



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Μείωση Επίδρασης Παρεμβολών σε Κυψελωτό Σύστημα LMDS
με Χρήση Τεχνικής Διαφορικής Λήψης Κελιού**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Π. Λιώλης

Επιβλέπων: Π.Γ. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2004



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
 ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
 ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
 ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
 ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Μείωση Επίδρασης Παρεμβολών σε Κυψελωτό Σύστημα LMDS
 με Χρήση Τεχνικής Διαφορικής Λήψης Κελιού**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Π. Λιώλης

Επιβλέπων: Π.Γ. Κωττής
 Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 9^η Ιουλίου 2004.

.....
 Π.Γ. Κωττής
 Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
 Ι.Δ. Κανελλόπουλος
 Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
 Χ.Ν. Καψάλης
 Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2004

.....
Κωνσταντίνος Π. Λιώλης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κωνσταντίνος Π. Λιώλης, 2004

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All Rights Reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό θα πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα συστήματα LMDS είναι επίγεια τοπικά κυψελωτά δίκτυα που εφαρμόζουν την τεχνική μετάδοσης ενός σημείου προς πολλαπλά και λειτουργούν, υπό τον περιορισμό οπτικής επαφής, σε συχνότητες άνω των 20GHz για ευρυζωνική σταθερή ασύρματη πρόσβαση. Κυρίαρχος μηχανισμός διάδοσης στη ζώνη αυτή των χιλιοστομετρικών συχνοτήτων είναι η απόσβεση λόγω βροχής, που επηρεάζει τη διαθεσιμότητα και αξιοπιστία των συστημάτων. Λόγω της χωρικής ανομοιογένειας της βροχής, μια πιθανή τεχνική άμβλυνσης των διαλείψεων λόγω βροχής είναι η διαφορική λήψη κελιού σύμφωνα με την οποία, κάθε χρήστης έχει τη δυνατότητα να συνδέεται κάθε στιγμή με περισσότερους του ενός σταθμούς βάσης και να εξυπηρετείται από εκείνον το φέρον σήμα του οποίου υφίσταται τη μικρότερη εξασθένηση.

Ωστόσο, η μεγάλη πυκνότητα χρηστών και σταθμών βάσης λόγω της αναμενόμενης ευρείας χρήσης των συστημάτων LMDS και η συνύπαρξη με άλλα ασύρματα μικροκυματικά συστήματα στην ίδια φασματική περιοχή αναμένονται να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα παρεμβολών. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μελετήσει προβλήματα ομοδιαυλικής παρεμβολής σε σύστημα LMDS διπλής διαφορικής λήψης κελιού από γειτονική επίγεια ραδιοζεύξη, να επισημάνει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης της διαφορικής λήψης κελιού ως τεχνική άμβλυνσης των παρεμβολών στα συστήματα LMDS και να προτείνει αναλυτικό μοντέλο υπολογισμού της βελτίωσης του λόγου σήματος προς παρεμβολή (C/I) που παρατηρείται κατά την εφαρμογή της τεχνικής στο σύστημα. Η αποτελεσματικότητά της τεχνικής στην αντιμετώπιση των παρεμβολών εκτιμάται ποσοτικά με κριτήριο το οριζόμενο μέγεθος του “Διαφορικού Κέρδους C/I” και πιστοποιείται μέσω των αριθμητικών αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται και σχολιάζονται στο τέλος της εργασίας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Επίγειες επικοινωνίες, ευρυζωνική σταθερή ασύρματη πρόσβαση, LMDS, απόσβεση λόγω βροχής, διαφορική απόσβεση λόγω βροχής, παρεμβολές, λόγος σήματος προς παρεμβολή, διαφορική λήψη κελιού, διαφορικό κέρδος C/I, λογαριθμοκανονική κατανομή, συνεκτικοί βροχοπυρήνες.

ABSTRACT

LMDS (Local Multipoint Distribution Service) systems are terrestrial local cellular line-of-sight limited networks which apply point-to-multipoint transmission technique and operate in frequencies above 20GHz for broadband fixed wireless access. The dominant propagation factor in this mm-wave frequency band is rain attenuation, which affects system availability and performance. Due to rain spatial inhomogeneity, a possible rain fade mitigation technique is cell-site diversity according to which, every user is connected to two or more base stations at any instant of time and has the capability of switching to the least impaired path.

However, high density of system users and base stations as a result of the expected wide use of LMDS systems and coexistence with other wireless microwave systems operating at the same frequency band are about to cause severe interference problems. This diploma thesis intends to study co-channel interference problems caused in a LMDS double cell-site diversity system by adjacent terrestrial link, to underline the capability of cell-site diversity to be used as interference mitigation technique in LMDS systems and to suggest an analytical model for the computation of carrier-to-interference ratio (C/I) improvement. The effectiveness of cell-site diversity technique to combat interference problems is evaluated using the criterion of the defined term “C/I Cell-Site Diversity Gain” and is verified by the numerical results presented and commented at the end of the thesis.

KEY WORDS

Terrestrial communications, BFWA (Broadband Fixed Wireless Access), LMDS (Local Multipoint Distribution Service), rain attenuation, differential rain attenuation, interference (C/I), carrier-to-interference ratio, cell-site diversity, C/I cell-site diversity gain, lognormal distribution, convective raincells.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Ολοκληρώνοντας την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας και τις προπτυχιακές μου σπουδές στη Σχολή Η.Μ.Μ.Υ. του Ε.Μ.Π., νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους εκείνους που υπήρξαν αρωγοί αυτής της προσπάθειας.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινέστατες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της εργασίας μου Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Παναγιώτη Γ. Κωττή όχι μόνο για τη συνεχή επίβλεψη της παρούσας εργασίας αλλά και για την πολύτιμη καθοδήγησή του όσον αφορά τις μεταπτυχιακές μου σπουδές, τη διαρκή ενθάρρυνση και τον ενθουσιασμό που μου ενέπνευσε.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον Διδάκτορα Ε.Μ.Π. κ. Αθανάσιο Δ. Παναγόπουλο για την άριστη συνεργασία που είχαμε καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, τις σημαντικές υποδείξεις που μου παρείχε σε καίρια σημεία της και τον απεριόριστο χρόνο που διέθεσε σε αυτή.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω την παρούσα εργασία στην οικογένειά μου η οποία μου παρείχε όλα τα απαραίτητα εχέγγυα για την ολοκλήρωση των σπουδών μου και στη σύντροφό μου Αθηνά η οποία είναι δίπλα μου τα τελευταία τρία χρόνια.

Αθήνα, Ιούλιος 2004

Κωνσταντίνος Π. Λιώλης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΗ ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΠΡΟΣΒΑΣΗ	11
1.1 Ευρυζωνική πρόσβαση	11
1.2 Υπηρεσίες πολυμέσων ευρυζωνικής πρόσβασης	12
1.3 Ευρυζωνικά συστήματα πρόσβασης.....	16
1.3.1 Καλωδιακή ευρυζωνική πρόσβαση.....	16
1.3.2 Ευρυζωνική πρόσβαση μέσω γραμμών x-DSL.....	18
1.3.3 Ευρυζωνική πρόσβαση μέσω οπτικών ινών	23
1.3.4 Ευρυζωνική δορυφορική πρόσβαση.....	25
1.3.5 Ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση.....	28
1.4 Αγορά υπηρεσιών σταθερής ασύρματης πρόσβασης LMDS.....	32
1.4.1 Πρόβλεψη παγκόσμιας αγοράς	32
1.4.2 Πρόβλεψη ελληνικής αγοράς	35
1.4.3 Παρούσα κατάσταση στον ελλαδικό χώρο	36
1.5 Κύριο αντικείμενο μελέτης της εργασίας.....	38
2. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ LMDS	41
2.1 Τι είναι το LMDS.....	41
2.2 Εφαρμογές και υπηρεσίες	43
2.3 Αποδιδόμενο ραδιοφάσμα	47
2.4 Δομή συστήματος.....	50
2.5 Τεχνικές αμφιδρόμησης	54
2.6 Τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης στον ασύρματο δίαυλο	55
2.7 Ψηφιακή διαμόρφωση	59
2.8 Αναχρησιμοποίηση συχνότητας	65
2.9 Πρωτόκολλα μεταφοράς.....	66
2.10 Προβλήματα διάδοσης.....	68
2.11 Τεχνικές άμβλυνσης των διαλείψεων λόγω βροχής	73
2.11.1 Έλεγχος της ισχύος της προς τα κάτω ζεύξης	76
2.11.2 Προσαρμοστική μορφοποίηση σήματος	77
2.11.3 Τεχνικές διαφορικής προστασίας.....	81
2.11.3.1 Διαφορική λήψη συχνότητας.....	81
2.11.3.2 Διαφορική λήψη χρόνου	82
2.11.3.3 Διαφορική λήψη όδευσης.....	83
3. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΛΟΓΩ ΒΡΟΧΗΣ.....	87
3.1 Περιγραφή του μέσου βροχής	87
3.2 Ειδική απόσβεση	91
3.3 Υπολογισμός της κατανομής απόσβεσης λόγω βροχής.....	93
4. ΤΕΧΝΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΛΗΨΗΣ ΚΕΛΙΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ LMDS	97
4.1 Γενικά.....	97
4.2 Υπολογισμός περιθωρίων διάλειψης λόγω βροχής	101
4.2.1 Σύστημα απλής λήψης.....	101
4.2.2 Σύστημα διπλής διαφορικής προστασίας	102

4.3	Διαφορικό κέρδος και διαφορικό πλεονέκτημα	105
4.4	Σύστημα LMDS διαφορικής λήψης κελιού που υποφέρει από παρεμβολές.....	106
4.4.1	Προσομοίωση παρεμβολών σε σύστημα LMDS.....	107
4.4.1.1	Μελέτη παρεμβολών σε σύστημα απλής λήψης.....	107
4.4.1.2	Μελέτη παρεμβολών σε σύστημα διαφορικής λήψης κελιού	118
5.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ LMDS ΑΠΟ ΓΕΙΤΟΝΙΚΟ ΕΠΙΓΕΙΟ ΣΤΑΘΜΟ ΒΑΣΗΣ	125
5.1	Γενικά.....	125
5.2	Σύστημα LMDS απλής λήψης.....	127
5.2.1	Παράμετροι κατανομής των τ.μ. A_C και A_I	130
5.2.2	Υπολογισμός δεσμευμένης πιθανότητας P_A/P_{II}	132
5.3	Σύστημα LMDS διπλής διαφορικής προστασίας.....	135
5.3.1	Παράμετροι κατανομής των τ.μ. A_{C1} , A_{C2} και A_I	141
5.3.2	Υπολογισμός δεσμευμένης πιθανότητας P_A/P_{II}	144
5.4	Διαφορικό κέρδος C/I	147
6.	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ	149
6.1	Γενικά.....	149
6.2	Επίδραση παρεμβολών σε σύστημα LMDS απλής λήψης.....	152
6.3	Επίδραση παρεμβολών σε ισοσταθμισμένο σύστημα LMDS διπλής λήψης.....	160
6.4	Επίδραση παρεμβολών σε μη ισοσταθμισμένο σύστημα LMDS διπλής λήψης.....	169
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	175
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	181
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	184
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ.....	189
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε.....	192
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	197

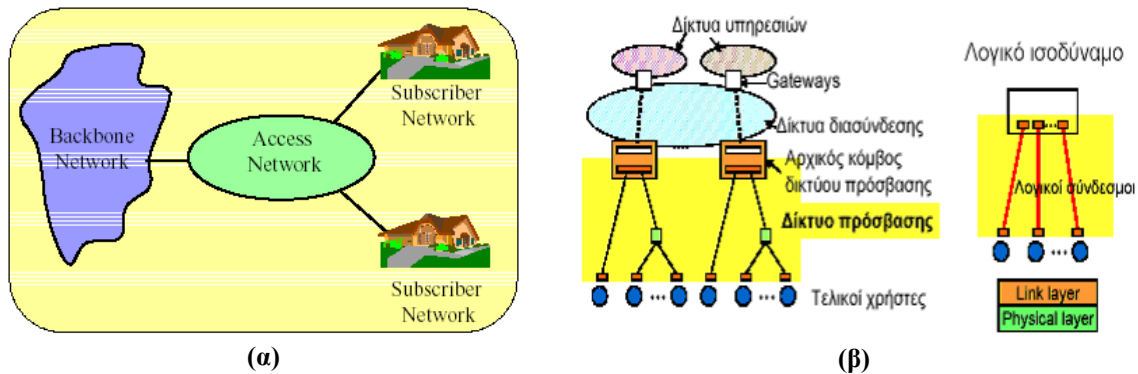
1. ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΗ ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΠΡΟΣΒΑΣΗ

1.1 Ευρυζωνική πρόσβαση

Στην εποχή των πολυμέσων, ένας από τους κύριους μακροπρόθεσμους στόχους για τα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, που απευθύνονται σε χρήστες κατοικιών και εταιρικούς πελάτες, είναι να παρέχουν και να υποστηρίζουν οποιοδήποτε είδος τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, από υπηρεσίες χωρίς σύνδεση (connectionless) έως υπηρεσίες προσανατολισμένες για σύνδεση (connection-oriented), και από διανομή έως και αλληλοδραστικές υπηρεσίες [1]. Τα συνεχώς εξελισσόμενα ευρυζωνικά συστήματα πρόσβασης απευθύνονται σε όλες εκείνες τις απαιτήσεις που χρειάζονται να πληρούνται ώστε να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός. Ο όρος πρόσβαση εμπεριέχει την έννοια ότι κάποιος συνδρομητής, από τη θέση στην οποία βρίσκεται, έχει πρόσβαση σε κάποιο άλλο δίκτυο και κάνει χρήση των υπηρεσιών που αυτό προσφέρει. Υπό αυτή την έννοια, ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα μπορεί να διαιρεθεί σε τρία βασικά μέρη: το δίκτυο πρόσβασης (access network), το δίκτυο πυρήνα (core network) ή δίκτυο κορμού (backbone network) και το δίκτυο συνδρομητή (subscriber network).

Το δίκτυο πρόσβασης ορίζεται ως μια ανεξάρτητη δικτυακή ολότητα, που επιτρέπει σε ένα συνδρομητή να έχει πρόσβαση σε ορισμένους παρόχους υπηρεσιών, οι οποίοι βρίσκονται στα άκρα απόληξης του δικτύου πυρήνα, και να κάνει χρήση των υπηρεσιών που αυτοί προσφέρουν. Πρόκειται δηλαδή για το συνδετικό κρίκο ανάμεσα στον τελικό χρήστη μιας υπηρεσίας και στα άκρα απόληξης του βασικού δικτύου που προσφέρει αυτήν την υπηρεσία. Από μόνο του, συνεπώς, το δίκτυο πρόσβασης δεν μπορεί να αποτελέσει ένα ολοκληρωμένο από άκρη σε άκρη (end-to-end) σύστημα επικοινωνίας. Το δίκτυο κορμού μπορεί να είναι το Διαδίκτυο (Internet), το Δημόσιο Τηλεφωνικό Δίκτυο Μεταγωγής (Public Switched Telephone Network, PSTN), ένα ιδιωτικό δίκτυο ή οποιοδήποτε άλλο βασικό δίκτυο που εκμεταλλεύεται κάποιος πάροχος μισθώνοντας ή πωλώντας τις υπηρεσίες του στους διάφορους συνδρομητές και χρήστες του. Το δίκτυο συνδρομητή, όταν και όπου υφίσταται, είναι κάποιο τοπικό δίκτυο (Local

Area Network, LAN), το οποίο μέσω κάποιας διεπαφής (modem ή Set-Top-Box, STB) συνδέεται με το δίκτυο πρόσβασης προσφέροντας έτσι τις υπηρεσίες του βασικού δικτύου σε κάθε πιθανό χρήστη που είναι συνδεδεμένος με το LAN. Μια γενική διάταξη ενός ευρυζωνικού συστήματος πρόσβασης απεικονίζεται στα σχήματα 1.1α και 1.1β. Όσον αφορά τον τρόπο υλοποίησης των ευρυζωνικών συστημάτων πρόσβασης, πολλές τεχνολογίες που θεωρούν την ενσύρματη ή την ασύρματη πρόσβαση, είναι υπό εξέταση. Καθεμία από αυτές θα αναλυθεί στην παράγραφο §1.3 του κεφαλαίου αυτού.



Σχήμα 1.1: Ευρυζωνικό σύστημα πρόσβασης

1.2 Υπηρεσίες πολυμέσων ευρυζωνικής πρόσβασης

Ολόκληρη η βιομηχανία τηλεπικοινωνιών που απευθύνεται στους χρήστες κατοικιών (residential users), μικρομεσαίων επιχειρήσεων (Small-Medium Enterprises, SME), εταιριών και γραφείων (Small-Office-Home-Office, SOHO) είναι δομημένη με βασικό γνώμονα την παροχή υπηρεσιών. Το εάν η παροχή μιας υπηρεσίας από κάποιον πάροχο δικτύου κριθεί τελικά ως επιτυχημένη ή όχι καθορίζεται κατά ένα ποσοστό από την τεχνολογία πληροφορίας και δικτύων, που έχει χρησιμοποιηθεί για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό εξαρτάται κυρίως από το αγοραστικό κοινό, στο οποίο η συγκεκριμένη υπηρεσία απευθύνεται, καθώς οι υπό μελέτη υπηρεσίες θα πρέπει να απευθύνονται στις αντιλήψεις και τις ανάγκες των χρηστών, την ευαισθησία της εκάστοτε αγοράς και την ανάλυση οικονομικού κόστους/κέρδους [2].

Όσον αφορά την ανάπτυξη των ευρυζωνικών συστημάτων πρόσβασης, αυτή κυρίως καθορίζεται από, και τις περισσότερες φορές συμπίπτει με, την αυξανόμενη

ζήτηση των συνδρομητών ενός δικτύου για παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών και ιδιαίτερα υπηρεσιών πολυμέσων, όπως είναι το Διαδίκτυο υψηλής ταχύτητας, η ψηφιακή τηλεόραση και τηλεφωνία, το βίντεο κατ' απαίτηση (Video-on-Demand, VoD) και η αλληλοδραστική τηλεόραση.

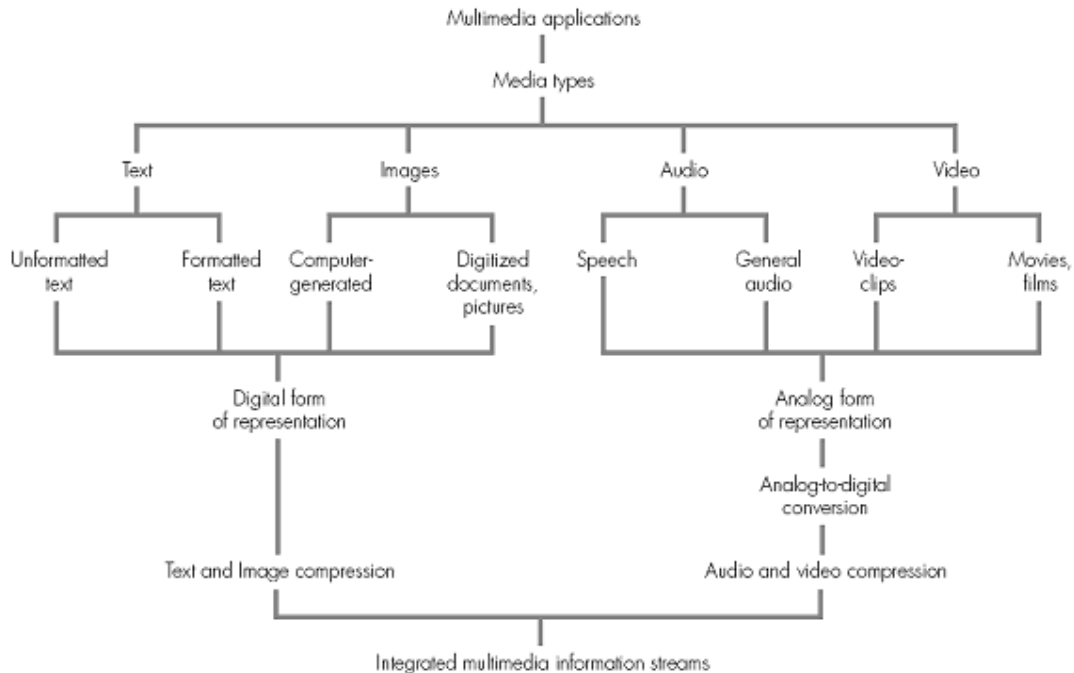
Σύμφωνα με τη σύσταση F.700 της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union, ITU-T), ως “υπηρεσία πολυμέσων” ορίζεται η υπηρεσία εκείνη που χειρίζεται πολλούς και διαφορετικούς τύπους μέσων παρουσίασης της πληροφορίας και τους παρουσιάζει στο χρήστη συντονισμένους. Κάθε τέτοια υπηρεσία μπορεί να απαρτίζεται από πολλούς χρήστες, πολλαπλές συνδέσεις και να συνοδεύεται από μεταβολή του αριθμού των χρηστών καθώς και των διαθέσιμων πόρων του δικτύου κατά τη διάρκεια μιας συνόδου της. Το γεγονός ότι η ITU-T δραστηριοποιείται στη συγκεκριμένη περιοχή αποτελεί την καλύτερη ένδειξη για το πόσο στενά συνδεδεμένες είναι οι εφαρμογές πολυμέσων με τις τηλεπικοινωνίες [3].

Η βασική ιδέα πίσω από την τεχνολογία πολυμέσων είναι η αξιοποίηση του τρόπου επικοινωνίας που χρησιμοποιούν οι άνθρωποι μεταξύ τους. Τα ανθρώπινα όντα σχεδόν ποτέ δεν περιορίζουν την επικοινωνία τους σε ένα μόνο μέσο και σε ένα μόνο τρόπο παρουσίασης της πληροφορίας. Ως μέσα παρουσίασης της πληροφορίας, διακρίνονται οι παρακάτω τύποι [4]:

- Κείμενο (Text): Στον τύπο αυτό ανήκουν τόσο το απλό, μη μορφοποιημένο κείμενο, που περιέχει δέσμες διαφόρων χαρακτήρων από ένα ορισμένο σύνολο, όσο και το πλήρως εμπλουτισμένο κείμενο, που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία, μορφοποίηση και παρουσίαση των ηλεκτρονικών αρχείων.
- Εικόνες (Images): Στον τύπο αυτό ανήκουν τόσο εικόνες που έχουν δημιουργηθεί με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή και περιέχουν γραμμές, καμπύλες, κύκλους και διάφορα άλλα σχήματα, όσο και ψηφιοποιημένες εικόνες από διάφορα αρχεία και φωτογραφίες.
- Ήχος (Audio): Στον τύπο αυτό ανήκουν τόσο ο χαμηλής πιστότητας (low-fidelity) ήχος, όπως αυτός που παράγεται στις τηλεφωνικές συνομιλίες, όσο και ο υψηλής πιστότητας (high-fidelity) στερεοφωνικός ήχος, όπως αυτός που χρησιμοποιείται στα διάφορα CDs.

- Βίντεο (Video): Στον τύπο αυτό ανήκουν τόσο σύντομες ακολουθίες κινούμενων εικόνων (γνωστές και ως video-clips) όσο και ολόκληρες κινηματογραφικές ταινίες (movies/films).

Στο σχήμα 1.2 απεικονίζονται παραστατικά όλοι οι τύποι των μέσων παρουσίασης της πληροφορίας όπως χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές πολυμέσων.



Σχήμα 1.2: Τύποι μέσων παρουσίασης πληροφορίας στις εφαρμογές πολυμέσων

Όπως προτείνεται από τον Halsall στην [4], οι εφαρμογές πολυμέσων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Διαπροσωπικές Επικοινωνίες (Interpersonal Communications)
- Αλληλοδραστικές Εφαρμογές πάνω από το Διαδίκτυο (Interactive Applications over the Internet)
- Ψυχαγωγικές Εφαρμογές (Entertainment Applications)

Μια επιλογή των εφαρμογών πολυμέσων, μαζί με τον τύπο του μέσου παρουσίασης της πληροφορίας που χρησιμοποιείται κάθε φορά, συνοψίζεται στον Πίνακα 1.1.

Κατηγορία Εφαρμογής	Μέσο	Εφαρμογή
Διαπροσωπικές Επικοινωνίες	Φωνή	Τηλεφωνία, φωνητικό μήνυμα (voice-mail), τηλεδιάσκεψη
	Εικόνα	Ψηφιοποιημένες εικόνες (facsimile)
	Κείμενο	Ηλεκτρονικό μήνυμα
	Κείμενο και Εικόνες	Ομαδική Εργασία Υποστηριζόμενη από Υπολογιστή (CSCW)
	Φωνή και Βίντεο	Βιντεοτηλεφωνία, Βιντεομήνυμα, Βιντεοδιάσκεψη
	Κείμενο, Εικόνα, Ήχος και Βίντεο	Ηλεκτρονικό μήνυμα πολυμέσων, ομαδικά video games
Αλληλοδραστικές Εφαρμογές πάνω από το Διαδίκτυο	Κείμενο, Εικόνα, Ήχος και Βίντεο	Ανάκτηση πληροφοριών (νέα, καιρός, βιβλία, περιοδικά, video games) Ηλεκτρονικό εμπόριο
Ψυχαγωγικές Εφαρμογές	Ήχος και Βίντεο	Ήχος/CD κατ' απαίτηση Ταινία/Βίντεο κατ' απαίτηση Ευρυεκπομπή Αναλογικής και Ψηφιακής Τηλεόρασης Αλληλοδραστική Τηλεόραση

Πίνακας 1.1: Εφαρμογές πολυμέσων

Οι υπηρεσίες πολυμέσων που προβλέπονται να υποστηριχθούν πάνω από τα ευρυζωνικά συστήματα πρόσβασης είναι δυνατό να περιλαμβάνουν είτε ασύμμετρες υπηρεσίες, όπως είναι η ταχεία πρόσβαση στο Διαδίκτυο, το VoD, η ψηφιακή τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας (High Definition TV, HDTV) και η πολυεκπομπή ψηφιακού ήχου και εικόνας είτε συμμετρικές υπηρεσίες, όπως η ψηφιακή τηλεφωνία και η βιντεοδιάσκεψη. Άλλοι τύποι υπηρεσιών, των οποίων η παροχή μελετάται πάνω από τα ευρυζωνικά συστήματα πρόσβασης, είναι το ηλεκτρονικό εμπόριο, η τηλεϊατρική, οι αλληλοδραστικές υπηρεσίες πληροφόρησης των κατοίκων πόλεων, τα ευφυή συστήματα μεταφορών, η τηλεεκπαίδευση, οι ηλεκτρονικές βιβλιοθήκες, τα ηλεκτρονικά μουσεία, κ.ά.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να τονισθεί ότι στην παρούσα εργασία, όπως άλλωστε είθισται, με τον όρο “ευρυζωνική” θα χαρακτηρίζεται κάθε υπηρεσία που απαιτεί ρυθμούς μετάδοσης μεγαλύτερους από 2Mbps [4]. Σημειώνεται επίσης ότι, το όριο των 2Mbps αποτελεί το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης για το συμβατικό Ψηφιακό

Δίκτυο Ενοποιημένων Υπηρεσιών (Integrated Services Digital Network, ISDN) (30x64kbps = 2Mbps).

1.3 Ευρυζωνικά συστήματα πρόσβασης

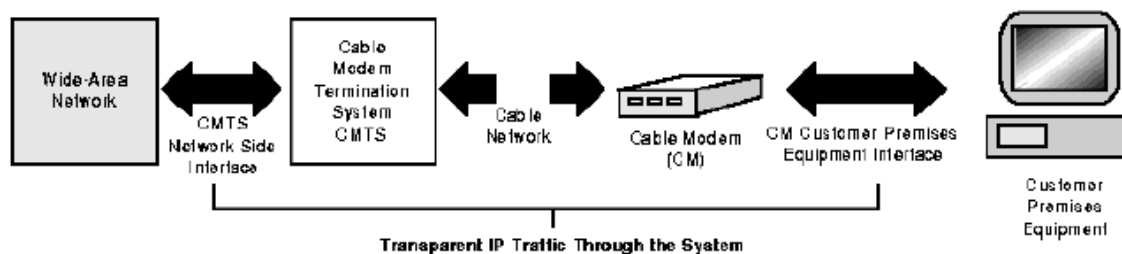
Η τεχνολογία που αφορά τα πολυμέσα είναι μια από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες που έχουν παρουσιασθεί στα τέλη του 20^{ου} αιώνα. Σε αυτόν τον ταχύ ρυθμό ανάπτυξης συνέβαλε και το γεγονός ότι τα πολυμέσα μπορούν εύκολα να συνδυασθούν με άλλες συναφείς τεχνολογίες όπως οι οπτικοί δίσκοι, τα κατανεμημένα υπολογιστικά συστήματα και τα διεθνή ή παγκόσμια δίκτυα δεδομένων με αποτέλεσμα τη δημιουργία εντελώς νέων τάσεων στον τρόπο με τον οποίο εξελίσσονται οι τεχνολογίες της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών [3].

Παράλληλα, τα τελευταία χρόνια, αρκετές ευρυζωνικές υπηρεσίες πολυμέσων έχουν ήδη αρχίσει να παρέχονται στους συνδρομητές των διαφόρων δικτύων. Για παράδειγμα, με την ανάπτυξη και τελειοποίηση του διεθνούς προτύπου κωδικοποίησης MPEG-2, η μετάδοση και η ευρυεκπομπή ψηφιακής τηλεόρασης μέσω του συστήματος DVB (Digital Video Broadcasting) είναι ήδη γεγονός. Παράλληλα, υπηρεσίες βιντεοδιάσκεψης, VoD καθώς επίσης και διάφορες άλλες εφαρμογές πολυμέσων πάνω από το Διαδίκτυο, δεν θα αργήσουν να παρέχονται σε ικανοποιητικό βαθμό στους χρήστες του. Η αλματώδης εξέλιξη της τεχνολογίας πολυμέσων, υποβοηθούμενη από την παράλληλη εξέλιξη άλλων συναφών τεχνολογιών καθώς και η αναμενόμενη ευρεία χρήση των ευρυζωνικών υπηρεσιών πολυμέσων στο άμεσο μέλλον, έχουν οδηγήσει τις προβλεπόμενες τεχνολογίες ευρυζωνικής πρόσβασης σε καθεστώς μεγάλου ανταγωνισμού. Στο υπόλοιπο αυτής της ενότητας, παρουσιάζονται οι διάφορες αυτές τεχνολογίες που στόχο έχουν την πρόσβαση των χρηστών σε ευρυζωνικές υπηρεσίες με όσο το δυνατόν πιο γρήγορο, εύκολο, οικονομικό και αποδοτικό τρόπο.

1.3.1 Καλωδιακή ευρυζωνική πρόσβαση

Οι εταιρίες και βιομηχανίες που δραστηριοποιούνται στο χώρο της καλωδιακής μετάδοσης εισήγαγαν ένα σύνολο προδιαγραφών με την ονομασία DOCSIS (Data Over Cable System Interface Specifications) με σκοπό την εγκατάσταση και τη λειτουργία

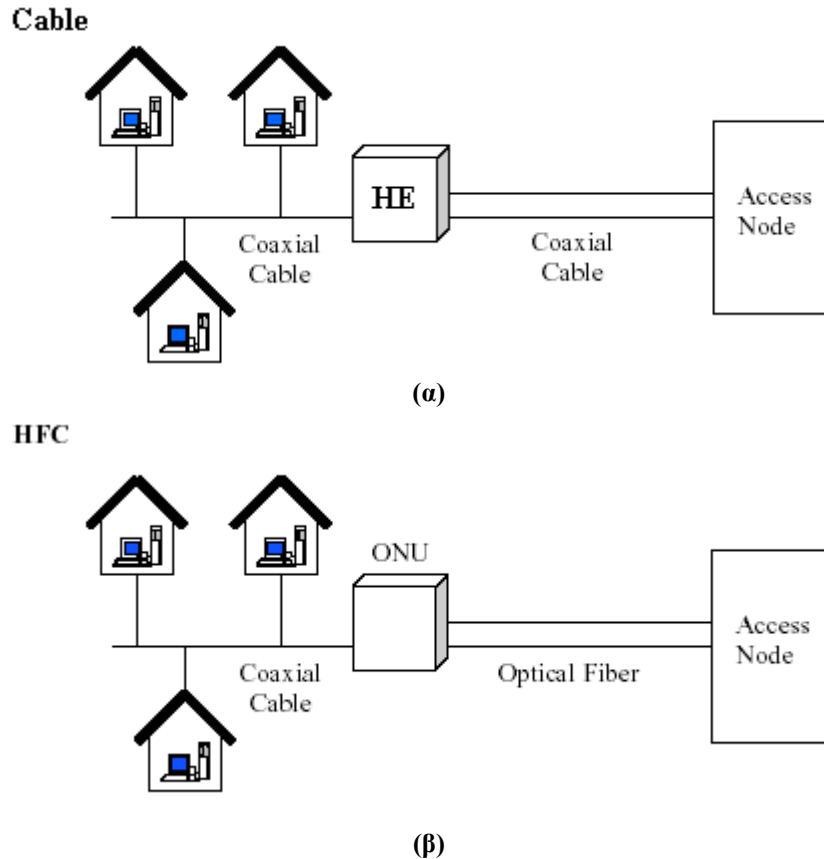
συστημάτων μετάδοσης καλωδιακής τηλεόρασης υψηλών ταχυτήτων. Στις προδιαγραφές αυτές περιγράφονται αναλυτικά οι δομές των τερματικών χρήστη και των διαφόρων διεπαφών του δικτύου, οι οποίες συνιστούν την αρτιότερη απόδοση των καλωδιακών δικτύων. Σύμφωνα, λοιπόν, με το σύστημα προδιαγραφών DOCSIS, οι συνδρομητές μπορούν να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο μέσω ενός καλωδιακού modem (Cable Modem, CM), ενώ οι μεταδόσεις στο άλλο άκρο απόληξης του δικτύου κορμού (Head-End, HE) μπορούν να γίνονται εφικτές μέσω ενός Συστήματος Απόληξης Καλωδιακού Modem (Cable Modem Termination System, CMTS). Μια γενική διάταξη καλωδιακού δικτύου όπως περιγράφεται στις προδιαγραφές DOCSIS απεικονίζεται στο σχήμα 1.3. Το σύστημα χρησιμοποιεί για το ρεύμα άνω ζεύξης (από CM προς CMTS) συχνότητες μεταξύ 5-30MHz ενώ για το ρεύμα κάτω ζεύξης (από CMTS προς CM) οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται περιορίζονται από ένα κάτω φράγμα μεταξύ 50-54MHz και ένα άνω φράγμα που κυμαίνεται μεταξύ 300-860MHz. Οι ταχύτητες μετάδοσης των σημάτων που μπορούν να επιτευχθούν με αυτή τη τεχνολογία αγγίζουν και τα 10-15Mbps [5].



Σχήμα 1.3: Διάταξη καλωδιακού δικτύου βάσει προδιαγραφών DOCSIS

Όσον αφορά την αρχιτεκτονική των δικτύων πρόσβασης αυτού του είδους, υιοθετείται η αρχιτεκτονική “δέντρου-κλαδιού” (tree-and-branch). Σύμφωνα με αυτή, σε κάθε σημείο απόληξης του δικτύου κορμού υπάρχει μια μονάδα από την οποία ξεκινούν οι συνδέσεις ομοαξονικού καλωδίου προς τον κάθε χρήστη του δικτύου (:κλαδιά). Η μονάδα αυτή συνδέεται με το δίκτυο κορμού (:δέντρο) είτε μέσω επίσης ομοαξονικού καλωδίου, οπότε πρόκειται για αμιγώς καλωδιακό δίκτυο πρόσβασης (βλ. σχήμα 1.4α), είτε μέσω οπτικής ίνας, οπότε πρόκειται για υβριδικό δίκτυο πρόσβασης καλωδίου/οπτικής ίνας (Hybrid-Fiber/Coax, HFC) και η μονάδα στο σημείο απόληξης

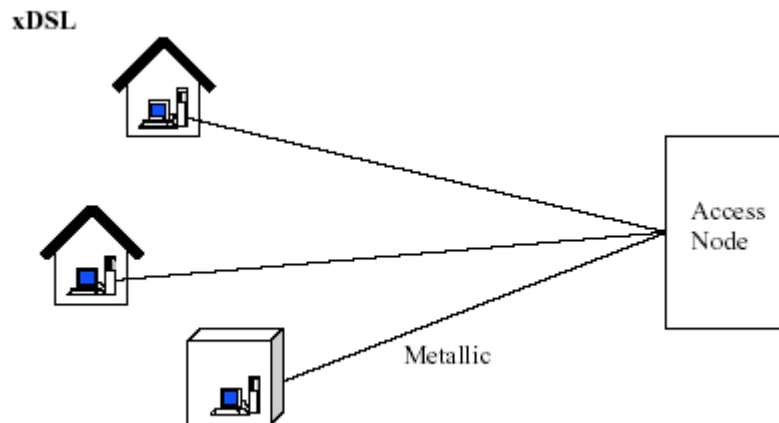
αντικαθίσταται πλέον από κάποια Μονάδα Οπτικού Δικτύου (Optical Network Unit, ONU) που μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό (βλ. σχήμα 1.4β).



Σχήμα 1.4: Δίκτυα καλωδιακής ευρυζωνικής πρόσβασης

1.3.2 Ευρυζωνική πρόσβαση μέσω γραμμών x-DSL

Το ακρωνύμιο DSL προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων Digital Subscriber Line (Ψηφιακή Συνδρομητική Γραμμή) και στην ουσία αποτελεί μια τεχνολογία ευρυζωνικής πρόσβασης τελευταίας γενιάς, που μετατρέπει το απλό χάλκινο τηλεφωνικό καλώδιο σε ένα δίαυλο ψηφιακής επικοινωνίας μεγάλου εύρους ζώνης με χρήση ειδικών modems, τα οποία τοποθετούνται στις δυο άκρες της γραμμής (βλ. σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5: Ευρυζωνική πρόσβαση μέσω γραμμών x-DSL

Για δεκαετίες τα χάλκινα καλώδια (συνεστραμμένα ζεύγη - twisted pairs) χρησιμοποιούνταν για τη μεταφορά φωνής, χωρίς να αξιοποιείται στο έπακρο η μεγάλη χωρητικότητα που προσφέρει ο χαλκός. Ο ήχος της ανθρώπινης φωνής αποτελείται ως γνωστόν από συχνότητες που κυμαίνονται σε εύρος μεταξύ 100-4000Hz. Όλο αυτό το εύρος συχνοτήτων, όμως, δεν είναι απαραίτητο για να γίνει καταληπτή η φωνή και η χροιά του συνομιλητή και έτσι με ειδικά φίλτρα αποκόπτεται το πλεονάζον φασματικό περιεχόμενο αφού όχι μόνο δε χρειάζεται αλλά μπορεί και να δημιουργήσει προβλήματα παρεμβολών. Στην παραδοσιακή τηλεφωνία (Plain Old Telephone Service, POTS) η μετάδοση μέσω των χάλκινων καλωδίων είναι αναλογική με αποτέλεσμα να απαιτείται πρώτα η μετατροπή των σημάτων φωνής σε αναλογικά στο εύρος ζώνης των 4KHz. Ωστόσο, το εύρος ζώνης του χαλκού που φτάνει περίπου τα 1.1MHz είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το εύρος των 4KHz με αποτέλεσμα στην POTS να περιορίζεται κατά πολύ το διαθέσιμο εύρος ζώνης του χαλκού (χρησιμοποιείται μόνο περίπου το 1% του συνολικού διαθέσιμου εύρους ζώνης) και οι ταχύτητες μετάδοσης που μπορούν να επιτευχθούν, χρησιμοποιώντας κοινά modems, να μην ξεπερνούν τα 56Kbps στην ιδανικότερη περίπτωση.

Αντίθετα, χάρη στους εξελιγμένους αλγορίθμους και στη βελτιωμένη ψηφιακή επεξεργασία σήματος που υποστηρίζει η τεχνολογία DSL καθώς επίσης και στη βελτίωση της τεχνολογίας των μετασχηματιστών, των αναλογικών φίλτρων και των μετατροπέων σήματος (από αναλογικό σε ψηφιακό, A/D), η μετάδοση γίνεται εξ

ολοκλήρου ψηφιακά και η μεταδιδόμενη πληροφορία μέσα από τα υπάρχοντα τηλεφωνικά καλώδια συμπίπτει σε μεγάλο βαθμό [6]. Έτσι, επιτρέπεται η χρήση πολύ μεγαλύτερου εύρους ζώνης για τη μεταφορά δεδομένων και επιτυγχάνονται πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης.

Παράλληλα, ο δίαυλος ψηφιακής επικοινωνίας μεγάλου εύρους ζώνης που επιτυγχάνεται μέσω της τεχνολογίας DSL μεταδίδει τόσο τις χαμηλές όσο και τις υψηλές συχνότητες ταυτόχρονα και συγκεκριμένα τις χαμηλές για τη μετάδοση φωνής και τις υψηλές για τη μετάδοση δεδομένων. Ανάλογα με το είδος του modem που θα συνδεθεί στα άκρα της γραμμής, επιτυγχάνονται και διαφορετικές επιδόσεις. Με το DSL επιτυγχάνονται υψηλότερες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων (μέχρι και 52.8Mbps από το Διαδίκτυο ή άλλο απομακρυσμένο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο προς το χρήστη (downstream) και 2.3Mbps από το χρήστη προς το Διαδίκτυο (upstream)), ενώ ταυτόχρονα μεταφέρονται και τα αναλογικά σήματα φωνής.

Ωστόσο, οι χάλκινες τηλεφωνικές γραμμές μεγάλου μήκους προκαλούν μεγάλη εξασθένηση στα DSL σήματα υψηλών συχνοτήτων που μπορεί να φτάσει και τα 90dB στο 1MHz. Στις απλές τηλεφωνικές συνδέσεις, για να αντιμετωπισθεί αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιούνται μικρές ενισχυτικές διατάξεις πηνίων (load coils) ανά μερικές εκατοντάδες μέτρα τηλεφωνικού καλωδίου. Τα πηνία αυτά είναι, όμως, μη συμβατά με την τεχνολογία DSL γιατί αναιρούν την απαιτούμενη αμιγώς ψηφιακή μορφή των DSL υψίσυχνων σημάτων και, συνεπώς, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις συνδέσεις DSL [6]. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της τεχνολογίας DSL καθώς η ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας (Quality of Service, QoS) στο χρήστη εξαρτάται άμεσα από την απόσταση της σύνδεσης (distance-sensitive technology). Όσο η απόσταση της σύνδεσης του χρήστη από τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο αυξάνεται, η εξασθένηση του σήματος αυξάνεται και η QoS και ο ρυθμός μετάδοσης μειώνονται. Το άνω όριο της απόστασης ικανοποιητικής παροχής υπηρεσιών τίθεται από τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο που εκμεταλλεύεται το δίκτυο πρόσβασης DSL και η μέγιστη τιμή που έχει λάβει μέχρι στιγμής είναι 5.5km. Παράλληλα, γίνεται μια συνεχής προσπάθεια από τους αρμόδιους σχεδιαστές ψηφιακών συστημάτων να αυξηθεί αυτό το άνω όριο απόστασης και να κατασκευασθούν DSL modems τα οποία, με τη χρήση ακόμα αποδοτικότερων αλγορίθμων, θα επιτυγχάνουν μεγαλύτερο δυναμικό

εύρος λειτουργίας των DSL συστημάτων και θα κρατούν το θόρυβο σε χαμηλότερα επίπεδα.

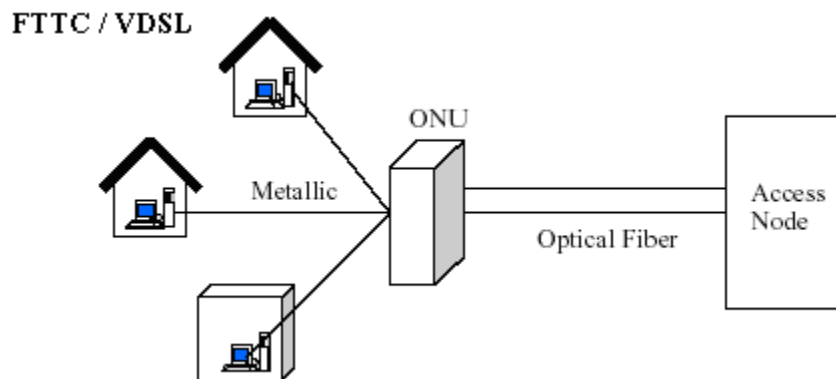
Οι τεχνολογίες DSL αναφέρονται γενικά ως x-DSL, όπου ο δείκτης x αναφέρεται στην εξελικτική διαδικασία της τεχνολογίας. Οι κυριότερες από αυτές είναι οι ADSL, HDSL, SDSL και VDSL. Όλες λειτουργούν με τις ίδιες βασικές αρχές. Από αυτές, η τεχνολογία που έχει εφαρμοσθεί σε μεγαλύτερο βαθμό μέχρι σήμερα και προσφέρει υπηρεσίες πρόσβασης με ικανοποιητική QoS είναι η ADSL ενώ η VDSL υπόσχεται να δώσει στο άμεσο μέλλον εντυπωσιακά μεγαλύτερες ταχύτητες που μπορεί να φτάνουν τα 55Mbps. Για καθεμία από αυτές τις δύο, επισημαίνονται τα εξής:

- **ADSL:** Το ADSL, το οποίο προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων Asymmetric Digital Subscriber Line (Ασύμμετρη Ψηφιακή Συνδρομητική Γραμμή), είναι αυτό που προσφέρεται στους περισσότερους απλούς χρήστες. Η τεχνολογία ADSL εξασφαλίζει πρόσβαση υψηλών ταχυτήτων στο Διαδίκτυο και σε άλλα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, δίνοντας τη δυνατότητα για ταυτόχρονη μετάδοση φωνής και δεδομένων (δεδομένα, κινούμενη εικόνα, γραφικά) μέσω της απλής τηλεφωνικής γραμμής. Κύριο χαρακτηριστικό της τεχνολογίας είναι ότι η μεταφορά δεδομένων γίνεται με ασύμμετρο τρόπο, δηλαδή προσφέρει διαφορετικό ρυθμό για τη λήψη (μέχρι 8Mbps για το downstream) και διαφορετικό για την αποστολή δεδομένων (640Kbps για το upstream). Το σημαντικότερο είναι ότι το εύρος ζώνης δεν μοιράζεται στους χρήστες του δικτύου, αλλά είναι εξ ολοκλήρου στη διάθεση του καθενός.

Όπως όλες οι τεχνολογίες DSL, το ADSL μεταφέρει ταυτόχρονα τα αναλογικά σήματα της φωνής και τα ψηφιακά δεδομένα. Για να δημιουργηθούν πολλαπλά κανάλια επικοινωνίας για τη μετάδοση των δεδομένων, τα ADSL modems χωρίζουν το διαθέσιμο εύρος ζώνης μιας τηλεφωνικής γραμμής είτε με τη μέθοδο Πολυπλεξίας Διαίρεσης Συχνότητας (Frequency Division Multiplexing, FDM) είτε με τη μέθοδο Καταστολής της Ηχούς (Echo Cancellation, EC). Οποιαδήποτε από τις δύο τεχνικές χρησιμοποιηθεί, το ADSL διαχωρίζει μια περιοχή 4KHz (κανάλι φωνής) για απλή τηλεφωνία (POTS) κοντά στη DC περιοχή του εύρους ζώνης του χαλκού ενώ στην περιοχή από 25KHz μέχρι 1.1MHz διαχωρίζονται 256 κανάλια εύρους 4KHz. Κάθε ένα από τα 256 κανάλια

μπορεί να μεταφέρει (μέσω πολυπλεξίας στο χρόνο) μέχρι 32Kbps. Έτσι, η μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης που μπορούμε να πετύχουμε με την τεχνολογία ADSL είναι $256 \cdot 32Kbps = 8.192Mbps$.

