ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ: Τηλεπικοινωνιών και Τεχνολογίας Πληροφορίας
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ Ασύρματης Τηλεπικοινωνίας

Διπλωματική Εργασία

του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών

Αϊάς Νάσερ

Αριθμός Μητρώου: 5908

Θέμα

«Διερεύνηση των τεχνικών παραμέτρων και μηχανισμών της Ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης ασύρματου καναλιού δορυφορικής κινητής τηλεφωνίας»

Επιβλέπων
Σταύρος Κωτσόπουλος

Αριθμός διπλωματικής Εργασίας:

Πάτρα, Οκτώβριος 2010

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Πιστοποιείται ότι η Διπλωματική Εργασία με θέμα

«Διερεύνηση των τεχνικών παραμέτρων και μηχανισμών της Ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης ασύρματου καναλιού δορυφορικής κινητής τηλεφωνίας»

Του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας

Αϊάς Νάσερ

Αριθμός Μητρώου: 5908

Παρουσιάστηκε δημόσια και εξετάστηκε στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών στις

...../...../.....

Ο Επιβλέπων
Σταύρος Κωτσόπουλος
Καθηγητής

Ο Διευθυντής του Τομέα
Νικόλαος Φακωτάκης
Καθηγητής

Αριθμός Διπλωματικής Εργασίας:

Θέμα: «Διερεύνηση των τεχνικών παραμέτρων και μηχανισμών της Ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης ασύρματου καναλιού δορυφορικής κινητής τηλεφωνίας»

Φοιτητής: **Επιβλέπων:**

Περίληψη

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει την μελέτη και τον χαρακτηρισμό του καναλιού ενός δορυφορικού καναλιού καθώς και την επίγεια διάδοση

Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στα ασύρματα συστήματα τηλεπικοινωνιών . Ειδικά παρουσιάζεται το δορυφορικό σύστημα και αναλύονται τα μέρη αυτού. Γίνεται παρουσίαση των δορυφορικών ζεύξεων και μελετάται το περιβάλλον μέσα στο οποίο λαμβάνει χώρα μια σύνδεση. Αρχικά αναλύονται οι μέθοδοι διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και οι διάφορες εξασθενήσεις που υφίσταται το σήμα λόγω φαινομένων της ατμόσφαιρας καθώς και άλλων επιδράσεων.

Γίνεται έπειτα μια εκτενής αναφορά στις διαλείψεις και στην ταξινόμησή τους. Στη συνέχεια γίνεται μια κατηγοριοποίηση των διαλείψεων αυτών με βάση τα χαρακτηριστικά τους. Ακολουθεί η στατιστική αναπαράσταση των καναλιών με διαλείψεις χρησιμοποιώντας τις βασικότερες κατανομές που συναντώνται στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

Summary

This work includes the study and channel characterization for a satellite signal and also its terrestrial propagation.

First we introduce the wireless telecommunications systems. We focus on the satellite system and its components are analyzed. A presentation of the satellite links follows and the propagation environment is studied. We analyze the propagation methods of electromagnetic radiation and the various losses that the signal endures due to atmospheric phenomena and other effects.

There is then a reference to the fading channel and and its analysis. Then there is categorization of the fading according to its characteristics. The statistical representation of the fading channel follows, with the use of the key distributions found in telecommunication systems.

Lastly, the satellite transmission is simulated for various orbit heights and conditions

Εν κατακλείδι ,θεωρώ υποχρέωση μου να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον καθηγητή μου κ. Σταύρο Κωτσόπουλο και στο μεταπτυχιακό φοιτητή κ. Θεόφιλο Χρυσικό για την άριστη συνεργασία που είχαμε, τις γνώσεις που μου προσέφεραν, τις πολύ σημαντικές παρατηρήσεις, υποδείξεις και διορθώσεις που έκαναν, συμβάλλοντας έτσι τα μέγιστα στην διεκπεραίωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ..... 9

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....12

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ιστορική ανασκόπηση..... .13

1.2 Σύγχρονες εξελίξεις..... .14

1.3 εφαρμογές ασύρματης τεχνολογίας.....15

1.4 ασύρματο κανάλι επικοινωνίας.....17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Μελέτη της λειτουργίας του δορυφορικού συστήματος

2.1 Εισαγωγή.....19

2.2 τεχνητοί δορυφόροι.....21

2.3 είδη τροχιών.....22

2.3.1 Γεωστατικές Τροχιές (GEO).....22

2.3.2 Χαμηλές τροχιές (LEO) 23

2.3.3 Μεσαίες τροχιές (MEO)..... 24

2.4 το δορυφορικό σύστημα.....26

2.4.1 Επίγειος σταθμός.....27

2.4.2 Διαστημικό τμήμα.....27

2.5 κεραίες.....29

2.6 Μικροκυματικό Φάσμα 31

2.7 Συμπεράσματα 33

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: **Ανάλυση των παραμέτρων διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας**

3.1 Εισαγωγή.....34

3.2 Μηχανισμοί διάδοσης Η/Μ ακτινοβολίας.....35

3.3 πολυοδική διάδοση.....36

3.4 επίγεια μετάδοση.....37

3.5 ατμοσφαιρική εξασθένιση.....41

3.51 ιονόσφαιρα.....42

3.5.2 τροπόσφαιρα.....44

3.6 Ηλιακή δραστηριότητα.....48

3.7 Συμπεράσματα.....49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάλυση των απωλειών και των διαλείψεων του καναλιού

4.1 Εισαγωγή.....50

4.2 Απώλειες ελεύθερου χώρου.....51

4.3 Σκίαση.....54

4.4 Κανάλια διαλείψεων.....55

4.4.1 Φαινόμενο πολυόδευσης.....56

4.4.2 Κατηγοριοποίηση διαλείψεων.....62

4.4.3 flat /frequency selective fading.....65

4.4.4 Fast /slow fading……......67

4.5 Outage Probability ……..71

4.6 Στατιστική περιγραφή του καναλιού……..76

4.6.1 Κατανομή Lognormal ……..77

4.6.2 Κατανομή Rayleigh……...77

4.6.3 Κατανομή Rician……...79

4.6.4 Κατανομή Nakagami……...80

4.6.5 Κατανομή Weibul……..81

4.7 Συπεράσματα.....82

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Προσομοίωση μοντέλων λειτουργίας δορυφορικού συστήματος

5.1 Εισαγωγή……...84

5.2 Ελάχιστη ισχύς εκπομπής για μετάδοση ελεύθερου……...85

5.2.1 Χαμηλό ύψος τροχιάς.....86

5.2.2 Γεωστατικό ύψος τροχιάς.....89

5.2.3 Μέσο ύψος τροχιάς.....91

5.3 Απώλειες λόγω σκίασης, διαλείψεων……...92

5.4 Συμπεράσματα.....97

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Γενικά συμπεράσματα ……...98

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ……100

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

BW	(bandwith) Εύρος ζώνης
SNR	(Signal to Noise Ratio) Λόγος Σήματος προς Θόρυβο
CDF	(Cumulative Density Function) Αθροιστική Συνάρτηση Πυκνότητας
PDF	(Probability Density Function) Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας
LOS	(Line-of-Sight) Διάδοση οπτικής επαφής
OLOS	(Obstructed Line-of-Sight) Εμποδιζόμενη οπτική επαφή
NLOS	(non-Line-of-Sight) Διάδοση μη οπτικής επαφής
GEO	(Geosychronous Earth Orbit) Γεωστατική τροχιά
MEO	(Middle Earth Orbit) Μεσαία τροχιά
LEO	(Low Earth Orbit) Χαμηλή τροχιά

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορική ανασκόπηση

Οι μεγάλες εξελίξεις που οδήγησαν στην ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών έγιναν στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Αρχικά, ο Hertz έδειξε ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στο κενό. Λίγο αργότερα (1892) ο Marconi κατάφερε να δημιουργήσει μια ραδιοζεύξη σε απόσταση λίγων χιλιομέτρων. Κατά τη διάρκεια του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου έγιναν διάφορες πρόοδοι όπως η χρήση του radar. Πρακτικά ωστόσο, η ιστορία των κινητών επικοινωνιών ξεκινά τη δεκαετία του 1950, οπότε με την ανακάλυψη των τρανζίστορ, αναπτύχθηκε η δυνατότητα της κατασκευής συσκευών αξιόπιστων, ελαφριών, με μικρό μέγεθος και με χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Τα πρώτα συστήματα κινητών επικοινωνιών λειτουργούσαν στην περιοχή των 2 MHz. Μετά το τέλος του 2^{ου} παγκοσμίου πολέμου, στη διάρκεια του οποίου η τεχνολογία των ραδιοεπικοινωνιών γνώρισε αλματώδη πρόοδο, άρχισαν οι πρώτες έρευνες στα εργαστήρια της Bell για την βελτίωση των υπηρεσιών των

ραδιοεπικοινωνιών και τη δυνατότητα χρησιμοποίησης υψηλότερων φασματικών περιοχών (μεγαλύτερες συχνότητες). Το πρώτο δημόσιο επίγειο δίκτυο κινητών επικοινωνιών εμφανίσθηκε μόλις το 1979. Οι λόγοι αυτής της καθυστέρησης ήταν εμφανείς, αφού έλειπε εκείνη η τεχνολογία που θα παρείχε τη δυνατότητα στα συστήματα κινητών επικοινωνιών της προσφοράς ουσιαστικών υπηρεσιών υψηλής ποιότητας και ευρύτητας, σε πραγματικά ανταγωνιστικό επίπεδο με τα υπάρχοντα ενσύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Η εμφάνιση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, των μικροεπεξεργαστών, των συνθετών συχνότητας, δηλαδή της σύγχρονης ηλεκτρονικής τεχνολογίας έδωσε την απαιτούμενη ώθηση και μετέτρεψε τον τομέα των κινητών επικοινωνιών σε κυρίαρχο σημείο αναφοράς των τεχνολογικών και κατ' επέκταση, κοινωνικών εξελίξεων.

1.2 Σύγχρονες εξελίξεις

Οι ασύρματες κινητές τηλεπικοινωνίες έχουν αποτελέσει αντικείμενο έρευνας και ανάπτυξης τα τελευταία χρόνια και αυτό οφείλεται κυρίως στις πολλαπλές εφαρμογές τους στην καθημερινή ζωή. Ο σκοπός των κινητών επικοινωνιών είναι να παρέχουν διπλής κατεύθυνσης επικοινωνία όσον αφορά στη φωνή, στα πολυμέσα και γενικότερα σε οποιαδήποτε μορφή υπηρεσίας μετάδοσης δεδομένων μεταξύ οντοτήτων, οι οποίες βρίσκονται σε οποιοδήποτε μέρος, οποιαδήποτε στιγμή. Ο όρος κινητές τηλεπικοινωνίες στις μέρες μας περιλαμβάνει σχεδόν κάθε κατάσταση όπου ο πομπός ή ο δέκτης έχουν την δυνατότητα να κινούνται, ανεξάρτητα από το αν κινούνται ή όχι.

Οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν συμβάλλει αποφασιστικά όχι μόνο στην βελτίωση της επικοινωνίας ανάμεσα στους ανθρώπους αλλά και σε άλλους τομείς όπως είναι το εμπόριο και η ανάπτυξη της οικονομίας, η ταχύτερη ενημέρωση (π.χ με την βοήθεια των δορυφόρων), η δημόσια υγεία και η ασφάλεια. Είναι επομένως σημαντική η μελέτη και η ανάπτυξη τους

προκειμένου να προσφέρονται όσο το δυνατό περισσότερες υπηρεσίες υψηλής ποιότητας.

Τα συστήματα κυψελωτών επικοινωνιών, ασύρματης τηλεφωνίας και ασύρματης μεταφοράς δεδομένων που έχουν παγκοσμίως αναπτυχθεί, ανέδειξαν την αναγκαιότητα των ασύρματων επικοινωνιών και θεμελίωσαν τις βάσεις της μελλοντικής εξέλιξης των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και υπηρεσιών. Παρακάτω αναφερόμαστε συνοπτικά στα βασικά χαρακτηριστικά των κύριων αυτών συστημάτων, καθώς και στις προοπτικές εξέλιξης που προσφέρουν.

1.3 εφαρμογές ασύρματης τεχνολογίας

Σήμερα η ασύρματη τεχνολογία έχει εφαρμογές που χρησιμοποιούμε καθημερινά. 3 κύρια πεδία παρουσιάζονται εδώ

1. Η ασύρματη πρόσβαση σε μεγάλα δίκτυα για προσωπικές επικοινωνίες χαμηλών απαιτήσεων.

   Οι προσωπικές επικοινωνίες χαμηλών απαιτήσεων στοχεύουν στο να παρέχουν κινητές υπηρεσίες φωνής και δεδομένων με μικρές φορητές συσκευές, σε πεζούς και σχεδόν στάσιμους χρήστες, μέσα σε σπίτια και κτίρια ή γύρω από αυτά.

2. Τα ασύρματα δίκτυα κινητών επικοινωνιών

   Τα κυψελωτά συστήματα κινητών επικοινωνιών έχουν ως στόχο την παροχή υπηρεσιών σε κινητά τερματικά, που εμφανίζουν μεγάλη διασπορά σε δρόμους και λεωφόρους αστικών, ημιαστικών και αγροτικών περιοχών. Η σπουδαιότερη απαίτηση σε αυτά τα συστήματα είναι η εξυπηρέτηση κινητών τερματικών μεγάλης ταχύτητας.

3. Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα

Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless LAN, WLAN) έχουν ως στόχο την παροχή υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης (αρκετά Mbps) σε φορητά τερματικά, που μετακινούνται σε περιορισμένες περιοχές, όπως π.χ μέσα σε μεγάλα κτίρια ή σε πανεπιστημιουπόλεις, νοσοκομειακούς χώρους, εμπορικά κέντρα.

Όταν μιλάμε για ασύρματη επικοινωνία μιλάμε ουσιαστικά για διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η διάδοση αυτή μελετάται ξεχωριστά για μια σειρά από διαφορετικές περιοχές, την περιοχή κοντινού πεδίου, μακρινού πεδίου. Κοντινό πεδίο έχουμε για απόσταση από την κεραία

$$R < 0{,}62 \cdot \left(\frac{D^3}{\lambda}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (1.1)$$

Όπου

R= απόσταση από την κεραία

λ = μήκος κύματος

D = η μεγαλύτερη διάσταση του ακτινοβολητή, δηλαδή της κεραίας (π.χ αν έχουμε κεραία την μεγαλύτερη διάσταση του ακτινοβολητή).

Στην περιοχή αυτή το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εμφανίζει άεργη συμπεριφορά δηλαδή δεν έχουμε ακτινοβολία ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας.

Μακρινό πεδίο έχουμε για απόσταση

$$R > \frac{2 \cdot D^2}{\lambda} \qquad (1.2)$$

Όπου

R= απόσταση από την κεραία

λ = μήκος κύματος

D = η μεγαλύτερη διάσταση του ακτινοβολητή, δηλαδή της κεραίας

Στην περιοχή αυτή οι εγκάρσιες συνιστώσες του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου δεν έχουν ακτινική εξάρτηση, και έχουμε κανονική συμπεριφορά του ηλεκτρομαγνητικού κύματος καθώς και μεταφοράς ενέργειας. Τα κύματα που θα εξεταστούν σε αυτή την εργασία είναι όλα στο μακρινό πεδίο.

1.4 ασύρματο κανάλι επικοινωνίας

Ο στόχος κάθε συστήματος επικοινωνιών είναι η επιτυχής μεταφορά πληροφοριών από τον πομπό στο δέκτη. Το ασύρματο κανάλι επικοινωνίας είναι δυναμικό, δεν είναι σταθερό, δηλαδή η συνάρτηση μεταφοράς του είναι τυχαία. Η μέση ένταση των λαμβανομένων σημάτων από μια κεραία μπορεί να είναι ικανοποιητική, αλλά ορισμένες φορές δεν είναι ασυνήθιστο η στιγμιαία στάθμη του σήματος σε ένα περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών (multipath fading environment) να πέσει πολύ (30 dB ή περισσότερο) κάτω από το μέσο επίπεδό του. Κατά τη διάρκεια αυτών των απότομων πτώσεων της στάθμης του σήματος ίσως έχουμε εσφαλμένη παράληψη του σήματος. Με άλλα λόγια ο δέκτης είτε να μην λάβει καθόλου πληροφορία, είτε να λάβει εσφαλμένη πληροφορία. Προκειμένου να αντισταθμιστεί η εξασθένιση που παρουσιάζεται εξαιτίας του καναλιού και για να εξασφαλιστεί ότι η πληροφορία θα αποκωδικοποιηθεί σωστά, η ισχύς μετάδοσης μπορεί να αυξηθεί κατά τη διάρκεια λήψης των ασθενών σημάτων από την κεραία. Τα περισσότερα όμως ασύρματα συστήματα επικοινωνιών είναι χαμηλής ισχύος και δεν έχουν τη δυναμική περιοχή που χρειάζεται για να αντιμετωπίσουν τις διαλείψεις (fading). Μια πετυχημένη προσπάθεια αύξησης της αξιοπιστίας σε ένα

περιβάλλον διαλείψεων πολλαπλών διαδρομών (multipath fading) χωρίς αύξηση της ισχύος εκπομπής είναι να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα λήψης διαφορισμού κεραιών (antenna diversity systems).

Η εξασθένιση είναι το βασικό χαρακτηριστικό όλων των καναλιών επικοινωνίας. Μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τα κανάλια βάσει των εξασθενήσεων που αυτά παρουσιάζουν. Έτσι έχουμε περιπτώσεις με ζεύξη οπτικής επαφής (simple line of sight,LOS), και άλλες που όπου μεταξύ πομπού και δέκτη παρεμβάλλονται βουνά ή κτήρια. Τότε το σήμα φτάνει στο δέκτη μέσω πολυόδευσης και λέμε ότι το κανάλι υποφέρει από διαλείψεις πολυόδευσης (multipath fading). Γύρω από τις κεραίες πομπού και δέκτη ,όπως και ανάμεσά τους, υπάρχουν διάφορα αντικείμενα που προκαλούν ανακλάσεις και εν γένει διασκόρπιση της μεταδιδόμενης ενέργειας. Εκεί οφείλεται η πολυόδευση (multipath propagation). Στην ακραία, αλλά καθόλου ασυνήθιστη περίπτωση όπου το απευθείας σήμα δεν μπορεί να φτάσει στον δέκτη ονομάζεται διάδοση μη οπτικής επαφής (NLOS ,non-line-of-sight).

Λόγω της παρουσία της πολυόδευσης, γίνεται στατιστική περιγραφή του λαμβανόμενου σήματος καθώς είναι δύσκολος ο αναλυτικός υπολογισμός αφού είναι αδύνατη (πρακτικά) η ακριβής γνώση της θέσης και των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών όλων των σκεδαστών

Η διαμόρφωση καναλιών που εξετάζουμε εδώ είναι ευρείας και όχι στενής ζώνης. Αυτό σημαίνει ότι το κανάλι επηρεάζει ανόμοια τις διάφορες συνιστώσες με αποτέλεσμα τη διαστρέβλωση στο δέκτη των φασματικών συνιστωσών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

2.1 Εισαγωγή

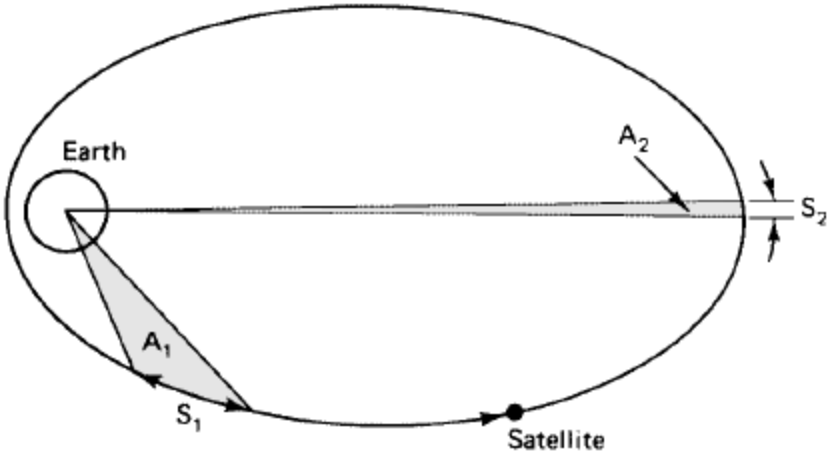
Ένα δορυφορικό σύστημα αποτελείται από τη σύνδεση δορυφόρου με έναν ή περισσότερους επίγειους σταθμούς. Ο χρήστης παράγει την πληροφορία και την δρομολογεί προς τον σταθμό βάσης μέσω του επίγειου δικτύου. Εκεί επεξεργάζεται και μεταδίδεται, μέσω της διαμορφωμένης ραδιοσυχνότητας (RF), στον δορυφόρο. Ο δορυφόρος , που μπορεί να θεωρηθεί ως αναμεταδότης στο διάστημα, μεταδίδει το σήμα προς τον ή τους σταθμούς βάσης. Λόγω της μεγάλης περιοχής πρόσβασής τους (ίχνος) μπορούμε με μια απλή μετάδοση να καλύψουμε έναν τεράστιο αριθμό δεκτών, επιτρέποντας κατά συνέπεια στα εκπεμπόμενα σήματα να μεταδοθούν ταυτόχρονα σε ένα μεγάλο αριθμό ανθρώπων.

Δορυφόροι ονομάζεται τα ουράνια σώμα τα οποία βρίσκονται σε περιοδική τροχιά γύρω από ένα άλλο μεγαλύτερο σώμα, το πρωτεύον . Η κίνησή τους ακολουθεί συγκεκριμένους νόμους, οι οποίοι ισχύουν για όλα τα ουράνια σώματα, όπως τους κομήτες πλανήτες, οι πλανήτες και τα άστρα. Οι αρχαίοι πολιτισμοί πίστευαν ότι οι κινήσεις των ουράνιων σωμάτων ήταν κυκλικές, ή συνδυασμός

κυκλικών κινήσεων. Πολύ αργότερα, ο Κέπλερ(Johannes Kepler 1571-1630) , ανακάλυψε με επεξεργασία των παρατηρησιακών δεδομένων δικών του, αλλά και των προηγούμενων αστρονόμων ,ότι οι κινήσεις των δορυφόρων είναι ελλειπτικές. Αυτός είναι ο πρώτος νόμος του Κεπλερ : η τροχιά που διαγράφει ο δορυφόρος γύρω από το μεγαλύτερο αντικείμενο είναι έλλειψη , με το κέντρο βάρους του συστήματος να βρίσκεται μία από τις δύο εστίες της έλλειψης.

Ο δεύτερος νόμος του Κέπλερ καθορίζει την ταχύτητα του δορυφόρου η οποία δεν είναι σταθερή: Ένας δορυφόρος καλύπτει σε ίσους χρόνους ίσα εμβαδά .

Στο σχήμα 2.1, ο δορυφόρος έχει μικρότερη ταχύτητα στη διαδρομή S2 από ότι στην S1



Σχήμα 2.1 *η απεικόνιση του δεύτερου νόμου του Keppler*

Ο τρίτος νόμος του Κέπλερ καθορίζει τη σχέση της απόστασης και της περιόδου περιστροφής: Το τετράγωνο της περιόδου περιστροφής του δορυφόρου είναι ανάλογο της τρίτης δύναμης της μέσης απόστασής του από το πρωτεύον σώμα.

2.2 Τεχνητοί δορυφόροι

Με τον όρο τεχνητούς δορυφόρους εννοούμε τα κατασκευασμένα από τον άνθρωπο αντικείμενα τα οποία τα έστειλε σε τροχιά γύρω από τη γη (και μεμονωμένα γύρω από τη σελήνη και τους κοντινούς στη γη πλανήτες)

Η παρουσία της ανθρώπινης δραστηριότητας στο διάστημα, αρχίζει ο δεύτερο μισό του $20^{ου}$ αιώνα οπότε έγινε η εκτόξευση των πρώτων τεχνιτών δορυφόρων για λόγους πειραματισμού και απόκτησης τεχνογνωσίας στα πλαίσια του ανταγωνισμού των δύο τότε μεγάλων δυνάμεων.

Ο πρώτος δορυφόρος ήταν ο Sputnik, με ημερομηνία εκτόξευσης το 1957. Ήταν στη ουσία μία κάψουλα 83 κιλών και εφοδιασμένη μόνο με ένα ραδιοπομπό πομπό.Έκτοτε η εξέλιξη ήταν αλματώδης, με αποτέλεσμα σήμερα να υπάρχει ένας τεράστιος αριθμός τεχνιτών δορυφόρων, με βάρη έως τόνους (στην περίπτωση του διεθνούς διαστημικού σταθμού))και εφοδιασμένων με πλήθος οργάνων για επιστημονικούς, πολεμικούς λόγους ή για παροχή διάφορων υπηρεσιών.

Δύο ή και περισσότεροι επίγειοι σταθμοί οι οποίοι συνδέονται μέσω δορυφόρου αποτελούν ένα δορυφορικό σύστημα. Ακολουθεί η γενική περιγραφή του

Η πληροφορία που παράγει ο χρήστης δρομολογείται προς τον σταθμό βάσης μέσω του επίγειου δικτύου. Εκεί επεξεργάζεται και μεταδίδεται, διαμορφωμένη με ραδιοσυχνότητα (RF), στον δορυφόρο. Ο δορυφόρος , που μπορεί να θεωρηθεί ως αναμεταδότης στο διάστημα, μεταδίδει το σήμα προς τον ή τους σταθμούς βάσης. Λόγω της μεγάλης περιοχής πρόσβασής τους (ίχνος) μπορούμε με μια απλή μετάδοση να καλύψουμε έναν τεράστιο αριθμό δεκτών, επιτρέποντας κατά συνέπεια στα εκπεμπόμενα σήματα να μεταδοθούν ταυτόχρονα σε ένα μεγάλο αριθμό ανθρώπων.

