

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Τμήμα: Ψηφιακών Συστημάτων

ΠΜΣ: Ψηφιακές Επικοινωνίες και Δίκτυα



**ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΑΥΛΟΥ ΓΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιμέλεια : Παπααύλου Χαράλαμπος

Επιβλέπων : Αθανάσιος Κανάτας, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2010

*Στην οικογένειά μου,
με ιδιαίτερη εκτίμηση και αγάπη*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αλματώδης ανάπτυξη των κινητών δορυφορικών δικτύων (Mobile Satellite Service, MSS) που παρατηρείται στις μέρες μας έχει κάνει επιτακτική την ανάγκη για περαιτέρω μελέτη πάνω στα χαρακτηριστικά του διαύλου κινητών δορυφορικών επικοινωνιών, με σκοπό την δημιουργία καλύτερων και πιο αποδοτικότερων κινητών δορυφορικών συστημάτων.

Αντικείμενο της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας είναι η μελέτη των μοντέλων διαύλου που χρησιμοποιούνται στα δορυφορικά συστήματα κινητών επικοινωνιών.

Αρχικά στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή-ιστορική αναδρομή πάνω στην εξέλιξη των κινητών δορυφορικών επικοινωνιών. Κατόπιν περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά που διέπουν τις κινητές δορυφορικές επικοινωνίες καθώς επίσης ,πραγματοποιείται και μια συνοπτική περιγραφή των σημαντικότερων δορυφορικών συστημάτων κινητών επικοινωνιών, που υπάρχουν μέχρι αυτήν την στιγμή στην τηλεπικοινωνιακή αγορά.

Στην συνέχεια στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μια αναλυτική περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών του διαύλου κινητών δορυφορικών επικοινωνιών. Περιγράφονται οι βασικοί μηχανισμοί διάδοσης του δορυφορικού σήματος και οι σημαντικότερες εξασθενίσεις που υφίσταται το δορυφορικό σήμα κατά την διάδοσή του στο εκάστοτε περιβάλλον.

Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση-σύγκριση των διαθέσιμων εμπειρικών μοντέλων που αφορούν στον υπολογισμό του απαιτούμενου περιθωρίου ισχύος για αγροτικά , ημιαστικά και αστικά περιβάλλοντα, όπου για την καλύτερη μελέτη τους πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση τους με την χρήση του λογισμικού matlab για διαφορετικά σενάρια διάδοσης. Ακόμη γίνεται μια παρουσίαση των αναλυτικών και στατιστικών μοντέλων που υπάρχουν μέχρι αυτήν την στιγμή στην βιβλιογραφία.

Τέλος παρουσιάζεται ένα μοντέλο MIMO δίαυλου όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ικανοποιητικά σε επίγειες κινητές δορυφορικές επικοινωνίες

Λέξεις Κλειδιά: Mobile Satellite Service (MSS), Channel Models, Radio Propagation

ABSTRACT

The rapid growth of the Mobile Satellite Service (MSS), which has been noticed nowadays, has created an urgent need for further study of the characteristics of the mobile satellite communication channel so that a better and more effective mobile satellite service could be developed.

This thesis elaborates on the models of the channel which are used in satellite systems of mobile communications.

Firstly, in Chapter One there is an introductory historical retrospection of the evolution of mobile satellite communication. Then, there is an account of the basic characteristics of mobile satellite communication, as well as a concise description of the most important satellite systems of mobile communication which have been used in the telecommunication market.

Next, in Chapter Two, there is a detailed analytical description of the basic characteristics of the mobile satellite communication channel. It is given an account of the basic propagation mechanisms of the satellite signal and its major attenuations which occur during its propagation in each environment.

Lastly, in Chapter Three, there is a comparative presentation of the available empirical models which concern the calculation of the necessary power margin for rural, semi-urban and urban environment, where for their optimum study their simulation was realized with the use of matlab software for different propagation options. In addition, there is an account of the analytical and statistical models which are currently used in this bibliography. Finally, a MIMO model of channel is presented, which can be satisfactorily used in earthly mobile satellite communication.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ Κανάτα Αθανάσιο, αναπληρωτή καθηγητή του Πανεπιστημίου Πειραιώς και εισηγητή του θέματος της μεταπτυχιακής διπλωματικής μου εργασίας, για την παρότρυνση του στην επιλογή του συγκεκριμένου θέματος, δίνοντας μου έτσι την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα σύγχρονο και υπό έρευνα πεδίο των τηλεπικοινωνιών.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Μανώλη Μιχαηλίδη υποψήφιο διδάκτορα του Πανεπιστημίου Πειραιώς για τις πολύτιμες συμβουλές του για την επιτυχή ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μου διπλωματικής.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την διαρκή υποστήριξη της μέχρι σήμερα και για την ενθάρρυνση της να συνεχίσω με τον ίδιο ζήλο και στο μέλλον.

Τέλος αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους με στήριξαν και μου συμπαραστάθηκαν σε όλη την διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Πειραιάς, Οκτώβριος 2010

Παπαπαύλου Χαράλαμπος

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Ευχαριστίες.....	5
Πίνακας σχημάτων.....	10
Συντομογραφίες.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΚΙΝΗΤΕΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ	15
1.1 Εισαγωγή.....	15
1.2 Κατηγορίες Κινητών Δορυφορικών Συστημάτων (Mobile Satellite Service).....	17
1.3 Δομή των Κινητών Δορυφορικών Δικτύων.....	19
1.4 Τροχιές Δορυφόρων στα Κινητά Δορυφορικά Δίκτυα.....	21
1.5 Ανάθεση συχνοτήτων στα Κινητά Δορυφορικά Συστήματα.....	26
1.6 Συστήματα Κινητών Δορυφορικών Επικοινωνιών με βάση τον τύπο τροχιάς.....	28
1.6.1 Συστήματα Γεωστατικών Δορυφόρων (Geostationary Satellite Systems).....	28
1.6.1.1 Inmarsat (3 ^{ης} & 4 ^{ης} Γενιάς).....	28
1.6.1.2 EutelTracs.....	29
1.6.1.3 Msat.....	29
1.6.1.4 Thuraya.....	30
1.6.1.5 S-UMTS.....	31
1.6.2 Συστήματα μη Γεωστατικών Δορυφόρων (Non Geostationary Satellite Systems).....	28
1.6.2.1 Iridium.....	31
1.6.2.2 GlobalStar.....	33
1.6.2.3 ICO Global Communications.....	34
1.6.3 Στρατοσφαιρικές Πλατφόρμες (High Altitude Platforms-Haps).....	34
1.7 Βιβλιογραφία.....	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΥΛΟΥ ΚΙΝΗΤΩΝ

ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ.....	38
2.1 Εισαγωγή.....	38
2.2 Γενικά Χαρακτηριστικά διαύλου Κινητών Δορυφορικών Επικοινωνιών	39
2.3 Βασικοί Μηχανισμοί διάδοσης του δορυφορικού σήματος	40
2.3.1 Ανάκλαση (Reflection)	41
2.3.2 Περίθλαση (Diffraction)	42
2.3.3 Σκέδαση (Scattering)	42
2.4 Οι Σημαντικότερες Εξασθενίσεις του σήματος (impairments).....	42
2.4.1 Επίδραση Σκίασης	42
2.4.2 Επίδραση Πολυδιαδρομικής διάδοσης.....	43
2.4.3 Απώλειες Ελευθέρου Χώρου (Free Space Loss).....	45
2.4.4 Τύποι Διαλείψεων.....	46
2.4.4.1 Διαλείψεις βασισμένες σε Πολυδιαδρομική Διασπορά Καθυστέρησης	46
2.4.4.2 Διαλείψεις βασισμένες σε Διασπορά Doppler.....	47
2.4.5 Επίδραση της Ατμόσφαιρας στην διάδοση του σήματος	48
2.4.5.1 Επίδραση της Τροπόσφαιρας.....	48
2.4.5.2 Συνθήκες “Καθαρού ουρανού” (Clear Sky).....	49
2.4.5.3 Διονοσφαιρική διάδοση (στροφή Faraday, Σπινθηρισμοί)	50
2.4.6 Θερμοκρασία θορύβου Ουρανού	51
2.4.6.1 Θερμοκρασία θορύβου Περιβάλλοντος	52
2.4.6.2 Ατμοσφαιρικός Θερμικός θόρυβος.....	52
2.4.6.3 Γαλαξιακός –Διαπλανητικός θόρυβος	53
2.4.6.4 Αποπόλωση (Depolarization)	53
2.5 Βιβλιογραφία.....	54

Κεφάλαιο 3^ο ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΑΥΛΟΥ ΓΙΑ ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ.....	55
3.1 Εισαγωγή και Κατηγορίες Μοντέλων	55
3.2 Εμπειρικά (Empirical) μοντέλα.....	56
3.2.1 Εξασθένιση λόγω βλάστησης.....	56
3.2.1.1 Το τροποποιημένο μοντέλο εκθετικής εξασθένισης (MED).....	57
3.2.1.2 Το μοντέλο Vogel & Goldhirsh	59
3.2.1.3 Το μοντέλο Roadside Vegetation Attenuation (Θ.Σοφός).....	60
3.2.2 Το μοντέλο Empirical roadside shadowing (ERS).....	61
3.2.3 Το μοντέλο ESA-Modified Empirical Roadside Shadowing(MERS).....	63
3.2.4 Το μοντέλο Combined Empirical Fading Model (CEFM).....	64
3.2.5 Το μοντέλο CCIR	65
3.2.6 Το μοντέλο Αστικού Περιβάλλοντος-Α.Κανάτας.....	66
3.2.7 Μοντέλα Μετάβασης Συχνοτήτων	67
3.2.7.1 Το μοντέλο Vogel & Goldhirsh.....	67
3.2.7.2 Το μοντέλο ESTEC.....	67
3.2.8 Σύγκριση των μοντέλων.....	67
3.3 Στατιστικά (Statistical) μοντέλα.....	75
3.3.1 Μοντέλα βασισμένα στις κατανομές Rayleigh- Rice- Lognormal.....	75
3.3.2 Μοντέλο Loo.....	81
3.3.3 Μοντέλο Suzuki.....	82
3.3.4 Μοντέλο Ολικής Σκίασης (Lutz).....	82
3.3.5 Μοντέλο Nakagami	84
3.3.6 Μοντέλο Norton's	85
3.3.7 Μοντέλο Corraza & Valataro.....	85
3.3.8 Μοντέλο Mehria-Hashemi	87
3.4 Αναλυτικά (Ντετερμινιστικά) μοντέλα	88
3.4.1 Τεχνικές Σάρωσης Ακτίνων (Ray-Tracing)	89
3.4.1.1 Τεχνικές Περίθλασης Ακμής	90
3.5 Μοντέλο Satellite MIMO Physical-Statistical.....	91
3.6 Βιβλιογραφία.....	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	97
4.1 Συμπεράσματα.....	97
4.2 Προτάσεις περαιτέρω μελέτης	98
Παράρτημα Α Κώδικες Προσομοίωσης με χρήση του λογισμικού MATLAB.....	99

Πίνακας Σχημάτων

- Εικόνα 1.1 Βασική δομή ενός Κινητού Δορυφορικού Δικτύου
- Εικόνα 1.2 Απεικόνιση της δίδυμης χρήσης ζεύξεων από ένα Κινητό Δορυφορικό Δίκτυο
- Εικόνα 1.3 Τροχιές Δορυφόρων για κινητά δορυφορικά συστήματα
- Πίνακας 1.1 Ζώνες Συχνοτήτων για Δορυφορικές Επικοινωνίες
- Εικόνα 1.4 Γεωστατικός δορυφόρος τύπου Inmarsat 4
- Εικόνα 1.5 Τερματικό BGAN νέας γενιάς
- Εικόνα 1.6 Κατευθυντική κεραία και τερματικό του συστήματος EutelTracs
- Εικόνα 1.7 Δορυφόρος του συστήματος Thuraya
- Εικόνα 1.8 Τερματικό και Ip modems thuraya νέας γενιάς
- Εικόνα 1.9 Δορυφορικό τηλέφωνο Iridium και εξοπλισμός OpenPort για IP υπηρεσίες
- Εικόνα 1.10 Iridium Constellation
- Εικόνα 1.11 Τερματικό tri-mode και Qualcomm data modem νέας γενιάς
- Εικόνα 1.12 GlobalStar Constellation
- Εικόνα 1.13 Αστερισμός MEO δορυφόρων του συστήματος ICO
- Εικόνα 1.14 Μελλοντική αρχιτεκτονική B3G δικτύου βασισμένο σε HAPs
- Εικόνα 2.1 Οι Βασικοί Μηχανισμοί Διάδοσης
- Σχήμα 3.1 Το μοντέλο του Weissberger σε τέσσερις διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων
- Σχήμα 3.2 Το μοντέλο Vogel & Goldhirsh
- Σχήμα 3.3 Το μοντέλο Roadside Vegetation Attenuation (Θ. Σοφός)
- Σχήμα 3.4 Περιθώριο ισχύος από το μοντέλο ERS σε συχνότητα 1500 MHz για γωνίες ανύψωσης μεταξύ 21ο και 60ο
- Σχήμα 3.5 Περιθώριο ισχύος από το μοντέλο MERS σε συχνότητα 1300 MHz για γωνίες ανύψωσης 20° έως 80°
- Σχήμα 3.6 Το μοντέλο CEFM για συχνότητα 1.3 GHz
- Σχήμα 3.7 Το μοντέλο CEFM για συχνότητα 2.45GHz
- Σχήμα 3.8 Μοντέλο Αστικού Περιβάλλοντος για συχνότητα 1800 MHz

Σχήμα 3.9 Σύγκριση των μοντέλων MED ,CCIR,Barts & Strutzman στα 1800 MHz και για απόσταση διαδρομής $0 < D < 14m$

Σχήμα 3.10 Σύγκριση των μοντέλων MED ,CCIR στα 1800 MHz και για απόσταση διαδρομής $14 < D < 400m$

Σχήμα 3.11 Σύγκριση των μοντέλων ERS,MERS,CEFΜ στα 1800 MHz και για πιθανότητα $P=1\%$

Σχήμα 3.12 Σύγκριση των μοντέλων ERS,MERS,CEFΜ στα 1800 MHz και για πιθανότητα $P=10\%$

Σχήμα 3.13 Σύγκριση των μοντέλων ERS,MERS,CEFΜ στα 1800 MHz και για πιθανότητα $P=20\%$

Πίνακας 3.1 Τιμές του περιθωρίου ισχύος Margin (dB) για τα μοντέλα ERS,MERS,CEFΜ στην L ζώνη.

Πίνακας 3.2 Τιμές του περιθωρίου ισχύος Margin (dB) για τα μοντέλα MERS,URBAN (Kanas) στην L ζώνη.

Σχήμα 3.14 Σύγκριση των μοντέλων MERS και URBAN(Kanas) στα 1800 MHz και για πιθανότητα $P=5\%$

Σχήμα 3.15 Σύγκριση των μοντέλων MERS και URBAN(Kanas) στα 1800 MHz και για πιθανότητα $P=10\%$

Σχήμα 3.16 Σύγκριση των μοντέλων MERS και URBAN(Kanas) στα 1800 MHz και για πιθανότητα $P=20\%$

Σχήμα 3.17 Η θεωρητική και προσομοιωμένη PDF της κατανομής Rayleigh

Σχήμα 3.18 Σύγκριση των PDF και CDF της κατανομής Rayleigh

Σχήμα 3.19 Θεωρητική και προσομοιωμένη PDF για δεδομένο SNR

Σχήμα 3.20 Η PDF της κατανομής Rice

Σχήμα 3.21 Η CDF (σε λογαριθμική κλίμακα) της κατανομής Rice

Σχήμα 3.22 Η PDF της Lognormal κατανομής

Σχήμα 3.23 Σύγκριση θεωρητικού και προσομοιωμένου BER για κανάλι Rayleigh

Σχήμα 3.24 Περίθλαση ακμής

Εικόνα 3.1 Περιβάλλον Cluster πλησίον του κινητού τερματικού

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

AMSS	Aeronautical Mobile Satellite Service
CDF	Cumulative Distribution Function
CDMA	Code Division Multiple Access
CEFM	Combined Empirical Fading Model
CN	Core Network
EHF	Extremely High Frequency
ERS	Empirical Roadside Shadowing
ESA	European Space Agency
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FES	Fixed Earth Station
FSL	Free Space Loss
GEO	Geostationary Earth Orbit
GES	Gateway Earth Station
GMDSS	Global Maritime Distress and Safety System
GO	Geometrical Optics
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
GTD	Geometrical Theory of Diffraction
HAPS	High Altitude Platforms
HEO	High Elliptical Orbit
ITU	International Telecommunications Union
ITU-R	International Telecommunication Union Radiocommunication sector
LEO	Low Earth Orbit
LES	Land Earth Station
LMSS	Land Mobile Satellite Service
LOS	Line Of Sight
MED	Modified Exponential Decay
MEO	Medium Earth Orbit
MERS	Modified Empirical Roadside Shadowing

MIMO	Multiple Input-Multiple Output
MMSS	Maritime Mobile Satellite Service
MSS	Mobile Satellite Service
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCC	Network Control Center
PDF	Probability Density Function
PO	Physical Optics
PSTN	Public Subscriber Telephone Network
SCC	Satellite Control Center
S-UMTS	Satellite Universal Mobile Telecommunication Systems
T-UMTS	Terrestrial Universal Mobile Telecommunication Systems
UHF	Ultra High Frequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunication Systems
UTD	Uniform Theory of Diffraction
WSS	Wide Sense Stationary

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

Η σελίδα είναι σκόπιμα κενή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΚΙΝΗΤΕΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

1.1 Εισαγωγή

Η ιστορία των κινητών δορυφορικών επικοινωνιών ξεκίνησε σχεδόν παράλληλα με αυτή των δορυφορικών επικοινωνιών. Στην διετία 1963-1964 εκτοξεύτηκαν από την NASA οι Sylcom II και Sylcom III, οι πρώτοι γεωσύγχρονοι γεωστατικοί δορυφόροι όπου χρησιμοποιήθηκαν για την παροχή αρχικά σταθερών και μετέπειτα κινητών δορυφορικών επικοινωνιών. Ο πρώτος κινητός δορυφορικός σταθμός εγκαταστάθηκε το 1964 πάνω στο κατάστρωμα του πλοίου Kingsport USNS το οποίο είχε τροποποιηθεί από το αμερικάνικο πολεμικό ναυτικό ώστε να μπορεί να μεταφέρει μια παραβολική κεραία διαμέτρου 9.1 m με σκοπό να μπορεί να συνδέεται με τους δορυφόρους Sylcom. Το τερματικό αυτό αποτέλεσε και τον πρώτο σε παγκόσμια κλίμακα πραγματικό κινητό σταθμό. Αν και η χρήση του συγκεκριμένου δορυφορικού σταθμού πάνω στο πλοίο γνώρισε μεγάλη επιτυχία καθώς επιβεβαίωσε την χρησιμότητα των γεωστατικών δορυφορικών σταθμών, η εφαρμογή δορυφορικών υπηρεσιών σε πλοία κρίθηκε μη πρακτική λόγω του μεγάλου μεγέθους της δορυφορικής κεραίας. Το 1971 η ITU στην Παγκόσμια Διάσκεψη Τηλεπικοινωνιών (WARC-71) προσδιόρισε το φάσμα για κινητές δορυφορικές επικοινωνίες με την ανάθεση των συχνοτήτων 1.5/1.6 GHz για θαλάσσιες και αεροναυτικές υπηρεσίες. Το σημαντικότερο όμως βήμα για την ανάπτυξη ενός πραγματικού κινητού δορυφορικού συστήματος πραγματοποιήθηκε το 1976 με την εκτόξευση των τριών δορυφόρων MARISAT από τις ΗΠΑ. Οι συγκεκριμένοι δορυφόροι τοποθετήθηκαν σε τροχιές πάνω από τον Ατλαντικό, Ειρηνικό και Ινδικό ωκεανό και παρείχαν υβριδικές, στρατιωτικές και εμπορικές υπηρεσίες σε πλοία σε συχνότητες UHF και L band 1.5/1.6 GHz (downlink/uplink). [1]

Παράλληλα στις 9 Ιουλίου 1976 πραγματοποιήθηκε η πρώτη επίσημη τηλεφωνική κινητή δορυφορική κλήση στον κόσμο ανάμεσα στο πετρελαιοαγωγό πλοίο “Deep Sea Explorer “ το οποίο βρίσκονταν κοντά στις ακτές της

Μαγαδασκάρης και την πετρελαϊκή εταιρεία Phillips στην Οκλαχόμα των ΗΠΑ, χρησιμοποιώντας γεωστατικούς δορυφόρους του συστήματος Marisat. [1]

Αυτοί οι δορυφόροι αποτέλεσαν το πρώτο εμπορικό κινητό δορυφορικό σύστημα με διεθνή κάλυψη με την ονομασία Inmarsat A (Φεβρουάριος 1982) [2] εγκαινιάζοντας με αυτόν τον τρόπο την 1^η γενιά κινητών δορυφορικών δικτύων.

Στις 16 Ιουλίου 1979 ιδρύθηκε η Διεθνής Θαλάσσια Δορυφορική υπηρεσία (Inmarsat) με την συμμετοχή 29 χωρών με έδρα το Λονδίνο. Αρχικά προσφέρονταν μόνο υπηρεσίες επικοινωνίας φωνής στην κοινότητα του εμπορικού ναυτικού, ενώ αργότερα προστέθηκαν υπηρεσίες δεδομένων και επίγεια φορητά τερματικά.

Το ίδιο έτος αναπτύχθηκε και το Διεθνές σύστημα Θαλάσσιου κινδύνου και Ασφάλειας (Global Maritime Distress and Safety System, GMDSS) λόγω της ανάγκης για ασφάλεια στις θαλάσσιες μεταφορές. Η ουσιαστική ισχύς των κινητών δορυφορικών επικοινωνιών πηγάζει από την δυνατότητα που έχουν να προσφέρουν υπηρεσίες σε αχανείς εκτάσεις, όπου τέτοιες υπηρεσίες δεν θα μπορούσαν να παρασχεθούν αποδοτικά από επίγεια συστήματα, είτε λόγω γεωγραφικής περιοχής (όπως σε περιοχές ωκεανών), είτε λόγω έλλειψης ικανοποιητικής υποδομής (π.χ σε αραιοκατοικημένες ή υπό ανάπτυξη περιοχές).

Τα επόμενα χρόνια (WARC-92) έγιναν επιπρόσθετες αναθέσεις συχνοτήτων σε ένα ευρύ φάσμα με συχνότητες όπως 1.5/1.6 GHz, 1.6/1.4 GHz, 2.5/2.6 GHz καθώς και 1.9/2.1 GHz για τα Little LEOs δορυφορικά συστήματα. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη επίγειων και αεροναυτικών κινητών δορυφορικών δικτύων και είχε σαν αποτέλεσμα την απαρχή λειτουργίας πολλών νέων κινητών δορυφορικών συστημάτων. Στα τέλη της δεκαετίας του 80' είχαμε τον σχεδιασμό νέων μη γεωστατικών συστημάτων όπως το Globalstar και το Iridium που λειτουργούν σε συχνότητες κάτω του 1 GHz.

Στην διετία 1990-1992 εγκαινιάστηκε η 2^η γενιά κινητών δορυφορικών δικτύων με την είσοδο σε χρήση των δορυφόρων Inmarsat II παρέχοντας εκτός από θαλάσσιες, επίγειες και αεροναυτικές υπηρεσίες. Κατόπιν το 1995 μπήκαμε στην 3^η γενιά κινητών δορυφορικών επικοινωνιών με τους δορυφόρους Inmarsat III για να φτάσουμε τελικά το 2005 στους Inmarsat IV οι οποίοι είναι μέχρι και 60

φορές πιο ισχυροί από τους Inmarsat III και με προβλεπόμενη διάρκεια ζωής μέχρι και το 2020 .[8]

Τέλος το 2009 η Ευρωπαϊκή επιτροπή ύστερα από διαγωνισμό επέλεξε δύο παρόχους κινητών Δορυφορικών επικοινωνιών τους Inmarsat Ventures και Solaris Mobile Limited για την διάθεση καινοτόμων κινητών δορυφορικών υπηρεσιών μέσω ενός φάσματος αποκλειστικής χρήσης όπου ενδέχεται να επιτευχθεί κάλυψη για τουλάχιστον 60 % του εδάφους της Ε.Ε. [9]

Συνοψίζοντας τα δορυφορικά συστήματα κινητών επικοινωνιών είναι ικανά να παρέχουν υπηρεσίες φωνής και δεδομένων σε παγκόσμια κλίμακα σε ένα μεγάλο αριθμό τερματικών διαφορετικού τύπου, σε ξηρά θάλασσα και αέρα. Τα συστήματα αυτά συνήθως χωρίζονται ανάλογα με τον τύπο της τροχιάς των δορυφόρων τους, δηλαδή σε GEO, MEO, LEO συστήματα. Παραδείγματα συστημάτων σε γεωστατική τροχιά είναι του Inmarsat, Eutelsat, Msat και σε μη γεωστατικές τροχιές όπως εκείνα του Iridium, GlobalStar, ICO κτλ. Τα τελευταία χρόνια λόγω της μεγάλης ανάπτυξης των προδιαγραφών για τα συστήματα 3^{ης} γενιάς έχει προταθεί η ανάπτυξη δορυφορικών κινητών επικοινωνιών 3^{ης} γενιάς είτε από γεωστατικούς δορυφόρους (S-UMTS) είτε από στρατοσφαιρικές πλατφόρμες (High Altitude Platforms-HAPS).[2]

Επίσης στις μέρες μας φάνηκε επιτακτική η ανάγκη για ενσωμάτωση των Κινητών Δορυφορικών Δικτύων με τα επίγεια δίκτυα κινητής τηλεφωνίας παρέχοντας αρχιτεκτονικές υβριδικών συστημάτων εγκαινιάζοντας έτσι την μελλοντική 4^{ης} γενιά κινητών δορυφορικών δικτύων. [6]

1.2 Κατηγορίες Κινητών Δορυφορικών Συστημάτων (Mobile Satellite Service MSS)

Με τον όρο Κινητά Δορυφορικά Συστήματα (Mobile Satellite Service) εννοούμε ένα σύστημα ραδιοεπικοινωνίας :

- μεταξύ κινητών επίγειων σταθμών (Earth stations) και ενός ή περισσότερων διαστημικών σταθμών.
- μεταξύ διαστημικών σταθμών που χρησιμοποιούνται για την παροχή κινητών δορυφορικών υπηρεσιών

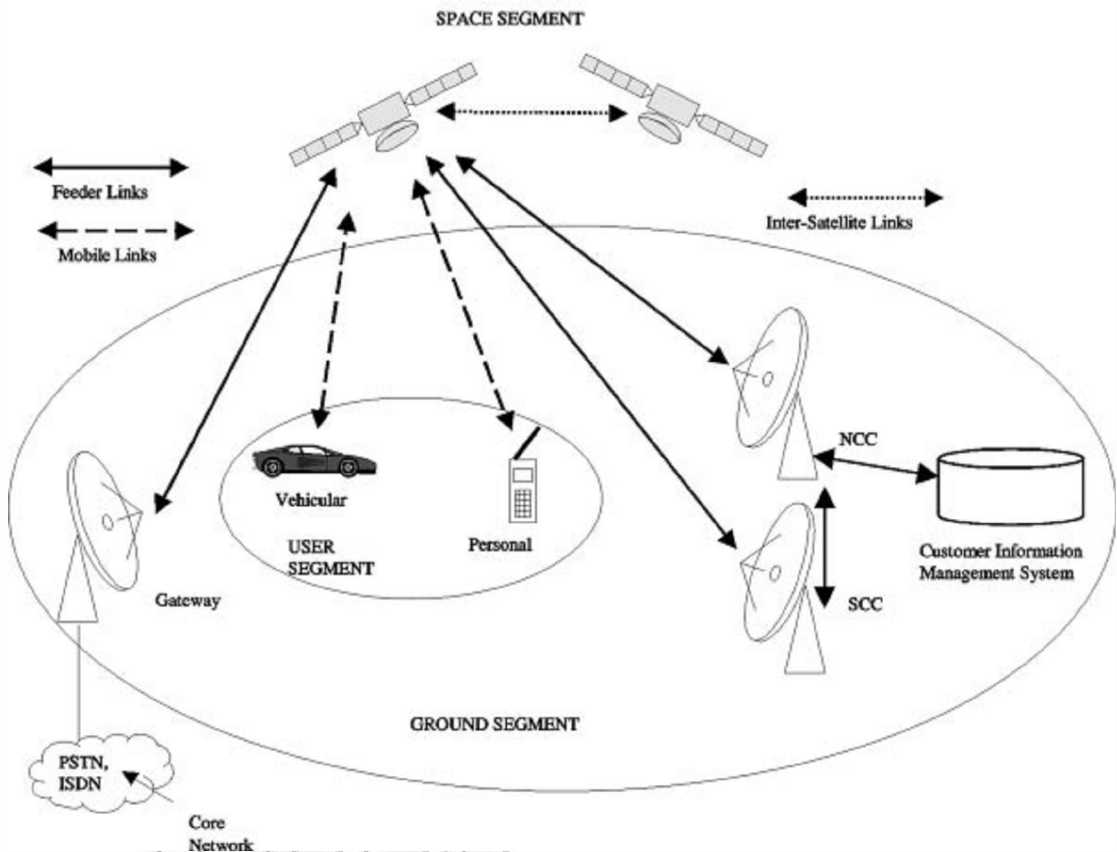
- μεταξύ κινητών επίγειων σταθμών διαμέσου ενός ή περισσότερων διαστημικών σταθμών

Τα κινητά δορυφορικά συστήματα διακρίνονται στις παρακάτω τρεις βασικές κατηγορίες:

- **Κινητό δορυφορικό σύστημα εδάφους** (Land Mobile Satellite Service LMSS) ορίζεται το σύστημα στο οποίο οι κινητοί σταθμοί εδάφους είναι τοποθετημένοι ή κινούνται πάνω στην ξηρά.
- **Θαλάσσιο κινητό δορυφορικό σύστημα** (Maritime Mobile Satellite Service MMSS) ορίζεται το σύστημα στο οποίο οι κινητοί σταθμοί εδάφους είναι τοποθετημένοι πάνω στο κατάστρωμα των πλοίων. Οι σταθμοί διάσωσης και έκτακτης ανάγκης EPIRBS που χρησιμοποιούνται από πλοία ανήκουν επίσης σε αυτήν την κατηγορία.
- **Αεροναυτικό κινητό δορυφορικό σύστημα** (Aeronautical Mobile Satellite Service, AMSS) ορίζεται το σύστημα στο οποίο οι κινητοί σταθμοί εδάφους είναι τοποθετημένοι πάνω στην πλατφόρμα κάποιου αεροσκάφους. Οι σταθμοί διάσωσης και έκτακτης ανάγκης EPIRBS που χρησιμοποιούνται στα αεροπλάνα ανήκουν επίσης σε αυτήν την κατηγορία.

1.3 Δομή των Κινητών Δορυφορικών Δικτύων

Η βασική Δομή ενός MSS δικτύου πρόσβασης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 1.1 Βασική δομή ενός Κινητού Δορυφορικού Δικτύου

Στην απλούστερη μορφή της, η αρχιτεκτονική δικτύου αποτελείται από τρία τμήματα: 1) το τμήμα χρηστών 2) το επίγειο τμήμα 3) το διαστημικό τμήμα.

Το τμήμα χρηστών περιλαμβάνει τις τερματικές μονάδες από το χρήστη. Τα χαρακτηριστικά ενός τερματικού συσχετίζονται ιδιαίτερα με το τομέα εφαρμογής και το λειτουργικό του περιβάλλον. Τα τερματικά μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες:

- ❖ Κινητά τερματικά – τα κινητά τερματικά είναι εκείνα που υποστηρίζουν την πλήρη κινητικότητα κατά τη λειτουργία τους (π.χ συσκευές χειρός και φορητές palm-top συσκευές)

❖ Φορητά τερματικά - τα φορητά τερματικά έχουν χαρακτηριστικά παρόμοιων διαστάσεων με αυτά ενός χαρτοφύλακα ή ενός lap-top. Όπως το όνομα υπονοεί, αυτά τα τερματικά μπορούν να μεταφερθούν από μια περιοχή σε άλλη, εντούτοις, η λειτουργία τους εν κινήσει δεν θα υποστηριχθεί κανονικά

Το επίγειο τμήμα περιλαμβάνει τρία κύρια στοιχεία δικτύου:

1) τις πύλες οι οποίες αποκαλούνται πολλές φορές σταθεροί επίγειοι σταθμοί (FES), **2)** το κέντρο ελέγχου δικτύου (NCC) και **3)** το κέντρο ελέγχου του δορυφόρου (SCC). Οι πύλες παρέχουν τα σταθερά σημεία εισόδων στο δορυφορικό δίκτυο πρόσβασης με τον εφοδιασμό μιας σύνδεσης στα υπάρχοντα συστήματα δικτύου (CN), όπως το δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο (PSTN) .

Το διαστημικό τμήμα παρέχει την σύνδεση μεταξύ των πυλών και των χρηστών του δικτύου. Επίσης το διαστημικό τμήμα αποτελείται από αστερισμό ενός ή περισσοτέρων δορυφόρων με συγκεκριμένες τροχιές και παραμέτρους.[3]

Μέχρι τώρα μελετήσαμε τα βασικά τμήματα πάνω στα οποία βασίζεται η αρχιτεκτονική ενός κινητού δορυφορικού δικτύου παρακάτω θα δούμε τον τρόπο λειτουργίας του και διάφορες σημαντικές παραμέτρους που το συνοδεύουν.

Ο σημαντικότερος παράγοντας που κάνει τα κινητά δορυφορικά συστήματα να διαφέρουν από τα σταθερά είναι ότι τα πρώτα χρησιμοποιούν δύο ζεύγη συχνοτήτων εν αντιθέσει με τα σταθερά που χρησιμοποιούν μόνο μία.

