w > 10d_m$, σε όλες τις περιπτώσεις η πιθανότητα αποκοπής είναι μικρότερη από 0.1, εκτός από το worst-case σενάριο μέσου SNR=-10 dB, όπου υπερβαίνει την τιμή 0.5. Για $d_m < d_w < 10d_m$ η πιθανότητα αποκοπής κυμαίνεται από 0.1 ως 0.5 (φτάνοντας μέχρι και την τιμή 0.7 για μέσο SNR= -10 dB).

Σε όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν, όταν η απόσταση ανάμεσα στον πομπό και τον νόμιμο δέκτη είναι μεγαλύτερη από την απόσταση ανάμεσα στον πομπό και τον ωτακουστή, η πιθανότητα αποκοπής αυξάνει ραγδαία πάνω από την τιμή 0.75, ειδικά όταν το μέσο SNR ισούται με -10 dB.

Πίνακας 4.1. Πιθανότητα Αποκοπής για διάφορες τιμές του μέσου SNR του νόμιμου καναλιού και του εκθέτη απωλειών οδεύσεως

Avg SNR	P out	P out (n=1.8)	P out (n=2)	P out (n=3.8)
(dB)	(dm= dw)	(dw= 10dm)	(dw= 10dm)	(dw= 10dm)
-10	0.7646	0.5204	0.5175	0.5124
0	0.5508	0.0848	0.0792	0.0695
10	0.5208	0.0238	0.0177	0.0074
20	0.5177	0.0174	0.0113	0.0009

4.3 Απόδοση Σχέσης Κλειστού Τύπου (Closed-Form) για την Outage Secrecy Capacity

4.3.1 Ορισμός

Η Αποκοπή Χωρητικότητας Ασφαλείας (Outage Secrecy Capacity) ορίζεται ως ο μέγιστος ρυθμός ασφαλείας (maximum secrecy rate) $R_s\{\max\} = C_{out}$ ούτως ώστε η πιθανότητα αποκοπής να μην υπερβαίνει ένα άνω όριο p :

$$P_{out}(C_{out}(p)) = p \quad (4.44)$$

4.3.2 Αριθμητικά αποτελέσματα

Η προσέγγιση της εκθετικής συνάρτησης μέσα από σειρά Taylor πρώτης τάξης στην γενικευμένη έκφραση δίδεται από [70]:

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} + \dots \quad (4.45)$$

Συγκεκριμένα για την περίπτωση που εξετάζουμε, έχουμε:

$$e^{\left(\frac{2^{R_s}-1}{\bar{\gamma}_M}\right)} \approx 1 - \left(\frac{2^{R_s}-1}{\bar{\gamma}_M}\right) \quad (4.46)$$

Συνεπώς για την πιθανότητα αποκοπής έχουμε:

$$P_{out}(R_s) = 1 - \frac{1 - \left(\frac{2^{R_s}-1}{\bar{\gamma}_M}\right)}{1 + 2^{R_s} \left(\frac{d_M}{d_W}\right)^n} \quad (4.47)$$

Η κλειστή μορφή της μαθηματικής σχέσης για την Αποκοπή Χωρητικότητας Ασφαλείας για δεδομένη πιθανότητα αποκοπής p δίδεται από [71]:

$$C_{out}(p) = \log_2 \left(\frac{\bar{\gamma}_M p + 1}{\bar{\gamma}_W (1-p) + 1} \right) \quad (4.48)$$

$$C_{out}(p) = \log_2 \left(\frac{p + \frac{1}{\bar{\gamma}_M}}{\left(\frac{d_M}{d_W} \right)^n (1-p) + \frac{1}{\bar{\gamma}_M}} \right) \quad (4.49)$$

Προκειμένου να διαπιστωθεί το σφάλμα μίας τέτοιας προσέγγισης σε ό,τι αφορά στις ρεαλιστικές τιμές των εμπλεκόμενων παραμέτρων, εξετάζουμε δύο σενάρια:

- Θεωρώντας μέσο SNR κυρίως καναλιού ίσο με 10 dB και εκθέτη απωλειών οδεύσεως ίσο με 2, δηλαδή περίπτωση εξασθένησης σήματος που αντιστοιχεί στο μοντέλο ελεύθερου χώρου
- Θεωρώντας μέσο SNR κυρίως καναλιού ίσο με 0 dB και εκθέτη απωλειών οδεύσεως ίσο με 3.8, δηλαδή περίπτωση εξασθένησης σήματος που αντιστοιχεί σε αστικό περιβάλλον με σκίαση ή σε εσωτερικό περιβάλλον ράδιο-διάδοσης με εμπόδια

Στους πίνακες που ακολουθούν υπολογίζεται αναλυτικά το σφάλμα της προσεγγιστικής μεθόδου που εφαρμόσαμε για διαφορετικούς λόγους αποστάσεων και για διάφορες ρεαλιστικές τιμές του target Secrecy Rate, για την πρώτη περίπτωση καναλιού. Για τιμές του Secrecy Rate άνω των 3.5 bits per second, η προσέγγιση Taylor δίνει πιθανότητα αποκοπής ίση με 1. Συνεπώς αποτελεί κοινό τόπο σε κάθε περίπτωση ότι ο Secrecy Rate για τα δεδομένα χαρακτηριστικά καναλιού δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή αυτή.

Πίνακας 4.2. Υπολογισμός της πιθανότητας αποκοπής για $n=2$ και μέσο SNR=10 dB.

Rs	dw = 5 dm		dw = 2 dm		dm = dw		dm = 2 dw	
	Exp.	Taylor	Exp.	Taylor	Exp.	Taylor	Exp.	Taylor
0,01	0,039	0,039	0,202	0,202	0,502	0,502	0,801	0,801
0,5	0,092	0,093	0,291	0,292	0,603	0,603	0,856	0,856
1	0,162	0,167	0,397	0,4	0,698	0,7	0,9	0,9
1,5	0,252	0,266	0,512	0,521	0,782	0,787	0,932	0,934
2	0,361	0,397	0,630	0,65	0,852	0,86	0,956	0,956
2,5	0,488	0,564	0,74	0,779	0,906	0,92	0,973	0,977
3	0,624	0,773	0,835	0,9	0,945	0,967	0,985	0,991
3,5	0,755	1	0,906	1	0,971	1	0,992	1
4	0,864	1	0,955	1	0,987	1	0,997	1
4,5	0,940	1	0,983	1	0,995	1	0,999	1
5	0,980	1	0,995	1	0,998	1	0,999	1

Πίνακας 4.3. Μέσο σφάλμα (%) της προσέγγισης Taylor για $n=2$ και μέσο SNR=10 dB.

Rs (bits/s)	dw=5dm	dw=2dm	dm=dw	dm=2dw
$0 < R_s \leq 5$	10,47	3,31	0,96	0,25
$0 < R_s \leq 3$	8,35	2,73	0,81	0,21
$0 < R_s \leq 1$	1,21	0,34	0,10	0,02

Το σφάλμα είναι αρκετά μικρό για ρεαλιστικές τιμές του Secrecy Rate. Για $R_s < 1$ bit/s, το μέσο σφάλμα είναι μικρότερο από 1%. Τα γραφήματα που ακολουθούν επιβεβαιώνουν την ορθότητα της προσεγγιστικής μεθόδου που εφαρμόσαμε, ενώ δείχνουν την διαφοροποίηση της προσέγγισης Taylor σε σχέση με την αρχική εκθετική κατανομή.

Εικόνα 4.6. Πιθανότητα αποκοπής ως προς Secrecy Rate για $n=2$ και μέσο SNR=10 dB

Εικόνα 4.7. Πιθανότητα αποκοπής ως προς Secrecy Rate για $n=2$ και μέσο SNR=10 dB
(Taylor approx.)

Πίνακας 4.4. Υπολογισμός της πιθανότητας αποκοπής για $n=3.8$ και μέσο SNR=0 dB.

Rs	dw = 5 dm		dw = 2 dm		dm = dw		dm = 2 dw	
	Exp.	Taylor	Exp.	Taylor	Exp.	Taylor	Exp.	Taylor
0,01	0,009	0,009	0,074	0,074	0,505	0,505	0,934	0,934
0,5	0,341	0,416	0,400	0,468	0,726	0,757	0,968	0,972
1	0,634	1	0,678	1	0,877	1	0,987	1
1,5	0,840	1	0,867	1	0,958	1	0,996	1
2	0,951	1	0,961	1	0,99	1	0,999	1
2,5	0,991	1	0,993	1	0,998	1	0,999	1

Πίνακας 4.5. Μέσο σφάλμα (%) της προσέγγισης Taylor για $n=3.8$ και μέσο SNR=0 dB.

Rs (bits/s)	dw=5dm	dw=2dm	dm=dw	dm=2dw
$0 < R_s \leq 3$	13,12	7,69	2,16	0,20
$0 < R_s \leq 0,5$	10,96	8,51	2,14	0,19
$R_s=0.01$	0	0	0	0

Για την περίπτωση όπου $n=3.8$ και μέσο SNR=0 dB (κυρίως κανάλι), ο μέγιστος εφικτός Secrecy Rate είναι μικρότερος από 1 bit per second, ενώ για μία αποδεκτή τιμή της πιθανότητας αποκοπής, ο Secrecy Rate δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 0.5 bits per second, συναρτήσει βέβαια και της σχετικής θέσης του νόμιμου χρήστη και του ωτακουστή εντός της τοπολογίας. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται και στα κάτωθι γραφήματα.

Στις εικόνες παρατηρούμε τη μεταβολή των τιμών της Αποκοπής Χωρητικότητας Ασφαλείας συναρτήσει της πιθανότητας αποκοπής για διάφορες τιμές του λόγου αποστάσεων για έκαστο από τα 2 προαναφερθέντα σενάρια.

Εικόνα 4.8. Πιθανότητα αποκοπής ως προς Secrecy Rate για $n=3.8$ και μέσο SNR=0 dB

Εικόνα 4.9. Πιθανότητα αποκοπής ως προς Secrecy Rate για $n=3.8$ και μέσο SNR=0 dB (Taylor approx.)

Εικόνα 4.10. Outage Secrecy Capacity για $n=2$ και μέσο SNR=10 dB

Εικόνα 4.11. Outage Secrecy Capacity για $n=3.8$ και μέσο SNR=0 dB

4.4 Επίδραση της κινητικότητας των χρηστών στην Ασφάλεια Φυσικού Επιπέδου

4.4.1 Στοιχειοθέτηση προβλήματος

Εξετάζοντας τη γενική περίπτωση της μεταβολής των παραμέτρων της Ασφάλειας Φυσικού Επιπέδου συναρτήσει του λόγου αποστάσεων του νόμιμου δέκτη και του ωτακουστή [72], συμπεραίνουμε πως υπάρχει ανάγκη συγκεκριμένης και εξειδικευμένης διερεύνησης της επίδρασης της μεταβολής της θέσης των χρηστών, βάσει συγκεκριμένων μοντέλων θεώρησης του τρόπου κίνησης των χρηστών, πάνω στην αξιοπιστία της Ασφάλειας Φυσικού Επιπέδου με διερεύνηση των μεταβολών στα όρια τιμών των παραμέτρων της μεθόδου WITS. Η διερεύνηση αυτή έλαβε χώρα με θεωρητική κατ' αρχάς προσομοίωση των μεταβολών αυτών [73], λαμβάνοντας υπόψη παράλληλες προσπάθειες εξέτασης της σχετικής γεωμετρίας εντός της οποίας κατανέμονται οι χρήστες [74].