Ωστόσο, λόγω της μεγάλης εξασθένησης των DSL σημάτων από τη μετάδοσή τους μέσα από το χάλκινο τηλεφωνικό καλώδιο, πρέπει να τονισθεί το γεγονός ότι η απόδοση του ADSL εξαρτάται σημαντικά από την απόσταση του χρήστη από τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο και φθάνει τα: 1.5Mbps για απόσταση 5.5km, 2Mbps για απόσταση 4.9km, 6.3Mbps για απόσταση 3.6km και 8.4Mbps για απόσταση 2.7km [6].



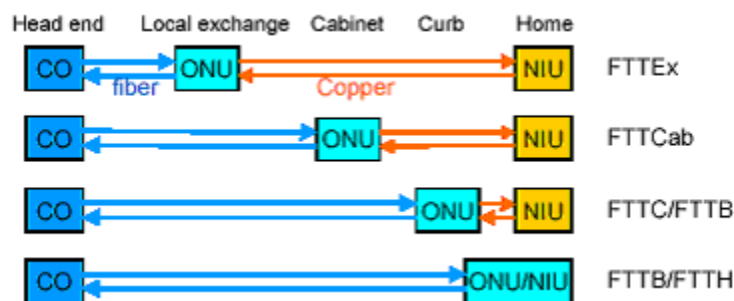
Σχήμα 1.6: Τεχνολογία ευρυζωνικής πρόσβασης FTTC/VDSL

- VDSL:** Το VDSL (Very-high-data-rate Digital Subscriber Line, Ψηφιακή Συνδρομητική Γραμμή Πολύ Υψηλού Ρυθμού Μετάδοσης) βρίσκεται ακόμη σε φάση ανάπτυξης και υπόσχεται να δώσει εντυπωσιακά μεγαλύτερες ταχύτητες που μπορεί να φθάσουν τα 55Mbps με περιορισμό, όμως, και αυτό ως προς τη μέγιστη απόσταση μεταξύ των δύο άκρων του χάλκινου αγωγού. Ανάλογα με την υλοποίηση - παρέχει τόσο συμμετρική όσο και ασύμμετρη μετάδοση - το VDSL δε μπορεί να υπερβαίνει το 1.5km και οι ρυθμοί μετάδοσης κυμαίνονται για τη λήψη από 13-55Mbps και για την αποστολή από 1.5-2.3Mbps. Η τεχνική VDSL σε συνδυασμό με την τεχνολογία Οπτική Ίνα Μέχρι το Πεζοδρόμιο (Fibre To The Curb, FTTC) εκτιμάται ότι θα προσφέρει σύντομα μια ποικιλία υπηρεσιών πολυμέσων, που ποτέ μέχρι τώρα δεν θεωρούντο εφικτές [5]. Στις υπηρεσίες αυτές συμπεριλαμβάνονται το VoD, η HDTV, μια σειρά τηλευπηρεσιών, όπως

τηλεϊατρική, τηλεργασία, τηλεεκπαίδευση και το γρήγορο Διαδίκτυο. Η τεχνολογία πρόσβασης FTTC περιγράφεται ανεξάρτητα στην επόμενη παράγραφο, ωστόσο ένα δείγμα αυτής σε συνδυασμό με την τεχνική VDSL δίνεται στο σχήμα 1.6.

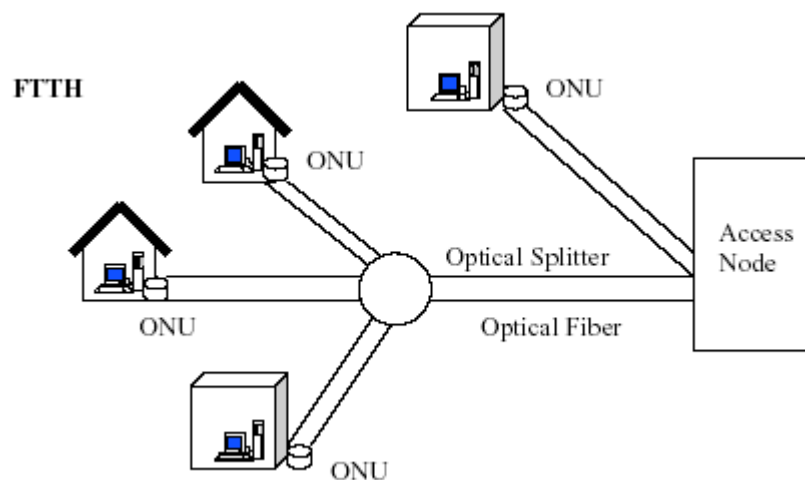
1.3.3 Ευρυζωνική πρόσβαση μέσω οπτικών ινών

Οι οπτικές ίνες σήμερα ως επί το πλείστον χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των δικτύων κορμού καθώς και τη διασύνδεση παγκοσμίων δικτύων μεταξύ τους. Ένας άλλος μεγάλος προμηθευτής της βιομηχανίας οπτικών ινών είναι και η βιομηχανία καλωδιακής τηλεόρασης (Cable TV, CATV). Ωστόσο, τα οπτικά συστήματα που σήμερα διανύουν την περίοδο της τρίτης γενιάς, υπόσχονται να δώσουν απλές λύσεις στα προβλήματα των σύγχρονων δικτύων, προσφέροντας υπηρεσίες που θα υπόκεινται σε λιγότερους περιορισμούς στις αποστάσεις μετάδοσης και στο απαιτούμενο εύρος ζώνης, αρκεί να μπορεί να αξιοποιηθεί όλο το διαθέσιμο οπτικό φάσμα [7]. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι σήμερα χρησιμοποιούνται μόλις 1-2GHz για την παροχή διαφόρων μορφών ψηφιακών επικοινωνιών υψηλής δόμησης από τα συνολικά διαθέσιμα 25THz. Όσον αφορά το πρόβλημα της ευρυζωνικής πρόσβασης, οι οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλα τμήματα του δικτύου πρόσβασης, υλοποιώντας αντίστοιχα διάφορες τεχνολογίες, οι οποίες απεικονίζονται στο σχήμα 1.7. Δύο από τις επικρατέστερες τεχνολογίες ευρυζωνικής πρόσβασης που είναι υπό μελέτη και σε αρκετές περιπτώσεις εφαρμόζονται είναι η Οπτική Ίνα Μέχρι το Σπίτι (Fibre To The Home, FTTH) και η Οπτική Ίνα Μέχρι το Πεζοδρόμιο (Fibre To The Curb, FTTC).



Σχήμα 1.7: Δίκτυα πρόσβασης οπτικών ινών

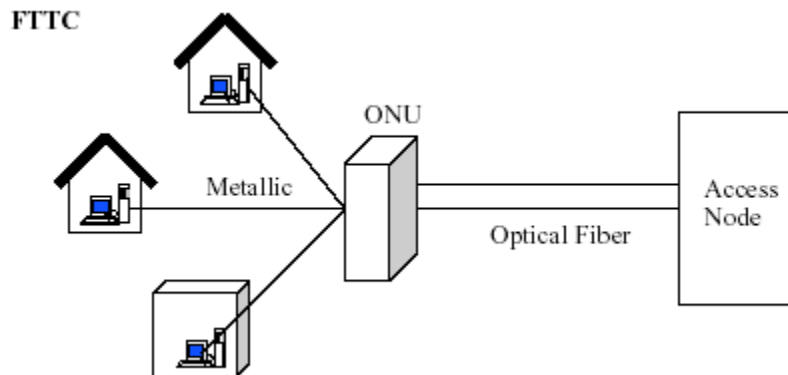
- FTTH:** Σύμφωνα με την τεχνολογία FTTH [5], η οπτική ίνα ξεκινά από το σημείο απόληξης του δικτύου κορμού και καταλήγει στην οικία του χρήστη. Το δίκτυο πρόσβασης που υλοποιείται στην περίπτωση αυτή είναι αμιγώς οπτικό και μεταφέρει οπτικά πολυπλεγμένα σήματα από το βασικό δίκτυο μέχρι κάποιον διαχωριστή (splitter), ο οποίος διαχωρίζει το σήμα στους διάφορους χρήστες που είναι συνδεδεμένοι με αυτό με κάποια δεδομένη αναλογία (πιο εύχρηστη περίπτωση διαχωριστή αυτός με αναλογία 1:16, που σημαίνει ότι το ίδιο οπτικό σήμα μεταφέρεται σε 16 διαφορετικές κατοικίες χρηστών). Στην περίπτωση της τεχνολογίας FTTH, η μονάδα ONU που μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό, πρέπει να είναι τοποθετημένη σε κάθε κατοικία χρήστη, όπου και καταλήγει το καλώδιο οπτικής ίνας. Η αρχή της FTTH ως τεχνική πρόσβασης απεικονίζεται στο σχήμα 1.8. Πρόκειται για μια αρκετά δαπανηρή τεχνική κυρίως λόγω των εξόδων εκσκαφής για την εγκατάσταση της οπτικής ίνας στο έδαφος, του κόστους αντικατάστασης του υπάρχοντος εξοπλισμού των διαφόρων κατοικιών και του σχετικά μεγάλου κόστους κάθε μονάδας ONU. Ωστόσο, αν πραγματοποιηθεί και αποτελέσει πλέον γεγονός, είναι σε θέση να παρέχει υπηρεσίες ευρείας ζώνης στους χρήστες του δικτύου.



Σχήμα 1.8: Τεχνολογία ευρυζωνικής πρόσβασης FTTH

- FTTC:** Μια περισσότερο εφικτή οικονομικά λύση που προτείνεται για την ευρυζωνική πρόσβαση σε υπηρεσίες πολυμέσων είναι η τεχνολογία FTTC [5] (βλ.

σχήμα 1.9), κατά την οποία η μονάδα ONU δεν τοποθετείται πλέον σε κάθε κατοικία χρήστη αλλά σε κάποιο σημείο πλησίον της περιοχής όπου υπάρχουν πολλοί ενδιαφερόμενοι χρήστες για ευρυζωνική πρόσβαση. Έτσι, η οπτική ίνα ξεκινά από το σημείο απόληξης του δικτύου κορμού και καταλήγει σε κάθε μονάδα ONU, εκεί το σήμα μετατρέπεται από οπτικό σε ηλεκτρικό και διαμοιράζεται μετά μέσω χάλκινου καλωδίου σε έναν δεδομένο αριθμό χρηστών (ανάλογα με το πλήθος των χάλκινων συνδρομητικών βρόχων που μπορεί να υποστηρίξει η ONU) που εξυπηρετούνται από την αντίστοιχη ONU. Η τεχνολογία αυτή είναι αρκετά διαδεδομένη και αποτελεί μια αρκετά οικονομική λύση στο γνωστό “πρόβλημα του τελευταίου μιλίου” εκμεταλλευόμενη τις ήδη υπάρχουσες εγκατεστημένες συνδέσεις χάλκινου καλωδίου στις περισσότερες περιοχές.



Σχήμα 1.9: Τεχνολογία ευρυζωνικής πρόσβασης FTTC

1.3.4 Ευρυζωνική δορυφορική πρόσβαση

Αρχικά τονίζεται ότι η δορυφορική πρόσβαση αποτελεί εν γένει ένα είδος ευρυζωνικής ασύρματης πρόσβασης. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία θεωρείται ως μια διαφορετική τεχνολογία ευρυζωνικής πρόσβασης, η οποία λαμβάνει την ιδιαίτερη ονομασία Ευρυζωνική Δορυφορική Πρόσβαση (Broadband Satellite Access, BSA). Ο διαχωρισμός αυτός είναι σύμφωνος με τις συστάσεις του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute for Electrical and Electronic Engineers, IEEE)

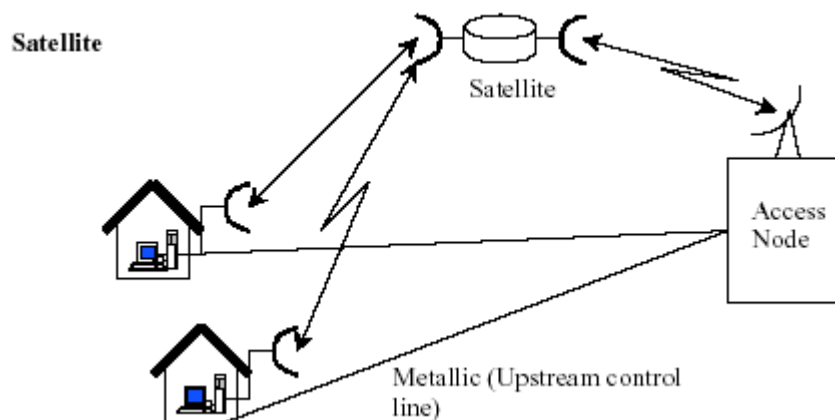
802.16 BWA για την Ευρυζωνική Ασύρματη Πρόσβαση (Broadband Wireless Access, BWA).

Όσον αφορά τις δορυφορικές επικοινωνίες, η εμπορική εκμετάλλευση των οποίων χρονολογείται από το 1965, στο πρώτο στάδιο της λειτουργίας τους δεν παρουσίασαν ιδιαίτερη επιτυχία λόγω των προβλημάτων βιωσιμότητας που αντιμετώπιζαν εξαιτίας της χαμηλής τροχιάς των συστημάτων. Ένα σημαντικό βήμα στην εξέλιξη αλλά και στην καλύτερη εκμετάλλευσή τους έγινε με την κατασκευή των γεωστατικών δορυφόρων, οι οποίοι τίθενται σε τροχιά σε ύψος 35880km πάνω από την επιφάνεια της γης με ταχύτητα 11040km/h, ταχύτητα ίση με τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της γης, ώστε να μένουν σταθεροί πάνω από το ίδιο σημείο αυτής. Από πλευράς συχνοτήτων, οι σημερινοί δορυφόροι χρησιμοποιούν τις ζώνες C-band (4-6GHz), Ku-band (11-14GHz) και Ka-band (18-30GHz). Πλεονεκτήματα των δορυφορικών επικοινωνιών είναι η άνετη κάλυψη μεγάλων γεωγραφικών περιοχών με εκπομπές σημάτων ευρείας ζώνης και η μη εξάρτηση του κόστους αλλά και της επικοινωνίας γενικά από την απόσταση, ενώ στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται οι μεγάλες απώλειες ελευθέρου χώρου (της τάξεως των 200dB) και η μεγάλη καθυστέρηση σήματος (της τάξης των 250ms) που δημιουργούνται λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ δορυφόρου και επίγειου σταθμού, η έλλειψη ασφάλειας στη μετάδοση που έχει ως αποτέλεσμα την απαιτούμενη χρησιμοποίηση συστημάτων κρυπτογράφησης και η δυσμενής εξάρτηση των δορυφορικών σημάτων σε συχνότητες άνω των 10GHz από τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, που προκαλούν σημαντική απόσβεση και αποπόλωση των δορυφορικών σημάτων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι δορυφορικές επικοινωνίες VSAT (Very Small Aperture Terminals, Τερματικά Πολύ Μικρού Ανοίγματος), μια ιδιαίτερη μορφή επικοινωνίας που ονομάστηκε έτσι λόγω των κεραιών μικρών διαστάσεων και χαμηλού κόστους που χρησιμοποιούν οι τερματικοί σταθμοί εδάφους. Η τεχνολογία VSAT επιτρέπει την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων μέσω δορυφόρου με χρήση παραβολικών κεραιών διαμέτρου 0.6-1.8m. Τα VSAT χρησιμοποιούνται για μετάδοση δεδομένων με ταχύτητες 1.2-19.2Kbps και σε σπανιότερες περιπτώσεις με ταχύτητες 64Kbps-2Mbps για μετάδοση ψηφιακής φωνής και εικόνας βίντεο [8]. Συνεπώς, με την τοποθέτηση παραβολικών κεραιών λήψης μικρών διαστάσεων σε κάθε οικία χρήστη, παρέχεται

απευθείας δορυφορική πρόσβαση σε υπηρεσίες πολυμέσων και είναι δυνατή η υλοποίηση των λεγόμενων δορυφορικών συστημάτων “Απευθείας στην Οικία” (Direct-to-Home, DTH).

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι τα περισσότερα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών που λειτουργούν προς το παρόν είναι μονόδρομα, δηλαδή γίνεται εκμετάλλευση της δορυφορικής ζεύξης μόνο για το ρεύμα καθόδου (downstream) από το δορυφόρο προς το χρήστη, ενώ για τη ζεύξη ανόδου (upstream) χρησιμοποιείται συνήθως μια απλή τηλεφωνική γραμμή, έτσι ώστε να παρέχονται αλληλοδραστικές αμφίδρομες υπηρεσίες επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών (βλ. σχήμα 1.10) [5]. Συνεπώς, κάθε ενδεχόμενη βλάβη που θα θέσει το τηλεφωνικό δίκτυο εκτός λειτουργίας θα διακόψει επίσης και κάθε δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών του συστήματος.



Σχήμα 1.10: Ευρυζωνική δορυφορική πρόσβαση (Μονόδρομη)

Ωστόσο τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών που αναμένονται να χρησιμοποιηθούν στο άμεσο μέλλον, θα είναι σε θέση να προσφέρουν αλληλοδραστικές ευρυζωνικές υπηρεσίες πολυμέσων και προς τις δύο κατευθύνσεις, ενώ η περιοχή εξυπηρέτησης του συστήματος θα είναι σαφώς ευρύτερη σε σχέση με τις προαναφερθείσες τεχνολογίες ευρυζωνικής ενσύρματης πρόσβασης. Ένα σημείο στο οποίο επίσης τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών υπερτερούν είναι και ο μικρότερος χρόνος μέσα στον οποίο το σύστημα αναμένεται να τίθεται σε λειτουργία, καθώς μετά την εκτόξευση του δορυφόρου όλες οι προβλεπόμενες υπηρεσίες επικοινωνίας είναι πλέον άμεσα δυνατές.

1.3.5 Ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση

Σύμφωνα με το Ινστιτούτο IEEE, με τον όρο Ευρυζωνική Ασύρματη Πρόσβαση (BWA) εννοείται η τεχνολογία κατά την οποία παρέχονται στο χρήστη με σχετικά μικρή χρονοκαθυστέρηση υπηρεσίες φωνής, δεδομένων καθώς και υπηρεσίες ευρείας ζώνης μέσω ενός ασύρματου συστήματος που λειτουργεί υπό τον περιορισμό οπτικής επαφής (Line-Of-Sight limited) [5]. Η ύπαρξη ακτίνας οπτικής επαφής στα συστήματα BWA, που απορρέει από τις ιδιαίτερες συνθήκες διάδοσης του ραδιοσήματος στο ασύρματο περιβάλλον της υπό μελέτη περιοχής και αποτελεί τον κυριότερο περιοριστικό παράγοντα στη λειτουργία των συστημάτων αυτών, επιτρέπει ωστόσο την κυψελωτή δομή αυτών και κατεπέκταση την αποδοτικότερη χρησιμοποίηση του διατιθέμενου ραδιοφάσματος μέσω της τεχνικής αναχρησιμοποίησης συχνότητας. Έτσι, ουσιαστικά η υπό κάλυψη περιοχή χωρίζεται σε κυψέλες, όπως άλλωστε συμβαίνει και στα παραδοσιακά συστήματα κινητής τηλεφωνίας. Η βασική διαφορά έγκειται εδώ στο ότι οι συνδρομητές δεν είναι κινητοί (mobile) αλλά σταθεροί (fixed) και επομένως δεν χρειάζεται μεταγωγή μεταξύ γειτονικών κυψελών. Για το λόγο αυτόν άλλωστε, τα συστήματα BWA είναι σε αρκετές περιπτώσεις γνωστά και ως BFWA (Broadband Fixed Wireless Access, Ευρυζωνική Σταθερή Ασύρματη Πρόσβαση).

Σε κάθε κυψέλη υπάρχει ένας σταθμός βάσης (Base Station, BS) ο οποίος επικοινωνεί με ασύρματο τρόπο με όλα τα τερματικά χρηστών (Terminal Station, TS) τα οποία βρίσκονται εντός της ακτίνας οπτικής επαφής αυτού και είναι διατεταγμένα σε τοπολογία “αστέρα”. Η μετάδοση δεδομένων γίνεται με αμφίδρομο τρόπο υπό την έννοια ότι από τον BS προς τους χρήστες (downstream) υπάρχει μετάδοση σημείου προς πολλαπλά σημεία (Point to Multi-Point) ενώ από τους χρήστες προς τον BS (upstream) η σύνδεση είναι σημείου προς σημείο (Point To Point).

Το γεγονός ότι οι χαμηλές μικροκυματικές φέρουσες συχνότητες είναι σχεδόν πλήρως κατειλημμένες οδηγεί στην επιλογή συχνοτήτων άνω των 20GHz για τη λειτουργία των συστημάτων αυτών. Τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από αυτή τη μετάβαση σχετίζονται πρωτίστως με την αύξηση του διατιθέμενου εύρους ζώνης για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές κάθε είδους. Επίσης, με τον τρόπο αυτόν αποφεύγονται οι παρεμβολές σε και από άλλες επίγειες μικροκυματικές ζεύξεις (όπως π.χ. συστήματα WLL (Wireless Local Loop), MMDS (Multi-channel Multipoint Distribution Services)

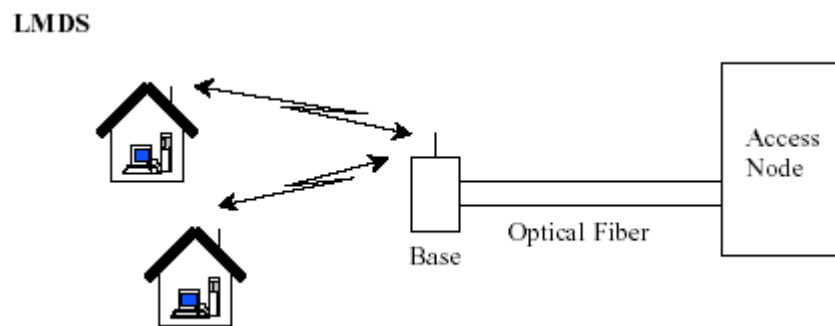
και MVDS (Multipoint Video Distribution Services)), που συνήθως λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων κάτω από τα 10GHz, ενώ είναι παράλληλα δυνατή και η χρήση κεραιών μεγαλύτερης κατευθυντικότητας και μικρότερου μεγέθους. Σε υψηλές συχνότητες, τα αυξημένα κέρδη των κεραιών δίνουν τη δυνατότητα αντίστοιχης μείωσης των διαστάσεών τους, γεγονός το οποίο βελτιώνει την εμπορική ανταγωνιστικότητα των συστημάτων BWA αν κανείς λάβει υπόψη την τοποθέτηση των κεραιών λήψης στις οικίες των χρηστών.

Έτσι, η αδειοδότηση των συστημάτων BWA αφορά κυρίως τις περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος των 24, 28, 31 ή 40GHz με το διατιθέμενο δεσμευμένο εύρος ζώνης να διαφέρει ελαφρώς μεταξύ των Η.Π.Α., του Καναδά, των ευρωπαϊκών και των υπολοίπων χωρών (όντας συνήθως της τάξης του 1GHz). Στην περιοχή αυτή των χιλιοστομετρικών συχνοτήτων, ο κυριότερος περιοριστικός παράγοντας διάδοσης που επηρεάζει τη διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία των συστημάτων BWA και έχει άμεσο αντίκτυπο στην ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας είναι οι βροχοπτώσεις, καθώς το μήκος κύματος του διαδιδόμενου ραδιοσήματος γίνεται συγκρίσιμο με το μέγεθος της σταγόνας βροχής με αποτέλεσμα τη σκέδαση του και τις σημαντικές απώλειες ισχύος.

Τα πιο διαδεδομένα συστήματα BWA που λειτουργούν στις παραπάνω ζώνες συχνοτήτων είναι τα συστήματα LMDS και HAPs. Για κάθε ένα από αυτά, επισημαίνονται τα εξής:

- **LMDS:** Το Ινστιτούτο IEEE έχει εκδώσει τη σύσταση 802.16 BWA με σκοπό να αναπτύξει διεθνείς προδιαγραφές και πρότυπα της σειράς 802 για τη λειτουργία των συστημάτων ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης. Από τις διάφορες τεχνολογίες που έχουν προταθεί κατά καιρούς, εκείνη που θα απασχολήσει ιδιαίτερα και θα αποτελέσει κύριο αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας είναι η τεχνολογία συστημάτων LMDS (Local Multipoint Distribution Services). Το LMDS είναι μία τεχνολογία ασύρματου επίγειου τοπικού δικτύου σταθερής πρόσβασης σχεδιασμένου για την παροχή υπηρεσιών ευρείας ζώνης. Λειτουργεί σε χιλιοστομετρικές συχνότητες που ποικίλλουν ανάλογα με την τοποθεσία με διατιθέμενο εύρος φάσματος που σε ορισμένες περιοχές υπερβαίνει το 1GHz. Επιτρέπει την αμφίδρομη μετάδοση δεδομένων παρέχοντας, ανάλογα με την υλοποίηση, χωρητικότητα μέχρι και 1.5Gbps προς τους χρήστες (downstream)

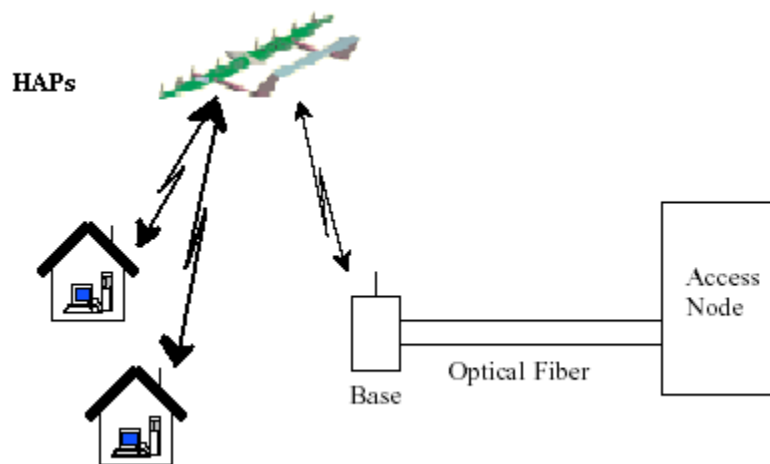
και 200Mbps από κάθε χρήστη (upstream). Ωστόσο, μια τυπική τιμή μετάδοσης δεδομένων αποτελεί η τιμή των 38Mbps προς το χρήστη [8]. Πρόκειται για μια πρόταση οικονομικής λύσης στο επονομαζόμενο πρόβλημα του “τελευταίου μιλίου” φέροντας υπηρεσίες υψηλού εύρους ζώνης στις οικίες και επιχειρήσεις χρηστών. Το σύστημα είναι μια εναλλακτική λύση στην εγκατάσταση οπτικών ινών καθόλη τη διαδρομή μέχρι το χρήστη ή στην προσαρμογή της καλωδιακής τηλεόρασης (CATV) για παροχή υπηρεσιών ευρείας ζώνης. Όμως, το κόστος για την εγκατάσταση του συστήματος LMDS είναι πολύ μικρότερο από αυτό που απαιτείται στις άλλες δύο περιπτώσεις, γεγονός που αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά του. Η μετάδοση γίνεται απευθείας από μία τοπική κεραία του σταθμού BS προς τα διάφορα τερματικά χρηστών TS που βρίσκονται μέσα σε ακτίνα οπτικής επαφής (βλ. σχήμα 1.11).



Σχήμα 1.11: Ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση LMDS

- HAPs:** Μια εναλλακτική τεχνολογία που έχει προταθεί τα τελευταία χρόνια και υπόσχεται να δώσει σημαντικές λύσεις στο πρόβλημα της ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης είναι τα συστήματα των Στρατοσφαιρικών Τηλεπικοινωνιακών Πλατφόρμων (High Altitude Platforms, HAPs) (βλ. σχήμα 1.12). Τα HAPs αντιπροσωπεύουν μια υβριδική τεχνολογική προσέγγιση στο πρόβλημα της ευρυζωνικής επικοινωνίας, καθώς συνδυάζουν όλα τα πλεονεκτήματα των επίγειων και δορυφορικών συστημάτων. Οι εν λόγω εναέριες πλατφόρμες δρουν ως σταθμοί βάσης ή κόμβοι αναμετάδοσης και είναι τοποθετημένες σε αεροπλάνα ή ειδικά σχεδιασμένα μπαλόνια, επανδρωμένα ή μη, στην περιοχή της στρατόσφαιρας σε ύψος 20-22km πάνω από την επιφάνεια της

γης. Είναι ψευδο-γεωστατικές πλατφόρμες και μπορούν να θεωρηθούν είτε ως κεραίες πολύ μεγάλου ύψους είτε ως δορυφόροι πολύ χαμηλής τροχιάς, προσφέροντας κάλυψη σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές αλλά και σε ευρύτερες γεωγραφικές εκτάσεις. Η τηλεπικοινωνιακή τεχνολογία με την οποία είναι σχεδιασμένα τα HAPs είναι ικανή να παρέχει πλήρως αμφίδρομα ψηφιακά κανάλια από τα 14.4Kbps ως τα 155Mbps. Σε αυτές τις ταχύτητες μπορούν να υποστηριχθούν πολλές εφαρμογές ευρυζωνικής σταθερής ασύρματης πρόσβασης BFWA, εφαρμογές που συχνά, καταχρηστικά, χαρακτηρίζονται από το γενικότερο όρο LMDS, λόγω του τρόπου μετάδοσης από ένα σημείο προς πολλαπλά που υφίσταται από τον εναέριο σταθμό HAP προς τους διαφόρους χρήστες του συστήματος. Η τεχνολογία ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης HAPs δεν πρόκειται να απασχολήσει άλλο την παρούσα εργασία. Ωστόσο, λόγω του μεγάλου ενδιαφέροντος που παρουσιάζει και της αναμενόμενης ευρείας χρήσης που ενδεχομένως αποκτήσει στο άμεσο μέλλον, ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται στην ενδεικτική βιβλιογραφία [9],[10] για την πληρέστερη ενημέρωσή του πάνω στην τεχνολογία των HAPs.



Σχήμα 1.12: Ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση HAPs

1.4 Αγορά υπηρεσιών σταθερής ασύρματης πρόσβασης LMDS

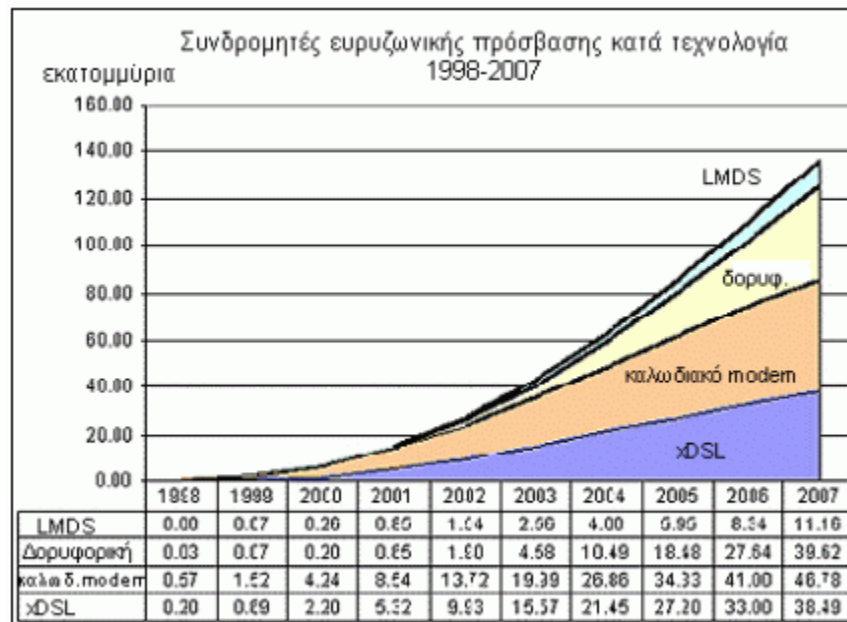
Μερικοί από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή μιας τεχνολογίας είναι το κόστος του εξοπλισμού, τα υπολογιζόμενα έσοδα από την υπηρεσία, η υπάρχουσα υποδομή και η πληθυσμιακή πυκνότητα. Μέχρι πρόσφατα η διάδοση των υπηρεσιών ευρυζωνικής πρόσβασης ήταν πολύ περιορισμένη. Οι σημαντικότεροι λόγοι ήταν το υψηλό κόστος εξοπλισμού, η έλλειψη αναγνωρισμένων προτύπων (standards) και η απροθυμία των πιθανών χρηστών να αγοράσουν προϊόντα πρώτης γενιάς. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια του 1999 παρατηρήθηκε έντονη κινητικότητα η οποία αποδόθηκε σε τέσσερις κυρίως λόγους [8]:

- Στην τεράστια εξάπλωση του Διαδικτύου.
- Στις τεχνολογικές εξελίξεις.
- Στην απελευθέρωση της τηλεπικοινωνιακής αγοράς και τη διαμόρφωση συνθηκών ανταγωνισμού.
- Στην αυξανόμενη ζήτηση για μετάδοση δεδομένων.

1.4.1 Πρόβλεψη παγκόσμιας αγοράς

Καθώς οι τεχνολογίες για υπηρεσίες ευρείας ζώνης συνεχίζουν να εξελίσσονται με ταχύτατους ρυθμούς, ο αριθμός των εναλλακτικών προτάσεων και λύσεων συνεχίζει να αυξάνεται. Ενώ μέχρι πρότινος η προσοχή της αγοράς είχε επικεντρωθεί στις τεχνολογίες για καλωδιακά modem και x-DSL, η άφιξη των τεχνολογιών LMDS και Ka-Band δορυφορικών τεχνολογιών δηλώνει ότι το αποτέλεσμα του ανταγωνισμού γύρω από τις υπηρεσίες και τα προϊόντα για ευρυζωνική πρόσβαση κάθε άλλο παρά έχει ξεκαθαρίσει. Η εταιρία Pioneer Consulting σε μια λεπτομερή μελέτη για την εκτίμηση της αγοράς σχετικά με τις παραπάνω υπηρεσίες συγκέντρωσε στοιχεία για τις τεχνολογίες ευρυζωνικής πρόσβασης, την υπάρχουσα τηλεπικοινωνιακή υποδομή και εκτιμήσεις για τη ζήτηση εύρους ζώνης, ώστε να κατασκευάσει αντίστοιχες προβλέψεις με δεκαετή ορίζοντα. Οι συνοπτικές της προβλέψεις όσο αφορά τον αριθμό των συνδρομητών παρουσιάζονται στο σχήμα 1.13, ενώ στη συνέχεια η μελέτη προοπτικής σε επίπεδο παγκόσμιας αγοράς επικεντρώνεται στις υπηρεσίες ευρυζωνικής ασύρματης

πρόσβασης LMDS, καθώς τα συστήματα αυτά αποτελούν και το κύριο αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 1.13: Συνδρομητές υπηρεσιών ευρυζωνικής πρόσβασης κατά τεχνολογία για τα έτη 1998 έως 2007 (Πηγή: Pioneer Consulting)

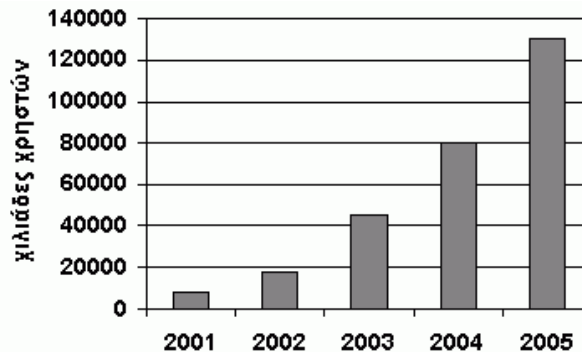
Όπως προκύπτει από το σχήμα 1.13, η υπηρεσία LMDS αναμένεται να κατέχει ένα σχετικά μικρό κομμάτι της αγοράς. Ωστόσο, η ανάπτυξή της από την αρχική της κατάσταση με μηδενικό μερίδιο αγοράς αναμένεται να είναι αρκετά γρήγορη. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ενώ το 2000, 260.000 χρήστες αναμένονταν να χρησιμοποιήσουν την υπηρεσία αυτή, το 2007 (δηλαδή μέσα σε έξι χρόνια) ο αριθμός αυτός αναμένεται να φθάσει τα 11.16 εκατομμύρια χρήστες, αντιπροσωπεύοντας δηλαδή το 8% περίπου των χρηστών ευρείας ζώνης. Όσον αφορά το ρυθμό ανάπτυξης, άλλες μελέτες αναφέρουν για ρυθμούς αύξησης της τάξης του 50% ετησίως. Σχετικά με τα έσοδα που αναμένονται από την ανάπτυξη και χρησιμοποίηση αυτής της υπηρεσίας, η εταιρία Pioneer Group προβλέπει ότι η αγορά των υπηρεσιών LMDS στις Η.Π.Α. θα αυξηθεί από 103 εκατομμύρια δολάρια περίπου που ήταν το 1998 σε 8.5 δισεκατομμύρια δολάρια το 2007, το οποίο σημαίνει έναν μέσο σύνθετο ετήσιο ρυθμό αύξησης περίπου ίσο με 63%. Οι προβλέψεις της εταιρίας Frost & Sullivan τον Απρίλιο του 1999 για την τεχνολογία

LMDS στα επόμενα τρία χρόνια ήταν τριπλάσιες από αυτές της Pioneer Group. Η εταιρία Telecompetition U.S. σε σχετική ανάλυση αναφέρει ότι τα ετήσια έσοδα για τις δέκα κορυφαίες αγορές στις Η.Π.Α. (Ν. Υόρκη, Λος Άντζελες, Σικάγο, Σαν Φρανσίσκο, Βοστώνη) θα προσέγγιζαν τα 500 εκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2001 με περισσότερους από 270.000 τερματισμούς τελικού χρήστη. Επιπλέον, η ίδια μελέτη αναφέρει ότι το 90% των εσόδων θα προέλθει από επιχειρησιακές εφαρμογές, ενώ περισσότερους από τους μισούς τερματισμοί τελικού χρήστη θα είναι οικιακών χρηστών. Μέχρι το 2008, τα έσοδα αναμένεται να έχουν αυξηθεί σε 3.1 δισεκατομμύρια δολάρια με περισσότερους από τρία εκατομμύρια τερματισμούς τελικού χρήστη. Η ίδια μελέτη αναφέρει ότι η εξέλιξη της εισόδου της υπηρεσίας τα πρώτα τρία χρόνια θα εστιασθεί σε επιχειρησιακές εφαρμογές για μετάδοση δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες και πρόσβαση στο Διαδίκτυο σε γεωγραφικές περιοχές υψηλής πυκνότητας βιομηχανικών και εμπορικών επιχειρήσεων. Τέλος, αναφέρει ότι μέχρι το 2001, οι τεχνικοί περιορισμοί και η αβεβαιότητα της αγοράς σχετικά με τις υπηρεσίες LMDS θα περιόριζαν τη διαθεσιμότητα της υπηρεσίας σε εθνικό επίπεδο και θα συγκρατούσαν τα συνολικά επίπεδα διείσδυσης χαμηλά.

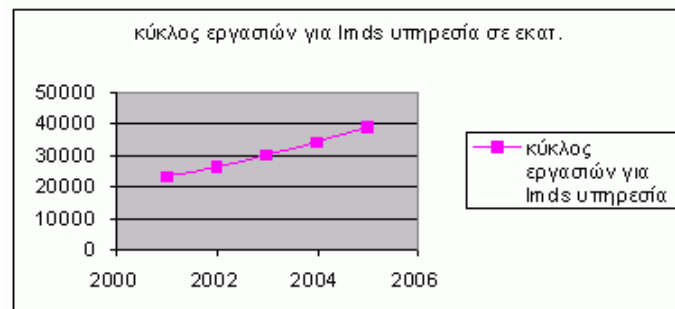
Ωστόσο, υπάρχουν και αντίθετες απόψεις. Όπως αναφέρεται από την εταιρία TotalTelecom, λόγω των απογοητευτικών πωλήσεων υπηρεσιών LMDS στις Η.Π.Α. οι εταιρίες στρέφονται στην Ευρώπη και προσπαθούν να επιταχύνουν τις διαδικασίες για τη λήψη σχετικών αδειών. Σύμφωνα με τον Frank Fabricius, αναλυτή της εταιρίας Dataquest στη Δανία, οι πωλήσεις εξοπλισμού LMDS στην Ευρώπη περιορίζονται ακόμα σε δοκιμές σε ένα περιορισμένο αριθμό χωρών, όπως η Γαλλία, η Ισπανία και η Πορτογαλία. Παρόλα αυτά, η εταιρία Dataquest επισημαίνει ότι η υπηρεσία μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο σε τοπικό επίπεδο, αλλά οι πωλήσεις μπορεί να μείνουν σχετικά χαμηλές επειδή η υπηρεσία λειτουργεί υπό τον περιορισμό ύπαρξης οπτικής επαφής, γεγονός που μπορεί να περιορίσει την εφαρμογή της σε ορισμένες περιοχές. Σχετικά με την κατάσταση στην Ευρώπη, σύμφωνα με τις πιο αισιόδοξες εκτιμήσεις της εταιρίας Dataquest η αξία των πωλήσεων εξοπλισμού LMDS μέχρι το 2002 θα ξεπερνούσε τα 754 εκατομμύρια δολάρια ή το 15% της αγοράς ασύρματου τοπικού βρόχου.

1.4.2 Πρόβλεψη ελληνικής αγοράς

Σύμφωνα πάλι με τη μελέτη που περιγράφεται στην [8], εκτιμάται ότι η υπηρεσία LMDS θα εξελιχθεί σύμφωνα με το γενικότερο μοντέλο ανάλογων προηγμένων υπηρεσιών που εισάγονται στην ελληνική τηλεπικοινωνιακή αγορά, γνωρίζοντας ενθαρρυντικούς βαθμούς διείσδυσης στους επιχειρηματικούς συνδρομητές στα μεγάλα αστικά κέντρα, ενώ για το βραχυχρόνιο ορίζοντα στον οποίο συνολικά αναφέρεται αυτή η μελέτη, το ποσοστό διείσδυσης στο σύνολο των οικιακών χρηστών-συνδρομητών αναμένεται σημαντικά μικρότερο και εμφανίζεται στο τέλος του ορίζοντα. Οι υποθέσεις που έγιναν σε αυτή την εκτίμηση αφορούσαν την πραγματοποίηση της εισαγωγής των υπηρεσιών από τους εγχώριους τηλεπικοινωνιακούς φορείς και για πενταετή ορίζοντα από το έτος εισαγωγής τους. Έτσι η εκτίμηση για την εξέλιξη των υπηρεσιών LMDS όσον αφορά τον αριθμό των συνδρομητών και τα έσοδα στην ελληνική αγορά, φαίνεται στα σχήματα 1.15 και 1.16. Στο σχήμα 1.15 έχει υποθεθεί ότι το έτος εισαγωγής (1^ο έτος) ήταν το 2001.



Σχήμα 1.16: Συνδρομητές υπηρεσιών LMDS ανά έτος λειτουργίας μετά την εισαγωγή της



Σχήμα 1.17: Εξέλιξη των εσόδων των υπηρεσιών LMDS στην Ελλάδα

Συνοπτικά θα μπορούσε να αναφερθεί ότι, από τη στιγμή εισαγωγής των υπηρεσιών LMDS στην Ελλάδα, κάτι το οποίο δεν αναμενόταν πριν το 2001, ο ρυθμός αύξησης των χρηστών θα είναι αρκετά ικανοποιητικός, καθώς είναι δυνατό να προσφερθεί από αρκετούς φορείς, ενώ ο αντίστοιχος ρυθμός αύξησης του τζίρου μπορεί να φθάσει μέχρι και το 63%. Το ποσοστό διείσδυσης των υπηρεσιών στους χρήστες υπηρεσιών ευρείας ζώνης ενδεχομένως υπερβεί το 8% περίπου το 2007 (ποσοστό που δείχνεται στο σχήμα 1.13 και αναμένεται για την αμερικάνικη αγορά), δεδομένου ότι στην Ελλάδα δεν έχει αναπτυχθεί στον ίδιο βαθμό η υπηρεσία των καλωδιακών modem, με αποτέλεσμα το μερίδιό της να διαμοιράζεται μεταξύ των υπολοίπων υπηρεσιών (LMDS, δορυφορικές επικοινωνίες, x-DSL). Πρέπει, όμως, να σημειωθεί ότι η επιτυχία καθιέρωσης και εξέλιξης των υπηρεσιών LMDS εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από άλλους παράγοντες, όπως από την προϋπόθεση ύπαρξης οπτικής επαφής, αλλά ακόμα και από την εξέλιξη και επιτυχία των ανταγωνιστικών της υπηρεσιών. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει όμως (υψηλή ταχύτητα και σχετικά μικρό κόστος) την καθιστούν ικανή να καταλάβει ένα σημαντικό μερίδιο από την αγορά, ιδίως σε επίπεδο επιχειρήσεων, αλλά και ως τεχνολογία για εσωτερική χρήση από τηλεπικοινωνιακούς φορείς.

1.4.3 Παρούσα κατάσταση στον ελλαδικό χώρο

Στην Ελλάδα, η αρμόδια επιτροπή για την έκδοση αδειών λειτουργίας των συστημάτων LMDS είναι η Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (Ε.Ε.Τ.Τ.). Μέχρι σήμερα, αν και η τεχνολογία LMDS πρόκειται ουσιαστικά για μια σχετικά νέα τεχνολογία ευρυζωνικής πρόσβασης για τα ελληνικά δεδομένα, αρκετές είναι οι εταιρίες που έχουν εκδηλώσει ενδιαφέρον για την απόκτηση σχετικής ειδικής άδειας και έχουν ήδη αρχίσει να εγκαθιστούν, να λειτουργούν και να εκμεταλλεύονται δημόσια τηλεπικοινωνιακά δίκτυα σταθερής ασύρματης πρόσβασης (βλ. πίνακα 1.2) [11]. Η ζώνη ραδιοσυχνότητας των 3.5GHz έχει αποδοθεί για συστήματα ασύρματων ζεύξεων σημείου προς σημείο, όπως τα συστήματα Ασύρματου Τοπικού Βρόχου WLL, ενώ τα συστήματα LMDS που έχουν εγκατασταθεί ήδη στην Ελλάδα λειτουργούν στη ζώνη των 25GHz.

α/α	Διακριτική Επωνυμία Εταιρίας
1	COSMOTE
2	EUROPROM TELECOMMUNICATIONS
3	FORTHNET
4	INFO QUEST
5	MEDITERRANEAN BROADBAND ACCESS
6	TELLAS
7	VODAFONE-ΠΑΝΑΦΟΝ

Πίνακας 1.2:

Εταιρίες που έχουν αποκτήσει ειδική άδεια ασύρματης σταθερής πρόσβασης στην Ελλάδα

Καθώς η εγκατάσταση, η λειτουργία και η εκμετάλλευση ενός δικτύου LMDS βρίσκονται ακόμα σε σχετικά αρχικό στάδιο στον ελλαδικό χώρο, οι παραπάνω εταιρίες στοχεύουν σε πρώτη φάση σε εταιρικούς πελάτες (SME, SOHO, εταιρίες μεγαλύτερης εμβέλειας) καλύπτοντας τις σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές ανάγκες τους και προσφέροντας υπηρεσίες σχετικά περιορισμένου εύρους ζώνης. Χαρακτηριστικά οι υπηρεσίες που συνήθως προσφέρονται είναι υπηρεσίες δημόσιας τηλεφωνίας (POTS, Fractional E1, E1), μισθωμένων κυκλωμάτων (nx64Kbps – 2Mbps), πρόσβασης στο Διαδίκτυο (με ταχύτητες από 128Kbps έως 2Mbps) και υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας (IP Addressing, Domain Name System, E-Mail Hosting, Web Hosting, Database Services, Proxy Services). Σε πρώτο στάδιο, οι περιοχές εξυπηρέτησης των συστημάτων LMDS αναφέρονται ως επί το πλείστον στις πόλεις της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης αλλά και, σε μικρότερο βαθμό, σε ορισμένες επαρχιακές πόλεις όπως η Λάρισα και τα Οινόφυτα όπου παρατηρείται υψηλή πυκνότητα βιομηχανικών και εμπορικών επιχειρήσεων και, συνεπώς, το αγοραστικό ενδιαφέρον των υπηρεσιών LMDS είναι ανάλογα αυξημένο.