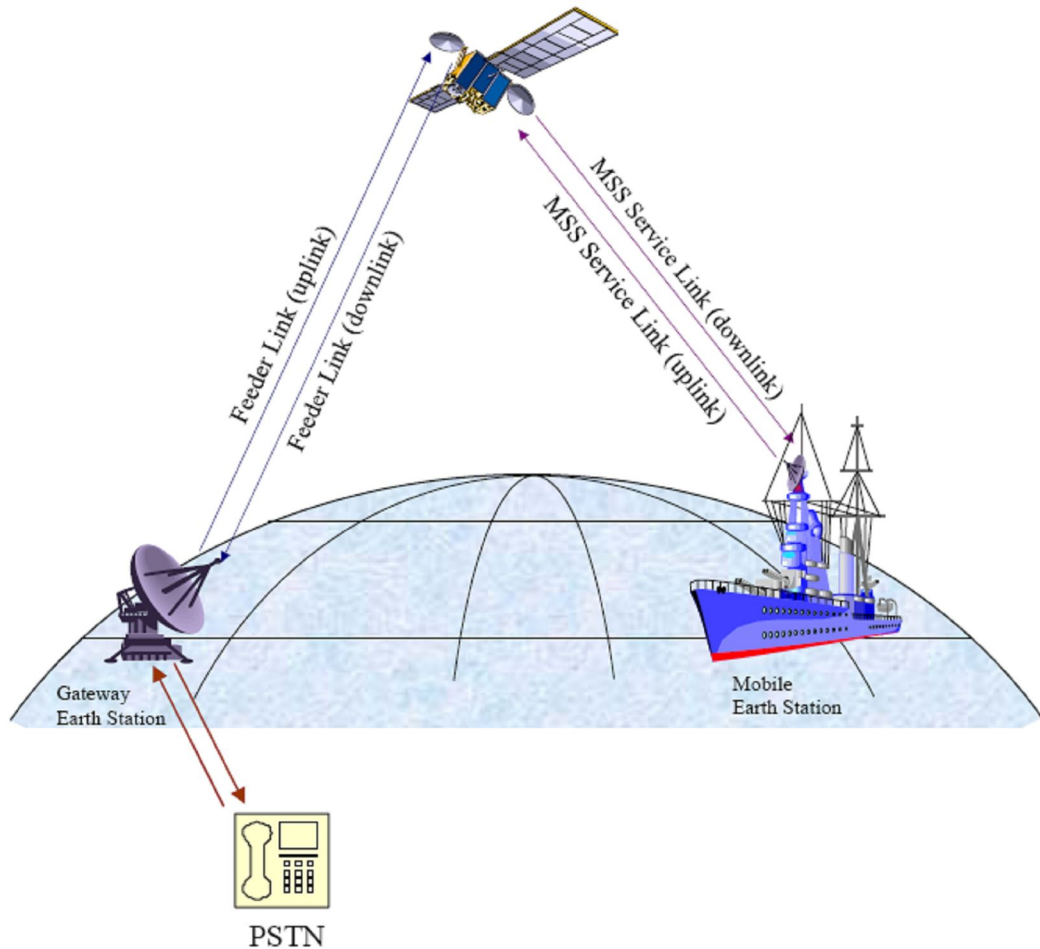
Η πρώτη ζεύξη καλείται ζεύξη υπηρεσίας και είναι η ζεύξη μεταξύ του κινητού δορυφορικού συστήματος και του δορυφόρου ,ενώ η δεύτερη ζεύξη καλείται ζεύξη τροφοδοσίας και είναι η ζεύξη μεταξύ ενός σταθερού σταθμού τροφοδοσίας και του δορυφόρου.[3]

Η λειτουργία ενός κινητού δορυφορικού δικτύου έχει ως εξής:

Ο κινητός σταθμός εδάφους ή το τερματικό εκπέμπει στην άνω ζεύξη υπηρεσίας (από τη γη στον Δορυφόρο) και έπειτα ο δορυφόρος επαναλαμβάνει την μετάδοση προς τα κάτω(από Δορυφόρο προς την γη) ζεύξη τροφοδοσίας στο σταθμό εδάφους (GES).Στην συνέχεια ο σταθμός εδάφους (GES) μεταφέρει την κλήση ή τα δεδομένα μέσω του τοπικού σταθερού τηλεφωνικού δικτύου PSTN προς το κατάλληλο παραλήπτη.

Στην αντίστροφη κατεύθυνση ο σταθμός εδάφους (GES) λαμβάνει την κλήση ή τα δεδομένα μέσω του σταθερού τηλεφωνικού δικτύου όπου πρέπει να

μεταδοθούν στο κινητό σταθμό εδάφους. Κατόπιν εκπέμπει στην άνω ζεύξη τροφοδοσίας προς τον δορυφόρο, και ο δορυφόρος επαναλαμβάνει την μετάδοση στην κάτω ζεύξη υπηρεσίας προς τον κινητό σταθμό εδάφους.

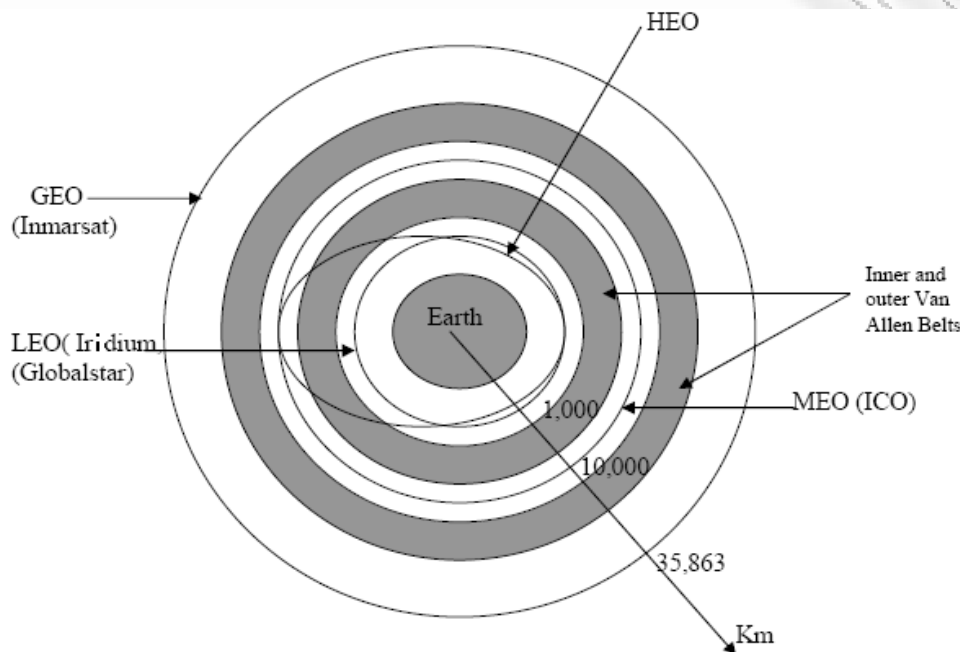


Εικόνα 1.2: Απεικόνιση της δίδυμης χρήσης ζεύξεων από ένα Κινητό Δορυφορικό Δίκτυο

1.4 Τροχιές Δορυφόρων στα Κινητά Δορυφορικά Δίκτυα

Η τροχιά του δορυφόρου είναι καθοριστική για σημαντικές παραμέτρους ενός συστήματος κινητού δορυφορικού δικτύου όπως η επιφάνεια κάλυψης, η κλίση, η χρονική καθυστέρηση και οι παρεμβολές. Τα κινητά δορυφορικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιήσουν όλους τους τύπους της τροχιακής διάταξης των δορυφόρων: γεωστατικές τροχιές (Geostationary Earth Orbit, GEO), μεσαίου

υψομέτρου (Medium Earth Orbit, MEO) ,χαμηλού υψομέτρου (Low Earth Orbit,LEO) και τέλος Υψηλές Ελλειπτικές Τροχιές (High Elliptical Orbit, HEO)



Εικόνα 1.3 Τροχιές Δορυφόρων για κινητά δορυφορικά συστήματα

Γεωστατικές Τροχιές (Geostationary Earth Orbit, GEO)

Πρόκειται για τις πιο γνωστές κυκλικές τροχιές με μηδενική κλίση του τροχιακού επιπέδου ως προς το ισημερινό επίπεδο με τους δορυφόρους GEO να τοποθετούνται σε ύψος 35876 Km και με φορά περιστροφής όπως της γης. Η περίοδος της τροχιάς είναι ίδια με την περιστροφή της γης γύρω από τον εαυτό της και έτσι οι δορυφόροι φαίνονται σαν σταθερά σημεία στον ουρανό εξασφαλίζοντας συνεχή λειτουργία σαν ράδιο αναμεταδότες για την ορατή από τον δορυφόρο περιοχή της γης (43%).

Οι γεωστατικοί δορυφόροι αποτελούν την απλούστερη και ευκολότερη λύση για ένα κινητό δορυφορικό δίκτυο. [2]

Τα **Πλεονεκτήματα** των γεωστατικών τροχιών (με έμφαση στα κινητά δορυφορικά συστήματα) είναι τα εξής :

1. Τα φαινόμενα Doppler είναι αμελητέα

2. Καλή δομή ανάπτυξης του συστήματος (Τρεις ή τέσσερις δορυφόροι για παγκόσμια κάλυψη)
3. Παρέχουν κάλυψη για γεωγραφικά πλάτη 75° Νότια μέχρι 75° Βόρεια (επαρκής για τις πιο πυκνοκατοικημένες περιοχές του πλανήτη). [11]
4. Οι κινητοί σταθμοί και οι σταθμοί τροφοδοσίας χρειάζονται απλά συστήματα ευθυγράμμισης με τον δορυφόρο μια και που αυτός είναι σταθερός (ως προς αυτούς) στον ουρανό.
5. Η χρήση κατευθυντικών κεραιών στα κινητά τερματικά είναι ευκολότερη σε σχέση με τα μη γεωστατικά συστήματα
6. Δεν απαιτούνται μεταβιβάσεις από τους σταθμούς τροφοδοσίας σε άλλο δορυφόρο
7. Μεγάλη διάρκεια ζωής (γύρω στα 15 χρόνια)

Μειονεκτήματα:

1. Μεγάλες απώλειες κατά την διάδοση του σήματος ανάμεσα στο δορυφόρο και το σταθμό εδάφους (10 έως 30 dB σε σχέση με μη γεωστατικά δίκτυα).
2. Οι γωνίες ανύψωσης είναι χαμηλές (10°) όπου σε περιοχές με μεγάλο γεωγραφικό πλάτος ή σε περιοχές με πολλά βουνά αυτό αποτελεί σοβαρό πρόβλημα για τις κινητές επικοινωνίες
3. Η μεγάλη απόσταση δορυφόρου-χρήστη επηρεάζει τόσο την εκπεμπόμενη ισχύ όσο και το μέγεθος των κεραιών στο δορυφόρο ιδιαίτερα στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν τερματικά χειρός.
4. Μεγάλη καθυστέρηση στη διάδοση του σήματος περίπου 240ms συνολικά (για την άνω και κάτω ζεύξη) κάνοντας πρακτικά αδύνατη την χρήση τους για μετάδοση φωνής και άλλες διαδραστικές εφαρμογές
5. Υψηλό κόστος εκτόξευσης

Χαμηλές Κυκλικές Τροχιές (Low Earth Orbit, LEO)

Είναι κυκλικές τροχιές με κλίση του τροχιακού επιπέδου ως προς το ισημερινό επίπεδο με του δορυφόρους LEO να τοποθετούνται σε ύψος μεταξύ 500 Km και

2000 Km.H περίοδος της τροχιάς είναι περίπου 1 ½ ώρα. Όταν η κλίση φθάσει στις 90° τότε μιλάμε για πολικές τροχιές που εξασφαλίζουν ότι ο δορυφόρος θα περάσει από οποιοδήποτε σημείο της γης.. [2]

Τα **Πλεονεκτήματα** των χαμηλών κυκλικών τροχιών (με έμφαση στα κινητά δορυφορικά συστήματα) είναι τα εξής :

1. Ένα σύστημα (LEO) που χρησιμοποιεί τερματικά χειρός με παγκόσμιο roaming μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερος χρήσιμο σε περιοχές που δεν υπάρχει κάλυψη από κυβελωτά συστήματα. (πχ. περιοχές των πόλων)
2. Η σχετικά μικρή απόσταση μεταξύ των δορυφόρων και του επίγειου σταθμού έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη ισχύ καθώς και μικρότερο μέγεθος τερματικά χρήστη.
3. Η υψηλή ολίσθηση Doppler επιτρέπει σε ένα σύστημα (LEO) να χρησιμοποιείται για προσδιορισμό θέσης και εντοπισμό μέσω δορυφόρου.
4. Οι καθυστερήσεις διάδοσης είναι μικρές και έτσι δίνεται η δυνατότητα για πολλαπλές μεταπομπές του σήματος από δορυφόρο σε δορυφόρο.

Μειονεκτήματα:

1. Ένα κινητό δορυφορικό σύστημα που χρησιμοποιεί αυτήν την τροχιά απαιτεί ένα μεγάλο αριθμό δορυφόρων (66 Iridium) ώστε να παρέχει επαρκή κάλυψη με αποτέλεσμα να έχουμε υψηλό κόστος δικτύου
2. Η μικρή διάρκεια παρατηρησιμότητας του δορυφόρου απαιτεί επιπρόσθετους μηχανισμούς για μεταπομπές (handover) μεταξύ διαφορετικών δορυφόρων
3. Υπάρχουν ισχυρά φαινόμενα Doppler λόγω της γρήγορης κίνησης των δορυφόρων
4. Η μικρή διάρκεια ζωής (3-7 χρόνια) που οφείλεται στην ατμοσφαιρική επίδραση και στην ακτινοβολία από την ζώνη Van Allen είναι ένα μεγάλο πρόβλημα για τους δορυφόρους LEO
5. Λόγω της γρήγορης κίνησης των δορυφόρων έχουμε αυξημένο πρόβλημα εστίασης στις κεραίες

Τέλος υπάρχει ένας περαιτέρω διαχωρισμός των LEOs συστημάτων **α)** σε little LEOs που έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν σε συχνότητες κάτω του 1GHz με χαμηλό εύρος για υπηρεσίες(100bps)[1] **β)** Big LEOs όπου λειτουργούν σε συχνότητες πάνω από 1GHz με εύρος ζώνης για υπηρεσίες περίπου (1000bits/sec). Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται πρόσφατα για επικοινωνία με κινητά και προσωπικά τερματικά τα οποία για να λειτουργήσουν χρειάζονται ισχυρό σήμα.

Μέσου Υψόμετρου Κυκλικές Τροχιές (Medium Earth Orbit ,MEO)

Είναι κυκλικές τροχιές με κλίση του τροχιακού επιπέδου με τους δορυφόρους MEO να έχουν ύψος 10000Km. Έχουν το χαρακτηριστικό ότι βρίσκονται πάνω από τις επικίνδυνες για τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό του δορυφόρου ζώνες Van Allen αλλά πολύ πιο κοντά από τις γεωστατικές. Η περίοδος της τροχιάς τους είναι περίπου 8-10 ώρες. [2]

Τα **Πλεονεκτήματα** των μέσου υψόμετρου κυκλικών τροχιών (με έμφαση στην στα κινητά δορυφορικά συστήματα) είναι τα εξής :

1. Ένα σύστημα MEO απαιτεί περίπου 12 δορυφόρους οι οποίοι είναι πολύ λιγότεροι από την απαίτηση ενός LEO συστήματος
2. Έχουν υψηλές γωνίες ανύψωσης (45° - 55° για όλα τα γεωγραφικά πλάτη) καθιστώντας τες ικανοποιητικές για κινητές δορυφορικές επικοινωνίες
3. Τα φαινόμενα Doppler σε σχέση με τις LEO είναι πολύ μικρά
4. Ένα σύστημα MEO μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερη κάλυψη (εξαρτώμενη από την κλίση) από ένα LEO άρα χρειάζονται λιγότερες μεταπομπές (handovers)
5. Οι δορυφόροι κινούνται σιγά σε σχέση με την περιστροφή της γης επιτρέποντας έτσι έναν απλούστερο σχεδιασμό συστήματος .

Μειονεκτήματα:

1. Οι δορυφόροι χρειάζονται υψηλότερη ισχύ μετάδοσης και κατάλληλες κεραιές για μικρότερα footprints

2. Μεγαλύτερες καθυστερήσεις σήματος (περίπου 70-80ms) σε σχέση με τα LEO.

Υψηλές Ελλειπτικές Τροχιές (High Elliptical Orbit, HEO)

Πρόκειται για ελλειπτικές τροχιές με κλίση περίπου 64° ως προς το ισημερινό επίπεδο και σε υψόμετρα που ξεκινούν από (περίγειο) τα 600-1000Km και φθάνουν (απόγειο) στα 40000Km. Η περίοδος της τροχιάς τους είναι περίπου $\frac{1}{2}$ μέρας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η Molnya(12 ώρες περίοδο) και η Tundra(24 ώρες περίοδο) που έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί από την πρώτη ΕΣΣΔ.

Τα **πλεονεκτήματα** αυτών των τροχιών έχουν ως εξής:

1. Η γωνία ανύψωσης στους HEO δορυφόρους παραμένει μεγάλη για το περισσότερο της 12ωρης περιόδου της παρατηρησιμότητας πράγμα το οποίο είναι ιδιαίτερα απαραίτητο για συνεχή κάλυψη σε περιοχές Ευρώπης –Ασίας παρέχοντας επίγειες κινητές δορυφορικές υπηρεσίες
2. Το υψόμετρο στο απόγειο συνδυάζει κάλυψη στους πόλους όπου χρειάζονται μόνο δύο LES για να υποστηρίξουν τα κινητά τερματικά

Μειονεκτήματα:

1. Μεγάλο μέγεθος κεραιών(6m) ιδίως στην περίπτωση της L ζώνης συχνοτήτων (1.5 GHz)
2. Πολύ μεγάλο υψόμετρο των δορυφόρων (στο απόγειο) που συνεπάγεται με προβληματικές ζεύξεις
3. Μεγάλες καθυστερήσεις διάδοσης
4. Μεγάλες ολισθήσεις Doppler λόγω της γρήγορης κίνησης των δορυφόρων

1.5 Ανάθεση Συχνοτήτων στα Κινητά Δορυφορικά Συστήματα

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις ζώνες συχνοτήτων που είναι διαθέσιμες για δορυφορικές επικοινωνίες και με γκρι φόντο οι ζώνες που έχουν θεσπιστεί από την ITU για Κινητές Δορυφορικές Επικοινωνίες..

Ζώνη	Εύρος Συχνοτήτων	Συνολικό Εύρος Ζώνης	Γενικές Εφαρμογές
L*	1 to 2 GHz	1 GHz	Mobile satellite services (MSS)
S*	2 to 4 GHz	2 GHz	MSS, NASA, deep space research
C	4 to 8 GHz	4 GHz	Fixed satellite service (FSS)
X	8 to 12.5 GHz	4.5 GHz	FSS, Military, terrestrial earth exploration and meteorological satellites
Ku	12.5 to 18 GHz	5.5 GHz	FSS, broadcast satellite service (BSS)
K	18 to 26.5 GHz	8.5 GHz	BSS, FSS
Ka	26.5 to 40 GHz	13.5 GHz	FSS

Πίνακας 1.1 Ζώνες Συχνοτήτων για Δορυφορικές Επικοινωνίες [10]

Η ITU έχει αναθέσει συχνότητες στην L και S ζώνη συχνοτήτων για κινητές δορυφορικές υπηρεσίες (MSS). Σε αυτές τις ζώνες συγκρινόμενες με υψηλότερες συχνότητες, υπάρχει ένας μεγάλος βαθμός διάθλασης και διείδυσης από φυσικά εμπόδια ,τέτοια όπως φυλλωσιές δέντρων και μη-μεταλλικά δομικά υλικά. Συνεπώς οι ζώνες αυτές είναι εξαιρετικά κατάλληλες για τη λειτουργία των κινητών δορυφορικών συστημάτων λόγω των ήπιων χαρακτηριστικών διάδοσης και της ανεπτυγμένης τεχνολογίας. Για μια ανάθεση συχνότητας σε μια συγκεκριμένη υπηρεσία ,υπάρχει μια ανάθεση σε μια ζώνη για downlink και μια για uplink. Η υψηλότερη ζώνη συνήθως ανατίθεται σε μια υψηλότερη συχνότητα καθώς οι υψηλότερες συχνότητες προσφέρουν μεγαλύτερη διασπορά ή απώλειες ελεύθερου χώρου (free space loss), από ότι οι χαμηλότερες συχνότητες αντίστοιχα. Ο μεγάλος όμως συνωστισμός τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών σε αυτές τις ζώνες συχνοτήτων και παράλληλα η ανάπτυξη κινητών δορυφορικών υπηρεσιών ευρείας ζώνης έχουν οδηγήσει τους σχεδιαστές κινητών δορυφορικών συστημάτων στην αναζήτηση νέων ζωνών συχνοτήτων. Αρκετά κινητά δορυφορικά συστήματα ευρείας ζώνης λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων C (6/4 GHz), Ku (11/12/13/14 GHz) και Ka (20/30 GHz) ενώ υπάρχει η τάση για τη χρήση ακόμα υψηλότερων ζωνών ,όπως στην ζώνη EHF (40/50GHz).[11]

Παραδείγματα συστημάτων που λειτουργούν σε τέτοιες συχνότητες είναι τα κινητά δορυφορικά δίκτυα σε πλοία (ESVs) στις ζώνες C, Ku καθώς και τα αεροναυτικά κινητά δορυφορικά δίκτυα της Boeing όπου λειτουργούν στην ζώνη Ka.

Τέλος, υπάρχουν και ζώνες συχνοτήτων κάτω από 1GHz όπου χρησιμοποιούνται μόνο για τη μεταφορά δεδομένων 2.8 έως 19.2 kbits/s (οι συγκεκριμένες ονομάζονται ζώνες “Little LEO”).

1.6 Συστήματα Κινητών Δορυφορικών Επικοινωνιών με βάση τον τύπο τροχιάς

1.6.1 Συστήματα Γεωστατικών Δορυφόρων (Geostationary Satellite Systems)

Τα δορυφορικά συστήματα κινητών επικοινωνιών όπως είδαμε πιο πάνω μπορούν να διαχωριστούν ανάλογα με το τύπο της τροχιάς, μια κατηγορία εξ αυτών είναι τα συστήματα γεωστατικών δορυφόρων (Geostationary Satellite Systems).

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται τα σημαντικότερα συστήματα γεωστατικών δορυφόρων καθώς και τα κύρια χαρακτηριστικά τους.

1.6.1.1 Inmarsat (3^{ης} & 4^{ης} Γενιάς)

Το δορυφορικό σύστημα Inmarsat αναπτύχθηκε το 1979 από τον οργανισμό Inmarsat που ιδρύθηκε για την παροχή αρχικά υπηρεσιών MSS σε πλοία. Το δορυφορικό σύστημα αποτελείται από 5 γεωστατικούς δορυφόρους τύπου Inmarsat III, 4 τύπου Inmarsat II (εφεδρικοί) καθώς και 4 νέας γενιάς τύπου Inmarsat IV.



Εικόνα 1.4-1.5 Γεωστατικός δορυφόρος τύπου Inmarsat 4 και τερματικό BGAN νέας γενιάς (δεξιά) [13]

Την τελευταία περίοδο η Inmarsat σε συνεργασία με την ESA θα προβούν σε εμπορική διαχείριση ενός νέου δορυφόρου του Alphasat ο οποίος πρόκειται να είναι έτοιμος μέχρι το 2012 [12] λειτουργώντας ως συμπλήρωμα στους δορυφόρους Inmarsat IV για την παροχή κάλυψης σε Ευρώπη, Μ.Ανατολή και Αφρική. Το σύστημα Inmarsat αποτελείται από διάφορα πρότυπα όπως Inmarsat – B,C, mini M, BGAN, fleet xx, καθένα από τα οποία παρέχουν υπηρεσίες όπως τηλεφώνου, fax, κινδύνου ασφάλειας(distress) καθώς και σύγχρονες όπως e-

mail, πληροφορίες καιρού σε πραγματικό χρόνο, επικοινωνίες για το πλήρωμα, τηλεμετρία σκάφους/μηχανής, αποστολή sms, βιντεοκλήσεις.

1.6.1.2 EutelTracs

Το EutelTracs είναι ένα GEO δορυφορικό σύστημα το οποίο έκανε την εμφάνιση του το 1991 σαν αποτέλεσμα της συνεργασίας των εταιριών Alcatel (Γαλλία) και Qualcomm (ΗΠΑ). Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί δορυφόρους του οργανισμού Eutelsat στην Ku ζώνη συχνοτήτων. Για την υλοποίηση της επικοινωνίας χρησιμοποιούνται δυο δορυφόροι, ένας τηλεπικοινωνιακός (messenger) και ένας άλλος (ranger) για τον εντοπισμό της θέσης του τερματικού. Οι δορυφόροι επικοινωνούν με τους σταθμούς εδάφους οι οποίοι με την σειρά τους συνδέονται με ένα πλήθος κέντρων διαχείρισης δικτύου SNMC που παρέχουν υπηρεσίες διασύνδεσης στους τελικούς χρήστες. Οι προσφερομενες υπηρεσίες εστιάζονται κυρίως στον τομέα των οδικών μεταφορών και υποστηρίζουν αποστολή/λήψη μηνυμάτων καθώς και σύστημα εντοπισμού θέσης. [14]



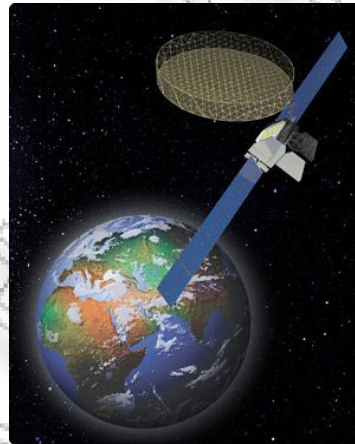
Εικόνα 1.6 Κατευθυντική κεραία και τερματικό του συστήματος EutelTracs

1.6.1.3 Msat

Το συγκεκριμένο σύστημα αναπτύχθηκε από τον Καναδά με σκοπό να παρέχει κάλυψη κυρίως σε περιοχές της βόρειας και Κεντρικής Αμερικής.[15] Το 1995 τίθεται σε λειτουργία ώστε να παράσχει υπηρεσίες κινητών δορυφορικών επικοινωνιών για χρήστες σε γη, θάλασσα και αέρα. Οι υπηρεσίες που προσφέρει είναι τηλεφωνικές κλήσεις, εντοπισμό θέσης, τηλεομοιοτυπία, κλήσεις δεδομένων. Ακόμα υπάρχει η δυνατότητα για τερματικά διπλής διαμόρφωσης για συνδυασμό με τα επίγεια συστήματα.

1.6.1.4 Thuraya

Το συγκεκριμένο σύστημα αναπτύχθηκε από την ομώνυμη εταιρεία όπου εδρεύει στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα και είναι πάροχος κινητών δορυφορικών επικοινωνιών με κάλυψη σε ένα μεγάλο ποσοστό χωρών ανά τον κόσμο. Το σύστημα αυτό ξεκίνησε την λειτουργία το 1997 και αποτελείται από 3 γεωστατικούς δορυφόρους (thuraya 1,2,3). Τα τερματικά είναι διπλής χρήσης όπου εκτός από το δορυφορικό δίκτυο thuraya μπορούν να λειτουργήσουν με τα υπάρχουσα επίγεια κυψελωτά συστήματα του GSM. Τα τερματικά έχουν την δυνατότητα τηλεφωνικών κλήσεων, δέκτη GPS, αποστολή/λήψη μηνυμάτων, πρόσβαση στο internet, όπου με την χρήση του νέας γενιάς δορυφορικό μόντεμ IP thuraya μπορούν να επιτευχθούν ταχύτητες μέχρι 444 kbit/s.



Εικόνα 1.7 Δορυφόρος του συστήματος Thuraya



Εικόνα 1.8 Τερματικό και Ip modems thuraya νέας γενιάς [16]

1.6.1.5 S-UMTS

Το S-UMTS αποτελεί ένα παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα κινητών επικοινωνιών 3ης γενιάς όπου λειτουργεί σε συχνότητες των 2 GHz και έχει σκοπό να παρέχει στους κινητούς χρήστες υπηρεσίες παρόμοιες με αυτές των επίγειων δικτύων. Τα τερματικά του συγκεκριμένου συστήματος μπορεί να είναι κινητά, επί οχήματος ή σταθερά τερματικά. Τα σταθερά τερματικά χρησιμοποιούν γεωστατικούς δορυφόρους σε εν αντιθέσει με τα κινητά που χρησιμοποιούν LEO δορυφόρους.[17].Ο οργανισμός ETSI που έχει συσταθεί για τις προδιαγραφές του S-UMTS σκοπεύει να πετύχει το σύστημα να είναι πλήρως συμβατό με το επίγειο σύστημα UMTS το οποίο βασίζεται στην τεχνική CDMA. Το S-UMTS δεν θα λειτουργεί απλώς ως συμπλήρωμα στο T-UMTS αλλά θα το επεκτείνει ,προσφέροντας υπηρεσίες και σε περιοχές όπου η κάλυψη από το T-UMTS λόγω οικονομικών ή τεχνικών λόγων δε μπορεί να καταστεί δυνατή. Το δορυφορικό δίκτυο πρόσβασης του συστήματος πρόκειται να συνδεθεί με το δίκτυο κορμού του UMTS μέσω μιας διεπαφής lu[17].Το συγκεκριμένο σύστημα αναμένεται να επιτύχει ταχύτητες άνω των 144 kbps δίνοντας έτσι την δυνατότητα στους τελικούς χρήστες να παρακολουθούν πολυμεσικές εφαρμογές ενώ θα βρίσκονται εν κινήσει.

1.6.2 Συστήματα μη Γεωστατικών Δορυφόρων (Non Geostationary Satellite Systems)

Μια άλλη κατηγορία κινητών δορυφορικών συστημάτων είναι τα συστήματα μη γεωστατικών δορυφόρων όπου χρησιμοποιούν δορυφόρους κυρίως σε LEO τροχιές .Τα σημαντικότερα από αυτά τα συστήματα καθώς και τα χαρακτηριστικά που τα συνοδεύουν παρουσιάζονται παρακάτω.

1.6.2.1 Iridium

Το δορυφορικό σύστημα Iridium αναπτύχθηκε από την εταιρία Motorola, όπου το Νοέμβριο του 1998 το σύστημα τίθεται σε πλήρη λειτουργία. Πρόκειται για είναι ένα “big LEO” δορυφορικό σύστημα αποτελούμενο από 66 δορυφόρους [1] (επιπλέον 14 εφεδρικούς) τοποθετημένους σε τροχιακό ύψος 780 km οι οποίοι λειτουργούν στη L ζώνη συχνοτήτων. Κάθε δορυφόρος υποστηρίζει μέχρι 48 κυψέλες έτσι ώστε όλοι μαζί να επιτυγχάνουν την κάλυψη όλης της γης. Το δορυφορικό σύστημα Iridium παρέχει δορυφορικές υπηρεσίες φωνής, ανταλλαγής

δεδομένων, Fax, καθώς και υπηρεσίες εντοπισμού θέσης και πορείας, με παγκόσμια κάλυψη σε ξηρά, θάλασσα και αέρα.



Εικόνα 1.9 Δορυφορικό τηλέφωνο Iridium και εξοπλισμός OpenPort για IP υπηρεσίες [18]

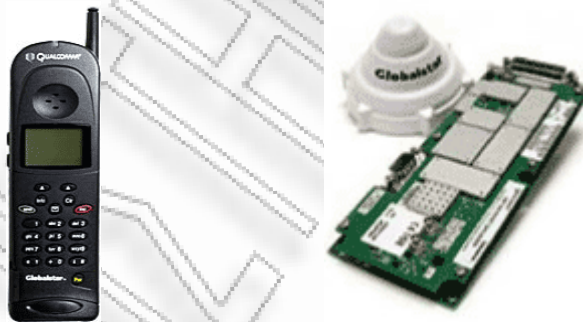
Το 2007 η εταιρία ανακοίνωσε ένα νέο πρόγραμμα με την ονομασία Iridium NEXT: Το iridium next προβλέπεται να ξεκινήσει το 2015 εγκαινιάζοντας με αυτόν τον τρόπο την δεύτερη γενιά συστήματος δορυφόρων, όπου θα είναι σε θέση να αντικαταστήσει το υπάρχον σύστημα των δορυφόρων παρέχοντας το 100% της παγκόσμιας κάλυψης. Το iridium next θα αποτελείται από 81 δορυφόρους (66 LEO δορυφόροι για να αντικαταστήσουν το υπάρχον σύστημα, 6 εφεδρικοί σε τροχιά, 9 δορυφόροι στο έδαφος). Θα παρέχει πρωτοπόρες και σύγχρονες υπηρεσίες όπως :μεγαλύτερες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων, πλεονεκτήματα της τεχνολογίας IP και τέλος συμβατότητα με τις υπάρχουσες επίγειες επικοινωνίες (με χρήση dual mode τερματικών).



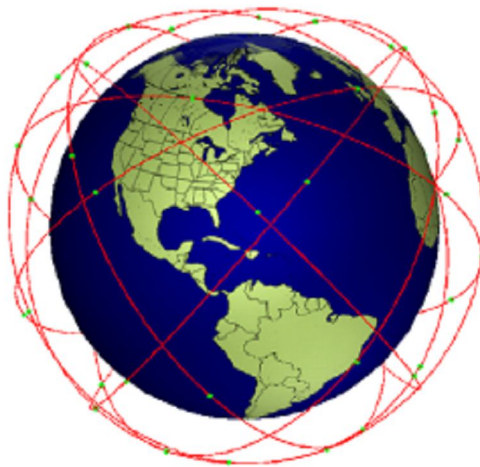
Εικόνα 1.10 Iridium Constellation

1.6.2.2 GlobalStar

Το συγκεκριμένο σύστημα ιδρύθηκε το 1991 και είναι μια κοινοπραξία από κορυφαίες εταιρίες τηλεπικοινωνιών. Το σύστημα Globalstar αποτελείται από 48 δορυφόρους σε 8 κεκλιμένες τροχιές LEO. Είναι σχεδιασμένο να παρέχει δορυφορικές τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες υψηλού επιπέδου σε μια ευρεία κλίμακα χρηστών όπως χρήστες κινητών τηλεφώνων που επιχειρούν περιαγωγή (roaming) εκτός περιοχής κάλυψης. Το Globalstar χρησιμοποιεί την τεχνική CDMA για την ζεύξη με τον κινητό και για την κύρια ζεύξη τις τεχνικές FDM και FDMA στο uplink και downlink αντίστοιχα. Οι υπηρεσίες του Globalstar είναι προσβάσιμες μέσω συμφωνιών με τοπικές εταιρίες όπου οι κλήσεις δρομολογούνται μέσω δορυφόρου μόνο όταν δεν θα υπάρχει τοπική κάλυψη από τα επίγεια κυψελωτά συστήματα. Το σύστημα παρέχει σύγχρονες υπηρεσίες όπως: φωνητικές κλήσεις, e-mail, παγκόσμια περιαγωγή, fax, εντοπισμό θέσης, και έχει το πλεονέκτημα ότι η ίδια συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για δορυφορικές όσο και για κλήσεις κινητού.



Εικόνα 1.11 Τερματικό tri-mode και Qualcomm data modem νέας γενιάς [19]



Εικόνα 1.12 GlobalStar Constellation

1.6.2.3 ICO Global Communications

Η ICO είναι μια εταιρία παροχής τελευταίας γενιάς δορυφορικών επικοινωνιών όπου εδρεύει στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Η ομώνυμη εταιρία σχεδίασε και ανέπτυξε ένα παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα για να παρέχει υψηλής ποιότητας υπηρεσίες φωνής και δεδομένων στην L ζώνη συχνοτήτων. Το σύστημα θα αποτελείται από 12 MEO δορυφόρους εκ των οποίων ο ένας με το όνομα ICO F2 εκτοξεύτηκε το 2001. Ο ICO F2 είναι ένας μέσης τροχιάς δορυφόρος όπου λειτουργεί με τους κανόνες που έχουν υιοθετηθεί από το Ηνωμένο Βασίλειο και την ITU και πρόσφατα παρέχει δορυφορικές υπηρεσίες για μια κρατική υπηρεσία των ΗΠΑ. Οι δορυφόροι θα έχουν περισσότερες από 490 δέσμες (spot beams) για τους χρήστες του δορυφορικού δικτύου και μέση διάρκεια ζωής 12 χρόνια.