Ο όρος δορυφόρος χρησιμοποιείται ευρέως για την περιγραφή κυρίως των κατασκευασμένων από των άνθρωπο δορυφόρων που βρίσκονται σε τροχιά γύρω

από τη γη, και από εδώ και στο εξής η λέξη δορυφόρος θα αναφέρεται υπό αυτήν την έννοια.

2.3 Είδη τροχιών

Οι δορυφόροι κινούνται σε διάφορες τροχιές γύρω από την γη. Το σχήμα των τροχιών αυτών είναι βασικά ελλειπτικό εκτός από τους γεωστατικούς δορυφόρους, των οποίων είναι κυκλικό.

Παρουσιάζουμε πέντε από τα βασικά είδη δορυφορικών τροχιών

2.3.1 Γεωστατικές Τροχιές (GEO)

Από τις πλέον γνωστές είναι η γεωστατική τροχιά (Geostatic Earth Orbit, GEO). Γεωστατική, είναι η γεωσύγχρονη τροχιά που βρίσκεται στη νοητή προέκταση του ισημερινού. Είναι δηλαδή πάνω από τον ισημερινό.

Μια κυκλική γεωσύγχρονη τροχιά έχει ακτίνα περίπου ίση με 35900 km από την επιφάνεια της γης. Χαρακτηριστικό αυτής της τροχιάς είναι ότι οι δορυφόροι που βρίσκονται σε αυτήν, και που ονομάζονται γεωσύγχρονοι, έχουν ταχύτητα τροχιάς 11000 km/h με φορά κίνησης από ανατολή προς δύση .Αυτή η ταχύτητα ισούται με την ταχύτητα περιστροφής της γης. Επομένως, η περίοδος περιστροφής του είναι ίση με την περίοδο περιστροφής της γης γύρω από τον εαυτό της, δηλαδή ίση με 24h.

Ένας γεωστατικός λοιπόν δορυφόρος φαίνεται να βρίσκεται σε σταθερή θέση στον ουρανό ως προς έναν ακίνητο παρατηρητή στη γη, πράγμα που σημαίνει ότι οι κεραίες που στοχεύουν σε αυτόν είναι ακίνητες στοχεύοντας στο σταθερό σημείο του ουρανού που βρίσκεται ο γεωστατικός δορυφόρος. και άρα δεν χρειάζεται παρακολούθηση της κίνησης του δορυφόρου που θα απαιτούσε ακριβό εξοπλισμό.

Αυτό είναι και το κύριο πλεονέκτημα αυτών των δορυφόρων. Η επιλογή του σημείου πάνω στην προέκταση του ισημερινού προσφέρει τη μέγιστη κάλυψη της επιφάνειας της γης. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι επιτυγχάνεται κάλυψη όλης της γης με μόλις τρεις δορυφόρους. Και αυτό διότι ένας γεωστατικός δορυφόρος καλύπτει κάτι λιγότερο από τη μισή επιφάνεια της γης. Άρα με τρεις δορυφόρους σε απόσταση 120 μοιρών μεταξύ τους θα μπορούσαν να καλύψουν ραδιοκυματικά ολόκληρη τη γη.

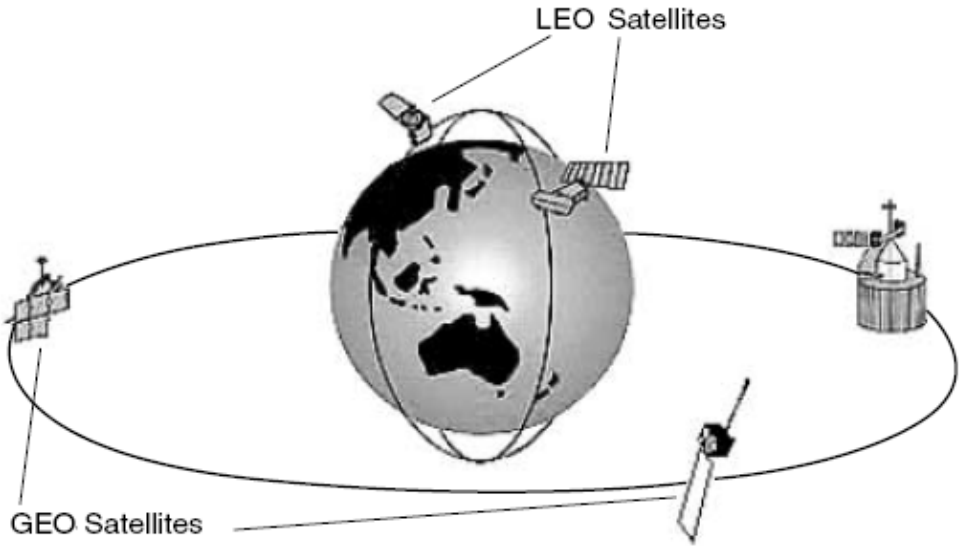
Τα δύο βασικά μειονεκτήματα των γεωστατικών δορυφόρων οφείλονται στην τεράστια απόσταση που έχουν, σε σχέση με άλλες τροχιές. Το πρώτο είναι η απόσβεση που οδηγεί στη μείωση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών, και άρα στην ανάγκη χρήσης μεγαλύτερης ισχύος αναμετάδοσης στο δορυφόρο. Το δεύτερο μειονέκτημα είναι η καθυστέρηση διάδοσης που επηρεάζει της ευαίσθητες στο συγχρονισμό υπηρεσίες, όπως επί παραδείγματι η καθυστέρηση στις τηλεφωνικές συνομιλίες. Επίσης δέκτες κοντά στους πόλους λαμβάνουν δύσκολα το απευθείας σήμα.

2.3.2 Χαμηλές τροχιές (Low Earth Orbits, LEO)

Το ύψος των τροχιών είναι για αυτούς τους δορυφόρους είναι της τάξης των 780 km. Εδώ δεν έχουμε πρόβλημα καθυστέρησης διάδοσης, αλλά το βασικό μειονέκτημα είναι ότι για παγκόσμια κάλυψη απαιτείται μεγάλος αριθμός δορυφόρων (τυπικός αριθμός 60 δορυφόροι). Οι δορυφόροι αυτοί πρέπει να έχουν ζεύξεις μεταξύ τους (intersatellite links). Τα πλεονεκτήματα των LEO δορυφόρων έναντι των GEO είναι ότι:

- Έχουν χαμηλότερο κόστος κατασκευής
- Παρέχεται σήμα υψηλότερης στάθμης καθώς η απόσταση είναι μικρότερη
- Είναι μειωμένο το φαινόμενο της αντήχησης

Στο σχήμα 2.2 εικονίζονται δορυφόροι σε LEO και GEO τροχιές (αν και η GEO τροχιά είναι κανονικά πολύ μακρύτερα)



Σχήμα 2.2 *σύγκριση των LEO και GEO τροχιών*

2.3.3 Μεσαίες τροχιές (Medium Earth Orbit,MEO)

Αυτές οι τροχιές βρίσκονται ανάμεσα στις χαμηλές τροχιές και τη Γεωσύγχρονη τροχιά. Δηλαδή καλύπτουν το διάστημα από 2000 km ως 35.786 km δηλαδή τη γεωσύγχρονη τροχιά. Οι δορυφόροι σε αυτή την περιοχή έχουν περίοδο περιστροφής 2 έως 24 ώρες.

Το GPS (Global Positioning System), Παγκόσμιο Σύστημα Θεσιθεσίας είναι ένα παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης, το οποίο βασίζεται σε ένα "πλέγμα" εικοσιτεσσέρων δορυφόρων της Γης, στους οποίους υπάρχουν ειδικές συσκευές, οι οποίες ονομάζονται "δέκτες GPS". Οι δέκτες αυτοί παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για τη θέση ενός σημείου, το υψόμετρό του, την ταχύτητα και την κατεύθυνση της κίνησης του. Επίσης, σε συνδυασμό με ειδικό λογισμικό χαρτογράφησης μπορούν να απεικονίσουν γραφικά τις πληροφορίες αυτές.

Το GPS αρχικά δημιουργήθηκε αποκλειστικά για στρατιωτική χρήση και ανήκε στη δικαιοδοσία του αμερικανικού Υπουργείου Εθνικής Άμυνας. Στα μέσα της

δεκαετίας του 1960 το σύστημα δορυφορικής πλοήγησης, γνωστό τότε με την ονομασία Transit System, χρησιμοποιήθηκε ευρέως από το αμερικανικό ναυτικό. Απαιτήθηκαν αρκετές δεκαετίες, μέχρι δηλαδή τα μέσα της δεκαετίας του 1990, ώστε το σύστημα GPS να εξελιχθεί, να γίνει ιδιαίτερα ακριβές και να αρχίσει να διατίθεται για ελεύθερη χρήση από το ευρύ κοινό.

Το διαστημικό τμήμα αποτελείται από το δίκτυο των 24 - 32 δορυφόρων που ήδη αναφέραμε. Οι δορυφόροι αυτοί «σκεπάζουν» ομοιόμορφα με το σήμα τους ολόκληρο τον πλανήτη, με εμβέλεια που καλύπτει ξηρά, θάλασσα και αέρα, γεγονός που αποδεικνύει τη φιλοσοφία που κρύβεται πίσω από τη λειτουργία του συστήματος GPS, δηλαδή τη διαθεσιμότητά του σε κάθε σημείο της Γης, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος να αποπροσανατολιστεί κανείς ποτέ και πουθενά. Όλοι οι δορυφόροι βρίσκονται σε ύψος 20.200 χιλιομέτρων πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και εκτελούν δύο περιστροφές γύρω από τη Γη κάθε 24ωρο. Για αυτό το λόγο η τροχιά αυτή ονομάζεται ημισύγχρονη, semisychronous orbit (SSO)

Ελλειπτικές τροχιές

Οι ελλειπτικές τροχιές έχουν μία κλίση ως προς τον ισημερινό και άρα μπορούν να καλύπτουν περιοχές μεγάλου γεωγραφικού πλάτους. Και εδώ υπεισέρχεται το πρόβλημα της καθυστέρησης διάδοσης, αλλά και η επίδραση του φαινομένου Doppler.

Δορυφόροι πολικής τροχιάς

Στις πολικές τροχιές ο δορυφόρους κινείται κατά μήκος των μεσημβρινών, περνώντας από τους δύο πόλους της γης . Για αυτές τις τροχιές προτιμούνται χαμηλά ύψη (LEO).Ορισμένα συστήματα πρόγνωσης καιρού χρησιμοποιούν συγκεκριμένα ηλιο-σύγχρονους (sun synchronous) δορυφόρους, δηλαδή δορυφόρους πολικής τροχιάς που περνάνε τον ισημερινό την ίδια τοπική ώρα κάθε

μέρα. Έτσι με δύο δορυφόρους, έναν πρωινό δορυφόρο σε ύψος 830km που περνάει τον ισημερινό στις 7:30 το πρωί (τοπική ώρα) και τον απογευματινό, που βρίσκεται σε ύψος 870km και διαβαίνει στις 2 το μεσημέρι τον ισημερινό, το αμερικάνικο σύστημα NOAA, μπορεί να παρατηρεί τις καιρικές συνθήκες σε όλη τη γη

Οι δορυφόροι ακολουθούν προσεγγιστικά μόνο τις παραπάνω τροχιές καθώς ένας αριθμός παραγόντων τους εκτοπίζει από την επιθυμητή τροχιά. Τέτοιοι λόγοι είναι οι βαρυτικές επιδράσεις τις σελήνης (κυρίως για τις απομακρυσμένες τροχιές όπως τις GEO) και η τριβή με μόρια της ατμόσφαιρας, η οποία συνεχίζει να εκτείνεται αν και με πολύ μικρή πυκνότητα για αποστάσεις που υπερβαίνουν τις τροχιές των δορυφόρων. Για αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος οι δορυφόροι είναι εφοδιασμένοι με συστήματα διόρθωσης τροχιάς , όπως γυροσκόπια.

2.4 Το δορυφορικό σύστημα

Ένα δορυφορικό σύστημα μπορούμε να πούμε ότι αποτελείται από το διαστημικό και το επίγειο τμήμα. Τα χαρακτηριστικά κάθε τμήματος εξαρτώνται από το είδος των υπηρεσιών που παρέχει το σύστημα όπως σταθερή ή κινητή υπηρεσία, απευθείας εκπομπής και άλλων

Η συνολική διαδρομή την οποία πρέπει να διανύσουν τα ραδιοκύματα από την πηγή μέχρι τον προορισμό μπορεί να χωριστεί σε δυο επιμέρους ζεύξεις: στη ζεύξη επίγειου σταθμού - δορυφόρου (ή προς τα άνω ζεύξη, uplink) και στη ζεύξη δορυφόρου - επίγειου σταθμού (ή προς τα κάτω ζεύξη, downlink). Η ποιότητα της ραδιοζεύξης καθορίζεται κυρίως από το λόγο φέροντος προς θόρυβο (carrier to noise ratio, CNR). Η επίδοση της συνολικής ζεύξης, δηλαδή από σταθμό σε σταθμό, αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα για τη σχεδίαση του συστήματος και καθορίζεται από την ποιότητα των δυο επιμέρους ζεύξεων.

2.4.1 Επίγειος σταθμός

Το επίγειο τμήμα αποτελείται από τον αντίστοιχο επίγειο σταθμό (earth station).Αυτός περιλαμβάνει κεραίες και τον εξοπλισμό λήψης και μετάδοσης, καθώς και σύνδεση (ενσύρματη ή ασύρματη) με το επίγειο δίκτυο.

Η κεραία του σταθμού βάσεως είναι συνήθως τοποθετημένη σε έναν κατάλληλα προσαρμοσμένο ιστό κεραίας για να αποφευχθούν εξασθενήσεις που προκαλούνται από εμπόδια στη γύρω περιοχή. Έτσι μειώνονται και τα επίπεδα του ανθρώπινου (man made) θορύβου, που προκαλείται από δραστηριότητες όπως ανάφλεξη μηχανών.

2.4.2 Διαστημικό τμήμα

Το δορυφορικό τμήμα εκτός των δορυφόρων περιλαμβάνει και επίγειες εγκαταστάσεις ,γνωστές με το όνομα εγκαταστάσεις εντοπισμού τηλεμετρίας και εντολών .Αυτές χρειάζονται για την ομαλή λειτουργία του δορυφόρου.

Η επίδοση της συνολικής ζεύξης, δηλαδή από τον επίγειο σταθμό στον άλλον επίγειο σταθμό, αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα για τη σχεδίαση του συστήματος και καθορίζεται από την ποιότητα των δυο επιμέρους ζεύξεων, την άνω και την κάτω ζεύξη.

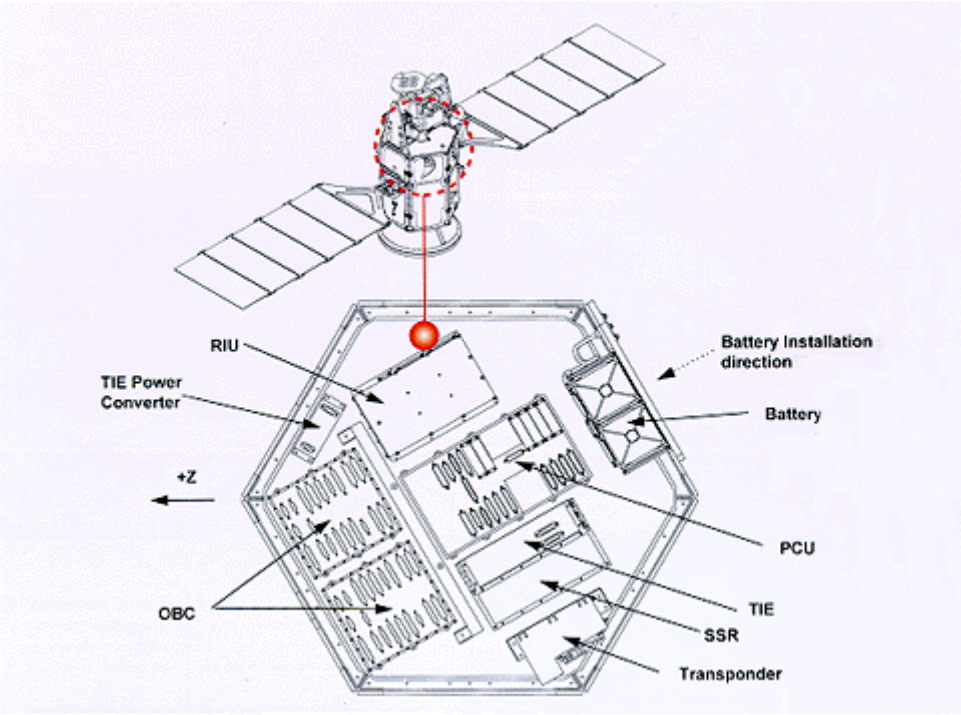
Δορυφορικό Ραδιοφάσμα

Η σύνδεση με το δορυφόρο γίνεται με συχνότητες του φάσματος των ραδιοσυχνοτήτων από 2 ως 22 GHz . Κάθε δορυφόρος χρησιμοποιεί 2 διαφορετικές συχνότητες για την άνω ζεύξη και κάτω ζεύξη (uplink,downlink) που είναι η σύνδεση γης-δορυφόρου και δορυφόρου γης αντίστοιχα. Αυτό γίνεται για να αποφευχθούν οι παρεμβολές ,ώστε να μπορεί να λειτουργεί ο δορυφόρος ταυτόχρονα ως δέκτης και ως πομπός. Επίσης, η χαμηλότερη συχνότητα αποδίδεται στην κάτω ζεύξη ,ώστε

να έχει αυτή λιγότερες αποσβέσεις, καθώς οι αποσβέσεις αυξάνονται με την αύξηση της συχνότητας.

Οι δορυφόροι και οι υπηρεσίες τους έχουν σήμερα παγκόσμιο χαρακτήρα. Αυτό έχει δημιουργήσει νέες προκλήσεις, όπως το πρόβλημα της οργάνωσης και του συντονισμού. Για παράδειγμα οι μεταδόσεις από και προς τους δορυφόρους πρέπει να γίνονται σε συγκεκριμένες συχνότητες για να αποφεύγονται οι παρεμβολές. Επίσης οι θέσεις στη γεωστατική τροχιά δεν είναι άπειρες, κάτι που επιβάλει τη χρήση τους με ορθολογικό τρόπο. Την κύρια ευθύνη για τη θέσπιση τέτοιων κανόνων λειτουργίας έχει η ITU (International Telecommunication Union), ένας διεθνής οργανισμός που εποπτεύει τη διαχείριση των διεθνών τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Κύριες ευθύνες της ITU είναι να διαχειρίζεται τη χρήση του ραδιοφάσματος, εκχωρεί συχνότητες για κάθε υπηρεσία και καθορίζει τις διαδικασίες για τη χρήση των ραδιοσυχνοτήτων σύμφωνα με τις απαιτήσεις των διαφόρων υπηρεσιών και περιοχών.

Ακολουθεί η περιγραφή του ίδιου του δορυφόρου .Στο σχήμα 2.3 βλέπουμε τα βασικά τμήματά του:



Σχήμα 2.3 *τα τμήματα που απαρτίζουν τον δορυφόρο*

Ο δορυφόρος έχει ηλιακούς συλλέκτες, που του παρέχουν την απαιτούμενη για τη λειτουργία του ηλεκτρική ενέργεια.

Στο κύριο τμήμα του δορυφόρου, στην πλατφόρμα, υπάρχουν μεγάλα κάτοπτρα και πομποί για αποστολή και παραλαβή σημάτων, που αποτελούν το φορτίο (payload). Το φορτίο γενικά περιλαμβάνει τον εξοπλισμό για την παροχή των υπηρεσιών για τις οποίες έγινε η εκτόξευση του δορυφόρου. Επίσης μπορούν να υπάρχουν στη πλατφόρμα συστήματα ρύθμισης της θερμοκρασίας, διόρθωσης της τροχιάς και γενικότερα για έλεγχο του δορυφόρου.

Ο δορυφόρος έχει διπλό ρόλο. Από τη μία ενισχύει τα λαμβανόμενα φέροντα σήματα για επαναμετάδοση στην προς τα κάτω ζεύξη. Η ισχύς φέροντος στην είσοδο ενός δορυφορικού δέκτη είναι της τάξης των 100pW έως 1nW. Αντίστοιχα, στην έξοδο του ενισχυτή η ισχύς φέροντος είναι της τάξης των 10 έως 100W. Επομένως, το κέρδος ισχύος είναι της τάξης των 100 έως 130dB. Από την άλλη, αλλάζει τη συχνότητα του φέροντος ώστε να αποφευχθεί η εκ νέου είσοδος στο δέκτη μέρους της μεταδιδόμενης ισχύος.

2.5 Κεραίες

Το βασικό στοιχείο των επίγειων σταθμών και των δορυφόρων είναι οι κεραίες. Η κεραία λήψης μετατρέπει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Στον επίγειο σταθμό αποτελείται από το κάτοπτρο ή πιάτο και το LNB (Low Noise Block converter ή Μπλοκ μετατροπέας Χαμηλού Θορύβου). Το κάτοπτρο με την παραβολική του επιφάνεια αντανακλά τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που προέρχονται από το δορυφόρο και τα εστιάζει σε ένα συγκεκριμένο σημείο όπου και βρίσκεται το LNB.

Το LNB συλλέγει το ανακλώμενο σήμα με μια χοάνη, έπειτα το περνάει από τον ενισχυτή χαμηλού θορύβου (Low Noise Amplifier-LNA),όπου γίνονται δύο λειτουργίες. Πρώτα γίνεται ο (πρώτος)υποβιβασμός συχνότητας (IF), με τη χρήση

ενός τοπικού ταλαντωτή και έπειτα ενισχύεται το σήμα. Το LNA προσθέτει λίγο θόρυβο στο σήμα που ενισχύεται. Έπειτα το σήμα περνάει στον επιλογέα πόλωσης. Το σήμα στην έξοδο του LNB οδηγείται με καλώδιο στα υπόλοιπα μέρη του σταθμού λήψης.

Στον δορυφόρο υπάρχουν συνήθως δύο δέκτες ευρείας ζώνης, ένας σε λειτουργία και ο άλλος εφεδρικός.

Οι κεραίες χαρακτηρίζονται από δύο ιδιότητες: το κέρδος και το διάγραμμα ακτινοβολίας. Το κέρδος μιας κεραίας είναι ένα μέτρο της ενίσχυσης του σήματος που εισάγεται από μια συγκεκριμένη κεραία εν συγκρίσει με μια πανκατευθυντική κεραία. (κεραία αναφοράς-δίπολο).Το διάγραμμα ακτινοβολίας δείχνει την κατανομή ισχύος της κεραίες, την ικανότητα λειτουργίας της, ανάλογα με την κατεύθυνση.

Σημαντικό μέγεθος για τις κεραίες είναι το επίπεδο ευαισθησίας της κεραίας (sensitivity level) . Επίπεδο ευαισθησίας μιας κεραίας είναι η ελάχιστη μετρούμενη τιμή ισχύος από την κεραία, η οποία εκλαμβάνεται ως χρήσιμο σήμα και όχι ως θόρυβος.Για τη λήψη του δορυφορικού σήματος πρέπει να γίνει σωστά η σκόπευση του δορυφόρου, με εύρεση της σωστής αζιμουθιακής γωνίας και της γωνία ανύψωσης

-Περιβάλλοντα μετάδοσης κινητού-δορυφορικού καναλιού

Μπορούμε να διαιρέσουμε τα περιβάλλοντα μετάδοσης σε τρείς κατηγορίες

- Ανοικτές και αγροτικές περιοχές, όπου το απευθείας σήμα φτάνει δίχως εμπόδια (LOS) και με ελάχιστες ανακλάσεις στον δέκτη
- Προαστιακές περιοχές, όπου εμφανίζεται μερική παρεμπόδιση στο απευθείας κύμα. Ο δέκτης λαμβάνει πέρα από το απευθείας σήμα και ένα θύσανο ανακλώμενων ,διαθλώμενων ακτίνων

- Αστικές περιοχές, που χαρακτηρίζονται από σχεδόν πλήρη παρεμπόδιση του απευθείας κύματος, όπου μόνο με πολυόδευση φτάνει το σήμα στο δέκτη

Το ληφθέν δορυφορικό σήμα μπορεί να αποτελείται από το συνδυασμό του απευθείας κύματος οπτικής επαφής (LOS), του διάχυτου κύματος (σήματα πολλαπλών διαδρομών) και της κατοπτρικής επίγειας ανάκλασης (ανάκλαση κοντά στον δέκτη)

2.6 Μικροκυματικό Φάσμα

Η μικροκυματική περιοχή έχει φασματικό εύρος 300 MHz -300 GHz ή αν δούμε τα μήκη κύματος, αυτά κυμαίνονται από 1m ως 1mm. Τα μικροκύματα χωρίζονται συνήθως σε τρεις επιμέρους ζώνες.

- Στα UHF ,Ultra high frequency, (0.3-3 GHz), με το μήκος κύματος λ να έχει τιμές 10cm-1m. Για αυτό τα UHF κύματα λέγονται δεκατομετρικά.