Ωστόσο, σύμφωνα με τις αισιόδοξες εκτιμήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω και αφορούν τον ελλαδικό χώρο, συγκεκριμένα, αλλά και την παγκόσμια αγορά, γενικότερα, αναμένεται ότι η αγορά των υπηρεσιών LMDS θα αυξηθεί ακόμα περισσότερο και πιθανώς επεκταθεί και σε πελάτες κατοικιών στο άμεσο μέλλον.

1.5 Κύριο αντικείμενο μελέτης της εργασίας

Είναι φανερό πλέον από τα προηγούμενα ότι, ως σχετικά νέα τεχνολογία που υπόσχεται ικανοποιητικές λύσεις για το πρόβλημα της ευρυζωνικής πρόσβασης, τα συστήματα LMDS αναμένονται να απασχολήσουν αρκετά στο άμεσο μέλλον. Προς το παρόν, στις περιοχές όπου έχουν αρχίσει και εγκαθίστανται τα συστήματα αυτά, ο αριθμός των τηλεπικοινωνιακών παρόχων που έχουν εξασφαλίσει άδεια σταθερής ασύρματης πρόσβασης από τους αρμόδιους φορείς είναι σχετικά μικρός. Όσο η τεχνολογία LMDS παραμένει σε πρώιμο στάδιο τόσο η πυκνότητα των χρηστών και των σταθμών βάσης του συστήματος θα είναι μικρότερη σε μια περιοχή και οι πρωτοπόροι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι θα δρουν υπό το καθεστώς μικρότερου ανταγωνισμού. Ωστόσο, καθώς το ποσοστό διείσδυσης των υπηρεσιών LMDS στο αγοραστικό κοινό ακολουθεί την αύξηση της ζήτησης των χρηστών για πρόσβαση σε ευρυζωνικές υπηρεσίες πολυμέσων, αναμένονται όλο και περισσότεροι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι να εκδηλώσουν ενδιαφέρον απόκτησης ειδικής άδειας από τους αρμόδιους φορείς.

Συνεπώς, η πυκνότητα των χρηστών και σταθμών βάσης των διαφόρων συστημάτων που πρόκειται να εγκατασταθούν και να λειτουργήσουν σε μια περιοχή αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά. Δεδομένου ότι οι πάροχοι αυτοί λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων που τους έχει αποδοθεί και ότι στους σταθμούς βάσης εφαρμόζονται συχνά τεχνικές αναχρησιμοποίησης συχνότητας για την αποδοτικότερη χρήση του διατιθέμενου ραδιοφάσματος, δημιουργούνται αρκετά συχνά προβλήματα παρεμβολών μεταξύ των διαφόρων συστημάτων που λειτουργούν στην ίδια περιοχή.

Παρόμοια προβλήματα, που επηρεάζουν αρνητικά τη λειτουργία και την επίδοση των ήδη υπαρχόντων ασυρμάτων μικροκυματικών συστημάτων και δυσχεραίνουν τη μελέτη για το σχεδιασμό και την εγκατάσταση νέων, αποτελούν μια συγκεκριμένη κατηγορία ζητημάτων των ασυρμάτων επικοινωνιών, των οποίων η μελέτη εντάσσεται στην ευρύτερη ερευνητική περιοχή της Διαχείρισης Φάσματος (Spectrum Management).

Στην παρούσα εργασία, λοιπόν, μελετάται η χρήση της τεχνικής διαφορικής λήψης κελιού σε κυψελωτά συστήματα LMDS ως μέτρο αντιμετώπισης αυτών των προβλημάτων και προτείνεται αναλυτικό μοντέλο υπολογισμού της βελτίωσης του λόγου σήματος προς παρεμβολή (C/I) που επιτυγχάνεται στο σύστημα με την τεχνική αυτή.

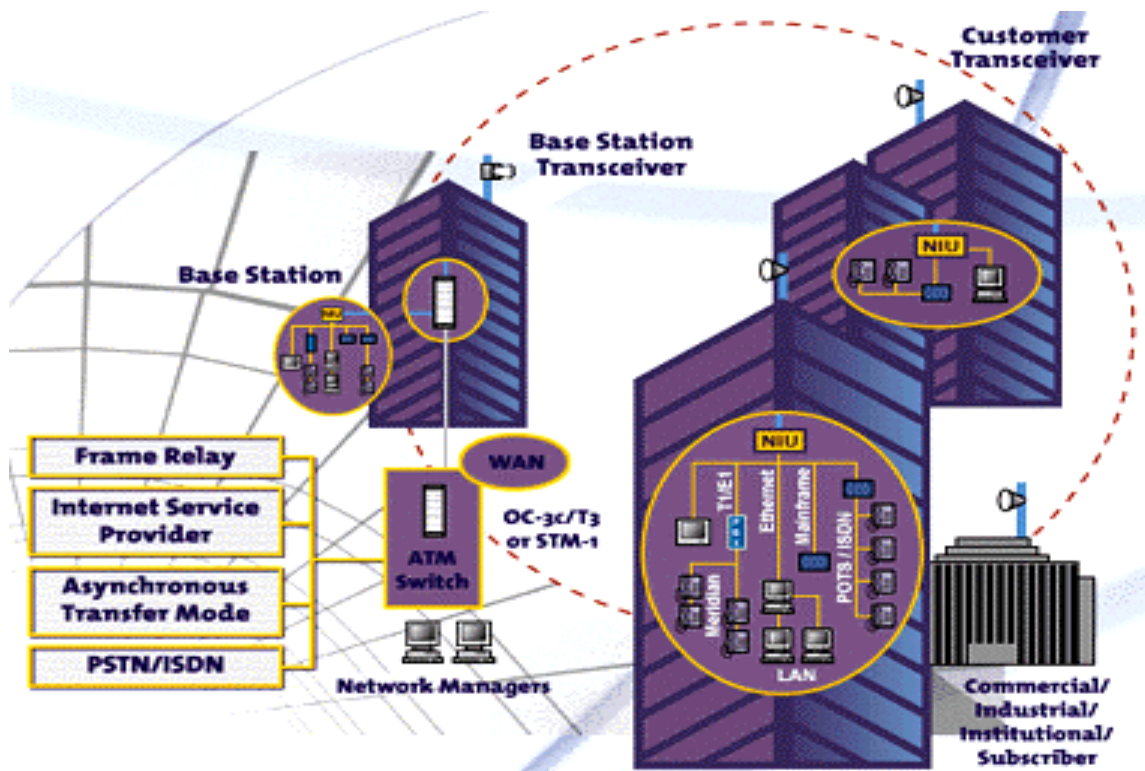
Γενικά, η τεχνική της διαφορικής λήψης εφαρμόζεται σε ασύρματα μικροκυματικά συστήματα που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz και σε περιοχές ιδιαίτερα επιβαρημένες από τις βροχοπτώσεις (:κυρίαρχος μηχανισμός διαλείψεων στις ζώνες αυτές συχνοτήτων) με στόχο την αύξηση των μεγεθών διαθεσιμότητας και αξιοπιστίας των συστημάτων και την επίτευξη χαμηλών περιθωρίων διάλειψης. Ειδικά στα κυψελωτά συστήματα LMDS, εφαρμόζεται η τεχνική διαφορικής λήψης κελιού για τον ίδιο βασικό σκοπό. Ωστόσο, όπως αποδεικνύεται στα τελευταία κεφάλαια της εργασίας, εκτός από τη μείωση των περιθωρίων διάλειψης λόγω βροχής, με την εφαρμογή της διαφορικής λήψης κελιού είναι δυνατή και η μείωση της επίδρασης των παρεμβολών σε συστήματα LMDS που υποφέρουν από την παρενόχληση γειτονικών σταθμών βάσης. Η μείωση της επίδρασης παρεμβολών στο σύστημα εκτιμάται με βάση αναλυτικό μοντέλο υπολογισμού που προτείνεται στην παρούσα εργασία.

Η χρησιμότητα του προτεινόμενου μοντέλου είναι μεγάλη καθώς βάσει αυτού μπορούν να συντελεσθούν οι απαραίτητες ειδικές μελέτες συντονισμού (coordination studies) για την επίτευξη της επιθυμητής διαθεσιμότητας στα ήδη υπάρχοντα συστήματα LMDS και για την ασφαλή σχεδίαση νέων ασύρματων επίγειων μικροκυματικών συστημάτων.

2. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ LMDS

2.1 Τι είναι το LMDS

Το LMDS (Local Multipoint Distribution Service) πρόκειται γενικά για μία τεχνολογία ασύρματου τοπικού δικτύου σταθερής πρόσβασης, που είναι σχεδιασμένο για την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών φωνής, δεδομένων, Διαδικτύου και βίντεο. Λειτουργεί ως επί το πλείστον σε μικροκυματικές ζώνες συχνοτήτων άνω των 20GHz, οι οποίες ποικίλλουν ανάλογα με την τοποθεσία, δεσμεύοντας φασματικό εύρος, που σε ορισμένες περιοχές ξεπερνά το 1GHz. Η γενική μορφή τοπολογίας ενός συστήματος LMDS απεικονίζεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Γενική μορφή τοπολογίας συστήματος LMDS

Η πιστή απόδοση του ακρωνυμίου LMDS στα ελληνικά είναι Τοπική Πολυσημειακή Διανομή Υπηρεσίας, ενώ αναλύοντας κάθε όρο χωριστά προκύπτουν παράλληλα και τα βασικότερα γνωρίσματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας [12].
Συνεπώς:

- **Local (Τοπική):**

Η επιλογή συχνοτήτων άνω των 20GHz για τη λειτουργία των συστημάτων LMDS έχει ως αποτέλεσμα τις αναπόφευκτες υψηλές αποσβέσεις ελευθέρου χώρου και λόγω βροχοπτώσεων στο μεταδιδόμενο σήμα. Τα ιδιαίτερα αυτά χαρακτηριστικά διάδοσης θέτουν ένα άνω όριο στην περιοχή κάλυψης του συστήματος, η οποία περιορίζεται σε μια κυψέλη με ακτίνα οπτικής επαφής (Line-of-Sight radius). Σύμφωνα με μετρήσεις, η ακτίνα αυτή σε μεγάλα αστικά κέντρα μπορεί να φθάνει μέχρι τα 8km το πολύ. Συνεπώς, ο συγκεκριμένος χαρακτηρισμός υποδηλώνει αυτόν τον τοπικό χαρακτήρα του δικτύου καθώς και την κυψελωτή δομή των συστημάτων LMDS. Αν και φαίνεται ως μειονέκτημα, επιτρέπει παράλληλα την εφαρμογή τεχνικών αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων σε παρακείμενες κυψέλες για την αποδοτικότερη χρήση του διατιθέμενου ραδιοφάσματος.

- **Multipoint (Πολυσημειακή):**

Αναφέρεται στην προς τα κάτω ζεύξη (downlink) από το σταθμό βάσης του συστήματος προς τα τερματικά χρηστών, όπου υπάρχει μετάδοση σημείου προς πολλαπλά σημεία (Point to Multi-Point, PMP). Κατά την αντίθετη φορά μετάδοσης, στην προς τα άνω ζεύξη (uplink) από τα τερματικά χρηστών προς το σταθμό βάσης, η σύνδεση είναι σημείου προς σημείο (Point To Point, PTP). Η τεχνική μετάδοσης PMP προσδίδει στα συστήματα LMDS ένα ιδιαίτερο προβάδισμα έναντι των υπάρχοντων ασύρματων μικροκυματικών συστημάτων (π.χ. συστήματα Ασύρματου Τοπικού Βρόχου – Wireless Local Loop, WLL) που εφαρμόζουν την τεχνική μετάδοσης PTP. Χρησιμοποιώντας σχεδόν παρόμοιο RF εξοπλισμό και λειτουργώντας μέσα στις ίδιες μικροκυματικές μπάντες συχνοτήτων, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι των συστημάτων LMDS επιτυγχάνουν να εξυπηρετούν περισσότερους χρήστες μέσα στην ίδια περιοχή. Το

γεγονός αυτό μεταφράζεται σε περισσότερα Mbps/km², το οποίο με τη σειρά του ισοδυναμεί με την παροχή περισσότερων υπηρεσιών με μεγαλύτερο εύρος ζώνης.

- **Distribution (Διανομή):**

Αναφέρεται στη διανομή σημάτων από τον κάθε σταθμό βάσης του συστήματος στους χρήστες αυτού. Τα σήματα που υποστηρίζονται ενδέχεται να είναι σήματα φωνής, δεδομένων, Διαδικτύου, βίντεο ή ακόμα και συνδυασμός αυτών.

- **Service (Υπηρεσία):**

Υπονοεί τη συνδρομητική φύση της σχέσης που υπάρχει μεταξύ του χρήστη και του τηλεπικοινωνιακού παρόχου ενός συστήματος LMDS. Οι παρεχόμενες υπηρεσίες μέσω ενός δικτύου LMDS εξαρτώνται εξ ολοκλήρου από τις επιχειρησιακές επιλογές του παρόχου.

2.2 Εφαρμογές και υπηρεσίες

Η κύρια εφαρμογή των συστημάτων LMDS είναι αυτή της ευρυζωνικής σταθερής ασύρματης πρόσβασης σε υπηρεσίες πολυμέσων. Επιτρέπουν την αμφίδρομη μετάδοση δεδομένων παρέχοντας, ανάλογα με την υλοποίηση, χωρητικότητα μέχρι και 1.5Gbps προς τους χρήστες (downstream) και 200Mbps από κάθε χρήστη (upstream). Παράλληλα, αποτελούν μια πρόταση αποτελεσματικής και οικονομικής λύσης στο πρόβλημα του “τελευταίου μιλίου” (last mile problem), δηλαδή της διασύνδεσης σε τελικό στάδιο των χρηστών με το βασικό κορμό του τηλεπικοινωνιακού δικτύου, το οποίο αποτελείται συνήθως από οπτικές ίνες.

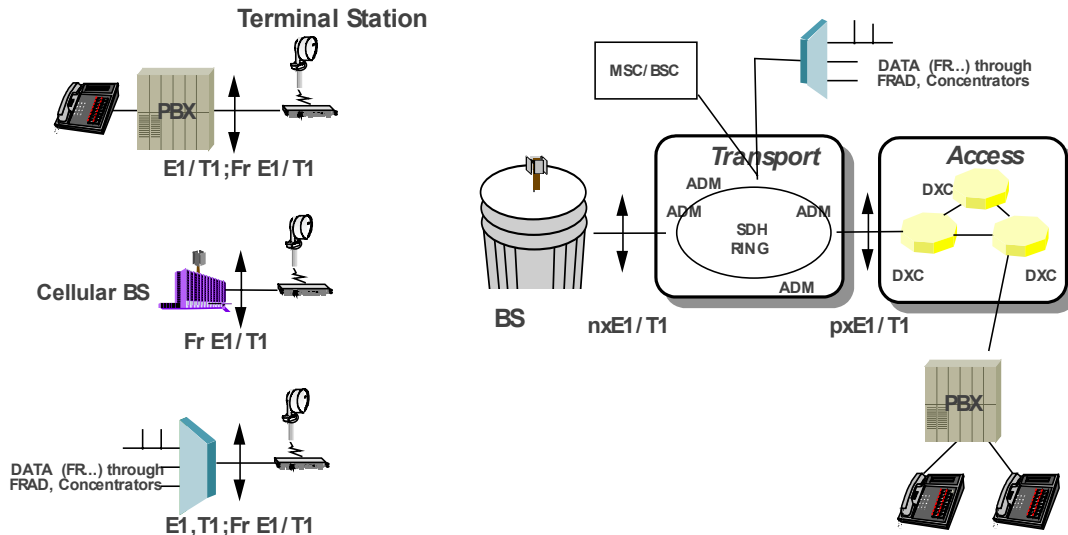
Η λύση που προτείνεται παρακάμπτει την ιδιαίτερα δαπανηρή εγκατάσταση οπτικών ινών καθώς και την ανάπτυξη δικτύου καλωδιακής τηλεόρασης (Cable TV, CATV) μέχρι τον τελικό χρήστη. Και οι δύο αυτές τεχνικές πρόσβασης είναι ιδιαίτερα επίπονες και δαπανηρές, από πλευράς κόπου και κόστους, αντίστοιχα, των απαιτούμενων εκσκαπτικών εργασιών. Εξάλλου, για το επιπρόσθετο αυτό κόστος εγκατάστασης των καλωδίων ή οπτικών ινών μέχρι το σημείο πρόσβασης του χρήστη επιβαρύνεται εξ ολοκλήρου ο τηλεπικοινωνιακός πάροχος. Αντίθετα, στην περίπτωση του ασύρματου δικτύου LMDS, ένα μεγάλο μέρος του κόστους, που είναι η τεχνική υποδομή, δεν επιβαρύνει τον πάροχο μέχρι τη στιγμή εγκατάστασης του συνδρομητικού εξοπλισμού.

Συνεπώς, η τεχνολογία ευρυζωνικής πρόσβασης LMDS για τους μεν τηλεπικοινωνιακούς παρόχους αποτελεί ιδιαίτερα επικερδή λύση όσον αφορά τη συντήρηση και διαχείριση του δικτύου και τα λειτουργικά κόστη αυτού, για τους δε χρήστες αποτελεί ιδιαίτερα οικονομική, γρήγορη, εύκολη και αποτελεσματική λύση, όσον αφορά το χαμηλό κόστος λειτουργικών εξόδων, την εύκολη και άμεση εγκατάσταση του απαιτούμενου συνδρομητικού εξοπλισμού και τις υψηλές ταχύτητες μετάδοσης που επιτυγχάνονται, αντίστοιχα.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί και μια δεύτερη πιθανή εφαρμογή των συστημάτων LMDS, γνωστή και ως λειτουργία κορμού (backhaul). Συγκεκριμένα, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν ως σταθερό μέσο συσσώρευσης και προώθησης δεδομένων στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας από τους διάφορους σταθμούς βάσης προς τα κέντρα μεταγωγής αυτών. Έως τώρα η επικοινωνία αυτή γινόταν μέσω των ελεγκτών σταθμών βάσης, που συνδέονταν ενσύρματα με πολλούς σταθμούς βάσης από τη μία πλευρά και με ένα κέντρο μεταγωγής από την άλλη. Ωστόσο, ο αριθμός των ενσύρματων συνδέσεων μπορεί να μειωθεί σημαντικά με τη χρησιμοποίηση ενός LMDS συστήματος για την επικοινωνία των ελεγκτών σταθμών βάσης με τους σταθμούς βάσης των συστημάτων κινητής τηλεφωνίας. Όπως είναι φανερό, μία τέτοια αρχιτεκτονική απλοποιεί σημαντικά το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας αφού κάθε σταθμός βάσης LMDS (:ελεγκτής σταθμών βάσης του δικτύου κινητής τηλεφωνίας) μπορεί να καλύψει μεγάλο αριθμό σταθμών βάσης κινητής τηλεφωνίας (:τερματικά χρηστών του συστήματος LMDS) με ανάλογο αριθμό ασυρμάτων ζεύξεων.

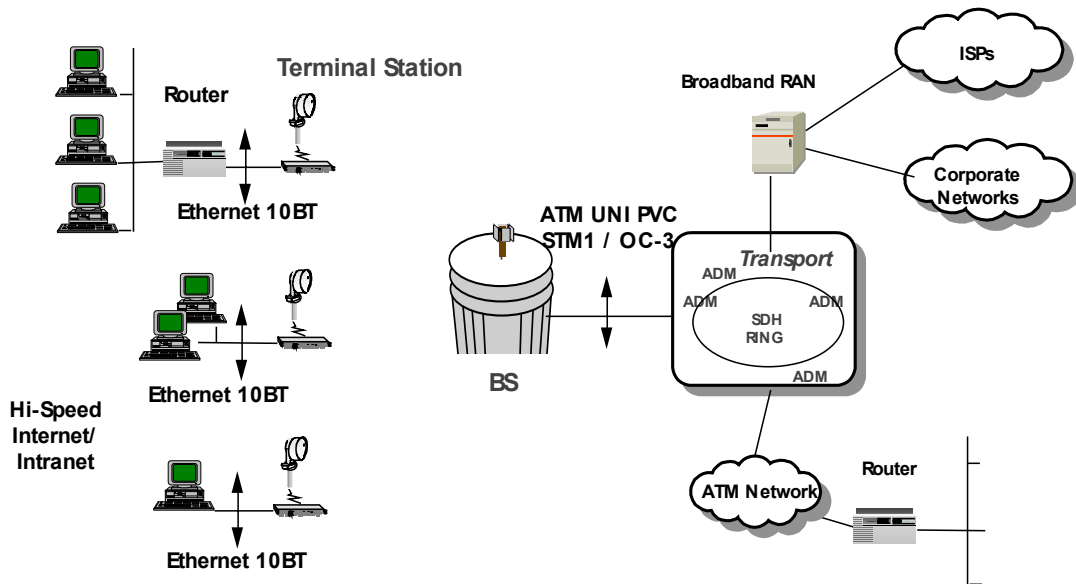
Όσον αφορά τις προσφερόμενες υπηρεσίες μέσω ενός συστήματος LMDS μπορούν να χωρισθούν στις παρακάτω κατηγορίες [13]:

- Υπηρεσίες μισθωμένης γραμμής (Leased Lines) (βλ. σχήμα 2.2)
Παρέχεται E1/T1 ή τμηματική E1/T1 διαφανής σύνδεση μεταξύ τερματικού και σταθμού βάσης. Από την πλευρά του κυρίως δικτύου, ο σταθμός βάσης είναι συνδεδεμένος μέσω διαρκούς διαθέσιμης σύνδεσης Nx E1 ή T1.



Σχήμα 2.2: Υπηρεσίες μισθωμένης γραμμής

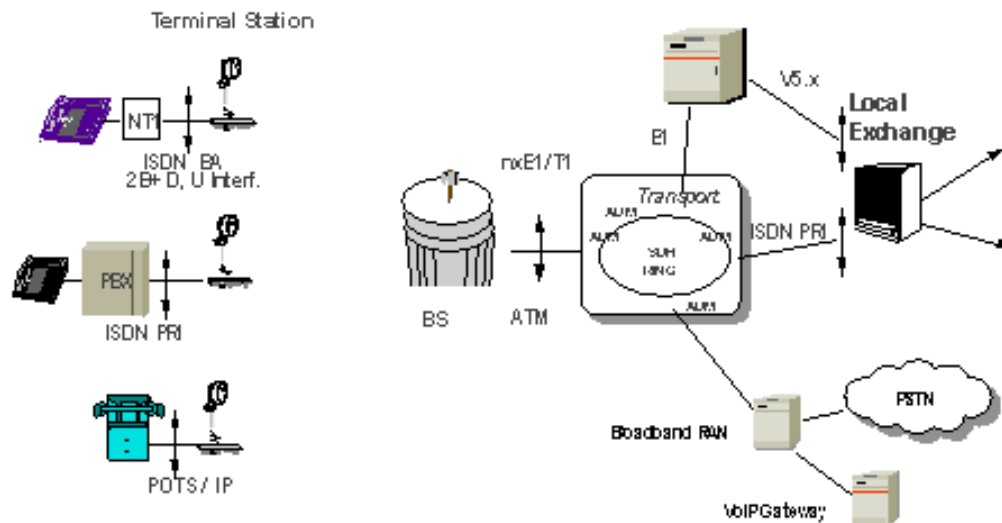
- Συνήθεις εφαρμογές είναι:
- PBX διασυνδέσεις (για τηλεφωνία).
 - Υπηρεσίες δεδομένων πάνω από μισθωμένες γραμμές για WAN σύνδεση βασισμένη σε μισθωμένες γραμμές μέσω συγκεντρωτών FRAD (Frame Relay), γεφυρών ή δρομολογητών.
 - Διασύνδεση με κυψελωτό (2G/3G) / PCS (Personal Communications Systems) / WLL δίκτυο.
- Υπηρεσίες καταιγιστικών δεδομένων (Bursty Data) (βλ. σχήμα 2.3)
Οι ενσωματωμένες TDMA και ATM τεχνολογίες επιτρέπουν τη δυναμική εκχώρηση φάσματος με αποτέλεσμα ο τελικός χρήστης να καταλαμβάνει μόνο το απαραίτητο εύρος ζώνης όταν και όποτε αυτό χρειάζεται. Έτσι, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη μεταφερόμενη κίνηση. Η διεπαφή με το δίκτυο μπορεί να είναι OC-3/STM1 ή E3 UNI ATM.



Σχήμα 2.3: Υπηρεσίες δεδομένων ευρείας ζώνης

Συνήθεις εφαρμογές είναι :

- Internet.
 - Intranet.
 - LAN-to-LAN διασύνδεση.
- Υπηρεσίες κυκλομεταγωγικής τηλεφωνίας (Switched Telephony) (βλ. σχήμα 2.4)
Παρέχουν πρόσβαση στις επικοινωνίες κλασικής τηλεφωνίας ή ISDN.



Σχήμα 2.4: Υπηρεσίες κυκλομεταγωγικής τηλεφωνίας

Συνήθεις εφαρμογές είναι:

- Πολλαπλές απλές αναλογικές τηλεφωνικές γραμμές POTS.
- Πολλαπλές ISDN γραμμές βασικής πρόσβασης (2B+D).
- ISDN πρωτεύουσα σύνδεση (30B+2D) για PBX διασυνδέσεις.

2.3 Αποδιδόμενο ραδιοφάσμα

Η συχνότητα λειτουργίας των συστημάτων LMDS διαφέρει ανάλογα με την περιοχή εγκατάστασης και τις άδειες που έχουν εκδοθεί από τις αρμόδιες αρχές σε κάθε χώρα. Ωστόσο, όλες σχεδόν οι άδειες που έχουν εκδοθεί μέχρι σήμερα για λειτουργία συστημάτων LMDS είναι στην περιοχή συχνοτήτων άνω των 20GHz. Στον πίνακα 2.1 απεικονίζεται το αποδιδόμενο ραδιοφάσμα για τα συστήματα BWA που εφαρμόζουν την τεχνική μετάδοσης ενός σημείου προς πολλαπλά (PMP) [14]. Με βάση αυτόν τον πίνακα, στις Η.Π.Α. η συχνότητα λειτουργίας των συστημάτων LMDS είναι στην περιοχή συχνοτήτων των 24GHz, 28GHz, 31GHz και 38GHz, ενώ στην Ευρώπη στην περιοχή από 24GHz έως 31GHz καθώς επίσης και σε αυτήν των 42GHz για ορισμένες μόνο Ευρωπαϊκές χώρες (κυρίως άνυδρες περιοχές όπως Αγγλία, Νορβηγία). Το δεσμευμένο εύρος ζώνης είναι αρκετά μεγάλο ώστε να είναι δυνατή η μετάδοση ευρυζωνικών υπηρεσιών πολυμέσων και κυμαίνεται από 0.8GHz έως 1.3GHz, ανάλογα πάλι με την περιοχή όπου το σύστημα πρόκειται να εγκατασταθεί.

PMP Frequency Bands											
Country	10 GHz ETSI	18-24 GHz	24 GHz DEMS	26 GHz ETSI	25-27 GHz	27.5-29.5 GHz	28 GHz Like US	31 GHz	38 GHz US	38 GHz ETSI	38 GHz Other
North America											
USA			X				X	X	X		
Canada			X		X		X		X		
Asia Pacific											
Australia							X	X			
Japan		X			XU						X
Korea					XU						
Malaysia	P										
New Zealand					X						
Philippines	X	X?			X		X				
Singapore						X?	X				
Taiwan				X							X
Thailand						X					
Central & South America											
Argentina	X		X		X		X	X	X		
Bolivia							X				
Brazil	P			P							
Chile					X		X				
Colombia					X		X				
Ecuador						X					
Mexico	X			X							
Paraguay						X					
Peru						X					
Venezuela						X					
Europe, Middle East, Africa											
Czechoslovakia						X					
France						T					
Germany				X							
Hungary				X							
Ireland				X							
Israel				P?							
Netherlands				X							
Norway				X							
Poland						X					
Romania							X				
South Africa						X					
Spain				X			X	X			
United Kingdom	X										

(* Σημειώνεται ότι στον πίνακα αυτό ΔΕΝ έχουν ληφθεί υπόψη οι Συστάσεις CEPT για την Ευρώπη που αφορούν τις περιοχές συχνοτήτων 40.5-42.5GHz και 42.5-43.5GHz)

Πίνακας 2.1: Αποδιδόμενο ραδιοφάσμα στα συστήματα BWA - PMP

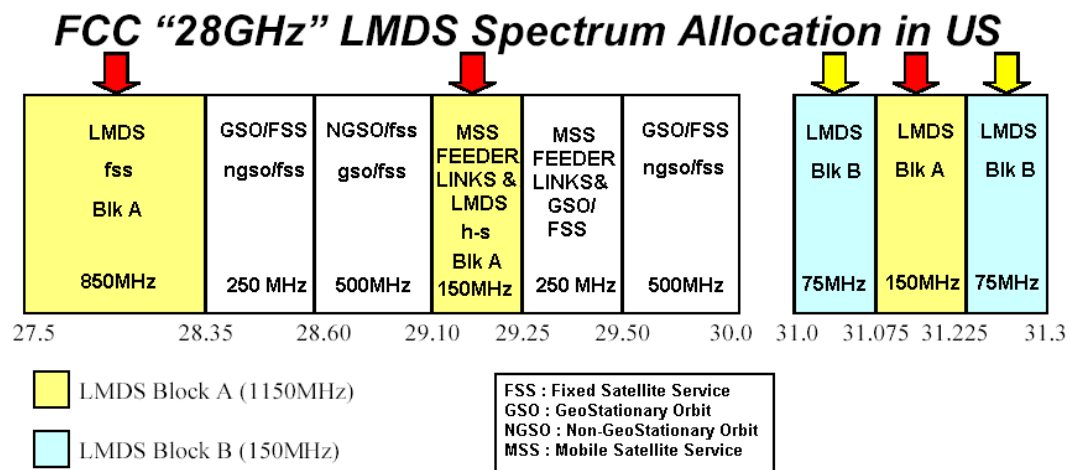
Στις Η.Π.Α., η αρμόδια αρχή για την έκδοση αδειών λειτουργίας συστημάτων LMDS είναι ο οργανισμός FCC (Federal Communications Commission). Στο σχήμα 2.5 φαίνεται αναλυτικά το φάσμα που έχει αποδοθεί στις Η.Π.Α. στην περιοχή των 28GHz, που αποτελεί και την περιοχή όπου οι περισσότερες άδειες έχουν εκδοθεί μέχρι στιγμής.

Όπως προκύπτει από αυτό, το αποδιδόμενο ραδιοφάσμα είναι διαθέσιμο σε δυο μπλοκ συχνοτήτων. Το πρώτο και μεγαλύτερο από τα δύο είναι το μπλοκ Α, το οποίο έχει συνολικό φάσμα 1150MHz στις ακόλουθες περιοχές:

- 27.500GHz – 28.350GHz
- 29.100GHz – 29.250GHz
- 31.075GHz – 31.225GHz

Το μπλοκ Β έχει φάσμα 150MHz και είναι δεσμευμένο ως εξής:

- 31.000GHz – 31.075GHz
- 31.075GHz – 31.225GHz



Σχήμα 2.5: Αποδιδόμενο ραδιοφάσμα στην περιοχή των 28GHz στις Η.Π.Α.

Στην Ελλάδα, η Ε.Ε.Τ.Τ. (Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων), η αρμόδια επιτροπή για την έκδοση αδειών λειτουργίας συστημάτων LMDS, έχει ήδη παραχωρήσει άδειες στην περιοχή των 25GHz και συγκεκριμένα στη ζώνη ραδιοσυχνοτήτων 24.5GHz – 26.5GHz για την οποία ισχύει η σύσταση CEPT/ERC/REC T/R 13-02E. Όσον αφορά τη διαυλοποίηση της παραπάνω ζώνης αυτή γίνεται συνήθως σε πολλαπλάσια των 28MHz [11].

2.4 Δομή συστήματος

Κάθε δίκτυο LMDS, που συναντάται στην πράξη, μπορεί να διαιρεθεί στα εξής τέσσερα μέρη [15]:

- Στα κέντρα λειτουργίας δικτύου (Network Operation Centers, NOC).
- Στο τμήμα διασύνδεσης.
- Στους σταθμούς βάσης (Base Stations, BS).
- Στον εξοπλισμό του πελάτη (Customer Premises Equipment, CPE).

Κάθε NOC περιλαμβάνει το σύστημα διαχείρισης του δικτύου (Network Management System, NMS) που διαχειρίζεται μεγάλα τμήματα του δικτύου των συνδρομητών και εκτελεί λειτουργίες παρακολούθησης (monitoring), ελέγχου (control) και αναφοράς προβλημάτων (reporting).

Είναι δυνατό να υπάρχουν περισσότερα από ένα NOC που συνδέονται μεταξύ τους μέσω του τμήματος διασύνδεσης, το οποίο αποτελεί το ενσύρματο τμήμα του συστήματος LMDS. Συνήθως βασίζεται στην υποδομή οπτικών ινών και περιλαμβάνει σύγχρονους οπτικούς συνδέσμους SONET OC-12, OC-13, DS-3, τους ATM και IP μεταγωγείς και τις απαραίτητες συνδέσεις με το Διαδίκτυο και το δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο μεταγωγής PSTN.

Οι BS κάθε συστήματος LMDS είναι το σημείο όπου σταματά το ενσύρματο δίκτυο οπτικών ινών και ξεκινά η ασύρματη μετάδοση. Κάθε BS αποτελείται από δύο τμήματα (βλ. σχήματα 2.6α και 2.6β). Το πρώτο αφορά τη ψηφιακή επεξεργασία των σημάτων (Digital Base Station, DBS) και περιέχει απαραίτητο εξοπλισμό για τη διεπαφή απόληξης του οπτικού δικτύου διασύνδεσης με το ασύρματο τμήμα, καθώς και συσκευές που εκτελούν λειτουργίες διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης. Επίσης, ενδέχεται να υποστηρίζει και υπηρεσίες τοπικής μεταγωγής. Στην περίπτωση αυτή, οι πελάτες που εξυπηρετούνται από τον ίδιο σταθμό βάσης μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους χωρίς να κάνουν χρήση του τμήματος οπτικής διασύνδεσης. Το δεύτερο τμήμα ενός BS (Radio Base Station, RBS) περιλαμβάνει τους απαραίτητους μικροκυματικούς πομποδέκτες και κεραίες σταθμών βάσης για την ασύρματη μετάδοση των σημάτων. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, τα συστήματα LMDS είναι κυψελωτά συστήματα στα οποία η κάθε κυψέλη ενδέχεται να χωρίζεται σε έναν αριθμό τομέων για την αποδοτικότερη χρήση του

διατιθέμενου ραδιοφάσματος. Έτσι, σε κάθε κυψέλη που χωρίζεται σε N επιμέρους τομείς, υπάρχει σταθμός βάσης με αντίστοιχο αριθμό N κεραιών, καθεμία από τις οποίες έχει αντίστοιχο εύρος ημίσειας ισχύος Δ_{3dB} ίσο με $360^\circ/N$ (τυπικές τιμές του Δ_{3dB} είναι 90° , 45° , 30° , 22.5° και 15° για αντίστοιχες τιμές του $N = 4, 8, 12, 16$ και 24).

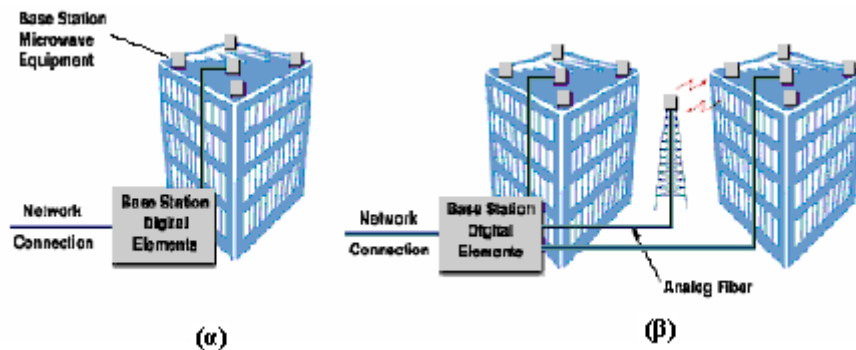


(α) Digital Base Station (DBS)



(β) Radio Base Station (RBS)

Σχήμα 2.6: Σταθμός βάσης συστημάτων LMDS [ALCATEL A7390]



(α)

(β)

Σχήμα 2.7: Αρχιτεκτονικές σταθμών βάσης συστημάτων LMDS

Τέλος, όσον αφορά τους σταθμούς βάσης συστημάτων LMDS, στις περισσότερες περιπτώσεις το ψηφιακό (DBS) και το RF (RBS) τμήμα κάθε BS είναι τοποθετημένα στο ίδιο κτίριο, με το μεν DBS να βρίσκεται τοποθετημένο στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου το δε RBS στην ταράτσα, ώστε να εξασφαλίζεται η οπτική επαφή με τις κεραιές των τερματικών χρήστη (βλ. σχήμα 2.7α). Υπάρχει όμως και η περίπτωση να χρησιμοποιούνται περισσότερα από ένα RF τμήματα, τοποθετημένα σε διαφορετικά κτίρια και συνδεδεμένα με το DBS μέσω οπτικών ινών. Αυτή η αρχιτεκτονική προσφέρει

ενοποιημένες ψηφιακές υπηρεσίες για ευρύτερη περιοχή και μειωμένο κόστος λειτουργίας, δεν είναι όμως ακόμα ευρέως χρησιμοποιούμενη (βλ. σχήμα 2.7β) [12].

Οι διατάξεις CPE εγκαθίστανται στην πλευρά του τερματικού χρήστη (Terminal Station, TS) με σκοπό να εξασφαλίζεται η πρόσβαση του στο βασικό δίκτυο κορμού. Αν και οι διάφοροι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι συστημάτων LMDS υποστηρίζουν διαφορετικό εξοπλισμό πελάτη ο καθένας, όλες σχεδόν οι διατάξεις CPE που κυκλοφορούν αυτή τη στιγμή στο εμπόριο, σε αντιστοιχία με τους σταθμούς βάσης, αποτελούνται από το εξωτερικό και το εσωτερικό τους τμήμα. Στο εξωτερικό τμήμα (βλ. σχήμα 2.8α), περιλαμβάνεται ο απαιτούμενος RF εξοπλισμός που αποτελείται από την κατευθυντική κεραία υψηλού κέρδους τοποθετημένη σε κάποιο υψηλό σημείο του κτιρίου του χρήστη (π.χ. ταράτσα), καθώς και διάφορους κυματοδηγούς και καλώδια. Στο εσωτερικό τμήμα (βλ. σχήμα 2.8β), περιλαμβάνεται η συσκευή modem (ή Set-Top-Box, STB) που εκτελεί λειτουργίες διαμόρφωσης, αποδιαμόρφωσης, ελέγχου και τερματισμού και τοποθετείται στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου του χρήστη κοντά στη συσκευή τερματικού με την οποία είναι συνδεδεμένη. Προκειμένου να συνδεθεί ο χρήστης στο δίκτυο πρόσβασης, πρέπει ο εξοπλισμός CPE να υποστηρίζει τεχνικές πρόσβασης TDMA, FDMA και CDMA, οι οποίες θα αναλυθούν λεπτομερέστερα παρακάτω. Επίσης, για λόγους συμβατότητας υπηρεσιών μεταξύ διαφορετικών χρηστών συστημάτων LMDS, αναφέρεται ότι κάθε CPE οφείλει συνήθως να υποστηρίζει όλη τη γκάμα συνδέσεων από DS0, POTS, 10BaseT, Unstructured DS1, structured DS1, Frame Relay, ATM25 serial, ATM over T1, DS-3, OC-3 και OC-1 [15].



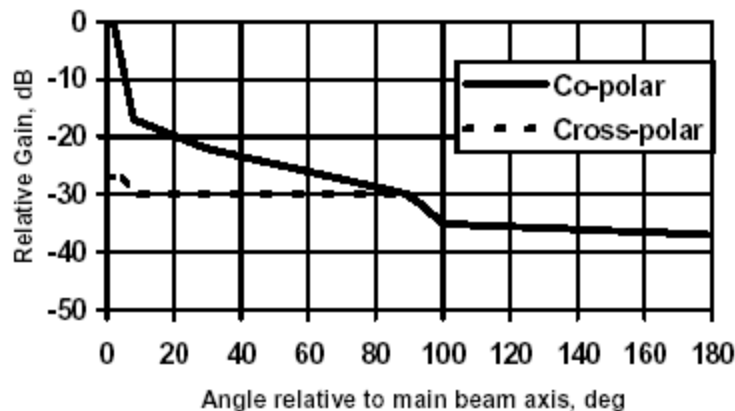
(α) Κατευθυντική κεραία TS



(β) Modem

Σχήμα 2.8: Εξοπλισμός πελάτη CPE συστημάτων LMDS [ALCATEL A7390]

Τέλος, όσον αφορά τον εξοπλισμό πελάτη CPE συστημάτων LMDS, στο σχήμα 2.9 παρατίθεται το κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας κεραιών τερματικών χρήστη συστημάτων LMDS που λειτουργούν στην περιοχή συχνοτήτων 24GHz έως 30GHz, βάσει του προτύπου ETSI EN 301 215-2 [16].



(α)

Angle (degree)	Co-polar (dB)	Angle (degree)	Cross-polar (dB)
0	0	0	-27
2	0	5	-27
8	-17	10	-30
30	-22	90	-30
90	-30	100	-35
100	-35	180	-37
180	-37		

(β)

Σχήμα 2.9: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραιών τερματικών χρήστη συστημάτων LMDS

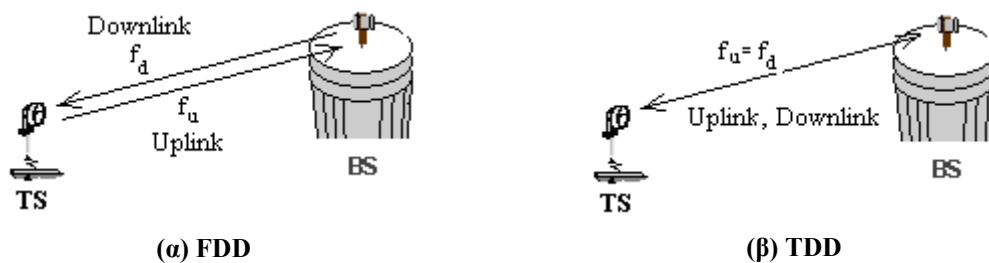
Από το παραπάνω σχήμα είναι φανερή η υψηλή κατευθυντικότητα της κεραίας δέκτη του σταθμού TS συστήματος LMDS, ενώ η συνάρτηση του (κανονικοποιημένου) κατευθυντικού κέρδους στην περίπτωση απλής πόλωσης (Co-polar) αυτής δίνεται από τη σχέση

$$G_R(\theta) = \begin{cases} 0 & , \quad 0^\circ \leq \theta \leq 2^\circ \\ -12.263 \cdot \ln(\theta) + 8.5 & , \quad 2^\circ \leq \theta \leq 8^\circ \\ -3.7828 \cdot \ln(\theta) - 9.1338 & , \quad 8^\circ \leq \theta \leq 30^\circ \\ -7.2819 \cdot \ln(\theta) + 2.7672 & , \quad 30^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \\ -47.456 \cdot \ln(\theta) + 183.54 & , \quad 90^\circ \leq \theta \leq 100^\circ \\ -3.4026 \cdot \ln(\theta) - 19.33 & , \quad 100^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \end{cases} \quad (2.1)$$

2.5 Τεχνικές αμφιδρόμησης

Στα συστήματα LMDS είναι επιθυμητό να παρέχονται αμφίδρομες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες στους συνδρομητές, δηλαδή ο χρήστης να στέλνει και να λαμβάνει πληροφορίες ταυτόχρονα, φαινόμενο το οποίο καλείται αμφιδρόμηση (duplexing). Οι δύο χρησιμοποιούμενες τεχνικές αμφιδρόμησης είναι η FDD και η TDD [17].

- Στην FDD (Frequency Division Duplexing) (βλ. σχήμα 2.10α) τα δεδομένα που αποστέλλονται από το σταθμό βάσης προς τους χρήστες (downlink) μεταδίδονται σε διαφορετική συχνότητα από αυτήν που αποστέλλονται τα δεδομένα από τους χρήστες στους σταθμούς βάσης (uplink). Τα δύο κανάλια έχουν μεταξύ τους μια ζώνη συχνοτήτων διαχωρισμού για την αποφυγή παρεμβολών. Σε κάθε BS και TS πρέπει να χρησιμοποιείται μια διάταξη, που ονομάζεται αμφιδρομητής (duplexer) και επιτρέπει την ταυτόχρονη εκπομπή και λήψη στο ζεύγος διαύλων που διατίθενται.
- Στην TDD (Time Division Duplexing) (βλ. σχήμα 2.10β) τα δεδομένα από και προς το σταθμό βάσης μεταδίδονται στην ίδια συχνότητα αλλά σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Αν η χρονική απόσταση μεταξύ των δύο χρονοσχημάτων (time slots) είναι επαρκώς μικρή, τότε η πληροφορία εκπομπής και λήψης εμφανίζεται ως ταυτόχρονη στο χρήστη. Στην TDD δεν απαιτείται η χρήση αμφιδρομητή ούτε στον BS ούτε στον TS.



Σχήμα 2.10: Τεχνικές αμφιδρόμησης

Μέχρι πρόσφατα οπότε το ραδιοφάσμα ήταν διαθέσιμο σε μεγαλύτερο ποσοστό, το μεγαλύτερο μέρος της μεταφερόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης ήταν η μετάδοση

τηλεοπτικών σημάτων και οι διάφορες υλοποιήσεις των συστημάτων LMDS βασίζονταν για λόγους συμβατότητας στις ήδη υπάρχουσες προδιαγραφές συστημάτων (όπως π.χ. στην οικογένεια προδιαγραφών του προτύπου DVB). Έτσι, τα περισσότερα συστήματα LMDS χρησιμοποιούσαν την τεχνική αμφιδρόμησης FDD. Ωστόσο, δεδομένου ότι σήμερα το ραδιοφάσμα είναι πολύτιμο και ότι η χρήση του Διαδικτύου (όπου περίπου το 75% της μεταφερόμενης κίνησης αφιερώνεται στο downstream) μαζί με τις αλληλοδραστικές υπηρεσίες ψηφιακής τηλεόρασης (όπου υπάρχει μη-συμμετρική μετάδοση δεδομένων) τείνουν να κυριαρχήσουν στις σύγχρονες μορφές υπηρεσιών, η τεχνική αμφιδρόμησης TDD αναμένεται να απασχολήσει περισσότερο τους αρμόδιους σχεδιαστές συστημάτων LMDS στο άμεσο μέλλον [13]. Αυτό γιατί η TDD διαχειρίζεται πιο αποδοτικά το διατιθέμενο ραδιοφάσμα καθώς χρησιμοποιεί την ίδια φέρουσα συχνότητα και για τις δύο ζεύξεις ανόδου και καθόδου και, επιπλέον, είναι πιο ευέλικτη όταν η μετάδοση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης προς και από το χρήστη είναι μη-συμμετρική.

Συνοψίζοντας τα δυο είδη τεχνικών αμφιδρόμησης, προκύπτει ο πίνακας 2.2 στον οποίο απεικονίζονται ορισμένες προδιαγραφές σχεδίασης ενός συστήματος LMDS με την αντίστοιχη τεχνική που την ικανοποιεί.