4.4.2 Μοντέλα Κινητικότητας (Mobility Models)

Υπάρχουν διάφορα μοντέλα κινητικότητας τα οποία έχουν προταθεί μέσω της βιβλιογραφίας, με σκοπό να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με εργαλεία για ρεαλιστικές προσομοιώσεις σε κινητά ad hoc δίκτυα [75] και [76]. Το πλέον διαδεδομένο μοντέλο κινητικότητας είναι αυτό του Τυχαίου Σημείου (RWP). Στο μοντέλο RWP, οι κόμβοι επιλέγουν έναν τυχαίο προορισμό στην περιοχή της προσομοίωσης και μετακινούνται γύρω της, χρησιμοποιώντας μια ακαθόριστη αλλά ομοιόμορφα κατανεμημένη ταχύτητα [77]. Μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα παύσης, επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία. Αρκετές παραλλαγές του τύπου RWP εξετάζουν επεκτάσεις της εν λόγω διαδικασίας. Τυπικά παραδείγματα θεωρούνται τα μοντέλα κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης (RD) (όπου οι κόμβοι καθορίζουν την ταχύτητα και την κατεύθυνση, και κινούνται μέχρι να φτάσουν το σύνορο της περιοχής) [78], και το Ρεαλιστικό Μοντέλο Κίνησης (όπου ταχύτητα και κατεύθυνση ακολουθούν διανομές οι οποίες αποδίδουν επακριβώς την κίνηση κόμβου) [79].

Έχουμε σχεδιάσει και αναπτύξει ένα μοντέλο κινητικότητας που μιμείται την ανθρώπινη κινητικότητα σε ένα περιβάλλον με εμπόδια. Το μοντέλο αυτό ονομάζεται Μοντέλο Ανθρώπινης Κινητικότητας (HUMO) και έχει αναπτυχθεί για να προσομοιώσει ρεαλιστικά τα κινητά ad hoc δίκτυα, τα οποία λειτουργούν σε περιοχές με εμπόδια στο πλαίσιο της αποστολής κρίσιμων εφαρμογών [80], [81]. Σε γενικές γραμμές, σύμφωνα με το μοντέλο MCM, κάθε κόμβος κινείται προς το επιλεγμένο σημείο προορισμού, με ένα τυχαίο αριθμό στροφών που έγκειται μεταξύ U_{min} και U_{max} . Όταν ο κόμβος φθάσει στο σημείο αυτό, αναμένει για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα παύσης P , προκειμένου να επιτευχθεί μια συγκεκριμένη αποστολή και στη συνέχεια επαναλαμβάνει την παραπάνω διαδικασία ξανά. Το σημείο προορισμού επιλέγεται χρησιμοποιώντας μια ομοιόμορφη κατανομή και αναπαράγει την ανάθεση μιας αποστολής στον κόμβο, σχετικά με ένα γεγονός που συνέβη σε αυτό το συγκεκριμένο σημείο. Κάθε κόμβος μπορεί να κινείται ελεύθερα στην περιοχή υπό μελέτη όσο το σημείο δε παραμένει εντός των συνόρων του εμποδίου. Χωρίς απώλεια της γενικότητας, τα εμπόδια λαμβάνονται υπ' όψιν ως ορθογώνια, τα οποία έχουν δύο βασικές έννοιες.

Η πρώτη αφορά τον περιορισμό της κινητικότητας του κόμβου προς ένα συγκεκριμένο σημείο. Το δεύτερο αφορά την εισαγωγή εξασθένησης του σήματος, προκειμένου να συνυπολογισθούν φαινόμενα όπως οι διαλείψεις και η πολύ-όδευση. Κάθε κόμβος κινείται γύρω από τα εμπόδια ακολουθώντας μια επαναληπτική διαδικασία, προκειμένου να επιτευχθεί το επιλεγμένο σημείο προορισμού. Εάν υπάρχει ανεμπόδιστη οπτική επαφή που συνδέει τον κόμβο με το σημείο προορισμού, ο κόμβος ακολουθεί αυτή την απευθείας γραμμή για να πάρει το επιθυμητό προορισμό. Διαφορετικά, ο κόμβος θέτει ως επόμενο ενδιάμεσο προορισμό του την κορυφή της άμεσα ορατής άκρης που βρίσκεται πλησιέστερα προς τον προορισμό και επαναλαμβάνει την ίδια διαδικασία ξανά, με αφετηρία την ίδια αρχική του θέση και έχοντας ως προορισμό την επιλεγείσα κορυφή.

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί μια ανεμπόδιστη απευθείας γραμμή, έως ότου να επιτευχθεί ο προεπιλεγμένος προορισμός [82].

4.4.3 Αριθμητικά αποτελέσματα

Ορίζουμε τον λόγο αποστάσεων πριν και μετά την κίνηση του χρήστη, d_M/d_W και d_M'/d_W' , αντίστοιχα. Θεωρούμε τον Παράγοντα Λόγων Αποστάσεων (Distance Ratio Factor, DRF) ως:

$$dR = \left(\frac{d_M'/d_W'}{d_M/d_W} \right) \quad (4.50)$$

Η πιθανότητα μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας μετά την κίνηση του χρήστη υπολογίζεται ως συνάρτηση της αρχικής τιμής (πριν την κίνηση του χρήστη) και του DRF. Για χάριν απλοποίησης των υπολογισμών, θεωρούμε εκθέτη απωλειών οδεύσεως ίσο με $n=2$:

$$\begin{aligned} P(C_s > 0)' &= \frac{1}{1 + \left(\frac{d_M'}{d_W'} \right)^2} = \\ &= \frac{1}{1 + dR^2 \left(\frac{d_M}{d_W} \right)^2} = \frac{1}{1 + dR^2 \left(\frac{1}{P(C_s > 0)} - 1 \right)} \end{aligned} \quad (4.51)$$

Αν $DRF < 1$, δηλαδή όταν ο λόγος αποστάσεων μετά την κίνηση d_M'/d_W' , είναι μικρότερος από τον λόγο αποστάσεων d_M/d_W πριν την κίνηση, η αύξηση της $P(C_s > 0)$ είναι σημαντική. Αντιθέτως, μία σημαντική αύξηση του λόγου αποστάσεων μετά την κινητικότητα του χρήστη συγκριτικά με τον λόγο αποστάσεων πριν την όποια μεταβολή της θέσης των χρηστών οδηγεί σε ραγδαία μείωση της τιμής της $P(C_s > 0)$, διακινδυνεύοντας ως εκ τούτου την Ασφάλεια Φυσικού Επιπέδου.

Εικόνα 4.12. Πιθανότητα μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας πριν και μετά την κίνηση του χρήστη για $DRF < 1$

Εικόνα 4.13. Πιθανότητα μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας πριν και μετά την κίνηση του χρήστη για $DRF > 1$

Θεωρούμε ένα πιο συγκεκριμένο σενάριο κίνησης για να εξετάσουμε την επίδραση της κινητικότητας στις παραμέτρους της Ασφάλειας Φυσικού Επιπέδου. Θεωρούμε ακίνητο πομπό, ακίνητο νόμιμο δέκτη και κινούμενο ωτακουστή, με βάσει το μοντέλο HUMO. Χωρίς απώλεια γενικότητας, θεωρούμε ότι η κίνηση αυτή γίνεται με χαμηλή ταχύτητα (τυπικά ίση με 1 m/s). Συνεπώς δεν υφίσταται φαινόμενο Doppler και άρα δεν έχουμε ταχείες διαλείψεις (fast fading).

Η τελική απόσταση του ωτακουστή από τον πομπό ισούται με:

$$d_w' = d_w - u\Delta t \quad (4.52)$$

Σε αυτήν την περίπτωση ο DRF υπολογίζεται ως:

$$dR = \left(\frac{d_M' / d_w'}{d_M / d_w} \right) = \frac{d_M' d_w}{d_M d_w'} = \frac{d_w}{d_w'} \quad (4.53)$$

$$\frac{1}{dR} = \frac{d_w'}{d_w} = \sqrt{\frac{(1 - P(C_s > 0))P(C_s > 0)'}{(1 - P(C_s > 0))P(C_s > 0)}} \quad (4.54)$$

Θεωρούμε δύο σενάρια κινητικότητας του ωτακουστή και εξετάζουμε την επίδραση αυτής της κινήσεως στην τιμή της $P(C_s > 0)$. Και στις δύο περιπτώσεις ο ωτακουστής πλησιάζει τον πομπό.

Το πρώτο σενάριο θεωρεί πως η πιθανότητα της μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας μειώνεται κατά 0.5:

$$P(C_s > 0) - P(C_s > 0)' = 0.5 \quad (4.55)$$

Το πρώτο σενάριο θεωρεί πως η πιθανότητα της μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας μειώνεται κατά 0.3:

$$P(C_s > 0) - P(C_s > 0)' = 0.3 \quad (4.56)$$

Στο σχήμα που ακολουθεί, παρατηρούμε πως για να επιτευχθεί μία μείωση της $P(C_s > 0)$ κατά 0.5, ο ωτακουστής πρέπει να μειώσει την απόστασή του από τον πομπό κατά 3 φορές (όταν η αρχική τιμή της $P(C_s > 0)$ είναι 0.75). Για να επιτευχθεί μία μείωση της $P(C_s > 0)$ κατά 0.3, ο ωτακουστής πρέπει να μειώσει την απόστασή του από τον πομπό κατά 2 φορές (όταν η αρχική τιμή της $P(C_s > 0)$ είναι 0.65).

Εικόνα 4.14. Συσχετισμός κίνησης ωτακουστή και μείωσης πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας

Όπως αποδείξαμε, η κλειστή μορφή του τύπου που υπολογίζει την Αποκοπή Χωρητικότητας Ασφαλείας για δεδομένη πιθανότητα αποκοπής p δίδεται από:

$$C_{out}(p) = \log_2 \left(\frac{p + \frac{1}{\bar{\gamma}_M}}{\left(\frac{d_M}{d_W} \right)^n (1-p) + \frac{1}{\bar{\gamma}_M}} \right) \quad (4.57)$$

Συνεπώς:

$$\left(\frac{d_M}{d_W} \right)^2 (1-p) = \frac{p + \frac{1}{\bar{\gamma}_M}}{2^{R_s}} - \frac{1}{\bar{\gamma}_M} \quad (4.58)$$

Άρα μετά την κίνηση του χρήστη έχω ($\bar{\gamma}_M' = \bar{\gamma}_M$):

$$C_{out}'(p) = \log_2 \left(\frac{p + \frac{1}{\bar{\gamma}_M}}{dR^2 \left(\frac{p + \frac{1}{\bar{\gamma}_M}}{2^{R_s}} - \frac{1}{\bar{\gamma}_M} \right) + \frac{1}{\bar{\gamma}_M}} \right) \quad (4.59)$$

Εικόνα 4.15. Αποκοπή Χωρητικότητας Ασφαλείας
πριν και μετά την κίνηση του ωτακουστή

Όπως φαίνεται από το γράφημα, η αρχική τιμή του Secrecy Rate (Αποκοπή Χωρητικότητας Ασφαλείας πριν την κίνηση του ωτακουστή) πρέπει να είναι μεγαλύτερη του 1.2 bits/s προκειμένου να υπάρξει ένας μη-μηδενικός, έστω και οριακά, Secrecy Rate, μετά την κίνηση του ωτακουστή.