- Στα SHF ,Super high frequency, (3-30 GHz), που λέγονται και εκατοστομετρικά (centimeter wave)κύματα καθώς λ= 1cm-10cm. Χρήση των συχνοτήτων SHF γίνεται από τα δορυφορικά κανάλια (uplink downlink),από τα περισσότερα μοντέρνα ραντάρ καθώς και από wireless LAN

- Στα EHF ,Extremely high frequency, (30-300 GHz) που λέγονται και χιλιοστομετρικά (millimeter wave) κύματα καθώς λ= 1mm-10mm. Αυτή η τρίτη κατηγορία βρίσκεται στο βαθύ υπέρυθρο και είναι στα όρια των THz κυμάτων

Πολλές φορές χρησιμοποιείται το σύστημα Radio Society of Great Britain (RSGB) για τον διαχωρισμό φάσματος σε μπάντες συχνοτήτων που καθώς είναι πιο μικρές επιτρέπουν γίνει πιο συγκεκριμένη μελέτη των χαρακτηριστικών κάθε κατηγορίας. Οι κατηγορίες του συστήματος RSGB είναι

Πίνακας 2.1 *Οι ζώνες συχνοτήτων σύμφωνα με τη* RSGB

L band	1 to 2 GHz
S band	2 to 4 GHz
C band	4 to 8 GHz
X band	8 to 12 GHz
K_u band	12 to 18 GHz
K band	18 to 26.5 GHz
K_a band	26.5 to 40 GHz
Q band	30 to 50 GHz
U band	40 to 60 GHz
V band	50 to 75 GHz
E band	60 to 90 GHz
W band	75 to 110 GHz
F band	90 to 140 GHz
D band	110 to 170 GHz

Η L και μέρος της S ανήκουν στην UHF περιοχή. Από την S μέχρι την Q βρισκόμαστε στην SHF περιοχή και από την Q και πάνω στην EHF περιοχή. Σύμφωνα όμως με την IEEE η UHF σταματάει στα 1 GHz, πριν την L band, και η millimeter περιοχή αρχίζει από τα 110 GHz,μετά την W band.Γενικά δεν υπάρχει κάποιο αυστηρό όριο μεταξύ των διάφορων αυτών ομάδων, απλά χρησιμοποιούνται για την ομαδοποίηση και την περιγραφή των διάφορων ομάδων συχνοτήτων, και μεταξύ των διάφορων οργανισμών ,δεν υπάρχει πάντα συμφωνία σε αυτά τα όρια.

Στην SHF βρίσκονται πολλές συχνότητες που προσφέρονται για δορυφορικές επικοινωνίες, όπως η X band ενώ άλλες είναι προβληματικές, όπως η K band όπου μεγιστοποιούνται οι εξασθενήσεις που οφείλονται στις απορροφήσεις των υδρατμών

2.7 Συμπεράσματα

Αρχικά σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε η βασική ιδέα του δορυφορικού συστήματος με μια σύντομη ιστορική ανασκόπηση και μια παρουσίαση των βασικών νόμων που διέπουν την κίνηση των ουράνιων σωμάτων. Έπειτα η συζήτηση επικεντρώθηκε στο δορυφορικό τμήμα και τις χρησιμοποιούμενες από των άνθρωπο τροχιές και περιγραφή αυτών. Ταξινομήθηκαν και αναλύθηκαν κάποια προτερήματα και μειονεκτήματα τους. Παρουσιάστηκαν τα δύο τμήματα ενός δορυφορικού συστήματος το διαστημικό και το επίγειο και έγινε ανάλυσή τους , όπως των οργάνων που κουβαλάει η κάψουλα.

Αναλύθηκε τέλος το χρησιμοποιούμενο ραδιοφάσμα, καθώς και οι διεθνείς κανόνες που διέπουν τη διάθεσή του. Ακολούθησε η σχετική ανάλυσή των χρησιμοποιούμενων κεραιών, ώστε να γίνει πλήρης η περιγραφή της ζεύξης του διαστημικού με το επίγειο τμήμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μηχανισμοί διάδοσης του σήματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ακολούθως αναλύονται και τα διάφορα είδη απωλειών που μπορεί να υποστεί το σήμα κατά την μετάδοσή του μέσω της ατμόσφαιρας, για το δορυφορικό κανάλι, καθώς και η περιγραφή της διάδοσης με τις απώλειές τις κατά την επίγεια μετάδοση.

3.2 Μμηχανισμοί διάδοσης Η/Μ ακτινοβολίας

Υάρχουν διάφορα είδη εξασθένησης (attenuation) που υφίσταται το σήμα κατά την διάδοσή του και οφείλονται στους διάφορους μηχανισμούς διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

- Ανάκλαση (reflection)

  Ανάκλαση εμφανίζεται όταν το διαδιδόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε αντικείμενο διαστάσεων πολύ μεγαλύτερων από το μήκος κύματος.

- Σκέδαση (scattering)

  Εμφανίζεται όταν στη διαδρομή του κύματος υπάρχουν αρκετά αντικείμενα, με διαστάσεις μικρότερες από το μήκος κύματος λ

- Περίθλαση(diffraction)

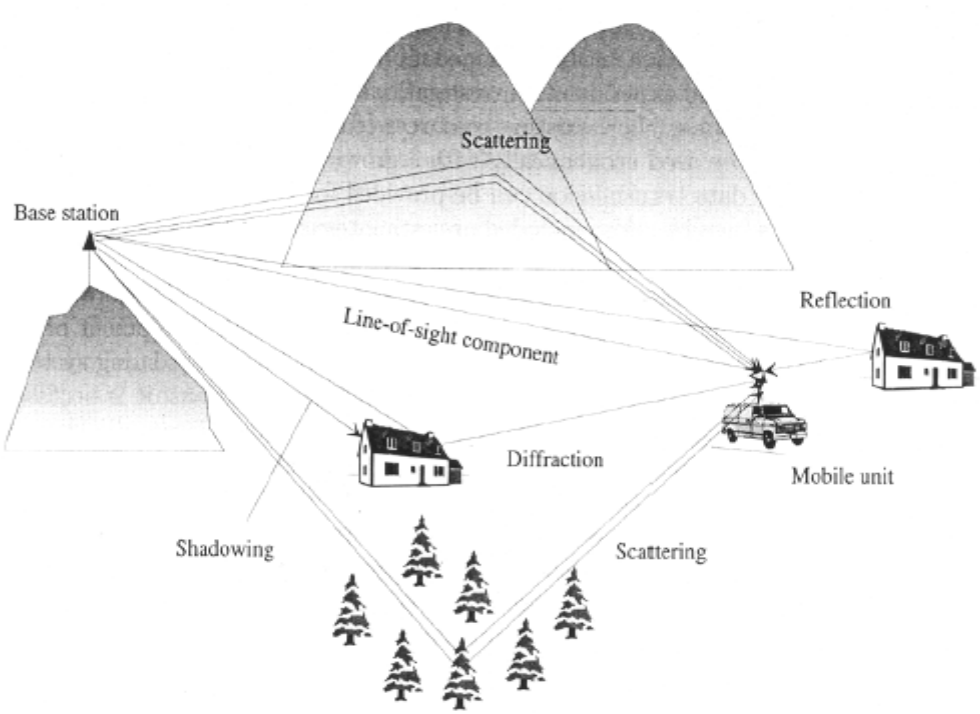
  Όταν κατά τη διαδρομή του ραδιοκύματος από τον πομπό προς τον δέκτη αυτό προσπίπτει σε αντικείμενα με αιχμή, συγκρίσιμα με το μήκος κύματος, τότε, από την αρχή του *Huygens*,το σημείο δρα ως δευτερεύουσα πηγή. Με αποτέλεσμα ηλεκτρομαγνητική ενέργεια να είναι παρούσα και πίσω από το αντικείμενο, σε σημεία όπου δεν υπάρχει οπτική επαφή με την πηγή, όπου δεν είναι δυνατή η πρόβλεψη της έντασης της περιθλόμενης ακτινοβολίας με οπτική γεωμετρία.

- Διάθλαση (refraction)

  Εμφανίζεται λόγω αλλαγής του δείκτη διάθλασης στο μέσο διάδοσης, όπως όταν περνάει το ραδιοκύμα από τα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας με διαφορετική πυκνότητα. και έχει σαν αποτέλεσμα την εκτροπή του κύματος.
- Απορρόφηση(absorbtion), Σκίαση

Αυτά τα φαινόμενα είναι εξαρτώμενα από το έδαφος ,από τα φαινόμενα της ατμόσφαιρας καθώς και από τα αντικείμενα στη διαδρομή όπως βουνά, κτήρια, δέντρα κτλ. Λόγω αυτών των συνθηκών διάδοσης του κύματος εμφανίζεται το φαινόμενο της πολυόδευσης (multipath) που θα εξετάσουμε παρακάτω.

Στο σχήμα 3.1 βλέπουμε την αναπαράσταση των διάφορων μηχανισμών διάδοσης του σήματος.



Σχήμα 3.1 *τρόποι διάδοσης ηλεκτρομαγνητικού κύματος*

3.3 Πολυοδική διάδοση

Βασικός παράγοντας απωλειών είναι η πολυοδική διάδοση(multipath fading). Η πολυοδική διάδοση οδηγεί σε ραγδαίες διακυμάνσεις της φάσης και του πλάτους του σήματος. Το σήμα που φτάνει στον δέκτη δεν περιέχει μόνο το κύμα της άμεσης οπτικής ευθείας, αλλά και μεγάλο αριθμό ραδιοκυμάτων που

φτάνουν μέσω ανάκλασης και περίθλασης. Οι επιδράσεις της πολυόδευσης και περαιτέρω περιγραφή της, θα γίνει στο κεφάλαιο των διαλείψεων (κεφάλαιο 4).

Στην κεραία, μία συνηθισμένη τεχνική καταπολέμησης θορύβου, είναι η απόκρυψη του πλάγιου λοβού της καραίας, αν υποθέσουμε ότι σημαντικό μέρος των πολυοδευόμενων ακτινών φτάνουν πλαγίως.

3.4 Επίγεια μετάδοση

Στην επίγεια (terrestrial) μετάδοση δεν έχουμε μετάδοση στον ελεύθερο χώρο (free space) αλλά πρέπει να υπολογιστεί η επίδραση της επιφάνειας της γης στο κανάλι μετάδοσης.

Δύο φαινόμενα που παρουσιάζονται είναι η παρεμπόδιση του σήματος, ή περίθλαση αν το σήμα περάσει από το εμπόδιο, δηλαδή η σκίαση που εξετάστηκε παραπάνω , και δεύτερον η ανάκλαση από το έδαφος (Ground Reflection). Αν το έδαφος είναι αρκετά ανακλαστικό μπορεί να προκληθεί ισχυρή εξασθένηση.

Θα δούμε την περίπτωση που στον δέκτη φτάνει μία μόνο ανακλώμενης ακτίνας από το έδαφος, και η απευθείας συνιστώσα. Αν το κανάλι μετάδοσης είναι πολύ κοντά στο έδαφος και παράλληλο με αυτό τότε έχουμε Near Earth Propagation.

- Συντελεστής ανάκλασης

Ο συντελεστής ανάκλασης ρ ,είναι σημαντική παράμετρος στον υπολογισμό του αθροίσματος των ακτίνων στο δέκτη, καθώς επηρεάζει το μέτρο και τη φάση της προσπίπτουσας ακτίνας .Εξαρτάται από τη συχνότητα , την πόλωση , τη γωνία πρόσπτωσης και την επιφάνεια του εδάφους. Για μικρή γωνία πρόσπτωσης και αλλαγή φάσης 180^{o} ο συντελεστής ανάκλασης έχει τιμή ρ=1

Στην περίπτωση που η απόσταση των δύο κεραιών είναι πολύ μεγαλύτερη από το ύψος των κεραιών, δηλαδή η γωνία πρόσπτωσης της ανακλώμενης ακτίνας στο

έδαφος είναι πολύ μικρή, μπορούμε να πούμε ότι οι δύο ακτίνες καλύπτουν προσεγγιστικά την ίδια απόσταση και άρα η απώλεια ελεύθερου χώρου είναι ίδια για τις δύο περιπτώσεις. Τότε έχω 6 DB ενίσχυση δηλαδή διπλασιασμό πλάτους στο δέκτη, αν η ανακλώμενη ακτίνα είναι σε φάση με την απευθείας. Διπλασιασμός του πλάτους σημαίνει τετραπλασιασμός της ισχύος. Αυτή είναι η ακραία περίπτωση θετικής συνεισφοράς της ανακλώμενης ακτίνας στο λαμβανόμενο σήμα. Η ακραία περίπτωση αρνητικής επίδρασης της ανακλώμενης ακτίνα είναι αν υπάρχει διαφορά φάσης 180^o οπότε τα σήματα αλληλοαναιρούνται

Το path loss είναι ίσο με

$$L_{mp} \cong G_T G_R \frac{(h_t h_r)^2}{d^4} \qquad (3.1)$$

Όπου

G_T,$G_{R\,\tau\alpha}$ κέρδη των κεραιών,

h, το ύψος της κεραίας του πομπού

h_r το ύψος της κεραίας του δέκτη

- σκληρότητα του εδάφους

Ένας άλλος σημαντικό παράγοντας για την επιρροή του εδάφους είναι η σκληρότητα του εδάφους (Surface Roughness) .Σε πολλές περιπτώσεις, το έδαφος είναι αρκετά ανώμαλο με αποτέλεσμα να μην είναι ρεαλιστική η προσέγγιση του εδάφους ως λείας ανακλαστικής επιφάνειας,αλλά αυτό να υφίσταται σκέδαση.

Η σκληρότητα του εδάφους μετράται με τη βοήθεια του κριτηρίου Rayleigh, το οποίο κρίνει την υψομετρική διαφορά που εμφανίζει το έδαφος. Αν η διαφορά από τα βυθίσματα μέχρι τις κορυφές είναι μικρότερη από αυτήν που θα προκαλούσε διαφορά φάσης μικρότερη από 90^o σε δύο ανακλώμενες ακτίνες από τα ακραία σημεία (την κορυφή και το βύθισμα) τότε το έδαφος χαρακτηρίζεται ομαλό. Το ποσό της ανωμαλίας του εδάφους που είναι αποδεκτή ώστε να χαρακτηριστεί

ομαλό το έδαφος, είναι ανάλογο του μήκους κύματος και της απόστασης και αντιστρόφως ανάλογο του ύψους των κεραιών.

Ο μαθηματικός τύπος που εκφράζει τα ανωτέρω είναι ο

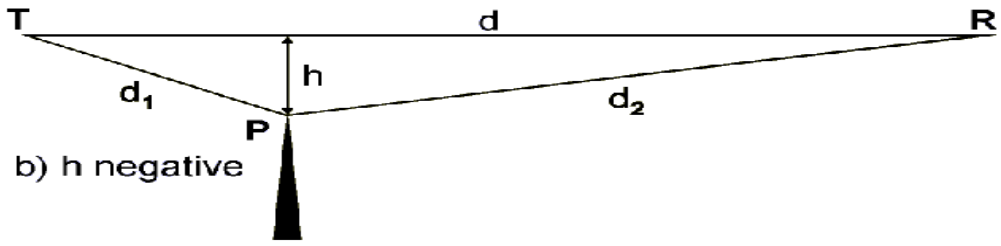
$$R=4\pi\sigma\sin\phi/\lambda \qquad (3.2)$$

Όπου
σ =η απόκλιση του μέσου ύψους των ανωμαλιών του εδάφους
φ =η γωνία πρόσπτωσης και λ το μήκος κύματος

Αν R<0.1 τότε η επιφάνεια χαρακτηρίζεται ομαλή (smooth) ενώ αν R>10 η επιφάνεια χαρακτηρίζεται σκληρή (rough)

- Ζώνες Frensel

Οι ζώνες Frensel μας δίνουν τη δυνατότητα να υπολογίζουμε που βρίσκονται οι ζώνες, όπου η ύπαρξη εμποδίων προκαλούν εντονότερα ανακλώμενα ή περιθλώμενα σήματα σε φάση με το απευθείας σήμα ή εκτός φάσης ,και άρα καταστρεπτικά στον δέκτη. Η πρώτη ζώνη θεωρείται αρκετά σημαντική για την ποιότητα του σήματος και αποφεύγεται κατά το δυνατόν η ύπαρξη αντικειμένων σε αυτή τη ζώνη.



Σχήμα 3.2 *Επιρροή του σήματος στον δέκτη μιας κορυφής P*

Στο σχήμα 3.2 βλέπουμε ότι πέρα από το απευθείας σήμα, στον δέκτη φτάνει και το σήμα λόγω περίθλασης από την κορυφή. Για να βρούμε για ένα σημείο P, την ακτίνα της ζώνεις νιοστού βαθμού υπάρχει ο τύπος

$$F_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \qquad (3.3)$$

Όπου

d_1, d_2= οι απόσταση της αιχμής P από τον πομπό και τον δέκτη αντίστοιχα

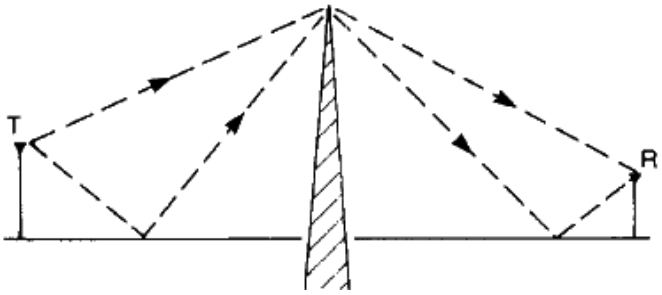
λ = το μήκος κύματος λειτουργίας

n = ο (νοστός) βαθμός της ζώνης Fresnel που ψάχνουμε

Γενικά οι ζώνες μονού αριθμού ,δηλαδή για περιττό n, λέμε ότι δρουν καταστρεπτικά στο σήμα, καθώς η διαφορά των δύο μονοπατιών είναι της τάξης του λ, η ανακλώμενη/περιθλώμενη ακτίνα μπορεί να είναι της ίδιας ισχύος με αυτή του απευθείας σήματος .Από την άλλη ανακλάσεις από ζώνες άρτιου αριθμού δρουν ενισχυτικά στο σήμα. Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι οι ζώνες έχουν ελλειψοειδή σχήματα με εστίες τις κεραίες εκπομπής και λήψης.

- Περίθλαση

Για την επεξήγηση της αρχής του Huygens,για την διάδοση ενέργειας πίσω από ένα αντικείμενο, χρησιμοποιείται ένα ιδανικό εμπόδιο, ευθύ , απόλυτα απορροφητικό. Η πραγματικότητα διαφέρει προφανώς και μία άλλη προσέγγιση είναι αυτή του (Knife edge diffraction) ,που θεωρεί φυσικό εμπόδιο, αλλά με πολύ λεπτή κορυφή. Υπάρχουν επίσης πολλές περαιτέρω προσεγγίσεις.



Σχήμα 3.3 *το φαινόμενο της περίθλασης (Knife Edge)*

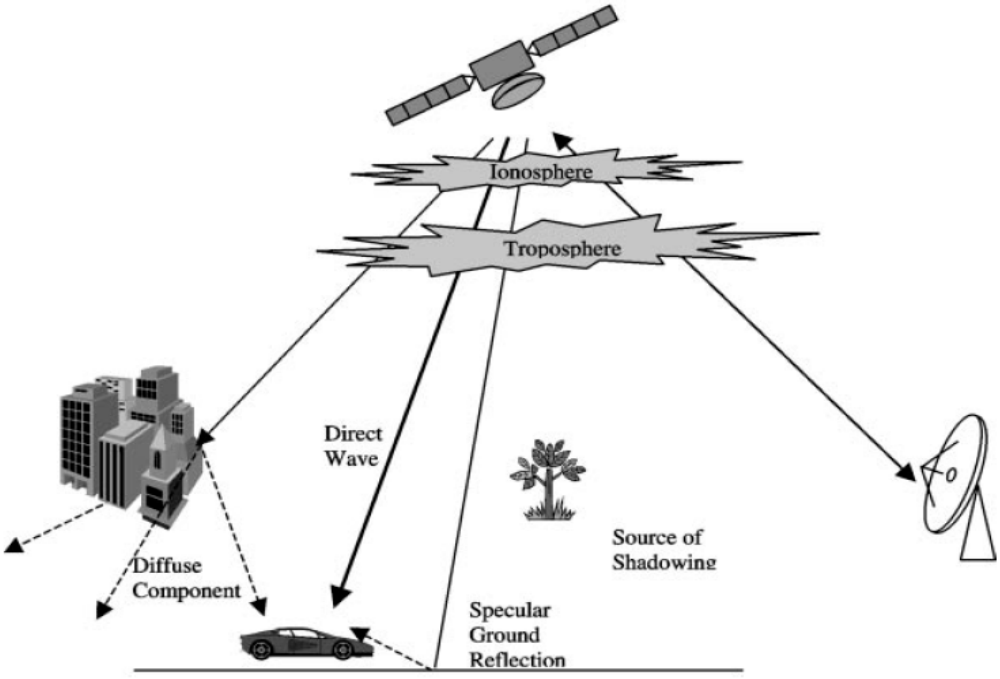
Αν κατά την επίγεια μετάδοση ο δρόμος διακόπτεται από την επιφάνεια της γης ή από ένα εμπόδιο, παρουσιάζεται το φαινόμενο της περίθλασης για μετάδοση πέρα από τον ορίζοντα. Οι παρεμβολές που εισάγονται εξαρτώνται από την ακτίνα της καμπύλης στην κορυφή του εμποδίου .Δηλαδή στην περίπτωση παρεμβολής ενός κτηρίου αν η απόσταση των επίγειων κεραιών είναι μεγάλη, δεν παίζει ρόλο μόνο το ύψος του κτηρίου, αλλά λαμβάνεται υπόψη η καμπύλωση της γης

Γενικά για αποστάσεις μικρότερες των 10 χιλιομέτρων η καμπύλωση της γης αγνοείται.

3.5 Ατμοσφαιρική εξασθένηση (atmospheric losses)

Εξασθένηση του σήματος στην ατμόσφαιρα δημιουργείται είτε από απορρόφηση της ενέργειας από διάφορα αέρια ,φαινόμενο που έχει το όνομα ατμοσφαιρική απορρόφηση (atmospheric absorption) είτε από εξασθενήσεις οφειλόμενες σε καιρικές συνθήκες που ονομάζονται ατμοσφαιρικές εξασθένισεις (atmospheric attenuation)

Στα επόμενα υποκεφάλαια περιγράφονται οι εξασθενήσεις που λαμβάνουν χώρα στην τροπόσφαιρα και την ιονόσφαιρα .Τα τροποσφαιρικά φαινόμενα μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα σε συχνότητες κάτω από 10 GHz



Σχήμα 3.4 *απεικόνιση της διάδοσης του σήματος μέσω των ζωνών της ατμόσφαιρας*

3.5.1 Ιονόσφαιρα

Το πρώτο τμήμα της ατμόσφαιρας που συναντάει το σήμα από δορυφόρο είναι η ιονόσφαιρα, ένα στρώμα ιονισμένων σωματιδίων, κυρίως λόγω της επίδρασης του ηλίου.

Τα βασικά προβλήματα που προκαλεί η ιονόσφαιρα είναι η ξαφνική αλλαγή του δείκτη διάθλασης, και ιονοσφαιρικός σπινθηρισμός (Ionospheric scintillation) και γενικά στατιστικές διακυμάνσεις της τιμής του σήματος, που δεν μπορεί να προβλεφτεί τοπικά. Ο ιονοσφαιρικός σπινθηρισμός περιγράφει μεταβολές της φάσης , του πλάτους, της πολικότητας και της γωνίας άφιξης του κύματος.

Τα φαινόμενα αυτά, που οφείλονται στα χαρακτηριστικά της ιονόσφαιρας που περιγράφονται παρακάτω, είναι μεταβλητά με το χρόνο, και μπορούν να

προκαλέσουν σημαντικές απώλειες στο σήμα, για διάρκεια της τάξης των λεπτών. Για αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερη ισχύς σήματος. Μία από τις εξασθενίσεις που εισάγονται από την ιονόσφαιρα, ειδικότερα, η περιστροφή Faraday(δηλαδή η περιστροφή του επιπέδου πόλωσης ενός γραμμικά πολωμένου ηλεκτρομαγνητικού κύματος στην ιονόσφαιρα, λόγω της αλληλεπίδρασής του με το μαγνητικό πεδίο της Γης) μπορεί να εξουδετερωθεί αποτελεσματικά από την εκλεκτική χρήση της πόλωσης της μετάδοσης.

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα αλλά σχηματίζουν στρώματα. Ακόμα, ταξιδεύουσες ιονοσφαιρικές διαταραχές, γνωστές ως νέφη ηλεκτρονίων ταξιδεύουν στην ατμόσφαιρα δημιουργώντας διακυμάνσεις στο σήμα . Στην ιονόσφαιρα υπάρχουν πολλά ελεύθερα ηλεκτρόνια ανά μονάδα όγκου. Η συνολική μετατόπιση ενός πλήθους ηλεκτρονίων N σε έναν όγκο δημιουργεί την διπολική ροπή ανά μονάδα όγκου, που καλείται πόλωση P. Η επίδραση της έντασης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος από ή προς τον δορυφόρο προκαλεί μια τέτοια πόλωση η οποία οδηγεί στην αλλαγή του δείκτη διάθλασης n της ιονόσφαιρας . προκύπτει ότι n^2 είναι ανάλογο της πυκνότητας ελευθέρων ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου και αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας. Αυτό είναι ένα στατιστικό φαινόμενο, δεν μπορεί δηλαδή να προβλεφτεί τοπικά

Στην πλειοψηφία των δορυφορικών συστημάτων όπου χρησιμοποιούνται μεγάλες συχνότητες, τα τροποσφαιρικά φαινόμενα και η επίδρασή τους, είναι πολύ σημαντικές, ενώ καθώς η επίδραση της ιονόσφαιρας είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της συχνότητας για τις ζώνες Ka, Ku και V η επίπτωση των φαινομένων αυτών της ιονόσφαιρας στην ποιότητα του σήματος είναι αμελητέα. Φαινόμενα της ιονόσφαιρας δεν θα εξεταστούν περεταίρω καθώς επίδραση της στα μικροκύματα είναι αρκετά μικρή.