Προδιαγραφές Συστήματος LMDS	FDD	TDD
Broadcasting	√	
Bursty Data Services		√
$R_{\text{uplink}}/R_{\text{downlink}}=\text{σταθερός}$	√	
$R_{\text{uplink}}/R_{\text{downlink}}=\text{μεταβλητός}$		√
Χαμηλό κόστος εξοπλισμού	√	
Καλύτερη φασματική απόδοση		√
Ευέλικτη λειτουργία για απρόβλεπτη τηλεπικοινωνιακή κίνηση		√

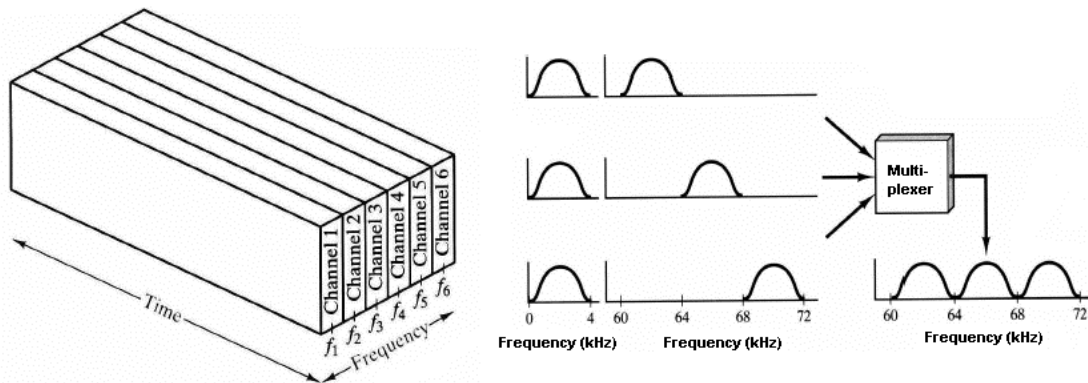
Πίνακας 2.2: Προδιαγραφές συστήματος LMDS και τεχνικές αμφιδρόμησης

2.6 Τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης στον ασύρματο διάυλο

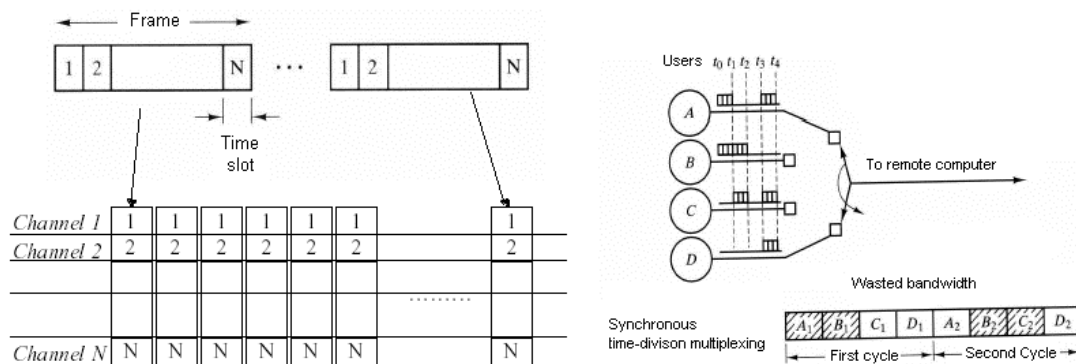
Οι μέθοδοι πρόσβασης αφορούν τον τρόπο διαχείρισης του διαύλου επικοινωνίας έτσι ώστε από το ίδιο κανάλι να μεταφέρονται ταυτόχρονα πληροφορίες για πολλούς χρήστες. Όπως είναι αναμενόμενο, στα συστήματα LMDS χρησιμοποιούνται διαφορετικές μέθοδοι για τις ζεύξεις καθόδου και ανόδου, αφού στην πρώτη περίπτωση

υπάρχει μετάδοση σημείου προς πολλαπλά σημεία (PMP) ενώ στη δεύτερη πολλές ταυτόχρονες μεταδόσεις σημείου προς σημείο (PTP).

Στη ζεύξη καθόδου του συστήματος, οι δύο υπάρχουσες μεθοδολογίες είναι η Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας FDM (Frequency Division Multiplexing) και η Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου TDM (Time Division Multiplexing), από τις οποίες η δεύτερη είναι επικρατέστερη [15]. Στην FDM, το φάσμα συχνοτήτων χωρίζεται σε διαύλους προκαθορισμένου εύρους και ο κάθε χρήστης έχει την αποκλειστική χρήση ενός από αυτούς (βλ. σχήμα 2.11). Στην TDM, ο χρόνος είναι διαιρεμένος σε τμήματα ίσης διάρκειας (χρονοσχισμές – time slots) και σε κάθε χρήστη παραχωρείται όλο το εύρος ζώνης για συγκεκριμένες, όμως, χρονικές σχισμές (βλ. σχήμα 2.12).



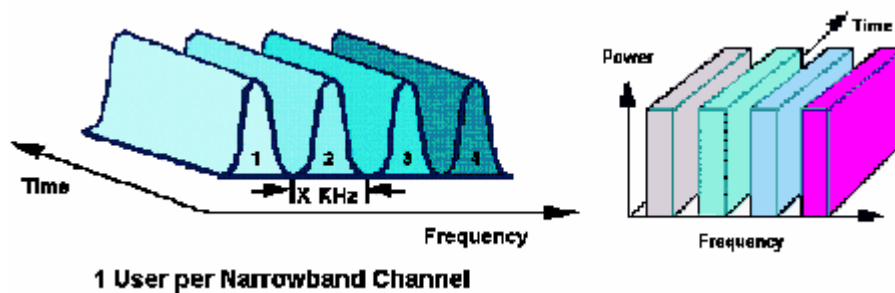
Σχήμα 2.11: FDM



Σχήμα 2.12: TDM

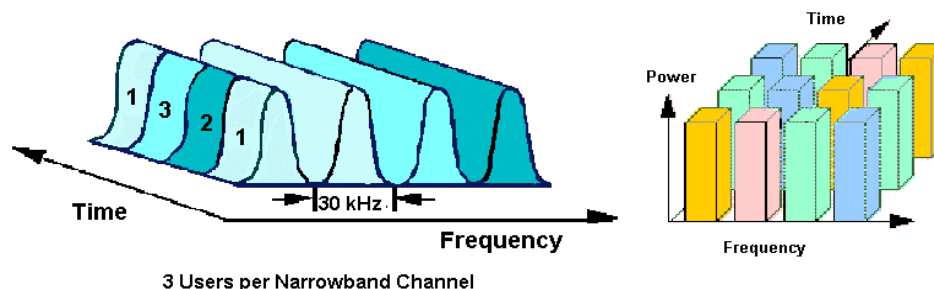
Στη ζεύξη ανόδου του συστήματος, υπάρχουν τρεις βασικές τεχνικές πρόσβασης, η Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Συχνότητας FDMA (Frequency Division Multiple Access), η Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Χρόνου TDMA (Time Division Multiple Access) και η Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Κώδικα CDMA (Code Division Multiple Access), από τις οποίες χρησιμοποιούνται περισσότερο αυτή τη στιγμή οι δύο πρώτες [12].

Στην FDMA (βλ. σχήμα 2.13) παραχωρούνται στους χρήστες, που επιθυμούν να εκπέμψουν, τμήματα του συνολικού εύρους ζώνης. Κάθε τέτοια ζώνη συχνοτήτων μπορεί να καταληφθεί από ένα μόνο χρήστη κάθε φορά, με αποτέλεσμα ο αριθμός των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν να είναι περιορισμένος.



Σχήμα 2.13: FDMA

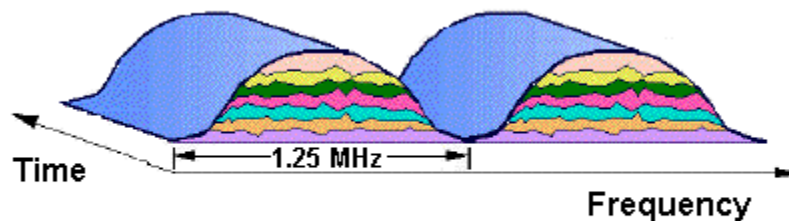
Στην TDMA (βλ. σχήμα 2.14) το φάσμα πάλι χωρίζεται σε ζώνες, καθεμία όμως από αυτές διατίθεται σε κάποιο χρήστη για συγκεκριμένες χρονοσχιμές. Έτσι γίνεται πιο αποδοτική χρήση του διατιθέμενου ραδιοφάσματος.



Σχήμα 2.14: TMDA

Η επιλογή της μεθόδου πρόσβασης εξαρτάται από τις απαιτήσεις του χρήστη και το σχεδιασμό του συστήματος. Για κάποιον πελάτη που θέλει διαθέσιμο φάσμα για όλη τη διάρκεια της ημέρας, η FDMA είναι πιο κατάλληλη μέθοδος, ενώ στην περίπτωση πελατών με μικρό όγκο δεδομένων στη ζεύξη ανόδου, η TDMA, που αξιοποιεί πιο αποδοτικά το διατιθέμενο φάσμα, είναι πιο κατάλληλη.

Μία άλλη μέθοδος πρόσβασης στον ασύρματο διάλο ανόδου είναι η CDMA (βλ. σχήμα 2.15) κατά την οποία σε κάθε χρήστη ανατίθεται μία ψηφιακή ακολουθία με συγκεκριμένες ιδιότητες, η οποία συνδυάζεται με το εκπεμπόμενο σήμα. Κάθε ακολουθία μπορεί να διαχωρισθεί τόσο από χρονικές της παραλλαγές όσο και από τις ακολουθίες των άλλων χρηστών. Αυτό επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να εκπέμπουν ταυτόχρονα στην ίδια περιοχή συχνοτήτων και επιπλέον κάθε χρήστης να καταλαμβάνει συνεχώς όλο το διατιθέμενο εύρος ζώνης του συστήματος. Το μειονέκτημα του CDMA έναντι των άλλων δύο τεχνικών πρόσβασης είναι ότι απαιτείται αρκετά πιο ακριβός εξοπλισμός για τη λειτουργία του δέκτη ώστε να είναι ικανός να διαχωρίζει διευθύνσεις. Μέχρι τώρα στα συστήματα LMDS έχει επικρατήσει η χρήση των TDMA και FDMA.



N Users per Narrowband Channel

Σχήμα 2.15: CDMA

Τέλος, με την πρόσφατη εμφάνιση της τεχνολογίας των Ευφυών Κεραιών (Smart Antennas), μελετάται η ενδεχόμενη χρήση τους στα συστήματα BWA τόσο στην πλευρά των BS όσο και στην πλευρά των TS. Με την εγκατάσταση ευφυών κεραιών σε κάθε BS συστήματος LMDS είναι δυνατή η υλοποίηση μιας εναλλακτικής τεχνικής πρόσβασης γνωστής ως Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Χώρου SDMA (Space Division Multiple Access) [15]. Στην SDMA, οι σταθμοί BS, χρησιμοποιώντας κεραιές σημειακής δέσμης

που φιλτράρουν χωρικά κάθε επιθυμητό τερματικό TS και εφαρμόζοντας τεχνικές ελέγχου ισχύος, έχουν τη δυνατότητα να ανιχνεύουν και να ελέγχουν την ακτινοβολούμενη ισχύ από κάθε χρήστη του συστήματος και να προσαρμόζουν ανάλογα το διάγραμμα ακτινοβολίας των κεραιών τους στο χώρο. Με τον τρόπο αυτό, βελτιώνονται κατά κύριο λόγο η φασματική απόδοση και η χωρητικότητα του συστήματος. Οι διάφορες περιοχές που καλύπτονται από τις σημειακές δέσμες της κεραιάς μπορεί να εξυπηρετούνται από την ίδια συχνότητα (στα συστήματα TDMA και CDMA) ή από διαφορετικές συχνότητες (στα συστήματα FDMA). Ωστόσο, η τεχνική πρόσβασης SDMA βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο ερευνητικό στάδιο και αυτό διότι δεν είναι δυνατόν ακόμα να κατασκευασθεί κεραία ικανή να φιλτράρει χωρικά κάθε τερματικό χρήστη του συστήματος σε κάθε κυψέλη [17]. Εάν χρησιμοποιηθούν προσαρμοστικές κεραιές στους BS, πιθανόν να μετριασθούν μερικά από τα προβλήματα της ζεύξης ανόδου (π.χ. παρεμβολές). Εξάλλου, με τη χρήση ευφυών κεραιών από την πλευρά του TS, είναι δυνατή η τεχνική της διαφορικής λήψης κελιού, η οποία αποτελεί το κύριο αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας και θα αναλυθεί λεπτομερώς σε επόμενα κεφάλαια.

2.7 Ψηφιακή διαμόρφωση

Τα συστήματα LMDS σε πολύ μεγάλο ποσοστό διαχειρίζονται ψηφιακής μορφής σήματα, δηλαδή σήματα που απαρτίζονται από ακολουθίες δυαδικών ψηφίων (bits). Ενώ στις αναλογικές επικοινωνίες στόχος του τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι η πιστή αναπαραγωγή του αναλογικού σήματος, στις ψηφιακές επικοινωνίες στόχος είναι η ορθή απόφαση για τα δυαδικά ψηφία πληροφορίας από τα οποία αποτελείται το σήμα πληροφορίας. Τα σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι ψηφιακές επικοινωνίες είναι [18]:

- Υψηλή αξιοπιστία, ευστάθεια και προσαρμοστικότητα στη διαρκή εξέλιξη της τεχνολογίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (Integrated Circuits, ICs).
- Αποθήκευση και επαναχρησιμοποίηση των ψηφιακών σημάτων με αξιοπιστία και ταχύτητα ώστε να αίρονται οι δυσαρμονίες μεταξύ διαφορετικών συστημάτων.
- Ελάττωση της δυσμενούς επίδρασης του θορύβου με χρήση επαναληπτών.

- Ευελιξία στην ικανοποίηση των προδιαγραφών μιας ζεύξης με ανταλλαγή εύρους ζώνης συχνοτήτων και ισχύος σήματος.
- Ευκολία πολύπλεξης και σηματοδοσίας.
- Κωδικοποίηση για διόρθωση λαθών και κρυπτογράφηση για την ασφάλεια των επικοινωνιών.
- Αρθρωτή (modular) υλοποίηση που προσφέρει τη δυνατότητα αναβάθμισης και την ευκολία ενσωμάτωσης νέων υπηρεσιών.

Σε κάθε ψηφιακή μέθοδο διαμόρφωσης αντιστοιχεί ένα μοναδικό διάγραμμα σηματοδοτικού αστερισμού (signal constellation) στο οποίο ορίζονται μονοσήμαντα τα M το πλήθος διαφορετικά σύμβολα με τα οποία μπορεί να αποσταλεί το διαμορφωμένο σήμα. Οι ψηφιακές μέθοδοι διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στα συστήματα LMDS χωρίζονται γενικά στις μεθόδους διαμόρφωσης ολίσθησης φάσης PSK (Phase Shift Keying) και σε αυτές της διαμόρφωσης πλάτους AM (Amplitude Modulation) [12]. Στη διαμόρφωση PSK η πληροφορία κωδικοποιείται στη φάση και κατά συνέπεια απαιτούνται σύμφωνα συστήματα διαμόρφωσης. Οι σηματοδοτικοί αστερισμοί αποτελούνται από σημεία τοποθετημένα σε κύκλο και σε γωνίες που εξαρτώνται από τη μέθοδο που ακολουθείται. Η διαμόρφωση QAM αποτελεί γενίκευση της PSK κατά την έννοια ότι ο σηματοδοτικός της αστερισμός είναι δισδιάστατος (πλάτος - φάση) και μπορεί να υλοποιηθεί με διαμόρφωση κατά πλάτος και υπέρθεση δύο ανεξαρτήτων, ορθογωνίων φερόντων σημάτων. Μπορεί να θεωρηθεί και ως συνδυασμός διαμόρφωσης εύρους και φάσης.

Σε κάθε ψηφιακό τηλεπικοινωνιακό σύστημα όπως το LMDS, για την εκτίμηση της χωρητικότητας του συστήματος ορίζεται η φασματική απόδοση (spectral efficiency) n (σε bit/sec/Hz) ως ο λόγος του ρυθμού μετάδοσης R (σε bit/sec) προς το καταλαμβανόμενο εύρος ζώνης W (σε Hz) του σήματος. Για ένα από τα M διαφορετικά σύμβολα του σηματοδοτικού αστερισμού της χρησιμοποιούμενης τεχνικής διαμόρφωσης που είναι δυνατό να αποσταλεί ανά χρονικό διάστημα T (sec) ισχύει [19]

$$n = \frac{R}{W} = \frac{\log_2 M}{W \cdot T} \quad (2.2)$$

Στον πίνακα 2.3 απεικονίζονται οι σηματοδοτικοί αστερισμοί ορισμένων ψηφιακών μεθόδων διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στα συστήματα LMDS και δίνεται η φασματική

απόδοση n (σε bit/sec/Hz) που αντιστοιχεί σε κάθε μέθοδο για την ειδική περίπτωση όπου $WT=1$.

BPSK		$M=2^1=2$ $n=\log_2 2=1$
QPSK		$M=2^2=4$ $n=\log_2 4=2$
8-PSK		$M=2^3=8$ $n=\log_2 8=3$
16-QAM		$M=2^4=16$ $n=\log_2 16=4$
64-QAM		$M=2^6=64$ $n=\log_2 64=6$

Πίνακας 2.3: Σηματικοί αστερισμοί και φασματική απόδοση ψηφιακών μεθόδων διαμόρφωσης

Από τον πίνακα 2.3 προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα της χρησιμοποιούμενης τεχνικής ψηφιακής διαμόρφωσης (π.χ. από 16-QAM σε 64-QAM) ή,

αντίστοιχα, όσο αυξάνεται ο αριθμός M των σημείων του σηματοδότησμού της, τόσο αυξάνεται η φασματική απόδοση n του συστήματος και κατεπέκταση η χωρητικότητα του διαύλου και ο ρυθμός μετάδοσης. Ωστόσο, η αύξηση της φασματικής απόδοσης που συνεπάγεται η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης επιφέρει αναπόφευκτη μείωση της ακτίνας κάλυψης του συστήματος LMDS, για δεδομένη ισχύ εκπομπής. Το συμπέρασμα αυτό γίνεται κατανοητό εάν ληφθούν υπόψη τα εξής:

Με βάση το Θεώρημα του Shannon ισχύει

$$n = \frac{R}{W} \leq \log_2(1 + SNR) \Rightarrow$$

$$n = \frac{R}{W} \leq \log_2\left(1 + \frac{C}{N}\right) \Rightarrow$$

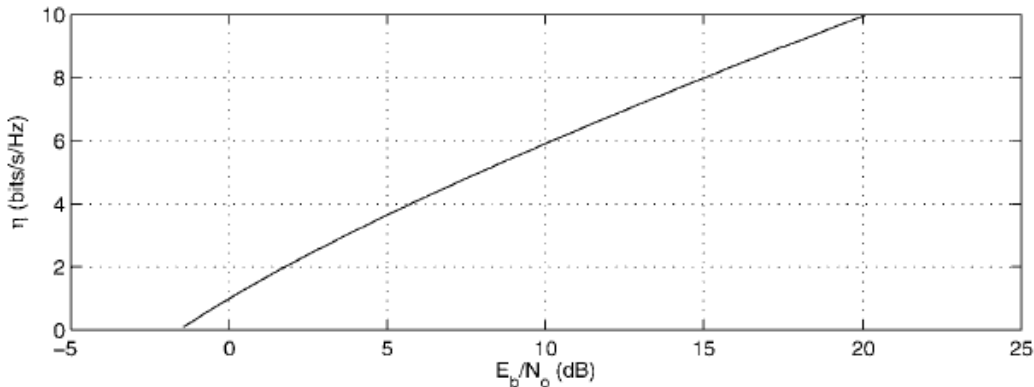
$$n = \frac{R}{W} \leq \log_2\left(1 + \frac{E_b \cdot R}{N_0 \cdot W}\right) \Rightarrow$$

$$\frac{E_b}{n_0} \geq \frac{2^n - 1}{n} \quad (2.3)$$

όπου

(E_b / N_0) είναι ο λόγος της ενέργειας ψηφίου E_b προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου N_0 και $SNR = \frac{C}{N}$ ο σηματοθορυβικός λόγος στο δέκτη του συστήματος.

Με βάση τη σχέση (2.3), προκύπτει το διάγραμμα που απεικονίζεται στο σχήμα 2.16 και δείχνει την εξάρτηση της ιδανικής φασματικής απόδοσης n του διαύλου από το λόγο (E_b / N_0) .



Σχήμα 2.16: Χειρότερη περίπτωση λόγου (E_b / N_0) για δεδομένη φασματική απόδοση n

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η χωρητικότητα του συστήματος είναι ανάλογη του λόγου (E_b / N_o) . Ωστόσο, η λαμβανόμενη ισχύς C φέροντος σήματος του συστήματος είναι, επίσης, ανάλογη με το λόγο αυτό και, για δεδομένη ισχύ εκπομπής, αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης d μεταξύ πομπού και δέκτη του συστήματος. Έτσι, αποδεικνύεται ότι η χωρητικότητα ενός συστήματος LMDS είναι αντιστρόφως ανάλογη της ακτίνας κάλυψης του συστήματος.

Συνεπώς, όταν χρησιμοποιείται μέθοδος διαμόρφωσης αυξημένης πολυπλοκότητας, υπάρχει ανταλλαγή (tradeoff) ανάμεσα στο ρυθμό μετάδοσης R (bps) και στην ακτίνα κάλυψης d (km) της κυψέλης. Για δεδομένη ισχύ εκπομπής, αυξανόμενης της φασματικής απόδοσης και κατεπέκταση του ρυθμού μετάδοσης του συστήματος, πρέπει να μειώνεται ανάλογα η απόσταση του τερματικού TS από το σταθμό BS του συστήματος LMDS έτσι ώστε να διατηρείται η QoS του συστήματος σταθερή.

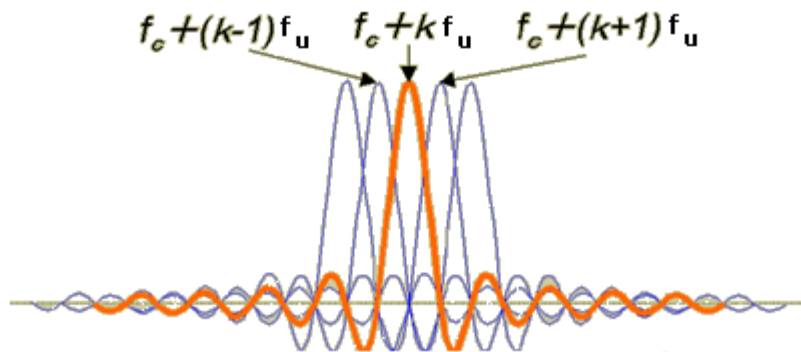
Η τελική επιλογή της μεθόδου διαμόρφωσης γίνεται με κριτήριο την εξισορρόπηση ανάμεσα σε απαιτήσεις για χωρητικότητα και προδιαγραφές για ακτίνα κάλυψης των σταθμών. Είναι δυνατό να χρησιμοποιούνται διαφορετικές μέθοδοι διαμόρφωσης ανάλογα με το χρήστη. Έτσι για χρήστες που βρίσκονται κοντά στο σταθμό βάσης, μέθοδοι διαμόρφωσης αυξημένης σχετικά πολυπλοκότητας όπως οι 64-QAM ($M=64$) και η 16-QAM ($M=16$) είναι πολύ αποδοτικές ενώ για μεγαλύτερες αποστάσεις είναι πιο κατάλληλη η QPSK ($M=4$), η οποία χαρακτηρίζεται από μειωμένη πολυπλοκότητα.



Σχήμα 2.17: Δυναμική προσαρμογή διαμόρφωσης ανάλογα με την απόσταση κάλυψης

Με βάση τη δυνατότητα αυτή ανταλλαγής εύρους ζώνης με ακτίνα κάλυψης, ορισμένοι κατασκευαστές συστημάτων LMDS, παρέχουν τρεις διαφορετικές μεθόδους διαμόρφωσης εντός της ίδιας κυψέλης του συστήματος με την ακτίνα κάλυψης καθεμίας αντιστρόφως ανάλογη του μεταφερόμενου φορτίου κίνησης μέσω της τεχνικής αυτής (Δυναμική Προσαρμογή Διαμόρφωσης). Όπως δείχνεται και στο σχήμα 2.17, η διαμόρφωση QPSK έχει τη μεγαλύτερη εμβέλεια κάλυψης και παράλληλα το μικρότερο ρυθμό μετάδοσης R, ενώ η 64-QAM τη μικρότερη εμβέλεια κάλυψης και το μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης R.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί η προσπάθεια ορισμένων σχεδιαστών ανάπτυξης ευρυζωνικών δικτύων LMDS, οι οποίοι, προκειμένου να επιτύχουν αποδοτικότερη χρήση του διατιθέμενου ραδιοφάσματος, καταφεύγουν σε υψηλότερου επιπέδου μεθόδους κωδικοποίησης και διαμόρφωσης, όπως η τεχνική Ορθογωνικής Πολυπλεξίας Διαίρεσης Συχνότητας OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [15]. Η OFDM πρόκειται για μία ειδική περίπτωση Διαμόρφωσης Πολλαπλών Φερόντων (Multi-Carrier Modulation, MCM) η κεντρική ιδέα της οποίας είναι ο διαχωρισμός της πληροφορίας σε ένα αριθμό παραλλήλων ροών, καθεμιά από τις οποίες χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει ένα ξεχωριστό φέρον (βλ. σχήμα 2.18). Η αποτελεσματικότητα της OFDM έγκειται στο ότι καταφέρνει, μέσω της ιδιότητας της ορθογωνιότητας και της χρήσης του ταχέως Μ/Σ Fourier (FFT/IFFT) στους πομποδέκτες του συστήματος, να υπερνικήσει ένα αριθμό σημαντικών προβλημάτων που ανακύπτουν αυτόματα όταν χρησιμοποιείται ένα μεγάλο πλήθος φερόντων για τη μετάδοση πληροφορίας.

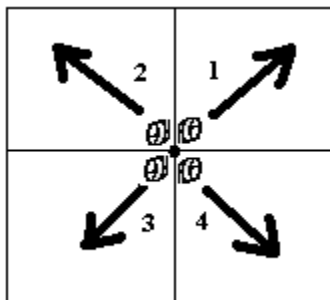


Σχήμα 2.18: Φάσμα OFDM σήματος

2.8 Αναχρησιμοποίηση συχνότητας

Η κυψελωτή δομή των συστημάτων LMDS επιτρέπει την εφαρμογή μεθόδων αναχρησιμοποίησης συχνότητας (frequency reuse). Έτσι, για την κάλυψη των ιδιαίτερα αυξημένων απαιτήσεων χωρητικότητας και τη μετάδοση όσο το δυνατό περισσότερων Mbps/km² σε μια δεδομένη γεωγραφική περιοχή, το διατιθέμενο φάσμα συχνοτήτων επαναχρησιμοποιείται, γεγονός που επιφέρει σημαντικά οφέλη στους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους. Πιο συγκεκριμένα, κάθε κυψέλη διαιρείται περαιτέρω σε τομείς (sectors). Επίσης, το διαθέσιμο εύρος ζώνης συχνοτήτων διαχωρίζεται σε υποζώνες (sub-bands). Με τον τρόπο αυτό δύο γειτονικοί τομείς θα λειτουργούν σε διαφορετικές υποζώνες συχνοτήτων χωρίς να παρεμβάλλει ο ένας στον άλλον.

Το πιο διαδεδομένο σχήμα τμηματοποίησης κυψελών στα σύγχρονα συστήματα LMDS που λειτουργούν αυτή τη στιγμή είναι αυτό των 4 τομέων, που δείχνεται στο σχήμα 2.19 [13]. Με βάση αυτό το σχήμα τμηματοποίησης, μπορεί σε κάθε BS του συστήματος να χρησιμοποιηθούν αντίστοιχα 4 κεραίες σταθμών βάσης, όπως αυτές που δείχτηκαν στην παράγραφο §2.4, με εύρος ζώνης ημίσειας ισχύος 90° η καθεμία.



Σχήμα 2.19: Τμηματοποίηση κυψελών 4 τομέων

Η αναχρησιμοποίηση μιας υποζώνης συχνοτήτων στην ίδια (ή σε γειτονική) κυψέλη έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση φαινομένων παρεμβολής, εφόσον οι πλευρικοί λοβοί ακτινοβολίας των κεραιών BS δε γίνεται πρακτικά να μηδενισθούν. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου το επιθυμητό σήμα υφίσταται σημαντικές διαλείψεις λόγω πρόσθετων φαινομένων (όπως βροχή), παράλληλα με την τμηματοποίηση κυψελών και τη χρήση κατευθυντικών κεραιών στους BS, γίνεται εναλλαγή της πόλωσης (Dual Polarization: V-Vertical, Κατακόρυφη και H-

Horizontal, Οριζόντια). Επίσης, σημειώνεται ότι στην περίπτωση σχήματος εναλλαγής πόλωσης πρέπει τόσο στους BS όσο και στα TS του συστήματος LMDS να χρησιμοποιείται κατάλληλη υποδομή RF εξοπλισμού που θα υποστηρίζει και τα δύο είδη πόλωσης.

Τέλος, αναφέρεται ότι για να ποσοτικοποιηθεί η έννοια της αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων, χρησιμοποιείται συχνά η έννοια του παράγοντα αναχρησιμοποίησης συχνότητας FR (Frequency Reuse factor), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού των τομέων μιας κυψέλης προς τον αριθμό των διαφορετικών υποζωνών που χρησιμοποιούνται σε αυτή.

2.9 Πρωτόκολλα μεταφοράς

Στα συστήματα LMDS τρία είναι τα κύρια πρωτόκολλα μεταφοράς που είναι υπό μελέτη για την υποστήριξη τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών πολυμέσων: το IP, το ATM και το DVB [20]. Για καθένα από αυτά, επισημαίνονται τα εξής:

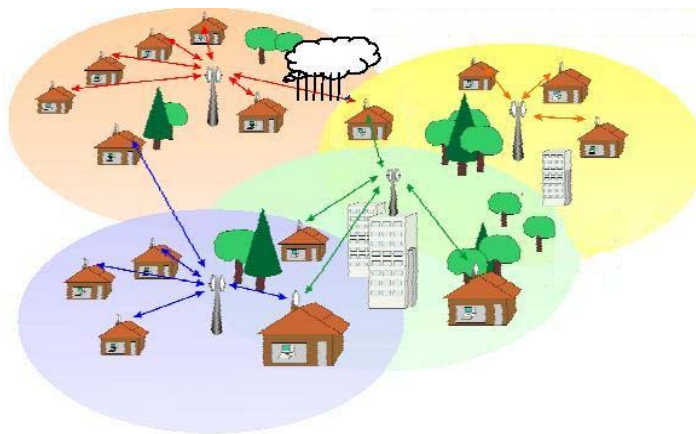
- **IP:** Το Πρωτόκολλο Διαδικτύου IP (Internet Protocol) είναι ένα πρωτόκολλο του στρώματος δικτύου που έχει στόχο να κάνει το τηλεπικοινωνιακό φορτίο κίνησης ικανό να μεταδίδεται εξίσου χωρίς προβλήματα πάνω από διαφορετικούς τύπους μηχανισμών μετάδοσης (όπως Ethernet, ATM, Frame Relay, κτλ). Υποστηρίζεται στις συσκευές τερματικών και στους διάφορους δρομολογητές (routers) του δικτύου που λειτουργούν ως μεταγωγείς για τη δρομολόγηση δεδομενογραφημάτων προς τον τελικό τους προορισμό, χρησιμοποιώντας ένα πεδίο διεύθυνσης που περιέχεται στο αντίστοιχο δεδομενογράφημα. Το IP παρέχει ένα παγκόσμιο σύστημα διευθυνσιοδότησης. Πρόκειται για πρωτόκολλο “best-effort” υπό την έννοια ότι κάθε κόμβος του δικτύου καταβάλλει κάθε δυνατή προσπάθεια για την παράδοση του πακέτου πληροφορίας στον επόμενο κόμβο, αλλά δεν μπορεί να εγγυηθεί ούτε για την ασφάλεια της μεταφοράς ούτε για τη σωστή σειρά με την οποία τα πακέτα παραλαμβάνονται από τον προορισμό τους. Δεδομένης της αυξανόμενης ζήτησης για σύνδεση στο Διαδίκτυο σε πάρα πολλές χώρες του κόσμου, το IP φαντάζει ως η πιο ολοκληρωμένη λύση στο θέμα πρωτοκόλλου μεταφοράς, καθώς υποστηρίζεται ήδη επιτυχημένα από μεγάλο αριθμό συνδέσεων και ζεύξεων σε όλο τον κόσμο.

- ATM:** Ο Ασύγχρονος Τρόπος Μεταφοράς ATM (Asynchronous Transfer Mode) είναι ένα πρωτόκολλο μεταφοράς, προσανατολισμένο σε σύνδεση (connection-oriented), που χρησιμοποιεί σταθερού μεγέθους πακέτα (cells) 53 bytes ως βασική μονάδα πληροφορίας. Αυτή η οργάνωση της πληροφορίας σε σταθερού μεγέθους πακέτα έχει ως αποτέλεσμα την απαιτούμενη ευελιξία του πρωτοκόλλου ως προς την υποστήριξη διαφόρων ρυθμών μετάδοσης. Κάθε φορά, λοιπόν, που πρέπει να διαχειρισθούν ροές δεδομένων πληροφορίας με διαφορετικές απαιτήσεις σε QoS η καθεμία, μεταδίδεται ο κατάλληλος αριθμός πακέτων ATM ανά μονάδα χρόνου. Το γεγονός αυτό παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον ιδιαίτερα για τις επικοινωνίες πολυμέσων που απαιτούν πολλαπλούς ρυθμούς μετάδοσης. Στη Σύσταση ITU-T I.356 ορίζονται όλες οι δυνατές υπηρεσίες σύνδεσης που υποστηρίζει το ATM: Σταθερού Ρυθμού Μετάδοσης CBR (Constant Bit Rate), Μεταβλητού Ρυθμού Μετάδοσης VBR (Variable Bit Rate) για ροές καταιγιστικών δεδομένων (bursty data streams) με μεταβλητό ρυθμό μετάδοσης, πραγματικού χρόνου (real-time) VBR (rt-VBR) για φορτία κίνησης ευαίσθητα στη χρονοκαθυστέρηση όπως το βίντεο και ο ήχος, Διαθέσιμου Ρυθμού Μετάδοσης ABR (Available Bit Rate) και Μη Καθορισμένου Ρυθμού Μετάδοσης UBR (Unspecified Bit Rate).
- MPEG-2/DVB:** Το ευρωπαϊκό στάνταρτ MPEG-2/DVB σχεδιάστηκε αρχικά για να παρέχει υπηρεσίες ψηφιακής τηλεόρασης αλλά με την πάροδο του χρόνου, θεωρείται ένα από τα πιο αποτελεσματικά και δοκιμασμένα πρωτόκολλα που είναι σε θέση να προσφέρει αλληλοδραστικές υπηρεσίες πολυμέσων χάρη στην ευελιξία που το χαρακτηρίζει. Οι ροές ψηφιακών δεδομένων, που αντιστοιχούν σε πληροφορία βίντεο, ήχου και δεδομένων και χαρακτηρίζονται συχνά από διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης είναι δομημένες όλες σε ένα Πακέτο Μεταφοράς (Transport Packet, TS) σταθερού μήκους 188 bytes και πολυπλέκονται μεταξύ τους πριν κωδικοποιηθούν και διαμορφώσουν μια φέρουσα συχνότητα. Διαφορετικά σχήματα κωδικοποίησης και διαμόρφωσης έχουν προτυποποιηθεί ανάλογα με τα ειδικά χαρακτηριστικά των τηλεπικοινωνιακών διαύλων στους οποίους πρόκειται να μεταδοθεί η πληροφορία. Συγκεκριμένα, για τη δορυφορική μετάδοση υπάρχει το πρότυπο DVB-S, για την

καλωδιακή το DVB-C και για την επίγεια ασύρματη μετάδοση υπάρχει το πρότυπο DVB-T. Τα πακέτα TS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εσωκλείσουν και μεταφέρουν οποιαδήποτε μορφή ψηφιακής πληροφορίας.

2.10 Προβλήματα διάδοσης

Ένας τομέας συνεχούς έρευνας για τα συστήματα LMDS είναι αυτός που αφορά τη διάδοση των μικροκυμάτων. Για τη φασματική περιοχή που έχει αποδοθεί στα συστήματα LMDS, οι απώλειες ελευθέρου χώρου είναι δεδομένες και αναπόφευκτες για μια ορισμένη απόσταση μεταξύ σταθμού βάσης και τελικού χρήστη του συστήματος. Πέραν όμως αυτών που αποτελούν μια στάθμη αναφοράς απωλειών για κάθε σύστημα LMDS, υπάρχουν και άλλοι μηχανισμοί απωλειών που επιδρούν δυσμενώς στη διάδοση των μικροκυματικών και χιλιοστομετρικών κυμάτων με σημαντικότερο τις απώλειες βροχοπτώσεων. Στη συνέχεια, αναλύεται περιληπτικά καθένας από αυτούς τους μηχανισμούς.



Σχήμα 2.20: Προβλήματα διάδοσης σε συστήματα LMDS

Η μετάδοση του σήματος στα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα και συγκεκριμένα στα συστήματα LMDS πραγματοποιείται με τη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω της ατμόσφαιρας. Η ατμόσφαιρα που περιβάλλει τη γη μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα ανομοιογενές και απορροφητικό μέσο διάδοσης, με αποτέλεσμα μία σειρά μηχανισμών να επιδρά δυσμενώς στη διάδοση των ραδιοκυμάτων. Συγκεκριμένα, επηρεάζονται δυσμενώς τόσο η στάθμη της λαμβανόμενης ισχύος του σήματος όσο και η πόλωση του μεταδιδόμενου κύματος. Εξάλλου, τα ατμοσφαιρικά

αυτά φαινόμενα δεν είναι κοινά για όλες τις περιπτώσεις αλλά παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας του συστήματος, το μήκος της διαδρομής μέσα από την ατμόσφαιρα και τη γωνία ανύψωσης του κεκλιμένου ραδιοδρόμου. Στην περίπτωση των συστημάτων LMDS, η γωνία ανύψωσης δεν παίζει σημαντικό ρόλο καθώς λαμβάνεται συνεχώς ίση με μηδέν (0°). Αναλυτικότερα στα συστήματα LMDS, οι δυσμενείς επιδράσεις τις οποίες υπόκεινται τα υψίσυχνα μικροκυματικά σήματα εξαιτίας ατμοσφαιρικών φαινομένων είναι οι εξής [21]:

- Απόσβεση:** Η απόσβεση αντιπροσωπεύει μία σταθερή με το χρόνο απώλεια διάδοσης της ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος. Προκαλείται από την απώλεια ενέργειας που υφίσταται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα όταν συναντά κατά τη διάδοσή του βροχή, χαλάζι, χιόνι, παγοκρυστάλλους, δηλαδή το σύνολο των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων που παράγονται στην τροπόσφαιρα. Από τους παράγοντες αυτούς, σημαντικότερος σε συχνότητες άνω των 10GHz, στις οποίες το μήκος κύματος γίνεται συγκρίσιμο με το μέγεθος της βροχοσταγόνας, είναι η επίδραση των βροχοπτώσεων. Μάλιστα, η απόσβεση λόγω βροχής αυξάνει σημαντικά με την αύξηση της συχνότητας (ανάλογα προς το τετράγωνο της συχνότητας σε dB). Το χιόνι και το χαλάζι έχουν σαφώς μικρότερη επίδραση στα ραδιοκύματα σε σχέση με τη βροχόπτωση, με εξαίρεση την περίπτωση νιφάδων χιονιού που κατά την πτώση τους λιώνουν και παίρνουν μορφή πολύ μεγαλύτερων σταγόνων συγκριτικά με την απλή βροχή. Επιπλέον, παράγοντες απόσβεσης με μικρότερη, όμως, βαρύτητα είναι οι νεφώσεις (σύννεφα) και η ομίχλη.
- Απορρόφηση από αέρια:** Η απορρόφηση την οποία εισάγουν στο ραδιοκύμα τα αέρια της ατμόσφαιρας και οι υδρατμοί εξαρτάται, εκτός από τις γνωστές παραμέτρους (συχνότητα, γωνία ανύψωσης) και από το ύψος του επίγειου σταθμού από την επιφάνεια της θάλασσας, τη θερμοκρασία, την πίεση, καθώς και από την υγρασία της περιοχής. Αν και σε συχνότητες κάτω από τα 10GHz η επίδραση του φαινομένου αυτού είναι συνήθως αμελητέα, για συχνότητες πάνω από το όριο αυτό η απορρόφηση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο μόνο σε συγκεκριμένες συχνότητες, όπου και μεγιστοποιείται. Συγκεκριμένα, για τους

υδρατμούς η μέγιστη απορρόφηση εντοπίζεται στις συχνότητες 22.5GHz, 183GHz και 320GHz, ενώ το οξυγόνο απορροφά έντονα την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια στα 60GHz και 119GHz.

- **Αποπόλωση:** Όπως προαναφέρθηκε, η ανάγκη για αύξηση της χωρητικότητας στα συστήματα LMDS έχει οδηγήσει πολλούς σχεδιαστές στην υιοθέτηση της τεχνικής της αναχρησιμοποίησης συχνότητας, η οποία συχνά συνίσταται στην εκπομπή δύο ορθογώνια πολωμένων μεταξύ τους σημάτων στην ίδια φέρουσα συχνότητα. Στην περίπτωση αυτή, ο περιοριστικός παράγοντας της αποπόλωσης (depolarization) προέρχεται και πάλι από τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις σε συχνότητες υψηλότερες των 10GHz. Ειδικά για την περίπτωση βροχοπτώσεων, η αποπόλωση που προκαλείται και οφείλεται στην τυχαία γωνία κλίσης των βροχοσταγόνων ως προς τον ορίζοντα (canting angle), αναιρεί την κατά 90° απομόνωση μεταξύ των δύο πολώσεων, με αποτέλεσμα μέρος της ισχύος της μιας πόλωσης να δημιουργεί παρεμβολή στην ορθογώνιά της.
- **Σπινθηρισμοί:** Οι σπινθηρισμοί (scintillations) αναφέρονται στις ταχύτατες διακυμάνσεις των χαρακτηριστικών του λαμβανόμενου σήματος (πλάτος, φάση, γωνία άφιξης), συντελούνται στην τροπόσφαιρα και εξαρτώνται άμεσα από τα χαρακτηριστικά του δείκτη διάθλασης στο στρώμα αυτό της ατμόσφαιρας. Έχει αποδειχθεί ότι αυξάνονται με την αύξηση της συχνότητας και μειώνονται με τη μείωση του μεγέθους της κεραίας και της γωνίας ανύψωσης [20]. Συνεπώς, στα συστήματα LMDS όπου χρησιμοποιούνται κεραίες μικρού σχετικά μεγέθους και μηδενικές γωνίες ανύψωσης, αναμένεται να μην υπάρχουν σημαντικές απώλειες λόγω σπινθηρισμών. Εξάλλου, οι σπινθηρισμοί αυξάνουν σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας που επικρατεί στο περιβάλλον του σταθμού λήψης. Γενικά, η απόσβεση που εισάγει ο μηχανισμός των σπινθηρισμών προβλέπεται προσεγγιστικά από τους σχεδιαστές μικροκυματικών συστημάτων με βάση μία εμπειρική σχέση, σύμφωνα με την οποία η ενεργός τιμή σε dB είναι ανάλογη της συχνότητας υψωμένης στον εκθέτη 7/12.

Πέραν όμως από τις δυσμενείς επιδράσεις της ατμόσφαιρας στη διάδοση των μικροκυματικών σημάτων των συστημάτων LMDS, υπεισέρχονται ορισμένοι ακόμα

μηχανισμοί διάδοσης που επηρεάζουν τη στάθμη της λαμβανόμενης ισχύος του σήματος και κατεπέκταση την ποιότητα των προσφερόμενων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Αυτοί είναι κυρίως οι διαλείψεις λόγω πολλαπλών διοδεύσεων του ραδιοκύματος και τα φαινόμενα σκέδασης από τα διάφορα κτίρια και τη βλάστηση που παρεμβάλλουν στην ευθεία οπτικής επαφής των συστημάτων LMDS. Αναλυτικότερα:

- **Διαλείψεις πολλαπλών διοδεύσεων:** Το φαινόμενο πολλαπλών διοδεύσεων (ή οδεύσεων) (multipath propagation) αναφέρεται στη λήψη από την κεραία δέκτη όχι μόνο του απευθείας κύματος αλλά και διαφόρων χρονικά μετατοπισμένων εκδοχών του, που οφείλονται σε ανακλάσεις και περιθλάσεις. Το συνολικά λαμβανόμενο σήμα προκύπτει από το διανυσματικό άθροισμα όλων των συνιστωσών και, ανάλογα με τις επιμέρους καθυστερήσεις τους και την ισχύ τους, μπορεί να είναι εξασθενημένο ή ενισχυμένο συγκριτικά με το αρχικό απευθείας σήμα. Το φαινόμενο των πολλαπλών διοδεύσεων είναι σημαντικό μόνο σε τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις που λειτουργούν σε συχνότητες κάτω από τα 10GHz και δεν λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά τη σχεδίαση συστημάτων LMDS για τους εξής κυρίως λόγους [12]:
 - Τα συστήματα LMDS λειτουργούν υπό τον περιορισμό ύπαρξης οπτικής επαφής, συνεπώς η σκίαση και η περίθλαση δεν εμφανίζονται τόσο συχνά όσο στις χαμηλότερες συχνότητες.
 - Οι κεραίες των τερματικών χρήστη είναι συνήθως τοποθετημένες στο υψηλότερο σημείο του κτιρίου του χρήστη, και όχι λίγα μόνο μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους, με αποτέλεσμα η συμβολή περισσότερων κυμάτων στην κεραία του δέκτη να είναι σπάνια.
 - Η χρησιμοποίηση ιδιαίτερα κατευθυντικών κεραιών τόσο από την πλευρά του σταθμού βάσης όσο και από την πλευρά του χρήστη μειώνει σημαντικά τα αρνητικά αποτελέσματα των πολλαπλών διαδρομών.
 - Εν αντιθέσει με τα συστήματα κινητών επικοινωνιών όπου είναι συνηθέστερο το φαινόμενο των πολλαπλών διοδεύσεων, τα συστήματα LMDS προσφέρουν σταθερή (fixed) πρόσβαση και ως εκ τούτου η κεραία τερματικού χρήστη είναι

σταθερή στην κορυφή των κτιρίων και τοποθετημένη στο σημείο που προσφέρει τη βέλτιστη επίδοση λειτουργίας.