Θεωρήσαμε ένα κατώφλι πιθανότητας αποκοπής ίσο με 0.3 και έναν μέσο SNR κυρίως καναλιού της τάξης των 10 dB (sub-optimal σενάριο).

4.5 Διερεύνηση των παραμέτρων WITS σε περιβάλλον με εμπόδια, διαλείψεις και παρεμβολές για σενάριο ενός ωτακουστή

4.5.1 Διερεύνηση επίδρασης εμποδίων στις παραμέτρους WITS

Η θεώρηση του κινούμενου ωτακουστή απέδειξε πόσο ευαίσθητο είναι το εύρος τιμών των παραμέτρων της Ασφάλειας Φυσικού Επιπέδου σε μεταβολές της θέσης των χρηστών για δεδομένο μοντέλο κινητικότητας.

Στην πραγματικότητα, μία πλήρης διερεύνηση των ορίων τιμών των παραμέτρων WITS για ρεαλιστικά περιβάλλοντα κίνησης των χρηστών απαιτεί:

- Να θεωρήσουμε περιβάλλον με εμπόδια και να ενσωματώσουμε την επίδραση των εμποδίων στις τιμές των παραμέτρων WITS
- Να θεωρήσουμε και τον νόμιμο δέκτη ως κινούμενο χρήστη εντός του ιδίου περιβάλλοντος
- Να θεωρήσουμε την κίνηση του νόμιμου δέκτη ανεξάρτητη από την κίνηση του ωτακουστή
- Να θεωρήσουμε ρεαλιστικές τιμές στάθμης θορύβου και παρεμβολών και να συνυπολογίσουμε την επίδρασή τους στις τιμές των παραμέτρων WITS.

Αρχικά εξετάζουμε ένα περιβάλλον εμποδίων, διαλείψεων και παρεμβολών με παρουσία ενός ωτακουστή [83] πραγματοποιώντας πειραματικές μετρήσεις. Στη συνέχεια εξετάσαμε το σενάριο πολλαπλών ωτακουστών [84]. Τα πειραματικά αποτελέσματα αντιπαραβάλλονται με αποτελέσματα προσομοίωσης.

4.5.2 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης

Στο κάτωθι γράφημα απεικονίζεται η θεωρητική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) της πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας για σενάριο ενός ωτακουστή. Θεωρήσαμε μία περιοχή κίνησης ως τετράγωνο πλέγμα 5x5, όπου το εμπόδιο εδράζει στο κέντρο του πλέγματος, τόσο ο νόμιμος δέκτης όσο και ο ωτακουστής κινούνται με χαμηλή ταχύτητα (1 m/s) σύμφωνα με το μοντέλο HUMO, ενώ ο πομπός θεωρείται ακίνητος σε σταθερή τοποθεσία εντός του πλέγματος.

Εικόνα 4.16. PDF της πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας για παρουσία ενός ωτακουστή (προσομοίωση)

Είναι προφανές πως η PDF της πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας τείνει γύρω από την τιμή 0.5, καθώς δεν έχουμε θεωρήσει κάποιο σενάριο πριμοδότησης του νόμιμου χρήστη ή του ωτακουστή, με αποτέλεσμα να υπάρχει μία σύγκλιση στην τιμή 0.5. Το κατά πόσο η θεώρηση αυτή, στα πλαίσια της προσομοίωσης, αντανακλάται και σε ένα πραγματικό περιβάλλον ράδιο-διάδοσης με εμπόδια, θα εξεταστεί στην επόμενη ενότητα.

4.5.3 Πειραματικά αριθμητικά αποτελέσματα

Ένα ad-hoc 802.11n δίκτυο τριών χρηστών υλοποιήθηκε για τις ανάγκες των πειραματικών μετρήσεων. Χωρίς απώλεια γενικότητας, η ολική EIRP κάθε χρήστη ήταν 10 dBm. Αμφότεροι δέκτες (νόμιμος και ωτακουστής) ήταν συνδεδεμένοι με το λογισμικό NetStumbler για την καταγραφή των τιμών της λαμβανόμενης ισχύος (τοπικής μέσης τιμής). Κατ' αντιστοιχία των θεωρητικών ευρημάτων της προηγούμενης ενότητας, ο ωτακουστής κινείται ελεύθερα στον χώρο. Ο νόμιμος χρήστης θεωρείται ακίνητος αλλά σε διαφορετικές θέσεις κάθε φορά σε σχέση με τον πομπό, ο οποίος παραμένει σε σταθερή τοποθεσία εντός της περιοχής ράδιο-διάδοσης.

Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στον χώρο του Πανεπιστημίου Πατρών, στην ευρύτερη περιοχή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών. Εξετάστηκαν τρία σενάρια ράδιο-διάδοσης: δύο OLOS και ένα NLOS. Σε κάθε περίπτωση, η ταχύτητα κίνησης δεν επιδρά στα χαρακτηριστικά του καναλιού. Τα σημεία T3 και T4 απεικονίζουν την θέση του πομπού σε κάθε ένα από τα 2 OLOS σενάρια και αντιστοίχως το σημείο T5 για το NLOS σενάριο. Όλα τα υπόλοιπα σημεία απεικονίζουν τις διάφορες θέσεις του νόμιμου δέκτη. Η κίνηση του ωτακουστή είναι σημειωμένη κάθε φορά με διακεκομμένη γραμμή.

Εικόνα 4.17. Τοπολογία μετρήσεων για τα OLOS σενάρια

Εικόνα 4.18. Τοπολογία μετρήσεων για το NLOS σενάριο

Στον πίνακα 4.6 απεικονίζονται οι στάθμες της τοπικής μέσης ισχύος και του μέσου SNR για όλες τις θέσεις του νόμιμου δέκτη, και για τον ωτακουστή, με δειγματοληψία από την πορεία κίνησης για το πρώτο OLOS σενάριο.

Η στάθμη περιβαλλοντικού θορύβου μετρήθηκε στα -98 dBm και οι παρεμβολές από άλλα δίκτυα στα 2.4 GHz μετρήθηκαν στα -85 dBm.

Πίνακας 4.6. Τοπική μέση ισχύς και μέσο SNR για το OLOS-1 σενάριο

OLOS T3	Pr (nW)	Pr (dBm)	SNR (dB)
A3 (main)	1,26	-59	26
B3 (main)	0,32	-65	20
C3 (main)	0,03162	-75	10
D3 (main)	0,03162	-75	10
X31 (eaves)	0,00631	-82	3
X32 (eaves)	0,5	-63	22
X33 (eaves)	0,5	-63	22
X33 (eaves)	10	-65	20
X35 (eaves)	2,51	-56	29
X36 (eaves)	1,58	-58	27

Στον πίνακα 4.7 απεικονίζονται οι τιμές της πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφάλειας για το OLOS-1 σενάριο. Έχουν ληφθεί υπόψη όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί ανάμεσα στις τιμές της τοπικής μέσης ισχύος για τον νόμιμο δέκτη και τις δειγματοληπτικά ληφθείσες τιμές της τοπικής μέσης ισχύος για τον ωτακουστή.

Όπως βλέπουμε από τα αποτελέσματα, οι τιμές της τοπικής μέσης ισχύος είναι της τάξης των nW. Ο μέσος SNR για τα κανάλια των δύο χρηστών (νόμιμου και ωτακουστή) κυμαίνεται από λίγα dB πάνω από το μηδέν μέχρι περίπου 30 dB.

Οι υπολογισθείσες τιμές της πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφάλειας κυμαίνονται από 0.003 όπου η μέθοδος WITS τίθεται εν αμφιβόλω μέχρι την τιμή 0.995, όπου $\bar{\gamma}_M \gg \bar{\gamma}_W$.

Πίνακας 4.7. Τιμές της $P(C_s > 0)$ για το OLOS-1 σενάριο

Pr legit. (nW)	Pr eaves. (nW)	SNR ratio	P(Cs>0)
1,26	0,00631	0,005007937	0,995
1,26	0,5	0,396825397	0,716
1,26	0,5	0,396825397	0,716
1,26	10	7,936507937	0,112
1,26	2,51	1,992063492	0,334
1,26	1,58	1,253968254	0,444
0,32	0,00631	0,01971875	0,981
0,32	0,5	1,5625	0,390
0,32	0,5	1,5625	0,390
0,32	10	31,25	0,031
0,32	2,51	7,84375	0,113
0,32	1,58	4,9375	0,168
0,03162	0,00631	0,199557242	0,834
0,03162	0,5	15,81277672	0,059
0,03162	0,5	15,81277672	0,059
0,03162	10	316,2555345	0,003
0,03162	2,51	79,38013915	0,012
0,03162	1,58	49,96837445	0,020

Στον πίνακα 4.8 απεικονίζονται οι στάθμες της τοπικής μέσης ισχύος και του μέσου SNR για όλες τις θέσεις του νόμιμου δέκτη, και για τον ωτακουστή, με δειγματοληψία από την πορεία κίνησης για το δεύτερο OLOS σενάριο. Όπως και στην πρώτη περίπτωση, η στάθμη των τοπικών μέσων ισχύων παραμένει στην κλίμακα των nW, με ελαφρά χαμηλότερες τιμές από την πρώτη περίπτωση. Παρότι παραμένει μία OLOS περίπτωση ράδιο-διάδοσης, η παρουσία δέντρων και βλάστησης στις συγκεκριμένες τοποθεσίες που έχουν επιλεγεί σε σχέση με την θέση του νόμιμου δέκτη και τα παρεμβαλλόμενα εμπόδια στο μονοπάτι οδεύσεως από τον πομπό.

Πίνακας 4.8. Τοπική μέση ισχύς και μέσο SNR για το OLOS-2 σενάριο

OLOS T4	Pr (nW)	Pr (dBm)	SNR (dB)
A4 (main)	0,32	-65	20
B4 (main)	0,32	-65	20
C4 (main)	0,0158	-78	7
D4 (main)	0,32	-65	20
E4 (main)	1	-60	25
F4 (main)	0,05012	-73	12
X41 (eaves)	0,1	-70	15
X42 (eaves)	0,32	-65	20
X43 (eaves)	0,63	-62	23
X44 (eaves)	1	-60	25
X45 (eaves)	1,58	-58	27
X46 (eaves)	2,51	-56	29

Στον πίνακα 4.9 απεικονίζονται οι τιμές της πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφάλειας για το OLOS-2 σενάριο.

Όπως βλέπουμε από τα αποτελέσματα, οι τιμές της τοπικής μέσης ισχύος είναι της τάξης των nW. Ο μέσος SNR για τα κανάλια των δύο χρηστών (νόμιμου και ωτακουστή) κυμαίνεται από λίγα dB πάνω από το μηδέν μέχρι περίπου 30 dB.

Οι υπολογισθείσες τιμές της πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφάλειας κυμαίνονται από 0.006 μέχρι την τιμή 0.909, όπου $\bar{\gamma}_M \gg \bar{\gamma}_W$.