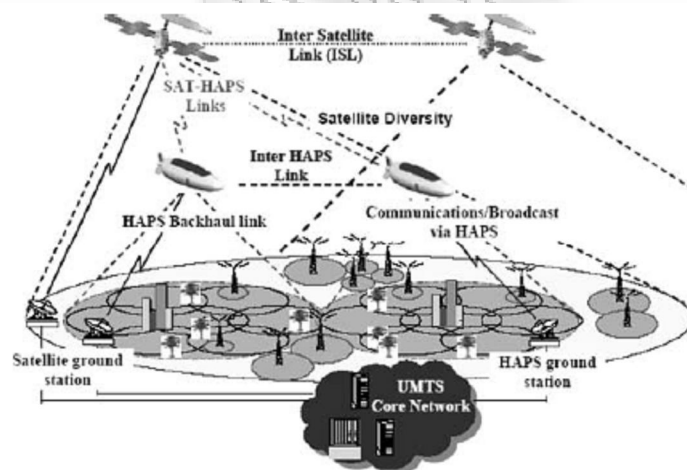


Εικόνα 1.13 Αστερισμός MEO δορυφόρων του συστήματος ICO[21]

1.6.3 Στρατοσφαιρικές πλατφόρμες (High Altitude Platforms-HAPs)

Οι στρατοσφαιρικές τηλεπικοινωνιακές πλατφόρμες (High Altitude Platforms, HAPs)[20] είναι εναέριες πλατφόρμες που λειτουργούν ως σταθμοί βάσης ή κόμβοι αναμετάδοσης και είναι τοποθετημένες σε αεροσκάφη ή αερόπλοια, επανδρωμένα ή μη. Αντιπροσωπεύουν μια υβριδική τεχνολογική προσέγγιση στο πρόβλημα της ευρυζωνικής επικοινωνίας καθώς και στην επικοινωνία από/προς κινητά τερματικά, καθώς συνδυάζουν όλα τα πλεονεκτήματα των επίγειων και δορυφορικών συστημάτων. Τα HAPs προβλέπεται να λειτουργήσουν στην

στρατόσφαιρα σε ύψος 17 με 22 km πάνω από την επιφάνεια της γης και καθώς οι τροχιές τους είναι ψευδο – γεωστατικές μπορούν να θεωρηθούν ως δορυφόροι πολύ χαμηλής τροχιάς. Σύμφωνα με την ITU-R τα HAPs μπορούν να λειτουργούν στις ζώνες συχνοτήτων L,S ,K ,Ka ,EHF. Οι υπηρεσίες μπορούν να προσφέρονται στους χρήστες είτε μέσω των απ’ ευθείας ζεύξεων (uplink και downlink) με την πλατφόρμα ,είτε μέσω ζεύξεων μεταξύ του HAP και του υπάρχοντος επίγειου δικτύου οπτικών ινών, ενώ υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης ζεύξης μεταξύ πλατφόρμας και δορυφόρου σε περίπτωση που αυτό κρίνεται σκόπιμο. Σημαντικές εφαρμογές τους είναι οι υψηλής ταχύτητας και ευρείας ζώνης ψηφιακές επικοινωνίες, οι κινητές επικοινωνίες, η τηλεπισκόπηση, η παρατήρηση του γήινου περιβάλλοντος και η συλλογή περιβαλλοντικών δεδομένων. Διάφορα προγράμματα πάνω στην ανάπτυξη των HAPs έχουν συσταθεί, τα σημαντικότερα από τα οποία είναι το SkyStation το HALO, Helinet, SkyNet και SkyTower.



Εικόνα 1.14 Μελλοντική αρχιτεκτονική B3G δικτύου βασισμένο σε HAPs[4]

1.7 Βιβλιογραφία

- [1] **Stojce Dimov I Icev** University of Durban , “ Global Mobile Satellite Communications ” , Springer 2005
- [2] **Αθανάσιος Κανάτας, Φίλιππος Κωνσταντίνου, Γεώργιος Πάντος**
“ Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών” , Εκδόσεις Παπασωτηρίου 2008
- [3] **Ray E.Sheriff and Y. Fun Hu**
“Mobile Communication Satellite Networks”, Wiley & Sons 2001
- [4] **Giovanni E. Corazza**
“Digital Satellite Communications”, Springer 2007
- [5] **Θεοδωρακοπούλου Ιωάννα, Δετοράκης Ζαχαρίας**
“Μελέτη και προσομοίωση παρεμβολών σε/από κινητά δορυφορικά συστήματα”,
Διπλωματική Εργασία, Τμήμα ΗΜΜΥ ΕΜΠ, 2003
- [6] **B G Evans**, “Role of Satellites in Mobile/Wireless Systems” University of Surrey,
Surrey GU2 7XH
- [7] **B. G. Evans, M. Werner, E. Lutz, M. Bousquet, G. E. Corazza, G. Maral,
and R. Rumeau**, "Integration of satellite and terrestrial systems in future
multimedia communications," IEEE Wireless Communications, vol. 12,
no. 5, pp. 72-80, October 2005.
- [8] **Επίσημη Ιστοσελίδα Εταιρείας Inmarsat**
http://www.inmarsat.com/About/Our_satellites/default.aspx
- [9] http://ec.europa.eu/information_society
- [10] **W. Stallings**. “Wireless Communications and Networks, 2003
- [11] **Μαρία Κ. Κωλέττα** “Δορυφορικά Δίκτυα Ευρείας Ζώνης για κινητούς
σταθμούς εδάφους, θαλάσσης και αέρος” Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα ΗΜΜΥ
ΕΜΠ, 2005
- [12] **Ηλεκτρονική Βιβλιοθήκη Wikipedia**, <http://el.wikipedia.org/wiki/Inmarsat>
- [13] **Επίσημη Ιστοσελίδα Εταιρείας Otesat Maritel**, <http://www.otesat.gr>
- [14] www.telespazio.it/pdf/Euteltracs_english.pdf
- [15] <http://www.boeing.com/defensespace/space/bss/factsheets/601/msat>
- [16] **Επίσημη ιστοσελίδα Εταιρείας Thuraya**, <http://www.thuraya.com/>

[17] **Giovanni Giambene**, “Resource Management in Satellite Networks Optimization and Cross-Layer Design”, Springer 2007

[18] **Επίσημη Ιστοσελίδα Εταιρείας Iridium**, <http://www.iridium.com/>

[19] **Επίσημη ιστοσελίδα Εταιρείας GlobalStar**, <http://www.globalstar.com/>

[20] **Νικόλαος Δωδεκάτος-Ευστάθιος Ευσταθιάδης**, “Μοντέλα σκίασης σε σχέση με την γωνία ανύψωσης για δορυφορικές επικοινωνίες και στρατοσφαιρικές πλατφόρμες” Διπλωματική Εργασία, Τμήμα ΗΜΜΥ ΕΜΠ, 2008

[21] **Επίσημη ιστοσελίδα Εταιρείας ICO Communications**, <http://www.ico.com/>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΥΛΟΥ ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Το δορυφορικό σήμα που λαμβάνει ο δέκτης σε ένα σύστημα κινητών δορυφορικών επικοινωνιών μπορεί να χαρακτηριστεί σαν συνδυασμός από δυο συνιστώσες, την απευθείας (συνθήκες LOS) και των σκεδαζόμενων κυμάτων λόγω εμποδίων που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από τον δέκτη. Η συνιστώσα οπτικής επαφής εξαρτάται όχι μόνο από τα διάφορα ιονοσφαιρικά και τροποσφαιρικά φαινόμενα διάδοσης, αλλά και από το φαινόμενο της σκίασης το οποίο προκαλείται κυρίως λόγω φυσικών εμποδίων και ανθρωπίνων κατασκευών. Οι ανακλάσεις και οι διαχύσεις από το έδαφος και αντικείμενα που βρίσκονται κοντά στον δέκτη (πχ. δέντρα, κτήρια, γέφυρες, κ.α) συνεισφέρουν στην δημιουργία της δεύτερης συνιστώσας του λαμβανόμενου LMS σήματος, η οποία και ονομάζεται πολυδιαδρομική συνιστώσα. Η διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού σήματος, μέσα από διάφορα στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας υπόκειται σε φαινόμενα όπως: διακύμανση, διασπορά, μεταβολή στην κατεύθυνση άφιξης, καθυστέρηση, μεταβολή στη συχνότητα και στην πόλωση. Η επίδραση αυτών των φαινομένων στην απόδοση του τηλεπικοινωνιακού καναλιού εξαρτάται εκτός των άλλων και από την χρησιμοποιούμενη συχνότητα του ραδιοφάσματος. Τα τροποσφαιρικά φαινόμενα είναι ανάλογα με την συχνότητα, για αυτόν τον λόγο έχουν σημαντική επίδραση στις Ka και Ku ζώνες συχνοτήτων, ενώ τα ιονοσφαιρικά είναι αντιστρόφως ανάλογα με την συχνότητα και έχουν σημαντική επίδραση στις L και S ζώνες όπου πρέπει να εφαρμόσουμε τεχνικές (πόλωσης για παράδειγμα), για την αντιμετώπιση αυτών των φαινομένων. Η σκίαση και οι διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης είναι οι πιο σημαντικές εξασθενίσεις σε μια τηλεπικοινωνιακή ζεύξη. Η επίδρασή τους στην απόδοση ενός συστήματος δορυφορικών κινητών επικοινωνιών εξαρτάται κατά πολύ από το περιβάλλον και τα χαρακτηριστικά που το συνοδεύουν. Ακόμα ένας άλλος σημαντικός παράγοντας ο οποίος επηρεάζει ένα κανάλι είναι η ταχύτητα του κινητού το οποίο

δίνει την εντύπωση του πόσο γρήγορα τα επίπεδα του σήματος εξασθενούν καθώς το κινητό τερματικό κινείται στον χώρο. Με τον όρο εξασθενίσεις εννοούμε : την εξασθένιση (attenuation) ,εξασθένιση λόγω παραμόρφωσης (attenuation distortion),απώλειες ελεύθερου χώρου, πολυδιαδρομική διάδοση, θόρυβος και τέλος η ταχύτητα του κινητού τερματικού.

2.2 Γενικά Χαρακτηριστικά διαύλου κινητών δορυφορικών επικοινωνιών

Η πιο συνήθης υπόθεση όσον αναφορά ένα δίαυλο κινητών δορυφορικών επικοινωνιών είναι ότι το μεταδιδόμενο σήμα λαμβάνεται από το άλλο άκρο της ζεύξης ως συνδυασμός από τρεις κύριες συνιστώσες:

- Το απευθείας σήμα
- Το ανακλώμενο σήμα
- Το σήμα που προέρχεται από πολυδιαδρομική διάδοση (multipath)

Το απευθείας σήμα μπορεί να επηρεαστεί λόγω της παρουσίας χαρακτηριστικών εμποδίων τέτοια όπως δέντρα ,κτίρια, κ.α ή αλλιώς να φτάσει στον δέκτη χωρίς την παρεμβολή εμποδίων, όπου σε αυτήν την περίπτωση θα λέμε ότι έχουμε συνθήκες οπτικής επαφής LOS (Line of Sight).Επίσης το απευθείας σήμα μπορεί να επηρεαστεί καθώς δέχεται τις επιδράσεις του στρώματος της Ιονόσφαιρας, επιδράσεις τέτοιες όπως π.χ στροφή Faraday και οι ιονοσφαιρικοί σπινθηρισμοί. Στις συνθήκες όμως αυτές η πόλωση που χάνεται λόγω της επίδρασης από την στροφή Faraday μπορεί να εξαλειφθεί αν χρησιμοποιήσουμε κυκλική πόλωση. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι οι διακυμάνσεις στα επίπεδα του σήματος λόγω της επίδρασης της ιονόσφαιρας είναι αμελητέες στις L ζώνη συχνοτήτων ενώ οι επιδράσεις είναι μικρότερες καθώς αυξάνεται η συχνότητα στις ζώνες συχνοτήτων Ka και Ku. Το στρώμα της τροπόσφαιρας τώρα, μπορεί και αυτό με την σειρά του να εισάγει (σε υψηλότερες αναθέσεις συχνοτήτων) εξασθένιση αλλά και αποπόλωση. Επιπρόσθετα η ανακλώμενη και η διαχεόμενη συνιστώσα επηρεάζονται και αυτές από την ιονοσφαιρική και τροποσφαιρική επίδραση. Η ανακλώμενη συνιστώσα δημιουργείται κυρίως στο έδαφος αλλά και σε ιδιαίτερα λείες επιφάνειες κτιρίων και για αυτό η ανακλώμενη συνιστώσα υπερτερεί πάνω από την διαχεόμενη συνιστώσα.

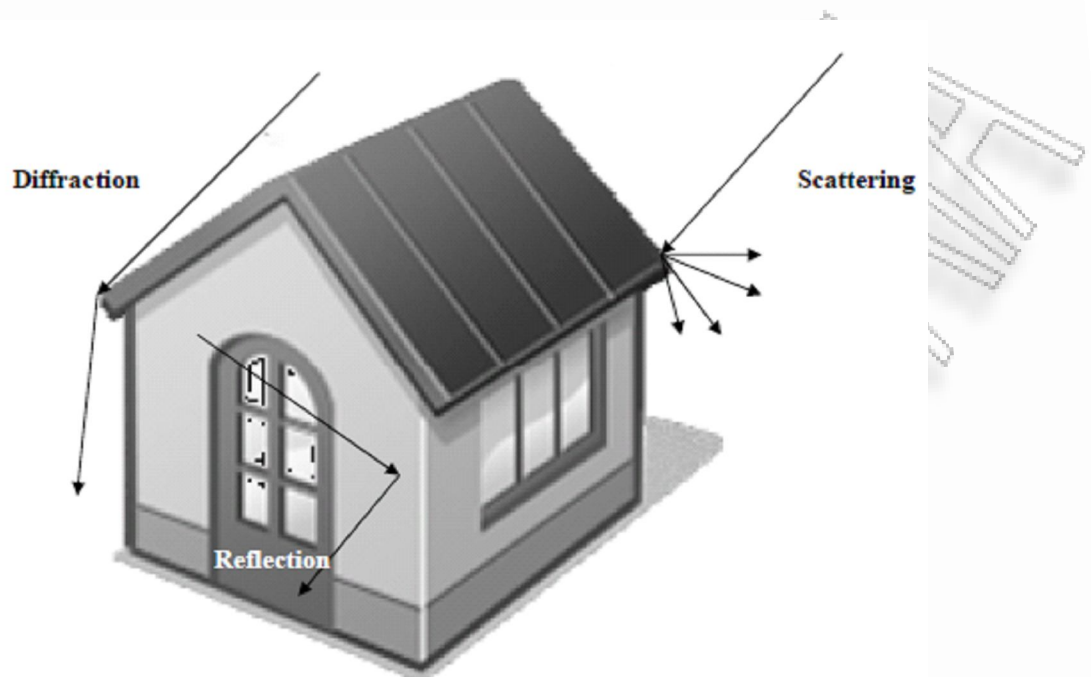
Η επιρροή αυτών των συμβολών περιορίζεται από διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας του κινητού τερματικού το οποίο συνήθως είναι ημισφαιρικό. Οι ανακλάσεις του σήματος από το έδαφος θα φθάσουν με λιγότερες από 90° γωνία ανύψωσης με αποτέλεσμα να εισάγουν σημαντική εξασθένιση. Η διαχεόμενη συνιστώσα δημιουργείται από έναν μεγάλο αριθμό από ακτίνες όπου φθάνουν στο δέκτη χωρίς να πληρούν τον κανόνα ανάκλασης που απορρέει από τον νόμο του Snell. Αυτές οι συνιστώσες υπάρχουν είτε εξαιτίας της σκέδασης του σήματος σε μη ομαλές επιφάνειες με λιγότερα χαρακτηριστικά στο περιβάλλον πλησίον του τερματικού είτε λόγω περίθλασης από τις άκρες των κτιρίων. Η ανακλώμενη και διαχεόμενη συνιστώσα κυρίως σε διαύλους κινητών επικοινωνιών προκαλούν φαινόμενα τέτοια όπως χρονική διασπορά και διαλείψεις. Δεδομένου του επιπέδου ισχύος και του περιθωρίου διαλείψεων που απαιτούνται στις κινητές δορυφορικές επικοινωνίες, και ακόμα στην περίπτωση όπου απαιτούνται υψηλές γωνίες ανύψωσης, τα περισσότερα φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης περιορίζονται καθώς το τερματικό ταξιδεύει κατά μήκος δρόμων-οδών. Τέλος η κινητικότητα του τερματικού καθώς και του δορυφόρου (όταν δεν είναι σε γεωστατική τροχιά) προκαλούν φαινόμενα όπως διασπορά Doppler και ολίσθηση φάσματος.

2.3 Βασικοί Μηχανισμοί διάδοσης του δορυφορικού σήματος

Υπάρχουν τρεις βασικοί μηχανισμοί διάδοσης όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν την αλληλεπίδραση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με το περιβάλλον. Οι τρεις βασικοί μηχανισμοί διάδοσης σε ένα σύστημα κινητών δορυφορικών επικοινωνιών είναι :

- Ανάκλαση (reflection)
- Περίθλαση (diffraction)
- Σκέδαση (Scattering)

όπου μπορούν να επηρεάσουν το πλάτος, την κατεύθυνση και την φάση του διαδομένου ηλεκτρομαγνητικού σήματος.



Εικόνα 2.1 Οι Βασικοί Μηχανισμοί Διάδοσης

2.3.1 Ανάκλαση (Reflection)

Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα όταν ένα εκπεμπόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσκρούει πάνω σε μια λεία επιφάνεια με πολύ μεγάλες διαστάσεις συγκρινόμενες με το μήκος κύματος του RF σήματος. Τα ανακλώμενα κύματα που δημιουργούνται μπορούν να λειτουργήσουν σαν θετικός ή αρνητικός παράγοντας για τη λήψη του σήματος στο δέκτη. Για παράδειγμα, αν ένα ανακλώμενο σήμα από το έδαφος έχει ληφθεί πλησίον της κινητής συσκευής, το κύμα εδάφους και το απευθείας σήμα ίσως τείνουν σε διακοπή της ζεύξης, προκαλώντας υψηλή απώλεια σήματος λόγω του ότι μετά την ανάκλαση τα ανακλώμενο σήμα θα έχει μια διαφορά φάσης της τάξεως των 180° . Ακόμα το ανακλώμενο σε σχέση με το απευθείας σήμα έχει να διανύσει μια μεγαλύτερη διαδρομή, πράγμα το οποίο οδηγεί σε μια διαφορά φάσης δημιουργώντας καθυστέρηση. Επίσης το ανακλώμενο σήμα δεν έχει την ίδια ισχύ όσο το πηγαιό καθώς μέρος της ισχύος του απορροφάται από διάφορα αντικείμενα που μεσολαβούν κατά την διάδοση του. Ανακλάσεις μπορούν να δημιουργηθούν λόγω του ανάγλυφου του εδάφους της επιφάνειας της γης καθώς και από κτήρια και τοίχους.

2.3.2 Περίθλαση (Diffraction)

Συμβαίνει όταν ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη υπάρχει φυσικό ή τεχνητό εμπόδιο με μεγάλες διαστάσεις συγκρινόμενες με το μήκος κύματος, το οποίο προκαλεί την εμφάνιση δευτερευόντων κυμάτων πίσω από το εμπόδιο σύμφωνα με την αρχή του Huygens. Η περίθλαση είναι ένα φαινόμενο που ερμηνεύει την μεταφορά ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από τον πομπό στο δέκτη χωρίς την απαραίτητη ύπαρξη απευθείας μονοπατιού μεταξύ τους. Όταν η συχνότητα του σήματος είναι υψηλή, η περίθλαση εξαρτάται από την γεωμετρία του αντικειμένου, το πλάτος, την φάση και την πολικότητα του προσπίπτοντος κύματος στο σημείο της περίθλασης.

2.3.3 Σκέδαση (Scattering)[3]

Είναι το φαινόμενο το οποίο συμβαίνει όταν ένα σήμα προσκρούει είτε σε μια μεγάλη τραχιά επιφάνεια ή σε μια επιφάνεια της οποίας οι διαστάσεις είναι της τάξης του μήκους κύματος ή λιγότερες, με αποτέλεσμα η ανακλώμενη ενέργεια να διασκορπίζεται σε όλες τις κατευθύνσεις. Τα διαχεόμενα κύματα παράγονται από τραχιές επιφάνειες, από μικρά αντικείμενα ή από άλλες ανωμαλίες μέσα στο κανάλι επικοινωνιών. Στην πραγματικότητα αντικείμενα όπως π.χ οι πινακίδες οδών, οι φυλλωσιές δέντρων, και στύλοι φωτισμού επιφέρουν σκέδαση σε ένα σύστημα κινητών επικοινωνιών.

2.4 Οι σημαντικότερες εξασθενίσεις του δορυφορικού σήματος (impairments)

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται οι σημαντικότεροι τύποι εξασθενίσεων οι οποίες υπάρχουν και μπορούν να επηρεάσουν ένα σύστημα κινητών δορυφορικών επικοινωνιών.

2.4.1 Η Επίδραση Σκίασης

Με τον όρο Σκίαση εννοούμε την εξασθένιση της απευθείας διάδοσης εξαιτίας της παρουσίας διαφόρων εμποδίων όπως δέντρα κατά μήκος δρόμων, κτιρίων, λόφων και βουνών. Η επίδραση της σκίασης εξαρτάται από το μήκος της

διαδρομής όπου θα διανύσει το σήμα μέσα από το εμπόδιο, το είδος του εμποδίου, την συχνότητα και την γωνία ανύψωσης του δορυφόρου. Ο βαθμός των διαλείψεων που προκαλείται λόγω της βλάστησης ενός δέντρου εξαρτάται από το μήκος διαδρομής του σήματος μέσα από δέντρα και την πυκνότητα των κλαδιών και φυλλωμάτων των δέντρων. Στις συχνότητες κάτω του 1 GHz, τα δέντρα είναι στην ουσία “διαφανή” για το σήμα ενώ για υψηλότερες συχνότητες θεωρούνται σαν ιδανικοί στα άκρα διαθλαστές ώστε να μπορεί να υπολογιστεί ο βαθμός εξασθένησης του σήματος. Η σκίαση λόγω της παρουσίας δέντρων παρουσιάζεται κυρίως όταν εμπεριέχεται εντός του 60 % της πρώτης ζώνης Fresnel. Τα κτίρια από πλευράς των δρόμων απορροφούν ιδιαίτερα μεγάλη ισχύ του σήματος στις συχνότητες των κινητών δορυφορικών επικοινωνιών, έτσι μπορούν να θεωρηθούν σαν περιθλαστές ευθείας – ακμής (Knife-Edge). Επιπρόσθετα μπορεί να θεωρηθεί ότι εμποδίζουν σημαντικά το σήμα όταν τουλάχιστον το 60% της πρώτης ζώνης Fresnel γύρω από την απευθείας ακτίνα από τον δορυφόρο στο κινητό τερματικό είναι μπλοκαρισμένη. Για αυτόν τον λόγο στην πράξη η σκίαση μπορεί να είναι λιγότερη σε υψηλότερες συχνότητες εξαιτίας των περιορισμένων ζωνών Fresnel για μια δεδομένη διαμόρφωση. Η εξασθένηση του σήματος LOS που προκαλείται εξαιτίας της παρουσίας κτιρίων, μπορεί να προσδιοριστεί μοντελοποιώντας το τύπο του εμποδίου σαν περίθλαση ευθείας-ακμής αμελητέου πάχους ή σαν ένα παχύ λείο αντικείμενο. Αν γνωρίζουμε την γωνία ανύψωσης του δορυφόρου, το ύψους του κτιρίου, το ύψους κεραίας, την απόσταση κεραίας – κτιρίου και την συχνότητα τότε μπορούμε να υπολογίσουμε τις απώλειες λόγω περίθλασης κοντά στο κτίριο και να προσδιορίσουμε τις διαθέσιμες – μη διαθέσιμες περιοχές για δορυφορικές επικοινωνίες.

2.4.2 Επίδραση Πολυδιαδρομικής Διάδοσης

Σε ένα περιβάλλον κινητών επικοινωνιών, αντικείμενα, τέτοια όπως σπίτια ή δέντρα δρουν σαν ανακλαστές των ραδιοκυμάτων. Κατά την μετάδοση ενός διαμορφωμένου σήματος, καθένα από τα πολλαπλά ανακλώμενα κύματα του μεταδιδόμενου σήματος θα φθάσουν στην κεραία του δέκτη από διαφορετικές κατευθύνσεις με διαφορετικές χρονικές καθυστερήσεις και φάσεις. Έτσι ένα κινητό τερματικό όπου θα βρίσκεται μέσα σε ένα πολυδιαδρομικό πεδίο θα

λάβει ένα σήμα το οποίο μπορεί να διαφέρει σε φάση και πλάτος σε σχέση με το αρχικό. Όταν τώρα το κινητό τερματικό είναι στατικό οι μεταβολές στο πλάτος του λαμβανομένου σήματος προκαλούνται εξαιτίας της παρουσίας των τριγύρω αντικειμένων. Η διακύμανση αυτή στο πλάτος του σήματος καλείται διάλειψη σήματος (signal-fading). Η θεωρία των χρονικά μεταβαλλόμενων καναλιών επινοήθηκε από τον P.A. Bello, ο οποίος παρουσίασε μια σειρά συναρτήσεις με σκοπό να περιγράψει το κανάλι επικοινωνιών. Κάθε συνάρτηση δεν είναι ανεξάρτητη σε σχέση με τις άλλες και βασίζεται σε δυο από τους τέσσερις παρακάτω τομείς δραστηριότητας. [1]

- Η πρώτη συνάρτηση $h(t, \tau)$ ονομάζεται χρονικά μεταβαλλόμενη κρουστική απόκριση (time-variant channel impulse response) Η συνάρτηση αυτή είναι η απόκριση του διαύλου την χρονική στιγμή t σε μια μοναδιαία κρουστική που εκπέμπεται την χρονική στιγμή $(t-\tau)$.
- Η δεύτερη συνάρτηση $T(f, t)$ είναι η χρονικά μεταβαλλόμενη συνάρτηση μεταφοράς όπου μπορούμε να μεταπηδήσουμε σε αυτήν χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Fourier
- Η τρίτη συνάρτηση $H(f, v)$ είναι η συνάρτηση Bello όπου μπορεί να ερμηνευτεί σαν συνάρτηση μεταφοράς συχνότητας του διαύλου που αφορά την διασπορά Doppler.
- Η συνάρτηση $S(\tau, v)$ χρησιμοποιεί την ολίσθηση καθυστέρησης Doppler για να περιγράψει το κανάλι επικοινωνιών.

Επίσης μια δεύτερης τάξης περιγραφή του καναλιού μας μπορεί να υπάρξει αρκεί να ορίσουμε τις συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης από τις συναρτήσεις του συστήματος. Οι συγκεκριμένες συναρτήσεις είναι οι παρακάτω: [1]

$$R_h(t_1, t_2, \tau_1, \tau_2), R_T(f_1, f_2, t_1, t_2), R_H(f_1, f_2, v_1, v_2), R_S(\tau_1, \tau_2, v_1, v_2)$$

Τώρα πρέπει να κάνουμε ένα διαχωρισμό όσον αφορά τους διαύλους.

Ένας δίαυλος καλείται στατικός (wide sense stationary -WSS) όταν τα στατιστικά μεγέθη των διαλείψεων παραμένουν σταθερά για μικρές χρονικές περιόδους συνεπώς οι συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης εξαρτώνται από τις χρονικές μεταβλητές t_1 και t_2 μόνο μέσω της διαφοράς τους $\Delta t = t_1 - t_2$.

Ένας δίαυλος θεωρείται ότι προσφέρει ασυσχέτιστη σκέδαση (Uncorrelated Scattering-US) όταν οι εξασθενίσεις και οι ολισθήσεις φάσης των συνιστωσών

που έχουν διαφορετικές καθυστερήσεις είναι ασυσχέτιστες. Ενώ ένας διάυλος είναι WSSUS όταν έχει ασυσχέτιστες σκεδάσεις τόσο στο πεδίο της καθυστέρησης όσο και στο πεδίο της ολίσθησης Doppler. Η καθυστέρηση λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης προκαλεί τα φαινόμενα της χρονικής διασποράς και των διαλείψεων που είναι επιλεκτικές με την συχνότητα. Χρονική διασπορά σημαίνει ότι το σήμα φθάνει από τον πομπό στον δέκτη από πολυδιαδρομική διάδοση έτσι αυτά μονοπάτια έχουν διαφορετικά μήκη με αποτέλεσμα να εισάγουν διαφορετικές καθυστερήσεις. Στο φαινόμενο της επιλεκτικής συχνότητας οι συνιστώσες του σήματος καταφθάνουν στο δέκτη από διαφορετικές κατευθύνσεις, και το διανυσματικό άθροισμα αυτών, το λαμβανόμενο σήμα από μόνο του, εξαρτάται από την φάση των συνιστωσών, το οποίο είναι η συνάρτηση της συχνότητας.

2.4.3 Απώλειες Ελευθέρου Χώρου (Free Space Loss)

Το μοντέλο απωλειών ελευθέρου χώρου περιγράφει το φαινόμενο της ζεύξης μεταξύ πομπού και δέκτη σε χώρο ελεύθερο από άλλα φυσικά ή τεχνητά εμπόδια. Σε κάθε τύπο ασύρματης επικοινωνίας το σήμα διασκορπίζεται με την απόσταση. Για τις δορυφορικές επικοινωνίες αυτός είναι ο πρώτος τρόπος της απώλειας σήματος. Ακόμα και αν δεν υπάρχουν άλλες πηγές εξασθένησης του σήματος, ένα μεταδιδόμενο σήμα εξασθενεί με την απόσταση, επειδή το σήμα διαδίδεται σε μια μεγαλύτερη περιοχή. Οι απώλειες ελευθέρου χώρου εκφράζονται βάσει της μεταδιδόμενης ισχύς του σήματος και της ισχύς που λαμβάνει η κεραία του δέκτη σε dB. Για ιδανική ιστροπική κεραία, οι απώλειες ελευθέρου χώρου

δίνονται από το τύπο $\frac{P_t}{P_r} = \frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2} = \frac{(4\pi f d)^2}{c^2}$, όπου P_t : η ισχύς του σήματος

στην κεραία εκπομπής

P_r : η ισχύς του σήματος στην κεραία λήψης

d : η απόσταση μεταξύ των δυο κεραιών

λ : το μήκος κύματος του σήματος

c : η ταχύτητα του φωτός ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

Σε λογαριθμική κλίμακα οι τύποι γίνονται:

$$L_{dB} = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) = -20 \log(\lambda) + 20 \log(d) + 21.98 dB = 20 \log \left(\frac{4\pi fd}{c} \right) = 20 \log(f) + 20 \log(d) - 147.56 dB$$

Για άλλες κεραιές πρέπει μελετήσουμε το κέρδος της κεραιάς, το οποίο οδηγεί

στην παρακάτω εξίσωση $\frac{P_t}{P_r} = \frac{(4\pi)^2 (d)^2}{G_t G_r \lambda^2} = \frac{(\lambda d)^2}{A_t A_r} = \frac{(cd)^2}{f^2 A_t A_r}$, όπου

G_t : είναι το κέρδος της κεραιάς εκπομπής

G_r : είναι το κέρδος της κεραιάς λήψης

A_t : είναι η ενεργός επιφάνεια της κεραιάς εκπομπής

A_r : είναι η ενεργός επιφάνεια της κεραιάς λήψης

2.4.4 Τύποι Διαλείψεων

Ο όρος διάλειψη αναφέρεται στην χρονική μεταβολή στην ισχύ ενός λαμβανόμενου σήματος εξαιτίας μεταβολών που συμβαίνουν στο μέσο μετάδοσης. Σε μια σταθερή διαμόρφωση, οι διαλείψεις επηρεάζονται από μεταβολές στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, μεταβολές τέτοιες όπως η ύπαρξη μιας βροχόπτωσης. Αυτό όμως είναι διαφορετικό σε ένα κινητό περιβάλλον όπου μια από τις δυο κεραιές κινείται συγκριτικά με την άλλη, η σχετική θέση διαφόρων εμποδίων αλλάζει κάθε φορά, δημιουργώντας σύνθετες επιδράσεις στην μετάδοση του σήματος.

2.4.4.1 Διαλείψεις βασισμένες σε Πολυδιαδρομική Διασπορά Καθυστερήσης

Η διασπορά καθυστέρησης (delay spread) είναι μια μορφή απωλειών του σήματος όπου προκαλείται όταν το ίδιο σήμα καταφθάνει στον δέκτη σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Το σήμα φθάνει συνήθως μέσω πολυδιαδρομικών διαδόσεων και με διαφορετικές φάσεις. Συνεπώς υπάρχει χρονική διαφορά ανάμεσα στην χρονική στιγμή άφιξης της πρώτης συνιστώσας (συνήθως LOS) και της τελευταίας στον δέκτη. Υπάρχουν δύο τύποι : οι επίπεδες διαλείψεις (flat fading) και οι διαλείψεις επιλεκτικές ως προς την συχνότητα (frequency selective fading).

- **Επίπεδες διαλείψεις(flat fading)** :Οι επίπεδες ή οι μη επιλεκτικές διαλείψεις είναι ένας τύπος διαλείψεων στον οποίο όλες οι συνιστώσες συχνότητας κυμαίνονται σε ίδια αναλογία ταυτόχρονα. Σε αυτές τις διαλείψεις το εύρος ζώνης του σήματος είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης ανοχής του καναλιού και ακόμα η χρονική διασπορά είναι μικρότερη από την περίοδο του συμβόλου(symbol period)[4]
- **Διαλείψεις επιλεκτικές ως προς την συχνότητα(frequency selective fading)**
Οι επιλεκτικές διαλείψεις επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο τις διάφορες φασματικές συνιστώσες ενός ραδιοσήματος. Επίσης το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος είναι μεγαλύτερο από ότι το εύρος ζώνης ανοχής του καναλιού καθώς και η χρονική διασπορά είναι μεγαλύτερη από την διάρκεια του συμβόλου.[4]

2.4.4.2 Διαλείψεις βασισμένες σε Διασπορά Doppler

Πρόκειται για έναν άλλο τύπο απωλειών του σήματος, οι οποίες προκαλούνται όταν το σήμα καταφθάνει στον δέκτη σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Ως συνέπεια της χρονικής διασποράς, της μετατόπισης του κινητού μέρους(σε σχέση με το πομπό) και της μετατόπισης τυχών τριγύρω αντικειμένων ,υπάρχει μια ολίσθηση στην συχνότητα των σημάτων καθώς αυτά καταφθάνουν στο δέκτη από διαφορετικές διαδρομές. Η διασπορά Doppler είναι η διαφορά μεταξύ της υψηλότερης και της χαμηλότερης ολίσθησης συχνότητας. Υπάρχουν δυο τύποι διαλείψεων:

- **Γρήγορες διαλείψεις:** Προκαλούνται από μικρές μετατοπίσεις του κινητού μέρους ή των εμποδίων. Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει υψηλή ολίσθηση Doppler,η συσχέτιση χρόνου είναι μικρότερη από την περίοδο του συμβόλου και τέλος οι μεταβολές στο κανάλι είναι γρηγορότερες από τις μεταβολές στο σήμα βασικής ζώνης.
- **Αργές διαλείψεις:** Προκαλούνται από μεγάλες μετατοπίσεις του κινητού μέρους ή των εμποδίων εντός του περιβάλλοντος διάδοσης. Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει χαμηλή ολίσθηση Doppler ,η συσχέτιση χρόνου είναι μεγαλύτερη από την διάρκεια του συμβόλου, και τέλος οι μεταβολές στο κανάλι είναι πιο αργές από τις μεταβολές στο σήμα Βασικής Ζώνης.