- **Φαινόμενα σκέδασης:** Στις υψηλές μικροκυματικές συχνότητες, το μήκος κύματος του σήματος είναι πολύ μικρό με αποτέλεσμα πολλά εμπόδια να αποκτούν συγκριτικά υπολογίσιμες διαστάσεις με αυτό και να προκαλούν τη σκέδαση του σήματος. Στα συστήματα LMDS προκύπτει ιδιαίτερο πρόβλημα όταν η σχεδίαση του συστήματος δεν έχει αποκλείσει την ύπαρξη τέτοιων εμποδίων στην ευθεία οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη. Οι δύο πιο συνηθισμένες περιπτώσεις σκέδασης οφείλονται στα κτίρια και τη βλάστηση. Στην περίπτωση των κτιρίων το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπισθεί με προσεκτική σχεδίαση του συστήματος δεδομένου ότι η θέση των κτιρίων είναι και θα παραμείνει σταθερή. Οι κεραιές των σταθμών βάσης πρέπει να εγκαθίστανται σε όσο το δυνατό υψηλότερα σημεία λαμβάνοντας υπόψη την τοπολογία των γειτονικών κτιρίων. Από την άλλη πλευρά, η εκτίμηση των αποσβέσεων λόγω σκεδάσεων από τη βλάστηση και κυρίως από τα φυλλώματα των δέντρων είναι πιο δύσκολη γιατί, σε αντίθεση με τα κτίρια που έχουν σταθερή θέση, τα φυτά μακροπρόθεσμα αναπτύσσονται και βραχυπρόθεσμα μετακινούνται υπό την επίδραση του ανέμου. Οι αποσβέσεις προκαλούνται από μία σειρά διαδοχικών σκεδάσεων του σήματος από τα φυλλώματα των δέντρων. Για τον προσδιορισμό της απόσβεσης λόγω βλάστησης στις χιλιοστομετρικές συχνότητες γίνονται προσπάθειες για την εύρεση όσο το δυνατόν καλύτερων και πλέον αξιόπιστων μοντέλων υπολογισμού. Ωστόσο, σχεδιάζοντας κάθε ζεύξη με τουλάχιστον 60% καθαρότητα της πρώτης ζώνης Fresnel μετριάζονται οι απώλειες λόγω σκέδασης από κάθε είδους εμπόδια, που μπορούν να προκαλέσουν σκέδαση και περίθλαση του σήματος [21].

Είναι φανερό πλέον από τα προηγούμενα, ότι ο δυσμενέστερος μηχανισμός αποσβέσεων στις συχνότητες άνω των 10GHz που ενδιαφέρει ιδιαίτερα τα συστήματα LMDS είναι η βροχοπτώση. Η βροχή επιδρά αρνητικά στην ποιότητα επικοινωνίας που επιτυγχάνει το τηλεπικοινωνιακό σύστημα, ιδιαίτερα σε γεωγραφικές περιοχές με επιβαρημένες λόγω βροχοπτώσεων κλιματολογικές συνθήκες. Επίσης, συνεπάγεται ότι

τα χαρακτηριστικά βροχοπτώσεων μιας περιοχής επηρεάζουν την ακτίνα κάλυψης ενός κυψελωτού τηλεπικοινωνιακού συστήματος, όπως είναι ένα σύστημα LMDS. Το γεγονός αυτό υπονοεί ότι τα οικονομικά θέματα που σχετίζονται με την παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών μέσω της τεχνολογίας LMDS ποικίλουν ανάλογα με την περιοχή εφαρμογής της.

Τέλος, αναφέρεται ότι η μελέτη της βροχής αντιμετωπίζεται με στοχαστικό τρόπο διότι πρόκειται για μια τυχαία στοχαστική διαδικασία τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο του χώρου. Καθώς η βροχή παρουσιάζει μια σημαντική ανομοιογένεια στο χώρο και το χρόνο, ο ρυθμός βροχόπτωσης είναι συνάρτηση του ποσοστού του χρόνου και εξαρτάται από κάθε κλιματική ζώνη. Ο Διεθνής Οργανισμός ITU-R έχει εκδώσει συστάσεις για την κατανομή υπέρβασης του ρυθμού βροχόπτωσης καθώς και εμπειρικό μοντέλο για τον υπολογισμό των αποσβέσεων που εισάγονται σε ένα μικροκυματικό σήμα λόγω βροχής. Επίσης, πειραματικά δεδομένα είναι διαθέσιμα σε μικρή όμως κλίμακα σε ορισμένες γεωγραφικές περιοχές, όπου μελετάται η εγκατάσταση και λειτουργία ασύρματων μικροκυματικών συστημάτων. Στην παρούσα εργασία ωστόσο, όπου θα θεωρηθεί η βροχή ως κυρίαρχος μηχανισμός διαλείψεων, υποτίθεται ότι η σημειακή ένταση βροχόπτωσης και η απόσβεση που επιφέρει ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή (log-normal distribution). Συνεπώς, υιοθετείται το ομώνυμο μοντέλο, το οποίο βρίσκει καλή εφαρμογή τουλάχιστον για περιοχές της Ευρώπης και της Βορείου Αμερικής (βλ. Κεφάλαιο 3).

Για τους παραπάνω λόγους, εδώ και αρκετά χρόνια πολλοί ερευνητές προσπαθούν να βρουν τρόπους ώστε να μετριάσθουν οι μεγάλες αποσβέσεις λόγω βροχής σε ασύρματες μικροκυματικές ζεύξεις άνω των 10GHz. Οι διαφορετικές προσεγγίσεις ως προς αυτήν την προσπάθεια συζητούνται στην επόμενη ενότητα.

2.11 Τεχνικές άμβλυνσης των διαλείψεων λόγω βροχής

Για να γίνουν κατανοητές οι δυσμενείς επιδράσεις των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων και να αναλυθούν στη συνέχεια οι διάφοροι τρόποι αντιμετώπισης αυτών, πρέπει πρώτα να ορισθούν ορισμένα βασικά μεγέθη ενός συστήματος ψηφιακών επικοινωνιών. Ένα πολύ κρίσιμο μέγεθος για την ποιότητα του τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι αυτού του ποσοστού λαθών (Bit Error Ratio, BER), του οποίου οι

μεταβολές μετρώνται στην έξοδο του δέκτη. Συναφής με το προηγούμενο μέγεθος είναι η πιθανότητα λάθους (Bit Error Probability, BEP) που εκτιμάται στο στάδιο της σχεδίασης και αντιπαρατίθεται σε σχέση με το BER στο στάδιο της λειτουργίας του ψηφιακού συστήματος. Έτσι λοιπόν, κάθε τηλεπικοινωνιακό σύστημα σχεδιάζεται με βάση την πιθανότητα λάθους BEP και αξιολογείται με βάση το ποσοστό λαθών BER.

Δύο πολύ σημαντικά επίσης μεγέθη που βοηθούν στην αξιολόγηση της ποιότητας των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων είναι αυτό της διαθεσιμότητας και της αξιοπιστίας που επιτυγχάνουν. Η διαθεσιμότητα (availability) εκφράζεται από το χρονικό ποσοστό στη διάρκεια ενός έτους κατά το οποίο ο δέκτης διατηρεί το συγχρονισμό του. Για να διατηρείται ο συγχρονισμός, το ποσοστό λαθών BER δεν πρέπει να υπερβαίνει μια στάθμη κατωφλίου BER_{th} , που συνήθως λαμβάνεται ίση με 10^{-3} [18]. Ισοδύναμα, η διαθεσιμότητα εκφράζεται από το χρόνο διακοπής της λειτουργίας T_{out} ή από την πιθανότητα διακοπής P_{out} . Με βάση τα προηγούμενα, ισχύουν οι σχέσεις

$$P_{out} = \Pr\{BER > BER_{th}\} \quad (2.4)$$

$$T_{out} = 525600 \cdot P_{out} \text{ (min / year)} \quad (2.5)$$

Εξάλλου, η αξιοπιστία (performance) του συστήματος περιγράφεται ποσοτικά από το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο επιτυγχάνεται ποσοστό λαθών BER μεγαλύτερο μιας δεδομένης στάθμης. Ισοδύναμα, η αξιοπιστία περιγράφεται από την πιθανότητα υπέρβασης μιας στάθμης ποσοστού λαθών BER_{sp} , δηλαδή την πιθανότητα

$$P_{sp} = \Pr\{BER > BER_{sp}\} \quad (2.6)$$

ή από το χρόνο υπέρβασης της στάθμης BER_{sp}

$$T_{sp} = 525600 \cdot P_{sp} \text{ (min / year)} \quad (2.7)$$

Η ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών (QoS) στους χρήστες ενός συστήματος LMDS σχετίζεται άμεσα με την αξιοπιστία αυτού. Όσο υψηλότερη είναι η QoS των υπηρεσιών που μεταδίδονται από το σύστημα, τόσο υψηλότερη αναμένεται η αξιοπιστία του και κατεπέκταση τόσο χαμηλότερη πρέπει να είναι η στάθμη κατωφλίου BER_{sp} . Τόσο η διαθεσιμότητα όσο και η αξιοπιστία των ψηφιακών συστημάτων επικοινωνιών, προδιαγράφονται από το Διεθνή Οργανισμό ITU-R μέσω συγκεκριμένων μασκών επίδοσης [18].

Στα ψηφιακά συστήματα LMDS, σε αντιδιαστολή με τα αναλογικά συστήματα, η λειτουργία του δέκτη είναι απλούστερη αφού αφορά μόνο την ορθή αναγνώριση του μεταδοθέντος δυαδικού ψηφίου και όχι την πιστή αναπαραγωγή ολόκληρου του εκπεμπόμενου σήματος. Η αξιοπιστία της αναγνώρισης κάθε δυαδικού ψηφίου αξιολογείται από τις μετρήσεις του σηματοθορυβικού λόγου της ισχύος του χρήσιμου σήματος προς την ισχύ του θορύβου. Η επίδοση, λοιπόν, του δέκτη χειροτερεύει υπό συνθήκες διάλειψης λόγω βροχής, αφού τότε η απαραίτητη για την αναγνώριση τιμή του σηματοθορυβικού λόγου είναι μειωμένη. Υπό συνθήκες καταιγίδας (παροξυσμικής βροχής), η μεγάλη απόσβεση μειώνει σε τέτοιο βαθμό την ισχύ του χρήσιμου σήματος, ώστε είναι δυνατό ο δέκτης να χάσει το συγχρονισμό του (δηλαδή το σημείο έναρξης του κάθε δυαδικού ψηφίου) και το σύστημα LMDS να τίθεται εκτός λειτουργίας (outage). Το γεγονός αυτό μειώνει τη διαθεσιμότητα του συστήματος. Σε άλλες περιπτώσεις, όπου και όταν οι κλιματολογικές συνθήκες είναι ηπιότερες, οι αποσβέσεις λόγω βροχής πλήττουν μόνο την ποιότητα υπηρεσιών QoS του συστήματος και όχι τη διαθεσιμότητά του.

Προκειμένου να διατηρηθεί η διαθεσιμότητα των συστημάτων LMDS εντός των προδιαγραφών, να καταστεί δυνατή η λειτουργία τους υπό χαμηλά περιθώρια διαλείψεων και να αναιρεθούν μερικώς οι παραπάνω δυσμενείς επιπτώσεις στη λειτουργία τους, έχουν προταθεί διάφορες λύσεις, γνωστές ως Τεχνικές Περιορισμού των Διαλείψεων (Fade Mitigation Techniques, FMT). Τα αντίμετρα αυτά χωρίζονται γενικά σε τρεις κατηγορίες [20]:

1. Έλεγχος της Ισχύος της προς τα Κάτω Ζεύξης (Down Link Power Control)
2. Προσαρμοστική Μορφοποίηση σήματος (Adaptive Waveform)
3. Τεχνικές Διαφορικής Προστασίας (Diversity Techniques)

Αυστηρά οριζόμενο, το περιθώριο διάλειψης (fade margin) εκφρασμένο σε dB είναι η διαφορά μεταξύ της τιμής της απόσβεσης (σε dB), η οποία οδηγεί το σύστημα σε απώλεια συγχρονισμού και της τιμής της απόσβεσης (σε dB) υπό συνθήκες καθαρού ουρανού. Η τιμή της απόσβεσης υπό συνθήκες καθαρού ουρανού προκύπτει από το άθροισμα όλων των υπολοίπων παραγόντων απόσβεσης μείον την απόσβεση λόγω βροχόπτωσης και για δεδομένο σύστημα LMDS που λειτουργεί σε συγκεκριμένη περιοχή είναι μια σταθερή ποσότητα. Αντίθετα, η απόσβεση που οφείλεται στη βροχή είναι ένα στατιστικό μέγεθος και μεταβάλλεται ισχυρά στη διάρκεια ενός έτους

δυσκολεύοντας τη σχεδίαση της ζεύξης. Γενικότερα, λοιπόν, μπορεί να ειπωθεί ότι το περιθώριο διάλειψης είναι η ποσότητα ισχύος κατά την οποία πρέπει να αυξηθεί η ισχύς εκπομπής των σταθμών του συστήματος ώστε αυτό να αντιμετωπίζει τις διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης και να διατηρείται η διαθεσιμότητα του συστήματος εντός των προδιαγραφών συγχρονισμού. Είναι πάντοτε επιθυμητή η λειτουργία του συστήματος LMDS υπό όσο το δυνατό μικρότερο περιθώριο διάλειψης, γεγονός το οποίο επιφέρει σημαντικά οφέλη στον τηλεπικοινωνιακό πάροχο που εκμεταλλεύεται το εν λόγω δίκτυο. Ανάμεσα στα κρίσιμα ζητήματα που υπεισέρχονται κατά το σχεδιασμό είναι τόσο η επιλογή κατάλληλης τεχνικής αντιμετώπισης των διαλείψεων λόγω βροχής, όσο και η επιτυχής ισορρόπηση μεταξύ επίδοσης και κόστους του συστήματος.

2.11.1 Έλεγχος της ισχύος της προς τα κάτω ζεύξης

Η τεχνική αυτή συνίσταται στην αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος από τους επίγειους σταθμούς προς τα τερματικά χρηστών, ώστε να αντισταθμισθούν οι απώλειες που εισάγουν οι κάθε είδους διαλείψεις. Η τεχνική ελέγχου ισχύος προς την αντίθετη κατεύθυνση (uplink) είναι πιο δύσκολα υλοποιήσιμη στα συστήματα LMDS λόγω των περιορισμών στον όγκο και στο μέγεθος του εξοπλισμού πελάτη CPE. Για να είναι επιτυχημένος ο έλεγχος ισχύος της προς τα κάτω ζεύξης, πρέπει η ισχύς εξόδου από το σταθμό βάσης να μεταβάλλεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται ότι η πυκνότητα ισχύος του σήματος που φθάνει στο τερματικό χρήστη δεν υπολείπεται ενός κατωφλίου που ορίζεται από τις προδιαγραφές QoS του συστήματος. Κάτι τέτοιο είναι εφικτό στα συστήματα LMDS καθώς η θέση των τερματικών χρήστη είναι σταθερή και, συνεπώς, ο σταθμός βάσης μπορεί να γνωρίζει κάθε στιγμή το μέγεθος της απόσβεσης κατά την προς τα κάτω ζεύξη και να προβλέπει με συνεχείς μετρήσεις την εξέλιξη του φαινομένου.

Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην περίπτωση αυτή στους ενισχυτές υψηλής ισχύος HPA που χρησιμοποιούνται στους πομπούς των σταθμών βάσης του συστήματος. Οι ενισχυτές αυτοί τοποθετούνται στο τελευταίο στάδιο της βαθμίδας του εκπομπού και αναλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος ενίσχυσης του προς εκπομπή σήματος. Ωστόσο, δεν είναι πάντοτε δυνατό να αυξήσουν την ισχύ εξόδου τους διότι πολλοί ενισχυτές ήδη κατά την κανονική τους λειτουργία έχουν μικρά περιθώρια ισχύος στην έξοδο, δηλαδή λειτουργούν σε μικρή απόσταση από την περιοχή κόρου τους με

αποτέλεσμα να εισέρχονται εύκολα στη μη γραμμική περιοχή λειτουργίας τους [18]. Ιδιαίτερα σε συστήματα LMDS που χρησιμοποιούν την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης FDMA, όπου τα κανάλια FDMA είναι διεσπαρμένα σε όλο το διατιθέμενο εύρος ζώνης, τα προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης λόγω της μη γραμμικής λειτουργίας του ενισχυτή δημιουργούν σημαντικές παρεμβολές σημάτων, περιορίζοντας την επίδοση του συστήματος και κατεπέκταση την εμβέλεια της συγκεκριμένης τεχνικής αντιμετώπισης των διαλείψεων.

Επιπλέον η αύξηση ισχύος δημιουργεί παρεμβολές προς τα γειτονικά επίγεια και δορυφορικά μικροκυματικά συστήματα που λειτουργούν σε παραπλήσιες φέρουσες συχνότητες, μέσω των πλευρικών λοβών του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας του σταθμού βάσης.

Τέλος, σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη τεχνική αντιμετώπισης των διαλείψεων έχει ήδη εφαρμοσθεί με επιτυχία στα συστήματα WLL, στα οποία εφαρμόζεται η τεχνική μετάδοσης σημείου προς σημείο (PTP) και τα οποία λειτουργούν ως επί το πλείστον σε συχνότητες κάτω των 10GHz [20].

2.11.2 Προσαρμοστική μορφοποίηση σήματος

Στο πλαίσιο αυτής της τεχνικής αντιμετώπισης των διαλείψεων, εντάσσονται τρία διαφορετικά είδη μεθόδων:

- Προσαρμοστική Κωδικοποίηση (Adaptive Coding)
- Μείωση του Ρυθμού Μετάδοσης (Data Rate Reduction)
- Προσαρμοστική Διαμόρφωση (Adaptive Modulation)

Η τεχνική κωδικοποίησης γενικά αφορά την εισαγωγή πλεοναζόντων δυαδικών ψηφίων (redundant bits) στη μεταδιδόμενη ακολουθία ψηφίων πληροφορίας με σκοπό την ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων και είναι δυνατή μόνο όταν το σήμα βρίσκεται σε ψηφιακή μορφή. Προκειμένου να επωφεληθούν τα νεοεισερχόμενα συστήματα LMDS από τη μαζική αγορά των ήδη υπάρχοντων δορυφορικών συστημάτων, πολλές από τις προδιαγραφές που αφορούν την προς τα κάτω ζεύξη του συστήματος είναι κοινές με αυτές των δορυφορικών συστημάτων DTH (Direct-to-Home) [15]. Συνεπώς, σε αρκετά ψηφιακά συστήματα LMDS υποστηρίζεται η τεχνική κωδικοποίησης με τέτοιο

τρόπο, ώστε η ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων να γίνεται στο δέκτη χωρίς αυτός να προσφεύγει σε κάποιας μορφής ανάδραση από τον πομπό. Η κωδικοποίηση αυτού του είδους ονομάζεται κωδικοποίηση Πρόσθιας Διόρθωσης Λαθών (Forward Error Correction, FEC). Συγκεκριμένα, ένα σύστημα που χρησιμοποιεί κωδικοποίηση FEC έχει τη δυνατότητα αυτόματης διόρθωσης σφαλμάτων με επακόλουθο μία σημαντική βελτίωση του ποσοστού σφαλμάτων BER και του χρόνου διαθεσιμότητας του συστήματος.

Συνεπώς, με την εισαγωγή βαθμίδων κωδικοποίησης στον πομπό και αποκωδικοποίησης στο δέκτη είναι δυνατό με μικρότερη τιμή του σηματοθορυβικού λόγου να επιτυγχάνεται στην έξοδο του δέκτη BER ίδιο με αυτό ενός συστήματος που δεν κάνει χρήση κωδικοποίησης. Με τον τρόπο αυτό, αντισταθμίζεται η πτώση στην τιμή του λόγου ενέργειας ψηφίου προς φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου (E_b / N_o) που παρουσιάζεται κατά τη διάρκεια των βροχοπτώσεων. Ωστόσο, με την τεχνική κωδικοποίησης εγείρονται μεγαλύτερες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης. Συνεπώς, η κωδικοποίηση για διόρθωση λαθών αποτελεί ένα τρόπο ανταλλαγής (tradeoff) ισχύος με εύρος ζώνης, λόγω της απαίτησης για μεγαλύτερη χωρητικότητα που οφείλεται στα πρόσθετα ψηφία που εισάγονται για την κωδικοποίηση. Επίσης, η τεχνική κωδικοποίησης για διόρθωση λαθών αυξάνει τη διαθεσιμότητα του συστήματος και καθιστά δυνατή τη λειτουργία του υπό χαμηλά περιθώρια διάλειψης με σημαντική, όμως, μείωση του ρυθμού μετάδοσης πληροφορίας.

Ωστόσο, οι συμβατικές τεχνικές κωδικοποίησης FEC δεν είναι πάντα το κατάλληλο εργαλείο για να αντιμετωπισθούν οι δυσμενείς επιδράσεις της ατμόσφαιρας στη διάδοση των κυμάτων πάνω από τα 10GHz, αφού η διορθωτική τους ικανότητα περιορίζεται στη διόρθωση ενός πεπερασμένου αριθμού συνεχόμενων σφαλμάτων. Όμως, τα σφάλματα εξαιτίας παροξυσμικής βροχόπτωσης είναι συνεχόμενα (καταιγισμός σφαλμάτων) και όταν αυτά υπερβούν ένα ορισμένο πλήθος η ασύρματη ζεύξη ενδέχεται να πάψει να λειτουργεί. Για να αποφευχθεί αυτή η κατάσταση ένας τρόπος είναι η επιλεκτική μείωση του ρυθμού μετάδοσης σε χρονικές περιόδους κατά τις οποίες τα καιρικά φαινόμενα αναμένονται ακραία. Ο τρόπος, όμως, αυτός δεν ενδείκνυται για μετάδοση ευρυζωνικών υπηρεσιών πολυμέσων, η οποία απαιτεί σχετικά

υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης μεγαλύτερους από 2Mbps. Ένας άλλος τρόπος πιο αποδοτικός είναι η τεχνική της προσαρμοστικής κωδικοποίησης.

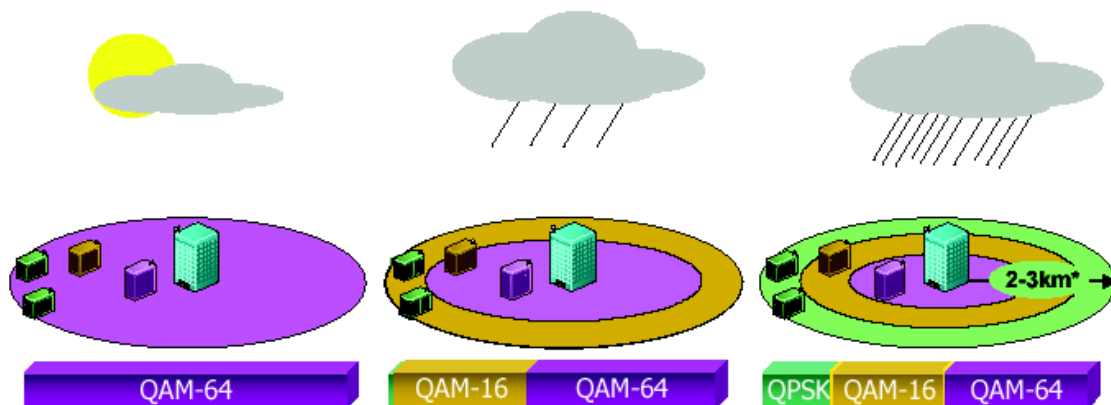
Η τελευταία τεχνική ειδικότερα συνίσταται σε λειτουργία υπό διαφορετικό ρυθμό κωδικοποίησης κάθε φορά με σκοπό να αντιμετωπισθούν οι ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες διάδοσης. Έχειδειχθεί ότι μεταβάλλοντας το ρυθμό κωδικοποίησης ανάλογα με τα καιρικά φαινόμενα που επικρατούν, το κέρδος κωδικοποίησης μπορεί να φθάσει από 2dB έως 10dB [20]. Ωστόσο, η τεχνική αυτή αντιμετώπισης των διαλείψεων απαιτεί μεγαλύτερο εύρος ζώνης στα συστήματα FDMA και μεγαλύτερους καταγισμούς δεδομένων μέσα στο ίδιο πλαίσιο στα συστήματα TDMA. Επίσης, στην περίπτωση όπου ο πομπός δέχεται στην είσοδό του δεδομένα προς εκπομπή με σταθερό ρυθμό πληροφορίας εισόδου, η προσαρμοστική κωδικοποίηση έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της ρυθμαπόδοσης του συστήματος.

Σε αντιστοιχία με την προσαρμοστική κωδικοποίηση, η τεχνική της προσαρμοστικής διαμόρφωσης έχει επίσης στόχο τη μείωση του λόγου (E_b/N_o) που αντιστοιχεί σε δεδομένη στάθμη BER με χρήση, όμως, ψηφιακής τεχνικής διαμόρφωσης χαμηλότερης πολυπλοκότητας (lower level). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αναπόφευκτη μείωση της φασματικής απόδοσης του συστήματος όπως δείχθηκε στην παράγραφο §2.7 αυτού του κεφαλαίου. Αντίθετα, υπό συνθήκες καθαρού ουρανού, υψηλή χωρητικότητα συστήματος μπορεί να επιτευχθεί για ένα δεδομένο εύρος ζώνης με χρήση ψηφιακών μεθόδων διαμόρφωσης μεγαλύτερης πολυπλοκότητας (higher level).

Προς το παρόν, οι σχεδιαστές συστημάτων έχουν στραφεί προς την τεχνική προσαρμοστικής διαμόρφωσης για την αντιμετώπιση των διαλείψεων λόγω βροχής στα συστήματα LMDS [20]. Όπως έχειδειχθεί στην παράγραφο §2.7, η μέθοδος διαμόρφωσης 64-QAM χαρακτηρίζεται από τη μικρότερη εμβέλεια κάλυψης σε σύστημα LMDS και εφαρμόζεται όταν ο λόγος (E_b/N_o) είναι σχετικά υψηλός. Αντίθετα, η μέθοδος διαμόρφωσης QPSK χαρακτηρίζεται από τη μεγαλύτερη εμβέλεια κάλυψης και μπορεί να εφαρμοστεί ακόμα και αν ο λόγος (E_b/N_o) είναι σχετικά χαμηλός. Συνεπώς, υπό συνθήκες καθαρού ουρανού όπου ο λόγος (E_b/N_o) παραμένει υψηλός, χρησιμοποιείται η μέθοδος 64-QAM για να καλυφθεί ολόκληρη η κυψέλη συστήματος LMDS και να επιτευχθεί μια δεδομένη QoS. Ωστόσο, στην περίπτωση όπου τα φαινόμενα βροχόπτωσης στην περιοχή γίνουν έντονα και ο λόγος (E_b/N_o) μειωθεί με

αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος χειροτέρευσης της αξιοπιστίας και της QoS του συστήματος, χρησιμοποιείται συνδυασμός μεθόδων διαμόρφωσης. Συγκεκριμένα, σε ακραίες περιπτώσεις κλιματολογικών συνθηκών λόγω βροχοπτώσεων, χρησιμοποιείται η μέθοδος QPSK χαμηλότερης πολυπλοκότητας για την κάλυψη των χρηστών στα όρια της κυψέλης, η μέθοδος 16-QAM μεσαίας πολυπλοκότητας για τους χρήστες στην ενδιάμεση περιοχή της κυψέλης και η μέθοδος 64-QAM αυξημένης πολυπλοκότητας για τους πλησιέστερους χρήστες στο σταθμό BS της κυψέλης. Επίσης, σε περιπτώσεις ηπιότερων βροχοπτώσεων, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος 64-QAM για την κάλυψη των πλησιέστερων τερματικών TS στον σταθμό BS του συστήματος και η μέθοδος 16-QAM για την κάλυψη των περισσότερων απομακρυσμένων τερματικών TS.

Η μέθοδος αυτή της δυναμικής προσαρμογής διαμόρφωσης σε μια περιοχή ανάλογα με τις επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες λόγω βροχοπτώσης απεικονίζεται στο σχήμα 2.21. Με τον τρόπο αυτό αντιμετωπίζονται οι διαλείψεις λόγω βροχής σε ένα σύστημα LMDS και η αξιοπιστία του παραμένει σε υψηλά επίπεδα διασφαλίζοντας, παράλληλα, την ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών στους χρήστες του.



Σχήμα 2.21: Προσαρμοστική διαμόρφωση ως μέτρο άμβλυνσης των διαλείψεων λόγω βροχής

Η τεχνική της προσαρμοστικής διαμόρφωσης εφαρμόζεται στην πράξη με συνεχείς μετρήσεις από το σταθμό βάσης του συστήματος LMDS του λόγου ισχύος σήματος προς συνολική ισχύ θορύβου και παρεμβολών, CNR^* . Όταν η ζεύξη με κάποιο χρήστη αντιστοιχεί σε πολύ καλό λόγο CNR^* , τότε δεν συμβαίνει διάλειψη λόγω

βροχής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχήματα κωδικοποίησης μεγαλύτερης πολυπλοκότητας. Η επιλεκτική αυτή αλλαγή στο σχήμα διαμόρφωσης γίνεται χωρίς, βεβαίως, να απαιτείται περισσότερη ισχύς εκπομπής και έτσι αποφεύγεται η εισαγωγή επιπρόσθετων παρεμβολών στο σύστημα.

2.11.3 Τεχνικές διαφορικής προστασίας

Αν και βασίζονται σε μία εντελώς διαφορετική φιλοσοφία αντιμετώπισης των διαλείψεων από τις δύο προηγούμενες, οι τεχνικές της διαφορικής προστασίας έχουν και αυτές τον ίδιο στόχο, να διατηρήσουν δηλαδή τη διαθεσιμότητα του συστήματος LMDS εντός των προδιαγραφών, να αυξήσουν την αξιοπιστία του και να καταστήσουν δυνατή τη λειτουργία του υπό χαμηλά περιθώρια διαλείψεων. Με τον όρο συστήματα διαφορικής λήψεως (diversity systems) αναφέρονται συστήματα που λειτουργούν έτσι ώστε να υπάρχουν διαθέσιμα δύο ή περισσότερα δείγματα στατιστικά ασυσχέτιστα του επιθυμητού σήματος [21]. Κατά την εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής αντιμετώπισης των διαλείψεων σε ένα σύστημα LMDS εγκαθίσταται εξ ολοκλήρου μια νέα ζεύξη μεταξύ πομπού και δέκτη όταν οι ήδη υπάρχουσες ζεύξεις υποφέρουν από διαλείψεις λόγω βροχής. Η νέα αυτή ζεύξη μπορεί να υφίσταται είτε σε διαφορετική συχνότητα, είτε σε διαφορετική χρονική περίοδο, είτε με διαφορετική όδευση του σήματος. Συνεπώς, τα σχήματα διαφορικής προστασίας χωρίζονται αντίστοιχα σε τρεις επιμέρους κατηγορίες:

1. Διαφορική Λήψη Συχνότητας (Frequency Diversity, FD)
2. Διαφορική Λήψη Χρόνου (Time Diversity, TD)
3. Διαφορική Λήψη Όδευσης (Route Diversity, RD)

2.11.3.1 Διαφορική λήψη συχνότητας

Η διαφορική λήψη συχνότητας εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι ανεξάρτητα από το μηχανισμό διαλείψεων, η συσχέτιση των διαλείψεων στα σήματα που λαμβάνονται είναι μικρή, εάν η πληροφορία μεταδίδεται ταυτόχρονα σε δύο φέρουσες συχνότητες που διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους [21]. Με δεδομένη τη μικρή συσχέτιση μεταξύ των δύο φασματικά μετατοπισμένων σημάτων, όταν το ένα υπόκειται σε βαθιές διαλείψεις στο άλλο οι συνέπειες αναμένονται ηπιότερες, ακόμα και όταν αυτά ακολουθούν τον ίδιο

δρόμο διάδοσης. Συνήθως πέραν της φέρουσας συχνότητας της κύριας ζεύξης, επιλέγεται μια δεύτερη συχνότητα, η οποία είναι μικρότερη και ανήκει σε ζώνη συχνοτήτων που μένει ανεπηρέαστη από τις συνθήκες διάλειτουργίας λόγω βροχοπτώσεων (συχνότητες κάτω των 10GHz).

Συνεπώς, η τεχνική αυτή υποφέρει εξ ορισμού από μη αποδοτική χρήση του διατιθέμενου ραδιοφάσματος, καθώς κάνει χρήση διπλασίων πόρων συστήματος. Μάλιστα, δεδομένου ότι οι συχνότητες κάτω των 10GHz τείνουν να καταληφθούν πλήρως από τις ήδη υπάρχουσες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες, προκύπτει ότι η τεχνική αυτή δεν θα τύχει ιδιαίτερης χρήσης στα σύγχρονα συστήματα LMDS. Επιπρόσθετα, η μεγάλη απόσταση στο φάσμα των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για την εφεδρική λειτουργία σε σχέση με αυτές της κανονικής λειτουργίας, προϋποθέτει την προσθήκη ενός τουλάχιστον ζεύγους πομποδεκτών και κεραιών στο τελικό άκρο τόσο του σταθμού βάσης όσο και του τερματικού χρήστη. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια σημαντική οικονομική επιβάρυνση τόσο στον τηλεπικοινωνιακό πάροχο που εκμεταλλεύεται το δίκτυο όσο και στους χρήστες αυτού.

2.11.3.2 Διαφορική λήψη χρόνου

Η τεχνική αυτή συνίσταται στην επαναμετάδοση της πληροφορίας ύστερα από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, όταν οι συνθήκες διάδοσης που επικρατούν στην υπόψη ασύρματη ζεύξη είναι άκρως επιβαρυντικές. Αυτό προϋποθέτει είτε ότι δεν υπάρχουν καθόλου, ή και αν ακόμα υπάρχουν είναι πολύ μικροί, χρονικοί περιορισμοί όσον αφορά τη μετάδοση της πληροφορίας είτε ότι μια μεταβλητή χρονοκαθυστέρηση (της τάξεως μερικών λεπτών) είναι ανεκτή μεταξύ των πακέτων πληροφορίας [20].

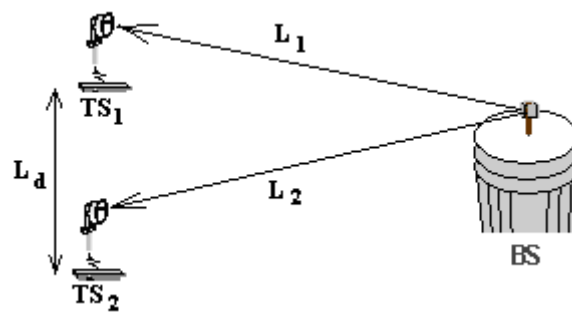
Συνεπώς, η τεχνική της διαφορικής λήψης χρόνου δεν φαίνεται να βρίσκει μεγάλη εφαρμογή στα σύγχρονα συστήματα LMDS, τα οποία στο σύνολό τους οφείλουν να υποστηρίζουν μεταξύ άλλων και υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, όπως τηλεφωνία και τηλεδιάσκεψη. Ωστόσο, σε σύγκριση με την τεχνική της διαφορικής λήψης συχνότητας, η συγκεκριμένη είναι σαφώς πιο συμφέρουσα οικονομικά τεχνική, καθώς κάνει χρήση μιας μόνο ζώνης συχνοτήτων χωρίς να απαιτεί την ύπαρξη ειδικού εξοπλισμού από πλευράς των σταθμών βάσης και των τερματικών χρήστη.

2.11.3.3 Διαφορική λήψη όδευσης

Η τεχνική της διαφορικής λήψης όδευσης συνίσταται στην αλλαγή της όδευσης (re-route) που ακολουθεί το μεταδιδόμενο σήμα μεταξύ των θέσεων του πομπού και του δέκτη του συστήματος. Τα σχήματα διαφορικής προστασίας στηρίζονται στην ταυτόχρονη λήψη του σήματος μέσω δύο (διπλή διαφορική λήψη), ή σε περιοχές με έντονες βροχοπτώσεις μέσω τριών (τριπλή διαφορική λήψη) διαφορετικών οδεύσεων του ηλεκτρομαγνητικού κύματος και αφορούν μόνο την προς τα κάτω ζεύξη (downlink) του τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Γενικά, όταν οι πολλαπλές οδεύσεις του ίδιου σήματος έχουν ως αφετηρία ένα σταθμό εκπομπής και ως κατάληξη περισσότερους του ενός σταθμούς λήψης του ίδιου, όμως δέκτη, η τεχνική ονομάζεται διαφορική λήψη θέσης (Site Diversity) (ή ακόμα και διαφορική λήψη χώρου, Space Diversity), ενώ όταν οι πολλαπλές οδεύσεις του ίδιου σήματος έχουν ως αφετηρία περισσότερους του ενός σταθμούς εκπομπού και ως κατάληξη έναν σταθμό δέκτη, η τεχνική ονομάζεται διαφορική λήψη σταθμού (Station Diversity). Ειδικά στα συστήματα LMDS, η διαφορική λήψη σταθμού λαμβάνει την ειδική ονομασία διαφορική λήψη κελιού (Cell-Site Diversity) και αυτό διότι τα LMDS είναι κυψελωτά συστήματα και κάθε σταθμός βάσης αντιστοιχεί σε διαφορετική κυψέλη του συστήματος. Η τεχνική της διαφορικής λήψης κελιού αποτελεί το κύριο αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας και σε αυτή θα γίνουν εκτενείς αναφορές σε επόμενα κεφάλαια.

Γενικά, η διπλή διαφορική λήψη θέσης περιλαμβάνει δύο σταθμούς του ίδιου δέκτη που λαμβάνουν από τον ίδιο σταθμό εκπομπής του συστήματος. Οι δύο σταθμοί δέκτη βρίσκονται σε τέτοια απόσταση μεταξύ τους ώστε σε κάθε χρονική στιγμή μόνο η μία από τις δύο ζεύξεις υποφέρει από υψηλή απόσβεση σήματος. Για να λειτουργήσει η τεχνική αυτή απαιτείται οι σηματοθορυβικοί λόγοι που λαμβάνονται από τα τερματικά των σταθμών του ίδιου δέκτη να υποβάλλονται διαρκώς σε σύγκριση, ώστε στην έξοδο του συστήματος να εμφανίζεται πάντοτε ο μεγαλύτερος [21]. Είναι φανερό, λοιπόν, ότι για τη διαφορική λήψη θέσης είναι απαραίτητη η επικοινωνία μεταξύ των σταθμών του ίδιου δέκτη καθώς και η επαρκής απόσταση μεταξύ τους (της τάξης μερικών χιλιομέτρων). Η επικοινωνία μεταξύ τους γίνεται γενικά είτε ενσύρματα (οπότε το μεταδιδόμενο σήμα δεν επηρεάζεται από τη βροχή) είτε ασύρματα σε μία χαμηλότερη συχνότητα που δεν επηρεάζεται από τη βροχή (συχνότητες κάτω των 10GHz).

Η τεχνική της διαφορικής λήψης θέσης έχει εφαρμοσθεί μέχρι σήμερα σε αρκετές δορυφορικές ζεύξεις που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz και λειτουργούν υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχής. Ωστόσο, ειδικά στα συστήματα LMDS (βλ. σχήμα 2.22), η τεχνική αυτή είναι φύσει αδύνατο να εφαρμοσθεί διότι οι χρήστες του συστήματος είναι συνήθως εταιρικοί πελάτες ή πελάτες κατοικιών, τα κτίρια των οποίων αναφέρονται σε αντίστοιχες διαστάσεις κτιριακών εγκαταστάσεων μήκους μερικών δεκάδων μέτρων. Συνεπώς, οι διάφορες κεραιές τερματικών του ίδιου χρήστη, που θα εγκαταστηθούν στο υψηλότερο σημείο του κτιρίου του χρήστη για να εφαρμοσθεί η τεχνική διαφορικής λήψης θέσης, δεν μπορούν παρά να απέχουν μεταξύ τους ορισμένες μόνο δεκάδες μέτρα ($L_d \sim$ μερικές δεκάδες μέτρα), γεγονός που θέτει περιορισμούς στην εφαρμογή της μεθόδου.

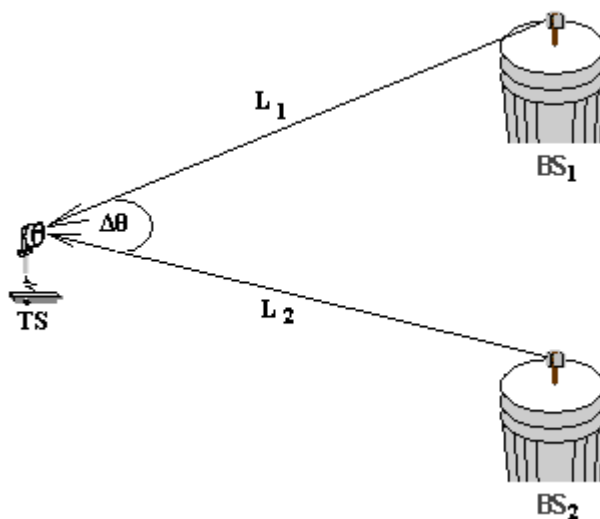


Σχήμα 2.22: Διπλή διαφορική λήψη θέσης σε σύστημα LMDS (L_d : σχετικά μικρή)

Αντίθετα, η τεχνική της διαφορικής λήψης κελιού μπορεί να εφαρμοσθεί στα συστήματα LMDS για να επιφέρει μία σημαντική μείωση στα περιθώρια διαλείψεων από αποσβέσεις βροχής για συγκεκριμένη στάθμη πιθανότητας διακοπής του συστήματος (outage probability). Η αντίστοιχη τεχνική της διαφορικής λήψης σταθμού έχει ήδη εφαρμοσθεί επιτυχώς σε αρκετές περιπτώσεις δορυφορικών ζεύξεων, που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz και είναι γνωστή ως διαφορική λήψη τροχιάς (Orbital Diversity). Για την τεχνική διαφορικής λήψης τροχιάς στις δορυφορικές ζεύξεις άνω των 10GHz μεταξύ γεωστατικών δορυφόρων και επίγειων σταθμών έχουν ήδη πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες από τους σχεδιαστές μικροκυματικών ζεύξεων που έχουν καταλήξει σε αναλυτικά μοντέλα υπολογισμού της βελτίωσης της επίδοσης του συστήματος. Ωστόσο, στην περίπτωση των συστημάτων LMDS, λίγες μόνο μελέτες που

αφορούν τη διαφορική λήψη κελιού και συγκεκριμένα τον υπολογισμό του διαφορικού κέρδους (βλ. §4.3) έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι στιγμής. Σε αυτές έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τρόποι υπολογισμού του διαφορικού κέρδους που βασίζονται κυρίως σε αποτελέσματα μετρήσεων με χρήση ειδικών μετεωρολογικών ραντάρ [22] [23] και, σε μικρότερο βαθμό, σε αναλυτικά μοντέλα υπολογισμού [24] [25].

Η αρχή λειτουργίας της τεχνικής διπλής διαφορικής λήψης κελιού απεικονίζεται στο σχήμα 2.23. Οι δύο σταθμοί βάσης (BS_1 και BS_2) του συστήματος LMDS, με τους οποίους είναι συνδεδεμένο το τερματικό χρήστη (TS) και οι οποίοι ανήκουν σε διαφορετικές κυψέλες του συστήματος έχουν ως προς το τερματικό χρήστη γωνιακή απόσταση $\Delta\theta$, που είναι επαρκώς μεγάλη. Για να λειτουργήσει η τεχνική αυτή απαιτείται οι σηματοθορυβικοί λόγοι που λαμβάνονται από το τερματικό χρήστη και αντιστοιχούν στους δύο σταθμούς βάσης, να υποβάλλονται διαρκώς σε σύγκριση, ώστε στην έξοδο του συστήματος να εμφανίζεται πάντοτε ο μεγαλύτερος. Συνεπώς, ο χρήστης επιλέγει πάντοτε να εξυπηρετηθεί από εκείνο το σταθμό βάσης του οποίου η αντίστοιχη ζεύξη υποφέρει λιγότερο από διαλείψεις λόγω βροχής. Πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι δεν απαιτείται διασύνδεση (ενσύρματη ή ασύρματη) των δύο σταθμών βάσης BS_1 και BS_2 . Ωστόσο, πρέπει από την πλευρά του χρήστη να διατίθεται ο κατάλληλος εξοπλισμός που επιτρέπει να διατηρούνται ταυτόχρονες συνδέσεις και με τους δύο σταθμούς βάσης του συστήματος.



Σχήμα 2.24: Διπλή διαφορική λήψη κελιού σε σύστημα LMDS

Γενικότερα, στην περίπτωση καθεμίας από τις δύο διαφορετικές εκφάνσεις της τεχνικής διαφορικής λήψης όδευσης, καθένα από τα συστήματα διαφορικής λήψης τίθεται εκτός λειτουργίας σπανιότερα από ένα σύστημα απλής λήψης. Η βελτίωση στη διαθεσιμότητα και την επίδοση των συστημάτων αυτών προέρχεται από το φυσικά αποδεκτό γεγονός ότι οι πυρήνες καταιγιστικής βροχής (βροχοπυρήνες) είναι χωρικά περιορισμένοι. Η αναλυτική περιγραφή της δομής της βροχής αποτελεί ένα δύσκολο πρόβλημα, αφού η βροχή είναι ένα φαινόμενο με μεγάλη τυχαιότητα τόσο στο πεδίο του χώρου, όσο και στο πεδίο του χρόνου. Αναγκαστικά, λοιπόν, η μελέτη του φαινομένου γίνεται μέσω εμπειρικών ή αναλυτικών στατιστικών μοντέλων. Ανάλογα με την εποχή του έτους και τη γεωγραφική περιοχή, η βροχή μπορεί να είναι είτε στρωσιγενούς τύπου (stratiform rain), δηλαδή μεγάλου βαθμού ομοιομορφίας, είτε συνεκτικού τύπου (convective rain). Η βροχή συνεκτικού τύπου είναι η πλέον ζημιογόνος για τις ασύρματες ζεύξεις που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz. Αποτελείται από περιοχές με ασθενή βροχόπτωση αλλά και από μικρότερες περιοχές με έντονη βροχόπτωση όπου παράγονται βαθιές διαλείψεις (οι λεγόμενοι “βροχοπυρήνες”). Χαρακτηριστικό αυτών των περιοχών είναι ότι εκτείνονται σε έκταση λίγων δεκάδων χιλιομέτρων, στοιχείο που εκμεταλλεύεται η διαφορική λήψη όδευσης απομακρύνοντας τους σταθμούς, εκπομπής ή λήψης ανάλογα, κατά μία απόσταση της αυτής τάξης μεγέθους [21]. Συνεπώς, ακόμα και εάν κάποιος σταθμός περιβάλλεται από ένα βροχοπυρήνα, υπάρχει πάντοτε αποσυσχέτιση στις αποσβέσεις κατά μήκος των διαφορετικών ραδιοζεύξεων που προβλέπει η εφαρμογή της τεχνικής διαφορικής λήψης όδευσης.

3. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΛΟΓΩ ΒΡΟΧΗΣ

3.1 Περιγραφή του μέσου βροχής

Όπως αναφέρεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, η διάδοση μικροκυμάτων με συχνότητες άνω των 10GHz επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία μέσου βροχής. Η βροχή είναι μια τυχαία χωροχρονική διαδικασία με έντονη ανομοιογένεια και επομένως μπορεί να μελετηθεί μόνο με χρήση στατιστικής ανάλυσης. Το μέσο βροχής αποτελείται από σταγόνες τυχαίου σχήματος και μεγέθους με μορφή που μοιάζει με πεπλατυσμένο σφαιροειδές. Κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης οι σταγόνες εμφανίζουν μία τυχαία γωνία κλίσης ως προς τον ορίζοντα (canting angle) στην οποία οφείλεται η αποπόλωση των μικροκυμάτων [21].