3.5.2 Τροπόσφαιρα

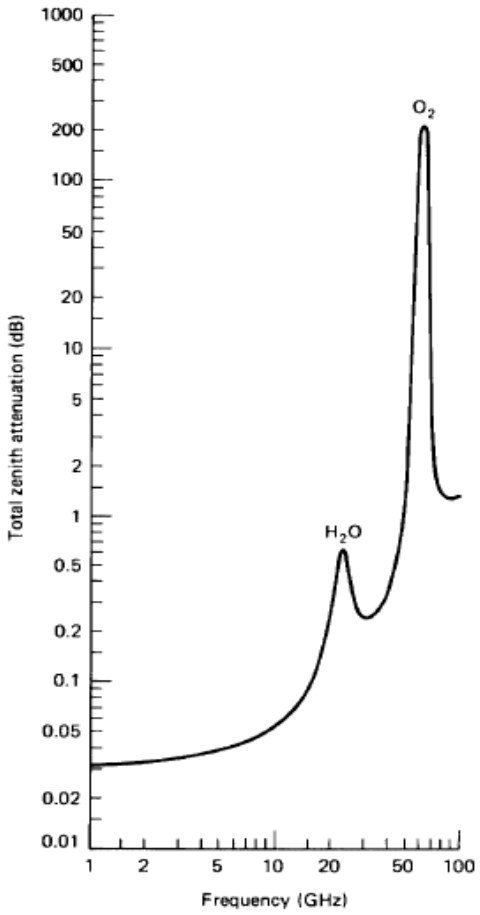
Η τροπόσφαιρα είναι τα χαμηλότερο τμήμα της ατμόσφαιρας και εκτείνεται από την επιφάνεια της θάλασσας περίπου ως το ύψος των 10Km όπου είναι η τροπόπαυση(tropopause) Το ακριβές ύψος αλλάζει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος από 9km στους πόλους ως 16km στον ισημερινό, αλλά και μεταβάλλεται τοπικά. Στην τροπόσφαιρα η θερμοκρασία εξαρτάται από το ύψος ,σε αντίθεση με τη στρατόσφαιρα όπου η θερμοκρασία είναι σταθερή.

Στην αυτήν επηρεάζεται κυρίως το δορυφορικό σήμα προκαλώντας εξασθένηση και παραμόρφωση.

Για μικρές συχνότητες ,κάτω του 1 GHz υπάρχει πολύ μικρή απορρόφηση, ενώ για συχνότητες μεγαλύτερες, και ειδικά πάνω από 10 GHz υπάρχει μεγάλη απορρόφηση κυρίως λόγω του φαινομένου του μοριακού συντονισμού, που προκαλείται κυρίως από δύο στοιχεία ,το οξυγόνο και το εξατμιζόμενο νερό . Παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα σημαντικότερα τροποσφαιρικά φαινόμενα

- Απορρόφηση λόγω αερίων. Με την αύξηση της συχνότητας αυξάνεται και η απορρόφηση από τα διάφορα μόρια αερίων της ατμόσφαιρας, ειδικά από τους υδρατμούς και το οξυγόνο. Το νερό και το οξυγόνο παρουσιάζουν μόνιμη ηλεκτρική και μαγνητική ροπή αντίστοιχα με αποτέλεσμα να επηρεάζουν οποιοδήποτε εφαρμοζόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που συντονίζονται στα στα 22,3 και 60 GHz αντίστοιχα προκαλούν 2 βυθίσματα (pick) στις συχνότητες αυτές. Άλλα αέρια που προκαλούν απορρόφηση σε μικροκυματικές συχνότητες είναι μεταξύ άλλων τα CO, O3,N2O, SO2 τα οποία έχουν πολύ χαμηλή μοριακή πυκνότητα οπότε η συνεισφορά τους στις απώλειες είναι αμελητέα.

Η ατμοσφαιρική απορρόφηση μακριά από τα δύο μέγιστα που προαναφέρθηκαν, έχει σχετικά μικρές τιμές όπως φαίνεται το σχήμα (για πίεση 1atm και θερμοκρασία 20^{o})



Σχήμα 3.5 *απορρόφηση του νερού και μοριακού οξυγόνου συναρτήσει της συχνότητας*

- Οι υδρομετεωρίτες (δηλαδή σταγόνες βροχής ,νιφάδες χιονιού ή χαλάζι)απορροφούν ή σκεδάζουν κύματα με μήκος κύματος συγκρίσιμα με το μέγεθός τους. Και αυτό συμβαίνει για συχνότητες μεγαλύτερες από 10 GHz,όπου ,πχ, οι σταγόνες της βροχής εκλαμβάνονται ως ευμεγέθη εμπόδια ,ή διηλεκτρικές σφαίρες με απώλειες για μεγάλες συχνότητες. Η πλέον κοινή μετρήσιμη παράμετρος της βροχής είναι η έντασή της σε διάφορα σημεία επί του εδάφους.

Η εξασθένηση λόγω βροχής (rain attenuation) μπορεί να θεωρηθεί συνάρτηση της έντασής της, η οποία μετριέται με χιλιοστόμετρα ανά ώρα .Ο μαθηματικός τύπος της εξασθένησης ανά χιλιόμετρο είναι

$\alpha = kR^{\gamma}$ dB/km (3.4)

Όπου

R = ο ρυθμός βροχόπτωσης

γ,k = σταθερές εξαρτώμενες από τη συχνότητα και την πόλωση.

Άρα η συνολική εξασθένηση σε περιβάλλον βροχόπτωσης είναι

$A = \alpha L$ dB (3.5)

Όπου

L = το συνολικό ενεργό μήκος της διαδρομής του σήματος στη βροχή

α = η εξασθένηση ανά χιλιόμετρο

Το L προκύπτει από το πραγματικό μήκος, διαμορφωμένου ώστε να περιλαμβάνει τις επιδράσεις της ανομοιογένειας της βροχής και του ύψους του δέκτη.

Η συνολική διατομή εξασθένησης για σταγόνα ακτίνας α Q(a) υπολογίζεται με τη βοήθεια της θεωρίας Mie για α περίπου ίση του μήκους κύματος λ, ενώ για λ>>α είμαστε στην περιοχή Rayleigh όπου Q ανάλογο της ποσότητας α^6.

- Αποπόλωση λόγω σκέδασης από μη σφαιρικά σωμάτια (σταγόνες βροχής, κρυστάλλους)
- Σπινθηρισμοί. Με την αύξηση της συχνότητας η μεταβολή του δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας προκαλεί μεγάλες αυξομειώσεις στο πλάτος και τη φάση του σήματος.
- Ατμοσφαιρική διάθλαση

Η παραδοχή ότι τα μέτωπα των κυμάτων οδεύουν σε ευθείες γραμμές μπορούν να οδηγήσουν σε σφάλματα, καθώς στην ατμόσφαιρα παρατηρούνται φαινόμενα διάθλασης και αντίστοιχης καμπύλωσης των ακτινών, όπως αναλύθηκε στην περίπτωση της ιονόσφαιρας. Ο ατμοσφαιρικός δείκτης

διάθλασης δεν είναι σταθερός αλλά παρουσιάζει βαθμώσεις, ανάλογα με το ύψος (ατμοσφαιρική πίεση) την υπάρχουσα θερμοκρασία και τη μερική πίεση υδρατμών. Ο δείκτης διάθλασης μειώνεται εκθετικά με το ύψος

Σε αντίθεση με τις απώλειες ελευθέρου χώρου, οι διαλείψεις που υφίσταται το σήμα και οφείλονται στα πιο επιβαρυντικά για την ποιότητα του σήματος ατμοσφαιρικά φαινόμενα, κυρίως τη βροχή, δεν επηρεάζουν σε μόνιμη βάση τη λειτουργία του συστήματος, αλλά σε τυχαίες χρονικές στιγμές και για τυχαία χρονικά διαστήματα. Τα διάφορα μετεωρολογικά φαινόμενα αποτελούν, λοιπόν, τυχαίες διαδικασίες και η απόσβεση που εισάγουν κατά τη διάδοση του σήματος δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί ντετερμινιστικά. Για το λόγο αυτό η επίδρασή τους στην ποιότητα του ραδιοδιαύλου μελετάται στατιστικά και το μέτρο σύγκρισης είναι η πιθανότητα κατά το συνολικό χρόνο λειτουργίας του συστήματος να υπερβεί η εξασθένιση, που αυτά προκαλούν, μία συγκεκριμένη στάθμη.

- Αποτίμηση των επιπτώσεων λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων

Η απόσβεση που οφείλεται στις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις και κατά κύριο λόγο στη βροχή εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους της δορυφορικής ζεύξης, όπως η γωνία ανύψωσης της ζεύξης σε σχέση με τον ορίζοντα και το γεωγραφικό πλάτος της θέσης του επίγειου σταθμού, στοιχεία που καθορίζουν το μήκος της διαδρομής στην ατμόσφαιρα κατά την οποία το σήμα διαδίδεται εν μέσω βροχής, τη συχνότητα λειτουργίας του συστήματος, την πόλωση του σήματος και φυσικά τις καιρικές συνθήκες, οι οποίες επικρατούν στη θέση του επίγειου σταθμού και σχετίζονται με την ένταση και τη χρονική κατανομή των διάφορων καιρικών φαινομένων.

Παρόλο που επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία των συστημάτων, η επίδραση των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων είναι ασθενέστερη σε σχέση με τις απώλειες ελευθέρου χώρου

3.6 Ηλιακή δραστηριότητα

Ο ήλιος παρουσιάζει μια περιοδική δραστηριότητα 11 ετών. Σε αυτό το διάστημα παρατηρείται μεταβολή της ποσότητας των ηλιακών κηλίδων. Οι ηλιακές κηλίδες είναι φαινομενικά σκοτεινές περιοχές της φωτόσφαιρας του ηλίου, οι οποίες λόγω της μαγνητικής δραστηριότητας της επιφάνειας του άστρου (και παρεμπόδισης της κίνησης αέριων μαζών) έχουν μειωμένη θερμοκρασία έως και $2000^{o}C$ σε σχέση με το περιβάλλον τους. Αυτός είναι και ο λόγος που φαίνονται σκοτεινές αυτές οι περιοχές .Οι κηλίδες λοιπόν είναι δείκτης της ηλιακής δραστηριότητας ,και καθώς αυξάνονται έως ένα μέγιστο και μειώνονται έως ένα ελάχιστο μέσα στον ενδεκαετή ηλιακό κύκλο, αντίστοιχα αυξομειώνεται η μαγνητική δραστηριότητα του ηλίου, καθώς και το από αυτή τη δραστηριότητα προϊόν ,ο ηλιακός άνεμος. από τις ηλιακές προεξοχές (solar flares) γίνεται εκτόξευση από τον ήλιο τεράστιων ποσοτήτων πλάσματος,(ιονισμένων σωματιδίων) τα οποία βομβαρδίζουν και τους πλανήτες. Αυτά το σωμάτια δεν φτάνουν στην επιφάνεια της γης καθώς εμποδίζονται από το μαγνητικό πεδίο της γης, και οδηγούνται στους πόλους δημιουργώντας το σέλας. Αλλά οι δορυφόροι που δεν είναι πλήρως υπό την προστασία του μαγνητικού πεδίου της γης, οπότε μπορεί να τους πλήξουν οι ηλιακές καταιγίδες προκαλώντας τους καταστροφές. Επιπτώσεις υπάρχουν γενικά στις ραδιοεπικοινωνίες καθώς και σε γραμμές μεταφοράς ενέργειας.

3.7 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετήθηκαν οι τρόποι διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, καθώς και με ποιον τρόπο εμφανίζονται αυτοί οι τρόποι κατά την μετάδοση ενός σήματος. Συγκεκριμένα, αναλύθηκαν οι περιπτώσεις επίγειας διάδοσης εξετάζοντας το απλό μοντέλο των δύο ακτινών, και ανάγοντάς το σε γενικότερες περιπτώσεις, όπως η ύπαρξη ανώμαλου εδάφους και η παρεμπόδιση ζωνών Fresnel. Στα πλαίσια τις επίγειας διάδοσης συζητήθηκε η περίπτωση της σκίασης και της πολυόδευσης.

Η επίδραση και φαινομένων της ατμόσφαιρας στο σήμα, όπως της βροχής , της αποπόλωσης που υφίσταται το ηλεκτρομαγνητικό μέτωπο. Οι απότομες μεταβολές που μπορεί να υπάρξουν λόγω της παρεμβολής ή μετακίνησης μαζών ιονισμένων αερίων αναλύθηκαν και αυτά διεξοδικά όπως και άλλα φαινόμενα.

Για την κάλυψη του καναλιού διάδοσης από τον δορυφόρο στη γη, ειπώθηκαν και κάποιες λεπτομέρειες περί της ηλιακής επίδρασης και των ηλιακών καταιγίδων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΔΙΑΛΕΙΨΕΩΝ ΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ

4.1 Εισαγωγή

Ως απώλειες μπορούμε να χαρακτηρίσουμε τη συνολική εξασθένηση της ισχύος του σήματος κατά τη διάρκεια της διαδρομής του από τον πομπό στον δέκτη. Η εξασθένηση αυτή μπορεί να οφείλεται σε διασκόρπιση του σήματος λόγω φαινομένων όπως η σφαιρική διάδοση του σήματος ή η σκέδαση ή ακόμα η παρουσία εμποδίων. Επίσης η εξασθένηση μπορεί να οφείλεται σε κατανάλωσή (απορρόφησή) του σήματος ,που μπορεί να οφείλεται στην παρουσία σωματιδίων στην ατμόσφαιρα ή σε φαινόμενα ανάκλασης. Οι απώλειες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ντετερμισνιστικές και σε στατιστικά κυμαινόμενες.

4.2 Απώλειες ελεύθερου χώρου- Free Space Loss (FSL)

Σε αυτήν την ντετερμινιστική περίπτωση για το απευθείας (LOS) σήμα έχουμε εξασθένηση που σχετίζεται μόνο από τις απώλειες ελεύθερου χώρου που εξαρτώνται δηλαδή από τη συχνότητα λειτουργίας και την απόσταση που διανύει το σήμα.

Ο δορυφόρος εκπέμπει το σήμα ισχύος P_t με κατευθυντικό κέρδος G_t . Η πυκνότητα ισχύος στο δέκτη είναι

$$W = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \qquad (4.1)$$

Όπου

W= η πυκνότητα ισχύος
d = η απόσταση πομπού δέκτη

Η ισχύς στον πομπό δίνεται ως P_r=W*A, όπου A η ενεργός επιφάνεια της κεραίας του δέκτη. Ισχύει

$$A = \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \qquad (4.2)$$

Όπου

λ = το μήκος κύματος

Gr = το κέρδος της κεραίας του δέκτη

και άρα ο λόγος λαμβανομένης προς εκπεμπόμενης ισχύος ισούται με

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left[\frac{\lambda}{4\pi d}\right]^2 \qquad (4.3)$$

Όπου

Pt = η ισχύς λήψης

Gt= το κέρδος της κεραίας εκπομπής

Η παραπάνω εξίσωση ονομάζεται εξίσωση του Friis. Αυτή είναι η πρώτη, αρκετά απλοποιημένη όπως θα εξηγήσουμε, περιγραφή της διάδοσης του κύματος. Πρόκειται για μια ντετερμινιστική περιγραφή, δηλαδή αρκεί η γνώση των δύο παραμέτρων, του μήκους κύματος και της απόστασης και έχουμε τον ακριβή λόγο της ισχύος λήψης προς την ισχύ εκπομπής.

Βλέπουμε ότι για τη διάδοση στον ελεύθερο χώρο ισχύει ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου, για την απόσταση, αλλά και για τη συχνότητα. Οπότε η λαμβανόμενη ισχύς μειώνεται κατά 6dB όταν διπλασιάζεται η απόσταση. Επίσης βλέπουμε ότι για μεγάλες συχνότητες έχουμε μεγαλύτερη εξασθένηση, οπότε απαιτείται η χρήση κεραιών μεγάλου κέρδους ή μεγαλύτερης ευαισθησίας για αντιμετώπιση αυτής της εξασθένησης.

Οι απώλειες διαδρομής, (path loss) δίνονται σε dB

$$L \quad (\mathrm{dB}) = 10 \log_{10}(P_{\mathrm{T}}/P_{\mathrm{R}}) \qquad (4.4)$$

Όπου

L = απώλειες διαδρομής σε dB

P_T, P_R = η ισχύς εκπομπής και λήψης αντίστοιχα

Σε αυτό το μοντέλο έχουν γίνει οι εξής παραδοχές:
Ο χώρος μεταξύ των δύο κεραιών εκπομπής και λήψης θεωρείται κενός. Δηλαδή θεωρούμε απουσία αντικειμένων που απορροφούν ή ανακλούν το σήμα. Ακόμα παραλείπουμε την επιρροή της ατμόσφαιρας. Επίσης η γη θεωρείται απείρως μακριά από το σήμα ,ή αντίστοιχα θεωρούμε απουσία ανακλάσεων.

Για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές το μοντέλο του Friis είναι ανεπαρκές για την περιγραφή του καναλιού, και λαμβάνεται μόνο προσεγγιστικά ή για πρώτη εκτίμηση κάποιου προβλήματος. Το μοντέλο χρειάζεται διορθώσεις ώστε να προσεγγίζει καλλίτερα τις πραγματικές συνθήκες.

Τα επίγεια συστήματα λειτουργούν κατά κύριο λόγο σε περιβάλλον μη οπτικής επαφής (non-line-of-sight, NLOS) .Εμπειρικά βλέπουμε ότι μόνο σε διάδοση χωρίς εμπόδια η ισχύς είναι αντιστρόφως ανάλογη του d^2 (ο εκθέτης n=2). Γενικά, η μέση τιμή των απωλειών διαδρομής αυξάνει εκθετικά με την απόσταση, και ο εκθέτης n δείχνει το ρυθμό αύξησης των απωλειών διαδρομής. Το n κυμαίνεται από 3.5 ως 5.

Βάσει εμπειρικών δεδομένων, έχει αναπτυχθεί ένα αρκετά γενικό μοντέλο για διάδοση NLOS και χρησιμοποιείται στην πλειονότητα των περιπτώσεων. Το μοντέλο αυτό περιγράφεται από τη σχέση:

$$L(d) = L_f \cdot \left[\frac{d}{d_0} \right]^n \qquad (4.5)$$

Όπου

n= εκθέτης απωλειών διαδρομής με τυπικές τιμές $3.5 \leq n \leq 5$

d= απόσταση μεταξύ κεραιών εκπομπής και λήψης

d_0= η απόσταση αναφοράς ή απόσταση μέχρι την οποία ισχύει διάδοση LOS

$L(d_0)$= οι απώλειες διαδρομής σε απόσταση d_0 και διάδοση LOS

L(d)= οι απώλειες διαδρομής για συνδυασμένη διάδοση του σήματος και με LOS και με NLOS

Η σχέση (4.5) δείχνει ότι η μέση τιμή των απωλειών διαδρομής L αυξάνει εκθετικά με την απόσταση d. Στη σχέση οι όροι είναι οι εξής:

Η απόσταση αναφοράς d_0 θεωρεί ότι υπάρχει διάδοση στον ελεύθερο χώρο (χωρίς εμπόδια) μέχρι απόσταση d_0 από την κεραία. Είναι ενδιαφέρον να επιλεγεί η απόσταση αναφοράς που είναι κατάλληλη για το εκάστοτε περιβάλλον διάδοσης.

Η απόλυτη μέση τιμή απωλειών διαδρομής (absolute mean path loss) σε dB, ορίζεται ως η τιμή των απωλειών λόγω διαδρομής $L(d_0)$, σε dB, από τον πομπό έως την απόσταση αναφοράς, συν τις πρόσθετες απώλειες διαδρομής, που δίνονται από την σχέση (2.10). Έτσι, η απόλυτη μέση τιμή απωλειών διαδρομής L(d) σε dB, δίνεται από τη σχέση

$$L(d) = L(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10}(\frac{d}{d_0}) \qquad (4.6)$$

Όπου

$L(d)$, $L(d_0)$= οι απώλειες σε μονάδες dB

4.3 Σκίαση

Με την εξίσωση που περιγράψαμε το σήμα όμως ,συμπεραίνουμε ότι για ίδια απόσταση από το δέκτη θα έχουμε την ίδια απώλεια, γεγονός που δεν ισχύει, καθώς η κατανομή των εμποδίων στο περιβάλλον, η αταξία, είναι διαφορετική για δύο θέσεις με ίδια απόσταση από τον πομπό. Δηλαδή η μέση ισχύς σε κάθε θέση έχει έναν παράγοντα τυχαιότητας. Αν τα διαφορετικά μονοπάτια είναι αρκετά μπορεί (με χρήση του κεντρικού οριακού θεωρήματος Central Limit Theorem) να γίνει χρήση της τυχαίας Γκαουσιανής μεταβλητής για περιγραφή του Path loss.Αυτό ονομάζεται λογαριθμοκανονική κατανομή(log-normal fading) καθώς ακολουθεί κανονική κατανομή σε dB.

Η κανονική λογαριθμική κατανομή περιγράφει τις τυχαίες επιδράσεις της σκίασης που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια μεγάλου αριθμού μετρήσεων σε θέσεις που έχουν μεν την ίδια απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, αλλά έχουν διαφορετικούς βαθμούς αταξίας στη διαδρομή διάδοσης. Με άλλα λόγια, η λογαριθμική-κανονική σκίαση συνεπάγεται ότι οι μετρούμενες στάθμες σήματος, για συγκεκριμένη απόσταση πομπού-δέκτη, έχουν κατανομή Gauss

γύρω από τη μέση τιμή στάθμης που υπολογίζεται συναρτήσει της απόστασης ντετερμινιστικά.

Έτσι έχουμε τη λογαριθμοκανονική κατανομή γύρω από τη μέση τιμή των απωλειών που υπολογίζεται με βάση την απόσταση, που βελτιώνει την προηγούμενη σχέση

$$L(d) = L(d) + \mathrm{X}_{\sigma} = L(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10}(\frac{d}{d_0}) + \mathrm{X}_{\sigma} \qquad (4.7)$$

Όπου

X_σ =η τυχαία Γκαουσιανή μεταβλητή (σε dB) με μηδενική μέση τιμή και απόκλιση σ

L(d)=οι απώλειες

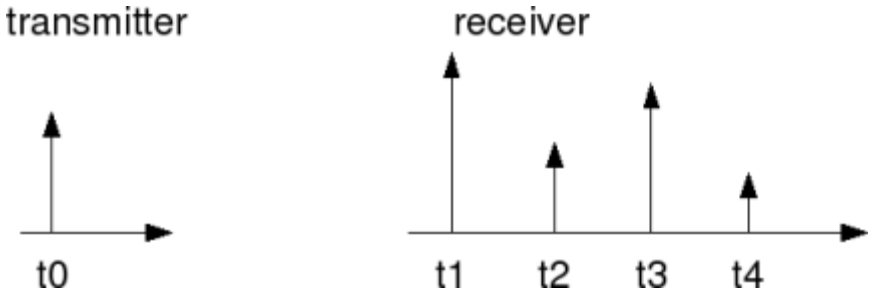
4.4 Κανάλια διαλείψεων

Η ποιότητα του καναλιού διάδοσης καθορίζει και την ποιότητα της επικοινωνίες. Το κανάλι ,ειδικά στις επίγειες επικοινωνίες, περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό αντικειμένων που εμποδίζουν τη διάδοση του σήματος, καθώς το σήμα υφίσταται ανακλάσεις ,σκέδαση από κτήρια ,δέντρα και απορρόφηση από την ίδια την ατμόσφαιρα. Αυτά τα φαινόμενα προκαλούν τις διαλείψεις(fading) που ως αποτέλεσμα έχουν διακυμάνσεις στο εύρος και στη φάση του σήματος, αλλά και στη γωνία άφιξης του σήματος .

Επίσης σε μικρές αποστάσεις έχουμε αναπόφευκτα διακυμάνσεις λόγω δύο διαδικασιών, το multipath και του φαινομένου Doppler

4.4.1 Φαινόμενο πολυόδευσης (multipath)

Στο επόμενο σχήμα επεξηγείται το πρόβλημα των πολλαπλών διαδρομών.

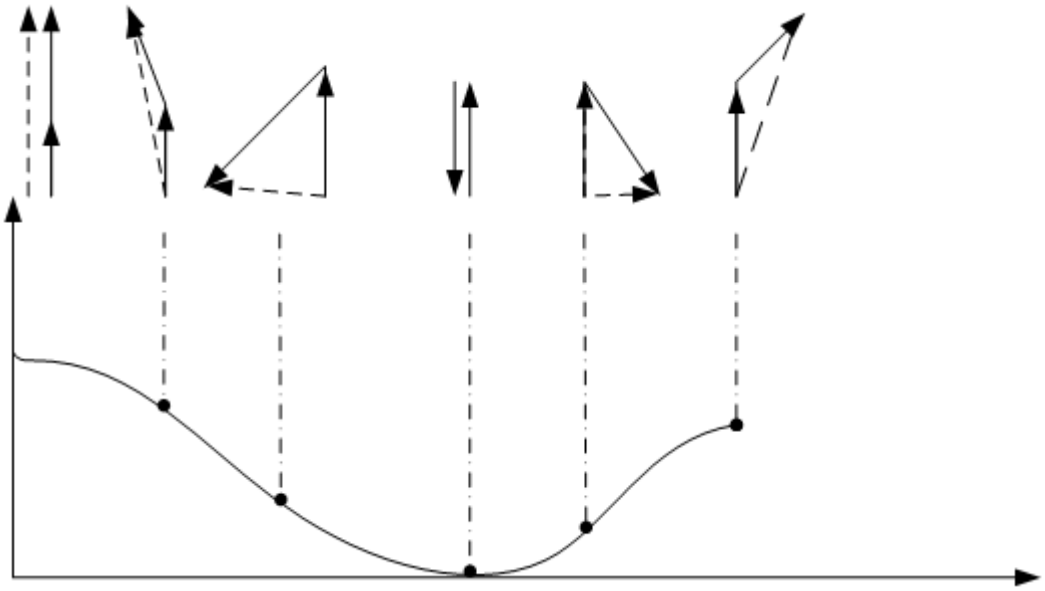


Σχήμα 4.1 *άφιξη πολλών αντιγράφων του σήματος*

Βλέπουμε ότι στέλνοντας έναν στενό παλμό ο δέκτης θα λάβει άνω του ενός αντιγράφου του σήματος, (υποθέτοντας ότι η πρώτη συνιστώσα είναι το απευθείας σήμα) γεγονός που οφείλεται στους παράγοντες διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που αναλύθηκαν παραπάνω. Καθώς ο δέκτης κινείται σε μια περιοχή, οι ανακλάσεις (reflections), οι περιθλάσεις (diffractions) και οι σκεδάσεις (scatterings) που λαμβάνουν χώρα έχουν ως αποτέλεσμα την άφιξη πολλών επίπεδων κυμάτων στο κινητό τερματικό, από πολλές κατευθύνσεις και με διαφορετικές καθυστερήσεις. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διάδοση με διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών (multipath fading). Τα πολλαπλά επίπεδα κύματα συνδυάζονται στην κεραία του δέκτη για να παράγουν ένα σύνθετο λαμβανόμενο σήμα.