2.4.5 Επίδραση της ατμόσφαιρας στην διάδοση του σήματος

Αυτή η ενότητα ασχολείται με τις επιδράσεις που υφίστανται το σήμα κατά την διάδοσή του σε όλα τα στρώματα της ατμόσφαιρας και του ελευθέρου χώρου ,συμπεριλαμβανομένου και του στρώματος της ιονόσφαιρας. Συγκεκριμένα τα περισσότερα καιρικά φαινόμενα όπως βροχοπτώσεις και υδρομετεωρολογικά φαινόμενα εκδηλώνονται στο στρώμα της τροπόσφαιρας, η οποία είναι μια μη ιονισμένη περιοχή σε ύψος περίπου 15 Km πάνω από τη ισημερινό επίπεδο της γης. Ως εκ τούτου ,οι επιδράσεις κατά την διάδοση του σήματος μέσα στο στρώμα της τροπόσφαιρας γίνονται σημαντικότερες καθώς η συχνότητα του ραδιοσήματος αυξάνει πάνω από το 1 GHz. Σε συχνότητες τώρα κάτω του 1GHz ,το πιο σημαντικό στρώμα της ατμόσφαιρας της γης για την διάδοση του συγκεκριμένου σήματος είναι η ιονόσφαιρα, πρόκειται μια ιονισμένη περιοχή πάνω από το στρώμα της τροπόσφαιρας ,εντός της οποίας οι επιδράσεις στα ραδιοσήματα χαμηλής συχνότητας είναι μεγαλύτερες. Οι επιδράσεις στην διάδοση του σήματος εντός της ιονόσφαιρας γίνονται πιο αισθητές κυρίως στις πάντες μεταξύ VLF-SHF[2].

2.4.5.1 Επίδραση της τροπόσφαιρας [5]

Η Τροπόσφαιρα είναι το στρώμα της ατμόσφαιρας το οποίο εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το ύψος των 6 km στους πόλους και των 15 km[1] στον ισημερινό. Παρακάτω παρουσιάζονται τα τροποσφαιρικά φαινόμενα τα οποία μπορούν να επηρεάσουν την διάδοση του δορυφορικού σήματος .

α) Εξασθένιση λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων (βροχή, χαλάζι ,χιόνι).

Αναλυτικότερα, ο συνδυασμός υδρομετεωρικής σκέδασης και απορρόφησης αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα εξασθένισης στις ζώνες συχνοτήτων μεταξύ 10 έως 30GHz, όπου η συγκεκριμένη απόσβεση σε dB είναι ανάλογη του τετραγώνου της συχνότητας. Επιπρόσθετα ,αυτή μειώνεται με την αύξηση της γωνίας ανύψωσης ενώ εξαρτάται ακόμα από την πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

β) Απόσβεση από αέρια της ατμόσφαιρας η οποία είναι μικρή εν συγκρίσει με την εξασθένιση λόγω βροχόπτωσης ,ενώ είναι σημαντική μόνο για μικρές γωνίες ανύψωσης και για συγκεκριμένες συχνότητες. Ως εκ τούτου, για συχνότητες κάτω

των 30GHz, παρατηρείται μέγιστη απορρόφηση από τους υδρατμούς για συχνότητα $f = 22.5 \text{ GHz}$

γ) Αποπόλωση του κύματος από μη σφαιρικούς σκεδαστές π.χ όπως είναι οι παγοκρύσταλλοι αλλά κυρίως οι σταγόνες της βροχής. Καθότι οι συγκεκριμένοι σκεδαστές είναι ασύμμετροι στρέφουν την πόλωση στα διαδιδόμενα κύματα με αποτέλεσμα να φθάνουν στο δέκτη με πόλωση διαφορετική από εκείνη στην οποία λαμβάνει η κεραία του. Ως αποτέλεσμα τα κύματα αυτά δεν λαμβάνονται από το δέκτη με αποτέλεσμα να δημιουργούν απώλειες.

δ) Διάφορα άλλα φαινόμενα μικρότερης σημασίας, είναι η εξασθένηση από το στρώμα τήξης του πάγου, οι τροποσφαιρικοί σπινθηρισμοί και η εξασθένηση λόγω παρουσίας νεφών.

2.4.5.2 Συνθήκες Καθαρού Ουρανού (Clear Sky) [1]

Τα ραδιοσήματα που ταξιδεύουν μέσα από τα στρώματα της ατμόσφαιρας επιφέρουν εξασθενίσεις ακόμα και όταν οι καιρικές συνθήκες είναι πολύ καλές. Σε κάθε περίπτωση η εξασθένηση καθαρού ουρανού (Clear Sky) είναι κυρίως αποτέλεσμα της απορρόφησης μέρους της ενέργειας του μεταδιδόμενου σήματος από υδρατμούς και μόρια οξυγόνου. Όμως υπάρχουν και άλλοι τρόποι επίδρασης σε συνθήκες Clear Sky κατά την διάδοση του σήματος, οι οποίοι παραθέτονται παρακάτω:

1. Αποεστίαση (defocusing) και ασύμφωνη συμβολή μετώπου κύματος

Μερικές εκφράσεις παρέχονται στις Νο 2.3.2 συστάσεις της ITU-R P.618, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθούν οι απώλειες διαδρομής του σήματος λόγω μη εστίασεως (beam-spreading) όταν υπάρχουν πολύ μικρές γωνίες ανύψωσης. Ως εκ τούτου, μικρής κλίμακας διαταραχές του δείκτη διάθλασης της δομής της ατμοσφαιράς προκαλούν ασυμφωνία του μετώπου κύματος στην κεραία του δέκτη. Σε κάθε περίπτωση αυτό έχει σαν αποτέλεσμα απότομες διακυμάνσεις στο μεταδιδόμενο σήμα και απώλειες στη ζεύξη κεραίας-μέσου πράγμα το οποίο μπορεί να περιγράψει σαν μείωση στο κέρδος της κεραίας του δεκτή.

2. Επίδραση σπινθηρισμών και πολυδιαδρομικής διάδοσης

Μικρής κλίμακας διαταραχές στον δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας μπορεί να προκαλέσουν απότομες μεταβολές στο πλάτος του σήματος. Έτσι οι επιδράσεις της τροπόσφαιρας στην περίπτωση όπου δεν θα υπάρχουν ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις είναι απίθανο να δημιουργήσουν σοβαρά προβλήματα διαλείψεων στο χώρο των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων όπου λειτουργούν σε συχνότητες κάτω των 10 GHz και με γωνίες ανύψωσης πάνω από 10°.

3. Καθυστέρηση διάδοσης (propagation delay)

Επιπρόσθετες καθυστερήσεις όπου υπερθέτονται στην καθυστέρηση διάδοσης στον ελεύθερο χώρο δημιουργούνται από την διάθλαση λόγω των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων και της ιονόσφαιρας. Συνεπώς, σε μια συχνότητα κάτω των 10 GHz, η χρονική καθυστέρηση του σήματος στην ιονόσφαιρα είναι γενικά λιγότερη από ότι στην τροπόσφαιρα.

2.4.5.3 Διωνοσφαιρική διάδοση (στροφή faraday, σπινθηρισμοί)

Τα ραδιοκύματα στις συχνότητες των VHF και πάνω είναι ικανά να διαπερνούν το στρώμα της ιονόσφαιρας και συνεπώς να παρέχουν διωνοσφαιρικές τηλεπικοινωνίες. Η ιονόσφαιρα συνίσταται σαν ένα στρώμα ύψους μεταξύ 50 km και 150 km, όπου η πυκνότητα της ατμόσφαιρας είναι πολύ μικρή. Η ακτινοβολία που προέρχεται από τον ήλιο ιονίζει μερικά μόρια για τα οποία απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα ώστε να ουδετεροποιηθούν από άλλα ιόντα. Η συγκέντρωση των ιόντων αυτών ποικίλει με βάση το ύψος, την χρονική στιγμή της ημέρας και την εποχή του χρόνου. Το σήμα καθώς ταξιδεύει στο στρώμα της ιονόσφαιρας υπόκειται στην επίδραση διαφόρων φαινομένων όπως η στροφή Faraday και οι ιονοσφαιρικοί σπινθηρισμοί. **Στροφή Faraday** :είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει όταν περιστρέφεται η πόλωση ενός γραμμικά πολωμένου κύματος από την ύπαρξη ελευθέρων ηλεκτρονίων κατά μήκος του διαύλου. Για μια συγκέντρωση της τάξης 18^{18} electrons/m², η γωνία περιστροφής πόλωσης θα είναι περίπου 70° για συχνότητα 850 MHz και 20° για τους 1.6 GHz[6]. Εάν χρησιμοποιηθεί γραμμικά πολωμένο κύμα, για δορυφορικό δίαυλο υπάρχει απώλεια της τάξης 9.3 dB στα 850 MHz και 0.5 dB στα 1.6 GHz. Οι επιδράσεις

όμως αυτές αποφεύγονται με την χρήση κυκλικά πολωμένων σημάτων και υψηλότερων συχνοτήτων.

Με το όρο τώρα **σπινθηρισμοί** εννοούμε τις διακυμάνσεις του πλάτους του λαμβανόμενου σήματος όπου προκαλούνται από διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης της τροπόσφαιρας και της ιονόσφαιρας. Το από κορυφή σε κορυφή πλάτος αυτών των διακυμάνσεων ,στην συχνότητα των 11GHz και για μέτρια γεωγραφικά πλάτη μπορεί να υπερβεί το 1 dB για ποσοστό 0.01% του χρόνου.[7]

Ο πιο ενοχλητικός σπινθηρισμός είναι ο ατμοσφαιρικός σπινθηρισμός, όπου είναι εντονότερος όταν η συχνότητα είναι μικρή και ο επίγειος σταθμός βρίσκεται κοντά στον ισημερινό.

2.4.6 Θερμοκρασία Θορύβου Ουρανού

Ο μηχανισμός ο οποίος προξενεί απορρόφηση ενέργειας από ένα κύμα το οποίο διέρχεται μεταξύ γης-διαστήματος προκαλεί θερμικό θόρυβο στις διάφορες ραδιοσυχνότητες. Στην πραγματικότητα ,μέρος του θορύβου προστίθεται στο εκπεμπόμενο σήμα όπου φθάνει στο δέκτη(δεδομένου ότι η γη από μόνη της ακτινοβολεί θόρυβο) θόρυβος ο οποίος μπορεί να εισέρθει στο κανάλι μετάδοσης διαμέσου του δορυφόρου ή της κεραίας λήψης. Η ισχύς θερμικού θορύβου N ,με θερμοκρασία θορύβου πηγής $T[K]$,υπολογισμένη για εύρος ζώνης B , δίνεται από τον τύπο: $N=kTB$ [W], όπου k είναι η σταθερά του Boltzman= $1.379 \cdot 10^{-23}$ =228.6dBw/Hz K. Η θερμοκρασία θορύβου αναπαριστά τη θερμοδυναμική θερμοκρασία μιας αντίστασης η οποία αποδίδει την ίδια διαθέσιμη ισχύ θορύβου με εκείνη της υπό εξέταση πηγής. Η φασματική πυκνότητα ισχύος N_0 του θορύβου από την πηγή δίνεται από τον τύπο: $N_0 = N / B = kT [WHz^{-1}]$.Τέλος η συνιστώσα θερμικού θορύβου ισούται με $\tau = n * T_B [K]$, όπου με τον όρο T_B συμβολίζουμε την θερμοκρασία λαμπρότητας ενός ακτινοβολούντος σώματος και με (η) ένας συντελεστής, ο οποίος αναπαριστά την ικανότητα, με την οποία η κεραία του δέκτη συλλαμβάνει το θόρυβο από αυτήν την πηγή.

2.4.6.1 Θερμοκρασία Θορύβου περιβάλλοντος

Στα συστήματα επίγειων κινητών δορυφορικών επικοινωνιών, το σήμα από την κεραία μπορεί να ταξιδέψει στον δέκτη μέσα από βλάστηση και να παρεμποδιστεί από την παρουσία κτηρίων ή βουνών. Διάφορες μετρήσεις όπου έχουν πραγματοποιηθεί έχουν δείξει ότι η επίδραση του πρόσθετου επίγειου θορύβου είναι μεγαλύτερη όταν η κεραία έχει μικρή θερμοκρασία εσωτερικού θορύβου. Μολονότι αυτά τα εμπόδια ανεβάζουν την θερμοκρασία θορύβου όπου παρατηρείται στην κεραία, προκαλούν επίσης σκίαση ή πολυδιαδρομική διάδοση, φαινόμενα τα οποία συνήθως είναι σημαντικά για την επίδοση μιας ζεύξης. Αν θεωρήσουμε ότι ο θόρυβος όπου λαμβάνεται από έναν επίγειο σταθμό, στη θάλασσα, η ακόμα και πλησίον κτηρίων, η θερμοκρασία T_B θα βρίσκεται μεταξύ 100 και 250 K, πλησιάζοντας το χαμηλότερο όριο στην θάλασσα για μικρές γωνίες ανύψωσης και το μέγιστο όριο στη γη. Η σχέση που δίνει αυτή την συνιστώσα θορύβου t_{gr} είναι ίδια με αυτή της t . Εάν από κοινού η γωνία ανύψωσης της κυρίας δέσμης και το κέρδος της κεραίας είναι μεγάλα, με σωστά καταπιεσμένους πλευρικούς λοβούς, η αντίστοιχη τιμή της η θα είναι μικρή όπου η θερμοκρασία t_{gr} μπορεί να είναι περισσότερο από 20K. Εάν ωστόσο το κέρδος της κεραίας είναι πολύ μικρό, όπως είναι συνήθως για επίγειους σταθμούς (LES), η τιμή η θα είναι 0.5 και το t_{gr} να ξεπερνά τα 100K.

2.4.6.2 Ατμοσφαιρικός Θερμικός θόρυβος

Ο θερμικός θόρυβος μιας κεραίας τοποθετημένης στο δορυφόρο υπάρχει λόγω της υψηλής θερμοκρασίας όπου εκπέμπεται από την γη και καταλαμβάνει το κύριο λοβό της κεραίας. Σε αυτήν την περίπτωση ο επιπρόσθετος θόρυβος εξαιτίας ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων είναι αμελητέος. Για μια παγκόσμια δέσμη σήματος ο θερμικός θόρυβος εξαρτάται από την συχνότητα και την θέση του δορυφόρου σε σχέση με την μάζα της γης. Η κεραία όπου είναι τοποθετημένη στην γη υπακούει σχετικά σε “καθαρό ουρανό” και συνεπώς η παρουσία νεφών και βροχής μπορεί να ανεβάσει σημαντικά την θερμοκρασία θορύβου στην κεραία. Γενικά η θερμοκρασία λαμπρότητας της ατμόσφαιρας εξαιτίας παρουσίας αερίων και βροχής αν παρουσιάζεται σε μια κεραία δίνεται από τον τύπο: $T_B = T_m (1 - 10^{-10/A}) [K]$, όπου T_m είναι η ουσιαστική θερμοκρασία του

μέσου εξασθένισης(ατμόσφαιρα ,σύννεφα ,βροχή) ,με τυπική τιμή τα 270 K και όπου A η τελική εξασθένιση από το μέσο. Η επίδραση της βροχής στο downlink δεν είναι μόνο η εξασθένιση αλλά και η μείωση στο λόγο C/N λόγω του υψηλότερου θερμικού θορύβου σε συνθήκες βροχής, συγκρινόμενες με συνθήκες καθαρού ουρανού(clear sky)

2.4.6.3 Γαλαξιακός –Διαπλανητικός θόρυβος

Ο θόρυβος προερχόμενος από διαπλανητικές πηγές, ιδιαίτερα τέτοιες όπως ο ήλιος, το φεγγάρι και ο γαλαξίας μας, επιδρά σημαντικά στο συνολικό εξωγήινο θερμικό θόρυβο πάνω σε ένα σύστημα. Ο συγκεκριμένος θόρυβος μπορεί να υπολογιστεί με βάσει την παρακάτω σχέση:[2] $T_B = T_g \times 10^{-A/10} [K]$, όπου T_g είναι η θερμοκρασία οποιαδήποτε διαπλανητικής πηγής σημάτων, συμπεριλαμβανομένου και του γαλαξιακού θορύβου(περίπου 3 K πάνω από τα 3 GHz).Η θερμοκρασία λαμπρότητας του ηλίου τώρα μειώνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα, από τα 10^6 περίπου στην συχνότητα των 30 MHz στα 10^4 στην συχνότητα των 10 GHz.Για παράδειγμα στα 20 GHz ,μια κεραία διαμέτρου 2m και με μια δέσμη σήματος (beam) πλάτους 0.5° θα έχει μια αύξηση στην τιμή του θερμικού θορύβου 8.100 K υπό κανονικές συνθήκες ηλίου.

2.4.6.4 Αποπόλωση (Depolarization)

Το δορυφορικό σήμα λόγω της διάδοσής του στην ατμόσφαιρα υφίσταται αποπόλωση, δηλαδή διαφορική ολίσθηση φάσης και διαφορική απόσβεση οι οποίες προξενούνται από μη σφαιρικούς σκεδαστές τέτοιοι όπως σταγόνες βροχής και παγοκρύσταλλοι. Συνεπώς, λόγω της αποπόλωσης χάνεται η ορθογωνιότητα των δύο κάθετως πολωμένων σημάτων με αποτέλεσμα μέρος της ισχύος που εκπέμπεται κατά τη μια από τις δύο ορθογώνιες πολώσεις να παρεμβάλλει στην άλλη. Οι εξασθενίσεις τώρα μπορούν να αποτραπούν χρησιμοποιώντας κυκλική πόλωση σε συχνότητες κάτω των 10 GHz, στις οποίες η επίδραση μπορεί να είναι σημαντική. Η αποπόλωση είναι συχνά η πιο σημαντική εξασθένιση στην διάδοση του σήματος για τα δορυφορικά συστήματα όπου λειτουργούν στις συχνότητες των 6/4 GHz. Μπορεί να είναι περιοριστικός παράγοντας σε συστήματα όπου λειτουργούν σε συχνότητες των 14/11GHz, ιδιαίτερα στη περίπτωση που χρησιμοποιούνται χαμηλές γωνίες ανύψωσης.

Βιβλιογραφία

- [1] **Satellite Communications Network of Excellence E-Book 1.1**, Feb. 2007
- [2] **Stojce Dimov I Icev** University of Durban , “ Global Mobile Satellite Communications ” , Springer 2005
- [3] **Αθανάσιος Κανάτας, Φίλιππος Κωνσταντίνου, Γεώργιος Πάντος** “ Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών” , Εκδόσεις Παπασωτηρίου 2008
- [4] **Ajayi Taiwo Seun** , “ Mobile Satellite Communications” , Master Thesis, Blekinge Institute of Technology, 2007
- [5] **Μαρτίν Ζαπκοτσιάν** “ Συστήματα MIMO διπλής Πόλωσης για Κινητές Δορυφορικές Επικοινωνίες” , Διπλωματική Εργασία, Τμήμα ΗΜΜΥ ΕΜΠ, 2009
- [6] **Θεμιστοκλής Σοφός**, “Χαρακτηρισμός διαύλου δορυφορικών κινητών επικοινωνιών με συνδυαστική χρήση αναλυτικών και στατιστικών μεθόδων” , Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα ΗΜΜΥ ΕΜΠ, 2003
- [7] **G.Maral, M.Bousquet**, “ Δορυφορικές Επικοινωνίες” , Εκδόσεις Τζιόλα 2000
- [8] **Κωνσταντίνου Αλεξανδρή** , “Εκτίμηση της Απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης σε Δορυφορικό Δίαυλο” , Διπλωματική Εργασία, Τμήμα ΗΜΜΥ ΕΜΠ, 2008

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΑΥΛΟΥ ΓΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

3.1 Εισαγωγή και Κατηγορίες Μοντέλων

Η μοντελοποίηση ενός δορυφορικού διαύλου κινητών επικοινωνιών όπως είδαμε παραπάνω αποτελεί τον πιο σημαντικό παράγοντα για τον χαρακτηρισμό του διαύλου. Σε μια συντονισμένη προσπάθεια από την πλευρά διαφόρων ερευνητών για την όσο πιο ακριβή και ρεαλιστική σχεδίαση συστημάτων δορυφορικών κινητών επικοινωνιών αναπτύχθηκαν διάφορα μοντέλα πρόβλεψης συμπεριφοράς του διαύλου[8]. Αυτά μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Εμπειρικά μοντέλα ,
- Στατιστικά μοντέλα ,
- Αναλυτικά μοντέλα

ενώ επιπρόσθετα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και διάφορες υβριδικές προσεγγίσεις τους.

Τα εμπειρικά μοντέλα βασίζονται στην εκμετάλλευση πειραματικών δεδομένων από μετρήσεις πεδίου και διακρίνονται για την απλότητα τους. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνται για διαφορετικές συχνότητες ,γωνίες ανύψωσης, τύπους περιβάλλοντος (αστικά, ημιαστικά, αγροτικά) και ποσοστού σκίασης. Τα συγκεκριμένα μοντέλα είναι ακριβή μόνο για περιβάλλον διάδοσης παρόμοιο με το μοντελοποιημένο. Το αρνητικό τους είναι ότι δεν λαμβάνουν υπόψη τα φαινόμενα που παρουσιάζονται κατά την διάδοση.

Τα στατιστικά μοντέλα όπως και τα εμπειρικά βασίζονται σε ένα μεγάλο εύρος μετρήσεων και μέσω στατιστικής ανάλυσης περιγράφουν το δίαυλο διάδοσης.

Με αυτόν τον τρόπο ο δίαυλος περιγράφεται από την στατιστική συμπεριφορά των φαινομένων που τον χαρακτηρίζουν. Τα μοντέλα αυτά προσφέρουν ικανοποιητική ακρίβεια σε παρόμοια μεταξύ τους περιβάλλοντα διάδοσης ενώ το κύριο μειονέκτημα τους είναι ότι δεν βασίζονται στους μηχανισμούς διάδοσης, αλλά στην ακρίβεια και την αξιοπιστία των μετρήσεων. Σε αυτή την κατηγορία

ανήκουν και οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας Rayleigh, Rician, lognormal καθώς και διάφορα άλλα μοντέλα τα οποία περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

Τα αναλυτικά μοντέλα χρησιμοποιούν γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις θεωρίες ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης όπως τη Γεωμετρική Οπτική (Geometrical Optics-GO), την Ομοιόμορφη Θεωρία της Περίθλασης (Uniform Theory of Diffraction-UTD) και την Φυσική Οπτική (Physical Optics-PO), για τον υπολογισμό και την μελέτη των επιπτώσεων στο λαμβανόμενο σήμα από την παρουσία σκεδαστών στην περιοχή του κινητού σταθμού.[18]

Η επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου εξαρτάται άμεσα από την εκάστοτε εφαρμογή. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι ενώ τα εμπειρικά μοντέλα δίνουν την εξάρτηση από σημαντικές παραμέτρους, συνήθως δεν παρέχουν καμία ένδειξη για τους φυσικούς μηχανισμούς της διάδοσης. Τα στατιστικά μοντέλα στηρίζονται σε παραδοχές που απλοποιούν τις συνθήκες διάδοσης, ενώ τα αναλυτικά παρέχουν μια ντετερμινιστική εκτίμηση κάτω από συγκεκριμένες γεωμετρικές συνθήκες.

Στην συνέχεια του κεφαλαίου παραθέτονται και συγκρίνονται όλα τα εμπειρικά στατιστικά και αναλυτικά μοντέλα διάδοσης που υπάρχουν μέχρι αυτήν την στιγμή στην βιβλιογραφία, καθώς επίσης γίνεται και προσομοίωση τους με το λογισμικό Matlab.

3.2 Εμπειρικά (Empirical) μοντέλα

3.2.1 Εξασθένιση λόγω βλάστησης

Το κυριότερο φαινόμενο που επηρεάζει τη διάδοση σε υπαίθριο περιβάλλον είναι η εξασθένιση λόγω βλάστησης. Ο απλούστερος τρόπος μέτρησης της εξασθένισης λόγω βλάστησης είναι να υπολογίσουμε το μήκος διαδρομής που διέρχεται από τα δέντρα και έπειτα να πολλαπλασιάσουμε αυτό το μήκος με μια κατάλληλη τιμή για να βρούμε την συγκεκριμένη εξασθένιση σε (dB/m) [1]. Τα εμπειρικά μοντέλα, που βασίζονται σε εκτεταμένες μετρήσεις, έχουν προταθεί από πολλούς ερευνητές με σκοπό να παρέχουν μια αναλυτική φόρμουλα για τον υπολογισμό της συγκεκριμένης εξασθένισης. Τα κυριότερα εμπειρικά μοντέλα που έχουν υιοθετηθεί για αυτό τον σκοπό είναι:

3.2.1.1 Το τροποποιημένο μοντέλο Εκθετικής Εξασθένησης (MED)

Το μοντέλο αυτό παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Weissberger [2] και αφορούσε τη διάδοση μέσα από δέντρα με μήκος διαδρομής μέσα από την βλάστηση μέχρι τα 400m. Έπειτα το μοντέλο MED απλοποιήθηκε από την CCIR [3] και τροποποιήθηκε από τους Smith, Strutzman και Barts [4], [5] στην προσπάθειά τους για μοντελοποίηση του δορυφορικού καναλιού κινητών επικοινωνιών. Το συγκεκριμένο μοντέλο υπολογίζει την μέση εξασθένηση από την επίδραση της βλάστησης βασισμένο στην συχνότητα και τις φυσικές παραμέτρους της ζεύξης. Δίνεται από την εξίσωση:

$$L_n = a_n * D_n \quad ()$$

Όπου:

L_n : η εξασθένηση σε dB,

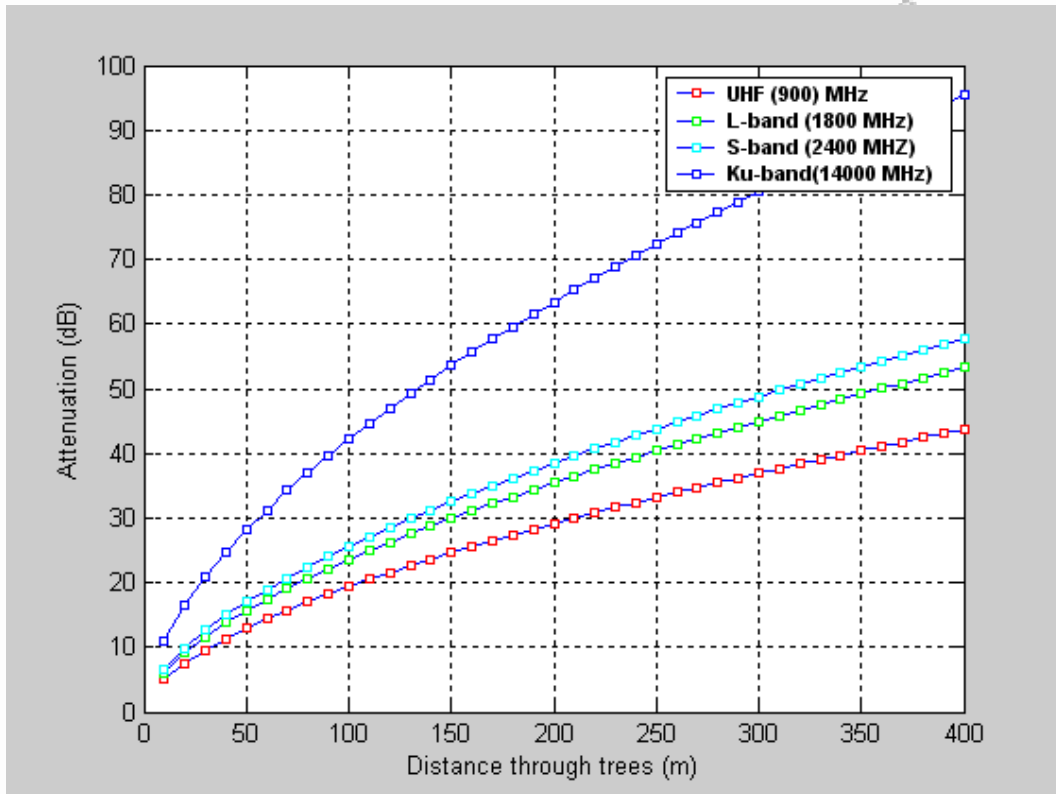
D_n : το μήκος της διαδρομής μέσα από την βλάστηση σε m

a_n : ο παράγοντας της ειδικής εξασθένησης της βλάστησης σε dB/m

Πρέπει να σημειωθεί ότι στις επόμενες εκφράσεις, ο παράγοντας ειδικής εξασθένησης a_n εξαρτάται από το μήκος της διαδρομής μέσα από την βλάστηση D_n , το οποίο κατά κάποιο τρόπο έρχεται σε αντίθεση με την ιδέα της ειδικής εξασθένησης. Η ειδική εξασθένηση σύμφωνα με [2] δίνεται από τον τύπο:

$$a_n = 0.187 * f^{0.284} * D_n^{-0.412}, \text{ για } 200 \text{ MHz} < f < 95 \text{ GHz},$$

Όπου f είναι η συχνότητα σε MHz και D_n το μήκος διαδρομής σε μέτρα..



Σχήμα 3.1 Το μοντέλο του Weissberger σε τέσσερις διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που δίνει το μοντέλο σε τέσσερις διαφορετικές συχνοτήτες (UHF, L, S και Ku ζώνες συχνοτήτων) και για μια διαδρομή 400m. Παρατηρούμε ότι για ένα μήκος διαδρομής 200m μέσα από βλάστηση η εξασθένιση παίρνει την τιμή των 29 dB στην ζώνη UHF, 35 dB στην L-band, 38 dB στην S-band, ενώ αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό στη Ku-band λαμβάνοντας την τιμή των 64 dB.

Σύμφωνα με την CCIR [3] η ειδική εξασθένιση δίνεται από την σχέση:

$$a_n = 0.2 * f^{0.3} * D_n^{-0.4}$$
, για $200 \text{ MHz} < f < 95 \text{ GHz}$ όπου f είναι η συχνότητα σε MHz, και D_n είναι το μήκος της διαδρομής σε μέτρα.

Επιπρόσθετα οι Barts και Strutzman [4],[5] δίνουν τις εξής εκφράσεις :

$$a_n = 0.063 * f^{0.284} \quad [\text{dB/m}], \quad \text{για } 0\text{m} < D_n < 14\text{m}$$

$$a_n = 0.187 * f^{0.284} * D_n^{-0.412} \quad [\text{dB/m}], \quad \text{για } 14\text{m} < D_n < 400\text{m}$$

Όπου f είναι η συχνότητα σε MHz και D_n είναι το μήκος διαδρομής σε μέτρα.

3.2.1.2 Το μοντέλο Vogel & Goldhirsh

Το μοντέλο είναι μια προσαρμογή ελαχίστων τετραγώνων όπου βασίζεται σε μετρήσεις που έγιναν από ερευνητές σε δάσος με βελανιδιές τον Οκτώβριο του 1985 (πλήρες φύλλωμα) και τον Μάρτιο του 1986 (χωρίς φύλλωμα) στα 870 MHz με τον δέκτη να παραμένει ακίνητος. Το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της εξασθένισης από ένα και μόνο δέντρο σαν συνάρτηση της γωνιάς ανύψωσης και ισχύει για γωνιές από 15° έως 40° .

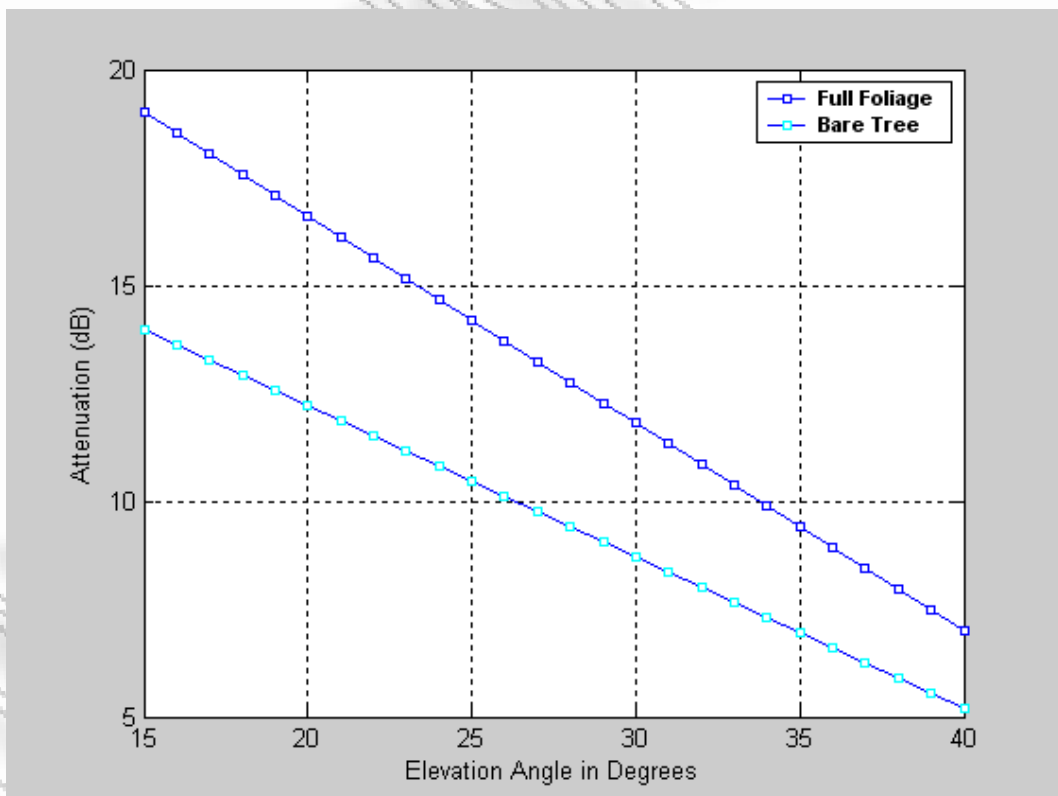
Δίνεται από την εξίσωση:

$$L_1(\theta) = 0.48 * \theta + 26.2 \quad , \text{ για πλήρες φύλλωμα}$$

$$L_2(\theta) = -0.35 * \theta + 19.2 \quad , \text{ χωρίς φύλλωμα}$$

Όπου L είναι η εξασθένιση σε dB και θ είναι η γωνία ανύψωσης σε μοίρες.

Από το παρακάτω διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η εξασθένιση από ένα δέντρο κυμαίνεται από 5 έως 14 dB για γυμνά κλαδιά και από 7 έως 19 dB για πλήρες φύλλωμα ανάλογα με την γωνία ανύψωσης.



Σχήμα 3.2 Το μοντέλο Vogel & Goldhirsh

Υπάρχει επίσης μια σχέση που ενώνει τις δυο πιο πάνω εξισώσεις και είναι η παρακάτω:

$$L (\text{Full Foliage}) \approx 1.35 * L (\text{Bare tree}) \text{ και } 15^\circ < \theta < 35^\circ$$

Οι ίδιοι ερευνητές πραγματοποίησαν εποχιακές μετρήσεις [6] για κινητούς δέκτες στο Maryland των ΗΠΑ στις οποίες το όχημα δέκτης κινούνταν κατά μήκος του αυτοκινητόδρομου με βλάστηση στα άκρα. Η κατεύθυνση διάδοσης ήταν σκιασμένη στο 75% της απόστασης όπου διανύθηκε.