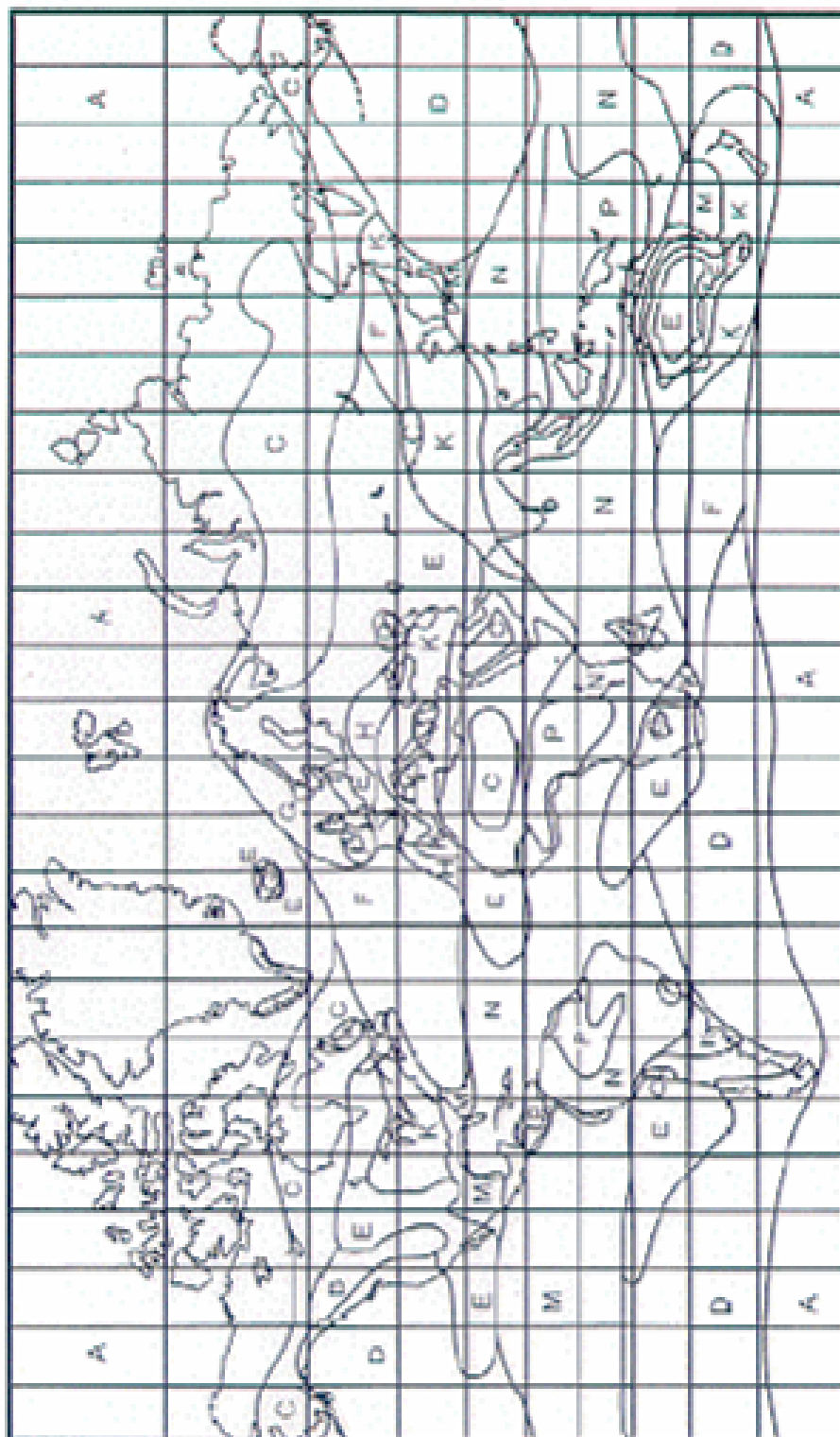
Η σημειακή ένταση βροχόπτωσης R ορίζεται ως το ύψος του νερού που φθάνει στη γη ανά μονάδα χρόνου και μετριέται σε mm/hr. Κατά τη διάρκεια της βροχής, η ένταση βροχόπτωσης R είναι μια τυχαία χωροχρονική διαδικασία που δύναται να μελετηθεί μόνο με εφαρμογή στατιστικής ανάλυσης. Για τον προσδιορισμό της κατανομής της R χρησιμοποιούμε κατάλληλα δίκτυα βροχομετρητών. Η πλειονότητα των μετρήσεων που έχουν γίνει, δείχνουν ότι οι κατανομές μικρού χρονικού διαστήματος της σημειακής έντασης βροχόπτωσης διαφέρουν από μετρητή σε μετρητή. Αυτό βέβαια δεν σχετίζεται με τη χωρική ανομοιογένεια της βροχής αλλά επιβάλλει ωστόσο τη γνώση της στατιστικής συμπεριφοράς μακρού χρονικού διαστήματος της σημειακής έντασης βροχόπτωσης. Ο λόγος είναι ότι οι κατανομές μακρού χρονικού διαστήματος για διάφορα σημεία που αναφέρονται σε μία συγκεκριμένη περιοχή έχει πειραματικά επιβεβαιωθεί ότι συγκλίνουν σε μια ενιαία τιμή [21].

Η γνώση της κατανομής της τ.μ. της σημειακής έντασης βροχόπτωσης R σε κάθε περιοχή είναι απαραίτητη για τη σχεδίαση μιας ραδιοζεύξης που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz κι ως εκ τούτου και για τη μελέτη και σχεδίαση μιας ζεύξης ενός συστήματος LMDS. Παρακάτω δίνονται δύο διαφορετικοί τρόποι υπολογισμού των

παραμέτρων της κατανομής της τ.μ. R που έχει προτείνει ο ITU-R: μέσω των κλιματικών ζωνών και μέσω της νεότερης σύστασης των χαρτών βροχής.

- **Κλιματικές ζώνες:** Σε περιπτώσεις που δεν είναι διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα μετρήσεων, ο διεθνής τηλεπικοινωνιακός οργανισμός ITU-R έχει προτείνει διάφορες κλιματικές ζώνες (A,B, C, D, E, F, G, H, J, K, L, M, N, P), όπου ανάλογα με τα κλιματικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής η Γη χωρίζεται σε κλιματικές περιοχές, στο εύρος των οποίων η βροχή παρουσιάζει όμοια στατιστική συμπεριφορά (βλ. σχήμα 3.1). Σε καθεμία κλιματική ζώνη παρουσιάζεται η αθροιστική κατανομή υπέρβασης της R για διάφορα ποσοστά του χρόνου. Ωστόσο, δεν έχει προταθεί μέχρι στιγμής κάποιος συστηματικός τρόπος προσδιορισμού της στατιστικής κατανομής που περιγράφει το μέγεθος R. Γενικά το είδος της στατιστικής περιγραφής που προσεγγίζει καλύτερα τη σημειακή ένταση βροχόπτωσης R διαφοροποιείται σε κάθε κλιματική ζώνη. Έχει παρατηρηθεί, όμως, ότι η λογαριθμοκανονική κατανομή προσεγγίζει με μεγαλύτερη επιτυχία τα πειραματικά αποτελέσματα στις ζώνες D,E,F,H,K,L (περιοχές Ευρώπης και Βορείου Αμερικής) ενώ η κατανομή γάμμα στις κλιματικές ζώνες J,M,N,P,Q (περιοχές Νότιας Αμερικής, Ιαπωνίας και Αφρικής). Σε όλη την έκταση της παρούσας εργασίας ακολουθείται το λογαριθμοκανονικό μοντέλο για τη σημειακή ένταση βροχόπτωσης R. Στο σχήμα 3.1 δίνεται ο κατά ITU-R διαχωρισμός της γης σε κλιματικές ζώνες ενώ στο Παράρτημα E δίνονται οι αντίστοιχοι παράμετροι της λογαριθμοκανονικής κατανομής της τ.μ. R που τις χαρακτηρίζουν.

Σχήμα 3.1: Διαχωρισμός της γης σε καλιμαρικές ζώνες κατά ITU-R



- Χάρτες βροχής:** Πρόσφατα ο διεθνής τηλεπικοινωνιακός οργανισμός ITU-R πρότεινε ένα νέο μοντέλο για να μπορεί να παράγει κανείς το ρυθμό βροχόπτωσης που υπερβαίνεται για ένα δεδομένο ποσοστό του συνολικού χρόνου για μια δεδομένη τοποθεσία [Σύσταση ITU-R P. 837-3, 2001]. Ως εκ τούτου προτάθηκαν οι λεγόμενοι χάρτες βροχής (rainmaps), στους οποίους θεωρείται ότι η Γη έχει χωρισθεί σε τετραγωνάκια με εμβαδόν $1.5^\circ \times 1.5^\circ$. Το πλέγμα του γεωγραφικού πλάτους (latitude) είναι από $+90^\circ$ N έως -90° S με βήμα 1.5° ενώ το πλέγμα του γεωγραφικού μήκους (longitude) είναι 0° έως 360° με το ίδιο βήμα. Για κάθε ένα από αυτά τα σημεία παρουσιάζονται τιμές για ορισμένες παραμέτρους οι οποίες αναφέρονται σε 15 χρόνια δεδομένων του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μέσης Κλίμακας Πρόγνωσης Καιρικών Συνθηκών (European Center of Medium-range Weather Forecast, ECMWF) και παρέχονται με μορφή αρχείων κειμένου. Οι παράμετροι οι οποίοι χρησιμοποιούνται είναι

P_{r6} (%): πιθανότητα υπέρβασης εξάωρων βροχερών περιόδων

M_c (mm): ετήσιο ποσό βροχόπτωσης τύπου συνεκτικών βροχοπυρήνων (convective-type rain)

M_s (mm): ετήσιο ποσό βροχόπτωσης στρωσιγενούς τύπου (stratiform-type rain)

Από τις τιμές αυτές των στατιστικών παραμέτρων P_{r6} , M_c και M_s , με μία διαδικασία που περιγράφεται στο Παράρτημα Ε, υπολογίζεται ο ρυθμός βροχόπτωσης που υπερβαίνεται για ένα δεδομένο ποσοστό του συνολικού χρόνου και μια δεδομένη τοποθεσία.

Κλείνοντας το θέμα της περιγραφής του μέσου της βροχής θα πρέπει να τονισθεί ότι σημαντικό ρόλο για τον προσδιορισμό της απόσβεσης του σήματος που εισάγει η βροχή, παίζει η μακροσκοπική δομή της βροχής. Στην παρούσα εργασία υιοθετείται το πολύ διαδεδομένο μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων. Σύμφωνα με αυτό, η βροχή αποτελείται από μεμονωμένους βροχοπυρήνες, μέσα στους οποίους το στοχαστικό μέγεθος της σημειακής έντασης της βροχόπτωσης R εμφανίζει έντονη αυτοσυσχέτιση.

Τους πυρήνες αυτούς περιβάλλουν περιοχές στρωσιγενούς βροχής, όπου η ένταση R παραμένει σταθερή. Η έκταση των βροχοπυρήνων εξαρτάται από την περιοχή όπου σχηματίζονται και φθάνει μέχρι δεκάδες χιλιόμετρα. Από την άλλη πλευρά, για ασθενείς βροχοπτώσεις ($R < 10 \text{ mm/hr}$), η βροχή εμφανίζεται να έχει χωρική ομογένεια σε μεγάλη έκταση [21].

3.2 Ειδική απόσβεση

Η ειδική απόσβεση A_o (dB/km) ορίζεται ως η εξασθένηση ανά μονάδα μήκους που υφίσταται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα από ένα χωρικά ομογενές μέσο βροχής. Αν A (dB) είναι η συνολική απόσβεση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που οφείλεται στη βροχόπτωση, τότε ισχύει η εξής σχέση

$$A = \int_0^L A_o dl \quad (3.1)$$

όπου η ολοκλήρωση γίνεται κατά μήκος ενός απλού ραδιοβήματος μήκους L .

Ως “απλό ραδιοβήμα” ορίζεται το σύνολο των σημείων του χώρου μεταξύ κεραιών πομπού και δέκτη που συντελούν στη διάδοση της ενέργειας των μικροκυμάτων. Κατά τους Bodtmann και Ruthroff [1974] ο χώρος αυτός ταυτίζεται με το πρώτο ελλειψοειδές του Fresnel και κατά τη διάρκεια βροχής είναι γεμάτος με σταγόνες, ο αριθμός των οποίων είναι αύξουσα συνάρτηση της έντασης βροχόπτωσης R . Σε περίπτωση καταιγίδας η βροχή παρουσιάζει έντονη ανομοιογένεια ως προς την τιμή του R κατά μήκος ενός απλού ραδιοβήματος.

Επιπλέον, η ειδική απόσβεση συνδέεται με την ένταση βροχόπτωσης μέσω της σχέσης [Olsen et al, 1978]

$$A_o = aR^b \quad (3.2)$$

Στη σχέση αυτή τα a και b εξαρτώνται από τη συχνότητα f , το είδος της πόλωσης καθώς και από τους παράγοντες που περιγράφουν τη μικροσκοπική δομή του μέσου βροχής. Για χωρικά ομογενείς βροχοπτώσεις, η απόσβεση A_h που εισάγεται σε μήκος ζεύξης L προκύπτει ανάλογη του L και δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$A_h = aR^b \cdot L \quad (3.3)$$

Οι συντελεστές a και b υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις για κάθε μία από τις περιπτώσεις γραμμικής ή κυκλικής πόλωσης

$$a = \frac{[a_H + a_V + (a_H - a_V) \cdot \cos^2 \varphi \cdot \cos 2\tau]}{2} \quad (3.4)$$

$$b = \frac{a_H b_H + a_V b_V + (a_H b_H - a_V b_V) \cdot \cos^2 \varphi \cdot \cos(2\tau)}{2a} \quad (3.5)$$

όπου a_H , b_H , και a_V , b_V είναι οι αντίστοιχες τιμές των συντελεστών a , b για οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση, φ η γωνία ανύψωσης του ραδιοβήματος (δηλ. η γωνία με τον ορίζοντα και η οποία για την περίπτωση ζεύξης συστήματος LMDS λαμβάνεται ίση με $\varphi=0^\circ$) και τ η γωνία πόλωσης ως προς τον ορίζοντα ($\tau=45^\circ$ για κυκλική πόλωση, $\tau=90^\circ$ για κατακόρυφη πόλωση και $\tau=0^\circ$ για οριζόντια πόλωση).

Οι συντελεστές a_H , b_H και a_V , b_V μπορούν να υπολογισθούν κάνοντας κατάλληλες υποθέσεις για τη μικροσκοπική περιγραφή του μέσου της βροχής. Μια βασική υπόθεση είναι η κατανομή του μεγέθους της σταγόνας και η μορφή του σχήματος. Κατά την παρούσα ανάλυση λαμβάνονται υπόψη σφαιροειδείς σταγόνες και χρησιμοποιείται η κατανομή μεγέθους κατά Laws και Parsons η οποία προτείνεται από την ITU-R και έχει εφαρμογή σε περιοχές εύκρατων κλιμάτων για συχνότητες από 10GHz έως 30GHz. Συνεπώς, για την κατανομή αυτή και για τις θεωρούμενες συχνότητες, οι τιμές των a_H , b_H και a_V , b_V προσεγγίζονται από τους τύπους

$$\left. \begin{aligned} a_H &= 2.1114 \cdot 10^{-5} \cdot f^{2.71896} \\ a_V &= 1.6953 \cdot 10^{-5} \cdot f^{2.76183} \\ b_H &= 1.79764 - 0.23202 \cdot \ln f \\ b_V &= 1.83761 - 0.25536 \cdot \ln f \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

όπου τονίζεται ότι η συχνότητα f είναι εκφρασμένη σε GHz.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να τονισθεί ότι ο τρόπος υπολογισμού των a και b , στηρίζεται σε ένα σύνολο περιοριστικών παραδοχών σχετικών με τη μικροσκοπική δομή της βροχής. Η διεξαγωγή περισσότερων μετρήσεων σχετικών με τις παραμέτρους περιγραφής της μικροσκοπικής δομής του μέσου βροχής καθώς και η ανάπτυξη πιο αποτελεσματικών μεθόδων επίλυσης προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης είναι η μοναδική μεθοδολογία που ενδείκνυται, ώστε να αναπτυχθούν νέα και πιο ακριβή μοντέλα υπολογισμού των συντελεστών a και b .

3.3 Υπολογισμός της κατανομής απόσβεσης λόγω βροχής

Για τον υπολογισμό της απόσβεσης λόγω βροχής σε μία επίγεια ραδιοζεύξη ενός συστήματος LMDS, θα θεωρήσουμε ότι η τ.μ. A της απόσβεσης λόγω βροχής ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή. Και αυτό διότι, σύμφωνα με το μοντέλο του Lin [1975], το οποίο έχει εφαρμογή για περιοχές της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής, αμφότερα τα μεγέθη σημειακής έντασης βροχόπτωσης R και απόσβεσης λόγω βροχής A ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή. Η παραδοχή αυτή δεν αποδεικνύεται με αναλυτική αυστηρότητα. Τα θεωρητικά αποτελέσματα, όμως, προσεγγίζουν με μεγάλη επιτυχία τις πειραματικές μετρήσεις, όπου αυτές είναι διαθέσιμες. Συνεπώς ενισχύεται η διαισθητική ορθότητα της παραπάνω παραδοχής και συνίσταται η χρήση της. Σκοπός λοιπόν είναι να προσδιορισθούν οι παράμετροι A_m και S_a της λογαριθμοκανονικής κατανομής της απόσβεσης για μια επίγεια ζεύξη μήκους L . Για την ανάλυση που ακολουθεί λαμβάνεται υπόψη ότι η κατανομή της τ.μ. R έχει τις ίδιες παραμέτρους R_m και S_r σε όλη την περιοχή της ζεύξης, οι οποίες υπολογίζονται βάσει της νεότερης σύστασης των χαρτών βροχής της ITU-R με τη μεθοδολογία που αναπτύσσεται στο Παράρτημα Ε.

Η μέση τιμή μ_0 και η τυπική απόκλιση σ_0 της τ.μ. A_0 δίνονται από τις σχέσεις

$$\mu_0 = E[A_0] = \alpha E[R^b] = \alpha \cdot m_b \quad (3.7)$$

$$\sigma_0^2 = E[A_0^2] - \mu_0^2 = \alpha^2 E[R^{2b}] - \alpha^2 m_b^2 = \alpha^2 \cdot (m_{2b} - m_b^2) \quad (3.8)$$

όπου m_k η ροπή k τάξης της τ.μ. R .

Από τη σχέση (3.2) υπολογίζεται η μέση τιμή μ_a της απόσβεσης A λόγω βροχής κατά μήκος της ζεύξης

$$\mu_a = E[A] = E\left[\int_0^L A_0 dl\right] = \int_0^L E[A_0] \cdot dl = \mu_0 \cdot L \quad (3.9)$$

Για την τυπική απόκλιση σ_a της τ.μ. A προκύπτει

$$\sigma_a^2 = E[A^2] - \mu_a^2 = E\left[\int_0^L A_0(l_1) dl_1 \cdot \int_0^L A_0(l'_1) dl'_1\right] - \mu_a^2 = \int_0^L \int_0^L E[A_0(l_1) \cdot A_0(l'_1)] dl_1 dl'_1 - \mu_a^2 \quad (3.10)$$

όπου $A_0(l_1)$, $A_0(l'_1)$ οι τιμές της ειδικής απόσβεσης σε δύο σημεία της διαδρομής που απέχουν από την αρχή της ζεύξης αποστάσεις l_1 και l'_1 αντίστοιχα.

Στην περίπτωση καταγιίδας η βροχή παρουσιάζει έντονη ανομοιογένεια ως προς την τιμή του R κατά μήκος της διαδρομής του σήματος. Συνεπώς ορίζεται ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης ρ_1

$$\rho_1 = \frac{E[A_0(l_1) \cdot A_0(l'_1)] - \mu_0^2}{\sigma_0^2} \quad (3.11)$$

που περιγράφει την οριζόντια μεταβολή της δομής της βροχής.

Σημειώνεται ότι θεωρώντας τη βροχή χωρικά στάσιμη στοχαστική διαδικασία, ισχύει

$$\rho_1(l_1, l'_1) = \rho_1(|l_1 - l'_1|) = \rho_1(d) \quad (3.12)$$

όπου d η απόσταση μεταξύ των δύο σημείων που βρίσκονται κατά μήκος της διαδρομής.

Συνεπώς η σχέση (3.10) με τη βοήθεια της (3.12) γίνεται

$$\sigma_\alpha^2 = \sigma_0^2 \int_0^L \int_0^L \rho_1(l_1, l'_1) dl_1 dl'_1 + \mu_0^2 L^2 - \mu_\alpha^2 = \sigma_0^2 \cdot H_1 \quad (3.13)$$

$$\text{όπου έχει } H_1 = \int_0^L \int_0^L \rho_1(l_1, l'_1) dl_1 dl'_1 \quad (3.14)$$

Συνεπώς, η τυπική απόκλιση της απόσβεσης A θα ισούται με

$$\sigma_\alpha^2 = \sigma_0^2 \cdot H_1 \quad (3.15)$$

Σύμφωνα και πάλι με το ίδιο μοντέλο του Lin [1975], ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης δίνεται από τη σχέση

$$\rho_1(d) = \begin{cases} \frac{G}{\sqrt{G^2 + d^2}} & d \leq D_r \\ \frac{G}{\sqrt{G^2 + D_r^2}} & d > D_r \end{cases} \quad (3.16)$$

όπου G (km) και D_r (km) είναι σταθερές εξαρτώμενες από τη μακροσκοπική δομή του μέσου βροχής της υπό μελέτη γεωγραφικής περιοχής. Ειδικά η σταθερά D_r (km) αντιστοιχεί στη μέγιστη διάσταση του βροχοπυρήνα.

Αντικαθιστώντας τη σχέση (3.16) στη σχέση (3.14), μπορεί να υπολογισθεί το μέγεθος H_1 το οποίο, όπως αποδεικνύεται στο Παράρτημα Α, δίνεται από τη σχέση

$$H_1 = \begin{cases} 2 \cdot L \cdot G \cdot \sinh^{-1}\left(\frac{L}{G}\right) + 2 \cdot G^2 \cdot \left[1 - \sqrt{\left(\frac{L}{G}\right)^2 + 1}\right] & L \leq D_r \\ 2 \cdot L \cdot G \cdot \sinh^{-1}\left(\frac{D_r}{G}\right) + 2 \cdot G^2 \cdot \left[1 - \sqrt{\left(\frac{D_r}{G}\right)^2 + 1}\right] + \frac{G \cdot (L - D_r)^2}{\sqrt{G^2 + D_r^2}} & L > D_r \end{cases} \quad (3.17)$$

Οι πρακτικές τιμές που λαμβάνει η παράμετρος G κυμαίνονται στο διάστημα μεταξύ 0.75km-3km ενώ η διάσταση του βροχοπυρήνα D_r κυμαίνεται συνήθως από 15km έως 30km.

Αν υποθεθεί ότι R_m , S_r είναι οι παράμετροι της λογαριθμοκανονικής κατανομής της σημειακής έντασης βροχόπτωσης R , οι ροπές της τ.μ. R προκύπτουν ίσες με

$$m_b = R_m^b \exp\left(\frac{b^2 S_r^2}{2}\right) \quad (3.18)$$

$$m_{2b} = R_m^{2b} \exp(2b^2 S_r^2) \quad (3.19)$$

Αν A_m , S_a είναι οι παράμετροι της λογαριθμοκανονικής κατανομής της τ.μ. A της απόσβεσης λόγω βροχής, τότε η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της θα είναι

$$\mu_a = A_m \cdot \exp\left(\frac{S_a^2}{2}\right) \quad (3.20)$$

$$\sigma_a^2 = A_m^2 \cdot \exp(S_a^2) \cdot [\exp(S_a^2) - 1] \quad (3.21)$$

Οι σχέσεις (3.18)-(3.21) αποδεικνύονται στο Παράρτημα Β.

Οι δυο τελευταίες σχέσεις (3.20) και (3.21) μαζί με τις σχέσεις (3.9) και (3.15) αποτελούν ένα σύστημα εξισώσεων με αγνώστους τα A_m και S_a^2 . Επιλύοντας το σύστημα προκύπτει ότι

$$S_a^2 = \ln \left[1 + \frac{H_1}{L^2} \cdot [\exp(b^2 S_r^2) - 1] \right] \quad (3.22)$$

$$A_m = \alpha \cdot R_m^b \cdot L \cdot \exp \left(\frac{b^2 \cdot S_r^2 - S_a^2}{2} \right) \quad (3.23)$$

Οι παραπάνω σχέσεις δίνουν τις παραμέτρους A_m και S_a της λογαριθμοκανονικής κατανομής της τ.μ. A της απόσβεσης λόγω βροχής δεδομένων των παραμέτρων R_m , S_r της τ.μ. R και των παραμέτρων α , b , L , H_1 .

Δεδομένων των παραμέτρων A_m και S_a , η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τ.μ. A είναι

$$f_A(A) = \frac{1}{S_a \cdot A \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(\ln A - \ln A_m)^2}{2 \cdot S_a^2} \right] \quad (3.24)$$

Όπως αποδεικνύεται στο Παράρτημα Β, η τ.μ. U , όπου

$$U = \frac{\ln A - \ln A_m}{S_a} \quad (3.25)$$

ακολουθεί την τυπική κανονική κατανομή $N(\mu=0, \sigma=1)$.

4. ΤΕΧΝΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΛΗΨΗΣ ΚΕΛΙΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ LMDS

4.1 Γενικά

Η ανάγκη αύξησης των μεγεθών διαθεσιμότητας και αξιοπιστίας των ευρυζωνικών ασύρματων συστημάτων σταθερής πρόσβασης καθώς και η απαίτηση για λειτουργία υπό χαμηλά περιθώρια διάλειασης οδηγούν στην ανάπτυξη τεχνικών διαφορικής λήψης. Τα συστήματα διαφορικής προστασίας βρίσκουν εφαρμογή σε δύο περιπτώσεις:

- Σε περιοχές με υψηλή ενυδρότητα ή σε περιοχές υποτροπικών και τροπικών κλιμάτων που χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές έντασης βροχόπτωσης (π.χ. κλιματικές ζώνες M, N, P, Q) και όπου τα συστήματα LMDS λειτουργούν με υψηλές τιμές διαθεσιμότητας στη ζώνη συχνοτήτων των 25GHz ή σε ακόμα υψηλότερες συχνότητες.
- Σε άνυδρες περιοχές (π.χ. Αγγλία, Νορβηγία, Καναδάς) όπου συναντάται το μοντέλο της στρωσιγενούς βροχής, δηλαδή μεγάλης διάρκειας βροχόπτωση με σταθερή, χαμηλή ένταση (μέχρι 10-14mm/h), και τα συστήματα LMDS λειτουργούν με σχετικά χαμηλές τιμές διαθεσιμότητας στη ζώνη συχνοτήτων των 42GHz [25].

Στις παραπάνω περιοχές, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι υψηλές προδιαγραφές διαθεσιμότητας και αξιοπιστίας των συστημάτων LMDS είναι αναγκαίο είτε να υιοθετηθούν μεγάλα περιθώρια διάλειασης λόγω βροχής είτε να χρησιμοποιηθεί η τεχνική διπλής ή ακόμα και τριπλής διαφορικής λήψης σε περιοχές με εξαιρετικά επιβαρημένες κλιματικές συνθήκες ως προς τη βροχόπτωση. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο μελετάται η τεχνική της διαφορικής λήψης κελιού στα κυψελωτά συστήματα LMDS για την αντιμετώπιση των διαλείψεων λόγω βροχής, ενώ όπως προκύπτει βάσει αποτελεσμάτων

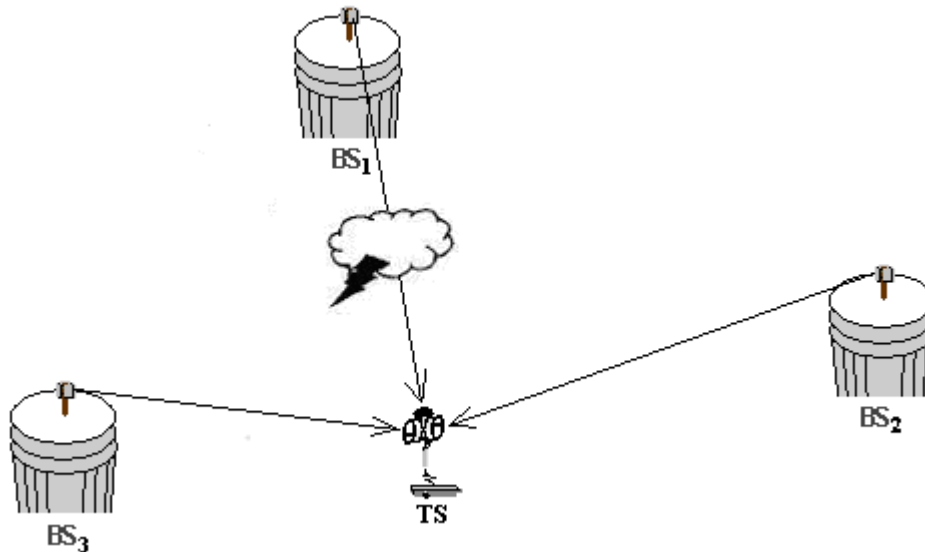
προσομοίωσης, η ίδια τεχνική κρίνεται εξίσου αποτελεσματική στην αντιμετώπιση προβλημάτων παρεμβολών.

Σύμφωνα με αυτή, ο τερματικός σταθμός χρήστη (Terminal Station, TS) λαμβάνει σήμα ταυτόχρονα από δύο ή και περισσότερους σταθμούς βάσης (Base Stations, BS) του συστήματος, οπότε ανάλογα εφαρμόζεται διπλή ή πολλαπλή διαφορική προστασία, αντίστοιχα. Η αποτελεσματικότητα της τεχνικής αυτής έγκειται στο γεγονός ότι κάθε χρονική στιγμή η απόσβεση λόγω βροχής εμφανίζει διαφορετικές τιμές στις εναλλακτικές οδεύσεις του ραδιοκύματος. Έτσι, παρέχεται η δυνατότητα στο δέκτη του τερματικού χρήστη να επιλέξει το σήμα με τον υψηλότερο σηματοθορυβικό λόγο και άρα με τη μικρότερη απόσβεση λόγω βροχής.

Κατά τη διάδοση του ραδιοκύματος οι χειρότερες περιπτώσεις διαλείψεων λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια βροχής συνεκτικού τύπου (convective rain), οπότε θεωρείται πιθανό το ενδεχόμενο το εκπεμπόμενο σήμα να διέρχεται μέσα από κάποιον βροχοπυρήνα. Η περίπτωση να τέμνονται περισσότεροι του ενός βροχοπυρήνες είναι συνήθης στις επίγειες μικροκυματικές επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων όπου συναντώνται μηδενικές γωνίες ανύψωσης και άρα το σήμα βρίσκεται για μεγάλο διάστημα μέσα στο μέσο βροχής κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων. Ωστόσο, στην περίπτωση των συστημάτων LMDS, οι αποστάσεις που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς είναι γενικά μικρότερες από τη μέγιστη διάσταση βροχοπυρήνα (βλ. σταθερά D_r , Κεφάλαιο 3) με αποτέλεσμα να θεωρείται ότι τέμνεται μόνο ένας βροχοπυρήνας. Η ανομοιογένεια στο εσωτερικό των βροχοπυρήνων δεν αναιρεί πλήρως την ισχυρή συσχέτιση της έντασης βροχόπτωσης και της απόσβεσης λόγω βροχής που χαρακτηρίζει τον ηπιότερο, από πλευράς ρυθμών βροχόπτωσης, στρωσιγενή τύπο βροχής. Κάποιος βαθμός συσχέτισης της απόσβεσης ανάμεσα σε δύο σημεία του βροχοπυρήνα είναι υπαρκτός, όταν η μεταξύ τους απόσταση είναι μικρή. Όσο μεγαλώνει η απόσταση αυτή, οι τιμές της έντασης βροχόπτωσης και της απόσβεσης αποσυσχετίζονται προοδευτικά [21]. Τις χωρικές αυτές ιδιότητες του πλέον δυσμενούς για τις τηλεπικοινωνίες συνεκτικού τύπου βροχής εκμεταλλεύεται η τεχνική διαφορικής λήψης κελιού, με εναλλακτικούς ραδιοδρόμους υπό όσο το δυνατό μεγαλύτερη γωνία μεταξύ τους, ώστε ο βροχοπυρήνας είτε να παρακάμπτεται εντελώς είτε, τουλάχιστον, να εισάγει αποσβέσεις που παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά τιμών μεταξύ τους. Έτσι, αν το

τερματικό κάποιου χρήστη είναι σε θέση να συνδέεται με δύο ή περισσότερους σταθμούς βάσης και ανά πάσα στιγμή να επιλέγει το ισχυρότερο σήμα υπάρχει μεγάλη πιθανότητα κατά τη διάρκεια μιας βροχοπτώσης τουλάχιστον ένας από τους ραδιοδιαύλους να μην είναι ιδιαίτερα επιβαρημένος από τη βροχή και να μην υπερβαίνεται έτσι η επιτρεπτή στάθμη διαλείψεων.

Η αρχή της τεχνικής διαφορικής λήψης κελιού απεικονίζεται στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Τεχνική διαφορικής λήψης κελιού

Με τον τρόπο αυτό, η διαθεσιμότητα και η αξιοπιστία του συστήματος βελτιώνονται σημαντικά. Επιπλέον, τα χαμηλά περιθώρια διάλειψης και οι χαμηλές στάθμες εκπεμπόμενης ισχύος που επιτυγχάνονται επιτρέπουν τη συνύπαρξη, από άποψη ανοχής παρεμβολών, των δορυφορικών με τα γειτονικά επίγεια μικροκυματικά συστήματα σε περιοχές όπου πρέπει να εγκατασταθούν το ένα με το άλλο. Ειδικά με τη συνύπαρξη, από άποψη ανοχής παρεμβολών, των διαφόρων ασύρματων επίγειων μικροκυματικών συστημάτων ασχολείται το επόμενο κεφάλαιο στο οποίο προτείνεται αναλυτικό μοντέλο πρόβλεψης της βελτίωσης του λόγου φέροντος σήματος προς παρεμβολή (C/I) που αφορά ένα σύστημα LMDS διπλής διαφορικής λήψης το οποίο υφίσταται παρεμβολή από γειτονικό επίγειο σταθμό βάσης. Στο παρόν κεφάλαιο, και συγκεκριμένα στην παράγραφο §4.4 αυτού, μελετάται μέσω προσομοίωσης η επίδοση ενός συστήματος LMDS που υποφέρει από διαλείψεις λόγω βροχής και από παρεμβολές

γειτονικών σταθμών βάσης του ίδιου συστήματος καθώς, επίσης, και η εφαρμογή της τεχνικής διαφορικής λήψης κελιού για την μείωση της επίδρασης των παρεμβολών.

Στο σημείο αυτό, αναφέρεται ότι για να μπορεί να υποστηριχθεί η τεχνική διαφορικής λήψης κελιού στα συστήματα LMDS και να διατηρεί ο δέκτης του τερματικού σταθμού ενός χρήστη παράλληλες συνδέσεις με περισσότερους του ενός σταθμούς βάσης, πρέπει να χρησιμοποιείται κατάλληλος εξοπλισμός κεραιών από τη πλευρά του χρήστη [23]. Συγκεκριμένα, η τεχνική είναι εφικτή είτε με χρήση ισάριθμων κεραιών από την πλευρά του χρήστη είτε με χρήση μιας ευφυούς κεραιάς (Smart Antenna), που θα στρέφει κατάλληλα τον κύριο λοβό ακτινοβολίας της προς το σταθμό βάσης για τον οποίο προκύπτει η μικρότερη απόσβεση λόγω βροχής. Μέχρι στιγμής μόνο η χρήση περισσοτέρων της μιας κεραιάς στην πλευρά του δέκτη είναι ήδη εφικτή και σε θέση να παρέχει πρακτική υλοποίηση της τεχνικής διαφορικής λήψης κελιού. Αντίθετα, η τεχνολογία των ευφύων κεραιών βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο, γεγονός που θέτει περιορισμούς στην εκτεταμένη χρήση τους ως βασική μονάδα του εξοπλισμού CPE των χρηστών ενός συστήματος LMDS. Η ωρίμανση της εκτιμάται ότι θα συντελέσει κατά πολύ στην εξάπλωση των ευρυζωνικών συστημάτων ασύρματης σταθερής πρόσβασης καθώς είναι σε θέση να αυξήσει τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα υπηρεσίας αυτών [17].

Τέλος αναφέρεται ότι στην περίπτωση των κυψελωτών συστημάτων LMDS, η χρήση της διαφορικής λήψης κελιού ενδέχεται να προκαλέσει την αύξηση του φορτίου τηλεπικοινωνιακής κίνησης (traffic payload) στη νέα κυψέλη, που εξυπηρετείται από το σταθμό βάσης στον οποίο γίνεται η μεταπομπή (switch-over) [27]. Για το λόγο αυτό, πρέπει να λαμβάνεται ειδική μέριμνα κατά τη σχεδίαση του συστήματος ώστε να αποφεύγονται παρόμοια προβλήματα υπερφόρτωσης κίνησης σε μια κυψέλη. Σε καμμία όμως περίπτωση, το ενδεχόμενο αυτό πρόβλημα δεν συγκρίνεται με τη σημαντική βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας, που παρέχεται σε κάθε χρήστη της ευρύτερης περιοχής εξυπηρέτησης του συστήματος LMDS, καθώς και την αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος υπό μικρότερα περιθώρια διαλείψεων.

4.2 Υπολογισμός περιθωρίων διάλειψης λόγω βροχής

4.2.1 Σύστημα απλής λήψης

Ένα επίγειο σύστημα LMDS απλής λήψης του οποίου η ζεύξη του TS με το BS λειτουργεί με περιθώριο διάλειψης λόγω βροχής M_s (dB) τίθεται εκτός λειτουργίας στο ποσοστό του χρόνου που καθορίζεται από την πιθανότητα

$$P_{out,s} = 1 - Availability = P(A_C > M_s) \quad (4.1)$$

όπου

Availability είναι η διαθεσιμότητα του συστήματος (π.χ. 99.99%) και A_C η τ.μ. της απόσβεσης λόγω βροχής που υφίσταται το φέρον σήμα.

Αν θεωρηθεί ότι η σημειακή ένταση βροχόπτωσης καθώς και η απόσβεση που επιφέρει ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή, τότε, αν A_m και S_a είναι οι παράμετροι της τ.μ. A_C (βλ. Κεφάλαιο 3), προκύπτει

$$P_{out,s} = P(A_C > M_s) = \int_{M_s}^{+\infty} dx f_{A_C}(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{u_s}{\sqrt{2}}\right) \quad (4.2)$$

$$\text{όπου } u_s = \frac{\ln(M_s) - \ln(A_m)}{S_a} \quad (4.3)$$

Το προηγούμενο αποτέλεσμα προκύπτει με χρήση των ιδιοτήτων της λογαριθμοκανονικής κατανομής που περιγράφονται στο Παράρτημα Β.

Προφανώς, το μέγεθος $P_{out,s}$ εκφράζει το λόγο της διάρκειας σε ένα έτος όπου το σύστημα απλής λήψης τίθεται εκτός λειτουργίας προς τη συνολική διάρκεια ενός έτους.

Ισχύει

$$P_{out,s} = \frac{T_{out,s}(\text{min})}{525600} \Leftrightarrow T_{out,s}(\text{min}) = 525600 \cdot P_{out,s} \quad (4.4)$$

Στην περίπτωση όπου δίνεται το περιθώριο διάλειψης λόγω βροχής M_s (dB), υπολογίζεται η διάρκεια $T_{out,s}$ με βάση την ανωτέρω σχέση. Αντίστροφα, αν είναι γνωστή η διαθεσιμότητα του συστήματος και είναι επιθυμητός ο υπολογισμός του περιθωρίου διάλειψης λόγω βροχής M_s (dB), απαιτείται η λύση της υπερβατικής εξίσωσης (4.2) η οποία, με βάση την (4.3), δίνει ως αποτέλεσμα

$$M_s = A_m \cdot \exp\left(\sqrt{2} \cdot \operatorname{erfc}^{-1}(2 \cdot P_{out,s}) \cdot S_a\right) \quad (4.5)$$

4.2.2 Σύστημα διπλής διαφορικής προστασίας

Ένα επίγειο σύστημα LMDS διπλής διαφορικής λήψης κελιού στο οποίο κάθε ζεύξη του TS με τον αντίστοιχο BS_i (i=1,2) λειτουργεί με αντίστοιχο περιθώριο διάλειψης λόγω βροχής M_{di} (dB) (i=1,2) τίθεται εκτός λειτουργίας σε ποσοστό του χρόνου που καθορίζεται από την πιθανότητα

$$P_{out,d} = 1 - Availability = P(A_{C1} > M_{d1}, A_{C2} > M_{d2}) \quad (4.6)$$

όπου

Availability είναι η διαθεσιμότητα του συστήματος (π.χ. 99.99%) και A_{Ci} (i=1,2) οι τ.μ. των αποσβέσεων λόγω βροχής στα φέροντα σήματα καθεμίας από τις δύο ζεύξεις που διατηρεί το TS με τον αντίστοιχο BS_i (i=1,2).

Αν θεωρηθεί ότι η σημειακή ένταση βροχόπτωσης καθώς και η απόσβεση που επιφέρει ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή (βλ. Κεφάλαιο 3), οι τ.μ. A_{C1} και A_{C2} ακολουθούν τη δισδιάστατη από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους A_{m1}, S_{a1} και A_{m2}, S_{a2}, αντίστοιχα, και συντελεστή συσχέτισης $\rho_{A_{C1}A_{C2}}$. Με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύσσεται στο Παράρτημα Γ και αφορά τη δισδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή, προκύπτει

$$P_{out,d} = P(A_{C1} > M_{d1}, A_{C2} > M_{d2}) = \int_{M_{d1}}^{+\infty} dy_1 \int_{M_{d2}}^{+\infty} dy_2 f_{A_{C1}A_{C2}}(y_1, y_2) = \int_{u_{d1}}^{+\infty} du_1 f_{U1}(u_1) \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{u_{d2} - \rho_n u_1}{\sqrt{2 \cdot (1 - \rho_n^2)}} \right) \quad (4.7)$$

όπου

$$u_{di(i=1,2)} = \frac{\ln(M_{di}) - \ln(A_{mi})}{S_{ai}} \quad (4.8)$$

$$f_{U1}(u_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left(-\frac{u_1^2}{2} \right) \quad (4.9)$$

και ρ_n ο λογαριθμικός συντελεστής συσχέτισης του ζεύγους των από κοινού κανονικών τ.μ. $\ln(A_{C1})$ και $\ln(A_{C2})$ που υπολογίζεται με τη βοήθεια του χωρικού συντελεστή συσχέτισης $\rho_{A_{C1}A_{C2}}$ του ζεύγους των από κοινού λογαριθμοκανονικών τ.μ. A_{C1} και A_{C2}, μέσω της σχέσης (Γ.22) του Παραρτήματος Γ.

Το μέγεθος $P_{out,d}$, όπως στην περίπτωση απλής λήψης, εκφράζει το λόγο της διάρκειας σε ένα έτος όπου το σύστημα διπλής λήψης τίθεται εκτός λειτουργίας προς τη συνολική διάρκεια ενός έτους. Συνεπώς, ισχύει

$$P_{out,d} = \frac{T_{out,d}(\text{min})}{525600} \Leftrightarrow T_{out,d}(\text{min}) = 525600 \cdot P_{out,d} \quad (4.10)$$

Για δεδομένα περιθώρια διάλειψης λόγω βροχής M_{di} (dB) ($i=1,2$) σε καθεμία από τις δύο ραδιοζεύξεις, υπολογίζεται η αντίστοιχη διάρκεια $T_{out,d}$ μέσω της σχέσης (4.10), ενώ για το αντίστροφο πρόβλημα απαιτείται η λύση (ως προς M_{di} ($i=1,2$)) της υπερβατικής εξίσωσης που απορρέει από τη σχέση (4.7) και είναι

$$P_{out,d} - \int_{u_{d2}}^{+\infty} du_1 f_{U_1}(u_1) \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{u_{d1} - \rho_n u_1}{\sqrt{2 \cdot (1 - \rho_n^2)}} \right) = 0 \Leftrightarrow F(M_{d1}, M_{d2}) = 0 \quad (4.11)$$

Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναλυθεί περαιτέρω η έννοια του ισοσταθμισμένου συστήματος διαφορικής λήψης (balanced diversity system). Αυστηρά οριζόμενο, ένα σύστημα διαφορικής λήψης καλείται ισοσταθμισμένο όταν τα σήματα που διαδίδονται στους εναλλακτικούς ραδιοδρόμους έχουν τον ίδιο σηματοθορυβικό λόγο. Επομένως, ένα ισοσταθμισμένο σύστημα προϋποθέτει ότι οι κόμβοι του (σταθμοί βάσης και τερματικά χρηστών) διαθέτουν πανομοιότυπες κεραιές και RF εξοπλισμό. Εκτός των προϋποθέσεων σε επίπεδο εξοπλισμού, σε ένα πραγματικά ισοσταθμισμένο σύστημα είναι απαραίτητο οι συνθήκες διάδοσης για το σύνολο των εναλλακτικών οδεύσεων του ραδιοκύματος να είναι κοινές. Αυτό ισοδυναμεί με ίδιες κατανομές υπέρβασης της απόσβεσης για καθένα από τους εναλλακτικούς ραδιοδρόμους και ίσα μήκη αυτών.

Συνεπώς, στην περίπτωση όπου τα μήκη των δύο ραδιοζεύξεων είναι ίσα ($L_1=L_2$), το θεωρούμενο σύστημα είναι ισοσταθμισμένο και το περιθώριο διάλειψης λόγω βροχής M_d (dB) είναι κοινό για τις δύο ραδιοζεύξεις και υπολογίζεται με λύση της υπερβατικής εξίσωσης (4.11) θεωρώντας κοινές παραμέτρους $u_{di(i=1,2)}$ ($u_d=u_{d1}=u_{d2}$). Στη γενική, όμως, περίπτωση όπου ισχύει $L_1 \neq L_2$ για τα μήκη των δύο ραδιοζεύξεων (βλ. σχήμα 4.2), οι συνθήκες διάδοσης για το σύνολο των εναλλακτικών οδεύσεων του ραδιοκύματος δεν είναι κοινές και ως εκ τούτου οι λογαριθμοκανονικές τ.μ. A_{C1}, A_{C2} δεν μπορούν να θεωρηθούν ισόνομες. Συνεπώς, το θεωρούμενο σύστημα διπλής διαφορικής προστασίας θεωρείται μη ισοσταθμισμένο. Το πρόβλημα στη συγκεκριμένη περίπτωση έγκειται στον

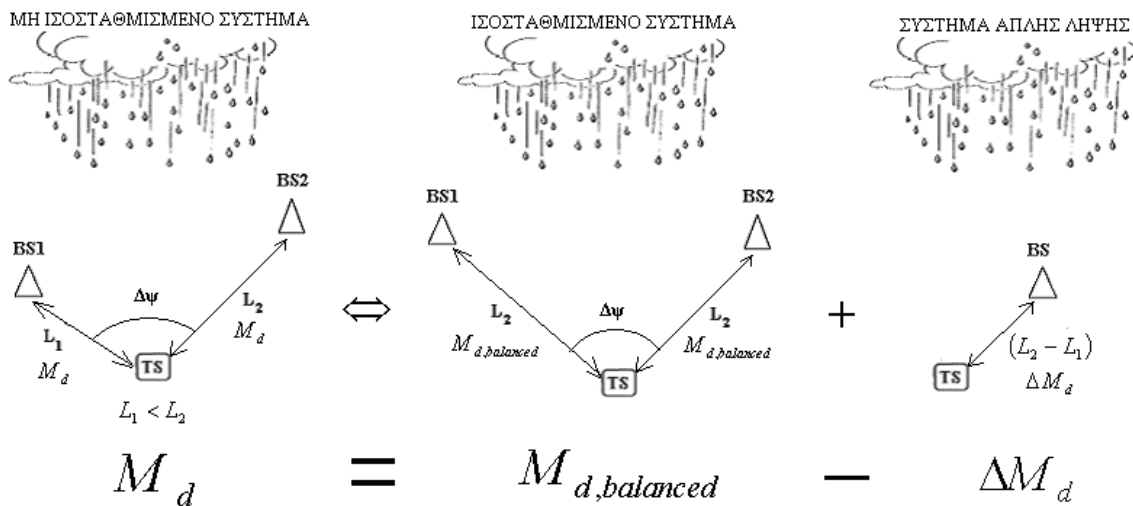
υπολογισμό του περιθωρίου διάλειψης λόγω βροχής M_d (dB) που θα χρησιμοποιηθεί για την εύρεση της διάρκειας $T_{out,d}$ του συστήματος.