Τελικά, το λαμβανόμενο σήμα αποτελείται από το άθροισμα των αφιχθέντων σημάτων, τα οποία πέρα από διαφορετικό χρόνο άφιξης, έχουν και διαφορετική ισχύ και μετατόπιση φάσης, και μπορεί να δρουν είτε εποικοδομητικά είτε καταστρεπτικά στον δέκτη, πράγμα που καθορίζεται από τη σχετική φάση μεταξύ τους.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η συνεισφορά δύο αφιχθέντων σημάτων ίδιας έντασης αλλά με διαφορετική φάση στο τελικό σήμα του δέκτη, που φαίνεται στον κατακόρυφο άξονα



Σχήμα 4.2 *συνισταμένη δύο αντιγράφων του σήματος για διαφορετική διαφορά φάσης*

Αν οι δύο ημιτονοειδείς συνιστώσες ίδιας ισχύος φτάσουν στο δέκτη με διαφορά φάσης 180^{o} ,όπως φαίνεται στην τρίτη περίπτωση, θα δράσουν καταστρεπτικά, μηδενίζοντας το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης ενώ θα υπάρξει μεγιστοποίηση της κοινής τους συνεισφοράς αν φτάσουν συμφασικά, όπως φαίνεται στην πρώτη περίπτωση.

Το άλλο πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι το κανάλι δεν μένει σταθερό. Αν ο πομπός της προηγούμενης εικόνας στείλει πάλι το ίδιο σήμα, ο δέκτης με εξαίρεση το απευθείας σήμα, θα δεχτεί έναν αριθμό σημάτων διαφορετικό από αυτόν της προηγούμενης φοράς σε αριθμό ,σε χρόνο άφιξης, σε ισχύ και σε μετατόπιση φάσης. Το συμπέρασμα είναι ότι το κανάλι μεταβάλλεται χρονικά.

Οι διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών περιγράφονται από τις διαλείψεις περιβάλλουσας (κατανομή πλάτους μη-επιλεκτική ως προς τη συχνότητα), την εξάπλωση Doppler (χρονικά μεταβαλλόμενος θόρυβος τυχαίας φάσης) και την εξάπλωση της χρονοκαθυστέρησης (μεταβλητή απόσταση διάδοσης των ανακλώμενων σημάτων προκαλεί χρονικές μεταβολές στα ανακλώμενα σήματα).

Το σήμα που φθάνει στην είσοδο του δέκτη υφίσταται κατά τη διαδρομή του στο μέσο, μεταβολές εύρους και φάσης συναρτήσει του χρόνου κατά τυχαίο τρόπο. Οι μεταβολές αυτές και ειδικότερα εκείνες του πλάτους, αποτελούν τις λεγόμενες διαλείψεις (fading) και εκφράζονται σε dB ως προς τη θεωρητική στάθμη του σήματος στον ελεύθερο χώρο ή ως προς την πραγματική μεσαία στάθμη του σήματος, που διαφέρει από την προηγούμενη κατά μερικά dB.

Οι διαλείψεις αποτελούν στιγμιαία εκτροπή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας προς άλλες κατευθύνσεις ή οφείλονται στη συμβολή κυμάτων που φθάνουν στο δέκτη δια διαφορετικών δρόμων(πολλαπλές οδεύσεις) ή στη συμβολή μεταξύ του κατευθείαν και του ανακλώμενου κύματος. Οφείλονται δε σε μεταβολές των ατμοσφαιρικών συνθηκών κατά μήκος της ζεύξης. Οι διαλείψεις αυξάνουν συνήθως αυξανόμενης της συχνότητας ή αυξανόμενης της αποστάσεως της ζεύξεως.

Μόνο στην ιδεατή περίπτωση ομοιόμορφης ατμόσφαιρας η μετάδοση γίνεται με το κατευθείαν κύμα, αλλιώς το κύμα υφίσταται καμπύλωση προς τα άνω ή προς τα κάτω ανάλογα με τις επικρατούσες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η καμπύλωση αυτή μπορεί μερικές φορές να οδηγήσει στον μετασχηματισμό μιας ζεύξεως οπτικής επαφής σε μια ζεύξη άνευ ορατότητας Ο τύπος αυτός των διαλείψεων δύναται να διαρκέσει επί αρκετές ώρες.

Το φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών του κύματος, το οποίο προκαλεί διαλείψεις, οφείλεται στις ανομοιογένειες του δείκτη διαθλάσεως ,κυρίως κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, αλλά και σε μικρότερο βαθμό κατά την οριζόντια διεύθυνση. Δεδομένου ότι τα μήκη των διαδρομών είναι διαφορετικά ,το σήμα στο δέκτη είναι το άθροισμα συνιστωσών που έχουν συγκρίσιμα πλάτη ,αλλά φάσεις τυχαίες. Επιπλέον τα πλάτη και οι φάσεις των συνιστωσών αυτών μεταβάλλονται συνεχώς λόγω των αντιστοίχων μεταβολών της ατμόσφαιρας.

- Ας δούμε τις επιδράσεις του καναλιού σε ένα σήμα της παρακάτω μορφής

$$s(t) = \mathrm{Re}\left[u(t)e^{j2\pi f_c t}\right] = u(t)\cos(\omega_c t) \qquad (4.8)$$

Όπου

s(t)=το σήμα προς αποστολή

ω = η γωνιακή ταχύτητα

Υποθέτουμε ότι υπάρχουν διάφορες διαδρομές διάδοσης. Για κάθε κανάλι υπάρχει μία καθυστέρηση διάδοσης και ένας συντελεστής εξασθένισης. Και οι καθυστερήσεις διάδοσης και οι συντελεστές εξασθένισης είναι χρονικά μεταβαλλόμενοι ως αποτέλεσμα των αλλαγών στη δομή του μέσου. Το κανάλι περιγράφεται με τη χρονικά μεταβαλλόμενη απόκριση

$$c(\tau;t) = \sum_n a_n(t)e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)}\delta[\tau - \tau_n(t)] \qquad (4.9)$$

Όπου

α_n =οι συντελεστές εξασθένησης

τ_n =η καθυστέρηση διάδοσης

Αν θεωρήσουμε ότι το λαμβανόμενο σήμα αποτελείται από μια σειρά multipath συνιστώσες τότε η απόκριση παλμού γίνεται

$$c(\tau;t) = a(\tau;t)e^{-j2\pi f_c \tau} \qquad (4.10)$$

Όπου

$c(\tau;t)$ =η απόκριση του καναλιού τη χρονική στιγμή t, αν εκπέμψουμε ένα παλμό τη χρονική στιγμή t-τ.

Έτσι η παραπάνω σχέση αποτελεί τον κατάλληλο προσδιορισμό της ισοδύναμης low pass απόκρισης του παλμού όταν το κανάλι χαρακτηρίζεται από

συνεχές multipath ενώ η προηγούμενη περιγράφει ένα κανάλι με συνιστώσες διακριτού multipath.

Ας θεωρήσουμε τώρα την εκπομπή ενός μη διαμορφωμένου φέροντος με συχνότητα f_c. Τότε στο εκπεμπόμενο σήμα το u(t)=1 για κάθε t και συνεπώς το λαμβανόμενο σήμα για τη περίπτωση του διακριτού multipath είναι

$$r(t) = \sum_n a_n(t) e^{-j2\pi f_c t_n(t)} = \sum_n a_n(t) e^{-jq_n(t)} \qquad (4.11)$$

Όπου

$\theta_n(t)=2\pi f_c \tau_n(t)$

α_n =οι συντελεστές εξασθένησης

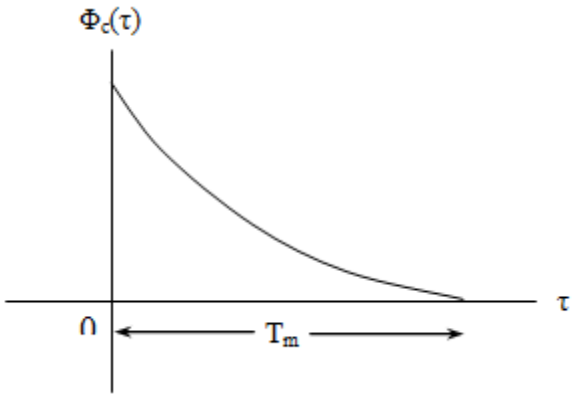
Έτσι το λαμβανόμενο σήμα αποτελείται από το άθροισμα των χρονικά μεταβαλλόμενων ανυσμάτων (phasors) με πλάτη $\alpha_n(t)$ και φάσεις $\theta_n(t)$. Σημειώνουμε ότι για να αλλάξει σημαντικά το $\alpha_n(t)$, ώστε να προκαλέσει σημαντική αλλαγή στο σήμα, απαιτούνται μεγάλες δυναμικές αλλαγές στο μέσο. Από την άλλη πλευρά η $\theta_n(t)$ θα αλλάξει κατά 2π ακτίνια όταν το α_n αλλάζει κατά $1/f_c$. Αλλά το $1/f_c$ είναι ένας μικρός αριθμός κι έτσι η θ_n μπορεί να αλλάξει κατά 2π ακτίνια με σχετικά μικρές κινήσεις του μέσου. Επίσης αναμένουμε ότι οι καθυστερήσεις $\tau_n(t)$, που σχετίζονται με τις διαφορετικές διαφορές του σήματος, θα αλλάξουν με διαφορετικούς ρυθμούς και με απροσδιόριστο (τυχαίο) τρόπο. Αυτό συνεπάγεται ότι το λαμβανόμενο σήμα r(t) στην τελευταία σχέση μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια τυχαία διαδικασία. Γενικά όταν υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός από διαδρομές τότε μπορεί να εφαρμοστεί το θεώρημα κεντρικού ορίου. Αυτό σημαίνει ότι η χρονικά μεταβαλλόμενη απόκριση του παλμού $c(\tau;t)$, είναι μια τυχαία μιγαδική Gaussian διαδικασία στη μεταβλητή t.

Το μοντέλο της multipath διάδοσης για το κανάλι το οποίο περιλαμβάνεται στο λαμβανόμενο σήμα r(t) και καταλήγει σε fading του σήματος. Το φαινόμενο του fading είναι πρωταρχικά ένα αποτέλεσμα των χρονικών μεταβολών των φάσεων. Δηλαδή, οι χρονικά μεταβαλλόμενες τυχαίες φάσεις που σχετίζονται με τα

ανύσματα λήψης, μερικές φορές καταλήγουν σε ανύσματα που προστίθενται με τρόπο υποβιβαστικό. Όταν συμβαίνει κάτι τέτοιο, το λαμβανόμενο σήμα r(t) που προκύπτει έχει μικρό πλάτος ή και πρακτικά μηδέν. Σε άλλες περιπτώσεις τα ανύσματα προστίθενται με τρόπο ενισχυτικό κι έτσι το λαμβανόμενο σήμα είναι μεγάλο. Έτσι οι μεταβολές του πλάτους στο λαμβανόμενο σήμα αποτελούν το fading του σήματος και οφείλονται στα χρονικά μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά του multipath του καναλιού.

Όταν η απόκριση του παλμού $c(\tau;t)$ όπου τ είναι η καθυστέρηση, μοντελοποιείται σαν μία μιγαδική Gaussian διαδικασία με μηδενική μέση τιμή, η περιβάλλουσα $|c(\tau;t)|$ σε κάθε χρονική στιγμή ακολουθεί κατανομή Rayleigh. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε ένα κανάλι με Rayleigh fading. Στην περίπτωση που υπάρχουν ακίνητοι σκεδαστές ή ανακλαστές του σήματος στο κανάλι, δηλαδή Line of Site διαδρομή, εκτός από τους τυχαία κινούμενους σκεδαστές, η $c(\tau;t)$ δεν μπορεί πλέον να μοντελοποιηθεί έχοντας μηδενική μέση τιμή. Σε αυτή τη περίπτωση η περιβάλλουσα $|c(\tau;t)|$ ακολουθεί κατανομή Rice και έχουμε ένα κανάλι με Rice fading. Κατά τη μελέτη των τύπων του fading για τα κανάλια , χρησιμοποιούμε μόνο τη στατιστική της περιβάλλουσας που ακολουθεί κατανομή Rayleigh . Αυτό το μοντέλο προσεγγίζει αρκετά τις πραγματικές συνθήκες μετάδοσης σε κινητά κανάλια επικοινωνίας. Η περιβάλλουσα του fading που ακολουθεί κατανομή Rayleigh εμφανίζεται συχνά στα HF και στα τροποσκεδαστικά κανάλια με αποτέλεσμα αυτό το μοντέλο καναλιού να είναι ευρύτατα αποδεκτό.

Για να μετρήσουμε πρακτικά τη συνάρτηση αυτοσυσχετισμού, θεωρούμε την ισοδύναμή της η οποία χαρακτηρίζεται σα μια μιγαδική τυχαία Gaussian διαδικασία με μηδενική μέση τιμή στη μεταβλητή t, $\phi_c(t,\Delta t)$. Τότε, η συνάρτηση $\phi_c(t,\Delta t)$ μετριέται εκπέμποντας πολύ στενούς παλμούς ή , ισοδύναμα, ένα σήμα ευρείας ζώνης και συσχετίζοντας αμοιβαία το λαμβανόμενο σήμα σε μια καθυστερημένη μορφή του. Τυπικά, η μετρούμενη συνάρτηση $\phi_c(\tau)$ έχει τη μορφή που απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.3 *η συνάρτηση αυτοσυσχέτησης συναρτήσει του χρόνου*

Το εύρος τιμών του τ, όταν η $\phi_c(\tau)$ είναι μη μηδενική, λέγεται multipath εύρος του καναλιού και συμβολίζεται T_m.

4.4.2 Κατηγοριοποίηση διαλείψεων

Το fading χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, το (small fading) και (Large fading). Ακολουθεί μία ποιοτική περιγραφή της μεγάλης και μικρής εξασθένησης, ονόματα τα οποία αναφέρονται στο ηλεκτρικό μήκος.

-Large scale fading

Η αλλαγή μεγάλης κλίμακας στη μέση τιμή του σήματος ονομάζεται (large-scale fading) ουσιαστικά αντιπροσωπεύει από τη μία τη μείωση της μέση ισχύος ενός σήματος καθώς διασχίζει μια μεγάλη απόσταση, και από την άλλη αλλαγές γύρω από τη μέση τιμή. Οι επιδράσεις αυτές μεγάλες κλίμακας καθορίζουν τη στάθμη ισχύος κατά μέσο όρο σε μια περιοχή δεκάδων ή εκατοντάδων μέτρων και για το λόγο αυτό ονομάζεται “μέση ισχύς περιοχής”. Τα φαινόμενα σκίασης εισάγουν επιπρόσθετες διακυμάνσεις έτσι ώστε η λαμβανόμενη τοπική μέση ισχύς να κυμαίνεται γύρω από τη μέση ισχύ της περιοχής. “Τοπική μέση ισχύς” αποκαλείται η στάθμη σήματος στρογγυλεμένη σε μερικές δεκάδες μήκη κύματος (τυπικά 40 μήκη κύματος).Έτσι εξασφαλίζεται ότι οι ραγδαίες διακυμάνσεις της

λαμβανόμενης στιγμιαίας ισχύος. λόγω της επίδρασης πολυοδικής διάδοσης, σε μεγάλο βαθμό εκμηδενίζεται.

Η περιγραφή του γίνεται με path loss μέσης τιμής και μια ταλάντευση που ακολουθεί την lognormal κατανομή γύρω από τη μέση τιμή.

Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας αποδίδονται σε μετακινήσεις αρκετά μεγάλες ώστε να αλλάζει πολύ η "διαδρομή" (το κανάλι) του σήματος προς τον δέκτη ή προκαλούνται από σκιάσεις, καθώς οι μεγάλες αυτές αλλαγές στη μέση τιμή του σήματος δημιουργούνται από κίνηση του δέκτη πίσω από μεγάλα κτήρια ή λόφους μπαίνοντας δηλαδή στη σκιά του ηλεκτρομαγνητικού σήματος . Εξού και η εναλλακτική ονομασία του Large scale fading ως σκίαση (shadowing)

Οι διαλείψεις επηρεάζουν αποστάσεις αρκετά μεγαλύτερες από το μήκος κύματος λ.. Σε χρονική απόσταση μπορούμε να υποθέσουμε ότι έχουμε σταθερό σήμα, δηλαδή στάθμη σήματος που μένει ανεπηρέαστο από διακυμάνσεις για μία διάρκεια της τάξης των λεπτών.

-Small scale fading

Το small scale fading (διαλείψεις μικρής κλίμακας) αναφέρεται στις πολύ έντονες αλλαγές που υφίσταται το πλάτος και η φάση του σήματος.
Αποδίδεται στις πολύ μικρές αλλαγές της απόστασης πομπού δέκτη, λόγω μετακινήσεων, και άρα των μονοπατιών πολυόδευσης, της τάξεως ενός μήκους κύματος λ ή και λιγότερο. Το κανάλι θεωρείται σταθερό για μια περίοδο (coherence time) που είναι της τάξης των msec.

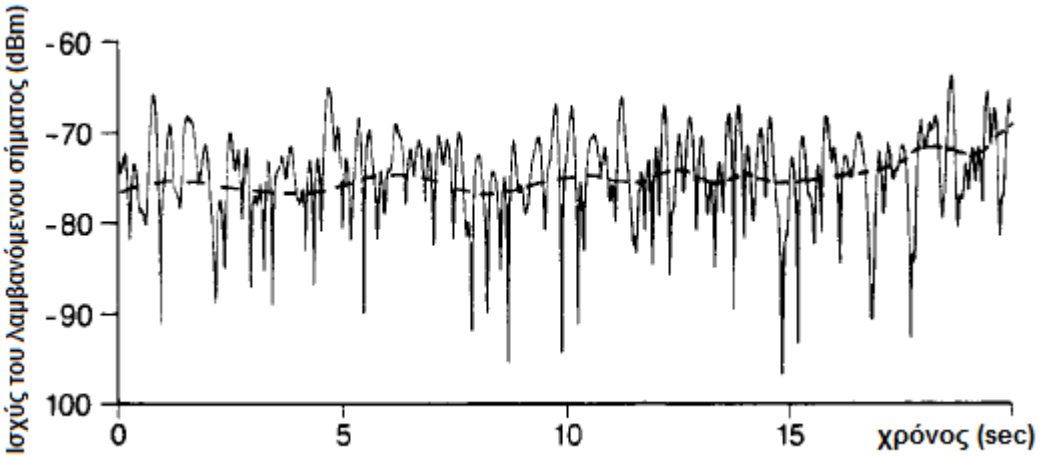
Ορισμένες φορές αναφέρεται και μια τρίτη κατηγορία fading , που δε θα εξεταστεί εδώ, το medium scale attenuation, όπου το coherence time είναι της τάξης των sec,και αποκλίσεις ισχύος συμβαίνουν όταν η κεραία μετατοπίζεται μερικά μέτρα.

Όπως ειπώθηκε πολυόδευση είναι το άθροισμα πολλών ανακλώμενων ακτίνων με διαφορετικές καθυστερήσεις (φάσεις) και πλάτη. Μικρές μετακινήσεις του δέκτη επιφέρουν κάποια αλλαγή του αθροίσματος αυτού ,καθώς

παραδείγματος χάριν κάποιο εμπόδιο ανακόπτει μία ανακλώμενη ακτίνα. Το κανάλι είναι στην πραγματικότητα χρονικά μεταβαλλόμενο καθώς η κίνηση του πομπού ή του δέκτη προκαλεί αλλαγές των συνθηκών μετάδοσης .Ο μεγάλος ρυθμός μεταβολής αυτών των συνθηκών ευθύνεται για την ταχύτητα αλλαγής των εξασθενήσεων, δηλαδή το φαινομενικά χαοτικό παιχνίδισμα γύρω από τη μέση τιμή.

Αυτό συχνά ονομάζεται Rayleigh fading καθώς αν οι διάφορες διαδρομές multipath είναι πολλές, και δεν υπάρχει line of sight,τότε το ληφθέν σήμα περιγράφεται με τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) Rayleigh.Αν όμως υπάρχει κυρίαρχη συνιστώσα, όπως όταν υπάρχει οπτική επαφή, τότε το small fading περιγράφεται με τη Rician κατανομή. Η φάση του σήματος ακολουθεί την ομοιόμορφη κατανομή.

Το σχήμα 4.4 κάνει σαφέστερη την ποιοτική διάκριση μεταξύ small και Large fading. Βλέπουμε τις διακυμάνσεις που εξετάζονται ως small fading γύρω από τη μέση τιμή της ισχύος του σήματος. Οι διακυμάνσεις αυτές είναι μικρότερες του χρόνου συσχέτισης του καναλιού, δηλαδή η κάθε κορυφή ή βύθισμα της εικόνας αντιπροσωπεύει μία επίδραση, θετική ή αρνητική, η οποία όμως δρά σε ένα μόνο σύμβολο. Η επιρροή της χάνεται την επόμενη στιγμή. Η διακεκομμένη γραμμή, λαμβάνεται μεν ως σταθερή για απόσταση μικρότερη ή ίση ενός μήκους κύματος λ, αλλά με τη σειρά της υπόκειται σε πιο αργές μεταβολές, που εξετάζονται από το Large Fading.



Σχήμα 4.4 *ποιοτική διάκριση σε μικρές και μεγάλες διαλείψεις*

4.4.3 *flat /frequency selective fading*

Το small fading μπορεί να κατηγοριοποιηθεί βάσει των φασματικών ιδιοτήτων του καναλιού και τη διασπορά καθυστέρησης(delay spread)σε (flat fading) και (Frequency selective)

Αυτό είναι συχνοτικό κριτήριο και έχει χρονικό αποτέλεσμα

Ας δούμε την περίπτωση όπου το σήμα είναι στενής ζώνης. Έστω ότι αποτελείται από δύο κοντινές μεταξύ τους συχνότητες . Τότε τα διάφορα μονοπάτια διάδοσης μέσα στο περιβάλλον πολυόδευσης επιφέρουν το ίδιο αποτέλεσμα, τις ίδιες απώλειες πολυόδευσης, στις δύο συνιστώσες λόγω του σχεδόν όμοιου μήκους κύματος. Γενικότερα, αν το εύρος ζώνης του σήματος είναι μικρό, όλες οι συχνότητες που συνιστούν το σήμα έχουν παρόμοια συμπεριφορά στο κανάλι. Αυτές οι διαλείψεις ονομάζονται επίπεδες (flat fading)

Η απόκριση του καναλιού σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να αναπαρασταθεί σαν ένας παλμός. Ωστόσο αν ο δέκτης κινείται τότε η απόκριση του καναλιού μπορεί να θεωρηθεί σαν συνάρτηση παλμών με μεταβλητό στο χρόνο κέρδος .

Οι επίπεδες διαλείψεις εμφανίζονται επίσης όταν η ενεργός τιμή της διασποράς καθυστέρησης (rms delay spread) είναι πολύ μικρότερη συγκρινόμενη με τη χρονική διάρκεια του διαμορφωμένου συμβόλου. Σε αυτήν την περίπτωση θεωρούμε ότι όλες οι συνιστώσες που οφείλονται στις διαλείψεις πολλαπλών δρόμων φθάνουν την ίδια χρονική στιγμή στην αρχή του συμβόλου, διατηρώντας το φασματικό περιεχόμενο του σήματος.

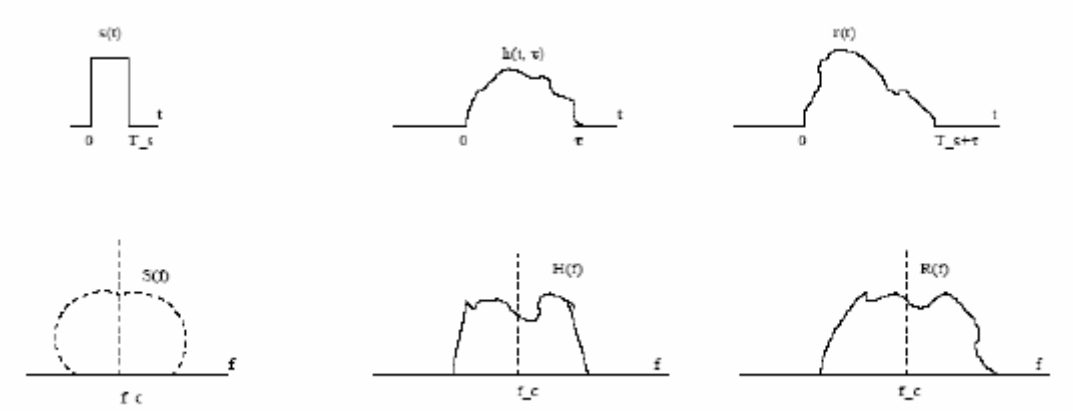
Όσο όμως η απόσταση ανάμεσα στις τιμές των συχνοτήτων που απαρτίζουν το σήμα μεγαλώνει, τόσο η συμπεριφορά της κάθε συνιστώσας γίνεται ασυσχέτιστη με των άλλων, καθώς η αλλαγή φάσης στα διάφορα μονοπάτια είναι διαφορετική για κάθε συχνότητα. Το πόσο διαφορετική εξαρτάται από τη διασπορά της χρονική

καθυστέρησης, καθώς η μετατόπιση φάσης αυξάνεται με την αύξηση του μήκους της διαδρομής. Οι διαφορετικές διαδρομές, προκαλούν διασπορά του σήματος στο χρόνο Για μεγάλη διασπορά καθυστέρησης (delay spread) οι φάσεις των αφιχθέντων συνιστωσών μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ακόμα και για μικρή διαφορά συχνότητας.