Κατόπιν από σύγκριση των αθροιστικών συναρτήσεων κατανομής για διαφορετικές εποχές προέκυψε η παρακάτω θέση για πλήρες φύλλωμα και γυμνά κλαδιά

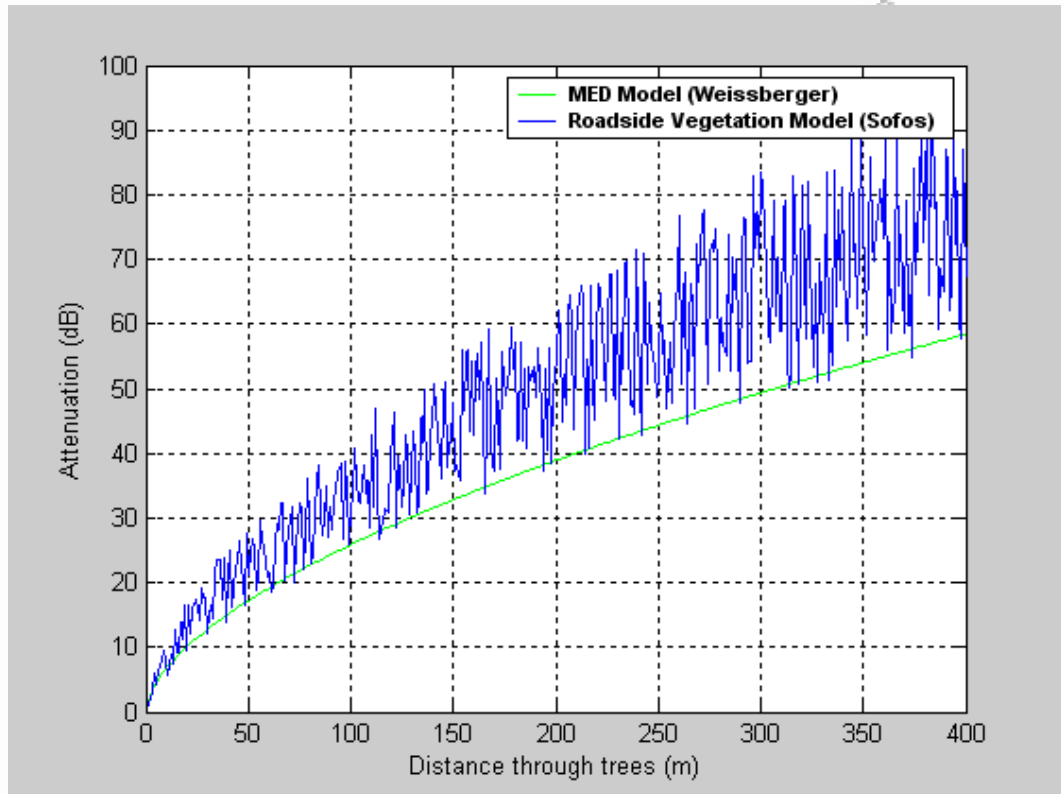
$$L (\text{Full Foliage}) \approx 1.24 * L (\text{Bare tree}) \text{ και } 15^\circ < \theta < 35^\circ$$

3.2.1.3 Το μοντέλο Roadside Vegetation Attenuation Θ-Σοφός

Το μοντέλο αυτό παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Θεμιστοκλή Σοφό[7] από την διεξαγωγή μιας σειράς μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν από το εργαστήριο κινητών ραδιοεπικοινωνιών του ΕΜΠ στους 2.5 GHz για μεσαίες και χαμηλές γωνίες ανύψωσης και για ημιαστικό-υπαίθριο περιβάλλον. (Μετρήθηκαν εννέα διαδρομές στην Πολυτεχνειούπολη ζωγράφου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνας και για την επίτευξη των γωνιών ανύψωσης χρησιμοποιήθηκε ένα κτίριο με κατάλληλη διάταξη ιστού-κεραίας [8]). Το μοντέλο αυτό αποτελεί ένα συνδυασμό του βελτιωμένου μοντέλου MED με στατιστική αλλοίωση. Και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$F(\text{dB})=0.3*A+0.7 \text{ rand}(2A,A-2),[8]$$

Όπου F είναι το τελικό εξαγόμενο αποτέλεσμα για την εξασθένιση ανά σημείο διαδρομής, A είναι η τιμή που έχει υπολογιστεί από το τροποποιημένο MED σε dB (αρνητικές τιμές) και $\text{rand}(\epsilon,\sigma)$ είναι ένας πραγματικός τυχαίος αριθμός σχεδόν κανονικά κατανεμημένος σύμφωνα με κατανομή Gauss ,μέση τιμή ϵ ,μέση απόκλιση σ . Οι τιμές για το $\epsilon, 2 A$ και για το $\sigma,A-2$ αντιστοιχούν στην κατάλληλη στατιστική αλλοίωση για την προσομοίωση των χαρακτηριστικών του δέντρου.



Σχήμα 3.3 Το μοντέλο Roadside Vegetation Attenuation (Θ. Σοφός)

3.2.2 Το μοντέλο Empirical Roadside Shadowing (ERS)

Το μοντέλο αυτό βασίστηκε σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από τους Vogel και Goldhirsh [9], [10] στις συχνότητες των 870 MHz και 1500 MHz, σε ημιαστικές και αγροτικές περιοχές. Στο συγκεκριμένο εγχείρημα χρησιμοποιήθηκε ο γεωστατικός δορυφόρος Inmarsat MARECS-B2 για 21° γωνία ανύψωσης και ένα ελικόπτερο για τις 39°, 45° και 60° μοίρες γωνία ανύψωσης. Το συγκεκριμένο μοντέλο δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$M = -A * \ln(P) + B,$$

Όπου M είναι το απαιτούμενο περιθώριο ισχύος, P η επιθυμητή πιθανότητα διακοπής της ζεύξης ή αλλιώς το ποσοστό απόστασης ή χρόνου για το οποίο η εξασθένιση λόγω διαλείψεων έχει ξεπεράσει το περιθώριο ισχύος και A, B δύο παράγοντες όπου εξαρτώνται από την γωνία ανύψωσης θ :

$$A = 3.44 + 0.0975 * \theta - 0.002 * \theta^2$$

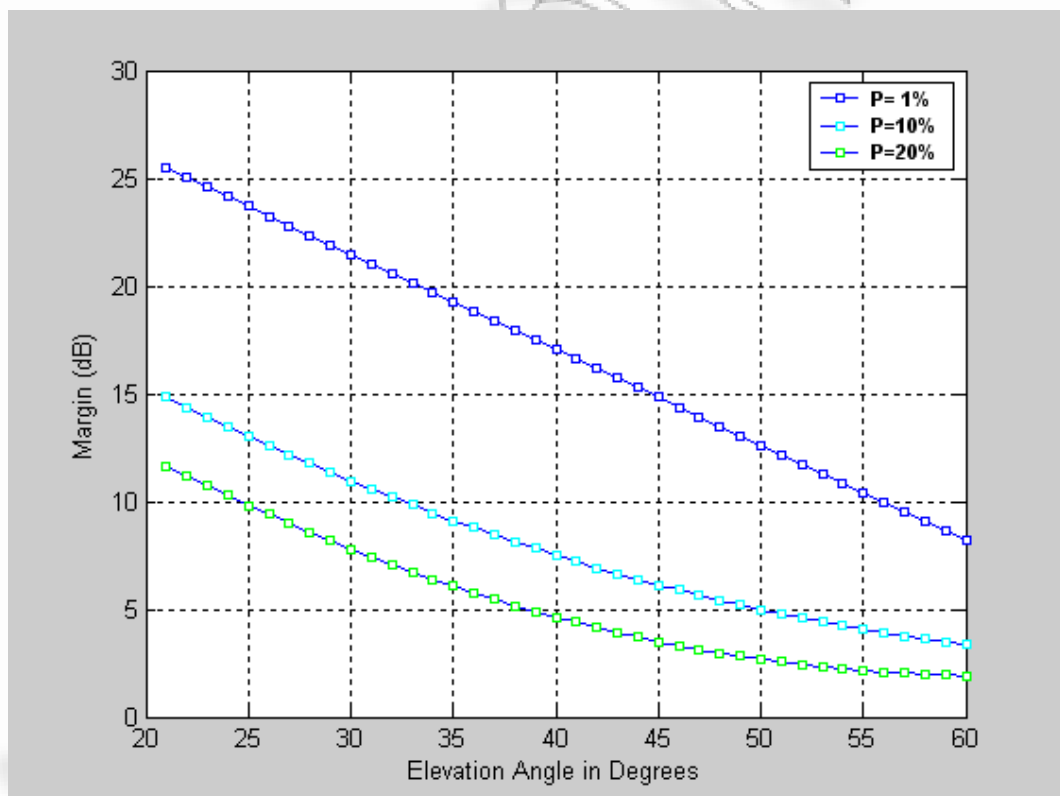
$$B = -0.433 * \theta - 0.002 * \theta^2$$

Το μοντέλο αυτό ισχύει για P μεταξύ 1 και 20 %.Επιπλέον σύμφωνα με μια μελέτη του Bundrock και Harvey το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να επεκταθεί σε ζώνες συχνοτήτων UHF (870 MHz) και S (2660 MHz) δίνοντας μέγιστη πιθανότητα σφάλματος 6%.[1] .Επίσης για πιθανότητα $20\% < P \leq 80$

$$L(P, \theta) = \frac{L(20\%, \theta)}{\ln 4} * \ln\left(\frac{80}{P}\right) \quad [11]$$

Τέλος για να επεκταθεί το μοντέλο για υψηλότερες συχνότητες $0.8 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz}$ πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο τύπος:

$$L(f_2) = L(f_1) \exp\left[1.5\left(\frac{1}{\sqrt{f_1}} - \frac{1}{\sqrt{f_2}}\right)\right] \quad [11]$$



Σχήμα 3.4: Περιθώριο ισχύος από το μοντέλο ERS σε συχνότητα 1500 MHz για γωνίες ανύψωσης μεταξύ 21° και 60°

Από την συγκεκριμένη γραφική παράσταση μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε ότι καθώς αυξάνεται η γωνία ανύψωσης έχουμε πτώση του περιθωρίου ισχύος φθάνοντας στην ελάχιστη τιμή των 1.8 dB για 60° γωνία ανύψωσης και P=20%.Ενώ αντίστοιχα έχουμε αύξηση του περιθωρίου ισχύος καθώς μειώνεται η

επιθυμητή πιθανότητα P παίρνοντας την τιμή των 26 dB για γωνία ανύψωσης 21° και $P=1\%$.

3.2.3 Το μοντέλο ESA-Modified Empirical Roadside Shadowing (MERS)

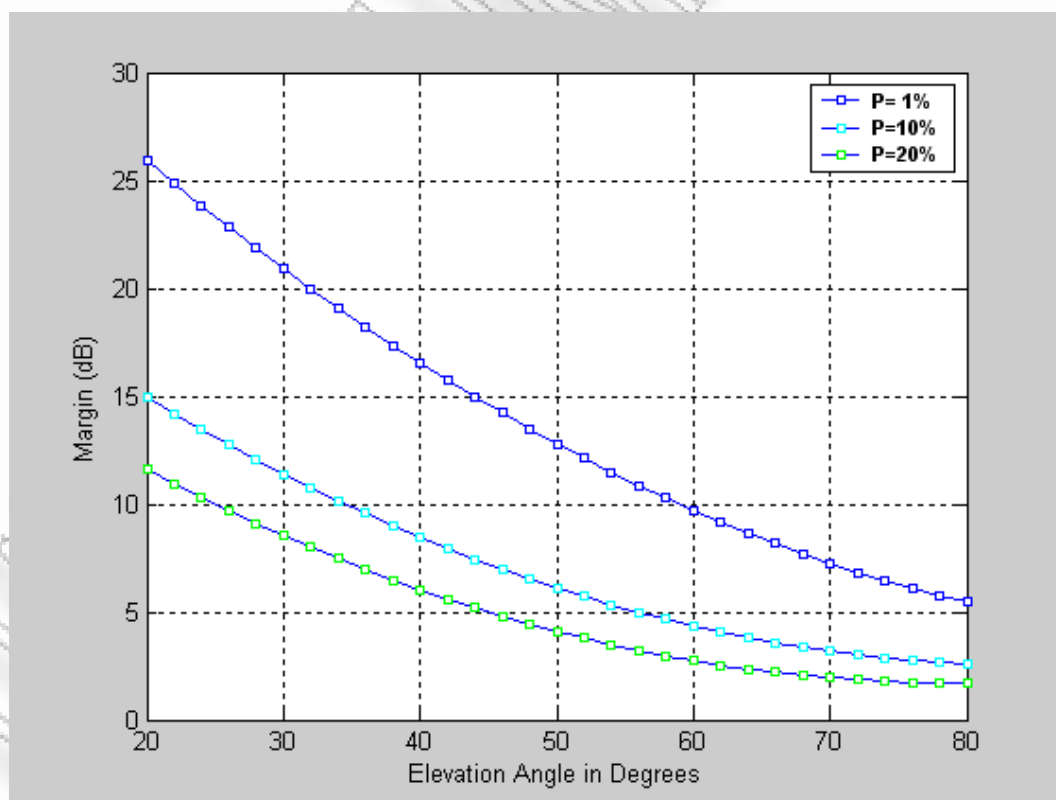
Το μοντέλο αυτό παρουσιάστηκε από μια ομάδα επιστημόνων της ESA [12] και παρέχει το περιθώριο ισχύος για γωνίες ανύψωσης από 20° έως 80° στην συχνότητα των 1300 MHz, και για την περίπτωση όπου η απόσταση σκίασης κυμαίνεται από 35% έως 85%. Δίνεται από τον τύπο :

$$M = -A * \ln(P) + B$$

Όπου M είναι το απαιτούμενο περιθώριο ισχύος σε dB, και την πιθανότητα P να παίρνει τιμές από 1% έως 30%. Οι παράγοντες A και B δίνονται από τον παρακάτω τύπο:

$$A = 1.117 * 10^{-4} * \theta^2 - 0.0701 * \theta + 6.1304,$$

$$B = 0.0032 * \theta^2 - 0.6612 * \theta + 37.8581, \quad \text{όπου } \theta \text{ είναι η γωνία ανύψωσης (μοίρες).}$$



Σχήμα 3.5. Περιθώριο ισχύος από το μοντέλο MERS σε συχνότητα 1300 MHz για γωνίες ανύψωσης 20° έως 80° .

3.2.4 Το μοντέλο Combined Empirical Fading Model (CEFM)

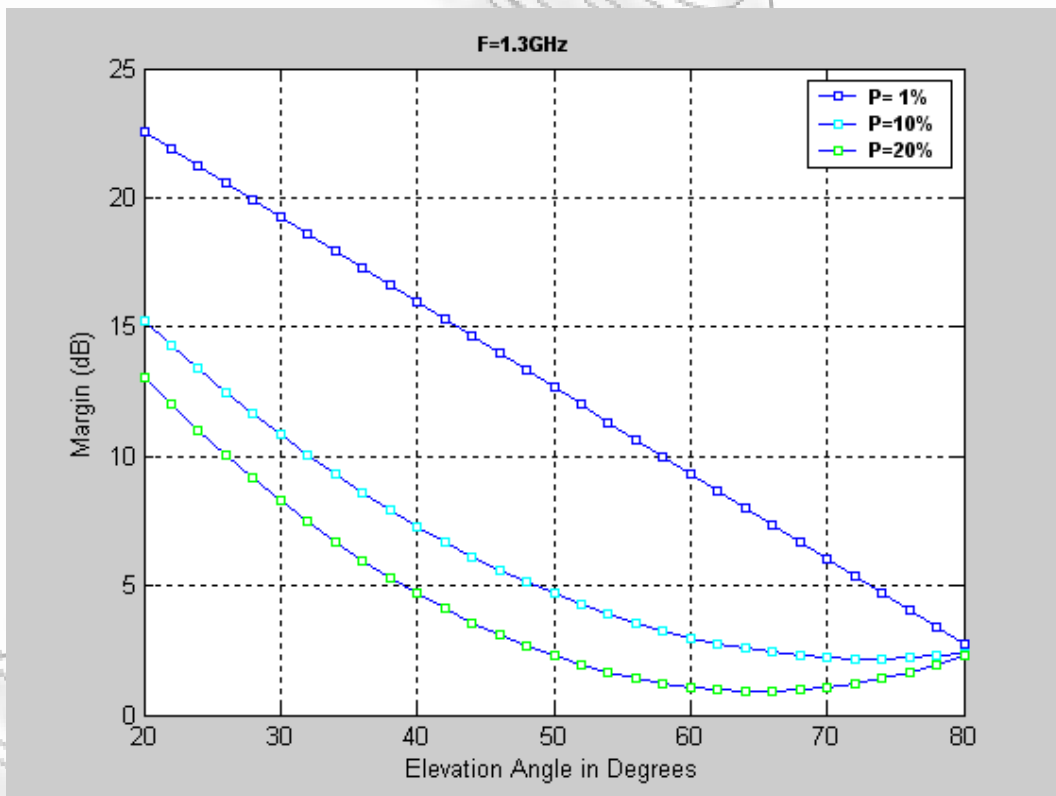
Η αναλυτική έκφραση για αυτό το μοντέλο προτάθηκε από τον Evans [13] και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην συχνότητα των 1300 MHz όσο και στα 2450, για γωνίες ανύψωσης από 20° ως 80° σε ημιαστικά και αγροτικά περιβάλλοντα. Η έκφραση αυτού του μοντέλου είναι παρόμοια με τα ERS και MERS με την μόνη διαφορά ότι στο συγκεκριμένο μοντέλο περιλαμβάνεται και η συχνότητα ως παράμετρος. Δίνεται από το παρακάτω εξίσωση:

$$M = A * \ln(P) + B$$

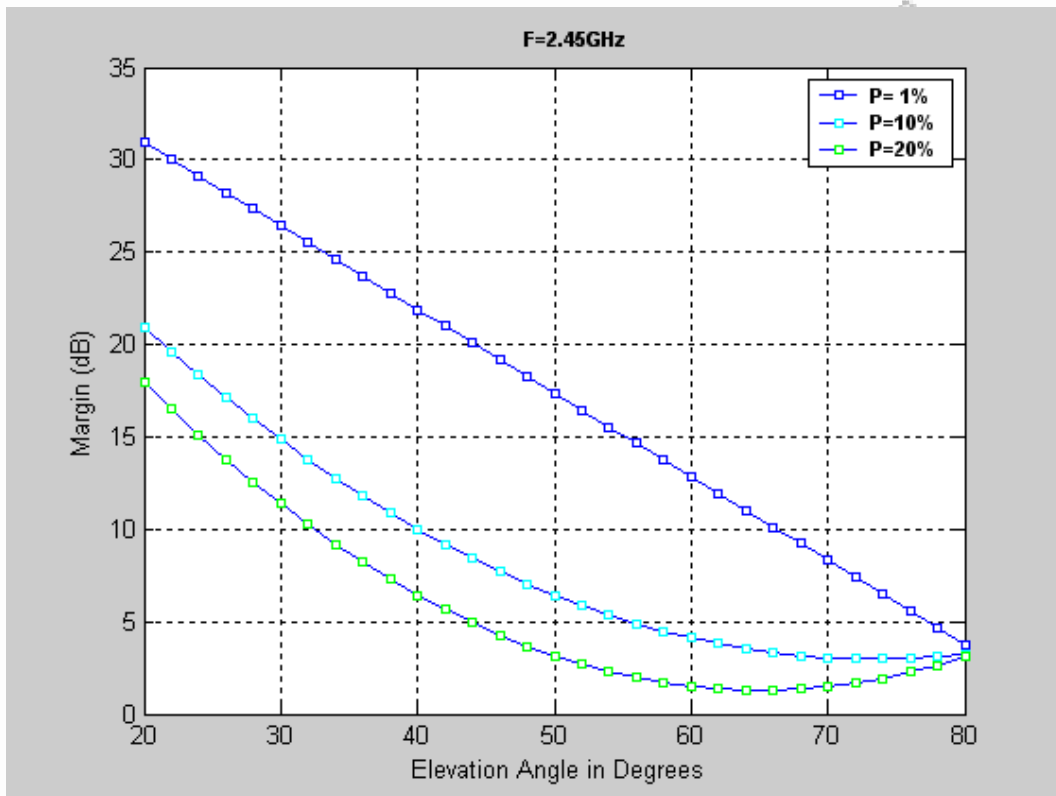
$$A = 0.002 * \theta^2 - 0.15 * \theta - 0.7 - 0.2 * f$$

$$B = 272 + 15 * f - 0.33 * \theta,$$

Όπου M είναι το περιθώριο ισχύος, P είναι η απαιτούμενη πιθανότητα με τιμές από 1% έως 20%, f είναι η συχνότητα σε GHz και θ είναι η γωνία ανύψωσης σε μοίρες.



Σχήμα 3.6 Το μοντέλο CEFM για συχνότητα 1.3 GHz



Σχήμα 3.7 Το μοντέλο CEFM για συχνότητα 2.45GHz

3.2.5 Το μοντέλο CCIR

Το μοντέλο αυτό [14] βασίζεται σε μετρήσεις που έγιναν από τον G.Hess [8] χρησιμοποιώντας το δορυφόρο ATS-6 της NASA και σε συχνότητες 860 και 1550 MHz ,γωνίες ανύψωσης 19° έως 43° σε αστικές, ημιαστικές και αγροτικές περιοχές. Το απαιτούμενο περιθώριο M υπολογίζεται με βάση το κριτήριο η ισχύς του φέροντος να είναι πάνω από μια καθορισμένη τιμή για 90% του χρόνου. Το απαιτούμενο περιθώριο ισχύος για αστικές περιοχές δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$M = 17.8 + 1.93 * f - 0.052 * \theta + K * (7.6 + 0.053 * f + 0.040 * \theta),$$

ενώ για ημιαστικές και αγροτικές περιοχές

$M = 12.5 + 0.17 * f - 0.17 * \theta + K * (6.4 - 1.19 * f - 0.05 * \theta)$, όπου M είναι το περιθώριο σε dB , f είναι η συχνότητα σε GHz, θ η γωνία ανύψωσης (μοίρες) και τέλος K ένας παράγοντας που συσχετίζει το ποσοστό των περιοχών για το οποίο το φέρον θα έχει ισχύς μεγαλύτερη από την καθορισμένη τιμή. Ο παράγοντας K μπορεί να πάρει τις παρακάτω τιμές:

$K(50\%)=0$, $K(90\%)=1.3$, $K(95\%)=1.65$, $K(99\%)=2.35$

3.2.6 Μοντέλο Αστικού Περιβάλλοντος Α-Κανάτας [15]

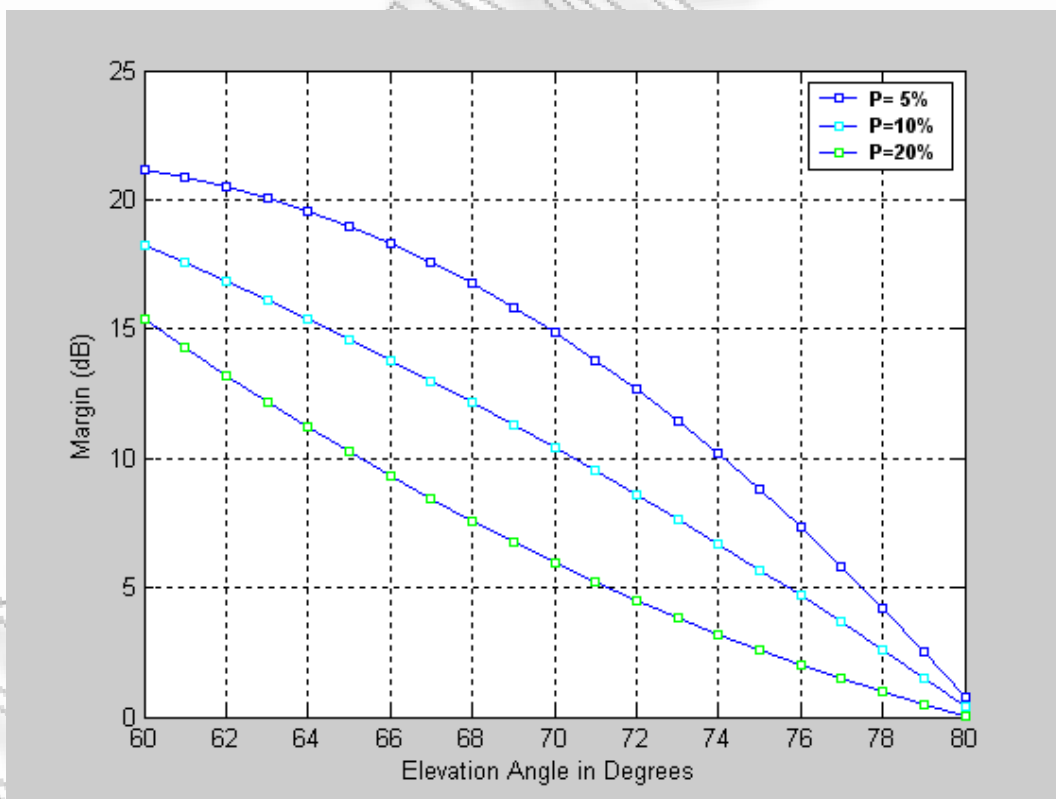
Το μοντέλο αυτό προέκυψε από μετρήσεις που έγιναν το Ιούνιο του 1996 στο κέντρο της Αθήνας χρησιμοποιώντας ένα ελικόπτερο ,σε υψηλές γωνίες ανύψωσης και στην συχνότητα 1800 MHz. Το μοντέλο δίνεται από την εξίσωση:

$$M = -A * \ln(P) + B$$

$$A = -180.487 + 5.5219 * \theta - 0.04074 * \theta^2$$

$$B = -395.364 + 13.3259 * \theta - 0.10454 * \theta^2$$

Όπου M είναι το περιθώριο ισχύος, P είναι η απαιτούμενη πιθανότητα, θ είναι η γωνιά ανύψωσης σε μοίρες και A, B δύο παράγοντες του πολυώνυμου. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε η διαφορά με τα προηγούμενα μοντέλα έγκειται στο γεγονός ότι ο παράγοντας B είναι $2^{\text{ου}}$ βαθμού πολυώνυμο και εφαρμόζεται για τιμές του P από 5% έως 30%.



Σχήμα 3.8 Μοντέλο Αστικού Περιβάλλοντος για συχνότητα 1800 MHz

3.2.7 Μοντέλα Μετάβασης συχνοτήτων

3.2.7.1 Το μοντέλο Vogel & Goldhirsh [16]

Το μοντέλο αυτό παρέχει την σύνδεση της εξασθένησης από διαλείψεις λόγω βλάστησης σε τρεις ζώνες συχνοτήτων UHF (870MHz), L ζώνη(1500MHz) και S ζώνη (2660MHz). Το μοντέλο δίνεται από την εξίσωση:

$$L(f_L) \approx L(f_{UHF}) * \sqrt{\frac{f_L}{f_{UHF}}} \quad \text{όπου } L(f_L) \text{ είναι η εξασθένηση στην L ζώνη σε}$$

dB, $L(f_{UHF})$ είναι η εξασθένηση στην UHF ζώνη. Σύμφωνα με τα παραπάνω έχουμε:

$$L(f_{1500}) \approx 1.31 * L(f_{870})$$

$$L(f_{2660}) \approx 1.33 * L(f_{1500})$$

3.2.7.2 Το μοντέλο ESTEC

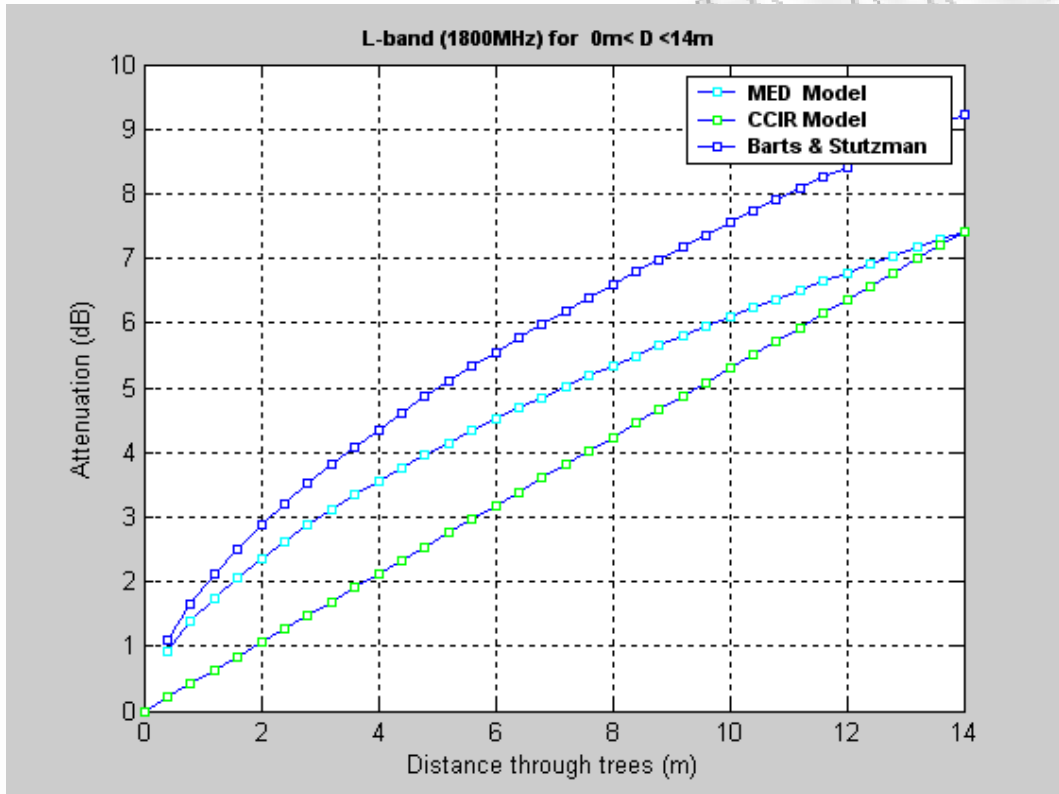
Το συγκεκριμένο μοντέλο συνδέει την εξασθένηση λόγω βλάστησης στην L (1500MHz) και S ζώνη(2660MHz) και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$L(f_s) \approx 1.41 * L(f_L), [1] \quad \text{όπου } f_s = 2.6 \text{ GHz και } f_L = 1.3 \text{ GHz.}$$

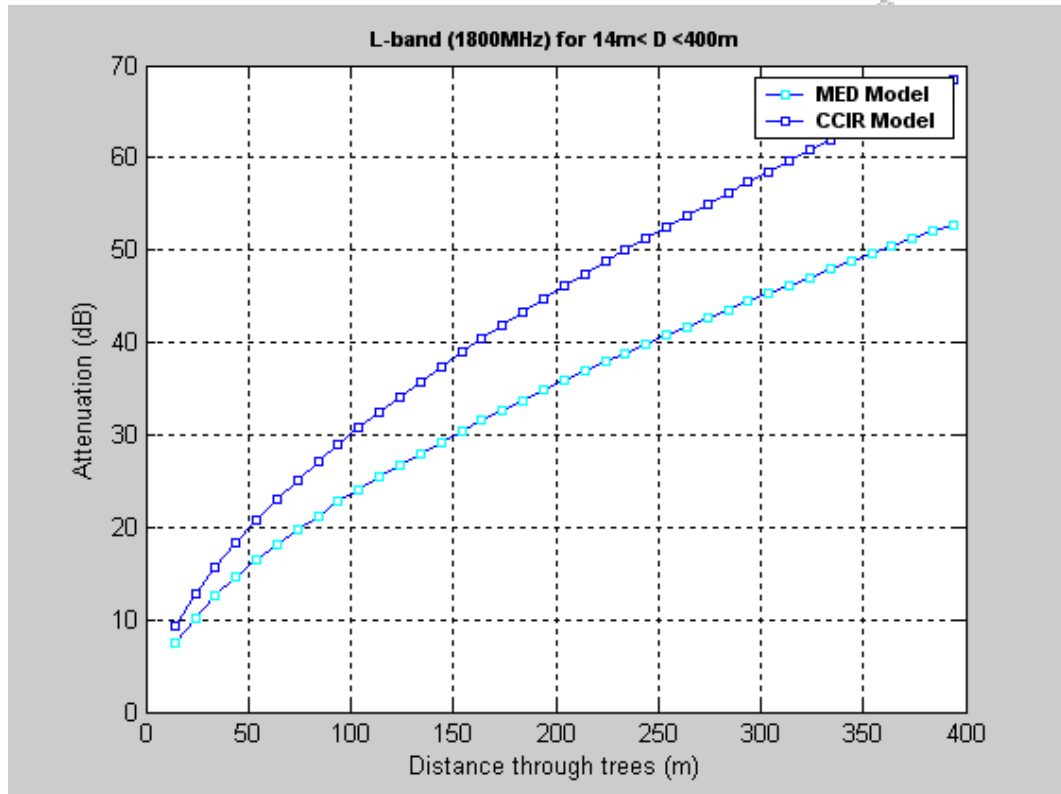
3.2.8 Σύγκριση των μοντέλων

Πιο πάνω αναφερθήκαμε σε όλα τα εμπειρικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην μοντελοποίηση του δορυφορικού καναλιού κινητών επικοινωνιών. Ένα μέρος αυτών των μοντέλων χρησιμεύουν για τον υπολογισμό της εξασθένησης όπου υφίσταται το σήμα λόγω βλάστησης. Στο σχήμα 3.9 παραθέτονται τρία μοντέλα, αυτά των Wiessberger, Barts & Strutzman και CCIR όπου χρησιμοποιούνται για αυτόν τον σκοπό. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων για αυτά τα μοντέλα όπως αυτά παρουσιάζονται στο σχήμα 3.9 παρατηρούμε ότι για απόσταση διαδρομής από $0m < D < 14m$ και συχνότητα 1800MHz χρησιμοποιώντας το μοντέλο Barts & Strutzman έχουμε μεγαλύτερες τιμές εξασθένησης με μέγιστη τιμή τα 9.2 dB για απόσταση διαδρομής $D=14m$. Συγκρίνοντας το με το CCIR, εκείνο παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές εξασθένησης και από τα τρία μοντέλα για όλο το μήκος της διαδρομής D . Στην περίπτωση όπου η απόσταση διαδρομής είναι από $14m < D < 400$ παρατηρούμε (σχήμα 3.10) ότι για τα πρώτα 50 m τα μοντέλα CCIR και MED παρουσιάζουν

παραπλήσιες τιμές εξασθένησης με το πρώτο να παρουσιάζει μια σαφώς καλύτερη προσέγγιση, καθώς όμως αυξάνει το μήκος διαδρομής, ιδιαίτερα μετά τα 100m παρατηρούμε μεγάλη απόκλιση στις τιμές εξασθένησης ανάμεσα στα δύο μοντέλα, με μέγιστη διαφορά της τάξεως των 15 dB για απόσταση διαδρομής 400m.