Στην παρούσα εργασία ακολουθείται ο τρόπος υπολογισμού του M_d (dB) που προτείνεται στην [26] και αποτελεί έναν τρόπο υποεκτίμησης (underestimation) του M_d (dB). Σύμφωνα με αυτόν, το περιθώριο διάλειψης λόγω βροχής σε ένα μη ισοσταθμισμένο σύστημα διπλής διαφορικής λήψης αποτελείται από δύο όρους: τον όρο $M_{d,balanced}$ που αναφέρεται στην περίπτωση ισοσταθμισμένου συστήματος και υπολογίζεται κατά τα γνωστά με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω, και τον όρο ΔM_d που αναφέρεται στο διαφορικό περιθώριο διάλειψης λόγω βροχής ενός συστήματος απλής λήψης με ραδιοζεύξη μήκους $L=|L_2-L_1|$. Συνεπώς, ισχύει

$$M_d (dB) = M_{d,balanced} + \Delta M_d \tag{4.12}$$

Το ΔM_d υπολογίζεται εύκολα με βάση τη σχέση (4.5) ενώ το πρόσημό του εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ των μηκών L_1 και L_2 . Συγκεκριμένα ισχύει

$$\Delta M_d = \begin{cases} +M_d & , L_1 > L_2 \\ -M_d & , L_1 < L_2 \end{cases} \tag{4.13}$$



Σχήμα 4.2: Τρόπος υπολογισμού του M_d (dB)

4.3 Διαφορικό κέρδος και διαφορικό πλεονέκτημα

Στη συνέχεια, θεωρείται ένα επίγειο σύστημα LMDS το οποίο δεν υποφέρει από παρεμβολές γειτονικών επίγειων σταθμών βάσης και στο οποίο εφαρμόζεται η διπλή διαφορική λήψη κελιού ως αντίμετρο για τις διαλείψεις λόγω βροχής. Είναι επιθυμητός ο υπολογισμός της βελτίωσης που προέρχεται από το σχήμα διπλής διαφορικής προστασίας σε σχέση με την απλή λήψη, σε όρους απόσβεσης και πιθανότητας υπέρβασης μίας δεδομένης στάθμης απόσβεσης λόγω βροχής αντίστοιχα. Για το λόγο αυτό, με βάση τους ορισμούς των περιθωρίων διαλείψεων λόγω βροχής M_s , M_d (dB) και των πιθανοτήτων υπέρβασης $P_{out,s}$ και $P_{out,d}$ που δόθηκαν στην προηγούμενη ενότητα για την απλή και διπλή λήψη αντίστοιχα, παραθέτονται οι ορισμοί του Διαφορικού Κέρδους και Διαφορικού Πλεονεκτήματος.

Το Διαφορικό Κέρδος CSDG (Cell-Site Diversity Gain) ορίζεται ως η διαφορά σε dB του περιθωρίου διάλειψης M_d στη διπλή διαφορική λήψη κελιού από το περιθώριο διάλειψης M_s στην απλή λήψη για την ίδια πιθανότητα διακοπής της λειτουργίας του συστήματος $P_{out} = P_{out,s} = P_{out,d}$, δηλαδή

$$CSDG(P_{out}) = M_s(P_{out}) - M_d(P_{out}) \quad (4.14)$$

Το Διαφορικό Πλεονέκτημα CSDI (Cell-Site Diversity Improvement) ορίζεται ως ο λόγος της πιθανότητας διακοπής της λειτουργίας του συστήματος απλής λήψης $P_{out,s}$ προς την αντίστοιχη πιθανότητα διπλής λήψης $P_{out,d}$ για την ίδια όμως στάθμη του περιθωρίου διαλείψεων λόγω βροχής $M(dB) = M_s = M_d$, δηλαδή

$$CSDI(M) = \frac{P_{OUT,s}(M)}{P_{OUT,d}(M)} \quad (4.15)$$

Όπως έχει αναφερθεί, οι πιθανότητες $P_{out,s}$ και $P_{out,d}$ αντιπροσωπεύουν το χρονικό διάστημα (σε min ανά έτος) κατά το οποίο δεν ικανοποιούνται οι προδιαγραφές διαθεσιμότητας του συστήματος στην απλή και τη διαφορική λήψη, αντίστοιχα. Επομένως, το διαφορικό πλεονέκτημα εκφράζει το πόσες φορές μειώνεται ο χρόνος αυτός με τη χρήση διαφορικής λήψης, ή ισοδύναμα το πόσο αυξάνεται η διαθεσιμότητα του συστήματος, ενώ το διαφορικό κέρδος εκφράζει, ουσιαστικά, τη μείωση της στάθμης του περιθωρίου διάλειψης ή ισοδύναμα την αύξηση της μέσης ισχύος του λαμβανόμενου σήματος που οφείλεται στη διαφορική λήψη.

Όσον αφορά την αξιολόγηση της επίδοσης ενός συστήματος διαφορικής προστασίας, τόσο το διαφορικό πλεονέκτημα όσο και το διαφορικό κέρδος είναι ισοδύναμα. Ωστόσο, στην πράξη χρησιμοποιείται κυρίως το δεύτερο γιατί αναφέρεται στην ίδια πιθανότητα διακοπής του συστήματος και ως εκ τούτου είναι πιο εύκολο να μετρηθεί. Τέλος, αναφέρεται ότι η έννοια του διαφορικού κέρδους λήψης επεκτείνεται και σε συστήματα LMDS που λειτουργούν υπό την επίδραση παρεμβολών. Με το θέμα αυτό ασχολείται η επόμενη ενότητα αυτού του κεφαλαίου (βλ. παράγραφο §4.4.1.2) ενώ εκτενείς αναφορές γίνονται στο επόμενο κεφάλαιο.

4.4 Σύστημα LMDS διαφορικής λήψης κελιού που υποφέρει από παρεμβολές

Ωστόσο, σε ένα κυψελωτό σύστημα LMDS που πρόκειται να εγκατασταθεί σε μια πυκνοκατοικημένη περιοχή χρηστών, εκτός από τη μελέτη των αποσβέσεων λόγω βροχής που εισάγονται στο φέρον σήμα μιας ζεύξης και έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου λειτουργίας του συστήματος, η μεγάλη πυκνότητα χρηστών και σταθμών βάσης του συστήματος στην περιοχή καθιστά επίσης αναγκαία τη μελέτη των προβλημάτων παρεμβολών που δημιουργούνται. Οι διαφορετικές συνθήκες διάδοσης που επικρατούν σε μια πυκνοκατοικημένη περιοχή σε συνδυασμό με τις μεγάλες αποσβέσεις που εισάγει η βροχή στα υψίσυχνα φέροντα σήματα τόσο της κύριας όσο και της παρεμβάλλουσας ζεύξης είναι σε θέση να προκαλέσουν μεγάλη διακύμανση της στάθμης του λόγου σήματος προς παρεμβολή (C/I). Οι μεγάλες όμως διακυμάνσεις του λόγου C/I από την πλευρά του δέκτη μεταφράζονται σε διακυμάνσεις του ποσοστού σφαλμάτων (Bit Error Ratio, BER) κατά το στάδιο των λειτουργιών αποδιαμόρφωσης και αποκωδικοποίησης στο δέκτη, γεγονός το οποίο έχει άμεσες συνέπειες στη λειτουργία του ασυρμάτου δικτύου LMDS στη συγκεκριμένη περιοχή. Για το λόγο αυτό, καθίσταται αναγκαία η επιβολή κάποιου περιοριστικού μέτρου που, αφενός, θα μειώνει τα περιθώρια διάλειψης λόγω βροχής και, αφετέρου, θα βελτιστοποιεί το λόγο C/I.

Η τεχνική της διαφορικής λήψης κελιού σε ένα επίγειο κυψελωτό σύστημα LMDS είναι σε θέση να δώσει λύση και σε αυτό το ζήτημα. Η ανάλυση που ακολουθεί στη συνέχεια και στηρίζεται σε αποτελέσματα προσομοίωσης έχει σκοπό να δώσει μια εκτίμηση της βελτίωσης που επιφέρει η τεχνική διαφορικής λήψης κελιού στην αντιμετώπιση του προβλήματος των διακυμάνσεων του λόγου C/I. Τα αποτελέσματα της

προσομοίωσης, που θα παρουσιασθούν στο τέλος του κεφαλαίου, κρίνονται ιδιαίτερα ενθαρρυντικά γεγονός που ωθεί στην αναζήτηση αναλυτικών μοντέλων πρόβλεψης της βελτίωσης του λόγου C/I κατά τη διαφορική λήψη κελιού.

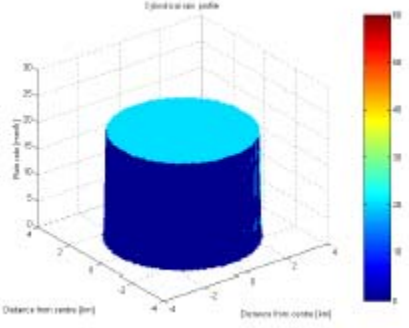
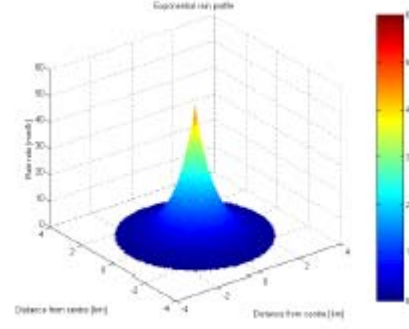
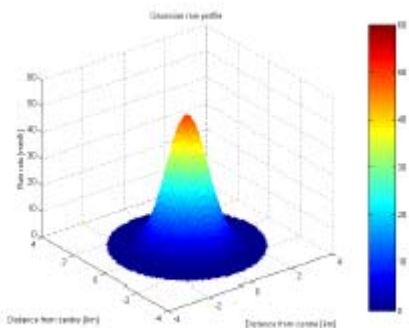
Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να τονισθεί ότι στην περίπτωση ενός επίγειου συστήματος LMDS θεωρείται ότι το σύστημα λειτουργεί με περιορισμό στην προς τα κάτω ζεύξη (downlink limited system). Για το λόγο αυτό μελετάται μόνο η προς τα κάτω ζεύξη (downlink). Αυτή η θεώρηση γίνεται διότι η προς τα κάτω ζεύξη είναι εκείνη που καθορίζει ουσιαστικά την ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας στους χρήστες του συστήματος. Ως εκ τούτου, υπολογίζεται μόνο ο λόγος C/I που αντιστοιχεί στον τερματικό σταθμό ενός χρήστη του συστήματος.

4.4.1 Προσομοίωση παρεμβολών σε σύστημα LMDS

4.4.1.1 Μελέτη παρεμβολών σε σύστημα απλής λήψης

Στο παρόν κεφάλαιο, για τη μοντελοποίηση της βροχής θεωρούνται ορισμένα μοντέλα κινούμενων βροχοπυρήνων συγκεκριμένων διαστάσεων που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία και χαρακτηρίζονται από κυλινδρικό, εκθετικό ή γκαουσιανό προφίλ ρυθμού έντασης βροχόπτωσης [28]. Κάθε χρονική στιγμή θεωρείται ότι ο βροχοπυρήνας είναι ακίνητος και επηρεάζει μια συγκεκριμένη περιοχή του συστήματος ανάλογα με την έκταση που καταλαμβάνει, ενώ την επόμενη χρονική στιγμή ο βροχοπυρήνας έχει κινηθεί, ανάλογα με κάποιο σενάριο κίνησης και φοράς των ανέμων, και επηρεάζει μια νέα περιοχή του συστήματος LMDS. Όλα τα μοντέλα βροχοπυρήνων που έχουν προταθεί παρουσιάζουν κυκλική συμμετρία. Ειδικά το κυλινδρικό μοντέλο, αποτελεί μια υπερεκτίμηση της έντασης βροχόπτωσης $R(\text{mm/h})$ καθώς θεωρεί ότι είναι σταθερή καθόλο το μήκος του βροχοπυρήνα, γεγονός το οποίο έρχεται σε αντίθεση με τα φυσικά δεδομένα. Στα υπόλοιπα δύο θεωρούμενα μοντέλα, εκθετικό και γκαουσιανό, η ένταση βροχόπτωσης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της στο κέντρο του βροχοπυρήνα, δηλαδή για $d=0$, και εξασθενεί με την απόσταση από το κέντρο του ανάλογα με το θεωρούμενο προφίλ. Η ελάχιστη τιμή της έντασης βροχόπτωσης $R(\text{mm/h})$ συναντάται στα άκρα του βροχοπυρήνα, δηλαδή για $d=\{\text{Ακτίνα Βροχοπυρήνα}\}$. Τα τρία μοντέλα βροχοπυρήνων που έχουν προταθεί καθώς και όλες οι παράμετροι που τα χαρακτηρίζουν

παρατίθενται στον πίνακα 4.1. Σημειώνεται επίσης ότι στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το προτεινόμενο μοντέλο βροχοπυρήνων με το γκαουσιανό προφίλ έντασης βροχόπτωσης $R(\text{mm}/\text{h})$, καθώς η μορφή του συγκλίνει περισσότερο με τις φυσικές παρατηρήσεις και δεδομένα.

	<p>Μοντέλο κυλινδρικού προφίλ έντασης βροχόπτωσης</p> $R(\text{mm} / \text{h}) = R_{\max} , d \leq \text{Radius}$ <p>$R_{\max}=20 \text{ mm/h}$ $\text{Radius}=3\text{km}$</p>
	<p>Μοντέλο εκθετικού προφίλ έντασης βροχόπτωσης</p> $R(\text{mm} / \text{h}) = R_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{4d}{\text{Radius}}\right), d \leq \text{Radius}$ <p>$R_{\max}=50 \text{ mm/h}$ $\text{Radius}=3\text{km}$</p>
	<p>Μοντέλο γκαουσιανού προφίλ έντασης βροχόπτωσης</p> $R(\text{mm} / \text{h}) = R_{\max} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{3d}{0.8 \cdot \text{Radius}}\right)^2\right], d \leq \text{Radius}$ <p>$R_{\max}=50 \text{ mm/h}$ $\text{Radius}=3\text{km}$</p>

Πίνακας 4.1: Προτεινόμενα μοντέλα προφίλ ρυθμού έντασης βροχόπτωσης

Ο υπολογισμός της απόσβεσης που εισάγεται στο σήμα λόγω βροχής υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο

$$A_{\text{RAIN}}(\text{dB}) = \int_0^l A_0 dx \quad (4.16)$$

όπου

I : το μήκος της ραδιοζεύξης που επηρεάζεται από την παρουσία του βροχοπυρήνα και
 A_0 : η ειδική απόσβεση λόγω βροχής σε dB/km όπως ορίστηκε μέσω της σχέσης (3.2).

Ανάλογα με την εκάστοτε θέση στην οποία βρίσκεται κάθε φορά ο βροχοπυρήνας, η επίδρασή του στην επίδοση του συστήματος LMDS απλής λήψης και πιο συγκεκριμένα στο λόγο C/I είναι διαφορετική, καθώς διαφορετικές είναι οι αποσβέσεις που εισάγονται στις διάφορες ζεύξεις κάθε φορά. Από την πλευρά του λόγου C/I , τα παρακάτω σενάρια είναι περισσότερο πιθανά:

1. *“Η βροχή οδηγεί σε χειροτέρευση του λόγου C/I ”.*

Σε αυτή την περίπτωση, ο βροχοπυρήνας βρίσκεται μεταξύ του κύριου BS και του TS, ενώ δεν επηρεάζει την παρεμβάλλουσα ζεύξη. Έτσι εισάγονται μεγάλες αποσβέσεις στο επιθυμητό σήμα (C) της κύριας ζεύξης, ενώ το παρεμβάλλον σήμα (I) υφίσταται μικρές αποσβέσεις, με αποτέλεσμα ο λόγος C/I να υποβαθμίζεται σημαντικά.

2. *“Η βροχή οδηγεί σε βελτίωση του λόγου C/I ”.*

Σε αυτή την περίπτωση, ο βροχοπυρήνας είναι τοποθετημένος μεταξύ του TS και του παρεμβάλλοντος BS, ενώ η κύρια ζεύξη παραμένει σχεδόν ανεπηρέαστη από το μέσο βροχής. Έτσι εισάγονται μικρές αποσβέσεις στο επιθυμητό σήμα (C) και μεγάλες στο παρεμβάλλον σήμα (I), με αποτέλεσμα ο λόγος C/I να βελτιώνεται σημαντικά.

3. *“Η βροχή προκαλεί μικρές διακυμάνσεις του λόγου C/I ”.*

Στην περίπτωση αυτή, ο βροχοπυρήνας είναι έτσι τοποθετημένος ώστε να επηρεάζει τόσο την κύρια όσο και την παρεμβάλλουσα ζεύξη κατά το ίδιο σχεδόν ποσοστό. Έτσι εισάγονται αποσβέσεις τόσο στο επιθυμητό σήμα (C) όσο και στο παρεμβάλλον (I) με αποτέλεσμα να προκύπτουν τελικά μικρές διακυμάνσεις στην τιμή του λόγου C/I .

Για να διερευνηθούν όλα τα ανωτέρω πιθανά σενάρια παρεμβολών για τις διάφορες θέσεις του βροχοπυρήνα σε κάθε χρονική στιγμή, πρέπει να υπολογισθούν

τόσο η στάθμη του λαμβανόμενου επιθυμητού σήματος όσο και του παρεμβάλλοντος. Για το σκοπό αυτό θεωρούνται τα ακόλουθα τρία βήματα:

A) Θεωρώντας κάποιο από τα γνωστά μοντέλα διάδοσης σήματος στις μικροκυματικές συχνότητες που ενδιαφέρουν τα συστήματα LMDS, προσδιορίζεται ο χάρτης του λόγου $C/I(\text{dB})=C(\text{dBw})-I(\text{dBw})$ χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι αποσβέσεις που εισάγονται λόγω της ύπαρξης του βροχοπυρήνα. Ο χάρτης αυτός που αναφέρεται στην περίπτωση ηλιοφάνειας, ονομάζεται χάρτης C/I υπό συνθήκες καθαρού ουρανού (C/I clear sky map).

B) Σε δεύτερη φάση, θεωρώντας κάθε φορά διαφορετική θέση του βροχοπυρήνα, υπολογίζεται ο αντίστοιχος χάρτης αποσβέσεων λόγω βροχής (A_{rain} map).

Γ) Τέλος, ο χρονομεταβλητός πλέον χάρτης C/I που αναφέρεται σε κάθε διαφορετική θέση του βροχοπυρήνα για κάθε χρονική στιγμή, προκύπτει με αφαίρεση του αντίστοιχου χάρτη αποσβέσεων λόγω βροχής από το χάρτη C/I υπό συνθήκες καθαρού ουρανού. Δηλαδή:

$$[C/I \text{ map}](t) = [C/I \text{ clear sky map}] - [A_{\text{rain}} \text{ map}](t), \quad \text{για } \forall (x,y,t) \text{ θέση του βροχοπυρήνα}$$

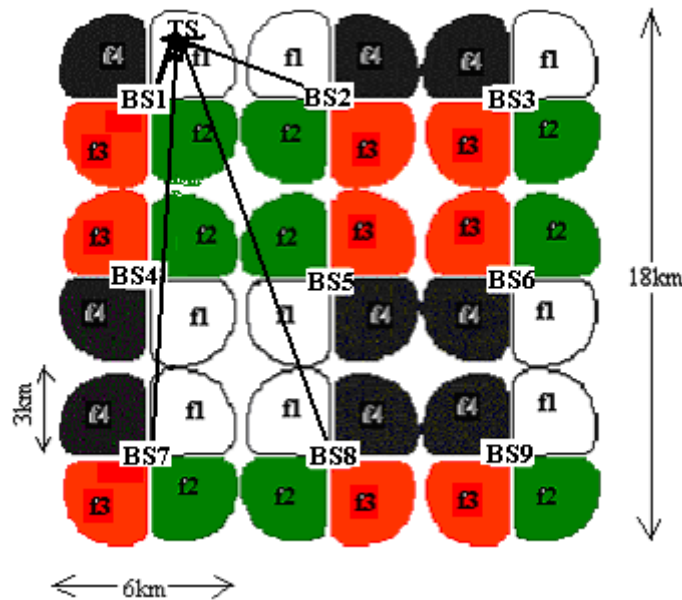
Στη συνέχεια, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση και να μελετηθούν περαιτέρω τα αποτελέσματα αυτής που αφορούν τόσο την επίδραση του κινούμενου βροχοπυρήνα στην επίδοση ενός συστήματος LMDS όσο και την αποτελεσματικότητα της διαφορικής λήψης κελιού για την αντιμετώπιση της μεγάλης χειροτέρευσης του λόγου C/I , γίνονται ορισμένες παραδοχές. Αυτές είναι:

- Περιοχή κάλυψης συστήματος LMDS: $18 \times 18 \text{ km}^2$
- Εμβαδόν κυψέλης: $3 \times 3 \text{ km}^2$
- Πλήθος σταθμών βάσης: 9
- Διάταξη (configuration) σταθμών βάσης: ορθογωνικό πλέγμα 3×3 BSs
- $f_{\text{downlink}} = 40 \text{ GHz}$
- Μέθοδος πρόσβασης στη ζεύξη ανόδου του δικτύου: TDMA
- Τεχνική αναχρησιμοποίηση συχνότητας: Τμηματοποίηση κυψελών σε 4 τομείς με χρήση 4 φερουσών συχνοτήτων (f_1, f_2, f_3, f_4), απλή πόλωση και εύρος δέσμης

κύριου λοβού κεραίας σταθμού βάσης $\Delta=100^\circ$ (: επικρατέστερη τεχνική αυτή τη στιγμή στο εμπόριο [13])

- Κεραία τερματικού χρήστη με εύρος δέσμης κύριου λοβού $\Delta=3^\circ$

Στο σχήμα 4.3 που ακολουθεί, φαίνεται η συγκεκριμένη περιοχή κάλυψης του συστήματος LMDS, η αναχρησιμοποίηση συχνοτήτων με την τμηματοποίηση των κυψελών και η διάταξη των 9 σταθμών βάσης.

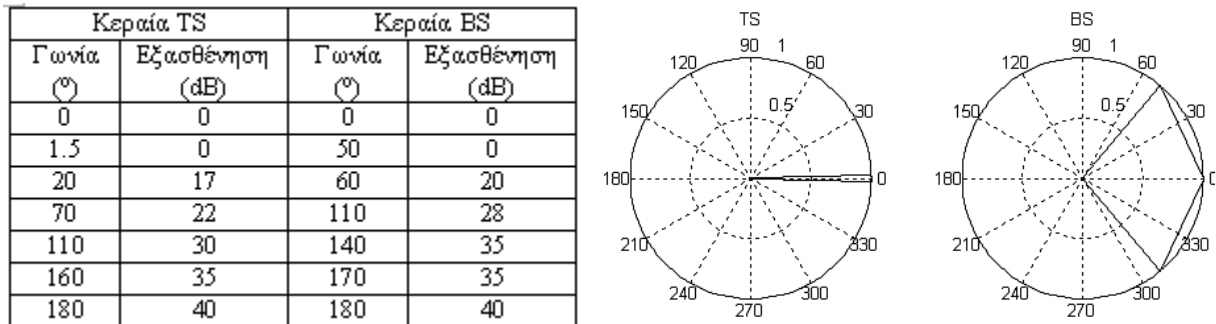


Σχήμα 4.3: Πλάνο κατανομής συχνοτήτων και σενάριο παρεμβολής στην προς τα κάτω ζεύξη

Όσον αφορά το σενάριο παρεμβολής που υιοθετείται στην παρούσα προσομοίωση, θεωρείται ότι παρεμβάλλουν σε κάποιο TS όλοι οι BS που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα με τον κύριο BS από τον οποίο εξυπηρετείται ο συγκεκριμένος χρήστης. Συνεπώς, όπως δείχνεται στο παράδειγμα του παραπάνω σχήματος, στο τερματικό χρήστη που βρίσκεται στην κυψέλη με αντιστοιχούσα φέρουσα συχνότητα f1 που εξυπηρετείται από τον αντίστοιχο τομέα του BS1, δεν παρεμβάλλει μόνο ο αντίστοιχος τομέας του δεξιά γειτονικού του BS2 αλλά και οι τομείς των δύο απομακρυσμένων BS7 και BS8, οι οποίοι λειτουργούν στην ίδια συχνότητα f1.

Στη συνέχεια, στο σχήμα 4.4, παρατίθενται ενδεικτικά τα κανονικοποιημένα διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραιών σταθμών βάσης (BS) και τερματικών χρήστη

(TS), όπου φαίνεται η τμηματοποίηση των κεραιών σταθμών βάσης με $\Delta=100^\circ$ και η μεγάλη κατευθυντικότητα των κεραιών τερματικών χρηστών με $\Delta=3^\circ$, αντίστοιχα [28].



Σχήμα 4.4: Διαγράμματα ακτινοβολίας κεραιών BS και TS (απλής πόλωσης)

Προκειμένου να εξαχθεί ο χάρτης C/I υπό συνθήκες καθαρού ουρανού (C/I clear sky map) το μοντέλο διάδοσης σήματος που υιοθετείται στην περιοχή κάλυψης του συστήματος είναι αυτό του Ελευθέρου Χώρου (Free Space), καθώς, λόγω της λειτουργίας τους στις ζώνες των χιλιοστομετρικών συχνοτήτων, τα συστήματα LMDS λειτουργούν έτσι και αλλιώς υπό τον περιορισμό οπτικής επαφής, οι κεραιές που χρησιμοποιούνται είναι υπερκατευθυντικές και το φαινόμενο της λήψης του σήματος από πολλαπλές ανακλάσεις είναι πολύ σπάνιο. Έτσι, θεωρώντας συνθήκες καθαρού ουρανού, η στάθμη του λαμβανόμενου σήματος τόσο για την περίπτωση του φέροντος όσο και για την περίπτωση του παρεμβάλλοντος δίνεται από τη σχέση

$$P_{RX}(\text{dBw}) = P_{TX} + G_{TX}(\theta_{TX}) + G_{RX}(\theta_{RX}) - FSL(\text{dB}) \quad (4.17)$$

όπου

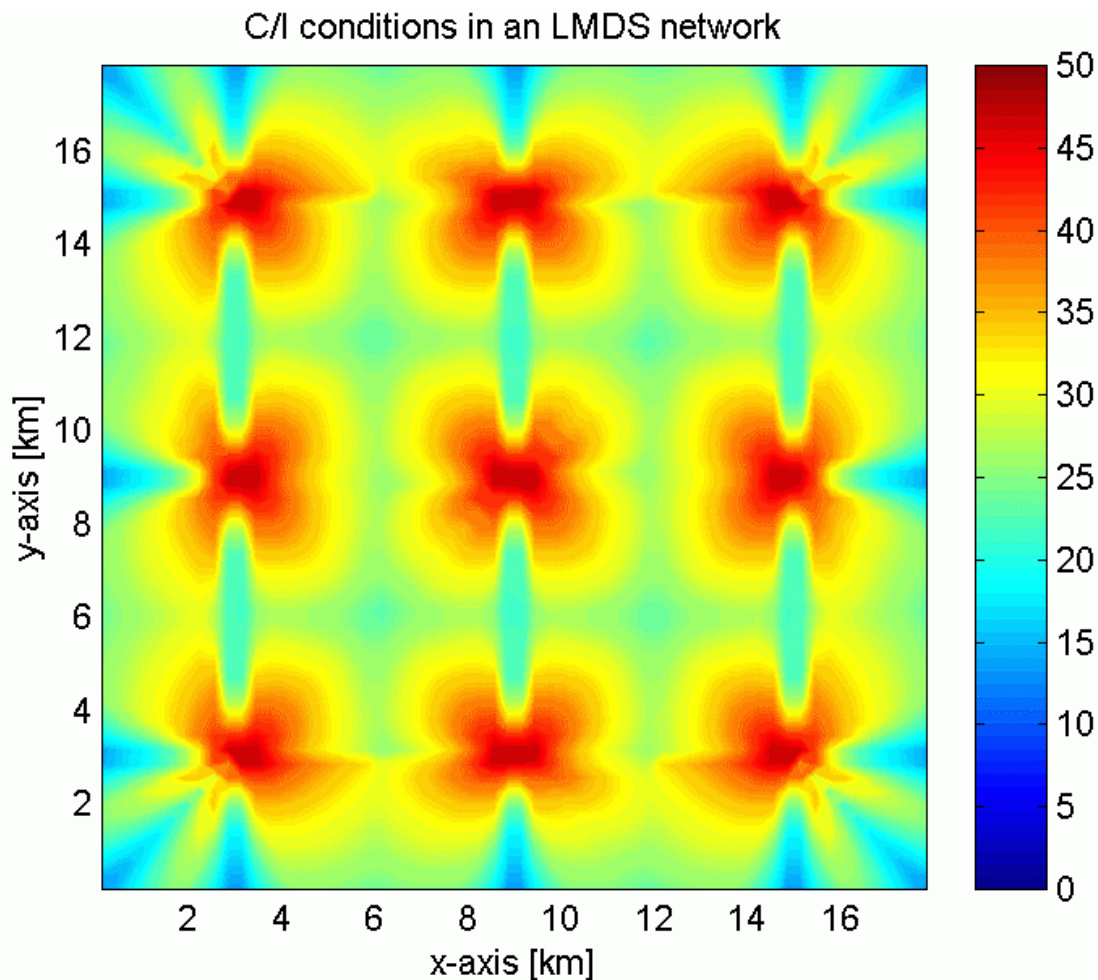
P_{TX} : η ισχύς εκπομπής των BS του συστήματος εκφρασμένη σε dBw,

$G_{TX}(\theta_{TX})$, $G_{RX}(\theta_{RX})$: αντίστοιχα οι συναρτήσεις κατευθυντικού κέρδους των κεραιών BS και TS στις αντίστοιχες διευθύνσεις θ_{TX} και θ_{RX} που αντιστοιχούν στα διαγράμματα ακτινοβολίας του σχήματος 4.4, εκφρασμένες σε dB, και

FSL (Free Space Loss): οι απώλειες ελευθέρου χώρου εκφρασμένες σε dB.

Με βάση λοιπόν τις προηγούμενες παραδοχές, προκύπτει με προσομοίωση ο χάρτης C/I υπό συνθήκες καθαρού ουρανού για την προς κάτω ζεύξη του συστήματος LMDS απλής λήψης, που απεικονίζεται στο σχήμα 4.5. Με βάση αυτόν το χάρτη, οι κρίσιμες περιοχές όπου ο λόγος C/I υποβαθμίζεται σημαντικά είναι οι περιοχές που

βρίσκονται κατά μήκος των ορίων μεταξύ των τομέων και κατά μήκος των ορίων μεταξύ των κυψελών. Αντίθετα, στις περιοχές γύρω από τους BS των κυψελών, η ισχύς σήματος της κύριας ζεύξης είναι υψηλή με αποτέλεσμα ο λόγος C/I να είναι αρκετά υψηλός επίσης. Με την απομάκρυνση από το BS κάθε κυψέλης, τα προβλήματα παρεμβολών αρχίζουν να γίνονται όλο και εντονότερα, καθώς, όπως φαίνεται από το σχήμα, ο λόγος C/I αρχίζει και μειώνεται.

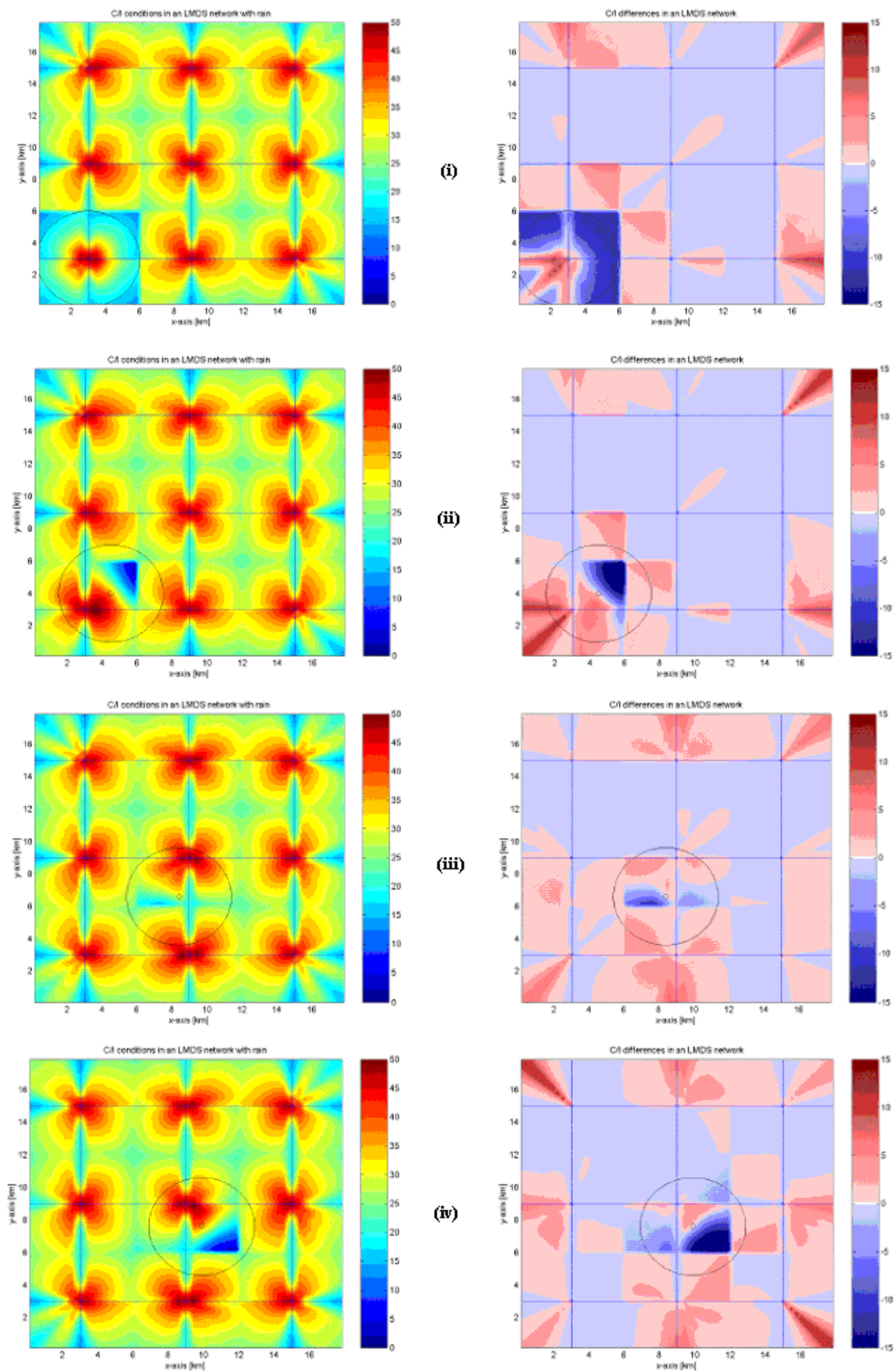


Σχήμα 4.5: Χάρτης C/I υπό συνθήκες καθαρού ουρανού στην προς τα κάτω ζεύξη

Στη συνέχεια, μελετάται η επίδραση ενός βροχοπυρήνα, με γκαουσιανό προφίλ έντασης βροχόπτωσης στην επίδοση του συστήματος όσον αφορά τη στάθμη παρεμβολών. Κάθε χρονική στιγμή, θεωρείται μια ορισμένη θέση του βροχοπυρήνα πάνω από την συγκεκριμένη περιοχή κάλυψης του συστήματος, εξάγεται για αυτή τη

θέση ένας συγκεκριμένος χάρτης βροχής ο οποίος αφαιρείται από τον παραπάνω χάρτη C/I υπό συνθήκες καθαρού ουρανού, για να προκύψει τελικά ο χάρτης C/I που λαμβάνει υπόψη του όλους τους μηχανισμούς απόσβεσης του σήματος (δηλαδή Απώλειες Ελευθέρου Χώρου και Αποσβέσεις λόγω Βροχής). Στη συνέχεια, στο σχήμα 4.6, παρατίθενται οι χάρτες C/I για καθεμία από τις τέσσερις δεδομένες θέσεις του κινούμενου βροχοπυρήνα (**αριστερή** στήλη σχήματος) καθώς επίσης και οι αντίστοιχες διαφορές που προκύπτουν στο χάρτη του λόγου C/I μεταξύ της περίπτωσης που αντιστοιχεί σε συνθήκες καθαρού ουρανού και αυτής που προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη και τις αποσβέσεις λόγω βροχής (**δεξιά** στήλη σχήματος).

Επίσης αναφέρεται ότι σε καθεμία από τις θεωρούμενες περιπτώσεις, με μαύρο κύκλο σημειώνεται ο βροχοπυρήνας ακτίνας 3km (όση και η ακτίνα της κυψέλης), ο οποίος θεωρείται ότι κινείται υπό την επίδραση ανέμου που πνέει στην περιοχή με κατεύθυνση διαγώνια πάνω δεξιά.



Σχήμα 4.6: Χάρτες C/I με βροχή και αντίστοιχες διαφορές με περίπτωση καθαρού ουρανού

Στην αριστερή στήλη των παραπάνω σχημάτων, δείχνονται οι ισχύουσες συνθήκες της στάθμης του λόγου C/I για την εκάστοτε δεδομένη θέση του βροχοπυρήνα. Στην ίδια στήλη, με κόκκινο χρώμα δείχνονται οι περιοχές όπου ο λόγος C/I λαμβάνει υψηλές σχετικά τιμές, ενώ με μπλε σκούρο χρώμα δείχνονται οι περιοχές στις οποίες ο λόγος C/I έχει χειροτερεύσει σημαντικά, τόσο λόγω της επίδρασης του βροχοπυρήνα αλλά και λόγω των παρεμβάλλοντων σταθμών βάσης στο εκάστοτε τερματικό χρήστη. Στη δεξιά στήλη, με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι βελτιώσεις του λόγου C/I που προκύπτουν λόγω της δεδομένης θέσης που καταλαμβάνει ο βροχοπυρήνας πάνω από τη συγκεκριμένη περιοχή κάλυψης, ενώ με μπλε χρώμα δείχνονται εκείνες οι περιοχές στις οποίες η παρουσία του βροχοπυρήνα έχει επιφέρει μεγάλη χειροτέρευση του λόγου C/I . Για τις περιοχές αυτές, όπου ο λόγος C/I χειροτερεύει σημαντικά και ενδεχομένως υπολείπεται μιας τιμής κατωφλίου (C/I_{th}) δεδομένης για την ικανοποιητική λειτουργία του δέκτη του συστήματος, η τεχνική της διαφορικής λήψης κελιού μπορεί να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στην αντιμετώπιση των παρεμβολών.

Πριν όμως θεωρηθεί η περίπτωση όπου εφαρμόζεται η τεχνική διαφορικής λήψης κελιού στο ανωτέρω κυψελωτό σύστημα LMDS, θα μελετηθεί η επίδραση των παρεμβολών στη λειτουργία του συστήματος απλής λήψης μέσω της στάθμης των τιμών που παίρνει ο λόγος C/I , για κάποιες από τις περιπτώσεις που παρατέθηκαν προηγουμένως. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση (i) ο βροχοπυρήνας βρίσκεται πάνω από το BS7 προκαλώντας αποσβέσεις σε όλα τα φέροντα αυτής κυψέλης ενώ όλα τα παρεμβάλλοντα σήματα στα τερματικά χρηστών που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης υφίστανται μικρότερες αποσβέσεις. Έτσι στα όρια της θεωρούμενης κυψέλης, επικρατεί το Σενάριο 1 περί παρεμβολών και θέσης του βροχοπυρήνα “*Η βροχή οδηγεί σε χειροτέρευση του λόγου C/I* ”). Σε περιοχές που απέχουν σχετικά μικρή απόσταση από το κέντρο της κυψέλης, που ταυτίζεται εν προκειμένω με το κέντρο του βροχοπυρήνα, όλα τα φέροντα υφίστανται σημαντικές αποσβέσεις λόγω βροχής. Ωστόσο, και τα παρεμβάλλοντα σήματα υφίστανται παρόμοιες σημαντικές αποσβέσεις, με αποτέλεσμα να μην προκύπτουν σημαντικές διακυμάνσεις του λόγου C/I (Σενάριο 3 περί παρεμβολών και θέσης του βροχοπυρήνα – “*Η βροχή προκαλεί μικρές διακυμάνσεις του λόγου C/I* ”). Επιπλέον, ακριβώς στο κέντρο της κυψέλης, η ισχύς του φέροντος σήματος δεν επηρεάζεται από το γεγονός ότι στο συγκεκριμένο σημείο η ένταση βροχόπτωσης

παρουσιάζει μέγιστο, με αποτέλεσμα να υπάρχει βελτίωση του λόγου C/I στο σημείο αυτό (Σενάριο 2 περί παρεμβολών και θέσης του βροχοπυρήνα – “*Η βροχή οδηγεί σε βελτίωση του λόγου C/I*”).

Όσον αφορά την περίπτωση (ii) όπου ο βροχοπυρήνας καταλαμβάνει νέα θέση και το κέντρο του βρίσκεται τώρα μεταξύ του BS7 και της άνω δεξιάς γωνίας του τομέα που εξυπηρετείται από τον ίδιο σταθμό βάσης, παρατηρείται σημαντική χειροτέρευση του λόγου C/I στην περιοχή άνω δεξιά του κέντρου του βροχοπυρήνα (Σενάριο 1). Η χειροτέρευση αυτή λαμβάνει χώρα διότι τα φέροντα εξυπηρέτησης των TS που βρίσκονται σε αυτή την περιοχή υφίστανται σημαντικές αποσβέσεις λόγω βροχής καθώς διέρχονται μέσα από την περιοχή μεγίστου της έντασης βροχόπτωσης, σε αντίθεση με τα παρεμβάλλοντα σήματα που φθάνουν στα TS με σχεδόν μηδενικές αποσβέσεις λόγω βροχής. Στην υπόλοιπη περιοχή κάλυψης του συστήματος, ο λόγος C/I δεν υφίσταται σημαντικές αλλαγές όπως προκύπτει από την προσομοίωση (Σενάριο 3), με μόνη εξαίρεση τις περιοχές που βρίσκονται στο άνω δεξιό και κάτω αριστερό άκρο της περιοχής κάλυψης του συστήματος, όπου προκύπτει κάποια βελτίωση όσον αφορά το λόγο C/I για την προς τα κάτω ζεύξη (Σενάριο 2).

Παρατηρείται λοιπόν ότι, για κάθε θέση του βροχοπυρήνα πάνω από τη θεωρούμενη περιοχή εξυπηρέτησης του συστήματος LMDS απλής λήψης, προκύπτουν κάποιες περιοχές στις οποίες ο λόγος C/I χειροτερεύει δραστικά. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το ότι αυτές οι χειροτερεύσεις του C/I οδηγούν αυτόματα σε αύξηση του ποσοστού λαθών BER του συστήματος, και κατεπέκταση σε υποβάθμιση της λειτουργίας του συστήματος και μείωση της προσφερόμενης ποιότητας υπηρεσίας, οφείλει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά τη φάση της σχεδίασης του συστήματος και να λαμβάνονται μέτρα αντιμετώπισης. Στην επόμενη ενότητα μελετάται μέσω προσομοίωσης αυτή ακριβώς η περίπτωση όπου εφαρμόζεται η τεχνική διαφορικής λήψης κελιού για την αντιμετώπιση του προβλήματος της υποβάθμισης του λόγου C/I του συστήματος.

Στο σημείο αυτό, πριν προχωρήσει η ανάλυση, αξίζει να αναφερθεί ο θετικός αντίκτυπος που έχει η ενδεχόμενη βελτίωση του λόγου C/I σε κάποιες υποπεριοχές της περιοχής εξυπηρέτησης του συστήματος ως απόρροια της θέσης του κινούμενου βροχοπυρήνα. Όπως παρατηρήθηκε ήδη, είναι δυνατό σε κάποιες περιοχές ο λόγος C/I

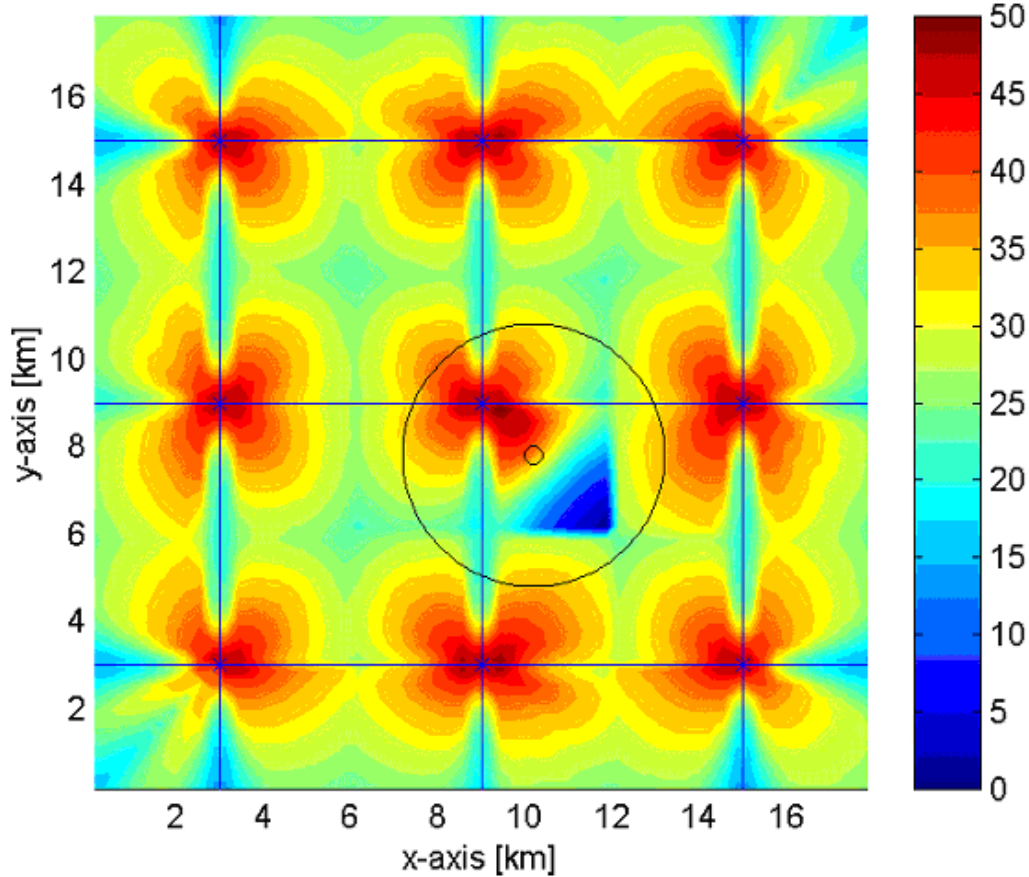
να βελτιωθεί έως και 10-15dB, γεγονός που, αν το εκμεταλλευθούν κατάλληλα οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι του δικτύου, ισοδυναμεί είτε με αύξηση της προσφερόμενης ποιότητας υπηρεσιών στους χρήστες του συστήματος είτε ακόμα και με εισαγωγή νέων υπηρεσιών.