Έτσι φτάνουμε στην άλλη κατηγορία διαλείψεων η οποία ονομάζονται επιλεκτικές στη συχνότητα, (frequency selective fading) και η οποία αναπαριστά το εξής φαινόμενο: Σήματα τα οποία καταλαμβάνουν εύρος ζώνης μεγαλύτερο από αυτό μέσω του οποίου οι φασματικές συνιστώσες συμπεριφέρονται με παρόμοιο τρόπο,(σταθερό κέρδος και γραμμική φάση) τότε το εκπεμπόμενο σήμα παραμορφώνονται καθώς οι διάφορες φασματικές συνιστώσες φτάνουν στον δέκτη με διαφορετικές φάσεις και πλάτη από αυτά που είχαν στον πομπό. Στα FM συστήματα το frequency selective fading ορίζει το άνω όριο της απόκλισης συχνότητας για δεδομένη παραμόρφωση.

Το εύρος ζώνης, στο οποίο οι συχνότητες επηρεάζονται με παρόμοιο τρόπο (είναι δηλαδή συσχετισμένες) ονομάζεται συσχετισμένο εύρος ζώνης (coherence, correlation Bandwidth)

Στο σχήμα 4.5 είναι ένα παράδειγμα απόκρισης του καναλιού σε frequency selective fading (μεσαία στήλη), το οποίο δεν είναι επίπεδο (παλμός) όπως στην περίπτωση των επίπεδων διαλείψεων, με αποτέλεσμα το εκπεμπόμενο σήμα (πρώτη στήλη) να φτάνει στον δέκτη παραμορφωμένο σε κάποιες συχνότητες. (τρίτη στήλη)



Σχήμα 4.5 *η εμφάνιση των επιλεκτικών στη συχνότητα διαλείψεων*

Τελικό συμπέρασμα είναι, ότι αν το coherence bandwidth είναι μεγαλύτερο από το φάσμα του σήματος, έχουμε επίπεδο (flat) κανάλι αλλιώς έχουμε κανάλι στενής ζώνης, (frequency selective channel) .Στο flat fading το πλάτος του ληφθέντος σήματος μεταβάλλεται, αλλά το φάσμα του σήματος μένει σταθερό.

4.4.4 *Fast /slow fading*

Η άλλη κατηγοριοποίηση γίνεται βάσει του ρυθμού αλλαγής, δηλαδή τη σχετική κίνηση στο κανάλι και τη διασπορά Ντόπλερ (Doppler spread) σε γρήγορο και αργό fading. Fast fading slow fading. Αυτό είναι χρονικό κριτήριο και έχει συχνοτικό αποτέλεσμα

Το κριτήριο που χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό είναι ο coherence time Tc (χρόνος συσχέτισης) ο οποίος μετράει την χρονική περίοδο κατά την οποία η εξασθένηση είναι συσχετιζόμενη με όλες τις χρονικές στιγμές., ή αντίστοιχα η χρονική περίοδος πέρα από την οποία η συνάρτηση συσχέτισης δύο διαφορετικών αποκρίσεων (από δύο δείγματα στην ίδια συχνότητα αλλά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές) έχουν τιμή μηδενική ή κάτω από ένα ορισμένο όριο. Με άλλα λόγια είναι ο ελάχιστος χρόνος που χρειάζεται ώστε η αλλαγή στο κανάλι να είναι ασυσχέτιστη από την προηγούμενη τιμή του σήματος.

Αν η διάρκεια συμβόλου είναι μικρότερη του coherence time, τότε λέμε ότι έχουμε αργό slow fading, στην αντίθετη περίπτωση, στην περίπτωση δηλαδή που ο χρόνος συσχέτισης Tc είναι μικρότερος από τη διάρκεια ενός συμβόλου , έχουμε γρήγορο fading.

Slow fading ονομάζεται ο μέσος όρος του λαμβανόμενου ραδιοσήματος που εμφανίζει διαλείψεις, καθώς και κάθε τιμή του που αντιστοιχεί στη μέση τιμή της έντασης του πεδίου σε κάθε σημείο, δηλαδή τοπικός μέσος όρος.

Το ταχύ (fast) fading χρησιμοποιείται για την περιγραφή της απότομης διακύμανσης του πλάτους ενός ραδιοσήματος, σε βραχύ χρονικό διάστημα ή σε βραχεία διανυόμενη απόσταση. Λέμε ότι οφείλεται κυρίως στις ανακλάσεις πολλαπλών διαδρομών ενός μεταδιδόμενου κύματος από τοπικούς σκεδαστές, όπως τοίχοι, έπιπλα, αν αναφερόμαστε σε εσωτερικούς χώρους και σπίτια, δέντρα και γενικότερα φυσικά εμπόδια αν αναφερόμαστε σε εξωτερικούς χώρους. Τα τρία κυριότερα φαινόμενα που προέρχονται από τις πολλαπλές διαδρομές είναι :

- Απότομες αλλαγές στην ένταση του σήματος, όταν διανύονται μικρές αποστάσεις ή μεσολαβούν μικρά χρονικά διαστήματα.
- Τυχαία διαμόρφωση συχνότητας, που οφείλεται στο γεγονός ότι η ολίσθηση Doppler, για τα διάφορα σήματα πολλαπλών διαδρομών, είναι διαφορετική.
- Εξάπλωση χρονοκαθυστέρησης (φαινόμενα ηχούς), που προκαλείται από διαφορετική καθυστέρηση σε κάθε διαδρομή που ακολουθείται από το σήμα.

Σε περιοχές στις οποίες παρεμβάλλονται πολλά εμπόδια ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη, τα εισερχόμενα στον δέκτη ραδιοκύματα καταφθάνουν από διαφορετικές κατευθύνσεις με διαφορετικές καθυστερήσεις διάδοσης. Το

σήμα που λαμβάνεται από το κινητό τερματικό σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου, μπορεί να αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό επιπέδων κυμάτων με τυχαία κατανεμημένα πλάτη, φάσεις και γωνίες άφιξης. Αυτές οι πολλαπλές συνιστώσες συνδυάζονται ανυσματικά στην κεραία του δέκτη και μπορεί να συντελούν στην εμφάνιση παραμορφώσεων ή διαλείψεων στο λαμβανόμενο σήμα. Ακόμη και αν ο δέκτης είναι ακίνητος , το λαμβανόμενο σήμα μπορεί να εμφανίζει διαλείψεις λόγω της κίνησης του περιβάλλοντος.

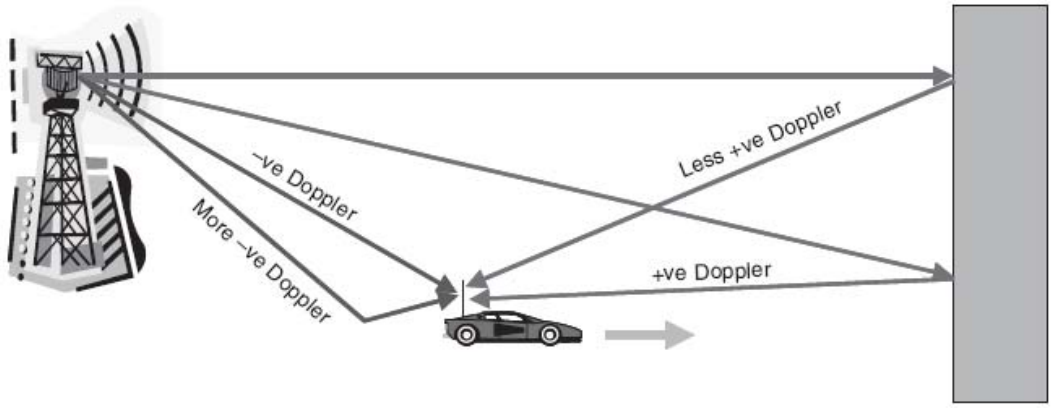
Αν τα γύρω αντικείμενα είναι ακίνητα και κινείται μόνο το κινητό τερματικό, τότε οι διαλείψεις είναι καθαρά χωρικό φαινόμενο. Οι μεταβολές του σήματος στον χώρο μπορεί να θεωρηθούν από τον δέκτη ως χρονικές μεταβολές, καθώς αυτό κινείται σε περιβάλλον που υπάρχουν πολλαπλές διαδρομές. Λόγω των ευνοϊκών ή μη ευνοϊκών επιδράσεων των κυμάτων που προέρχονται από πολλαπλές διαδρομές και αθροίζονται διανυσματικά στα διάφορα σημεία του χώρου, μπορεί ένα κινητό τερματικό που κινείται με μεγάλη ταχύτητα να συναντήσει πολλές διαλείψεις σε μικρό χρονικό διάστημα. Σε σοβαρότερη περίπτωση, μπορεί ένα κινητό να σταματήσει σε θέση όπου το λαμβανόμενο σήμα εμφανίζει βαθιά διάλειψη. Τότε, η διατήρηση της καλής επικοινωνίας μπορεί να είναι πολύ δύσκολη , παρά το γεγονός ότι τα διερχόμενα οχήματα ή οι άνθρωποι που περπατούν στην περιοχή του κινητού μπορεί να μεταβάλλουν το πεδίο, εξαλείφοντας έτσι το ενδεχόμενο να μείνει το λαμβανόμενο σήμα σε διάλειψη για μεγάλο χρονικό διάστημα. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει διακοπή της επικοινωνίας.

Οι χρονικές ιδιότητες του καναλιού,οι ταχύτητα δηλαδή της αλλαγής του προκαλούνται όπως ειπώθηκε από τις σχετικές κινήσεις στο κανάλι και τη συνακόλουθη μετατόπιση Ντόπλερ.Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως Doppler spread και προκαλεί διασπορά στο φάσμα. Ισχύει η σχέση

$$T_c \simeq \frac{1}{f_d} \qquad (4.12)$$

Όπου

f_d η μέγιστη εμφανιζόμενη μετατόπιση Doppler



Σχήμα 4.6 *η εμφάνιση της διασποράς Doppler*

Αν το φάσμα του σήματος είναι αρκετά μεγαλύτερο από τη μέγιστη μετατόπιση Ντοπλερ, τότε το κανάλι ονομάζεται κανάλι αργών διαλείψεων (slow-fading channel) . Η επίδραση της διασποράς Doppler είναι αμελητέα. Στην αντίθετη περίπτωση το κανάλι είναι γρήγορων διαλείψεων (fast fading channel). Ισοδύναμη απαίτηση είναι η διάρκεια συμβόλου να είναι μικρότερη από το **coherence time** (T_c)του καναλιού. Έτσι ο χαρακτηρισμός της ταχύτητας των διαλείψεων (αργές ή γρήγορες) εξαρτάται από τη σχέση του φασματικού εύρους του σήματος σε σχέση με αυτό του Doppler,ή ισοδύναμα στη σχέση διάρκειας συμβόλου και του T_c. Για κανάλια γρήγορων διαλείψεων (fast fading) ο δέκτης πρέπει να μπορεί να ανέχεται εξασθενήσεις μέσα σε ένα σύμβολο, γεγονός που δεν ευνοεί τις διαμορφώσεις πλάτους, όπως QAM. Ενώ για αργές διαλείψεις (slow fading) το κανάλι μπορεί να θεωρηθεί σταθερό για τη διάρκεια ενός συμβόλου οπότε διαμορφώσεις πλάτους μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

-Αντιμετώπιση διαλείψεων

Υπάρχουν διάφορα μέτρα που λαμβάνονται ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι διαλείψεις. Δύο από τα πλέον γνωστά είναι τα εξής:

-Η χρήση κατευθυντικών κεραιών που εμποδίζουν σχετικά τις ανακλώμενες ακτίνες είναι ένα σημαντικό μέτρο, το οποίο είναι αποτελεσματικότερο στην περίπτωση δορυφόρων μεγάλης γωνίας ανύψωσης (ως προς τον ορίζοντα)σε σχέση με επίγειες μεταδώσεις ή δορυφόρους μικρής ανύψωσης.

–Η κυκλική πόλωση έχει μικρότερο συντελεστή ανάκλασης από αυτόν της οριζόντιας πόλωσης. Ανακλώμενες ακτίνες που οι γωνίες τους ξεπερνούν τη γωνία Brewster τείνουν να είναι κυρίως ορθογώνια πολωμένες σε σχέση με τις απευθείας προσπίπτουσες ακτίνες. Καθώς οι κεραίες λήψης σχεδιάζονται για τη συγκεκριμένη πόλωση του πομπού είναι αναίσθητες στις ορθογώνια πολωμένες συνιστώσες των ανακλώμενων ακτίνων. Έτσι οι απώλειες πολυόδευσης μειώνονται

4.5 Πιθανότητα σφάλματος (outage Probability)

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των συστημάτων ,η λειτουργία του οποίου συνδέεται στενά με τα κανάλια εξασθένισης, είναι η πιθανότητα να τεθεί το σύστημά μας εκτός λειτουργίας. Η πιθανότητα αυτή είναι γνωστή ως “outage probability’’ και εκφράζεται από το συμβολισμό Pout. Η Pout με λίγα λόγια εκφράζει το ενδεχόμενο το SNR γ του σήματός μας στην έξοδο να πέσει κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή, που αναφέρεται σαν “κατώφλι ευαισθησίας γ_{th}’’ και κατά συνέπεια να μην έχουμε επιθυμητό αποτέλεσμα κατά τη λήψη. Από μια άλλη άποψη εκφράζει την πιθανότητα ότι η στιγμιαία πιθανότητα λάθους υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή.

Η outage probability, που καθορίζεται ως η πιθανότητα ότι ο στιγμιαίος λόγος σήματος προς θόρυβο πέφτει κάτω από ένα δεδομένο κατώφλι. Το fading προκαλεί δραματική αύξηση στο μέσο bit-error-rate και στην outage probability. Σε ένα ραδιο-κανάλι με διαλείψεις, είναι πιθανό ότι το μεταδιδόμενο σήμα θα υποφέρει από τις διαλείψεις και αυτό να οδηγήσει σε μια πλήρη απώλεια του ή της διακοπής λειτουργίας του. Η outage probability είναι ένα μέτρο της ποιότητας της μετάδοσης σε ένα κινητό ραδιο-κανάλι. Outage υπάρχει όταν η λαμβανόμενη ισχύς του

σήματος πέφτει κάτω από ένα ορισμένο επίπεδο (κατώφλι). Μπορεί να υπολογιστεί ως ολοκλήρωμα της λαμβανόμενης ισχύς του σήματος $p_\gamma(t)$

$$Pout = \int_0^{\gamma_{th}} p_\gamma(\gamma) d\gamma \qquad (4.13)$$

Όπου

γ_{th} = το κατώφλι ευαισθησίας

$p_\gamma(t)$=η λαμβανόμενη ισχύς του σήματος

Η P_{out} είναι η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (CDF) του γ, ως εκ τούτου είναι η Pγ(γ) εκτιμώντας την για γ=γth. Αφού η PDF και η CDF συνδέονται με τη σχέση :

$$p_\gamma(\gamma) = dP_\gamma(\gamma) / d\gamma \qquad (4.14)$$

Όπου

$p_\gamma(t)$=η λαμβανόμενη ισχύς του σήματος

και αφού Pγ(0)=0, ο μετασχηματισμός Laplace των δυο αυτών συναρτήσεων σχετίζονται ως εξής

$$\hat{P}_\gamma(s) = \frac{\hat{p}_\gamma(s)}{s} \qquad (4.15)$$

Όπου

$p_\gamma(s)$=η λαμβανόμενη ισχύς του σήματος στο πεδίο του Laplace

Στην εξίσωση το άνω όριο στο ολοκλήρωμα γ_{th} δηλώνει το ελάχιστο απαιτούμενο SNR για να έχουμε αποδεκτή απόδοση.

Η διαδικασία για να βρει κανείς outage probability είναι η ακόλουθη:

1. Υπολογίστε τη λαμβανόμενη ισχύ του σήματος χρησιμοποιώντας την σχέση

$$f(r) = \int_0^\infty \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2} \right) \frac{1}{\sigma\lambda\sqrt{2\pi}} \exp\left\{ -\frac{(\ln\sigma - \mu)^2}{2\lambda^2} \right\} d\sigma \qquad (4.16)$$

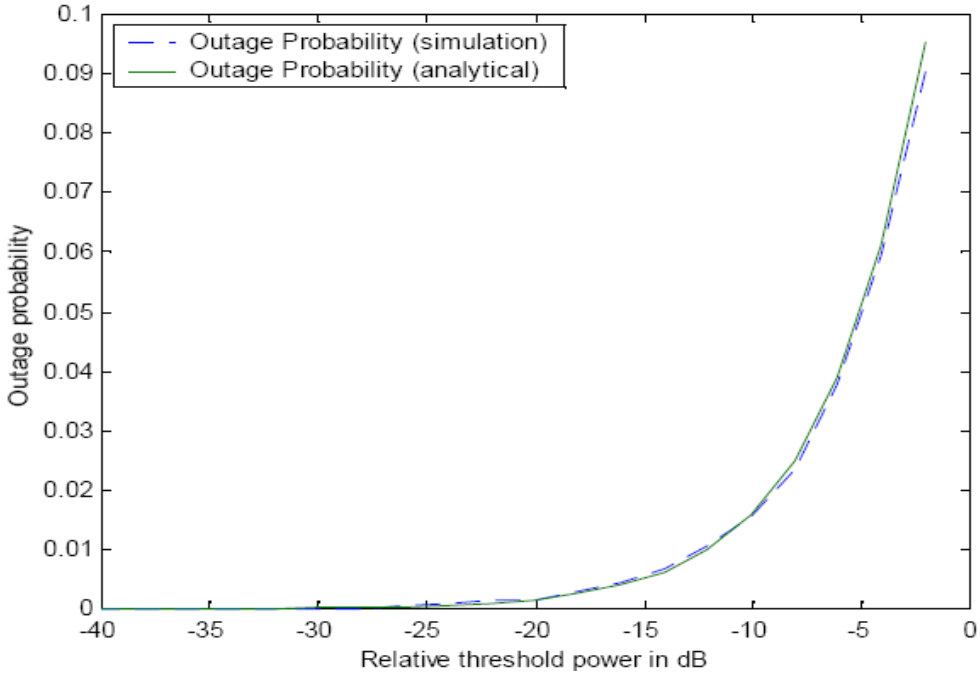
   Όπου

   σ=η τυπική απόκλιση

   r=η τυχαία μεταβλητή της τιμής (envelope) του σήματος

2. Ορίστε ένα κατώφλι ισχύος για το λαμβανόμενο σήμα σε σχέση με την μέση ισχύ σήματος
3. Μέτρησε τον αριθμό των φορών μέσα στο διάστημα δειγματοληψίας κατά τον οποίο η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος πέφτει κάτω από το κατώφλι
4. Χρησιμοποιώντας τη βασική έννοια της πιθανότητας, η outage υπολογίζεται έπειτα με τον λόγο της μέτρησης στο βήμα 3 προς τον συνολικό αριθμό των δειγμάτων

Για ένα λαμβανόμενο σήμα, υπολογίσαμε τις outage probabilities για τα διάφορα κατώφλια, και συγκρίναμε αυτές τις τιμές με εκείνες που υπολογίστηκαν αναλυτικά. Οι outage probabilities υπολογίστηκαν αναλυτικά και μέσω των προσομοιώσεων βρέθηκε ότι συμπίπτουν αρκετά καλά. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει τις καμπύλες για την outage probability, που υπολογίστηκε αναλυτικά και μέσω των προσομοιώσεων, για την περίπτωση της Rayleigh εξασθένησης.



Σχήμα 4.7 *η πιθανότητα σφάλματος συναρτήσει της έντασης (dB)*

Η πιθανότητα outage σχετίζεται με το γ_b και καθορίζεται ως P_{out} =p($\gamma_b < \gamma_0$), όπου το γ_0 τυπικά διευκρινίζει το ελάχιστο SNR που απαιτείται για αποδεκτή απόδοση (π.χ. σε σήμα φωνής , το $P_b = 10^{-3}$ είναι ένας αποδεκτός λόγος σφάλματος αφού γενικά δε μπορεί να ανιχνευτεί από το ανθρώπινο αυτί. Έτσι για ένα BPSK σήμα με εξασθένιση Rayleigh, το γ_b <7db μπορεί να δηλωθεί μια outage πιθανότητα). Ένας παρόμοιος ορισμός χρησιμοποιείται για outage που σχετίζεται με πιθανότητα σφάλματος και symbol και γ_s . Σε Rayleigh εξασθένιση, η πιθανότητα outage γίνεται

$$P_{out} = \int_0^{\gamma_0} \frac{1}{\bar{\gamma}_b} e^{-\gamma_b / \bar{\gamma}_b} d\gamma_b = 1 - e^{-\gamma_0 / \bar{\gamma}_b}. \qquad (4.17)$$

Όπου

P_{out}=η πιθανότητα σφάλματος

γ_b= ο λόγος σήματος προς θόρυβο

γ_0=το κατώφλι ευαισθησίας

Αντιστρέφοντας , βλέπουμε ότι για μία δεδομένη πιθανότητα outage απαιτείται ένα μέσο SNR γ_b όπου

$$\bar{\gamma}_b = \frac{\gamma_0}{-\ln(1-P_{out})}. \qquad (4.18)$$

Όπου

γ_0= το ελάχιστο αποδεκτό SNR ,δηλαδή το κατώφλι ευαισθησίας

P_{out}=η πιθανότητα σφάλματος

γ_b= ο λόγος σήματος προς θόρυβο

Σε db αυτό σημαίνει ότι $\gamma_b = 10\log\gamma_b$ πρέπει να υπερβεί το στόχο $\gamma_0 = 10\log\gamma_0$ από $F_d = -10\log[-\ln(1-P_{out})]$ για να παραμείνει αποδεκτή απόδοση περισσότερο από 100 * $(1-P_{out})$ εκατοστά του χρόνου. Η ποσότητα F_d τυπικά ονομάζεται fade margin (επιπλέον απαιτούμενη ισχύς).

Το fade margin προσδιορίζει την πρόσθετη δύναμη μετάδοσης που απαιτείται προκειμένου να αντισταθμιστούν τα αποτελέσματα των διαλείψεων , έτσι ώστε ο δέκτης να είναι σε θέση να λειτουργήσει πάνω από το κατώφλι ή το ελάχιστο επίπεδο σήματος που απαιτείται για να ικανοποιηθούν τα κριτήρια απόδοσης της ζεύξης. Η τιμή κατωφλίου καθορίζεται από τον προϋπολογισμό της ζεύξης. Το αστικό περιβάλλον διάδοσης τοποθετεί αυστηρούς περιορισμούς στο κινητό-δορυφορικό δίκτυο. Παραδείγματος χάριν, προκειμένου να επιτευχθεί fade margin στην περιοχή 6 –10 dB στα αστικά και αγροτικά περιβάλλοντα, απαιτείται μια συνεχής εγγυημένη ελάχιστη γωνία ανύψωσης χρήστη-δορυφόρου τουλάχιστον 50^0. Η αποζημίωση για ένα τέτοιο fade margin δεν πρέπει να είναι πέρα από τις τεχνικές δυνατότητες ενός συστήματος και θα πρέπει να ενσωματωθεί στο σχεδιασμό της ζεύξης. Εντούτοις, το να επιτύχουμε μια τέτοια ελάχιστη γωνία ανύψωσης που χρησιμοποιεί έναν χαμηλό αστερισμό γήινης τροχιάς θα απαιτούσε έναν αστερισμό πάνω από 100 δορυφόρους. Απ' εναντίας, για μια εγγυημένη ελάχιστη γωνία ανύψωσης 20^0, θα απαιτούταν fade margin στην περιοχή 25–35 dB για την ίδια ποιότητα υπηρεσίας, το οποίο είναι σαφώς μη λειτουργικό. Ενώ αυτοί οι αριθμοί καταδεικνύουν τις εξασθενίσεις της παροχής κάλυψης στις αστικές

περιοχές, στην πραγματικότητα, για ένα ενσωματωμένο διαστημικό/επίγειο περιβάλλον, σε ένα αστικό περιβάλλον, η επίγεια κυψελοειδής κάλυψη θα έπαιρνε την προτεραιότητα. Πράγματι συστήματα όπως το GLOBALSTAR λειτουργούν έτσι.

4.6 Στατιστική περιγραφή του καναλιού

Για τον δέκτη οι αλλαγές στο κανάλι δεν είναι προβλέψιμες, δηλαδή το κανάλι δεν μπορεί να θεωρηθεί στατικός

Αυτός είναι ο λόγος που ο χαρακτηρισμός του καναλιού γίνεται με χρήση στατιστικών μοντέλων, λόγω της μη προβλεψιμότητας των αλλαγών στο κανάλι -και άρα των απωλειών που έχει το σήμα κάθε στιγμή- είτε λόγω σχετικής κίνησης του δέκτη ως προς τον πομπό είτε λόγω φυσικής μεταβολής του ίδιου του καναλιού, από μεταβολή των ατμοσφαιρικών συνθηκών ως την κίνηση οχημάτων. Τις απώλειες αυτές τις λέμε πιθανοθεωριτικές σε αντίθεση με τις Ντετερμισνιστικές ,όπως είναι η απώλειες απόστασης.

Για τον χαρακτηρισμό λοιπόν του καναλιού έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα στατιστικής περιγραφής σχετικά απλά αλλά ακριβή, τα οποία εξαρτώνται κάθε φορά από το περιβάλλον διάδοσης.

Η περιγραφή γίνεται κυρίως με χρήση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (PDF) η οποία μας βοηθά στην περιγραφή της τυχαίας μεταβλητής που αναπαριστά το πλάτος του ληφθέντος σήματος, και η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής (CDF) η οποία μας δίνει την πιθανότητα ο λόγος σήματος προς θόρυβο να πέσει κάτω από ένα όριο. Όπως αναφέρθηκε είδη, για τις μεγάλης κλίμακας διαλείψεων χρησιμοποιείται η lognormal κατανομή καθώς και η Gamma κατανομή. Για τη στατιστική περιγραφή των μικρής κλίμακας διαλείψεων (small fading), που εμφανίζονται σε αποστάσεις της τάξης του μήκους κύματος , χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων οι κατανομές Nakagami, Rayleigh, Rice

4.6.1 LogNormal κατανομή

Ίσως υπάρχουν πολλές διαδρομές diffraction paths. Στον δέκτη, οι διαδρομές αυτές είναι πολλαπλασιαστέες (αθροίζονται σε DB)
Αν τα μονοπάτια είναι αρκετά μπορεί (με χρήση του Central Limit Theorem) να γίνει χρήση της τυχαίας Γκαουσιανής μεταβλητής για περιγραφή του Path loss
Αυτό ονομάζεται log-normal fading καθώς ακολουθεί κανονική κατανομή σε DB
Και οφείλεται οφείλεται σε αλλαγή της γεωμετρίας του καναλιού, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του κινούμενου δέκτη.
σL (location variability) αρκεί αν χαρακτηρίσει τη log-normal fading (Mean= Median)

Η πιθανότητα της log-normal αν η κυκλική περιοχή καθορισμένης ακτίνας καλύπτεται.