Πίνακας 4.9. Τιμές της $P(C_s > 0)$ για το OLOS-2 σενάριο

Pr legit. (nW)	Pr eaves. (nW)	SNR ratio	P(Cs>0)
0,32	0,1	0,3125	0,762
0,32	0,32	1	0,500
0,32	0,63	1,96875	0,337
0,32	1	3,125	0,242
0,32	1,58	4,9375	0,168
0,32	2,51	7,84375	0,113
0,0158	0,1	6,32911392	0,136
0,0158	0,32	20,2531646	0,047
0,0158	0,63	39,8734177	0,024
0,0158	1	63,2911392	0,016
0,0158	1,58	100	0,010
0,0158	2,51	158,860759	0,006
1	0,1	0,1	0,909
1	0,32	0,32	0,758
1	0,63	0,63	0,613
1	1	1	0,500
1	1,58	1,58	0,388
1	2,51	2,51	0,285
0,05012	0,1	1,99521149	0,334
0,05012	0,32	6,38467678	0,135
0,05012	0,63	12,5698324	0,074
0,05012	1	19,9521149	0,048
0,05012	1,58	31,5243416	0,031
0,05012	2,51	50,0798085	0,020

Στον πίνακα 4.10 απεικονίζονται οι στάθμες της τοπικής μέσης ισχύος και του μέσου SNR για όλες τις θέσεις του νόμιμου δέκτη, και για τον ωτακουστή, με

δειγματοληψία από την πορεία κίνησης για το NLOS σενάριο. Η στάθμη των τοπικών μέσων ισχύων είναι αυτή τη φορά της τάξεως των μW .

Στον πίνακα 4.11 απεικονίζονται οι τιμές της πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφάλειας για το NLOS σενάριο.

Πίνακας 4.10. Τοπική μέση ισχύς και μέσο SNR για το NLOS σενάριο

NLOS T5	Pr (μW)	Pr (dBm)	SNR (dB)
A5 (main)	15,8	-78	7
B5 (main)	10	-80	5
C5 (main)	100	-70	15
D5 (main)	3,16	-85	0
X51 (eaves)	10	-80	5
X52 (eaves)	31,62	75	10

Πίνακας 4.11. Τιμές της $P(C_s > 0)$ για το NLOS σενάριο

Pr legit. (μW)	Pr eaves. (μW)	SNR ratio	P(Cs>0)
15,8	10	0,632911	0,612
15,8	31,62	2,001266	0,333
10	10	1	0,500
10	31,62	3,162	0,240
100	10	0,1	0,909
100	31,62	0,3162	0,760
3,16	10	3,164557	0,240
3,16	31,62	10,00633	0,091

Στον πίνακα 4.12 απεικονίζονται οι συγκεντρωτικές τιμές του μέσου SNR και της πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφάλειας για κάθε σενάριο ράδιο-διάδοσης καθώς και οι ολικές μέσες τιμές.

Πίνακας 4.12. Τιμές μέσου SNR και της $P(C_s > 0)$ για όλα τα σενάρια

Scheme	Av. main SNR (dB)	Av. eaves SNR (dB)	P(Cs>0)
OLOS-1 (T3)	16,5	23	0,354
OLOS-2 (T4)	17,3	21,5	0,269
NLOS (T5)	6,8	7,5	0,461
Overall	13,53	17,33	0,361

4.6 Διερεύνηση των παραμέτρων WITS σε περιβάλλον με εμπόδια, διαλείψεις και παρεμβολές για σενάριο πολλαπλών ωτακουστών

4.6.1 Σενάριο πολλαπλών ωτακουστών

Εξετάζουμε ένα σενάριο με $k=4$ ωτακουστές. Για να διερευνήσουμε το ενδεχόμενο συντονισμένης συνεργασίας αυτών των παθητικών εισβολέων, θεωρούμε δύο πιθανές μεθοδολογίες: Selection Combining (SC) και Maximal-Ratio Combining (MRC). Στην πρώτη περίπτωση (SC), επιλέγεται το καλύτερο σήμα από τα διαθέσιμα, ενώ στην δεύτερη περίπτωση (MRC), το ολικό θεωρηθέν σήμα ισούται με το άθροισμα των σημάτων όλων των ενεργών ωτακουστών. Μεταξύ άλλων, η συγκριτική διερεύνηση των δύο μεθόδων θα μας επιτρέψει να συμπεράνουμε αν για $k=4$ ωτακουστές, το άθροισμα ανεξάρτητων σημάτων υπερβαίνει το μεγαλύτερο από τα ανεξαρτήτως ληφθέντα σήματα.

Όπως και στην περίπτωση του ενός ωτακουστή, η διερεύνηση του σεναρίου πολλαπλών ωτακουστών εμπεριέχει τόσο προσομοιώσεις όσο και πειραματικές μετρήσεις.

4.6.2 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης

Στα παρακάτω γραφήματα απεικονίζονται οι PDF και CDF αντιστοίχως για το σενάριο 4 ωτακουστών για αμφοτέρους μεθόδους SC και MRC. Σύμφωνα με την CDF, η μέθοδος MRC εμφανίζει υψηλότερη πιθανότητα να έχουμε $P(C_s > 0) < 0.2$. Στην περιοχή με το κατώφλι $P(C_s > 0) > 0.2$, οι δύο μέθοδοι συγκλίνουν. Για αμφοτέρους μεθόδους, η πιθανότητα ότι η $P(C_s > 0)$ θα υπερβεί το κατώφλι του 0.5 είναι χαμηλή (περίπου 0.2), με ελαφρώς υψηλότερη τιμή για την SC περίπτωση.

Η PDF για την μέθοδο MRC επιβεβαιώνει μία υψηλότερη συγκέντρωση τιμών της $P(C_s > 0)$ στην περιοχή κάτω από το 0.2. Με ενδιαφέρον παρατηρούμε μία συγκέντρωση τιμών της $P(C_s > 0)$ στην περιοχή γύρω από το 0.5 για την SC μέθοδο. Αυτό οφείλεται στο ότι σε επίπεδο προσομοίωσης, το σενάριο των πολλαπλών ωτακουστών στην SC περίπτωση προσεγγίζει την κλασική περίπτωση του ενός ωτακουστή.

Εικόνα 4.19. PDF της πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας για παρουσία 4 ωτακουστών (προσομοίωση)

Εικόνα 4.20. CDF της πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας για παρουσία 4 ωτακουστών (προσομοίωση)

4.6.3 Πειραματικά αριθμητικά αποτελέσματα

Για τις πειραματικές μετρήσεις, υλοποιήθηκε ένα 802.11n ad-hoc δίκτυο με 6 κόμβους. Ο πρώτος κόμβος θεωρείται ως ο πομπός, ο δεύτερος ως ο νόμιμος χρήστης και οι υπόλοιποι 4 είναι οι ωτακουστές. Όλοι οι κόμβοι κινούνται εντός της περιοχής ράδιο-διάδοσης (η ίδια τοπολογία εντός του Πανεπιστημίου Πατρών όπως και στο σενάριο ενός ωτακουστή) με βάσει το μοντέλο HUMO. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 15 επαναλήψεις της πειραματικής διαδικασίας, οδηγώντας σε 125 διαφορετικές διαδρομές που παρήχθησαν από τον ns-2 προσομοιωτή, στον οποίον υλοποιήθηκε ως add-on το μοντέλο HUMO. Έχουμε λοιπόν αντίστοιχα 125 σερ μετρήσεων για την τοπική μέση τιμή του SNR για κάθε κινούμενο χρήστη. Η ολική EIRP κάθε κόμβου είναι 10 dBm. Η στάθμη περιβαλλοντικού θορύβου μετρήθηκε στα -98 dBm και οι παρεμβολές από άλλα δίκτυα στα 2.4 GHz μετρήθηκαν στα -85 dBm. Οι τιμές του μέσου SNR για κάθε κινούμενο χρήστη και για κάθε επανάληψη του πειράματος απεικονίζονται στον πίνακα 4.13.

Πίνακας 4.13. Τιμές μέσου SNR για τους κινούμενους χρήστες

Field Test	Leg. Rc.	Eaves. 1	Eaves. 2	Eaves. 3	Eaves. 4
Trials	SNR (dB)	SNR (dB)	SNR (dB)	SNR (dB)	SNR (dB)
1	6.81	-4.57	11.17	9.35	11.64
2	12.68	-5.66	7.19	10.75	21.94
3	12.84	1.26	N/A	18.85	N/A
4	5.57	7.91	N/A	10.9	N/A
5	5.93	22.7	16.42	-0.6	N/A
6	12.85	18.07	22.52	4.42	N/A
7	13.14	6.64	14.02	0	-0.44
8	20.66	9.7	1.62	3.08	1.88
9	26.81	-2.08	N/A	1.46	N/A
10	38.14	-5.46	-0.14	7.39	N/A
11	6.71	10.68	10.33	2.5	N/A
12	3.57	-2.92	7.63	N/A	N/A
13	2.78	6.17	17.21	4.6	N/A
14	2.64	12.21	6.29	2.48	N/A
15	6.92	3.12	7.23	N/A	N/A

Αξίζει να σημειωθεί πως σε ορισμένες επαναλήψεις της πειραματικής διαδικασίας, όπως φαίνεται και στον πίνακα 4.13, δεν είναι και οι 4 ωτακουστές εντός εμβέλειας σήματος. Αυτό συμβαίνει γιατί οι διαδρομές των κόμβων παρήχθησαν με βάση το μοντέλο HUMO ως προς τα εμπόδια της τοπολογίας και δεν ελήφθη υπόψη η πιθανότητα να βρεθεί κάποιος χρήστης, λόγω της προδιαγεγραμμένης κίνησης, εκτός εμβέλειας δικτύου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως π.χ. στις επαναλήψεις 7 και 8, και οι 4 ωτακουστές βρίσκονται εκτός εμβέλειας δικτύου. Σε άλλες περιπτώσεις, 1 ή 2 ωτακουστές βρίσκονται εκτός εμβέλειας, π.χ. στις επαναλήψεις 12 και 15. Σε όλες τις επαναλήψεις όμως, τουλάχιστον 2 ωτακουστές είναι εντός εμβέλειας δικτύου, ούτως ώστε να έχουμε σε κάθε περίπτωση σενάριο πολλαπλών ωτακουστών.

Οι πίνακες 4.14 και 4.15 παρουσιάζουν εκτενώς τα στατιστικά στοιχεία της συνδεσιμότητας των ωτακουστών βάσει της κίνησής τους εντός της τοπολογίας ράδιο-διάδοσης.

Πίνακας 4.14. Πλήθος ‘ενεργών’ ωτακουστών σε κάθε επανάληψη του πειράματος

Field Test Trials	Number of ‘active’ eaves.
1	4
2	4
3	2
4	2
5	3
6	3
7	4
8	4
9	2
10	3
11	3
12	2
13	3
14	3
15	2

Πίνακας 4.15. Στατιστική ‘ενεργών’ ωτακουστών

Metrics	Mean	Median	Min	Max	Std Dev
No. of Eavesdroppers	2.93	3	2	4	0.8

Στο γράφημα που ακολουθεί απεικονίζονται οι υπολογισθείσες τιμές της πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφάλειας για τις δύο μεθόδους SC και MRC για το σύνολο των επαναλήψεων. Οι τιμές παρουσιάζονται συγκεντρωτικά και στους πίνακες 4.16 και 4.17. Για τις επαναλήψεις 8, 9, 10, $P(C_s > 0) \cong 1$, (perfect secrecy). Για τις επαναλήψεις 7 και 15, $P(C_s > 0) \cong 0.5$. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, η Ασφάλεια Φυσικού Επιπέδου διακινδυνεύεται, καθώς, $P(C_s > 0) < 0.3$.

Συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους για κάθε πειραματική επανάληψη, διαπιστώνουμε πως τα αποτελέσματα διαφέρουν, από σχεδόν ταυτόσημες τιμές (επαναλήψεις 9, 10) σε σημαντικά αποκλίνουσες, όπως στις επαναλήψεις 1 και 11, όπου η μέθοδος MRC δίνει σημαντικά μικρότερες τιμές της $P(C_s > 0)$ (53% και 43% αντίστοιχα). Στο σύνολο των επαναλήψεων, η τεχνική MRC παρέχει μία μέση μείωση της τάξης του 16.73% στις τιμές της $P(C_s > 0)$ σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές της μεθόδου SC.

Εικόνα 4.21. Τιμές της $P(C_s > 0)$ για σενάριο πολλαπλών ωτακουστών

Πίνακας 4.16. Τοπικές μέσες τιμές της $P(Cs>0)$ για τις πειραματικές επαναλήψεις

Field Test	P(Cs>0)	P(Cs>0)
Trials	SC	MRC
1	0.247	0.116
2	0.106	0.096
3	0.200	0.198
4	0.227	0.163
5	0.021	0.017
6	0.097	0.073
7	0.450	0.401
8	0.926	0.890
9	0.997	0.996
10	0.999	0.999
11	0.286	0.162
12	0.282	0.265
13	0.035	0.031
14	0.099	0.075
15	0.482	0.401

Πίνακας 4.17. Μέση τιμή της $P(Cs>0)$ για το σύνολο των επαναλήψεων

Metrics	Area-mean values	Median	Min	Max	Std Dev
P(Cs>0) - SC	0.364	0.247	0.021	0.999	0.343
P(Cs>0) - MRC	0.326	0.163	0.017	0.999	0.350

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι εμπειρικές CDF και PDF των πειραματικά υπολογισθέντων τιμών της $P(Cs>0)$. Και οι δύο ακολουθούν σε γενικές γραμμές τις αντίστοιχες καμπύλες των προσομοιώσεων.

Για την περιοχή τιμών $0 < P(Cs>0) < 0.2$ η μέθοδος MRC παρέχει υψηλότερη συγκέντρωση τιμών, όπως και στην προσομοίωση. Οι πειραματικές τιμές αποκλίνουν από τις αντίστοιχες των προσομοιώσεων στην περιοχή τιμών $0.85 < P(Cs>0) < 1$: οι εμπειρικές τιμές παρέχουν υψηλότερη συγκέντρωση τιμών από τις προσομοιώσεις.

Εικόνα 4.22. Εμπειρική CDF της πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας για παρουσία 4 ωτακουστών

Εικόνα 4.23. Εμπειρική PDF της πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφαλείας για παρουσία 4 ωτακουστών

Εικόνα 4.24. Data-fitting PDF των τιμών της $P(Cs>0)$ για το SC σενάριο

Εικόνα 4.25. Data-fitting PDF των τιμών της $P(Cs>0)$ για το MRC σενάριο

Πίνακας 4.18. Στατιστικές ιδιότητες των κατανομών που περιγράφουν την $P(C_s > 0)$

SC				MRC			
Distribution: Lognormal				Distribution: Lognormal			
Log likelihood: -0.215512				Log likelihood: 2.0626			
Domain: $0 < y < \text{Inf}$				Domain: $0 < y < \text{Inf}$			
Mean: 0.428065				Mean: 0.375604			
Variance: 0.511524				Variance: 0.478336			
Parameter Estimate Std. Err.				Parameter Estimate Std. Err.			
μ -1.51487 0.29808				μ -1.71895 0.314055			
σ 1.15446 0.222176				σ 1.21633 0.234083			
Estimated covariance of parameter estimates:				Estimated covariance of parameter estimates:			
μ 0.0888519 1.02299e-017				μ 0.0986307 1.2978e-017			
σ 1.02299e-017 0.0493622				σ 1.2978e-017 0.0547948			
Distribution: Gamma				Distribution: Gamma			
Log likelihood: 0.245152				Log likelihood: 1.83866			
Domain: $0 < y < \text{Inf}$				Domain: $0 < y < \text{Inf}$			
Mean: 0.3636				Mean: 0.325533			
Variance: 0.116865				Variance: 0.109158			
Parameter Estimate Std. Err.				Parameter Estimate Std. Err.			
a 1.13126 0.367631				a 0.970808 0.311305			
b 0.321412 0.130376				b 0.335322 0.138864			
Estimated covariance of parameter estimates:				Estimated covariance of parameter estimates:			
a 0.135153 -0.0383994				a 0.0969107 -0.0334734			
b -0.0383994 0.0169979				b -0.0334734 0.0192833			

Οι εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζουν το ιστόγραμμα των πειραματικά υπολογισθέντων τιμών της $P(C_s > 0)$ για τις μεθόδους SC και MRC αντίστοιχα. Σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιούνται η Log-normal και η Gamma κατανομή για data-fitting. Οι στατιστικές ιδιότητες των κατανομών αυτών στο σύνολο των πειραματικών επαναλήψεων απεικονίζονται στον πίνακα 4.18.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η κατανομή Gamma παράσχει καλύτερη προσαρμογή στις εμπειρικές τιμές της $P(C_s > 0)$. Επιπρόσθετα, τα ιστογράμματα εμφανίζουν μία συγκέντρωση τιμών της $P(C_s > 0)$ γύρω από το 0.5.

Σχετικά με την πιθανότητα αποκοπής, αντικαθιστούμε το λόγο SNR και την τοπική μέση τιμή του SNR του κυρίως καναλιού από τις μετρήσεις στον τύπο υπολογισμού της πιθανότητας αποκοπής. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στις γραφικές που ακολουθούν. Σύμφωνα με αυτά, υπάρχει επιβεβαίωση των όσων συμπεράναμε από τις υπολογισθείσες τιμές της πιθανότητας μη-μηδενικής χωρητικότητας ασφάλειας. Οι πειραματικές επαναλήψεις 1, 2, 3, 4, 5, 6, 11, 12, 13 και 14 χαρακτηρίζονται ως χείριστες εκδοχές για την Ασφάλεια Φυσικού Επιπέδου. Στις επαναλήψεις 8, 9, 10 επιτυγχάνεται τέλεια ασφάλεια (perfect secrecy), ενώ στις επαναλήψεις 7 και 15 έχουμε ενδιάμεσα αποτελέσματα.

Ενώ η μέθοδος MRC όντως ενισχύει ελαφρά την δραστηριότητα των ωτακουστών, συνολικά και οι δύο μέθοδοι παρέχουν συγκλίνοντα αποτελέσματα, στις επαναλήψεις 2, 3, 5, 6, 9, 10, 12, 13, 14. Στις υπόλοιπες επαναλήψεις, η μέθοδος MRC παρέχει ελαφρώς υψηλότερες τιμές της πιθανότητας αποκοπής, χωρίς όμως σημαντικές αποκλίσεις από τις τιμές στην περίπτωση της SC μεθόδου.

Εικόνα 4.26. Πιθανότητα αποκοπής ως προς Secrecy Rate για την επανάληψη 1

Εικόνα 4.27. Πιθανότητα αποκοπής ως προς Secrecy Rate για την επανάληψη 2

Εικόνα 4.28. Πιθανότητα αποκοπής ως προς Secrecy Rate για την επανάληψη 3

Εικόνα 4.29. Πιθανότητα αποκοπής ως προς Secrecy Rate για την επανάληψη 4

Εικόνα 4.30. Πιθανότητα αποκοπής ως προς Secrecy Rate για την επανάληψη 5

Εικόνα 4.31. Πιθανότητα αποκοπής ως προς Secrecy Rate για την επανάληψη 6

Εικόνα 4.32. Πιθανότητα αποκοπής ως προς Secrecy Rate για την επανάληψη 7

Εικόνα 4.33. Πιθανότητα αποκοπής ως προς Secrecy Rate για την επανάληψη 8

Εικόνα 4.34. Πιθανότητα αποκοπής ως προς Secrecy Rate για την επανάληψη 9

Εικόνα 4.35. Πιθανότητα αποκοπής ως προς Secrecy Rate για την επανάληψη 10

Εικόνα 4.36. Πιθανότητα αποκοπής ως προς Secrecy Rate για την επανάληψη 11

Εικόνα 4.37. Πιθανότητα αποκοπής ως προς Secrecy Rate για την επανάληψη 12

Εικόνα 4.38. Πιθανότητα αποκοπής ως προς Secrecy Rate για την επανάληψη 13

Εικόνα 4.39. Πιθανότητα αποκοπής ως προς Secrecy Rate για την επανάληψη 14

Εικόνα 4.40. Πιθανότητα αποκοπής ως προς Secrecy Rate για την επανάληψη 15

4.7 Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε η λύση της Ασφάλειας Φυσικού Επιπέδου (Wireless Information-Theoretic Security, WITS) που επιδιώκει να αποτελεί συμπληρωματική λύση προς την κρυπτογραφία ανωτέρου επιπέδου ή και αυτόνομη λύση, ιδιαίτερα σε αυτόνομα δίκτυα. Περιγράφηκε η μέθοδος και οι βασικές της παράμετροι και στη συνέχεια διερευνήθηκε η επίδραση των ρεαλιστικών απωλειών οδεύσεων ενός ασύρματου διαύλου με εμπόδια και διαλείψεις στα όρια των τιμών των παραμέτρων της WITS. Επίσης παρουσιάστηκε για πρώτη φορά σε κλειστή μορφή η παράμετρος της Αποκοπής Χωρητικότητας Ασφαλείας (Outage Secrecy Capacity) και επαληθεύτηκε η ακρίβεια της μεθόδου μας για ρεαλιστικές τιμές των εμπλεκόμενων παραμέτρων. Στη συνέχεια εξετάσαμε την επίδραση της κινητικότητας των χρηστών στην βιωσιμότητα της μεθόδου. Τέλος, διερευνήθηκαν, σε επίπεδο προσομοιώσεων αλλά και με πειραματικές μετρήσεις σε πραγματικό περιβάλλον με εμπόδια και διαλείψεις, τα όρια τιμών των παραμέτρων της WITS υπό την παρουσία ενός ωτακουστή, και εν συνεχεία σε καθεστώς πολλαπλών ωτακουστών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα

5.1 Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα διατριβή παρουσιάστηκε μία εκτενής αξιολόγηση και διερεύνηση της αξιοπιστίας των μοντέλων απωλειών οδεύσεως σε περιβάλλοντα εσωτερικών χώρων. Οι επιλεγμένες τοπολογίες αναλύθηκαν διεξοδικά ως προς τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους και το μηχανισμό ράδιο-διάδοσης που ήταν σε κάθε περίπτωση κατά κύριο λόγο υπεύθυνος για την εξασθένηση σήματος δια μέσω της τοπολογίας.