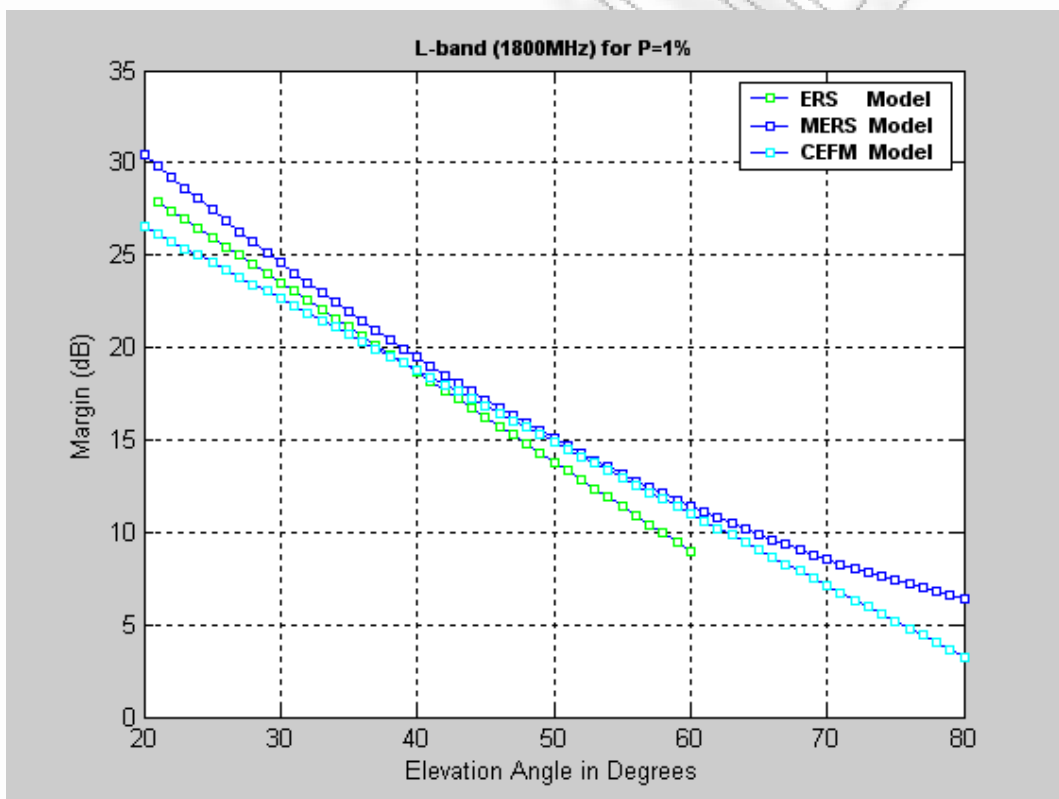
Σχήμα 3.9 Σύγκριση των μοντέλων MED, CCIR, Barts & Strutzman στα 1800 MHz και για απόσταση διαδρομής $0 < D < 14$ m



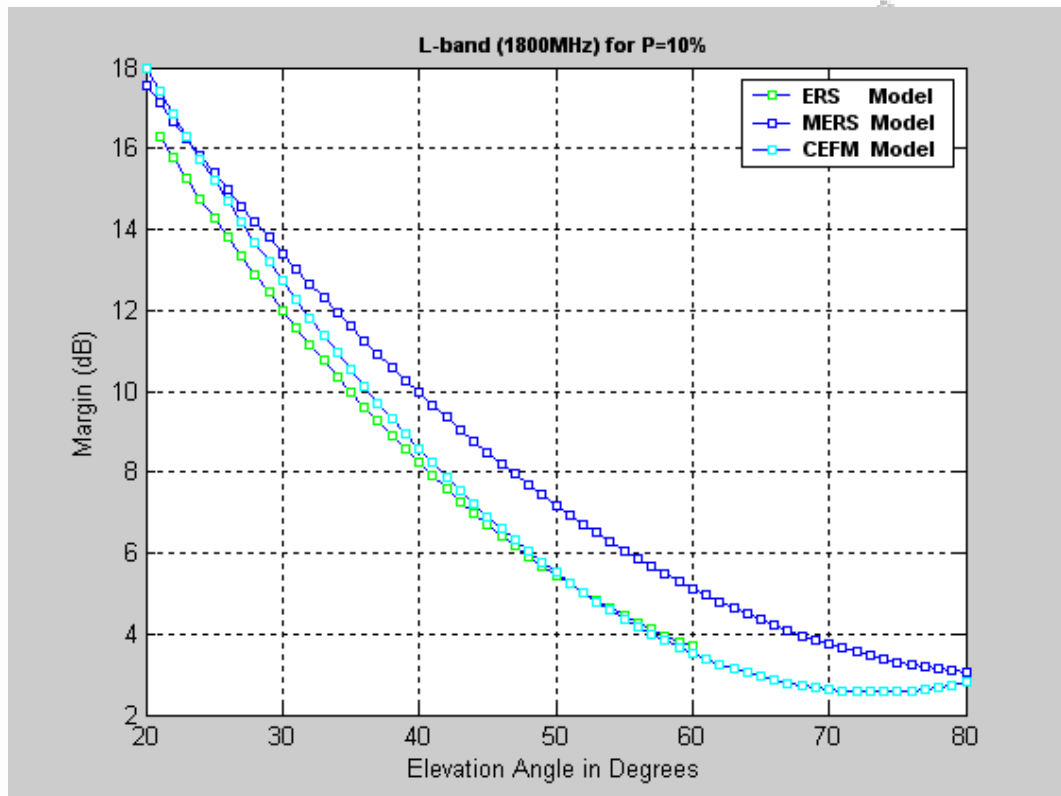
Σχήμα 3.10 Σύγκριση των μοντέλων MED ,CCIR στα 1800 MHz και για απόσταση διαδρομής $14 < D < 400m$

Μια άλλη διάκριση των εμπειρικών μοντέλων αποτελούν τα μοντέλα αυτά που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του απαιτούμενου περιθωρίου ισχύος λόγω διαλείψεων. Στην συνέχεια παρουσιάζονται-συγκρίνονται τα μοντέλα MERS,CEFM και URBAN model,με τα δύο πρώτα να είναι εφαρμόσιμα σε ημιαστικά και αγροτικά περιβάλλοντα ενώ το δεύτερο σε αστικά. Στα σχήματα 3.11, 3.12, 3.13 παρουσιάζεται για καθένα από τα μοντέλα CEFM,ERS,MERS το απαιτούμενο περιθώριο ισχύος σε dB ,για γωνίες ανύψωσης από 20° έως 80° ,και για τρεις τιμές πιθανότητας (1%,10%,20%). (Όλα τα μοντέλα έχουν αναχθεί στην ίδια συχνότητα με την βοήθεια του μοντέλου μετάβασης συχνότητας).Στον πίνακα 3.1 μπορούμε να βρούμε τις αναμενόμενες τιμές του περιθωρίου ισχύος για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης και στην συχνότητα των 1800 MHz. Παρατηρώντας κάποιος το σχήμα 3.11 μπορεί εύκολα να διαπιστώσει την συμφωνία που παρουσιάζουν τα τρία μοντέλα (ERS,MERS,CEFM) για όλο το εύρος των τιμών της γωνίας ανύψωσης. Η μέγιστη διαφορά δεν ξεπερνάει την

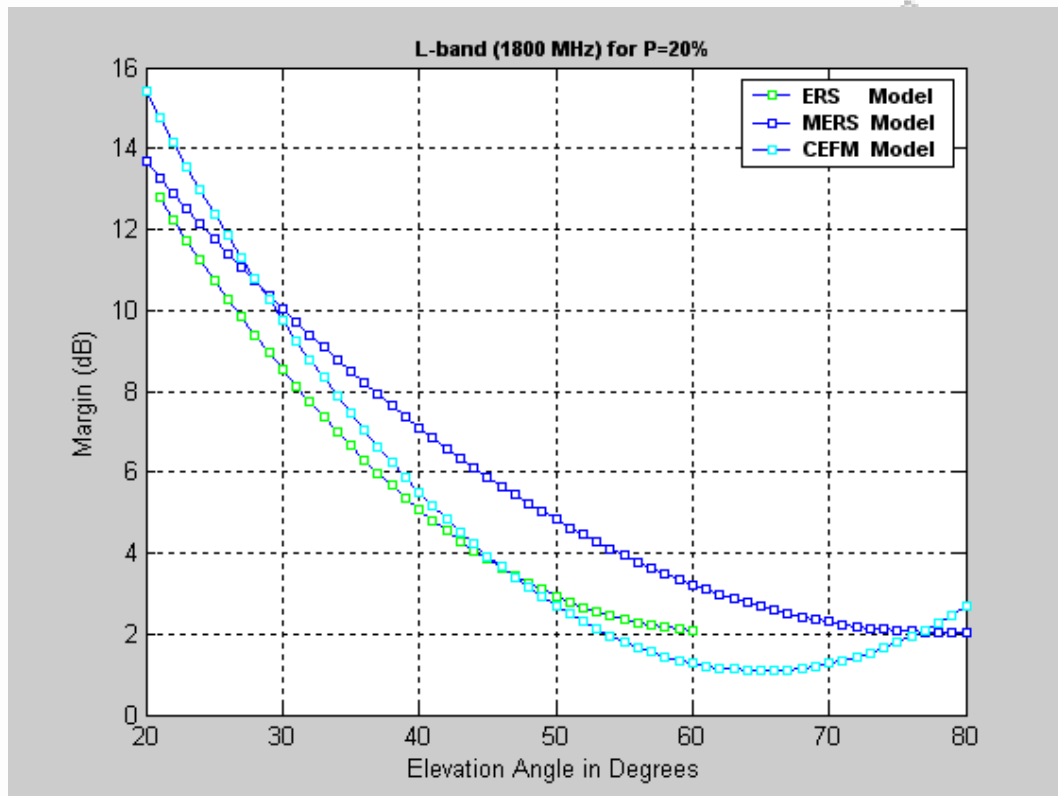
τιμή των 4 dB .Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η μικρή απόκλιση μεταξύ των μοντέλων υπάρχει και λόγω των διαφορετικών περιβάλλοντων στα οποία πραγματοποιηθήκαν οι μετρήσεις.(π.χ εποχή, τύπος και πυκνότητα βλάστησης, παράγοντας σκίασης, πλάτος δρόμων κ.α). Επίσης μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε και για τα τρία μοντέλα, ότι έχουμε μείωση του περιθωρίου ισχύος καθώς αυξάνεται η γωνία ανύψωσης με μεγάλες αποκλίσεις στο περιθώριο ισχύος καθώς αυξάνεται η πιθανότητα P. Αυτό μας δείχνει την δυσκολία υπολογισμού του περιθωρίου(Margin) σε περιπτώσεις όπου απαιτείται υψηλή διαθεσιμότητα ζεύξης.



Σχήμα 3.11 Σύγκριση των μοντέλων ERS,MERS,CEFΜ στα 1800 MHz και για πιθανότητα P=1%



Σχήμα 3.12 Σύγκριση των μοντέλων ERS, MERS, CEFM στα 1800 MHz και για πιθανότητα $P=10\%$



Σχήμα 3.13 Σύγκριση των μοντέλων ERS, MERS, CEFM στα 1800 MHz και για πιθανότητα P=20%

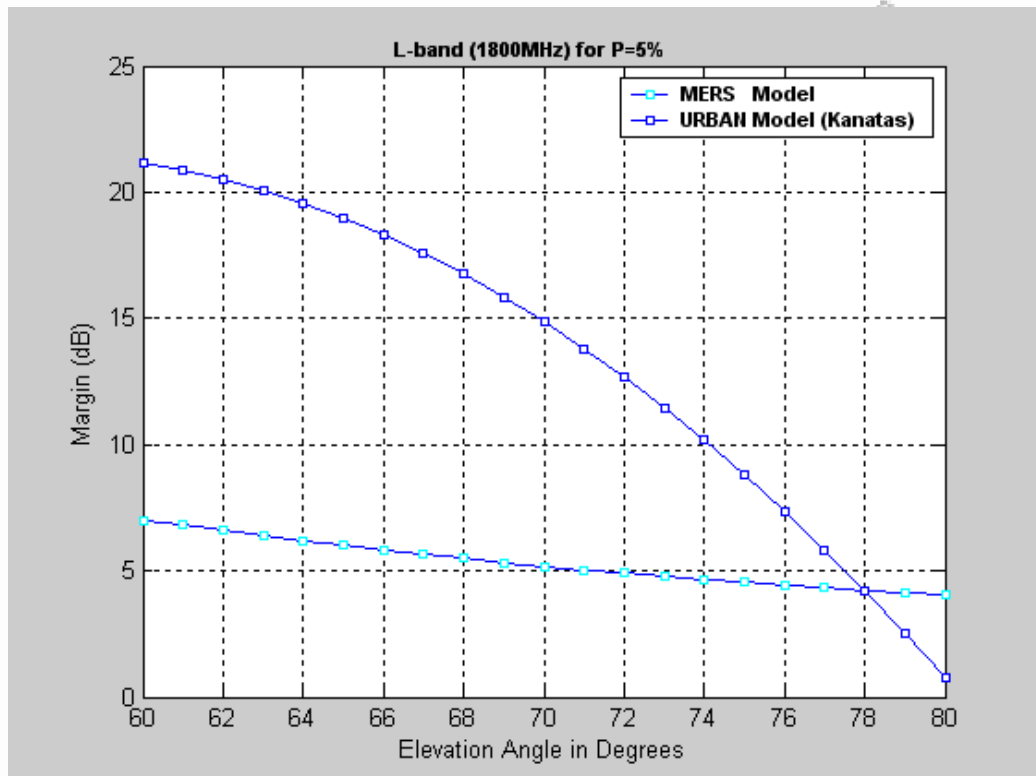
	P=1 %	P=10 %	P=20 %
20°	26.5- 30.5	16.3- 18.0	12.8- 15.4
30°	22.7- 24.7	12.0- 13.4	8.6- 10.1
40°	18.7- 19.5	8.2- 9.9	5.1- 7.1
50°	13.8- 15.1	5.5- 7.2	2.7- 4.8
60°	8.9- 11.5	3.6- 5.1	1.3- 3.2
70°	7.9- 8.6	2.6- 3.7	1.3- 2.3
80°	3.3- 6.4	2.8- 3.1	2.1- 2.7

Πίνακας 3.1 Τιμές του περιθωρίου ισχύος Margin (dB) για τα μοντέλα ERS, MERS, CEFM στην L ζώνη.

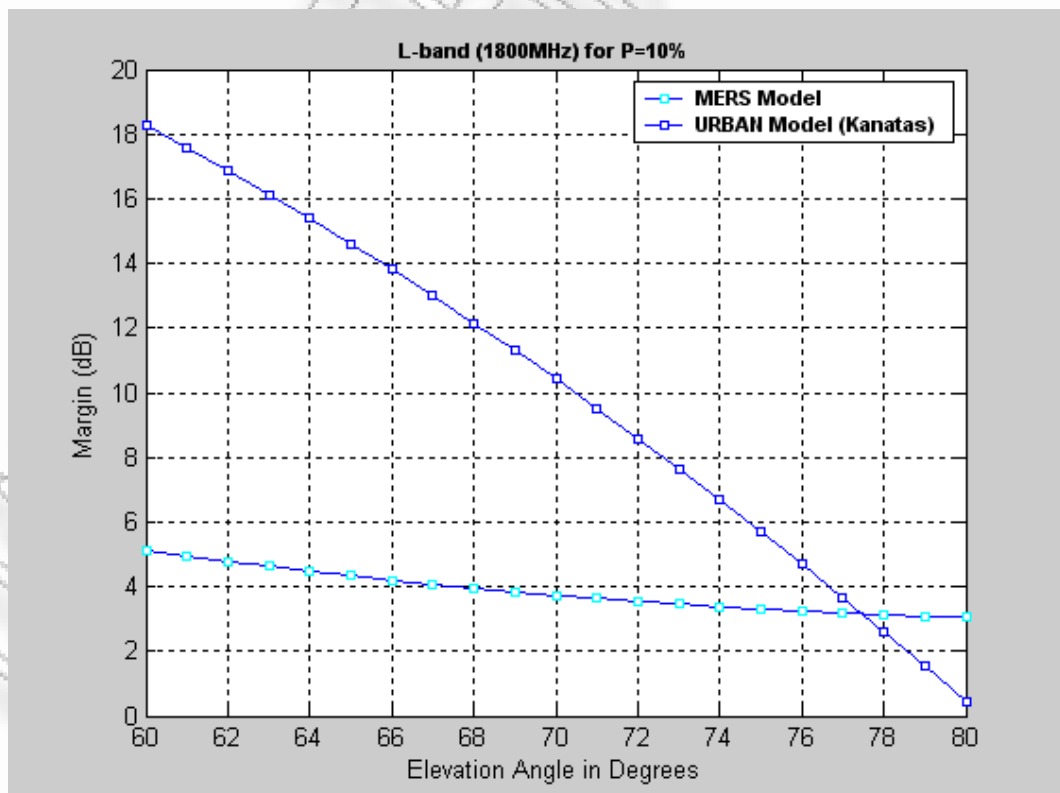
Τα σχήματα 3.14, 3.15, 3.16 παρουσιάζει συγκριτικά τα μοντέλα MERS και το μοντέλο αστικού περιβάλλοντος (Κανάτας) για μεγάλες γωνίες ανύψωσης από 60° έως 80°. Στον πίνακα 3.1 μπορούμε να βρούμε τις αναμενόμενες τιμές του περιθωρίου ισχύος για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης και πιθανότητες στην συχνότητα των 1800 MHz. Όπως εύκολα μπορεί να παρατηρήσει κανείς έχουμε μείωση του απαιτούμενου περιθωρίου ισχύος καθώς αυξάνεται η γωνία ανύψωσης πράγμα το οποίο ισχύει και για τα δύο μοντέλα. Γίνεται όμως ιδιαίτερος αντιληπτό στο μοντέλο αστικού περιβάλλοντος το οποίο παρουσιάζει και τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις (τιμές από 0.1-21.2 dB έναντι 2.1-7.1 dB του MERS μοντέλου). Σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να τονίσουμε ότι το κανάλι κινητών δορυφορικών επικοινωνιών είναι άμεσα εξαρτώμενο από το περιβάλλον όπου πραγματοποιείται η ζεύξη πράγμα το οποίο μας δίνει μια εξήγηση όσον αφορά την διαφορά στην τιμές περιθωρίου ανάμεσα στα δυο μοντέλα.

	URBAN Model (Kanatas)			MERS Model		
	P=5%	P=10%	P=20%	P=5%	P=10%	P=20%
60°	21.2	18.3	15.4	7.1	5.1	3.2
70°	14.9	10.4	6.0	5.2	3.8	2.3
80°	0.8	0.4	0.1	4.1	3.1	2.0

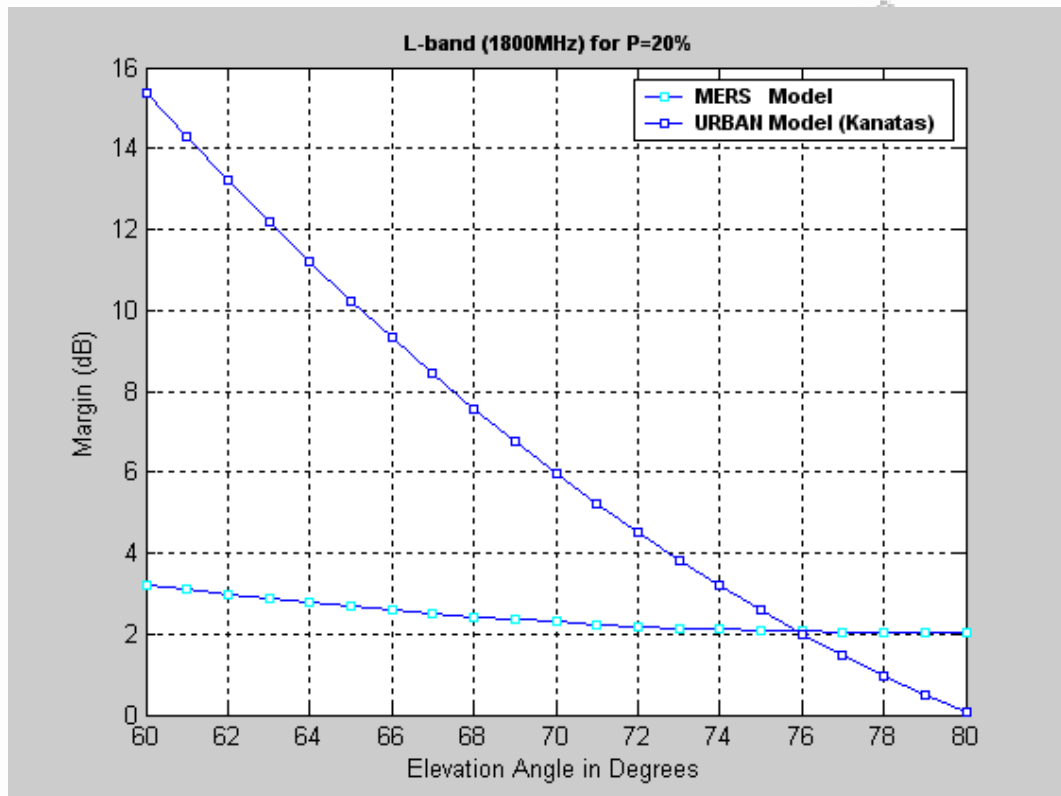
Πίνακας 3.2 Τιμές του περιθωρίου ισχύος Margin (dB) για τα μοντέλα MERS, URBAN (Kanatas) στην L ζώνη.



Σχήμα 3.14 Σύγκριση των μοντέλων MERS και URBAN(Kanatatas) στα 1800 MHz και για πιθανότητα P=5%



Σχήμα 3.15 Σύγκριση των μοντέλων MERS και URBAN(Kanatatas) στα 1800 MHz και για πιθανότητα P=10%



Σχήμα 3.16 Σύγκριση των μοντέλων MERS και URBAN(Kanatas) στα 1800 MHz και για πιθανότητα P=20%

3.3 Στατιστικά (Statistical) μοντέλα

Τα στατιστικά μοντέλα βασίζονται στην θεωρητική θεμελίωση που περιγράφηκε στην ενότητα 3.1 και η χρησιμότητά τους εστιάζεται στον υπολογισμό της απόδοσης δεκτών και τεχνικών βελτιστοποίησης σε πραγματικό χρόνο. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν και οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας Rayleigh, Rician, Lognormal καθώς και διάφορα άλλα μοντέλα τα οποία περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

3.3.1 Μοντέλα βασισμένα στις κατανομές Rayleigh –Rice - Lognormal

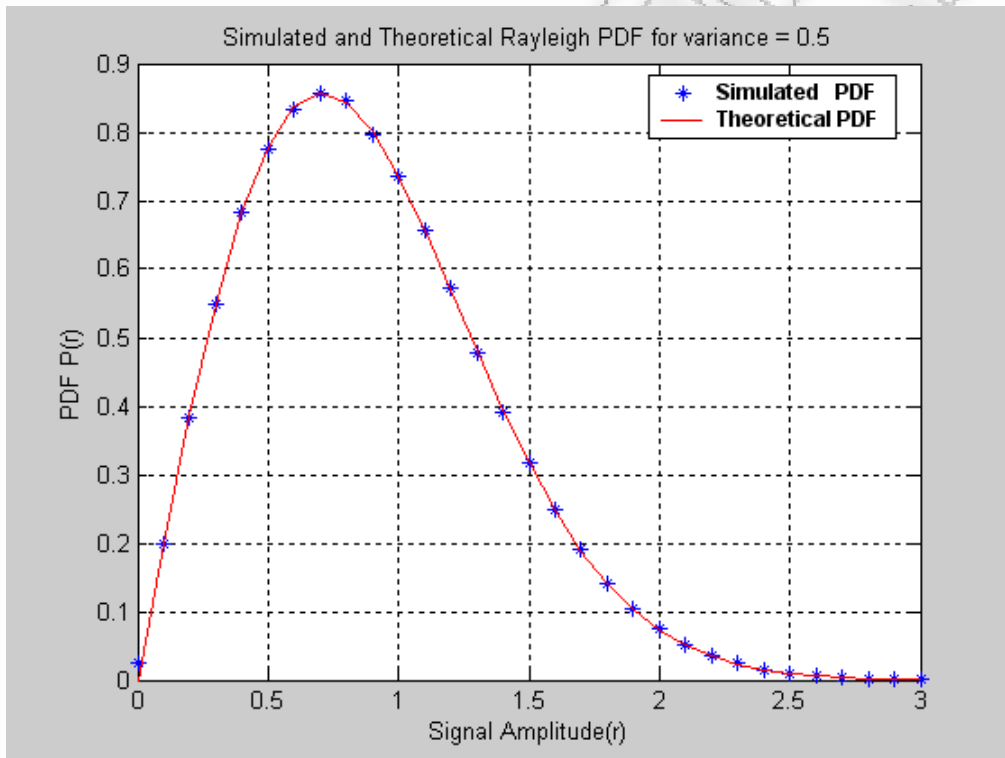
Η κατανομή Rayleigh είναι από τα σημαντικότερα μοντέλα για την περιγραφή του ασύρματου καναλιού. Χρησιμοποιείται με ικανοποιητικά αποτελέσματα για περιβάλλον πλούσιο σε σκεδαστές. Εφαρμόζεται για στατιστική περιγραφή του

καναλιού όταν δεν υπάρχει μια επικρατούσα συνιστώσα ,δηλαδή ο πομπός δεν έχει οπτική επαφή με τον δέκτη (συνθήκες Non Line Of Sight).[17]

Η p.d.f της κατανομής Rayleigh δίνεται από τον τύπο:

$$P_{Rayleigh}(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad 0 \leq r < \infty$$

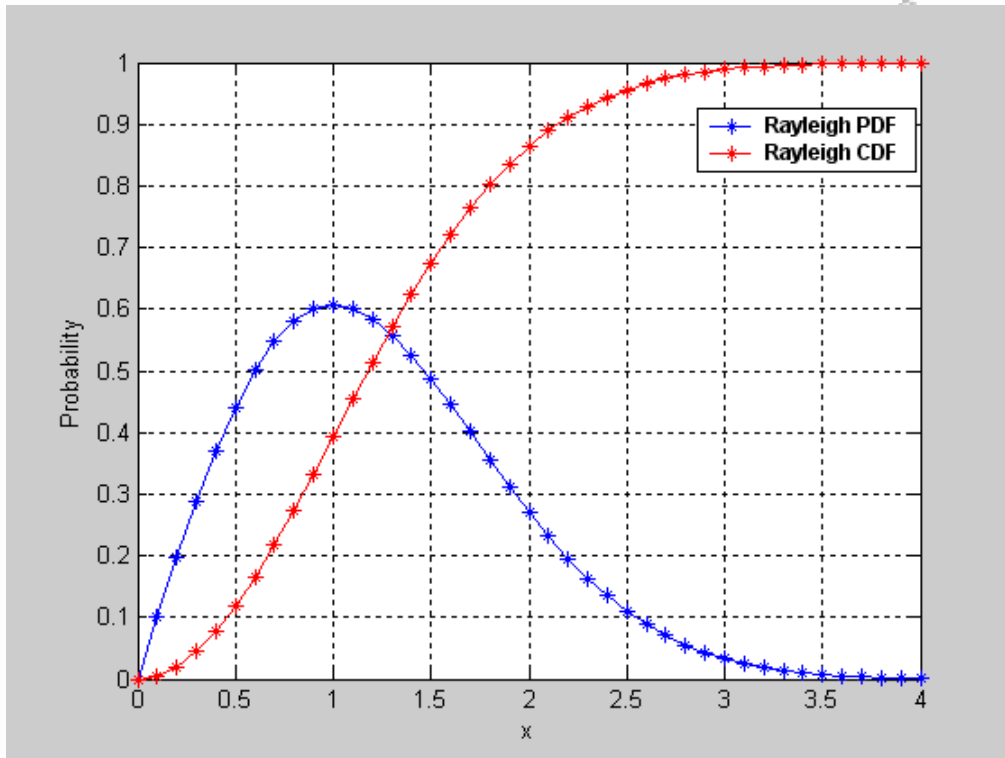
όπου r είναι το πλάτος, $r = |a| = \sqrt{x^2 + y^2}$, x και y είναι το πραγματικό και φανταστικό μέρος τυχαίων Gaussian μεταβλητών. Η παράμετρος $2\sigma^2$ είναι η μέση ισχύς.



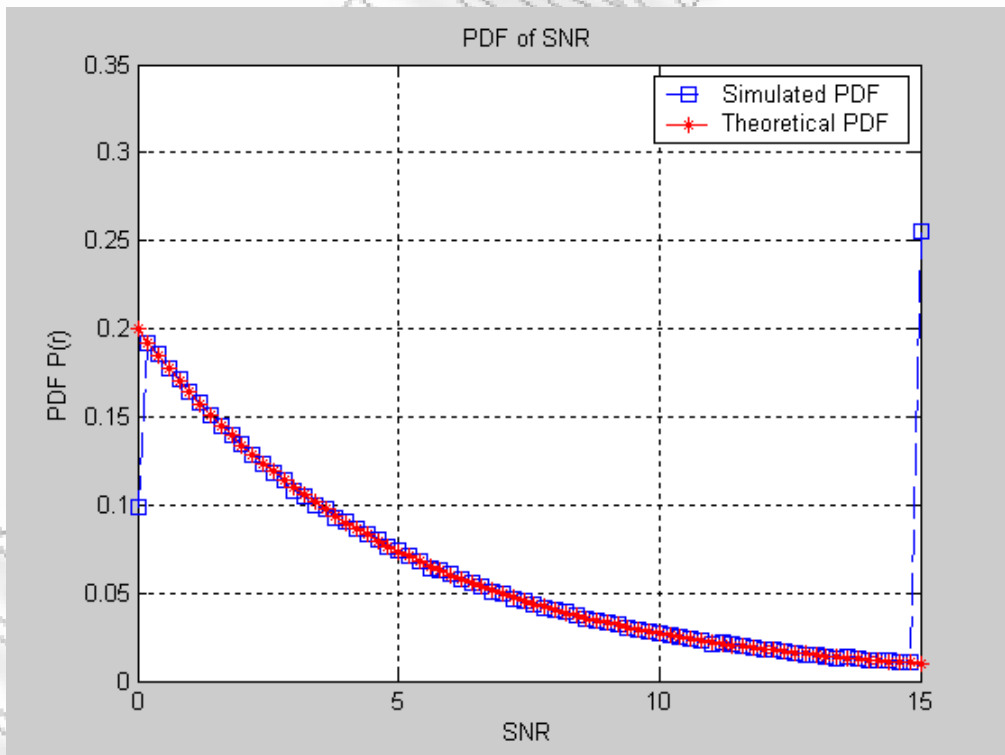
Σχήμα 3.17 Η θεωρητική και προσομοιωμένη PDF της κατανομής Rayleigh

Η c.d.f της κατανομής Rayleigh δίνεται από τον τύπο:

$$F_{Rayleigh}(R) = \Pr[r \leq R] = 1 - \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right)$$



Σχήμα 3.18 Σύγκριση των PDF και CDF της κατανομής Rayleigh



Σχήμα 3.19 Θεωρητική και προσομοιωμένη PDF για δεδομένο SNR

Η **κατανομή Rice** είναι ένα συνηθισμένο μοντέλο στενής ζώνης και χρησιμοποιείται στην περίπτωση όπου η διάδοση εκτός των πολυδιαδρομικών συνιστωσών περιλαμβάνει και μια σταθερή συνιστώσα (συνήθως LOS ή μια ισχυρή ανάκλαση). Ο λόγος της ισχύος της απευθείας συνιστώσας προς την ισχύ των πολυδιαδρομικών συνιστωσών καλείται παράγοντας Rice, συμβολίζεται συνήθως ως K και δίνεται από τον τύπο

$$K = \frac{|C_0|^2}{2\sigma^2} \quad \text{ή} \quad K(dB) = 10 * \log\left(\frac{|C_0|^2}{2\sigma^2}\right)$$

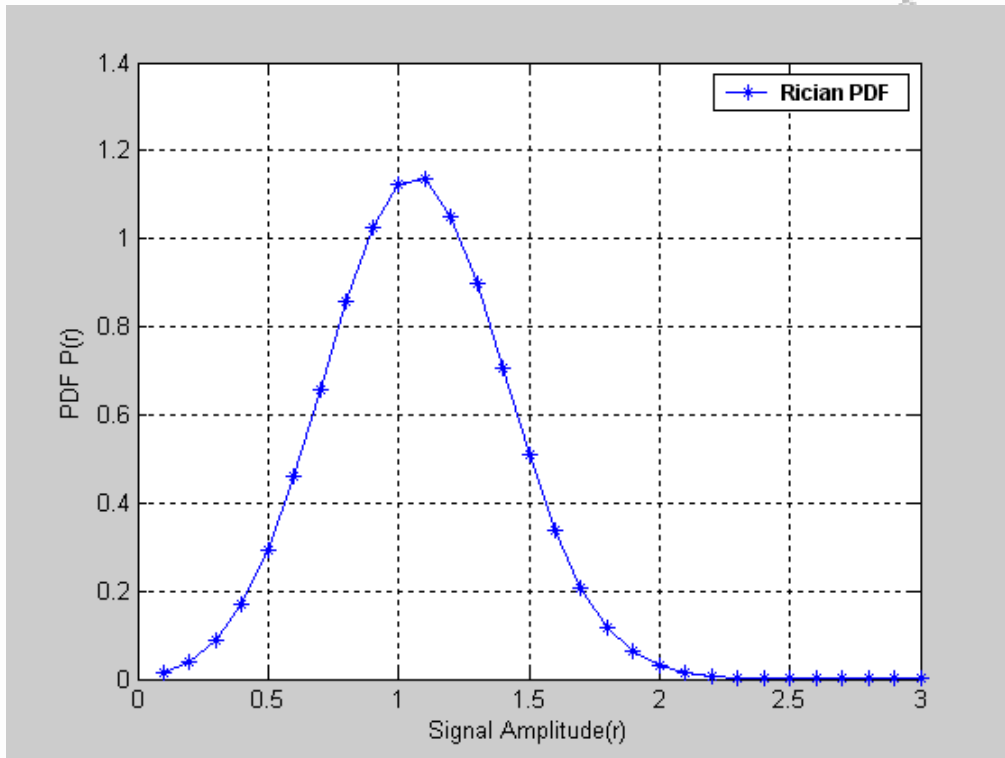
Οι συνηθισμένες τιμές του παράγοντα K για ένα δορυφορικό κανάλι κινητών επικοινωνιών έχουν εύρος από -15 dB έως 15 dB.[11]

Η μιγαδική περιβάλλουσα είναι της μορφής $c(z) = c_0 + \sum_{i=1}^N c_i(z)$.

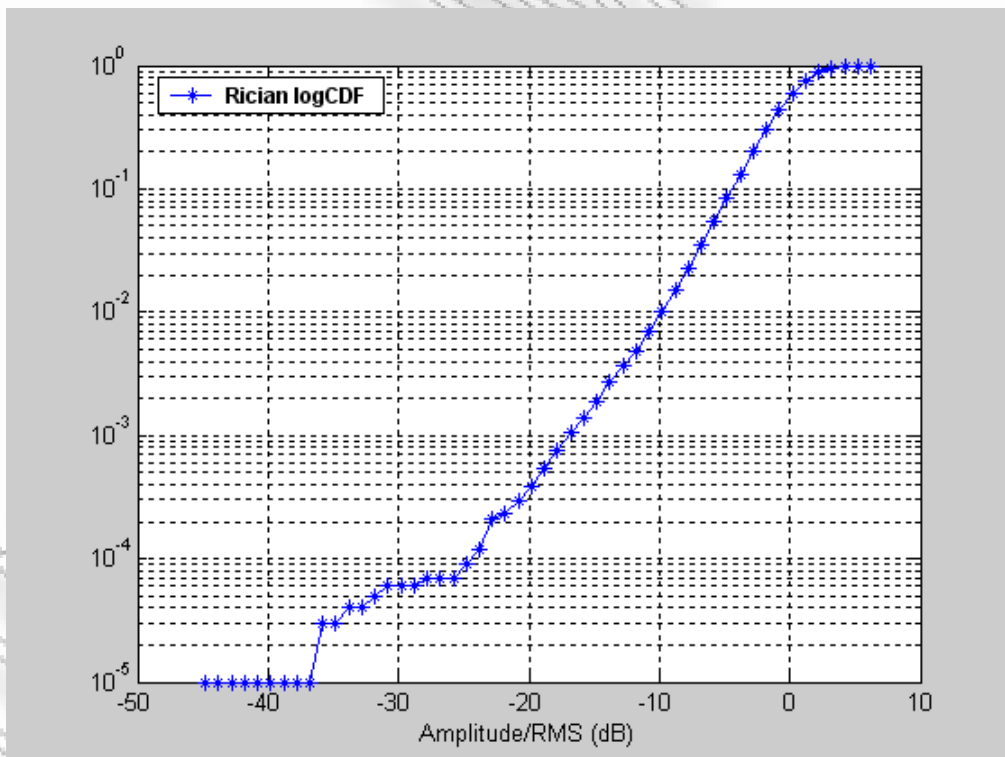
Το πλάτος της ακολουθεί την κατανομή Rice της οποίας η p.d.f δίνεται από τον τύπο: $P_{Rice}(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + |c_0|^2}{2\sigma^2}\right) * I_0\left(\frac{r|c_0|}{\sigma^2}\right)$, όπου

$$I_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{x \cos(\theta)} d\theta \quad [18], \text{ όπου } I_0 \text{ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel}$$

πρώτου είδους και μηδενικής τάξης, σ είναι η απόκλιση του πραγματικού ή φανταστικού μέρους των συνιστωσών, και c_0 το μέγεθος της LOS συνιστώσας.