4.6.2 Κατανομή Rayleigh

Η κατανομή Rayleigh είναι από τις ποιο γνωστές κατανομές που περιγράφουν τη λαμβανόμενη τιμή ισχύος του σήματος. Χρησιμοποιείται όταν δεν υπάρχει απευθείας συνιστώσα ,δηλαδή δεν έχουμε οπτική επαφή πομπού δέκτη και όλες οι συνιστώσες που φτάνουν στον δέκτη είναι σκεδαζόμενες, ανακλώμενες ή περιθλώμενες. Λόγω επιδράσεων εξουδετέρωσης κυμάτων, η στιγμιαία λαμβανόμενη ισχύς που έρχεται σε μια κινητή κεραία γίνεται μια τυχαία μεταβλητή, που εξαρτάται από τη θέση της κεραίας. Η πολυοδική λήψη δηλαδή προκαλεί την λεγόμενη απόσβεση Rayleigh. Η φάση του λαμβανόμενου σήματος είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη μεταξύ 0 και 2π,ενώ το πλάτος “x” του σήματος, καθώς είναι τυχαία μεταβλητή, έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας η οποία μπορεί να υπολογιστεί.

Το λαμβανόμενο μη διαμορφωμένο σήμα ,για ένα φασικό σύστημα συντεταγμένων μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα δύο ορθογώνιων μεταξύ τους συνιστωσών I(t) και Q(t), οι οποίες είναι τυχαίες διεργασίες που αναπαριστούν το άθροισμα των αφιχθέντων σημάτων (με διαφορά 90^{o} μεταξύ τους). Παρατηρούμε τις τυχαίες αυτές διεργασίες για μια συγκεκριμένη στιγμή. Αν υπάρχει αρκετά

μεγάλος αριθμός σημάτων τότε από το κεντρικό οριακό θεώρημα (Central Limit Theorem), οι συνιστώσες I(t) και Q(t) ακολουθούν τη γκαουσιανή (Gaussian) κατανομή, με μηδενικό μέσο όρο. Το λαμβανόμενο σήμα έχει ένα πλάτος ίσο με τη ρίζα της ποσότητας $I(t)^2+ Q(t)^2$ και μια σταθερή φάση. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας προκύπτει

$$p_x(x) = \frac{x \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right)}{\sigma^2} \qquad (4.19)$$

Όπου

σ^2 = η μέση ισχύς των λαμβανόμενων διάχυτων (σκεδαζόμενων) συνιστωσών που μεταδίδονται από τις πολλαπλές διαδρομές(multipath).

x = η τυχαία μεταβλητή του πλάτους του σήματος

Στα ασύρματα συστήματα, είναι αναμενόμενη μια τυπική παρεμβολή από πολλούς πομπούς. Κάθε σήμα μπορεί να υποστεί πολυοδική απόσβεση και φαινόμενο σκιάς .Η συσσώρευση πολλών αποσβενούμενων σημάτων με κατανομή Rayleigh απαιτεί εξέταση της φύσης των σημάτων που συμβάλλουν στην παρεμβολή. Γίνεται παρατήρηση της συμπεριφοράς ενός σήματος σε ένα διάστημα Τ, το οποίο είναι μικρό σε σχέση με το ρυθμό απόσβεσης του καναλιού,δηλαδή η απόσβεση δεν επηρεάζει τα πλάτη και τις φάσεις των σημάτων. Αυτά όμως μπορούν να επηρεαστούν από τη διαμόρφωση κατά το χρόνο Τ. Υπάρχουν δύο ακραίες περιπτώσεις

-Συμφασική άθροιση συμβαίνει όταν κατά το διάστημα παρατήρησης οι διακυμάνσεις των φάσεων που προκαλούνται είναι αρκετά μικρές και οι συχνότητες των φορέων των σημάτων είναι ίσες. Τότε η στιγμιαία ισχύς είναι εκθετικά κατανεμημένη

-Ασύμφωνη άθροιση Δυναμική, ή ασύμφωνη άθροιση εμφανίζεται αν η φάση καθενός από τα σήματα κυμαίνεται σημαντικά ,οπότε τα σήματα προστίθενται ασύμφωνα

4.6.3 Κατανομή Rice

Στην περίπτωση που έχουμε ένα κυρίαρχο σήμα, (ή ένας αθροιστικός φάσορας του απευθείας σήματος και μιας ανάκλασης) και ένα μεγάλο αριθμό πολυοδευόμενων κυμάτων (ανακλώμενων και διασκορπισμένων) μικρότερης έντασης, τότε γίνεται χρήση της κατανομής Rice. Το πρόβλημα είναι ανάλογο με ένα ημιτονοειδές με προσθήκη θορύβου. Στην ουσία το μοντέλο που βρίσκεται πίσω από την απόσβεση Rician είναι παρόμοιο με αυτό της απόσβεσης Rayleigh,με τη διαφορά τη παρουσία της ισχυρής συνηστώσας στη Rician. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) λαμβάνεται παρατηρώντας τις δύο τυχαίες διεργασίες I(t) και Q(t) (που συμπεριλαμβάνουν τα αφιχθέντα σήματα όπως και στη περίπτωση Rayleigh)σε μια συγκεκριμένη στιγμή t_0 .Εάν ο αριθμός των αφιχθέντων (μέσω πολυόδευσης) κυμάτων είναι επαρκώς μεγάλος, το θεώρημα του κεντρικού ορίου μας λέει ότι οι τυχαίες διεργασίες ακολουθούν την Γκαουσιανή κατανομή, αλλά δεν έχουν μηδενική μέση τιμή λόγω της ύπαρξης της κύριας, ντετερμινιστικής, συνιστώσας. Ο μαθηματικός τύπος της pdf βρίσκεται τελικά ίσος με

$$p_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(- \frac{r^2 + r_s^2}{2\sigma^2} \right) I_0\left(\frac{r r_s}{\sigma^2} \right) \qquad (4.20)$$

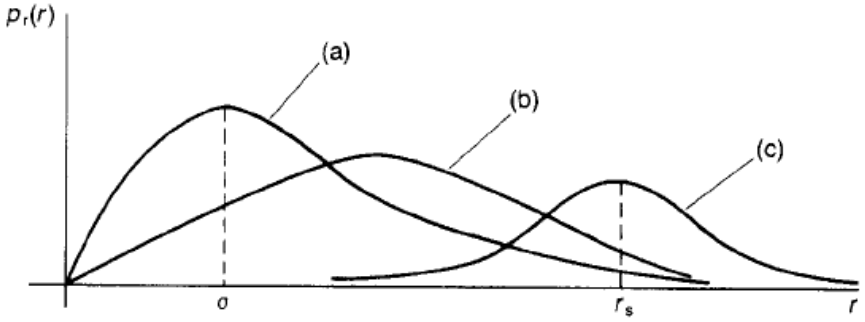
Όπου

r_s=το πλάτος της κυρίαρχης συνιστώσας.

r=το λαμβανόμενο πλάτος σήματος

$I_0(x)$=οι συναρτήσεις Bessel

Αν αυτή μηδενιστεί, τότε η παραπάνω εξίσωση θα δώσει τη pdf της κατανομής Rayleigh. Βλέπουμε ότι οι δύο βασικές κατανομές της περιγραφής του small fading σχετίζονται και μάλιστα η μία είναι ειδική περίπτωση της άλλης.



Σχήμα 4.7 *η pdf κατανομή των Rice,Rayleigh*

Στο σχήμα 4.7 βλέπουμε την pdf της κατανομή Rice (b,c)και για ίσο με μηδέν την pdf της κατανομής Rayleigh

Τα ακριβή μοντέλα Rician θεωρούν ότι το κύριο κύμα μπορεί να είναι το άθροισμα των φασόρων δύο ή περισσότερων κύριων κυμάτων, όπως του κύματος οπτικής ευθείας και του κύματος ανάκλασης από το έδαφος .Όπως έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο των επίγειων μεταδόσεων, αυτό το συνδυασμένο σήμα συμπεριφέρεται κυρίως σαν μια ντετερμινιστική, πλήρως προβλέψιμη διεργασία. Επίσης, το κύριο κύμα μπορεί να είναι μέρος μιας εξασθένησης λόγω φαινομένου σκίασης. Αυτή η περίπτωση είναι ευρέως διαδεδομένη στη μοντελοποίηση δορυφορικών καναλιών

4.6.4 Κατανομή Nakagami

Εκτός από τις αποσβέσεις κατά Rayleigh και Rician όσο αφορά τη pdf του πλάτους ενός σήματος για την περίπτωση της εξασθένησης κατά την κίνηση έχουν προταθεί και άλλες κατανομές, όπως η m-κατανομή Nakagami.
Για να ακολουθεί ένα σήμα αυτή την κατανομή θα πρέπει η αντίστοιχη στιγμιαία ισχύς να ακολουθεί την “γάμμα” κατανομή. Η παράμετρος m καλείται παράγοντας διαμόρφωσης.

Παράδειγμα περίπτωσης όπου έχουμε απόσβεση κατά Nakagami είναι η πολυοδική σκέδαση με σχετικά μεγάλο χρόνο διάδοσης καθυστέρησης από ανακλώμενα κύματα από διαφορετικές “ομάδες” clusters. Για κάθε μία από τις ομάδες οι φάσεις των πολυοδικών κυμάτων είναι τυχαία αλλά οι χρόνοι καθυστέρησης είναι περίπου ίδιοι για όλα τα κύματα της ομάδας (cluster). Υποθέτουμε ότι οι χρόνοι καθυστέρησης όλων των ομάδων διαφέρουν πολύ μεταξύ τους. Εάν οι χρόνοι αυτοί υπερβαίνουν κατά πολύ το χρόνο ενός bit μιας ψηφιακής ζεύξης, τότε τα διάφορα clusters προκαλούν σοβαρές διασυμβολικές παρεμβολές. Οπότε η παρεμβολή λόγω των πολυοδικών κυμάτων προσεγγίζει την περίπτωση της ενδοκαναλικής παρεμβολής. Η Nakagami κατανομή χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση της διόδευσης μέσω ασύρματων καναλιών εντός κτιρίων, όπου ισχύουν οι παραπάνω συνθήκες.

4.6.5 Κατανομή Weibull

Η κατανομή Weibull, που αποτελεί μια γενίκευση της Rayleigh, είναι σημαντική κατανομή ειδικά όταν πρόκειται για ανάλυση αξιοπιστίας Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται η Αθροιστική Συνάρτηση Πυκνότητας (**CDF**) και πιθανότητας (**PDF**).

Πίνακας. 4.1 *παράμετροι της κατανομής Weibull*

CDF	$F_x(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x^\beta}{\Omega}\right)$
PDF	$P_x(x) = \beta \frac{x^\beta}{\Omega} \exp\left(-\frac{x^\beta}{\Omega}\right)$
Παράμετροι	$\beta > 0$
	$\Omega = E(R^2)$
	$x \in [0, \infty)$

Όπου για β=2 η κατανομή Weibull εξισώνεται με αυτήν της Rayleigh

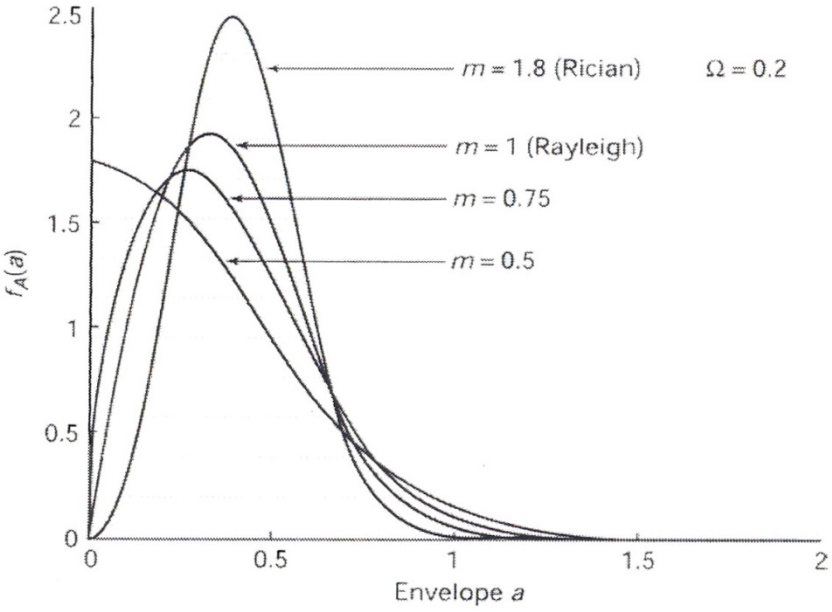
4.6 Συμπεράσματα

Όταν μιλάμε για διάδοση κύματος τότε χωρίζουμε δυο περιπτώσεις. Αυτή στην οποία έχουμε multipath propagation και σε αυτή που δεν έχουμε ή μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Συνήθως οι κατανομές Nakagami-m, Rayleigh, Rice και Weibull χρησιμοποιούνται για την περιβάλλουσα του σήματος που υποφέρει από multipath. Επιπροσθέτως η Rayleigh και η Rice υποθέτουν μεγάλο αριθμό συνιστωσών πεδίου, ανεξάρτητες μεταξύ τους, ώστε το άθροισμά τους να δίνει Gauss (γνωστό θεώρημα αθροίσματος απείρων ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών). Στη συνέχεια η ισχύς που συνδέεται με την περιβάλλουσα δίνεται από την κατανομή Rayleigh. Ωστόσο η παραδοχή για μεγάλο αριθμό συνιστωσών δεν ευσταθεί πολλές φορές οπότε αναγκαζόμαστε να μελετήσουμε sub-Rayleigh channels.

Στη θεωρία επικοινωνιών οι κατανομές Nakagami, Rice και η Rayleigh χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν τα διεσπαρμένα σήματα που φθάνουν σε έναν δέκτη από multipath. Ανάλογα με την πυκνότητα της διασποράς, το σήμα θα

επιδείξει τα διαφορετικά χαρακτηριστικά fading .Οι κατανομές Rayleigh και Nakagami χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν τα σήματα, στα οποία παρουσιάζεται πυκνή διασπορά, όταν η κατανομή Rice διαμορφώνει fading με ισχυρό LOS.

Συγκρίνοντας τις PDF των κατανομών Nakagami-m και Rice αυτή της Nakagami-m είναι καταλληλότερη για αναλυτική ανάλυση μιας και δεν υπάρχει η συνάρτηση Bessel. Η κατανομή Rayleigh απαιτεί τις ίδιες RMS τιμές των διάφορων multipath συνιστωσών κάτι που δεν κάνει η Nakagami-m. Φυσικά, μπορεί να δικαιολογηθεί εξαιτίας του συμπλέγματος των multipath κυμάτων (εγκαίρως).



Σχήμα 4.8 *σύγκριση των pdf των διάφορων κατανομών*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται ποσοτική παρουσίαση των επιδράσεων των διαλείψεων και των απωλειών στην δορυφορική επικοινωνία. Ως βάση αυτής της ανάλυσης θα χρησιμοποιηθούν κάποια τυποποιημένα ύψη τροχιών καθώς και τεχνικών χαρακτηριστικών του δέκτη.

Θα λάβουμε τρεις περιπτώσεις:

1. Σε ανοιχτό χώρο, όπου θεωρούμε ότι οι ανακλάσεις είναι μηδαμινές και ότι η απευθείας συνιστώσα κυριαρχεί απόλυτα. Αυτό το μοντέλο αν και απλοϊκό θα βοηθήσει ως βάση σύγκρισης για τα επόμενα μοντέλα

2. Σε περιοχή παρουσία πολυόδευσης. Σε αυτή την περίπτωση, θεωρούμε την ύπαρξη αφενός της οπτικής επαφής, αλλά και την παρουσία ανακλάσεων, οι οποίες διαμορφώνουν το τελικό ληφθέν σήμα

3. Σε πυκνοκατοικημένη περιοχή. Σε αυτή την περίπτωση όπου υπάρχει πλήρης απουσία του LOS κυριαρχεί η πολυόδευση (multipath) καθώς το εκπεμπόμενο σήμα φτάνει μέσω διάφορων διαδρομών στην κεραία του δέκτη μέσω ανάκλασης (reflection) σκέδασης (scattering)και περίθλασης (diffraction),έτσι το σήμα φτάνει μέσω διάφορων διαδρομών στο δέκτη με διαφορετικές καθυστερήσεις

5.2 Ελάχιστη ισχύς εκπομπής για μετάδοση ελεύθερου χώρου Free Space

Για την περιγραφή των απωλειών ελευθέρου χώρου, (Free Space Loss) θα γίνει χρήση του τύπου

$$P_L(dB)=32.45+20\log_{10}d+20\log_{10}f \qquad (5.1)$$

Όπου

d =η απόσταση του δορυφόρου σε χιλιόμετρα

f =η συχνότητα σε MHz

P_L=οι απώλειες ελεύθερου χώρου

Αυτή η σχέση μας δείχνει ότι το PathLoss εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα και την απόσταση.

Η ισχύς που φτάνει στον δέκτη ισούται με την εκπεμπόμενη από τον δορυφόρο ισχύ μειούμενη κατά P_L(Free Space Loss) . Οπότε ισχύει ο τύπος

$$P_r(dBm)=P_t(dBm)-P_L(dB) \quad (5.2)$$

Όπου

P_r η ισχύς λήψης

P_t η ισχύς εκπομπής

P_L η ισχύς απωλειών

Για να βρούμε την ελάχιστη ισχύ εκπομπής που πρέπει να έχει ο δορυφόρος ώστε το σήμα να φτάσει στον δέκτη (στο σταθμό βάσης) θέτουμε την ισχύ λήψης λίγο μεγαλύτερη από το επίπεδο ευαισθησίας (sensitivity level)

5.2.1 Χαμηλό ύψος τροχιάς

Για LEO τροχιές δορυφόρων, για ένα τυπικό ύψος 750km και για εύρος συχνοτήτων 8-12.5 GHz και για -110dBm επίπεδο ευαισθησίας , η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς των LEO δορυφόρων είναι

$$P_t(dBm)=P_r(dBm)+P_L(dB) \quad (5.3)$$

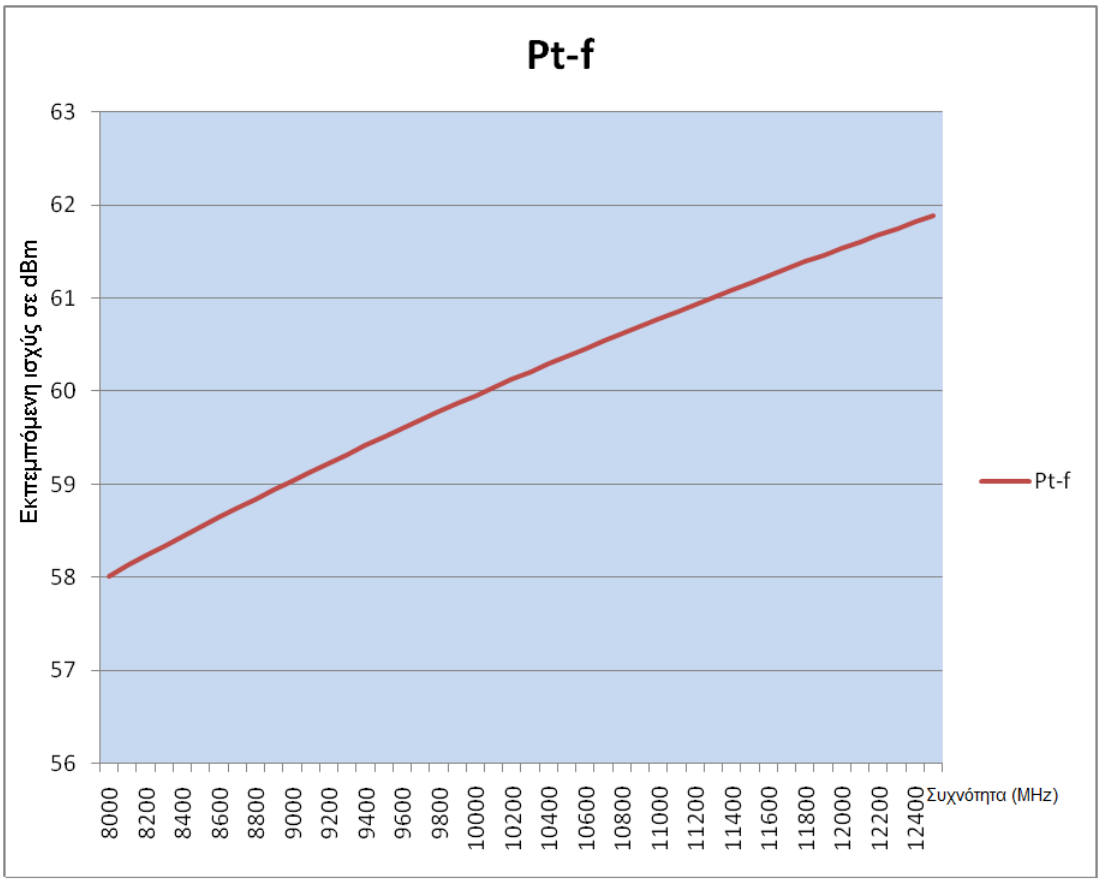
Όπου

P_r =-110dBm

P_L = οι απώλειες διαδρομής , που είναι γνωστές αφού έχουμε συγκεκριμένη απόσταση και συγκεκριμένο φάσμα συχνοτήτων

P_t=η λαμβανόμενη ισχύς, πουείναι και ομόνος άγνωστος στη σχέση

Στο σχήμα 5.1 είναι οι γραφικές αναπαραστάσεις της P_t συναρτήσει του εύρους συχνοτήτων 8-12.5 GHz



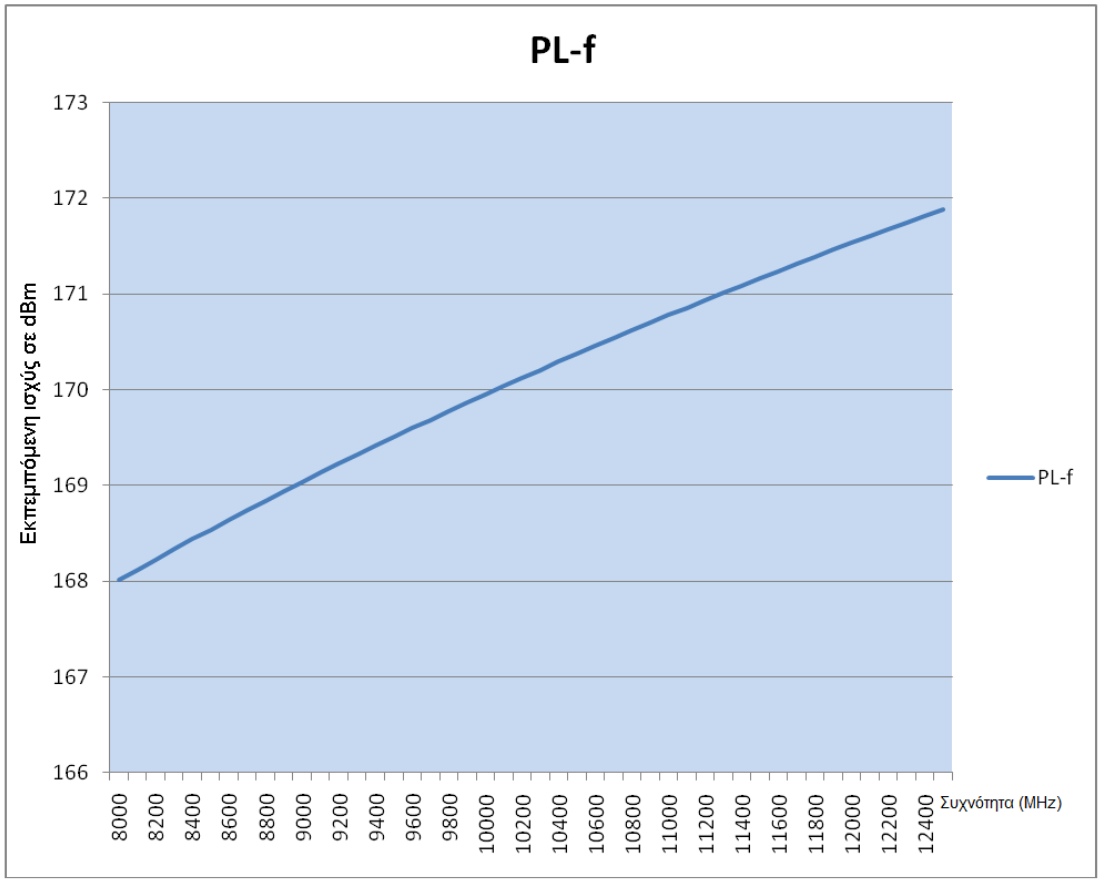
Σχήμα 5.1 *η ισχύς εκπομπής συναρτήσει της συχνότητας για ύψος τροχιάς 750km*

Στην παραπάνω γραφική βλέπουμε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς του δορυφόρου αυξάνει με την αύξηση της συχνότητας, κάτι που το περιμέναμε αφού σύμφωνα με τον τύπο ο όρος $20\log_{10}f$ προστίθεται στην ποσότητα που μας δίνει το Pt σε dBm.

Έτσι για 8GHz η απαιτούμενη ισχύς εκπομπής είναι 58dBm, στα 10GHz η ισχύς είναι μεγαλύτερη και έχει τιμή 60dBm, και τέλος στα 12.5GHz αγγίζει τα 62dBm.