Η σημασία της συμβολής μας έγκειται στην συγκριτική αντιπαραβολή των βασικότερων μοντέλων απωλειών οδεύσεως σε κατηγορίες τοπολογιών που αντιστοιχούν στην επίσημη ομαδοποίηση των περιβαλλόντων εσωτερικού χώρου από την ITU. Παρατηρήσαμε πως όπου έχουμε τοπολογία με εμπόδια και απώλειες σκίασης, το μοντέλο MWF είναι το πλέον αξιόπιστο για την πρόβλεψη της μέσης απώλειας οδεύσεως.

Επίσης συμβάλλαμε καθοριστικά στην αναβάθμιση του μοντέλου της ITU του οποίου οι αρχικές συστάσεις οδηγούσαν σε όλες τις περιπτώσεις σε αναξιόπιστες προβλέψεις καθιστώντας το ακατάλληλο για χρήση στα πλαίσια ενός RF planning. Οι προτεινόμενες μας αλλαγές στο μοντέλο ITU αύξησαν σημαντικά την αξιοπιστία του όχι μόνο σε σχέση με την αρχική του απόδοση αλλά και συγκριτικά με τα υπόλοιπα μοντέλα, καθιστώντας το την πλέον συμφέρουσα εναλλακτική λύση απέναντι στο μοντέλο MWF. Σε περιπτώσεις τοπολογιών όπου ο βασικός μηχανισμός ράδιο-διάδοσης δεν οφείλεται σε εμπόδια και απώλειες σκίασης, τότε το μοντέλο ITU αποκτά προτεραιότητα χρήσεως, συνεπώς έχει ιδιαίτερη σημασία η δυνατότητα αξιόπιστης πρόβλεψης της στάθμης της τοπικής μέσης ισχύος, κάτι που επιτυγχάνεται πλέον μετά από την διόρθωση που παρείχαμε στην παρούσα εργασία.

Επιπρόσθετα, υπολογίσαμε αναλυτικά για κάθε τοπολογία την εξασθένηση ανά απόσταση, τόσο τις τοπικές μέσες τιμές, όσο και την μέση τιμή ανά τοπολογία. Συγκρίνοντας τις μέσες τιμές παρατηρούμε πως η μεγαλύτερη πολυπλοκότητα της τοπολογίας και αυξημένο πλήθος των εμποδίων έχει ως αποτέλεσμα η μέση τιμή της εξασθένησης ανά απόσταση να είναι ιδιαίτερα μεγαλύτερη, ειδικότερα όταν υπάρχει σενάριο μετάδοσης πολλαπλών ορόφων. Ο χαρακτηρισμός της γεωγραφικής διασποράς των τιμών της εξασθένησης ανά απόσταση εντός εκάστης τοπολογίας με βάση διαδεδομένα μοντέλα curve-fitting δεν αποτελεί απλώς διαδικαστική προσέγγιση, αλλά συσχετίζει την γεωγραφική κατανομή των τιμών με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των τοπολογιών με εμπόδια και συνεπώς με απώλειες σκίασης. Στην δε περίπτωση των τοπολογιών με εξασθένηση λόγω ανακλάσεων, ray bouncing και πολύ-όδευση, η μοντελοποίηση της γεωγραφικής διασποράς της εξασθένησης ανά απόσταση με κλασικές curve-fitting συναρτήσεις μπορεί να αποτελέσει το θεμέλιο ενός προγνωστικού εργαλείου για την παράμετρο αυτή.

Εστιάζοντας στις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας, προβήκαμε σε χαρακτηρισμό τους που για όλες τις υπό εξέταση τοπολογίες ακολουθεί το log-normal μοντέλο, ανεξάρτητα από τη φύση του βασικού μηχανισμού ράδιο-διάδοσης. Συνεπώς από-συσχετίζουμε την φύση της κατανομής των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας από τα φαινόμενα σκίασης ή τους όποιους άλλους μηχανισμούς. Συνεπώς, το φαινόμενο της σκίασης αποτελεί μία ανεξάρτητη διαδικασία που δεν μπορεί να προσδιορίζεται ποσοτικά ή και ποιοτικά ως το «υπόλοιπο» από τις απώλειες ελεύθερου χώρου. Ως εκ τούτου, η κατά Jakes ορισθείσα πλεονάζουσα απώλεια οδεύσεως (excess path loss) πρέπει και μπορεί να προσδιοριστεί ανεξάρτητα από την διάδοση της H/M ακτινοβολίας στο κενό. Η συμβολή της εργασίας μας σε αυτό το πεδίο συνίσταται σε μία καινοτόμο μέθοδο για τον υπολογισμό του βάθους σκίασης απευθείας από τα εμπόδια της εκάστοτε τοπολογίας (αναφερόμενοι σε obstacle-dense topologies), ως (λογαριθμικό) άθροισμα των απωλειών των εμποδίων, υλικών, τοίχων, πατωμάτων, κάθε τύπου και πλήθους. Η μέθοδος αυτή αξιολογήθηκε για την ακρίβειά της. Αξίζει να σημειωθεί πως η μέθοδος αυτή δεν απαιτεί εκτεταμένες μετρήσεις στην κάθε τοπολογία αλλά μόνο γνώση των απωλειών των εμποδίων διάφορων τύπων και πλήθους, κάτι που μπορεί να επιτευχθεί είτε με περιορισμένες μετρήσεις περίξ των εμποδίων είτε ανατρέχοντας σε ήδη γνωστές

και καταγεγραμμένες απώλειες αυτών των εμποδίων. Η μέθοδος αυτή προτάθηκε και ελέγχθηκε για την ακρίβειά της στα 2.4 GHz, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε συχνότητα ενδιαφέροντος εφόσον ακολουθηθούν οι διαδικασίες καταμέτρησης των απωλειών σκίασης των εμποδίων κάθε τύπου και πλήθους.

Με τη μέθοδο αυτή μπορεί να υπολογιστεί και η εξασθένηση ανά απόσταση μέσω του βάθους σκίασης, συνεπώς είναι εφικτός ο χαρακτηρισμός της εξασθένησης εντός της τοπολογίας χωρίς την αναγκαιότητα πραγματοποίησης εκτεταμένων μετρήσεων. Το συμπέρασμα αυτό προέκυψε συγκρίνοντας τις τιμές της εξασθένησης ανά απόσταση που υπολογίστηκαν μέσα από τις εκτεταμένες μετρήσεις μας, με τις τιμές που δίνει ο υπολογισμός της εξασθένησης ανά απόσταση από το βάθος σκίασης. Το σφάλμα είναι πολύ μικρό όσο περισσότερο έντονος είναι ο OLOS/NLOS χαρακτήρας της τοπολογίας. Δηλαδή το σφάλμα αυξάνεται αναλόγως της παρουσίας των LOS τοπολογιών, γιατί σε μία τέτοια περίπτωση το βάθος σκίασης μηδενίζεται και ως εκ τούτου προκύπτει από την μέθοδό μας «μηδενική» εξασθένηση ανά απόσταση.

Σε ό,τι αφορά στον υπολογισμό του excess path loss για περιπτώσεις τοπολογιών όπου ο βασικός μηχανισμός ράδιο-διάδοσης δεν αφορά σε φαινόμενα σκίασης, η απόπειρα μοντελοποίησης του excess path loss μέσα από την εξασθένηση ανά απόσταση δείχνει πως αν και δίδονται ικανοποιητικές προσεγγίσεις, χρειάζεται η περαιτέρω στοιχειοθέτηση των μηχανισμών ράδιο-διάδοσης. Συγκεκριμένα, στην τοπολογία του αεροδρομίου, η απομόνωση των φαινομένων κλασικής ανάκλασης από τα φαινόμενα ray bouncing, κάτι που θα εξεταστεί και στην επόμενη ενότητα (μελλοντικές προεκτάσεις).

Επιπρόσθετα, εξετάστηκαν οι γεωγραφικές διασπορές των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας με αντιπαραβολή της τοπολογίας οικίας με την τοπολογία του αεροδρομίου και προέκυψε το συμπέρασμα πως διαφορετικοί μηχανισμοί ράδιο-διάδοσης οδηγούν σε διαφορετική γεωγραφική διασπορά των τοπικών τιμών της λαμβανόμενης ισχύος.

Σε ό,τι αφορά στις παρεμβολές, η μελέτη της επίδρασής τους έγκειται στον αξιόπιστο προσδιορισμό του SNR, όχι μόνο σε επίπεδο αριθμητή (χρήσιμο σήμα) αλλά και σε επίπεδο στάθμης θορύβου, τον οποίον μετρήσαμε επίσης εκτεταμένα κατά την πραγματοποίηση των προαναφερθέντων μετρήσεων, αλλά και στην πρόβλεψη της μέσης ομοκαναλικής παρεμβολής για δεδομένη χρήση δικτύων Wi-Fi στην ευρύτερη περιοχή

εξέτασης της τοπολογίας ράδιο-διάδοσης. Σε αυτό θα πρέπει να προστεθούν φυσικά και οι όποιες παρεμβολές ως προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης.

Τέλος, παρουσιάστηκε η λύση της Ασφάλειας Φυσικού Επιπέδου (Wireless Information-Theoretic Security, WITS) που δύναται να αποτελεί συμπληρωματική λύση προς την κρυπτογραφία ανωτέρου επιπέδου ή και αυτόνομη λύση, ιδιαίτερα σε αυτόνομα δίκτυα. Οι παράμετροι της λύσης WITS είχαν αρχικά εξεταστεί για πολύ συγκεκριμένες και περιορισμένες θεωρήσεις του ασύρματου καναλιού. Συμβάλλοντας στην περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης των ρεαλιστικών απωλειών οδεύσεων ενός ασύρματου διαύλου με εμπόδια και διαλείψεις στα όρια των τιμών των παραμέτρων της WITS, παρατηρήσαμε πως με θεώρηση συνθηκών αστικού περιβάλλοντος σκίασης ή εσωτερικής τοπολογίας με ιδιαιτερότητες όπως στενοί διάδρομοι, εμπόδια, τοίχοι, πατώματα, η επίδραση των απωλειών οδεύσεως στις παραμέτρους WITS μπορεί να διακινδυνεύσει την ίδια την βιωσιμότητα της Ασφάλειας Φυσικού Επιπέδου.

Παρέχοντας για πρώτη φορά σε κλειστή μορφή την παράμετρο της Αποκοπής Χωρητικότητας Ασφαλείας (Outage Secrecy Capacity) και επαληθεύοντας την ακρίβεια της μεθόδου μας για ρεαλιστικές τιμές των εμπλεκόμενων παραμέτρων, μπορέσαμε να παράσχουμε κλειστή μορφή για τον μέγιστο ρυθμό secrecy rate για δεδομένο SNR κυρίως καναλιού (νόμιμου χρήστη) και δεδομένη μέγιστη επιτρεπτή πιθανότητα αποκοπής.