Σχήμα 3.20 Η PDF της κατανομής Rice



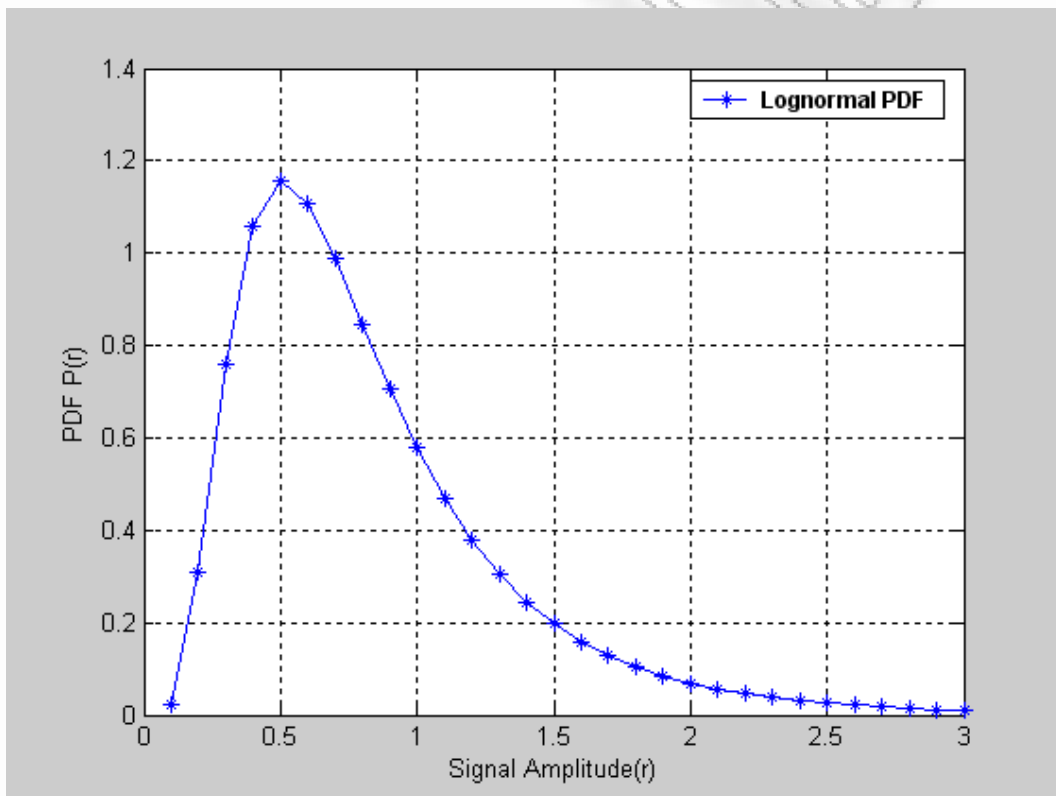
Σχήμα 3.21 Η CDF (σε λογαριθμική κλίμακα) της κατανομής Rice

Η κατανομή **Lognormal** μπορεί να περιγράψει την επίδραση της σκίασης από μια απευθείας συνιστώσα LOS στη περίπτωση που δεν υπάρχουν πολυδιαδρομικές συνιστώσες.

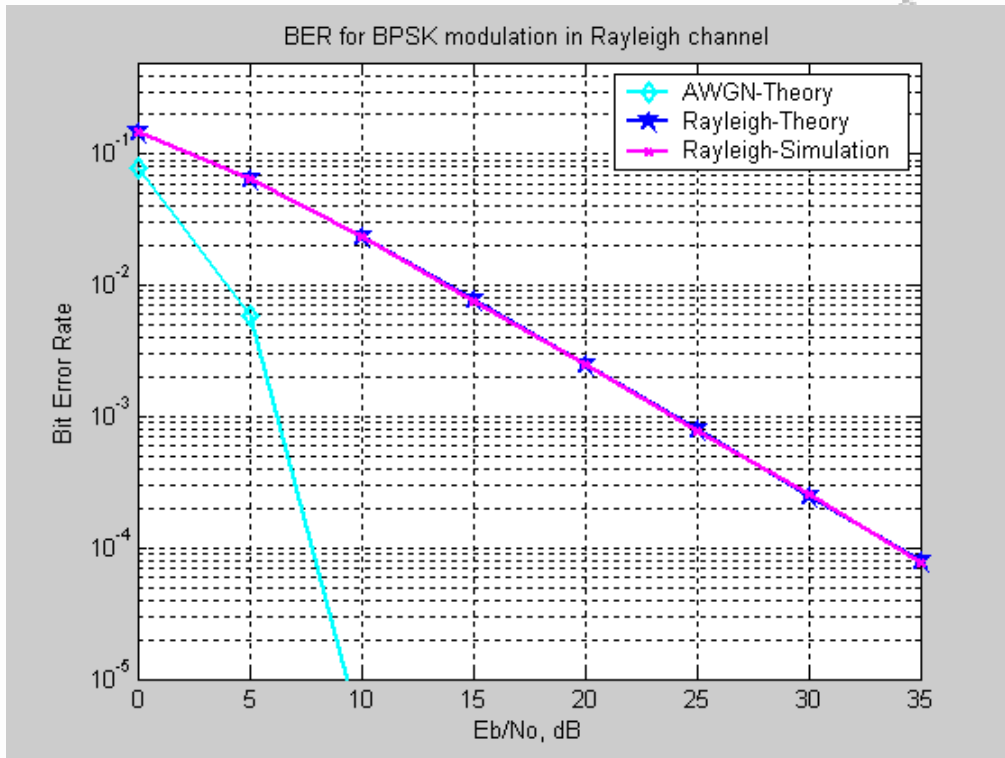
Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{Lognormal}(r) = \frac{1}{r * s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln r - \mu)^2}{2s^2}\right),$$

Όπου r είναι το πλάτος του λαμβανόμενου σήματος, μ είναι η μέση τιμή και s είναι η τυπική απόκλιση. Τυχαία σκίαση του απευθείας σήματος παρουσιάζεται κυρίως σε ημι-αστικά περιβάλλοντα λόγω της παρουσίας κτιρίων, δέντρων κ.τ.λ.



Σχήμα 3.22 Η PDF της Lognormal κατανομής



Σχήμα 3.23 Σύγκριση θεωρητικού και προσομοιωμένου BER για κανάλι Rayleigh [27]

3.3.2 Μοντέλο Loo

Το μοντέλο αυτό προτάθηκε από τον Loo [19][20], πρόκειται για ένα στατιστικό μοντέλο όπου βασίζεται στις p.d.f για σκίαση και πολυδιαδρομικές διαλείψεις:

α) οι πολυδιαδρομικές διαλείψεις σε κατάσταση ύπαρξης απευθείας σήματος περιγράφονται από διαλείψεις τύπου Rice β) Η σκίαση του απευθείας σήματος περιγράφεται από την λογαριθμοκανονική κατανομή. Ο συνδυασμός α και β έχει ως αποτέλεσμα μια κατανομή τύπου Rice με τον συντελεστή K να ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή. Η pdf του πλάτους του σήματος r έχει ως εξής:

$$P(r) = \frac{r}{s\sigma^2\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{z} \exp\left[-\frac{(\ln z - m)^2}{2s^2} - \frac{r^2 + z^2}{2\sigma^2}\right] * I_0\left(\frac{rz}{\sigma^2}\right) dz,$$

Όπου σ^2 η μέση λαμβανόμενη ισχύς της διαδικασίας Rayleigh

s η τυπική απόκλιση της λογαριθμοκανονικής διαδικασίας

r το πλάτος του λαμβανόμενου σήματος

μ η μέση τιμή της λογαριθμοκανονικής διαδικασίας
 I_0 η συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης

Ο πρώτος όρος της εκθετικής εξίσωσης δείχνει ότι το πλάτος του απευθείας σήματος ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή. Ο δεύτερος όρος στην εκθετική συνάρτηση και η συνάρτηση Bessel I_0 δείχνουν ότι η περιβάλλουσα του σήματος που είναι συνδυασμός απευθείας και πολυδιαδρομικών συνιστωσών ακολουθεί την κατανομή Rice.

3.3.3 Μοντέλο Suzuki

Το μοντέλο Suzuki [21], είναι ένα μείγμα από δύο κατανομές το οποίο περιγράφει την κατανομή από μεγάλης και μικρής κλίμακας διαλείψεις σε αστικά περιβάλλοντα. Συνδυάζει την κατανομή Rayleigh (μικρής κλίμακας διαλείψεις) με την λογαριθμοκανονική (μεγάλης κλίμακας διαλείψεις). Η συγκεκριμένη κατανομή δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_R(r) = \int_0^{\infty} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma d}} \exp\left(\frac{(\ln \sigma - m)^2}{2d^2}\right) d\sigma, \quad [11]$$

Όπου r είναι η περιβάλλουσα λόγω διαλείψεων, $2\sigma^2$ είναι η μέση ισχύς Rayleigh, d είναι η τυπική απόκλιση της μεταβλητής λόγω σκίασης, και m είναι η μέση τιμή της μεταβλητής λόγω κανονικής σκίασης.

3.3.4 Μοντέλο Ολικής Σκίασης (Lutz)

Το μοντέλο ολικής σκίασης υιοθετήθηκε για πρώτη φορά από τον E.Lutz [22] και όπως και το μοντέλο του Loo χρησιμοποιεί τις γνωστές διαδικασίες (Rayleigh, Lognormal και Rice) για την μοντελοποίηση του καναλιού. Διαφέρει όμως ως προς τον τρόπο με τον οποίο συνδυάζονται οι κατανομές και αποδίδονται στα φαινόμενα της σκίασης και σκέδασης. Πιο συγκεκριμένα η βασική θεώρηση είναι ότι υπάρχουν δυο διακριτές καταστάσεις για το κανάλι, μια με σκίαση η οποία στο εξής θα ονομάζεται “κακή” κατάσταση και μια χωρίς σκίαση η οποία θα ονομάζεται “καλή” κατάσταση. Στην περίπτωση της “καλής” κατάστασης (μη σκιασμένη διάδοση) η περιβάλλουσα θεωρείται ότι ακολουθεί την Rician κατανομή με σταθερό τον παράγοντα K . Στην περίπτωση όπου το κανάλι βρίσκεται στην “κακή” κατάσταση, η απευθείας συνιστώσα είναι πλήρως

σκιασμένη και στο δέκτη καταφθάνουν κύματα μόνο από σκέδαση. Έτσι η περιβάλλουσα ακολουθεί την Rayleigh κατανομή αλλά η μέση τιμή της είναι κατανομημένη με βάση την λογαριθμοκανονική κατανομή. Ένας σημαντικός παράγοντας στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι το ποσοστό του χρόνου A , η της απόστασης που το κανάλι βρίσκεται στην “κακή” κατάσταση ή όπως πολλές φορές αποκαλείται και παράγοντας σκίασης. Ο συγκεκριμένος παράγοντας χρησιμοποιείται στη συνολική συνάρτηση πυκνότητα πιθανότητας για να διαχωρίσει τις δυο καταστάσεις ως εξής:

$$p(S) = (1 - A) * p_{Rice}(S) + A * \int_0^{\infty} p_{Rayleigh}(S | S_0) p_{Lognormal}(S_0) dS_0$$

Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν βάση για την κατασκευή ενός προσομοιωτή του δορυφορικού καναλιού κινητών επικοινωνιών. Παρακάτω παραθέτονται μερικές εκφράσεις της προηγούμενης εξίσωσης όπως επίσης και της αντίστοιχης αθροιστικής συνάρτησης κατανομής. Όταν το πλάτος της περιβάλλουσας είναι εκφρασμένο σε Volts, τότε η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για μη σκιασμένη διάδοση δίνεται από την συνάρτηση Rice (π.χ Εξίσωση 1.1) ενώ η αθροιστική συνάρτηση κατανομής δίνεται από:

$$P(r \leq R) = 1 - Q\left(\frac{r_s}{\sigma}, \frac{R}{\sigma}\right) = 1 - \exp\left[-\frac{r^2 + R^2}{2\sigma^2}\right] \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{r_s}{R}\right)^k I_k\left(\frac{r_s R}{\sigma^2}\right),$$

Όπου I_k η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel k τάξης. Ο παράγοντας Rice c δίνεται από την έκφραση $c = \frac{r^2}{2\sigma^2}$ και εκφράζει το λόγο της ισχύος της απευθείας συνιστώσας προς την μέση ισχύ των σκεδαζόμενων κυμάτων. Αν χρησιμοποιήσουμε την έκφραση της στιγμιαίας λαμβανόμενης ισχύος

$$S = \frac{r^2}{2} \text{ τότε η εξίσωση 1.1 έχει ως εξής:}$$

$$p(S) = \frac{1}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{S}{\sigma^2} - \frac{r_s^2}{2\sigma^2}\right] I_0\left(\frac{r_s \sqrt{2S}}{\sigma^2}\right),$$

Ενώ η c.d.f αντίστοιχα δίνεται από τον τύπο:

$$P(S \leq S_T) = 1 - \exp\left[-\frac{r_s^2 + 2S_T}{2\sigma^2}\right] \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{r_s}{\sqrt{2S_T}}\right)^k I_k\left(\frac{r_s \sqrt{2S_T}}{\sigma^2}\right),$$

Αν κανονικοποιήσουμε την ισχύ της απευθείας συνιστώσας στην μονάδα:

$r_s = \sqrt{2}$ τότε μετά από μαθηματική επεξεργασία η c.d.f για την στιγμιαία λαμβανομένη ισχύ θα γίνει:

$$P(S \leq S_T) = 1 - \exp[-c(1 + S_T)] \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{1}{\sqrt{S_T}}\right)^k I_k(2c\sqrt{S_T})$$

Στην περίπτωση της συνδυασμένης συνάρτησης Rayleigh-Lognormal θα εκφράσουμε τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας σε μονάδες ισχύος και η συνολική συνάρτηση θα δίνεται από τον τύπο:

$$P_{R-\ln}(S) = \frac{10}{s \ln 10 \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{S_0^2} \exp\left[-\frac{S}{S_0}\right] \exp\left[-\frac{(10 \log S_0 - m)^2}{2s^2}\right] dS_0$$

Όπου $m = E\{10 \log(S_0)\}$ είναι η μέση τιμή, και $s = \sqrt{E\{10 \log(S_0)^2\} - m^2}$ είναι η τυπική απόκλιση. Αντίστοιχα για συνδυασμένη Rayleigh Lognormal c.d.f:

$$P_{R-\ln}(S \leq S_T) = \frac{10}{s \ln 10 \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{S_0} \left[1 - \exp\left[-\frac{S_T}{S_0}\right]\right] \exp\left[-\frac{(10 \log S_0 - m)^2}{2s^2}\right] dS_0$$

Για τον υπολογισμό των δυο πιο πάνω εξισώσεων εφαρμόζεται η αριθμητική ολοκλήρωση Gauss και του ορθοκανονικού συνόλου πολυωνύμων Hermite.

3.3.5 Μοντέλο Nakagami

Μια πολύ χρήσιμη κατανομή είναι η Nakagami-m η οποία έχει συμπεριφορά παρόμοια με της Ricean. Αν το κεντρικό οριακό θεώρημα δεν ικανοποιείται, τότε η Nakagami-m είναι μια προσεγγιστική κατανομή για το πλάτος της μιγαδικής περιβάλλουσας. Η κατανομή αυτή μπορεί να περιγράψει είτε καλύτερες είτε χειρότερες συνθήκες διαλείψεων από την Rayleigh, επιλέγοντας κατάλληλα τιμές για την παράμετρο m. Η p.d.f της Nakagami δίνεται από τύπο:

$$p_r(r) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m r^{2m-1} \exp\left(-\frac{m}{\Omega} r^2\right), [18]$$

Όπου $r \geq 0$, $m \geq \frac{1}{2}$, $\Omega = E\{r^2\}$ $m = \frac{\Omega^2}{(r^2 - \Omega)^2}$ και $\Gamma(m)$ είναι η συνάρτηση

γάμμα του Euler. Να σημειωθεί ότι για $m=1$, η κατανομή εκφυλίζεται σε Rayleigh, ενώ για $m=1/2$ σε Gaussian. Επίσης, αν $m \rightarrow \infty$ τότε δεν υπάρχουν καθόλου διαλείψεις στον δίαυλο. Όταν το πλάτος ακολουθεί Nakagami- m τότε η ισχύς ακολουθεί την κατανομή Gamma με:

$$P_p(P) = \frac{m}{\Omega * \Gamma(m)} \left(\frac{mP}{\Omega} \right)^{m-1} \exp\left(-\frac{mP}{\Omega}\right)$$

Τέλος η σχέση που συνδέει την παράμετρο m με τον παράγοντα Rice, K , για $m > 1$ είναι:

$$m = \frac{(K+1)}{(2K+1)}.$$

3.3.6 Μοντέλο Norton [23]

Αυτή η κατανομή υιοθετήθηκε για point to point μικροκυματικές ζεύξεις και είναι παρόμοια με το μοντέλο Nakagami. Κατά κάποιο τρόπο συνδυάζει από κοινού τις κατανομές Nakagami και Rice και δίνεται από την συνάρτηση p.d.f.

$$P_{Norton}(r) = \frac{r^m * m}{\sigma^2 * a^{m-1}} \exp\left[-\left(\frac{r^2 + a^2}{2\sigma^2}\right) * m\right] * I_{m-1}\left(\frac{ram}{\sigma^2}\right), \text{ όπου } r \text{ είναι το πλάτος}$$

του σήματος, $a \geq 0$, και $m \geq \frac{1}{2}$.

Το μειονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι η απόδοση του όσον αφορά τις δορυφορικές κινητές επικοινωνίες επειδή ο αρχικός σχεδιασμός του ήταν για point to point συνδέσεις.

3.3.7 Μοντέλο Corraza & Vatalaro [24]

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί τις Rician και Lognormal κατανομές με την διαφορά ότι η σκίαση επιδρά τόσο στην απευθείας συνιστώσα όσο και στην συνιστώσα σκέδασης. Σε αυτήν την περίπτωση η ολική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$p(r) = \int_0^{\infty} p_{Rice}(r|S) p_{Lognormal}(S) dS, \quad (1) \text{ όπου } p_{Rice}(r|S) \text{ είναι η Rician PDF}$$

για ένα δεδομένο επίπεδο σκίασης S. Αν τώρα θεωρήσουμε ότι η περιβάλλουσα είναι το γινόμενο μια διαδικασίας Rice R και μιας lognormal S τότε λόγω της ανεξαρτησίας μεταξύ των R και S ισχύει

$$p(r) = \int_0^{\infty} \frac{1}{S} p_{Rice}\left(\frac{r}{S}\right) p_{Lognormal}(S) dS = \int_0^{\infty} \frac{1}{R} p_{Lognormal}\left(\frac{r}{R}\right) p_{Rice}(R) dR \quad (2)$$

$$\text{Συγκρίνοντας (1) και (2) έχουμε: } p_{Rice}(r|S) = \frac{1}{S} p_{Rice}\left(\frac{r}{S}\right) \quad (3)$$

Εάν συμβολίσουμε το πλάτος κανονικοποιημένο ως προς την τετραγωνική ρίζα της συνολικής ισχύος με R:

$$R = \frac{r}{r_{total}} = \frac{r}{\sqrt{2}\sqrt{\sigma^2 + c\sigma^2}}, \quad \text{όπου } r_{total} \text{ είναι το πλάτος που αντιστοιχεί στη}$$

συνολική ισχύ και c είναι ο παράγοντας K της κατανομής Rice, ισχύει:

$$p_{Rice}(R) = 2R(c+1) \exp[-R^2(c+1) - c] * I_0(2R\sqrt{c(c+1)}) \quad (4)$$

Αντικαθιστώντας τώρα την 4 στην 3 υπολογίζουμε την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Η συνάρτηση για την κατανομή Lognormal δίνεται από την εξίσωση:

$$p_{Lognormal}(S) = \frac{20}{\sigma S \ln(10) \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{20 \log(S) - m}{\sigma}\right)^2\right] \quad (5)$$

Στην περίπτωση που θέλουμε να πάρουμε την C.D.F αντικαθιστούμε την 4,5 στην 2

$$\begin{aligned}
P(r \leq R) &= \int_0^R \int_0^\infty p_{Rice}(r|S) p_{Lognormal}(S) dS dr \\
&= \int_0^\infty p_{Lognormal}(S) \int_0^R p_{Rice}(r|S) dr dS \\
&= 1 - \int_0^\infty p_{Lognormal}(S) \left[\int_R^\infty p_{Rice}(r|S) dr \right] dS \\
&= 1 - E_s \left\{ \int_R^\infty p_{Rice}(r|S) dr \right\}
\end{aligned}$$

Το ολοκλήρωμα της p.d.f του Rice με την μορφή της συνάρτησης Q του Marcum δίνεται από την εξίσωση:

$$\int_R^\infty p_{Rice}(r|S) dr = Q\left(\sqrt{2c}, \frac{R}{S} \sqrt{2(c+1)}\right) \text{ με την συνάρτηση } Q \text{ του Marcum που}$$

δίνεται από

$$Q(a, b) = \int_b^\infty x \exp\left[-\frac{x^2 + a^2}{2}\right] * I_0(ax) dx$$

Συνεπώς η C.D.F του μοντέλου εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$P(r \leq R) = 1 - E_s \left\{ Q\left(\sqrt{2c}, \frac{R}{S} \sqrt{2(c+1)}\right) \right\}$$

3.3.8 Μοντέλο Mehrnia-Haskemi [25]

Το μοντέλο Nakagami έδειξε ότι η κατανομή-m με την παράμετρο $1/2 \leq m < 1$ αντιστοιχεί στην κατανομή-Q: $M(r, m, \Omega) = Q(r, a, b)$, όπου $M(r, m, \Omega)$ δείχνει την κατανομή-m Nakagami και το $Q(r, a, b)$ αντιστοιχεί στην κατανομή

$$Q \text{ και δίνεται: } Q(r, a, b) = \frac{2r}{\sqrt{ab}} \exp\left[-\frac{r^2}{2}\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right)\right] * I_0 * \left[\frac{r^2}{2}\left(\frac{1}{b} + \frac{1}{a}\right)\right] \quad [1]$$

Η σχέση ανάμεσα στις παραμέτρους των κατανομών Nakagami και Q για την

$$\text{περίπτωση όπου } 1/2 \leq m < 1 \text{ είναι: } \Omega = \frac{a+b}{2}, m = \frac{(a+b)^2}{(a+b)^2 + (a-b)^2}, \text{ όπου}$$

$\Omega \geq 0$, καταλήγοντας σε $a + b \geq 0$. Επιπρόσθετα, ο Nakagami έδειξε ότι η κατανομή- m όταν $m \geq 1$ αντιστοιχεί στην κατανομή Rice, η οποία δίνεται από τον παρακάτω τύπο: $N(r, r_s, \sqrt{\sigma}) = p_{Rice}(r)$. Η σχέση που συνδέει την

κατανομή Nakagami με την κατανομή Q είναι: $\Omega = \sqrt{\sigma} + r_s^2, m = 1 - \frac{r_s^4}{\Omega^2}$

Από τα παραπάνω μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι οι κατανομές N και Q αντιπροσωπεύουν το “καλό” και “κακό” κανάλι αντίστοιχα. Είναι κατάλληλες για να λειτουργούν ως συμπληρωματικές κατανομές σε ένα συνδυασμένο κανάλι. Επιπρόσθετα, εφόσον αυτές οι κατανομές συσχετιστούν με την κατανομή Nakagami, έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι καταλληλότερες για να περιγράψουν ένα δορυφορικό κανάλι κινητών επικοινωνιών. Το προτεινόμενο μοντέλο δίνεται από τον μαθηματικό τύπο:

$$P_{NQ}(r, a, b, r_s, \sqrt{\sigma}, A) = A * N(r, r_s, \sqrt{\sigma}) + (1 - A) * Q(r, a, b) \text{ όπου } 0 \leq A \leq 1$$

Σε αυτό το μοντέλο όταν υφίσταται η LOS διάδοση η λήψη είναι “καλή” και το A πλησιάζει την μονάδα, μειώνοντας την συνεισφορά της κατανομής Q. Όταν παρουσιάζεται σκίαση ως αποτέλεσμα αδυναμίας ή μη ύπαρξης της LOS συνιστώσας η παράμετρος A προσεγγίζει το μηδέν αυξάνοντας την συνεισφορά της κατανομής N.

3.4 Αναλυτικά (Deterministic) μοντέλα

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει στην αρχή του κεφαλαίου τα αναλυτικά μοντέλα χρησιμοποιούν απευθείας τις πληροφορίες όσον αφορά το περιβάλλον διάδοσης, είτε πρόκειται για τα χαρακτηριστικά όπως (ύψος-θέση) των βουνών μεταξύ πομπού-δέκτη όταν έχουμε διάδοση σε υπαίθριο περιβάλλον ή για χαρακτηριστικά (π.χ κτιρίων κ.α) για διάδοση σε αστικό περιβάλλον. Τα συγκεκριμένα μοντέλα χρησιμοποιούν κυρίως τη θεωρία ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης και τους μηχανισμούς που αυτή περιλαμβάνει όπου με αυτόν τον τρόπο καθορίζουν με ακρίβεια για κάθε θέση δέκτη τη λήψη που θα δημιουργεί η θέση του πομπού. Η αξιοπιστία των μοντέλων αυτών εξαρτάται κατά κύριο λόγο 1^ο από την σωστή κατάρτιση των εξισώσεων ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας (αν για παράδειγμα απλοποιούνται για πρακτικούς λόγους), 2^ο από το εάν περιλαμβάνουν

όλους τους δυνατούς μηχανισμούς. Στην συνέχεια παρουσιάζουμε τα βασικά στοιχεία μιας εκ των πιο διαδεδομένων αναλυτικών μεθόδων, την τεχνική σάρωσης ακτινών (Ray-Tracing).

3.4.1 Τεχνικές Σάρωσης Ακτινών (Ray-Tracing)

Η μέθοδος ανίχνευσης ακτινών (Ray-Tracing)[8] βασίζεται στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνων σε υπολογιστές και έχει γίνει αποδεκτή από την επιστημονική κοινότητα ως μια αξιόπιστη διαδικασία μοντελοποίησης του αστικού περιβάλλοντος. Το αστικό περιβάλλον παρουσιάζει μεγάλη πολυπλοκότητα εξαιτίας των πολλών εμποδίων και διαφόρων άλλων ανασταλτικών παραγόντων όπου υπάρχουν κατά την διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού σήματος μεταξύ πομπού και δέκτη.

Η συγκεκριμένη τεχνική η οποία χρησιμοποιεί την προσέγγιση αλλά και προσομοίωση του ηλεκτρομαγνητικού σήματος με ακτίνα μπορεί και συνδυάζει ακριβείς και αποδοτικές υπολογιστικές μεθόδους για τον προσδιορισμό του πεδίου σε περιβάλλοντα τόσο εντός (Indoor) όσο και εκτός (Outdoor) των κτιρίων. Έτσι με τη χρήση αυτής της μεθόδου μπορούν να προβλεφθούν οι τιμές σημαντικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν ένα κανάλι κινητών δορυφορικών επικοινωνιών όπως το Path Loss, η ένταση του πεδίου (Field Strength), η παραμόρφωση όπου εισάγει το κανάλι, η κρουστική απόκριση και το Power Delay Profile. Μερικά από τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου (κυρίως για indoor περιβάλλον) είναι ότι στην περίπτωση που θέλουμε να υπολογίσουμε το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σε ένα σημείο δεν είναι απαραίτητη η γνώση του πεδίου σε όλο τον χώρο, όπως αυτό συμβαίνει όταν χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις Maxwell με κάποιες οριακές συνθήκες. Επίσης για να εφαρμοστεί η συγκεκριμένη μέθοδος προϋποθέτει την ύπαρξη μιας βάσης δεδομένων στην οποία αρχικά καταχωρούνται οι τοπογραφικές παράμετροι καθώς και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των κτιρίων. Κατά την εφαρμογή του Ray-Tracing ανιχνεύονται όλα τα μονοπάτια μέσα από τα οποία οι ακτίνες μπορούν, ξεκινώντας ισοτροπικά από τον πομπό να φθάσουν στον δέκτη. Αυτό που ουσιαστικά συμβαίνει είναι η προσπάθεια περιγραφής ενός αναλογικού φαινομένου (άπειρες ακτίνες) με ένα

διακριτό φαινόμενο (πεπερασμένος αριθμός ακτινών). Συνεπώς όσο αυξάνεται ο αριθμός των ακτινών τόσο πιο πολύ το μοντέλο πλησιάζει στην πραγματικότητα. Για κάθε μονοπάτι εισάγεται μια ξεχωριστή ακτίνα, της οποίας παρακολουθείται η πορεία και εντοπίζονται τα εμπόδια που συναντά στον δρόμο της.

Οι ακτίνες που θεωρούνται σημαντικές είναι οι εξής:

- ❖ Απευθείας (Line of Sight)
- ❖ Ανακλώμενη από το έδαφος (Ground Reflected Ray)
- ❖ Ανακλώμενη από τους τοίχους κτιρίων (Wall Reflected)
- ❖ Περιθλώμενη από κατακόρυφες κορυφές κτιρίων (Wall-Edge Diffracted)
- ❖ Περιθλώμενη από οριζόντιες ακμές κτιρίων (Roof-Top Diffracted)
- ❖ Συνδυασμοί όλων των παραπάνω

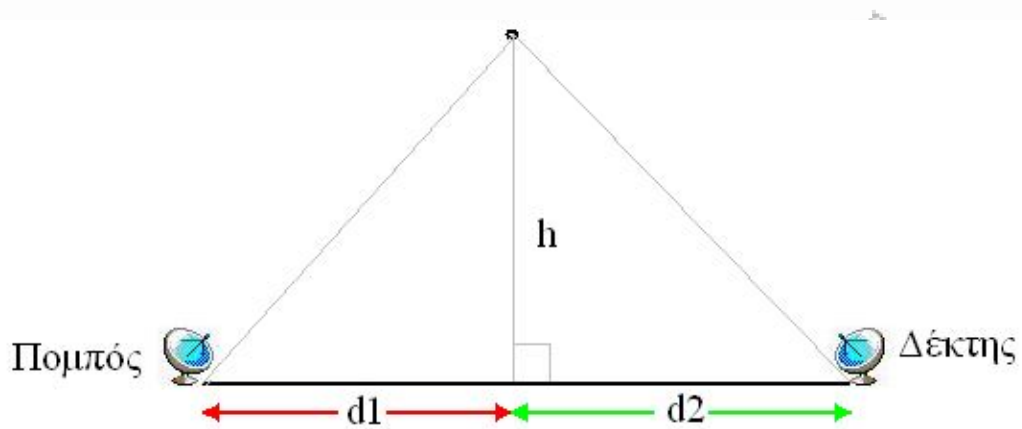
Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στους περισσότερους αλγόριθμους Ray-Tracing βασίζονται σε θεμελιωμένες ηλεκτρομαγνητικές θεωρίες. Συνεπώς για τον καθορισμό των ακτινών που προέρχονται από ανάκλαση χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό η Γεωμετρική Οπτική (Geometrical Optics, GO) ενώ στην περίπτωση των περιθλώμενων ακτινών ιδιαίτερα εύχρηστες είναι η Γεωμετρική και η Ομοιόμορφη Θεωρία Περίθλασης (Geometrical Theory of Diffraction GTD, Uniform Theory of Diffraction, UTD)

3.4.1.1 Τεχνικές Περίθλασης Ακμής

Η τεχνική αυτή βασίζεται πάνω στην αρχή του Huygens για τα επίπεδα κύματα και πρακτικά μεταφράζεται στην ανάλυση μέσω των ζωνών Fresnel που καθορίζουν τις απώλειες περίθλασης με βάση το μιγαδικό ολοκλήρωμα που δίνεται από τον τύπο

$$\frac{E_1}{E_0} = \left(\frac{1+j}{2}\right) \int_u^{\infty} \exp\left(-j\frac{\pi}{2}t^2\right) dt, \quad \text{όπου το}$$

$$u = h\sqrt{\frac{2(d_1+d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad \text{με βάση το παρακάτω σχήμα}$$

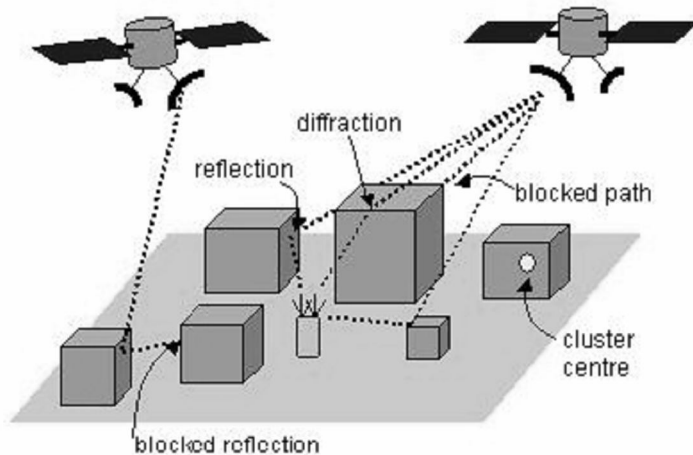


Σχήμα 3.24 Περίθλαση ακμής

Παρατηρώντας το σχήμα μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό ότι αν στην απευθείας διαδρομή υπάρχει εμπόδιο, το h είναι θετικό ενώ στην περίπτωση όπου το εμπόδιο βρίσκεται κάτω από την γραμμή απευθείας σήματος το h είναι αρνητικό. Οι ζώνες και το ολοκλήρωμα Fresnel χρησιμεύουν στην ανάλυση ζεύξεων από σημείο σε σημείο αλλά και στον καθορισμό του ύψους πομπού σε συστήματα κινητών επικοινωνιών. Προσθέτοντας τις ανακλάσεις εδάφους, τα χαρακτηριστικά καμπυλότητας των κορυφών ή πολλαπλές περιθλάσεις από κορυφές προκύπτουν μια σειρά από αναλυτικά μοντέλα διάδοσης.

3.5 Μοντέλο Satellite MIMO Physical-Statistical

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει ένα μοντέλο MIMO διαύλου όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ικανοποιητικά σε επίγειες κινητές δορυφορικές επικοινωνίες. Είναι μια παραλλαγή από μοντέλα διαύλου τα οποία διασκορπουν ακτίνες διαθέσω Clusters από σκεδαστές. Το μοντέλο αυτό μπορεί να προβλέψει υψηλής ανάλυσης χρονικές ακολουθίες δεδομένων και το προφίλ της ισχύος της καθυστέρησης στο χώρο μεταξύ της κάθε κεραίας του δορυφόρου και της κάθε κεραίας του κινητού τερματικού. Ακόμα το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να προβλέψει και την συσχέτιση μεταξύ αυτών των καναλιών. Σε αυτό το μοντέλο τα cluster από σκεδαστές αναπαριστούν κτήρια ή δέντρα. Αναλυτικότερα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα έχουμε ένα κεντρικό cluster όπου τοποθετείται με τυχαίο τρόπο πάνω σε ένα επίπεδο όπου αναπαριστά την επιφάνεια ενός κτιρίου ή το υψος δέντρων.