Με δεδομένο το σταθερό επίπεδο ευαισθησίας, οι αλλαγές αυτές του επιπέδου του Pt οφείλονται αποκλειστικά στην αύξηση του Path Loss. Για να φανεί

καλύτερα αυτό παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του P_L συναρτήσει της συχνότητας στο σχήμα 5.2



Σχήμα 5.2 *οι απώλειες διαδρομής (σε dB) συναρτήσει της συχνότητας*

Το Path Loss είναι ανάλογο του τετραγώνου της συχνότητας, ή σε dBm ένας από τους όρους του αθροίσματος που δείνουν το P_L είναι η ποσότητα $20\log_{10}f$.

5.2.2 Γεωστατικό ύψος τροχιάς

Για GEO τροχιές δορυφόρων, δηλαδή σε ύψος 35900km και για εύρος συχνοτήτων 8-12.5 GHz και για -110dBm επίπεδο ευαισθησίας , θέλουμε να βρούμε την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς εκπομπής.

Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία με πριν. Το μόνο που αλλάζει είναι η απόσταση των GEO δορυφόρων, που για τις τυπικές τροχιές που χρησιμοποιούνται σε αυτή την προσομοίωση είναι 48 φορές μεγαλύτερη. Ακολουθεί η καμπύλη του σχήματος 5.3 που παριστάνει την ελάχιστη ισχύ εκπομπής συναρτήσει της συχνότητας, για το ίδιο εύρος λειτουργίας που δουλέψαμε και πριν, δηλαδή στην X μπάντα συχνοτήτων.

Σχήμα 5.3 *η ισχύς εκπομπής (σε dB) συναρτήσει της συχνότητας για ύψος τροχιάς* 35900km

Βλέπουμε ότι στην περίπτωση των GEO δορυφόρων η απαιτούμενη ισχύς είναι περίπου 36% περισσότερη από αυτή των δορυφόρων χαμηλής τροχιάς (LEO), σε όλο το φάσμα συχνοτήτων. Συγκεκριμένα για 8GHz η απαιτούμενη ισχύς εκπομπής είναι 91.6dBm, 36% μεγαλύτερη τιμή σε dBm .Στα 10GHz η ισχύς είναι όπως είναι λογικό μεγαλύτερη, και έχει τιμή 93.5dBm, (πάλι περίπου 36% αύξηση σε σχέση με την τιμή στους δορυφόρους των LEO τροχιών)και τέλος στα 12.5GHz αγγίζει τα 95.49dBm, με παρόμοια αύξηση ισχύος, κατά 33.6 dB για όλες τις συχνότητες.

Προς δικαιολόγηση αυτής της συμπεριφοράς ξανακοιτάμε τον τύπο που δίνει την P_t,

$P_t(dBm)=P_r(dBm)+P_L(dB)= P_r+32.45+20\log_{10}d+20\log_{10}f.$

Όπου

d =η απόσταση του δορυφόρου σε χιλιόμετρα

f =η συχνότητα σε MHz

P_r =-110dBm

P_L = οι απώείες διαδρομής , που είναι γνωστές αφού έχουμε συγκεκριμένη απόσταση και συγκεκριμένο φάσμα συχνοτήτων

P_t=η λαμβανόμενη ισχύς, πουείναι και ομόνος άγνωστος στη σχέση

Άρα στον υπολογισμό της $P_t(dBm)$ υπεισέρχεται η ποσότητα $20\log_{10}d$. Στην περίπτωση των γεωστατικών δορυφόρων είπαμε είδη ότι έχουμε τροχιά σε ύψος d 48 φορές μεγαλύτερο από αυτό της LEO τροχιάς. Άρα στη σχέση έχουμε πλέον την ποσότητα (με d την απόσταση δορυφόρων χαμηλής τροχιάς)

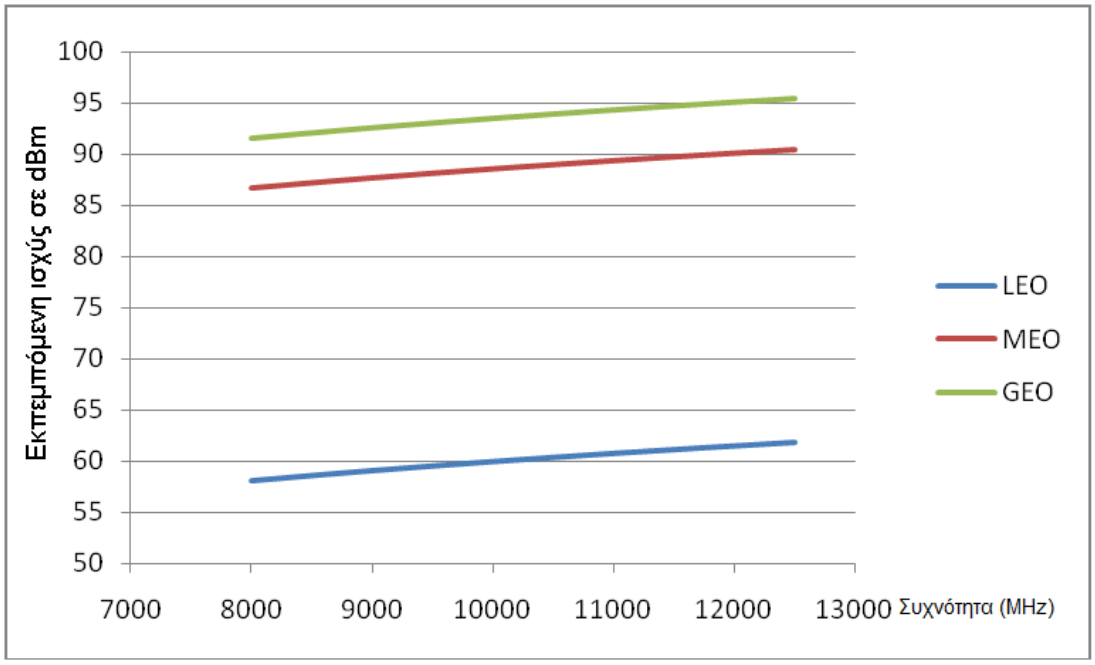
$20\log_{10}48d=20\log_{10}d+20\log_{10}48= 20\log_{10}d+ 33.6$

5.2.3 Μέσο ύψος τροχιάς

Θα ακολουθήσουμε την ίδια διαδικασία και για δορυφόρους της τροχιάς MEO.

Οι δορυφόροι του συστήματος GPS είδαμε ότι βρίσκονται σε ύψος 20200, για ίδια στάθμη ευαισθησίας του δέκτη και εύρος συχνοτήτων βλέπουμε ότι η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς εκπομπής βρίσκεται όπως αναμενόταν ανάμεσα στα αποτελέσματα των δύο προηγούμενων περιπτώσεων, και συγκεκριμένα είναι 17% μεγαλύτερη από τη LEO τροχιά και περίπου 3% μικρότερη από την ισχύ της γεωστατικής τροχιάς

Το κοινό διάγραμμα που εικονίζεται στο σχήμα 5.4 δείχνει τις διαβαθμίσεις της απαιτούμενης ενέργειας εκπομπής σε dBm ανάλογα με την περίπτωση



Σχήμα 5.4 συγκριτική παρουσία*ση της ισχύος εκπομπής (σε dB) συναρτήσει της συχνότητας για διαφορετικές τροχιές*

Συνοψίζοντας, δείξαμε ότι η ενέργεια με την οποία πρέπει να εκπέμπψει ο δορυφόρος ένα σήμα, με δεδομένες και σταθερές τις άλλες παραμέτρους, συγκεκριμένα: απουσία απωλειών πολυόδευσης και διαλείψεων καθώς χρήση ίδιου δέκτη , είναι συνάρτηση της συχνότητας λειτουργείας, και του ύψους της τροχιάς. Επίσης , υπάρχει σταθερή σχέση μεταξύ των ενεργειών κάθε τροχιάς (των λόγων τους δηλαδή) σε κάθε συχνότητα.

5.3 Απώλειες λόγω σκίασης, διαλείψεων

Για να μελετήσουμε το σήμα σε πιο ρεαλιστικά δεδομένα, πρέπει να λάβουμε υπόψη τις απώλειες πέρα από αυτές της ελεύθερης διάδοσης. Δηλαδή την επίδραση όλων αυτών των παραγόντων που είδαμε στη θεωρία ότι επιδρούν στη στάθμη του λαμβανόμενου σήματος και εν τέλει στην ποιότητα της δορυφορικής

σύνδεσης. Αυτοί οι παράγοντες, δηλαδή τα χαρακτηριστικά των ζωνών τις ατμόσφαιρας, της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας και οι διάφορες διακυμάνσεις σε αυτές ,οι τρόποι διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, οι επιδράσεις της ηλιακή δραστηριότητας και των ηλιακών καταιγίδων, τα διάφορα φαινόμενα της επίγειας διάδοσης όπως οι περιθλάσεις, η σκίαση και βεβαίως η πολυόδευση ,και διάφορα άλλα φαινόμενα που μελετήθηκαν, συνεισφέρουν στην συνολική απόσβεση . Μάλιστα η μελέτη αυτής της επίδρασης δεν είναι απλή υπόθεση, καθώς όλοι αυτοί οι παράγοντες , με την τυχαιότητα την οποία τους διακρίνει κάνουν το πρόβλημα στοχαστικό, και έτσι καταφύγαμε σε στατιστικές θεωρίες για ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων που περιγράφουν φαινόμενα όπως η πολυόδευση και η μετατόπιση ντόπλερ.

Σαν πρώτη ,και γενική διόρθωση του τύπου των απωλειών ελεύθερου χώρου έχουμε είδη εισάγει τον τύπο

$$L(d) = L(d) + \mathrm{X}_{\sigma} = L(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10}(\frac{d}{d_0}) + \mathrm{X}_{\sigma} \qquad (5.4)$$

Όπου

X_σ μας δίνει την συνεισφορά των απωλειών στο συνολικό path loss.

d_0=d (θεωρούμε την ισότητα) η απόσταση πηγής δέκτη

L(d)= απώλειες διαδρομής

- Περίπτωση διάδοσης OLOS

Αρχικά θεωρούμε τον την περίπτωση διάδοσης OLOS (Obstructed line of Sight),εμποδιζόμενη οπτική επαφή. Δηλαδή παρουσία σκίασης, που δεν προκαλεί όμως μεγάλη απόσβεση στο σήμα που λαμβάνει ο δέκτης. Σαν τυπικές τιμές για αυτού του είδους την σκίαση παίρνουμε σ(dB)=3dB, 6dB, και X=Z σ(dB), όπου Z ο συντελεστής που καθορίζει την πιθανότητα κάλυψης. Για πιθανότητας κάλυψης (coverage probability) 95%, που είναι μια πολύ καλή τιμή, η τιμή του Z είναι 1.645.

Έτσι τυπικές τιμές του X για διάδοση OLOS είναι X=4.935dB και X=9.87dB

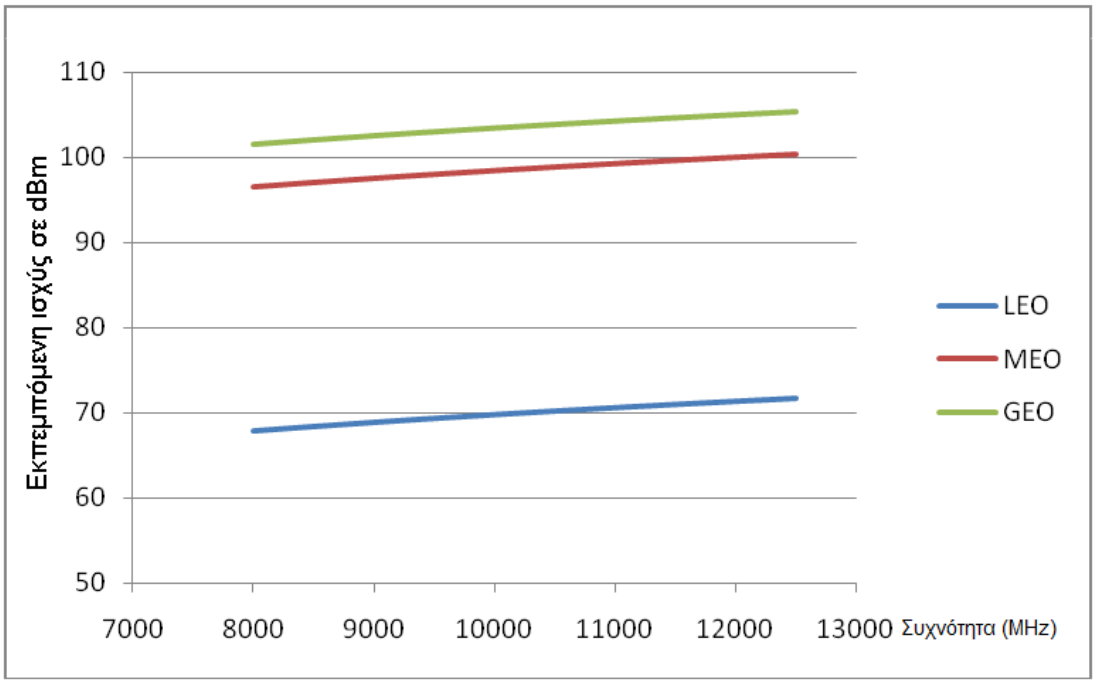
Οι τιμές αυτές αντιστοιχούνε στην περίπτωση του δέκτη που ενώ ίσως έχει οπτική επαφή με την πηγή, περιβάλλεται από κτήρια ή άλλες ανακλαστικές επιφάνειες, ή σκεδαστές, και έτσι δέχεται την επίδραση των φαινομένων της πολυόδευσης. Η περιγραφή της κατανομής της τυχαίας μεταβλητής της έντασης, μπορεί να περιγράφεται με την κατανομή Rice. Αυτή η επίδραση υπάρχει όταν ο δέκτης βρίσκεται σε μια περιοχή η οποία είναι αραιοκατοικημένη, ή σε άνα ξέφωτο ανάμεσα σε λόφους , ή ακόμα κάτω από φυλλώματα δέντρων.

Για την τιμή X=4.935dB υπάρχει σχεδόν διπλασιασμός της απαιτούμενης ισχύος εκπομπής για να ξεπεράσει το σήμα στον δέκτη το επίπεδο ευαισθησίας

Για τα 8 GHz, οι τιμές της P_t για τα παραδείγματα LEO ,MEO και GEO τροχιών που έχουμε βρέθηκαν να είναι 61dB, 91.5dB, και 100.4dB αντίστοιχα.

Οι ίδιοι υπολογισμοί έγιναν για την περίπτωση όπου X=9.87dB ,δηλαδή βαριές απώλειες από τη μία αλλά ακόμα με παρουσία οπτική επαφής, ή με τις ανακλώμενες ακτίνες να παίζουν ρόλο αλλά να μην κυριαρχούν.

Η γραφική παράσταση του σχήματος 5.5 δείχνει την απαιτούμενη ισχύ εκπομπής για X=9.87dB, συναρτήσει της συχνότητας που συνοψίζει τα 3 είδη τροχιών που είδαμε στο ίδιο εύρος συχνοτήτων είναι:



Σχήμα 5.5 *η ισχύς εκπομπής (σε dB) συναρτήσει της συχνότητας για διαφορετικά ύψη σε συνθήκες OLOS*

- Περίπτωση πολύ έντονων απωλειών.

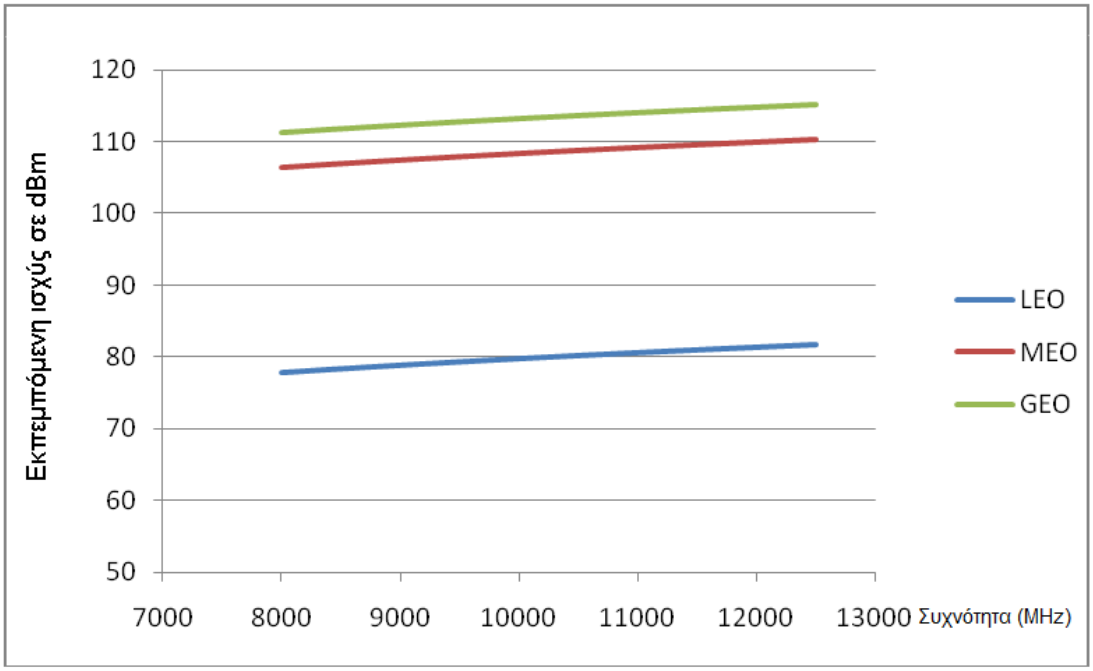
Εδώ έχουμε την περίπτωση που ο δέκτης βρίσκεται υπό πολύ έντονη σκίαση , και ο παρουσία πολυοδευόμενων κυμάτων κυριαρχεί στον δέκτη. Η περιγραφή της τυχαίας μεταβλητής της ισχύος μπορεί να γίνει με την κατανομή Rayleigh. Ο δέκτης σε αυτή την περίπτωση μπορεί να υποτεθεί ότι βρίσκεται σε αστικό περιβάλλον, με τα ψηλά κτήρια να αφήνουν τις διάφορες δέσμες να φτάνουν στον δέκτη από διαφορετικά μονοπάτια ανακλάσεων, και άραμε διαφορετική παρουσία διαφοράς φάσης και χρονικής καθυστέρησης, αλλά και παρουσία αμαξιών και κινούμενων επιφανειών. Ο ίδιος ο δέκτης μπορεί να κινείται, και άρα έχουμε και πιθανή παρουσία φαινομένου Ντόπλερ. Έτσι, παρουσία αυτών των διαλείψεων στο κανάλι, προστίθενται μεγάλες απώλειες στο συνολικό path loss .

Ενδεικτικές τιμές είναι σ=9dB, 12dB, και άρα , με Z=1.645 έχουμε τις τιμές

X= 14.805dB και X= 19.74dB

Για την τιμή X=14.805dB, και για τα 8 GHz, οι τιμές της P_t για τα παραδείγματα των LEO ,MEO και GEO τροχιών που έχουμε βρίσκουμε 67dB, 101.4dB, και 106.4dB αντίστοιχα

Για X= 19.74dB, βλέπουμε στο σχήμα 5.6 την απαιτούμενη ισχύ εκπομπής, για τα 3 είδη τροχιών που είδαμε και για το ίδιο εύρος συχνοτήτων για να φανούν συγκεντρωμένα όλα τα στοιχεία :



Σχήμα 5.6 *η ισχύς εκπομπής (σε dB) συναρτήσει της συχνότητας για διαφορετικά ύψη σε συνθήκες NLOS*

Παρατηρούμε την πολύ μεγαλύτερη τιμή σε dB που απαιτείται να εκπέμψει ο δορυφόρος για να αντισταθμίσει τις απώλειες του καναλιού. Πρακτικά έως και 20 dB αύξηση σε σχέση με την ιδανική περίπτωση της απουσίας απωλειών.

5.3 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο, μελετήθηκε η επίδραση που έχουν στο σήμα η απόσταση που έχει να διανύσει το σήμα και η συχνότητα λειτουργίας του. Όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά στη θεωρία, υπάρχουν επιπλέον εξασθενίσεις που επιφέρει το κανάλι οι οποίες προκαλούν περαιτέρω μείωση της αφικνούμενης στάθμης ισχύος στο δέκτη. Αυτή τη μείωση και τη συνεπακόλουθη ανάγκη για αύξηση της στάθμης του σήματος εκπομπής στον δορυφόρο προσομοιώσαμε σε αυτό το κεφάλαιο, για διάφορες περιπτώσεις , με σχολιασμό των αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Με δεδομένο το κόστος που περιλαμβάνει η κατασκευή, η εκτόξευση και η συντήρηση ενός δορυφόρου γίνεται αυτονόητο, ότι δεν είναι επιτρεπτή η χρήση κεραίας με μικρότερη ισχύ εξόδου ,ή με μικρότερο κέρδος από το απαιτούμενο λόγω κακής εκτίμησης, ή υποτίμησης των απωλειών που μπορεί να προκύψουν κατά την διάδοση του σήματος.

Επίσης τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην επίγεια διάδοση, που ποικίλουν ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας , το ύψος του εδάφους, και άλλα χαρακτηριστικά που αναλύθηκαν στη θεωρία, απαιτούν την προσοχή του μηχανικού που θέλει να σχεδιάσει επίγειο κανάλι, όχι μόνο λόγω πιθανών προβλημάτων ή περιορισμών ,αλλά και διευκολύνσεων σε ορισμένες περιπτώσεις (διάδοση πέρα από τον ορίζοντα με εκμετάλλευση της ιονοσφαιρικής ανάκλασης)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την εργασία μελετήθηκαν οι παράμετροι λειτουργίας ενός δορυφορικού συστήματος, αρχίζοντας με μια γενική εισαγωγή στην ιστορία των τηλεπικοινωνιών. Αναφέρθηκαν τα χαρακτηριστικά του ασύρματου καναλιού καθώς και των εφαρμογών του που έχουν πλέον σχέση με την καθημερινότητα του ανθρώπου. Ακολούθησε η περιγραφή του δορυφορικού συστήματος, του επίγειου τομέα του και αναλυτικότερα του ό του δορυφορικού, όπου αναλύθηκε από τη μία η ίδια η κάψουλα , με τα όργανα μέτρησής της και τον εξοπλισμό της καθώς και η ίδια η τροχιά των δορυφόρων, με τις διάφορες κατηγοριοποιήσεις της και ιδιότητές της. Γίνεται παρουσίαση των δορυφορικών ζεύξεων και μελετάται το περιβάλλον μέσα στο οποίο λαμβάνει χώρα μια σύνδεση. Στη περιγραφή του ασύρματου καναλιού μελετήθηκαν οι διάφορες ζώνες συχνότητας και η φυσική τους συμπεριφορά, δηλαδή οι ιδιότητες, ενός ραδιοσήματος. Στη συνέχεια το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στους μηχανισμούς διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και στους μηχανισμούς που διέπουν την διάδοση του σήματος, που

ως αποτέλεσμα έχουν τις διάφορες εξασθενήσεις που υφίσταται το σήμα λόγω φαινομένων της ατμόσφαιρας καθώς και άλλων επιδράσεων.

Γίνεται έπειτα μια εκτενής αναφορά στις διαλείψεις ,με μια πιο αναλυτική ματιά και στην ταξινόμησή τους. Στη συνέχεια γίνεται μια κατηγοριοποίηση των διαλείψεων αυτών με βάση τα χαρακτηριστικά τους.

Όλα αυτά τα φαινόμενα που επιδρούν στο σήμα εξηγήθηκε ότι δεν έχουν ντετερμινιστική συμπεριφορά και έτσι δημιουργείται ανάγκη χρήσης στατιστικών μοντέλων που επιτρέπουν μία ρεαλιστική περιγραφή του σήματος. Ακολουθεί η στατιστική αναπαράσταση των καναλιών με διαλείψεις χρησιμοποιώντας τις βασικότερες κατανομές που συναντώνται στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Κάθε κατανομή ανταποκρίνεται σε διαφορετικό σενάριο λειτουργίας. Το συμπέρασμα είναι ότι πρέπει το περιβάλλον και οι συνθήκες να λαμβάνονται υπόψη , ώστε να είναι δυνατόν η σωστή χρήση των κατανομών και γενικά των μαθηματικών παραμέτρων του προβλήματος.

Ακολουθεί η προσομοίωση στην οποία συνοψίζονται όλες οι πληροφορίες που αναλύθηκαν σε αυτή την εργασία. Παρουσιάζεται η επίδραση στη ποιότητα λειτουργίας, στο ληφθέν από το δέκτη σήμα της απόστασης και της συχνότητας λειτουργίας από τη μία, που είναι γνώσεις ντετερμινιστικές, αλλά κυρίως φαίνεται η επίπτωση των παραμέτρων που σχετίζονται είτε με τις συνθήκες του καναλιού, όπως διακυμάνσεις της τροπόσφαιρας, είτε με τη θέση και τη ταχύτητα του δέκτη. Αυτά δείχνουν ότι η σύνδεση που επιτυγχάνεται, διακατέχεται από φαινόμενα τα οποία είναι δυναμικά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] “Digital Communication Over Fading Channels”,Authors: Marvin K. Simon, Mohamed-Slim Alouini , ISBN 0-471-20069-7

[2] “The Mobile Radio Propagation Channel”, Author: J.D.Parsons, second edition,Wiley,ISBN 0-470-84152-4

[3] “Interscience Introduction to RF Propagation”, Author: John S. Seybold,2005, Wiley, ISBN-13 978-0-471-65596-1

[4] “Satellite Communications”, Author: Dennis Roddy, McGraw Hill, third Edition

[5] “Wireless Communications”, Author :Andrea Goldsmith,2005, Cambridge University Press

[6] “Συστήματα Ευρείας Εκπομπής”, Σταύρος Κωτσόπουλος, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών

[7] Διαδίκτυο: www.wikipedia.com