Η μελέτη της επίδρασης της κινητικότητας των χρηστών στην αξιοπιστία της μεθόδου έδειξε ότι για μικρά σενάρια μεταβολής του ωτακουστή σε ρεαλιστικό περιβάλλον απωλειών οδεύσεως, όπως αυτό θεωρήθηκε για συγκεκριμένες συνθήκες προσομοίωσης, οδηγεί σε μεταβολές των παραμέτρων WITS, που για να αντιμετωπιστούν, απαιτούν αντισταθμιστικά μέτρα εκ μέρους του νόμιμου χρήστη. Συνεπώς το ζήτημα της σχετικής τοποθέτησης και κινητικότητας των χρηστών τίθεται άμεσα όχι ως «φωτογραφία» μίας κατάστασης αλλά ως δυναμική μεθοδολογία αντιμετώπισης των ωτακουστών που κινούνται εντός μίας τοπολογίας με ρεαλιστικά χαρακτηριστικά: εμπόδια, φαινόμενα σκίασης, διαλείψεις και παρεμβολές.

Τα φαινόμενα αυτά διερευνήθηκαν, σε επίπεδο προσομοιώσεων αλλά και με πειραματικές μετρήσεις σε έτσι που να ποσοτικοποιηθεί και περιγραφεί και ποιοτικά η επίδρασή τους στα όρια τιμών των παραμέτρων της WITS υπό την παρουσία ενός

ωτακουστή, και εν συνεχεία σε καθεστώς πολλαπλών ωτακουστών, θεωρώντας μέθοδο συνεργασίας ωτακουστών SC και MRC.

5.2 Μελλοντικές προεκτάσεις

Στα πλαίσια ήδη υπό εξέλιξη ερευνητικής εργασίας και αποτελεσμάτων που προεκτείνουν τα ευρήματα, τα συμπεράσματα και τις συμβολές της παρούσας εργασίας μπορούμε να αναφέρουμε:

- Την άμεση δημοσίευση αποτελεσμάτων που συνδέουν τις στατιστικές ιδιότητες του βάθους σκίασης με τα χαρακτηριστικά κάθε τοπολογίας, καθώς και τον χαρακτηρισμό του shadow fading correlation για τις δοσμένες τοπολογίες εσωτερικών χώρων, ενσωματώνοντας στο κλασικό μοντέλο του Gudmundson την αντίληψη για την αυτονομία των φαινομένων σκίασης σε σχέση με την μετάδοση ελεύθερου χώρου..
- Την επεξεργασία και δημοσίευση αποτελεσμάτων που τεκμηριώνουν την αξιοπιστία της μεθόδου υπολογισμού του βάθους σκίασης και συνεπακόλουθα της εξασθένησης ανά απόσταση για άλλες συχνότητες λειτουργίας, όπως στα 2.6 GHz και στα 3.5 GHz με σχετικές εκτεταμένες μετρήσεις που έχουμε ήδη πραγματοποιήσει σε τοπολογίες εσωτερικών χώρων.
- Την άμεση παροχή νέων ευρημάτων για μοντελοποίηση ασύρματου διαύλου στα 2.4 GHz για ανοικτούς χώρους, με μελέτη μητροπολιτικού δικτύου Wi-Fi αλλά και με μελέτη και καταγραφή διαλείψεων που προκαλούνται από παρεμπόδιση ή και διακοπή επικοινωνιών σε τοπικά Wi-Fi σε καταστήματα και πλατείες από κινούμενα οχήματα.
- Την άμεση δημοσίευση αποτελεσμάτων που διερευνούν όχι μόνο την επίδραση των ρεαλιστικών απωλειών οδεύσεων ενός ασύρματου διαύλου με εμπόδια και διαλείψεις στα όρια των τιμών των παραμέτρων της WITS, αλλά και την

επίδραση του βάθους σκίασης, για διαφορετικές θεωρήσεις απωλειών σκίασης και κινητικότητας χρηστών, στα όρια των παραμέτρων της Ασφάλειας Φυσικού Επιπέδου.

- Τέλος, θα εξεταστεί η δυνατότητα υλοποίησης μίας λύσης Ασφάλειας Φυσικού Επιπέδου που θα βασίζεται σε space diversity προκειμένου να προταθεί μέθοδος αντιμετώπισης συνεργαζόμενων πολλαπλών ωτακουστών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. D. Parsons, The Mobile Radio Propagation Channel. Hoboken, NJ: Wiley Interscience, 2000.
- [2] A. Aguiar and J. Gross, Wireless Channel Models, Technical Report, TKN, Berlin, 2003.
- [3] A. Goldsmith, Wireless Communications. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [4] J. Seybold, Introduction to RF Propagation. Hoboken, NJ: Wiley Interscience, 2005.
- [5] T. Rappaport, Wireless Communications: Principles & Practice. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1999.
- [6] W. C. Jakes (Ed.), Microwave mobile communications. New York, NY: Wiley Interscience, 1974.
- [7] M. Lott, I. Forkel, "A multi wall and floor model for indoor radio propagation", IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2001-Spring), Rhodes Island, Greece, May 6-9, 2001.
- [8] A. Lima, L. Menezes, "Motley-Keenan model adjusted to the thickness of the wall", SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, Brasilia, Brazil, July 25-28, 2005.
- [9] R. Mathur, M. Klepal, A. McGibney, and D. Pesch, "Influence of people shadowing on Bit Error Rate of IEEE 802.11 2.4 GHz channel", 1st International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS 2004), pp. 448-452, Port-Louis, Mauritius, September 20-22, 2004.
- [10] Jia-Liang, L., & Valois, F. (2006, June). *Performance evaluation of 802.11 WLAN in a real indoor environment*. Paper presented at the IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob 2006), Montreal, Canada.
- [11] Oestoes C Czink N., Bandemer, B., Castiglione, P., Kaltenberger, F., & Paulraj, A. (2009, September). *Experimental Characterization of Indoor Multi-Link Channels*. Paper presented at the IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2009), Tokyo, Japan.
- [12] Valenzuela, R.A., Chizhik, D., & Ling, J. (1998, May). *Measured and predicted correlation between local average power and small scale fading in indoor wireless communication channels*. Paper presented at the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 1998-Spring), Ottawa, Canada.
- [13] Poutanen, J., Salmi, J., Haneda, K., Kolmonen, V., & Vainikainen, P. (2011). Angular and Shadowing Characteristics of Dense Multipath Components in Indoor Radio Channels. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59 (1), 245-253.
- [14] Roberts, B., & Pahlavan, K. (2009, November – December). *Site-Specific RSS Signature Modeling for WiFi Localization*. Paper presented at the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2009), Honolulu, USA.
- [15] Akl, R., Tummala, D., & Li, X. (2006, July). *Indoor propagation modeling at 2.4 GHz for IEEE 802.11 networks*. Paper presented at the 6th IASTED International Multi-Conference on Wireless and Optical Communications, Banff, Canada.
- [16] Cheung, K. W., Sau, J. H. M., & Murch, R. D. (1998). A new empirical model for indoor propagation prediction. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 47 (3), 996-1001.
- [17] Henderson, A. H., Durkin, C. J., & Durkin, G. D. (2008, July). *Finding the right small-scale distribution for a measured indoor 2.4 GHz channel*. Paper presented at the IEEE

Antennas and Propagation Society International Symposium (APSRURSI 2008), San Diego, USA.

- [18] Iskander, M., Yun, Z., & Zhang, Z. (2001, July). *Outdoor/indoor propagation modeling for wireless communications systems*. Paper presented at the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSRURSI 2001), Boston, USA.
- [19] MacLeod, H., Loadman, C., & Chen, Z. (2005, May). *Experimental studies of the 2.4-GHz ISM wireless indoor channel*. Paper presented at the 3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference (CNSR 2005), Halifax, Canada.
- [20] Theofilos Chrysikos, Giannis Georgopoulos, Konstantinos Birkos and Stavros Kotsopoulos, "Wireless Channel Characterization: On the validation issues of indoor RF models at 2.4 GHz", First Panhellenic Conference on Electronics and Telecommunications (PACET), March 20-22, 2009, Patras, Greece.
- [21] T. Chrysikos, G. Georgopoulos, and S. Kotsopoulos, "Impact of shadowing on wireless channel characterization for a public indoor commercial topology at 2.4 GHz", 2nd International Congress on Ultra Modern Telecommunications (ICUMT 2010), Moscow, Russia, October 18-20, 2010.
- [22] Theofilos Chrysikos, Giannis Georgopoulos and Stavros Kotsopoulos, "Site-Specific Validation of Indoor RF models for Commercial Propagation Topologies at 2.4 GHz", 7th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS 2010), September 19-22, 2010, York, UK.
- [23] T. Chrysikos, G. Georgopoulos, and S. Kotsopoulos, "Wireless channel characterization for a home indoor propagation topology at 2.4 GHz", Wireless Telecommunications Symposium 2011 (WTS 2011), New York City, USA, April 13-15, 2011.
- [24] Theofilos Chrysikos, Giannis Georgopoulos and Stavros Kotsopoulos, "Site-Specific Validation of ITU Indoor Path Loss Model at 2.4 GHz", 4th IEEE Workshop on advanced experimental activities on wireless networks and systems (EXPONWIRELESS 2009), June 19, 2009, Kos Island, Greece.
- [25] J. Lähteenmäki, "Testing and verification of indoor propagation models", COST 231 TD (94) 111, September 1994.
- [26] J. Lähteenmäki, "Indoor propagation between floors at 855 MHz and 1.8 GHz," COST 231 TD (94) 37, January 1994.
- [27] J. Lähteenmäki, "Radiowave propagation in office buildings and underground halls", 22nd European Microwave Conference (EurMC 1992), pp. 377-382, Espoo, Finland, August 24-27, 1992.
- [28] D. M. J Devasirvatham, C. Banerjee, R. R. Murray, D. A. Rappaport, "Four-frequency radiowave propagation measurements of the indoor environment in a large metropolitan commercial building", IEEE Global Telecommunication Conference (GLOBECOM 1991), vol. 2, pp. 1282-1286, Phoenix, USA, December 2-5, 1991.
- [29] Θεόφιλος Χρυσικός, Γιάννης Γεωργόπουλος, Σταύρος Κωτσόπουλος, «Μοντελοποίηση Ασύρματου Διαύλου: Υπολογισμός γραμμικής εξασθένησης για περιβάλλοντα διάδοσης εσωτερικών χώρων», 13^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Ένωσης Ελλήνων Φυσικών, 17-21 Μαρτίου 2010, Πάτρα.
- [30] Theofilos Chrysikos, Giannis Georgopoulos, and Stavros Kotsopoulos, "Attenuation over distance for indoor propagation topologies at 2.4 GHz", 16th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2011), Corfu, Greece, June 28-July 1, 2011.
- [31] Konstantinos Birkos, Theofilos Chrysikos and Stavros Kotsopoulos, "An inter-HAP handover scheme over a worst-case fading scenario", Transcom '07: 7th European Conference of young research and science workers, June 25-27, 2007, Zilina, Slovak Republic (publication in Proceedings Section 3 – Information and Communication Technologies, pp. 19-22).
- [32] Konstantinos Birkos, Theofilos Chrysikos and Stavros Kotsopoulos, "QoS Issues in Complex-based High Altitude Platform communication systems", *Komunikacie/*