Εικόνα 3.1 Περιβάλλον Cluster πλησίον του κινητού τερματικού

Τα ύψη των κτιρίων ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή με μέση απόκλιση όπου προέρχεται από τις καλύτερες παραμέτρους που ταιριάζουν σε ένα χωριό ή σε μια πόλη. Τοποθετούνται περίπου 20 σκεδαστές με τυχαίο τρόπο γύρω από το κεντρικό Cluster, ενώ η διάσταση του κάθε σκεδαστή ακολουθεί μια Laplacian κατανομή. Τυπικές πυκνότητες όπου έχουν υιοθετηθεί είναι ένα κτίριο ή δέντρο για κάθε 1.000m^2 , 1.000m^2 , 10.000m^2 σε αστικά, ημιαστικά και εθνικές οδούς-δημοσίους δρόμους αντίστοιχα. Σε ένα αστικό περιβάλλον τα cluster προσδιορίζονται σαν κτίρια για 90% του χρόνου, ενώ σε ένα highway περιβάλλον προσδιορίζονται σαν δέντρα για το 90 % του χρόνου.

Ακτίνες διασκορπίζονται από την κεραία του δορυφόρου στην κεραία του κινητού σταθμού μέσω των διαθέσιμων cluster από σκεδαστές. Οι συντελεστές ανάκλασης είναι ίδιοι για κάθε cluster και καθορίζονται με τυχαίο τρόπο από μια κατανομή πλάτους μεταξύ 0 και 1, και με κατανομή φάσης μεταξύ 0 και 2π .

Καθώς το τερματικό κινείται το μοντέλο αλλάζει μεταξύ τριών καταστάσεων:

- “καθαρή” LOS διαδρομή
- “μπλοκαρισμένη” LOS διαδρομή
- “εξασθενιμένη” διαδρομή λόγω της παρουσίας δέντρων

Οι υψηλής ανάλυσης χρονικές ακολουθίες δεδομένων μεταξύ κάθε κεραίας του δορυφόρου M και κάθε κεραίας του κινητού τερματικού N, $a_{M,N}$ μπορεί να

$$\text{οριστεί ως: } a_{M,N} = \left\{ \begin{array}{l} P_{M,N} + b \cdot \sum_{i=1}^n T_i \cdot \Gamma_i \cdot P_{M,N,i} \cdot e^{jkd_{M,N,i}}, \text{clear} \\ D_{M,N} \cdot P_{M,N} + b \cdot \sum_{i=1}^n T_i \cdot \Gamma_i \cdot P_{M,N,i} \cdot e^{jkd_{M,N,i}}, \text{blocked} \\ T_{M,N} \cdot P_{M,N} + b \cdot \sum_{i=1}^n T_i \cdot \Gamma_i \cdot P_{M,N,i} \cdot e^{jkd_{M,N,i}}, \text{trees} \end{array} \right\}$$

Όπου το $P_{M,N}$, είναι οι απώλειες διαδρομής LOS μεταξύ της κεραίας του δορυφόρου M, και της κεραίας του κινητού τερματικού N, k είναι ο κυματαριθμός(wave number), n είναι ο συνολικός αριθμός διαθεσίμων σκεδαστών, και T_i είναι η εξασθένιση λόγω παρουσίας δέντρων όπου συσχετίζεται με την ανακλώμενη κατανομή από τον σκεδαστή i,

Γ_i είναι ο σύνθετος συντελεστής ανάκλασης στο σκεδαστή i, $P_{M,N,i}$ είναι η διαδρομή LOS από την κεραία του δορυφόρου M προς την κεραία του κινητού τερματικού N μέσω του σκεδαστή i, $d_{M,N,i}$ είναι η απόσταση μεταξύ της κεραίας του δορυφόρου M και της κεραίας του κινητού τερματικού N μέσω του σκεδαστή i, $D_{M,N}$ είναι οι απώλειες διαδρομής LOS λόγω περίθλασης, και $T_{M,N}$ είναι οι απώλειες διαδρομής λόγω παρουσίας δέντρων. Ο όρος b είναι ένας παράγοντας όπου προέρχεται από μετρήσεις για το κάθε περιβάλλον.

3.6 Βιβλιογραφία

- [1] **Satellite Communications Network of Excellence E-Book 1.1**, Feb. 2007
- [2] **M A Weissberger**, “An initial critical summary of models for prediction the attenuation of radio waves by foliage ”, ECAT-TR-81-101, Electromagnetic Compatibility Center, Annapolis, Md, USA, Aug. 1981
- [3] **CCIR**, Rep. 236-6, “Influence of terrain irregularities and vegetation on tropospheric propagation”, vol. XIII-3, 1986
- [4] **W.T. Smith, and W.L. Strutzman**, “Statistical modelling for land mobile satellite communications” Virginia Tech. Rep. EE Satcom 86-3, performed for JPL sponsored by NASA, Aug. 1986
- [5] **R. M. Barts, and W.L. Strutzman**, “Modelling and simulation of mobile satellite propagation”, IEEE Trans. Antennas Propagat, vol 40, no 4 Apr. 1992
- [6] **J. Goldhirsh, and W. J. Vogel**, “Propagation effects for land mobile satellite systems: overview of experimental and modeling results,” NASA Ref. Public. 1274, Feb. 1992.
- [7] **T. Sofos, and P. Constantinou**, “Propagation model for vegetation effects in terrestrial and satellite mobile systems,” IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 52, no. 7, Jul. 2004.
- [8] **Θεμιστοκλής Σοφός**, “Χαρακτηρισμός διαύλου δορυφορικών κινητών επικοινωνιών με συνδυαστική χρήση αναλυτικών και στατιστικών μεθόδων ”, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα ΗΜΜΥ ΕΜΠ, 2003
- [9] **J. Goldhirsh, and W. J. Vogel**, “Propagation effects for land mobile satellite systems: overview of experimental and modeling results,” NASA Ref. Public. 1274, Feb. 1992.
- [10] **W. J. Vogel, and J. Goldhirsh**, “Mobile satellite system propagation measurements at Lband using MARECS-B2,” IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 38, no. 2, Feb. 1990.
- [11] **P.R King**, “ Modelling and Measurement of the Land Mobile Satellite MIMO Radio Propagation Channel ”, University of Surrey, 2007

- [12] **M. Sforza, S. Buonomo, and A. Martini**, “ESA research activities in the field of channel modeling and simulation for land mobile satellite systems,” COST 227, TD(93) 044.
- [13] **M. A. N. Parks, B. G. Evans, and G. Butt**, “High elevation angle propagation results, applied to a statistical model and an enhanced empirical model,” COST 227, TD(93)049.
- [14] **CCIR**, “Factor affecting the choice of antennas for mobile stations of the Land Mobile Satellite Service”, CCIR Rep.925-1, Vol V, 1986
- [15] **A. G. Kanatas, N. Papadakis, and P. Constantinou**, “An empirical model for high elevation angle land-mobile satellite channels at urban environment,” IEEE Commun.Lett., vol. 2, no. 4, Apr. 1998.
- [16] **J. Goldhirsh, and W. J. Vogel**, “An overview of results derived from mobile-satellite propagation experiments,” Inter. Mobile Satellite Conf., Ottawa, 1990.
- [17] **Εμμανουήλ Μανιάτης**, “MIMO Δίαυλοι Διάδοσης για Κινητές Δορυφορικές Επικοινωνίες ”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα ΗΜΜΥ ΕΜΠ, 2008
- [18] **Αθανάσιος Κανάτας, Φίλιππος Κωνσταντίνου, Γεώργιος Πάντος** “Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών”, Εκδόσεις Παπασωτηρίου 2008
- [19] **C. Loo**, “A statistical model for a land mobile satellite link,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 34, no. 3, Aug. 1985.
- [20] **C. Loo**, “Measurement and models of a land mobile satellite channel and their applications to MSK signals,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 35, no. 3, Aug. 1987.
- [21] **H. Suzuki**: “A Statistical Model for Urban Radio Propagation”, IEEE Transactions on Communications, vol.25, no.7, Jul.1977, pp.673-680
- [22] **E. Lutz, D. Cygan, M. Dippold, F. Dolainsky, and W. Papke**, “The land mobile satellite communication channel-recording statistics, and channel model,” IEEE Trans. Veh.Technol., vol. 40, no. 2, May 1991
- [23] **Ajayi Taiwo Seun**, “Mobile Satellite Communications”, Master Thesis, Blekinge Institute of Technology, 2007

[24] **G. E. Corazza, and F. Vatalaro**, “A statistical model for land mobile satellite channels and its application to nongeostationary orbit systems,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol.43, no. 3, Aug. 1994.

[25] **A. Mehrnia, and H. Hashemi**, “Mobile satellite propagation channel. Part II A new model and its performance,” in Proc. VTC '97, pp. 2780-2784, Sept. 1999.

[26] **Abdelmonaem Lakhzouri, Elena Simona Lohan, Ilkka Saastamoinen , Markku Renfors**, “Interference and Indoor Channel Propagation Modeling Based on GPS Satellite Signal Measurements”, Tampere University Finland

[27] **Σημειώσεις Γεώργιος Ευθύμογλου**, “ Rayleigh fading channel”

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 Συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία διαπραγματεύτηκε σε μεγάλο βαθμό το θέμα μοντελοποίησης και χαρακτηρισμού του διαύλου κινητών δορυφορικών επικοινωνιών. Αρχικά έγινε μια εκτενής αναφορά πάνω στις κινητές δορυφορικές επικοινωνίες και στην ιστορία αυτών, που αποτελεί σταθμό στον μεγάλο δρόμο των επικοινωνιών. Παρουσιάστηκαν τα σημαντικότερα κινητά δορυφορικά συστήματα που υπάρχουν ή σχεδιάζονται στον τομέα αυτόν, όπως και η θεωρία που καλύπτει τα ζητήματα διάδοσης και μοντελοποίησης του διαύλου. Αναλυτικότερα μελετήσαμε τα μοντέλα διαύλου όπου χρησιμοποιούνται στις κινητές δορυφορικές επικοινωνίες. Όσον αφορά τα εμπειρικά μοντέλα, διαπιστώσαμε ότι είναι ακριβή μόνο για περιβάλλον διάδοσης παρόμοιο με το μοντελοποιημένο, ενώ όμως δεν λαμβάνουν υπόψη τα φαινόμενα όπου παρουσιάζονται κατά την διάδοση. Σε εν αντιθέσει τα στατιστικά μοντέλα προσφέρουν ικανοποιητική ακρίβεια σε παρόμοια μεταξύ τους περιβάλλοντα διάδοσης ενώ το κύριο μειονέκτημα τους είναι ότι δεν βασίζονται στους μηχανισμούς διάδοσης. Τα αναλυτικά μοντέλα αποτελούν μια καλή προσέγγιση όπως π.χ η τεχνική σάρωσης ακτίνων (Ray-Tracing) η οποία έχει γίνει αποδεκτή από την επιστημονική κοινότητα ως μια αξιόπιστη διαδικασία μοντελοποίησης. Τέλος από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν εξήχθησαν συμπεράσματα με βάση τα συγκριτικά αποτελέσματα για τις επιδόσεις του εκάστοτε εμπειρικού μοντέλου ανάλογα με το περιβάλλον διάδοσης.

4.2 Προτάσεις περαιτέρω μελέτης

Ένας σημαντικός τομέας για μελλοντική έρευνα-μελέτη είναι η εξέταση των εμπειρικών μοντέλων μέσω μετρήσεων για τον χαρακτηρισμό του καναλιού, και η επέκτασή τους για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης, χρησιμοποιώντας ένα ελικόπτερο ή μια τεχνητή δορυφορική πλατφόρμα με ένα όχημα που θα λειτουργεί ως κινητός δέκτης. Επίσης ένας ακόμα σύγχρονος τομέας μελέτης είναι μια περαιτέρω έρευνα –μελέτη πάνω στα μοντέλα διαύλου για υβριδικά συστήματα κινητών δορυφορικών επικοινωνιών, συγκεκριμένα μια προσέγγιση του συνδυασμού δορυφόρων και HAPS για να συντάξουν ένα κανάλι LMS-HAPS

❖ **Παράρτημα Α Κώδικες Προσομοίωσης με χρήση του λογισμικού MATLAB**

Περιεχόμενα Προγραμμάτων

1. med_model.m
2. vogel_goldhirsh.m
3. sofos_model.m
4. ers_model.m
5. mers_model.m
6. cefm_model_1.m
7. cefm_model_2.m
8. kanatas_model.m
9. comp_med_ccir_bart.m
10. comp_med_ccir.m
11. comp_ers_mers_cefm_1.m
12. comp_ers_mers_cefm_2.m
13. comp_ers_mers_cefm_3.m
14. comp_mers_kanatas_1.m
15. comp_mers_kanatas_2.m
16. comp_mers_kanatas_3.m
17. ray_pdf.m
18. ray_pdf_cdf.m
19. pdf_snr.m
20. ric_pdf.m
21. ric_cdf.m
22. log_pdf.m
23. ray_ber.m

1. med_model.m

```
f1=900;f2=1800;f3=2400;f4=14000; % zwnes syxnothtw n se MHz
D=[0:10:400]; % mhkos diadromhs mesa apo blastshh se m

% ypologismos tou paragonta eidkhs exasthenishs gia syxnothtes f1,f2,f3,f4
a1=0.187*(f1^0.284)*(D.^(-0.412));
a2=0.187*(f2^0.284)*(D.^(-0.412));
a3=0.187*(f3^0.284)*(D.^(-0.412));
a4=0.187*(f4^0.284)*(D.^(-0.412));

% ypologismos exasthenishs se dB
L1=a1.*D;
L2=a2.*D;
L3=a3.*D;
L4=a4.*D;
plot(D,L1,'r s-');
hold on;
plot(D,L2,'g s-');
hold on;
plot(D,L3,'c s-');
hold on;
plot(D,L4,'b s-');
hold on;
grid;
legend('UHF (900 MHz)', 'L-band (1800 MHz)', 'S-band (2400 MHz)', 'Ku-band
(14000 MHz)');
xlabel('Distance through trees (m)');
ylabel('Attenuation (dB)');
```

2. vogel_goldhirsh_model.m

```
TH=[15:40]; % gwnies aniywshs 15°-40°
L1=-0.48*TH+26.2 % ypologismos exasthenishs gia plhres fylwma se dB
L2=-0.35*TH+19.2 % ypologismos exasthenishs xwrish fylwma se dB
plot(TH,L1,'b s-');
hold on;
plot(TH,L2,'c s-');
grid;
legend('Full Foliage', 'Bare Tree');
xlabel('Elevation Angle in Degrees');
ylabel('Attenuation (dB)');
```

3. sofos_model.m

```
f1=2500; % h syxnothta gia Sofos_Model
f2=900; % h syxnothta gia MED Model
```

```

D=[1:400];          % diadromh mesa apo vlastsh se m
a1=0.187*(f1^0.284)*(D.^(-0.412));
A=a1.*D;
x=(A-2-(2*A)).*rand(1,400)+2*A;  % efarmogh statistikhs aloiwshs
F=0.3*A+0.7*x;  % ypologismos exasthenishs /shmeio diadromhs gia Sofos
Model

```

```

L1=a1.*D;
plot(D,L1,'g');
hold on;
plot(D,F);
grid;
legend('MED Model (Weissberger)', 'Roadside Vegetation Model (Sofos)');
xlabel('Distance through trees (m)');
ylabel('Attenuation (dB)');

```

4. ers_model.m

```

P1=1;P2=10;P3=20;  % pithanothtes epithimhts diakophs ths zeuxhs
TH=[21:60];        % gwnies anhywshs apo 21° mexri 60°
A=3.44+(0.0975.*TH)-0.002.*(TH.^2);
B=-0.443.*TH+34.76;
M1=-A*log(P1)+B;   % ypologismos apaitoumenou perithwriou isxuos
M2=-A*log(P2)+B;
M3=-A*log(P3)+B;

plot(TH,M1,'b s-');
hold on;
plot(TH,M2,'c s-');
hold on;
plot(TH,M3,'g s-');
grid;
legend('P= 1%','P=10%','P=20%');
xlabel('Elevation Angle in Degrees');
ylabel('Margin (dB)');

```

5. mers_model.m

```

P1=1;P2=10;P3=20;  % pithanothtes epithimhts diakophs ths zeuxhs
TH=[20:2:80];      % gwnies anhywshs apo 20° mexri 80°
A=((1.117*(10^-4)).*(TH.^2))-(0.0701.*TH)+6.1304;
B=(0.0032.*(TH.^2))-(0.6612.*TH)+37.8581;
M1=-A*log(P1)+B;   % ypologismos apaitoumenou perithwriou isxuos
M2=-A*log(P2)+B;
M3=-A*log(P3)+B;
plot(TH,M1,'b s-');
hold on;

```

```

plot(TH,M2,'c s-');
hold on;
plot(TH,M3,'g s-');
grid;
legend('P= 1%','P=10%','P=20%');
xlabel('Elevation Angle in Degrees');
ylabel('Margin (dB)');

```

6. cefm_model_1.m

```

P1=1;P2=10;P3=20;      % Apaitoumeh pithanothta 1%,10%,20%
f=1.300;                % syxnothta leitourgias 1.3GHz
TH=[20:2:80];          % gwnies anhywshs apo 20° mexri 80°

A=0.002.*(TH.^2)-(0.15.*TH)-0.7-(0.2*f);
B=27.2+1.5*f-(0.33.*TH);
M1=(A*log(P1)+B);      % ypologismos apaitoumenou perithwriou isxuos
M2=(A*log(P2)+B);
M3=(A*log(P3)+B);
plot(TH,M1,'b s-');
hold on;
plot(TH,M2,'c s-');
hold on;
plot(TH,M3,'g s-');
grid;
legend('P= 1%','P=10%','P=20%');
title('F=1.3GHz');
xlabel('Elevation Angle in Degrees');
ylabel('Margin (dB)');

```

7. cefm_model_2.m

```

P1=1;P2=10;P3=20;      % Apaitoumeh pithanothta 1%,10%,20%
f=1.300;                % syxnothta leitourgias 2.45GHz
TH=[20:2:80];          % gwnies anhywshs apo 20° mexri 80°
A=0.002.*(TH.^2)-(0.15.*TH)-0.7-(0.2*f);
B=27.2+1.5*f-(0.33.*TH);
transition=sqrt(2450/1300); % xrhsimopoiw to frequency transition model
apo %1300MHz se 2450MHz
M1=(A*log(P1)+B)*transition; % ypologismos apaitoumenou perithwriou isxuos
M2=(A*log(P2)+B)*transition;
M3=(A*log(P3)+B)*transition;
plot(TH,M1,'b s-');
hold on;
plot(TH,M2,'c s-');

```

```

hold on;
plot(TH,M3,'g s-');
grid;
legend('P= 1%','P=10%','P=20%');
title('F=2.45GHz');
xlabel('Elevation Angle in Degrees');
ylabel('Margin (dB)');

```

8. kanatas_model.m

```

TH=[60:80]; % gwnies anhywshs apo 60° mexri 80°
P1=5;P2=10;P3=20; % apaitoumenh pithanothta 5%,10%,20%
A=-180.487+5.5219.*TH-0.04074*(TH.^2);
B=-395.364+13.3259.*TH-0.10454*(TH.^2);
M1=-A*log(P1)+B; % ypologismos apaitoumenou perithwriou isxuos
M2=-A*log(P2)+B;
M3=-A*log(P3)+B;
plot(TH,M1,'b s-');
hold on;
plot(TH,M2,'c s-');
hold on;
plot(TH,M3,'g s-');
grid;
legend('P= 5%','P=10%','P=20%');

```

9. comp_med_ccir_bartstutzman.m

```

f1=1800; % syxnothta leitourgias 1800 MHz
D=[0:0.4:14]; % apostash diadromhs mesa apo vlasthsh 0 ews 14m
a1=0.187*(f1^0.284)*(D.^(-0.412));
L1=a1.*D;
%MED MODEL

a2=0.063*(f1^0.284);
L2=a2.*D;
% Barts & Strutzman Model

a3=0.2*(f1^0.3)*(D.^(-0.4));
L3=a3.*D;
%CCIR Model

plot(D,L1,'c s-');
hold on;
plot(D,L2,'g s-');
hold on;
plot(D,L3,'b s-');

grid;
legend('MED Model','CCIR Model','Barts & Strutzman');

```

```

title('L-band(1800MHz for 0m<D<14m)');
xlabel('Distance through trees (m)');
ylabel('Attenuation (dB)');

```

10. comp_med_ccir.m

```

f1=1800; % syxnothta leitourgias 1800 MHz
D=[14:10:400]; % apostash diadromhs mesa apo vlastsh 14 ews 400m
a1=0.187*(f1^0.284)*(D.^(-0.412));
L1=a1.*D;
%MED MODEL

```

```

a2=0.2*(f1^0.3)*(D.^(-0.4));
L2=a2.*D;
%CCIR Model

```

```

plot(D,L1,'c s-');
hold on;
plot(D,L2,'b s-');

```

```

grid;
legend('MED Model','CCIR Model');
title('L-band(1800MHz) for 14m< D <400m');
xlabel('Distance through trees (m)');
ylabel('Attenuation (dB)');

```

11. comp_ers_mers_cefm_1.m

```

P1=1; % apaitoumenh pithanothta 1%
TH=[21:60]; % gwnies anhywshs apo 20° mexri 60°
A1=3.44+(0.0975.*TH)-0.002.*(TH.^2);
B1=-0.443.*TH+34.76;
transition1=sqrt(1800/1500); % xrhsimopoiw to frequency transition model apo
%1500MHz se 1800MHz
M1=(-A1*log(P1)+B1)*transition1;

```

```

%ERS MODEL

```

```

TH1=[20:80]; % gwnies anhywshs apo 20°mexri 80°
A2=((1.117*(10^-4)).*(TH1.^2))-(0.0701.*TH1)+6.1304;
B2=(0.0032.*(TH1.^2))-(0.6612.*TH1)+37.8581;
transition2=sqrt(1800/1300); % xrhsimopoiw to frequency transition model apo
%1300MHz se 1800MHz
M2=(-A2*log(P1)+B2)*transition2;

```

```

%MERS MODEL

```

```

f=1.300;
A3=0.002.*(TH1.^2)-(0.15.*TH1)-0.7-(0.2*f);

```



```
B3=27.2+1.5*f-(0.33.*TH1);
M3=(A3*log(P1)+B3)*transition2; % xrhsimopiw to frequency transition
model % apo 1300MHz se 1800MHz
```

```
% CEFM MODEL
```

```
plot(TH,M1,'g s-');
hold on;
plot(TH1,M2,'b s-');
hold on;
plot(TH1,M3,'c s-');
grid;
title('L-band(1800MHz) for P=1%');
legend('ERS Model','MERS Model','CEFM Model');
xlabel('Elevation Angle in Degrees');
ylabel('Margin (dB)');
```

12. comp_ers_mers_cefm_2.m

```
P1=10; % apaitoumenh pithanofhta 10%
TH=[21:60]; % gwnies anhywshs apo 20° mexri 60°
A1=3.44+(0.0975.*TH)-0.002.*(TH.^2);
B1=-0.443.*TH+34.76;
transition1=sqrt(1800/1500); % xrhsimopiw to frequency transition model
apo %1500MHz se 1800MHz
M1=(-A1*log(P1)+B1)*transition1;
```

```
%ERS MODEL
```

```
TH1=[20:80]; % gwnies anhywshs apo 20° mexri 60°
A2=((1.117*(10^-4)).*(TH1.^2))-(0.0701.*TH1)+6.1304;
B2=(0.0032.*(TH1.^2))-(0.6612.*TH1)+37.8581;
transition2=sqrt(1800/1300); %xrhsimopiw to frequency transition model apo
%1300MHz se 1800MHz
M2=(-A2*log(P1)+B2)*transition2;
```

```
%MERS MODEL
```

```
f=1.300;
A3=0.002.*(TH1.^2)-(0.15.*TH1)-0.7-(0.2*f);
B3=27.2+1.5*f-(0.33.*TH1);
M3=(A3*log(P1)+B3)*transition2; %xrhsimopiw to frequency transition model
%apo 1300MHz se 1800MHz
```

```
% CEFM MODEL
```

```

plot(TH,M1,'g s-');
hold on;
plot(TH1,M2,'b s-');
hold on;
plot(TH1,M3,'c s-');
grid;
title('L-band(1800MHz) for P=10%');
legend('ERS Model','MERS Model','CEFM Model');
xlabel('Elevation Angle in Degrees');
ylabel('Margin (dB)');

```

13. comp_ers_mers_cefm_3.m

```

P1=20; % apaitoumenh pithanothta 20%
TH=[21:60]; % gwnies anhywshs apo 20° mexri 60°
A1=3.44+(0.0975.*TH)-0.002.*(TH.^2);
B1=-0.443.*TH+34.76;
transition1=sqrt(1800/1500);% xrhsimopoiw to frequency transition model apo
%1500MHz se 1800MHz
M1=(-A1*log(P1)+B1)*transition1;

```

%ERS MODEL

```

TH1=[20:80]; %gwnies anhywshs apo 20° mexri 80°
A2=((1.117*(10^-4)).*(TH1.^2))-(0.0701.*TH1)+6.1304;
B2=(0.0032.*(TH1.^2))-(0.6612.*TH1)+37.8581;
transition2=sqrt(1800/1300);%xrhsimopoiw to frequency transition model apo
%1300MHz se 1800MHz
M2=(-A2*log(P1)+B2)*transition2;

```

%MERS MODEL

```

f=1.300;
A3=0.002.*(TH1.^2)-(0.15.*TH1)-0.7-(0.2*f);
B3=27.2+1.5*f-(0.33.*TH1);
M3=(A3*log(P1)+B3)*transition2;%xrhsimopoiw to frequency transition model
apo %1300MHz se 1800MHz

```

% CEFM MODEL

```

plot(TH,M1,'g s-');
hold on;
plot(TH1,M2,'b s-');
hold on;

```

```

plot(TH1,M3,'c s-');
grid;
title('L-band(1800MHz) for P=20%');
legend('ERS Model','MERS Model','CEFM Model');
xlabel('Elevation Angle in Degrees');
ylabel('Margin (dB)');

```

14. comp_mers_kanatas_1.m

```

P1=5; % apaitoumenh pithanothta 5%
TH=[60:80]; % gwnies anhywshs apo 60° mexri 80°
A1=((1.117*(10^-4)).*(TH.^2))-(0.0701.*TH)+6.1304;
B2=(0.0032.*(TH.^2))-(0.6612.*TH)+37.8581;
transition=sqrt(1800/1300); % xrhsimopoiw to frequency transition model apo
%1300MHz se 1800MHz
M1=(-A1*log(P1)+B2)*transition;
plot(TH,M1);
%MERS Model

```

```

A2=-180.487+5.5219.*TH-0.04074*(TH.^2);
B2=-395.364+13.3259.*TH-0.10454*(TH.^2);
M2=-A2*log(P1)+B2;
%KANATAS Model

```

```

plot(TH,M1,'c s-');
hold on;
plot(TH,M2,'b s-');
xlabel('Elevation Angle in Degrees');
ylabel('Margin (dB)');
grid;
legend('MERS Model','URBAN Model (Kanatas)');
title('L-band(1800MHz) for P=5%');

```

15. comp_mers_kanatas_2.m

```

P1=10; % apaitoumenh pithanothta 10%
TH=[60:80]; % gwnies anhywshs apo 60° mexri 80°
A1=((1.117*(10^-4)).*(TH.^2))-(0.0701.*TH)+6.1304;
B2=(0.0032.*(TH.^2))-(0.6612.*TH)+37.8581;
transition=sqrt(1800/1300); % xrhsimopoiw to frequency transition model apo
%1300MHz se 1800MHz
M1=(-A1*log(P1)+B2)*transition;
plot(TH,M1);
%MERS Model

```

```

A2=-180.487+5.5219.*TH-0.04074*(TH.^2);
B2=-395.364+13.3259.*TH-0.10454*(TH.^2);
M2=-A2*log(P1)+B2;

```

```
%KANATAS Model
```

```
plot(TH,M1,'c s-');  
hold on;  
plot(TH,M2,'b s-');  
xlabel('Elevation Angle in Degrees');  
ylabel('Margin (dB)');  
grid;  
legend('MERS Model','URBAN Model (Kanas)');  
title('L-band(1800MHz) for P=10%');
```

16. comp_mers_kanatas_3.m

```
P1=20; % apaitoumenh pithanothta 20%  
TH=[60:80]; % gwnies anhywshs apo 60° mexri 80°  
A1=((1.117*(10^-4)).*(TH.^2))-(0.0701.*TH)+6.1304;  
B2=(0.0032.*(TH.^2))-(0.6612.*TH)+37.8581;  
transition=sqrt(1800/1300); %xrhsimopiw to frequency transition model apo  
%1300MHz se 1800MHz  
M1=(-A1*log(P1)+B2)*transition;  
plot(TH,M1);  
%MERS Model
```

```
A2=-180.487+5.5219.*TH-0.04074*(TH.^2);  
B2=-395.364+13.3259.*TH-0.10454*(TH.^2);  
M2=-A2*log(P1)+B2;  
%KANATAS Model
```

```
plot(TH,M1,'c s-');  
hold on;  
plot(TH,M2,'b s-');  
xlabel('Elevation Angle in Degrees');  
ylabel('Margin (dB)');  
grid;  
legend('MERS Model','URBAN Model (Kanas)');  
title('L-band(1800MHz) for P=20%');
```

17. ray_pdf.m

```
N=1000000; %Number of samples to generate  
variance = 0.5; % Variance of underlying Gaussian random variables  
%-----
```

```
%Independent Gaussian random variables with zero mean and unit variance  
x = randn(1, N);  
y = randn(1, N);
```

```

%Rayleigh fading envelope with the desired variance
r = sqrt(variance*(x.^2 + y.^2));

%Define bin steps and range for histogram plotting
step = 0.1; range = 0:step:3;

%Get histogram values and approximate it to get the pdf curve
h = hist(r, range);
approxPDF = h/(step*sum(h)); %Simulated PDF from the x and y samples

%Theoretical PDF from the Rayleigh Fading equation
theoretical = (range/variance). *exp(-range.^2/(2*variance));
plot(range, approxPDF,'b*', range, theoretical,'r');
title('Simulated and Theoretical Rayleigh PDF for variance = 0.5')
legend('Simulated PDF','Theoretical PDF')
xlabel('Signal Amplitude(r)');
ylabel('PDF P(r)');
grid;

```

18. ray_pdf_cdf.m

```

N=1000000; %Number of samples to generate
variance = 1; % Variance of underlying Gaussian random variables
%-----

%Define bin steps and range for histogram plotting
step = 0.1; range = 0:step:4;

%Theoretical PDF from the Rayleigh Fading equation
theoretical_PDF = (range/variance). *exp(-range.^2/(2*variance));

%Theoretical CDF from the Rayleigh Fading equation
theoretical_CDF = 1-exp(-range.^2/(2*variance));
plot(range, theoretical_PDF,'b*-',range, theoretical_CDF,'r*-');
legend('Rayleigh PDF','Rayleigh CDF');
xlabel('x');
ylabel('Probability');
grid;

```

19. pdf_snr.m

```

N=1000000; %Number of samples to generate
variance = 0.5; % Variance of underlying Gaussian random variables
ebn0=5 % einai o logos Eb/No
%-----

```

```

%Independent Gaussian random variables with zero mean and unit variance
x = randn(1, N);
y = randn(1, N);

%Rayleigh fading envelope with the desired variance
r = sqrt(variance*(x.^2 + y.^2));
gama_b=ebn0.*r.^2;
%Define bin steps and range for histogram plotting
step = 0.2; range = 0:step:15;

%Get histogram values and approximate it to get the pdf curve
h = hist(gama_b,range);
approxPDF = h/(step*sum(h)); %Simulated PDF from the x and y samples

%Theoretical PDF from the Rayleigh Fading equation
theoretical = (1/ebn0).*exp(-range./ebn0);
plot(range,approxPDF,'bs--', range, theoretical,'r*-');
title('PDF of SNR')
legend('Simulated PDF','Theoretical PDF')
xlabel('SNR');
ylabel('PDF P(r)');
grid;

```

20. ric_pdf.m

```

K=6; % K is Rician carrier-to-multipath power ratio in dB
C=1; % LOS Signal
beta=10.^(-K/10); %Rician Mean square value

%Parameter
%Define bin steps and range for histogram plotting
range = 0:0.1:3; %Signal level in natural scale
Ini=2*range*C/beta;
%Theoretical PDF from the Rayleigh Fading equation
theoretical=exp(log(2*range/beta)-(range.^2+C^2)/beta+Ini-log((2*pi*Ini).^5));

plot(range,theoretical,'b-*');
legend('Rician PDF')
xlabel('Signal Amplitude(r)');
ylabel('PDF P(r)');
grid;

```

21. ric_cdf.m

```

function r = rice_fading(Kdb, N, Mi)%Rice fading
Kdb=7; % K is Rician carrier-to-multipath power ratio in dB
N=1000000;
Mi=2;

```

```

K = 10^(Kdb/10);
const = 1/(2*(K+1));
x = randn(1,N); y = randn(1,N);%Independent Gaussian random variables with
zero mean and unit variance
r = sqrt(const*((x + sqrt(2*K)).^2 + y.^2));
rt = zeros(1,Mi*length(r)); ki = 1;
for i=1:length(r)
    rt(ki:i*Mi) = r(i); ki = ki+Mi;
end
r = rt;

RdB = 20*log10(r);
Rt= [min(RdB):max(RdB)];
for m = 1:length(Rt)

fade = find(RdB < Rt(m));
Nm = length(fade); AF(m) = Nm/N;
end
grid;
semilogy(Rt,AF,'b*-'); grid;
legend('Rician logCDF');
title('logCDF')
xlabel('Amplitude/RMS (dB)');

```

22. log_pdf.m

```

%u is lognormal mean in dB
%a is lognormal mean in dB
u=-3;
a=5;
%Parameter
range = 0:0.1:3;%Signal level in natural scale

%Theoretical Lognormal PDF
theoretical = 20*log10(exp(1))*exp(-(20*log10(range)-
u).^2/(2*a^2))./(sqrt(2*pi)*a*range);
plot(range, theoretical,'b*-');
legend('Lognormal PDF')
xlabel('Signal Amplitude(r)');
ylabel('PDF P(r)');
grid;

```

23. ray_ber.m

```

% Script for computing the BER for BPSK modulation in a
% Rayleigh fading channel

clear

```

```

N = 10^6 % number of bits or symbols

% Transmitter
ip = rand(1,N)>0.5; % generating 0,1 with equal probability
s = 2*ip-1; % BPSK modulation 0 -> -1; 1 -> 0

Eb_N0_dB = [0:5:35]; % multiple Eb/N0 values
for ii = 1:length(Eb_N0_dB)

n = 1/sqrt(2)*[randn(1,N) + j*randn(1,N)]; % white gaussian noise, 0dB variance
h = 1/sqrt(2)*[randn(1,N) + j*randn(1,N)]; % Rayleigh channel

% Channel and noise Noise addition
y = h.*s + 10^(-Eb_N0_dB(ii)/20)*n;

% equalization
yHat = y.*conj(h);

% receiver - hard decision decoding
ipHat = real(yHat)>0;

% counting the errors
nErr(ii) = size(find([ip- ipHat]),2);

end

simBer = nErr/N; % simulated ber
theoryBerAWGN = 0.5*erfc(sqrt(10.^(Eb_N0_dB/10))); % theoretical ber
EbN0Lin = 10.^(Eb_N0_dB/10);
theoryBer = 0.5.*(1-sqrt(EbN0Lin./(EbN0Lin+1))); % theoretical ber with fading

% plot
close all
figure
semilogy(Eb_N0_dB,theoryBerAWGN,'cd-','LineWidth',2);
hold on
semilogy(Eb_N0_dB,theoryBer,'bp-','LineWidth',2);
semilogy(Eb_N0_dB,simBer,'mx-','LineWidth',2);
axis([0 35 10^-5 0.5])
grid on
legend('AWGN-Theory','Rayleigh-Theory', 'Rayleigh-Simulation');
xlabel('Eb/No, dB');
ylabel('Bit-Error Rate');
title('BER for BPSK modulation in Rayleigh channel');

```