- [33] S. Karapantazis and F.-N. Pavlidou, *Broadband Communications via High Altitude Platforms (HAPs) – A survey*, Dept. Of Electrical & Computer Engineering, Telecommunications Division, Faculty of Engineering, Aristotle University of Thessaloniki.
- [34] T. J. Mouldsley and E. Vilar, 'Experimental and theoretical statistics of microwave amplitude scintillations on satellite down-links', *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, vol. 30, pp. 1099-1106, 1982.
- [35] Graziosi, F., & Santucci, F. (2002). A General Correlation Model for Shadow Fading in Mobile Radio Systems. *IEEE Communications Letters*, 6 (3), 102-104.
- [36] Heliot, F., Ghavami, M., & Nakhai, M. R. (2008). An Accurate Closed-Form Approximation of the Average Probability of Error over a Log-Normal Fading Channel. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7 (5), 1495-1500.
- [37] Heliot, F., Xiaoli, C., Hoshyar, R., & Tafazolli, R. (2009). A Tight Closed-Form Approximation of the Log-Normal Fading Channel Capacity. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8 (6), 2842-2847.
- [38] Hongchuan, Y., & Alouini, M. S. (2002, May). *A Hierarchical Markov Model for Wireless Shadowed Fading Channels*. Paper presented at the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2002-Spring), Birmingham, USA.
- [39] JaeWoo, L., Sewoong, K., YoungJoong, Y., & JongGwan, Y. (2006, September). A Path loss and Shadow Fading modeling in Various Radio Environment of Seoul City Based on Measurement Data at 5.3GHz and 2.1GHz Bands. Paper presented at the European Conference on Wireless Technology, Manchester, UK.
- [40] Janaswamy, R. (2005, July). *A New Shadow Model for Indoor Wireless Channels at 60 GHz*. Paper presented at the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI 2005), Washington DC, USA.
- [41] Karedal, J., Johansson, A. J., Tufvesson, F., & Molisch, A. F. (2008). A Measurement-Based Fading Model for Wireless Personal Area Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7 (11), 4575-4585.
- [42] Motamedi, Z., & Soleymani, M. R. (2007, November). *For Better or Worse: The Impact of Shadow Fading on the Capacity of Large MIMO Networks*. Paper presented at the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2007), Washington DC, USA.
- [43] Nam-Ryul, J., Kyung-Hoe K., Jung-Hwan C., & Seong-Cheol K. (2010, September). *A Spatial Correlation Model for Shadow Fading in Indoor Multipath Propagation*. Paper presented at the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Fall), Ottawa, Canada.
- [44] Pätzold, M., Avazov, N., & Nguyen, V. D. (2010, October). *Design of Measurement-Based Correlation Models for Shadow Fading*. Paper presented at the International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC 2010), Ho Chi Minh City, Vietnam.
- [45] Pätzold, M., & Nguyen, V. D. (2004, September). *A spatial simulation model for shadow fading processes in mobile radio channels*. Paper presented at the IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2004), Barcelona, Spain.
- [46] Poutanen, J., Haneda, K., Kolmonen, V. M., Salmi, J., & Vainikainen, P. (2009). Analysis of Correlated Shadow Fading in Dual-Link Indoor Radio Wave Propagation. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 8, 1190-1193.

- [47] Salo, J., Vuokko, L., El-Sallabi, H. M., & Vainikainen, P. (2006, May). *Shadow fading revisited*. Paper presented at the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2006-Spring), Melbourne, Australia.
- [48] Salo, J., Vuokko, L., El-Sallabi, H. M., & Vainikainen, P. (2007). An additive model as a physical basis for shadow fading. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56 (1), pp. 13-26.
- [49] Shankar, P.M., & Gentile, C. (2010, May). *Statistical analysis of short term fading and shadowing in Ultra Wideband systems*. Paper presented at the IEEE International Conference on Communications (ICC 2010), Cape Town, South Africa.
- [50] Sharma, R. K., & Wallace, J. W. (2009, March). *Experimental Characterization of Indoor Multiuser Shadowing for Collaborative Cognitive Radio*. Paper presented at the European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2009), Berlin, Germany.
- [51] Szyszkowicz, S. S., Yanikomeroglu, H., & Thompson, J. S. (2010). On the Feasibility of Wireless Shadowing Correlation Models. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59 (9), 4222-4236.
- [52] Theofilos Chrysikos and Stavros Kotsopoulos, "Characterization of large-scale fading for the 2.4 GHz channel in obstacle-dense indoor propagation topologies", IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall 2012), September 3-6, 2012, Quebec City, Canada (accepted).
- [53] Theofilos Chrysikos and Stavros Kotsopoulos, "Characterization of Propagation Mechanisms for the 2.4 GHz Channel At Athens International Airport", 6th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2012), Prague, Czech Republic, March 26-30, 2012.
- [54] Theofilos Chrysikos, Giannis Georgopoulos and Stavros Kotsopoulos, "Empirical Calculation of Shadowing Deviation for Complex Indoor Propagation Topologies at 2.4 GHz", International Conference on Ultra Modern Telecommunications (ICUMT 2009), October 12-14, 2009, St. Petersburg, Russia.
- [55] Theofilos Chrysikos, Stavros Kotsopoulos and Eduard Babulak, "A generic method for the reliable calculation of large-scale fading in an obstacle-dense propagation environment", Book Chapter in Integrated Models for Information Communication Systems and Networks: Design and Development, IGI Global, 2012 (in print).
- [56] Theofilos Chrysikos, Stavros Kotsopoulos and George Karagiannidis, "Attenuation over distance and excess path loss for a large-area indoor commercial topology at 2.4 GHz", 19th International Conference on Telecommunications (ICT 2012), Jounieh, Lebanon, April 25-25, 2012.
- [57] C. E. Shannon, "Communication theory of secrecy systems", Bell System Technical Journal, vol. 29, pp. 656-715, 1949.
- [58] A. D. Wyner, "The wire-tap channel", Bell System Technical Journal, vol. 54, pp. 1355-1387, 1975.
- [59] I. Csiszar and J. Korner, "Broadcast channels with confidential messages", IEEE Transactions on Information Theory, vol. 24, no. 3, pp. 339-348, May 1978.
- [60] S. K. Leung-Yan-Cheong and M. E. Hellman, "The Gaussian wiretap channel", IEEE Transactions on Information Theory, vol. 24, no. 4, pp. 451-456, July 1978.
- [61] U. M. Maurer, "Secret key agreement by public discussion from common information", IEEE Transactions on Information Theory, vol. 39, no. 3, pp. 733-742, May 1993.

- [62] U. M. Maurer, "Information-theoretically secure secret-key agreement by NOT authenticated public discussion", *Advances in Cryptology - EUROCRYPT '97*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 1233, pp. 209-225, Springer-Verlag, 1997.
- [63] U. M. Maurer and S. Wolf, "Information-theoretic key agreement: from weak to strong secrecy for free", *Advances in Cryptology - EUROCRYPT 2000*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 1807, pp. 351-368, Springer-Verlag, 2000.
- [64] U. M. Maurer and S. Wolf, "Secret-key agreement over unauthenticated public channels Part I: Definitions and a completeness result", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49, no.4, pp. 822-831, April 2003.
- [65] J. Barros and M. R. D. Rodrigues, "Secrecy capacity of wireless channels", *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Seattle, WA, USA, July 2006.
- [66] Matthieu Bloch, Joao Barros, Miguel R. D. Rodrigues, and Steven W. McLaughlin, "Wireless Information-Theoretic Security", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 54, no.6, pp. 2515-2534, June 2008.
- [67] M. Bloch, A. Thangaraj, S. W. McLaughlin, and J. M. Merolla, "LDPC-based Gaussian key reconciliation", *2006 IEEE Information Theory Workshop (ITW 2006)*, Punta Del Este, Uruguay, March 13-16, 2006.
- [68] T. J. Richardson, M.A. Shokrollahi, and R. L. Urbanke, "Design of capacity-approaching irregular low-density parity-check codes", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 47, no.2, pp. 619-637, February 2001.
- [69] T. Chrysikos, and S. Kotsopoulos, "Impact of channel-dependent variation of path loss exponent on Wireless Information-Theoretic Security", *Wireless Telecommunications Symposium 2009 (WTS '09)*, April 22-24, 2009, Prague, Czech Republic.
- [70] Abramowitz, M., Stegun, I.: *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. Dover Publications, New York (1970)
- [71] Theofilos Chrysikos, Tasos Dagiuklas and Stavros Kotsopoulos, "A Closed-Form Expression for Outage Secrecy Capacity in Wireless Information-Theoretic Security", *1st ICST International Workshop on Security in Emerging Wireless Communications and Networking Systems (SEWCN 2009)*, September 14, 2009, Athens, Greece.
- [72] Konstantinos Birkos, Theofilos Chrysikos, Stavros Kotsopoulos and Ioannis Maniatis, "Security Interoperability Issues and QoS in Wireless Networks", Book chapter published in *Handbook on Communication and Information Security*, Springer, 2010.
- [73] Theofilos Chrysikos, Tasos Dagiuklas and Stavros Kotsopoulos, "Wireless Information-Theoretic Security for Moving Users in Autonomic Networks", *IFIP Wireless Days 2010 (WD '10)*, October 20-22, 2010, Venice, Italy.
- [74] Pinto, P.C., Barros, J., Win, M.J.: Wireless physical-layer security: the case of colluding eavesdroppers. In: *2009 IEEE International Conference on Symposium on Information Theory*, pp. 2442--2446. IEEE Press, New York (2009)
- [75] Atsan, E. and Ozkasap, O.: A classification and performance comparison of mobility models for ad hoc networks. In *ADHOC-NOW*, pp. 444-457, 2006.
- [76] Aschenbruck, N., Gerhards-Padilla, E., Martini, P.: Modeling mobility in disaster area scenarios. In *Perform. Eval.*, Vol. 66, No.12, pp. 773-790, 2009.
- [77] Johnson, D. and Maltz, D., "Dynamic source routing in ad hoc wireless networks, *Mobile Computing*, pp. 153-181. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [78] Royer, E., Melliar-Smith, P. and Moser, L., "An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks. In *Proc.of the IEEE Int'l Conf. on Communications*, pp. 857-861, 2001.
- [79] Kamal, A. and Al-Karaki, J., "A new realistic mobility model for mobile ad hoc networks. In *IEEE Int'l Conf. on Communications*, pp. 3370-3375, 2007.

- [80] Papageorgiou, C., Birkos, K., Dagiuklas, T., Kotsopoulos, S., “An obstacle-aware human mobility model for ad hoc networks”, In Proc. of the 17th IEEE/ACM International Symposium on Modelling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS), 2009.
- [81] Papageorgiou, C., Birkos, K., Dagiuklas, T., Kotsopoulos, S., “Simulating mission critical mobile ad hoc networks. In Proc. of the 4th ACM workshop on Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks (PM2HW2N), 2009.
- [82] Papageorgiou, C., Birkos, K., Dagiuklas, T., Kotsopoulos, S., “Modelling Human Mobility in Obstacle-constrained Ad Hoc Networks”, Elsevier Ad-Hoc networks, 2011
- [83] Theofilos Chrysikos, Tasos Dagiuklas and Stavros Kotsopoulos, “Wireless Information-Theoretic Security in an Outdoor topology with Obstacles: Theoretical Analysis & Experimental Measurements”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Special Issue on Security and Resilience for Smart Devices and Applications, 2011.
- [84] Theofilos Chrysikos, Tasos Dagiuklas and Stavros Kotsopoulos, “Wireless Information-Theoretic Security: Experimental Measurements with Multiple Eavesdroppers in an Outdoor Ad-Hoc Network with Obstacles”, (under review).