4.4.1.2 Μελέτη παρεμβολών σε σύστημα διαφορικής λήψης κελιού

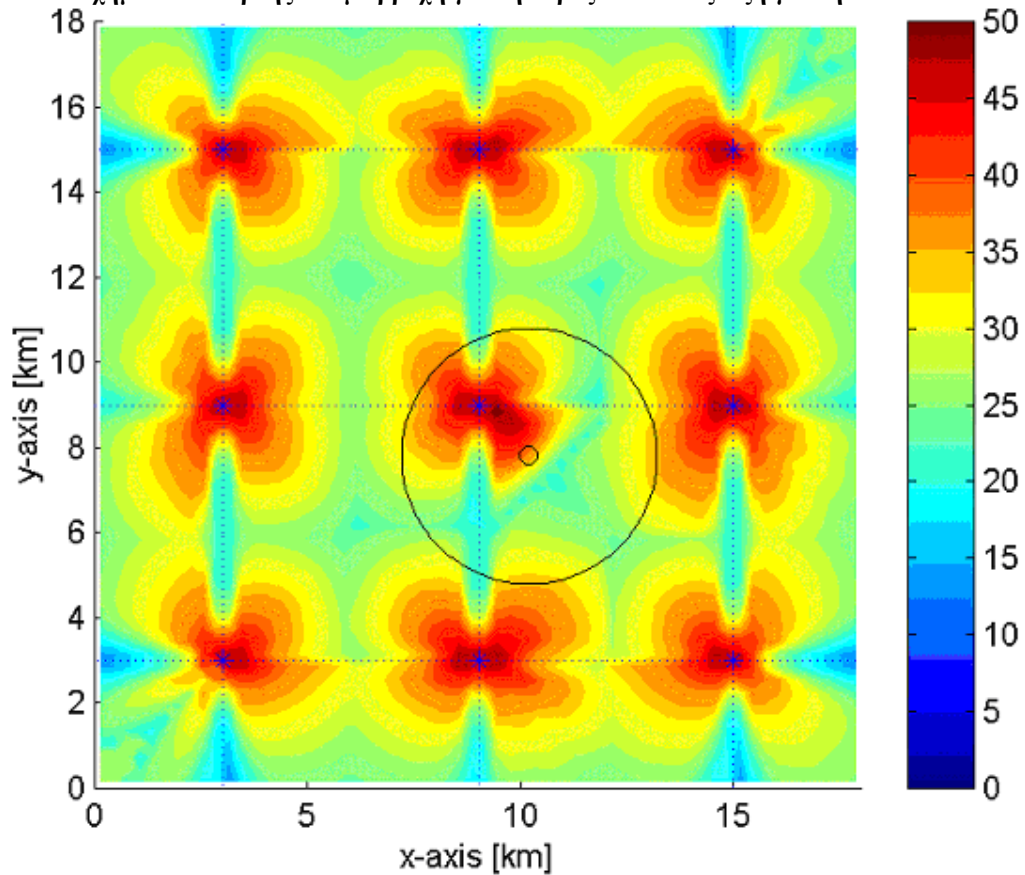
Για την ίδια περιοχή κάλυψης που εξετάστηκε παραπάνω, θεωρείται ότι το σύστημα υποστηρίζει την τεχνική διαφορικής λήψης κελιού για την αντιμετώπιση της σοβαρής χειροτέρευσης του λόγου C/I που προκύπτει λόγω της ύπαρξης του κινούμενου βροχοπυρήνα σε κάποια συγκεκριμένη θέση [27]. Σύμφωνα με αυτήν, το τερματικό χρήστη είναι σε θέση να διατηρεί περισσότερες από μια συνδέσεις με σταθμούς βάσης του συστήματος και να επιλέγει κάθε φορά ζεύξη επικοινωνίας με εκείνον που παρέχει τον υψηλότερο λόγο C/I είτε αυτό μεταφράζεται σε υψηλή στάθμη φέροντος (C) είτε σε ιδιαίτερα χαμηλή στάθμη παρεμβάλλοντος σήματος (I). Η κρίσιμη τιμή κατωφλίου $(C/I)_{th}$ για το λόγο σήματος προς παρεμβολή τίθεται στην ενδεικτική τιμή των 20dB, στα πλαίσια της παρούσας προσομοίωσης. Έτσι λοιπόν, όταν για κάποια δεδομένη θέση του κινούμενου βροχοπυρήνα οι στάθμες ισχύος C(dBw) και I(dBw) έχουν υποστεί τέτοιες αποσβέσεις ώστε στο δέκτη του TS να ισχύει $C/I < (C/I)_{th} = 20dB$, το συγκεκριμένο TS αναζητά στην ομάδα των γειτονικών BS εκείνον το σταθμό που θα του προσφέρει τον υψηλότερο λόγο C/I, δηλαδή εκείνο για τον οποίο θα ισχύει $C/I = (C/I)_{max}$.

Στο σχήμα 4.7, θεωρείται μια από τις περιπτώσεις χαρτών C/I που ήδη εξετάστηκαν προηγουμένως και στην οποία υπάρχει σημαντική χειροτέρευση του λόγου C/I στη συγκεκριμένη περιοχή, που δείχνεται με βαθύ μπλε χρώμα.

Εφαρμόζοντας τον παραπάνω αλγόριθμο για την τεχνική διαφορικής λήψης κελιού, που συγκεκριμένα βρίσκει εφαρμογή μόνο για την κρίσιμη περιοχή η οποία υφίσταται την υποβάθμιση της προσφερόμενης ποιότητας υπηρεσιών, προκύπτει ο χάρτης C/I που απεικονίζεται στο σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.7: Χάρτης C/I με βροχή για την προς τα κάτω ζεύξη για την ΔΠΛΗ ΛΗΨΗ

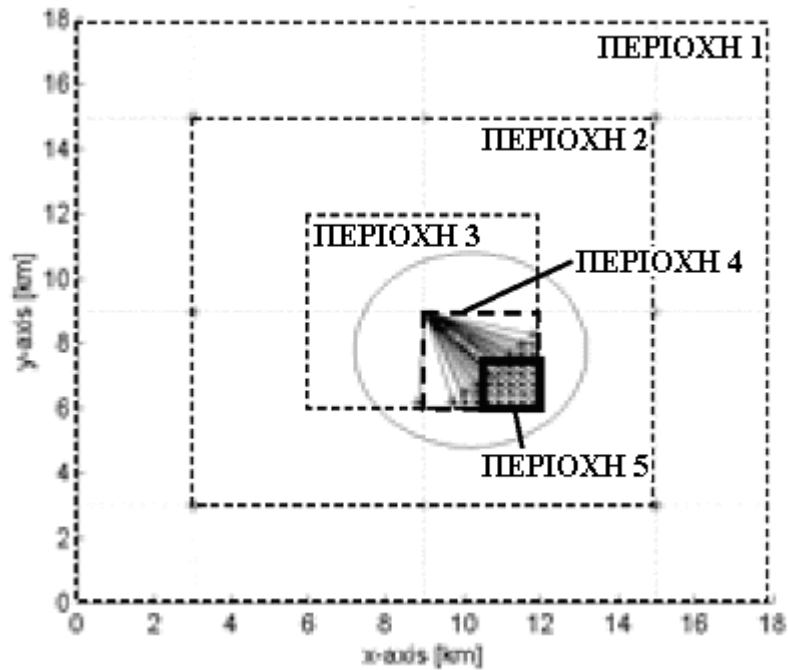


Σχήμα 4.8: Χάρτης C/I με βροχή για την προς τα κάτω ζεύξη για τη ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΛΗΨΗ ΚΕΛΙΟΥ

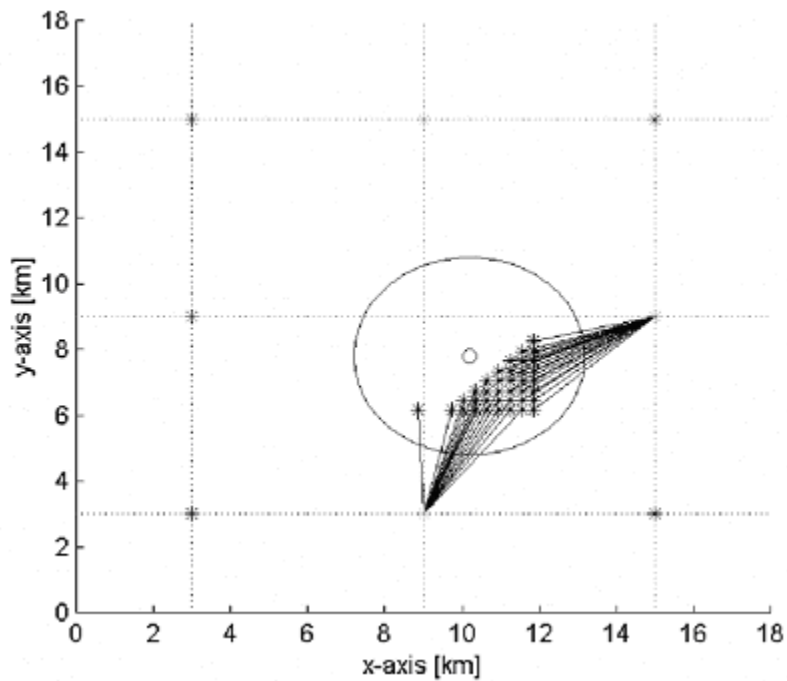
Παρατηρώντας τον χάρτη C/I του σχήματος 4.8, η βελτίωση που προσφέρει στο λόγο C/I η τεχνική διαφορικής λήψης κελιού είναι πλέον εμφανής. Σε αντίθεση με την περίπτωση συστήματος LMDS απλής λήψης όπου η στάθμη του λόγου C/I άγγιζε σχετικά χαμηλά επίπεδα τιμών (<20dB) στην κρίσιμη περιοχή, μετά την εφαρμογή της τεχνικής διαφορικής προστασίας, ο λόγος C/I στην κρίσιμη περιοχή αυξήθηκε και έλαβε πλέον τιμές πάνω από το κατώφλι των 20dB, γεγονός που ισοδυναμεί με βελτίωση της ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, κατά την προσομοίωση θεωρείται ότι την τεχνική διαφορικής λήψης κελιού εφαρμόζουν μόνο όσα TS βρίσκονται στην κρίσιμη περιοχή, υποφέρουν από διαλείψεις λόγω βροχής και από την επίδραση παρεμβολών και ο λόγος C/I που μετράται στους δέκτες τους υπολείπεται της τιμής κατωφλίου των 20dB. Θεωρώντας σύστημα LMDS απλής λήψης, τα TS αυτά διατηρούν κύριες ζεύξεις με τον BS5 (original links) στη φέρουσα συχνότητα f4. Στο σχήμα 4.9 απεικονίζονται οι κύριες ζεύξεις αυτών των TS με τον BS5 πριν την εφαρμογή της τεχνικής διαφορικής λήψης κελιού.

Ωστόσο, κατά την εφαρμογή της τεχνικής διαφορικής προστασίας, όλα τα TS που βρίσκονται στην κρίσιμη περιοχή αναζητούν στην ομάδα των γειτονικών BS εκείνον το σταθμό για τον οποίο θα ισχύει $C/I = (C/I)_{\max}$, όπου βέβαια $(C/I)_{\max} > 20dB$. Με βάση το σχήμα 4.3, οι πλησιέστεροι BS που μπορούν να εξυπηρετήσουν τα TS της κρίσιμης περιοχής στη φέρουσα συχνότητα f4 είναι μόνο οι σταθμοί BS6, BS8 και BS9. Από αυτούς, όπως προκύπτει από την προσομοίωση, αξιόπιστες συνδέσεις με τα TS μπορούν να δημιουργήσουν μόνο οι BS6 και BS8 καθώς ο λόγος C/I που αντιστοιχεί στις ζεύξεις του BS9 με τα αντίστοιχα TS της κρίσιμης περιοχής υπολείπεται συνεχώς των 20dB. Συνεπώς, όπως δείχνεται στο σχήμα 4.10, μετά την εφαρμογή της τεχνικής διαφορικής λήψης κελιού, οι νέοι σταθμοί εξυπηρέτησης των TS της κρίσιμης περιοχής είναι οι BS6 και BS8 (switched-to links).



Σχήμα 4.9: Τερματικά χρήστη στην κρίσιμη περιοχή ΠΙΝ το Switch-over
(ΑΠΛΗ ΛΗΨΗ)



Σχήμα 4.10: Τερματικά χρήστη στην κρίσιμη περιοχή ΜΕΤΑ το Switch-over
(ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΛΗΨΗ ΚΕΛΙΟΥ)

Σε μια προσπάθεια να ποσοτικοποιηθεί αυτή η βελτίωση που παρέχει στη στάθμη του λόγου C/I και κατεπέκταση στην ποιότητα υπηρεσιών του συστήματος η τεχνική της διαφορικής λήψης κελιού, ορίζεται το κριτήριο του μέσου λόγου C/I ως ο μέσος όρος των λόγων $C/I_i \forall i \in \{\text{Περιοχή Κριτηρίου}\}$ [27], όπου ως “Περιοχή Κριτηρίου” ορίζεται:

- Είτε ολόκληρη η περιοχή εξυπηρέτησης του συστήματος (ΠΕΡΙΟΧΗ 1, βλ. σχήμα 4.9),
- Είτε η κεντρική περιοχή των 16 εσωτερικών τομέων της περιοχής εξυπηρέτησης (ΠΕΡΙΟΧΗ 2, βλ. σχήμα 4.9),
- Είτε η περιοχή της κυψέλης της οποίας το μεγαλύτερο μέρος καλύπτεται από το βροχοπυρήνα (ΠΕΡΙΟΧΗ 3, βλ. σχήμα 4.9),
- Είτε η περιοχή του τομέα της κυψέλης ο οποίος καλύπτεται πλήρως από το βροχοπυρήνα (ΠΕΡΙΟΧΗ 4, βλ. σχήμα 4.9),
- Είτε, τέλος, η κρίσιμη περιοχή στην οποία είχε παρουσιασθεί εντονότερο το πρόβλημα της υποβάθμισης του λόγου C/I (ΠΕΡΙΟΧΗ 5, βλ. σχήμα 4.9).

Στον ακόλουθο πίνακα 4.2, παρατίθεται ο μέσος όρος του λόγου C/I (dB) σε καθεμία από τις προαναφερθείσες περιοχές, για τα εκάστοτε σενάρια παρουσίας ή όχι του κινούμενου βροχοπυρήνα και εφαρμογής ή μη της διαφορικής λήψης κελιού, που έχουν θεωρηθεί έως τώρα.

Περιοχή Κριτηρίου	Χωρίς Βροχή	Με Βροχή, Χωρίς Διαφορική Λήψη Κελιού	Με Βροχή, Με Διαφορική Λήψη Κελιού	Διαφορικό Κέρδος C/I
ΠΕΡΙΟΧΗ 1	34.613	35.481	35.489	0.008
ΠΕΡΙΟΧΗ 2	35.816	36.455	36.464	0.009
ΠΕΡΙΟΧΗ 3	35.446	36.324	36.361	0.037
ΠΕΡΙΟΧΗ 4	35.822	35.417	38.505	3.088
ΠΕΡΙΟΧΗ 5	28.581	12.849	25.479	12.63

Πίνακας 4.2: Μέσος όρος του λόγου C/I (dB) στην προς τα κάτω ζεύξη

Στην τελευταία στήλη του πίνακα 4.2, παρατίθεται μια πρώτη έννοια του Διαφορικού Κέρδους C/I, το οποίο στην παρούσα φάση ορίζεται ως η διαφορά της 3^{ης} στήλης από την 4^η στήλη του πίνακα. Ωστόσο, στην έννοια του Διαφορικού Κέρδους C/I και στον ακριβή ορισμό του αναφέρεται εκτενώς το επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

Όσον αφορά τα συμπεράσματα που εξάγονται από τον πίνακα 4.2, παρατηρείται ότι ο μέσος όρος του λόγου C/I που υπολογίζεται για τις ευρύτερες περιοχές (ΠΕΡΙΟΧΗ 1,2,3), δεν αποτελεί σε καμιά περίπτωση έγκυρο κριτήριο για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων που αφορούν τη διαφορική λήψη κελιού. Και αυτό διότι οι ευρύτερες περιοχές δεν αντικατοπτρίζουν απόλυτα τις όποιες διακυμάνσεις παρουσιάζει ο λόγος C/I. Μεγάλες και μικρές αλλαγές στο λόγο C/I ενσωματώνονται με τον ίδιο συντελεστή βαρύτητας στον υπολογισμό του μέσου όρου με αποτέλεσμα να μην γίνεται αντιληπτή η σοβαρή υποβάθμιση που υφίσταται ο λόγος C/I σε αρκετές περιπτώσεις (εξομάλυνση διαφορών). Έτσι, οι τρεις πρώτες σειρές του παραπάνω πίνακα που αντιστοιχούν στις ΠΕΡΙΟΧΕΣ 1,2 και 3, αδυνατούν να αναδείξουν τη μεγάλη χρησιμότητα της τεχνικής διαφορικής λήψης κελιού, γεγονός που αντικατοπτρίζεται από το χαμηλό διαφορικό κέρδος C/I που προσφέρεται.

Αντίθετα, λαμβάνοντας ως κριτήριο αξιολόγησης της επίδοσης της διαφορικής λήψης κελιού το μέσο όρο του λόγου C/I στην κρίσιμη περιοχή (ΠΕΡΙΟΧΗ 5, 5^η Σειρά), το διαφορικό κέρδος C/I που προκύπτει παρουσιάζεται αρκετά μεγάλο, της τάξης των 13dB. Και αυτό γιατί η κρίσιμη περιοχή είναι αυτή που υποφέρει ιδιαίτερα από το πρόβλημα της χειροτέρευσης του λόγου C/I και συνεπώς είναι η περιοχή εκείνη στην οποία απαιτείται η εφαρμογή της τεχνικής διαφορικής λήψης κελιού.

Με βάση λοιπόν το κριτήριο του διαφορικού κέρδους C/I μετρούμενου μόνο στην κρίσιμη όπως ορίστηκε παραπάνω περιοχή, αποκτάται η ποσοτικοποίηση της βελτίωσης που συνεπάγεται η τεχνική διαφορικής λήψης κελιού στην αντιμετώπιση των παρεμβολών παρουσία διαλείψεων λόγω βροχής. Η βελτίωση αυτή αντικατοπτρίζει γενικά μια εικόνα του κατά πόσο η λειτουργία του συστήματος βελτιώνεται, κατά πόσο η διαθεσιμότητά και η αξιοπιστία του αυξάνονται και κατά πόσο η ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών του, επίσης, βελτιώνεται. Συνεπώς, το διαφορικό κέρδος C/I είναι σε θέση να ποσοτικοποιήσει τη βελτίωση της επίδοσης ενός κυψελωτού συστήματος LMDS που λειτουργεί υπό την επίδραση παρεμβολών και διαλείψεων λόγω βροχής και στο οποίο εφαρμόζεται η τεχνική της διαφορικής λήψης κελιού. Η μελέτη, ωστόσο, της τεχνικής διαφορικής λήψης κελιού για την αντιμετώπιση των παρεμβολών στηρίχθηκε σε πρόγραμμα προσομοίωσης και όχι σε αναλυτική μελέτη του προβλήματος στο παρόν κεφάλαιο. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα

που προέκυψαν οδηγούν στην αναζήτηση αναλυτικής επίλυσης του προβλήματος. Έτσι, λοιπόν, στο επόμενο κεφάλαιο μελετάται διεξοδικά το πρόβλημα των παρεμβολών σε ένα κυψελωτό σύστημα LMDS διπλής διαφορικής προστασίας που λειτουργεί παρουσία διαλείψεων βροχής και προτείνεται αναλυτικό μοντέλο πρόβλεψης της βελτίωσης του λόγου C/I που αφορά ένα σύστημα LMDS διπλής διαφορικής λήψης, το οποίο υφίσταται παρεμβολή από γειτονικό επίγειο σταθμό βάσης

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ LMDS ΑΠΟ ΓΕΙΤΟΝΙΚΟ ΕΠΙΓΕΙΟ ΣΤΑΘΜΟ ΒΑΣΗΣ

5.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η επίδραση των παρεμβολών που υφίσταται ένα σύστημα LMDS λόγω γειτονικού επίγειου σταθμού βάσης, ο οποίος ανήκει στο ίδιο ή σε διαφορετικό επίγειο ασύρματο μικροκυματικό δίκτυο και λειτουργεί στην ίδια ζώνη συχνοτήτων υπό συνθήκες διάλειτουργίας βροχής. Η παρεμβολή που δημιουργείται έτσι είναι Ομοδιαυλική Παρεμβολή (Co-Channel Interference, CCI). Η ανάλυση των παρεμβολών γίνεται μόνο για συστήματα απλής πόλωσης, ενώ η μέθοδος που αναπτύσσεται είναι γενική και εκτός από τα συστήματα απλής λήψης επεκτείνεται και σε συστήματα διπλής διαφορικής προστασίας. Η ανάλυση ολοκληρώνεται με τον ακριβή ορισμό του διαφορικού κέρδους C/I, μέσω του οποίου ποσοτικοποιείται η μείωση της επίδρασης των παρεμβολών στο σύστημα από τη διαφορική λήψη κελιού.

Για τη μαθηματική αντιμετώπιση των προβλημάτων παρεμβολών γίνεται η βασική υπόθεση ότι τα σήματα παρεμβολών είναι προσθετικού τύπου και ασυσχέτιστα μεταξύ τους καθώς και με το θόρυβο [18]. Με βάση αυτήν την παραδοχή, προκύπτει η εξής έκφραση του λόγου ισχύος σήματος προς τη συνολική ισχύ θορύβου και παρεμβολών για το συνδυασμό της προς άνω και προς τα κάτω ζεύξης, CNR_t^*

$$(CNR_t^*)^{-1} = CNR_t^{-1} + CIR_t^{-1} \quad (5.1\alpha)$$

όπου

$$CNR_t^{-1} = CNR_u^{-1} + CNR_d^{-1} \quad (5.1\beta)$$

$$CIR_t^{-1} = CIR_u^{-1} + CIR_d^{-1} \quad (5.1\gamma)$$

Στις ανωτέρω σχέσεις, χρησιμοποιείται ο συμβολισμός CNR για να υποδηλώσει το λόγο της ισχύος σήματος προς την ισχύ θορύβου και CIR για να υποδηλώσει το λόγο της ισχύος σήματος προς ισχύ παρεμβολής, ενώ οι δείκτες u, d και t συμβολίζουν

αντίστοιχα την άνω ζεύξη (**uplink**), την κάτω ζεύξη (**downlink**) και το συνδυασμό (**total**) αυτών των δύο.

Στο σημείο αυτό, πρέπει να τονισθεί ότι η ανάπτυξη του παρόντος κεφαλαίου στηρίζεται στη θεώρηση ότι τα υπό μελέτη συστήματα LMDS λειτουργούν με περιορισμό στην προς τα κάτω ζεύξη (**downlink limited**). Εκείνο που ουσιαστικά ενδιαφέρει είναι η μελέτη της ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών στους χρήστες του συστήματος. Συνεπώς, αναλύονται τα μεγέθη CNR^* , CNR και CIR μόνο για την προς τα κάτω ζεύξη και οι αντίστοιχες σχέσεις ορισμού τους τροποποιούνται ως εξής

$$CNR_t \cong CNR_d \quad (5.1\delta)$$

$$CIR_t \cong CIR_d \quad (5.1\epsilon)$$

$$CNR_t^* \cong CNR_d^* = (CNR_d^{-1} + CIR_d^{-1})^{-1} \quad (5.1\sigma\tau)$$

Ειδικά για την ανάλυση του παρόντος κεφαλαίου γίνεται η πρόσθετη παραδοχή ότι η επικρατούσα παρενόχληση της προς τα κάτω ζεύξης κατά τη λειτουργία των υπό μελέτη συστημάτων είναι ο θερμικός θόρυβος (**noise-dominant system**). Η παραδοχή αυτή στηρίζεται στην υπόθεση ότι η πρόσθετη δυσλειτουργία λόγω παρεμβολής είναι πολύ μικρότερης διάρκειας συγκρινόμενη με τη διακοπή λειτουργίας της κύριας ζεύξης λόγω διάλειψης βροχής. Το αποτέλεσμα που προκύπτει από την παραπάνω παραδοχή, με βάση τις σχέσεις (5.1δ)-(5.1στ), είναι

$$N_d \gg I_d \Rightarrow CNR_d \ll CIR_d \Rightarrow CNR_d^{-1} \gg CIR_d^{-1} \Rightarrow \\ CNR_t^* \cong CNR_d^* \cong CNR_d \quad (5.2)$$

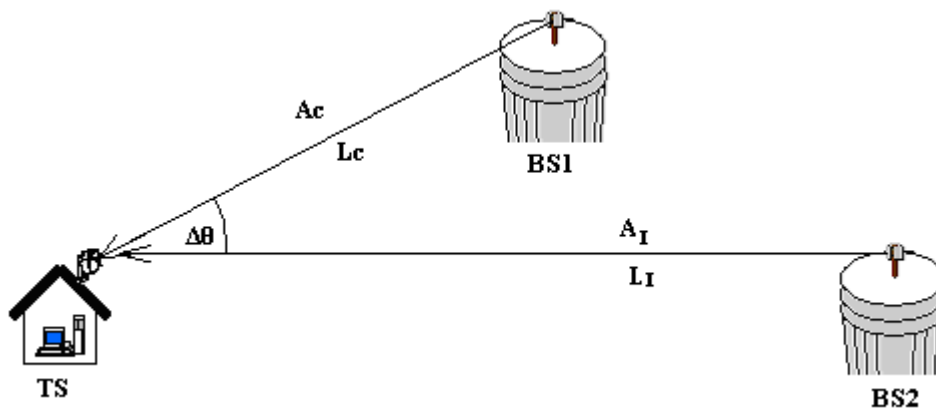
Η (5.1α) και η ειδικότερη εφαρμογή της (5.2) είναι ιδιαιτέρως χρήσιμες για τη σχεδίαση ή την αξιολόγηση τηλεπικοινωνιακών συστημάτων επικοινωνιών, όπως τα συστήματα LMDS. Εφόσον είναι γνωστό το είδος της ψηφιακής διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται και οι πηγές πιθανών παρεμβολών, προσδιορίζεται ο σηματοθορυβικός λόγος που είναι αναγκαίος για την ικανοποίηση προδιαγραφών που αφορούν την αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα του συστήματος. Βέβαια, σε πολλές περιπτώσεις, η λεπτομερής μελέτη της επίδρασης των παρεμβολών για τα διάφορα είδη ψηφιακής διαμόρφωσης απαιτεί τη συνεκτίμηση της πιθανής συνάφειας στο συγχρονισμό και τη φάση του φέροντος με το παρεμβάλλον σήμα. Ωστόσο, η θεώρηση των παρεμβολών ως

λευκού θορύβου, όπως ορίζει η εξίσωση (5.1α), αποτελεί την πλέον δυσμενή περίπτωση και οδηγεί στις λιγότερο αισιόδοξες προβλέψεις για τη λειτουργία του συστήματος.

Συνεπώς, με βάση τα προηγούμενα, ενδιαφέρει η μελέτη μόνο της προς τα κάτω ζεύξης (downlink) και ο υπολογισμός μόνο του λόγου C/I (ή CIR_d) που αντιστοιχεί στο τερματικό σταθμό ενός χρήστη του συστήματος. Τέλος, σημειώνεται ότι η ανάλυση των παρεμβολών που ακολουθεί βασίζεται στο μοντέλο των συνεκτικών βροχοκυρήνων καθώς και στην υπόθεση ότι η σημειακή ένταση βροχόπτωσης και η απόσβεση που επιφέρει ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή (βλ. Κεφάλαιο 3).

5.2 Σύστημα LMDS απλής λήψης

Στο σχήμα 5.1 απεικονίζεται η γεωμετρία του προβλήματος που απασχολεί την παρούσα ενότητα.



Σχήμα 5.1: Σύστημα LMDS απλής λήψης με παρεμβολή από γειτονικό σταθμό BS2

Σύμφωνα με αυτό, το τερματικό χρήστη TS του συστήματος LMDS βρίσκεται σε επικοινωνία και εξυπηρετείται από το σταθμό βάσης BS1. Ο παρακείμενος σταθμός βάσης BS2 λειτουργεί σε παραπλήσια συχνότητα με το σταθμό BS1 και η γωνιακή του απόσταση από τον τελευταίο ως προς το TS, είναι $\Delta\theta$. Τα εκπεμπόμενα ΗΜ κύματα και από τους δύο σταθμούς βάσης είναι απλής πόλωσης. Η κεραία του TS έχει επιλεγεί ώστε να υποβιβάζονται σήματα παρεμβολής που προέρχονται από διευθύνσεις διαφορετικές της TS-BS1. Κατά τη διάρκεια βροχόπτωσης εμφανίζεται πρόσθετη απόσβεση λόγω βροχής στο ραδιοβήμα TS-BS1 του επιθυμητού σήματος και στο TS-BS2 του

ανεπιθύμητου παρεμβάλλοντος σήματος. Αν η απόσβεση του επιθυμητού σήματος υπερβεί την απόσβεση του παρεμβάλλοντος, αυξάνει η παρεμβολή και χειροτερεύει η ποιότητα της επικοινωνίας TS-BS1. Ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια βροχόπτωσης, οι παρεμβολές αυξάνουν σημαντικά όσο πιο πολύ ελαττώνεται η γωνιακή απόσταση $\Delta\theta$, δηλαδή ισοδύναμα όσο πιο μικρή γίνεται η γωνία απόκλισης (off-axis angle) που σχηματίζει η διεύθυνση της διαδρομής της παρεμβάλλουσας ζεύξης TS-BS2 με την αντίστοιχη διεύθυνση της διαδρομής της κύριας ζεύξης TS-BS1, στην οποία αντιστοιχεί το μέγιστο κέρδος της κεραίας δέκτη του σταθμού TS. Το τερματικό χρήστη TS απέχει από το σταθμό BS1 απόσταση L_C ενώ από το σταθμό BS2 απόσταση L_I . Όσον αφορά τις γωνίες ανύψωσης των κεκλιμένων ραδιοδρόμων, κατά μήκος των οποίων θεωρείται ότι οι αντίστοιχες ζεύξεις υποφέρουν από τη βροχή, λαμβάνονται όλες ίσες με μηδέν (0°), όπως άλλωστε συμβαίνει σε κάθε ζεύξη μεταξύ επίγειων σταθμών.

Η ανάλυση του προβλήματος των παρεμβολών από γειτονικό επίγειο σταθμό βάσης γίνεται ακολουθώντας τη στατιστική θεώρηση της διαφορικής απόσβεσης λόγω βροχής μεταξύ του επιθυμητού και του παρεμβάλλοντος σήματος [29]. Για το σύστημα του σχήματος 5.1, η απόσβεση του επιθυμητού σήματος είναι A_C ενώ του παρεμβάλλοντος είναι A_I . Η διαφορική απόσβεση που συμβολίζεται με ΔA είναι η διαφορά $A_C - A_I$. Η ανάλυση του προβλήματος σχετίζεται με τη στατιστική κατανομή της διαφορικής απόσβεσης υπό τη δέσμευση ότι η απόσβεση του επιθυμητού σήματος A_C κυμαίνεται στο διάστημα από 0.5dB έως M_s (dB). Η στάθμη M_s (dB) αναφέρεται στο περιθώριο διάλειψης λόγω βροχής για σύστημα απλής λήψης, υπολογίζεται με βάση τη σχέση (4.5) και η φυσική της ερμηνεία σχετίζεται με την εξασφάλιση της επικοινωνίας TS-BS1. Αν η απόσβεση A_C υπερβεί τη στάθμη M_s , η ζεύξη TS-BS1 τίθεται εκτός λειτουργίας. Το κάτω όριο δέσμευσης 0.5dB της A_C είναι ενδεικτικό και τίθεται ώστε να διασφαλισθεί η αναγκαιότητα μελέτης της παρεμβολής. Για αποσβέσεις A_C μικρότερες των 0.5dB αρκεί η απόρριψη του σήματος παρεμβολής από το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας λήψης του τερματικού χρήστη TS, ώστε η ζεύξη TS-BS1 να λειτουργεί χωρίς παρενόχληση.

Ο λόγος της ισχύος του φέροντος του επιθυμητού σήματος προς την ισχύ του παρεμβάλλοντος, στην είσοδο του TS, συμβολίζεται με $\frac{C}{I}$. Με τα μεγέθη των

σηματοθορυβικών λόγων και αποσβέσεων εκφρασμένα σε dB και τις ισχύεις σε dBw, ισχύει

$$\begin{aligned}\frac{C}{I} &= C - I \Rightarrow \\ \frac{C}{I} &= (C_{nom} - A_C) - (I_{nom} - A_I) \Rightarrow \\ \frac{C}{I} &= (C_{nom} - I_{nom}) - A_C + A_I \Rightarrow \\ \frac{C}{I} &= \left(\frac{C}{I}\right)_{nom} - A_C + A_I\end{aligned}\quad (5.3)$$

ή ισοδύναμα

$$\frac{C}{I} = \left(\frac{C}{I}\right)_{nom} - \Delta A \quad (5.4)$$

όπου $\left(\frac{C}{I}\right)_{nom}$ είναι η ονομαστική τιμή του λόγου $\frac{C}{I}$ απουσία βροχής, υπό συνθήκες καθαρού ουρανού (clear sky).

Το ποσοστό του χρόνου στη διάρκεια του οποίου το σύστημα λειτουργεί παρουσία βροχής αλλά υποφέρει από παρεμβολή εκφράζεται από την ακόλουθη δεσμευμένη πιθανότητα [29]

$$P(\text{ΠΑΡΕΝΟΧΛΗΣΗΣ} | \text{ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ}) = \frac{P(\text{ΠΑΡΕΝΟΧΛΗΣΗΣ}, \text{ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ})}{P(\text{ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ})} \quad (5.5)$$

Η παραπάνω έκφραση με εισαγωγή των μεγεθών $\frac{C}{I}$, A_C , A_I και M_s γίνεται ως εξής

$$P\left(\frac{C}{I} < r_s \mid 0.5 < A_C < M_s\right) = \frac{P\left(\frac{C}{I} < r_s, 0.5 < A_C < M_s\right)}{P(0.5 < A_C < M_s)} \quad (5.6)$$

όπου r_s είναι η μέγιστη επιτρεπτή τιμή του μεγέθους $\frac{C}{I}$ παρουσία βροχής για σύστημα απλής λήψης. Αν αντικατασταθεί το μέγεθος $\frac{C}{I}$ από την (5.2) προκύπτει

$$P(\Delta A > r'_s \mid 0.5 < A_C < M_s) = \frac{P(\Delta A > r'_s, 0.5 < A_C < M_s)}{P(0.5 < A_C < M_s)} \quad (5.7)$$

$$\text{όπου } r'_s = \left(\frac{C}{I} \right)_{nom} - r_s \quad (5.8)$$

ή ισοδύναμα

$$P(\Delta A > r'_s \mid 0.5 < A_C < M_s) = \frac{P(A_C - A_I > r'_s, 0.5 < A_C < M_s)}{P(0.5 < A_C < M_s)} = \frac{P_A}{P_{\Pi}} \quad (5.9)$$

Για τον υπολογισμό της δεσμευμένης πιθανότητας, που εκφράζεται στις σχέσεις (5.5), (5.6), (5.7) και (5.9), γίνεται η βασική υπόθεση ότι η σημειακή ένταση βροχόπτωσης καθώς και η απόσβεση που επιφέρει ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή (βλ. Κεφάλαιο 3).

5.2.1 Παράμετροι κατανομής των τ.μ. A_C και A_I

Οι τ.μ. A_C και A_I , που αντιστοιχούν στις αποσβέσεις λόγω βροχής που υφίστανται οι επίγειες ζεύξεις TS-BS1 και TS-BS2 με μήκη L_C και L_I αντίστοιχα, θεωρείται ότι ακολουθούν την δισδιάστατη από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή. Οι παράμετροι A_m και S_a της περιθώριας σ.π.π. της τ.μ. A_C δίνονται από τους παρακάτω τύπους

$$S_a^2 = \ln \left\{ 1 + \frac{H_{1c}}{L_c^2} \cdot [\exp(b^2 S_r^2) - 1] \right\} \quad (5.10\alpha)$$

$$A_m = \alpha \cdot R_m^b \cdot L_C \cdot \exp \left(\frac{b^2 \cdot S_r^2 - S_a^2}{2} \right) \quad (5.10\beta)$$

όπου R_m , S_r είναι οι παράμετροι της σημειακής έντασης βροχόπτωσης για την υπό μελέτη περιοχή (βλ. Παράρτημα E) και a , b είναι οι συντελεστές που καθορίζονται από το Διεθνή Οργανισμό ITU-R για την ειδική απόσβεση A_0 (dB/km) και δίνονται στις σχέσεις (3.4) και (3.5).

Οι παράμετροι A_{mi} και S_{ai} της περιθώριας σ.π.π. της τ.μ. A_I δίνονται αντίστοιχα από τους παρακάτω τύπους

$$S_{ai}^2 = \ln \left\{ 1 + \frac{H_{1I}}{L_I^2} \cdot [\exp(b^2 S_r^2) - 1] \right\} \quad (5.11\alpha)$$

$$A_{mi} = \alpha \cdot R_m^b \cdot L_I \cdot \exp \left(\frac{b^2 \cdot S_r^2 - S_{ai}^2}{2} \right) \quad (5.11\beta)$$

Τα μεγέθη H_{IC} και H_{II} υπολογίζονται με τη βοήθεια της σχέσης (3.17) με αντικατάσταση του L από τα L_C και L_I , αντίστοιχα.

Ο συντελεστής συσχέτισης των τ.μ. A_C και A_I υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση

$$\rho_{A_C A_I} = \frac{E[A_C \cdot A_I] - E[A_C] \cdot E[A_I]}{\sqrt{Var[A_C]} \cdot \sqrt{Var[A_I]}} \quad (5.12)$$

Σύμφωνα με τη σχέση (3.9), ισχύει

$$E[A_C] = \mu_o \cdot L_C \quad (5.13\alpha)$$

$$E[A_I] = \mu_o \cdot L_I \quad (5.13\beta)$$

ενώ σύμφωνα με τη σχέση (3.10), ισχύει

$$Var[A_C] = \sigma_o^2 \cdot H_{IC} \quad (5.14\alpha)$$

$$Var[A_I] = \sigma_o^2 \cdot H_{II} \quad (5.14\beta)$$

Η μέση τιμή $E[A_C \cdot A_I]$ υπολογίζεται ως εξής

$$E[A_C \cdot A_I] = E \left[\int_0^{L_C} dl_c \int_0^{L_I} dl_i A_0(l_c) \cdot A_0(l_i) \right] = \int_0^{L_C} dl_c \int_0^{L_I} dl_i E[A_0(l_c) \cdot A_0(l_i)] \quad (5.15)$$

Με άμεση στατιστική ανάλυση προκύπτει ότι

$$E[A_0(l_c) \cdot A_0(l_i)] = \rho_{2a1}(l_c, l_i) \cdot \sigma_o^2 + \mu_o^2 \quad (5.16)$$

όπου το μέγεθος $\rho_{2a1}(l_c, l_i)$ εκφράζει το σημειακό συντελεστή συσχέτισης και δίνεται στην παράγραφο §A.2.1 του Παραρτήματος Α. Στο σημείο αυτό αξίζει να τονισθεί ότι η γωνιά μεταξύ των δύο τεμνόμενων ραδιοβημάτων είναι ίση με $\Delta\theta$ (βλ. σχήμα 5.1).

Με εισαγωγή της σχέσης (5.16) στην (5.15), προκύπτει

$$E[A_C \cdot A_I] = \sigma_o^2 \cdot H_{2a1} + \mu_o^2 \cdot L_C \cdot L_I \quad (5.17)$$

$$\text{όπου } H_{2a1} = \int_0^{L_C} dl_c \int_0^{L_I} dl_i \rho_{2a1}(l_c, l_i) \quad (5.18)$$

Ο υπολογισμός του H_{2a1} γίνεται στο Παράρτημα Α. Από τις σχέσεις (5.12) έως και (5.18), προκύπτει για το συντελεστή συσχέτισης των τ.μ. A_C και A_I , ότι

$$\rho_{A_C A_I} = \frac{H_{2a1}}{\sqrt{H_{IC} \cdot H_{II}}} \quad (5.19)$$

5.2.2 Υπολογισμός δεσμευμένης πιθανότητας P_A/P_{Π}

Ο αριθμητής P_A της δεσμευμένης πιθανότητας που δίνεται από τη σχέση (5.9) προκύπτει

$$P_A = P(A_I < A_C - r'_s, 0.5 < A_C < M_s) \quad (5.20)$$

Με βάση τα σχήματα 5.2(α)-5.2(γ) που απεικονίζουν το σύνθετο ενδεχόμενο της πιθανότητας της σχέσης (5.20) στο χωρίο του επιπέδου $A_C A_I$, ισχύει για κάθε περίπτωση

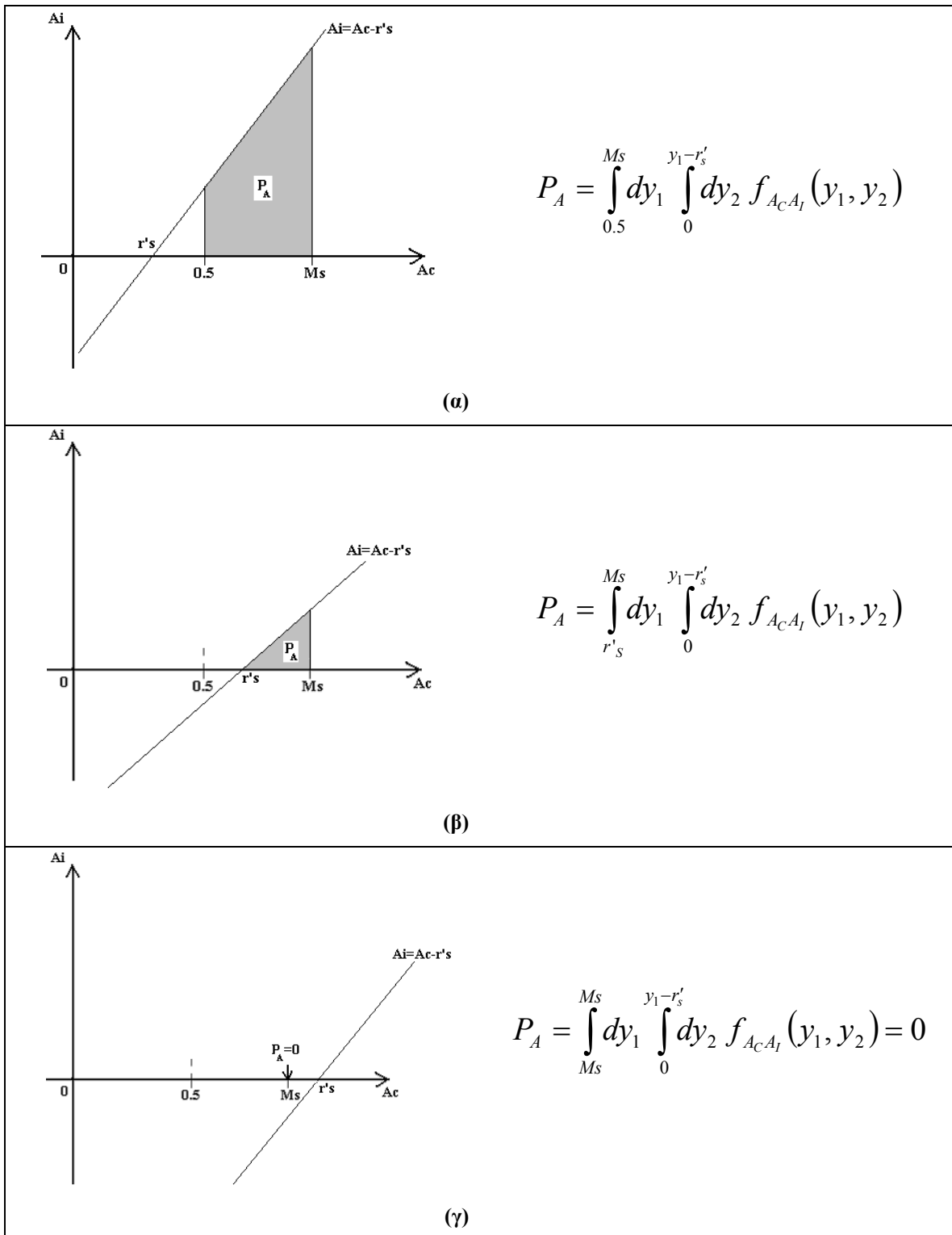
$$P_A = \int_{x_s}^{M_s} dy_1 \int_0^{y_1 - r'_s} dy_2 f_{A_C A_I}(y_1, y_2) \quad (5.21)$$

$$\text{όπου } x_s = \begin{cases} 0.5 & , \quad r'_s < 0.5 \\ r'_s & , \quad 0.5 < r'_s < M_s \\ M_s & , \quad M_s \leq r'_s \end{cases} \quad (5.22)$$

και $f_{A_C A_I}(y_1, y_2)$ είναι η από κοινού σ.π.π. των λογαριθμοκανονικών τ.μ. A_C και A_I .

Για τον παρονομαστή P_{Π} της δεσμευμένης πιθανότητας που δίνεται από τη σχέση (5.9) ισχύει

$$P_{\Pi} = P(0.5 < A_C < M_s) = \int_{0.5}^{M_s} dy_1 f_{A_C}(y_1) \quad (5.23)$$



Σχήμα 5.2: Χορίο υπολογισμού του αριθμητή της δεσμευμένης πιθανότητας P_A

Ακολουθώντας τις διαδικασίες μετασχηματισμού ολοκληρωμάτων που αναπτύσσονται στα Παραρτήματα Β και Γ, οι σχέσεις (5.21) και (5.23) μετατρέπονται αντίστοιχα στις

$$P_A = \int_{u_{1ks}}^{u_{1ps}} du_1 f_{U_1}(u_1) \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{u_{3s1} - \rho_n \cdot u_1}{\sqrt{2 \cdot (1 - \rho_n^2)}} \right) \right] \quad (5.24)$$

$$P_{\Pi} = \frac{1}{2} \cdot \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{u_{00}}{\sqrt{2}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{u_{1ps}}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (5.25)$$

όπου

$$u_{1ps} = \frac{\ln(M_s) - \ln(A_m)}{S_a} \quad (5.26\alpha)$$

$$u_{1ks} = \frac{\ln(x_s) - \ln(A_m)}{S_a} \quad (5.26\beta)$$

$$u_{00} = \frac{\ln(0.5) - \ln(A_m)}{S_a} \quad (5.26\gamma)$$

$$u_{3s1} = \frac{\ln[\exp(u_1 \cdot S_a) \cdot A_m - r'_s] - \ln(A_{mi})}{S_{ai}} \quad (5.26\delta)$$

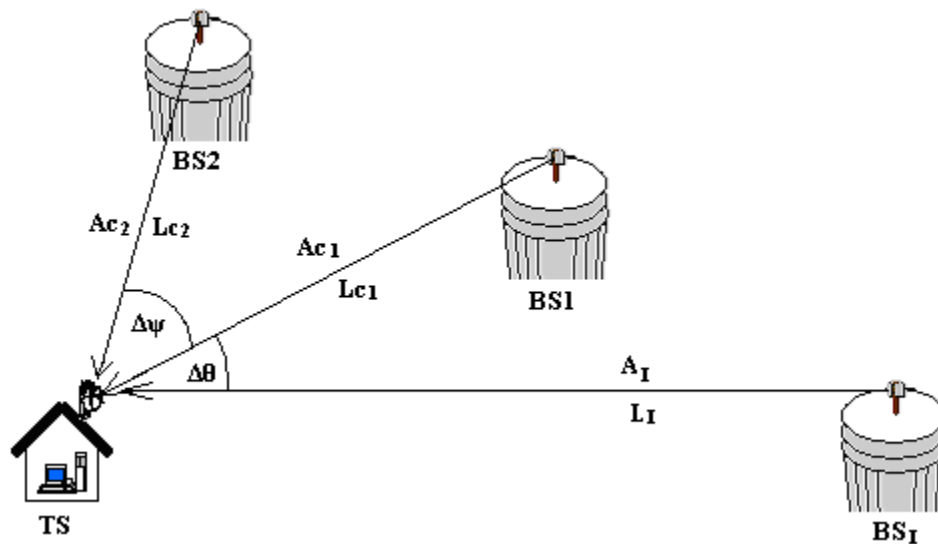
Ο λογαριθμικός συντελεστής συσχέτισης ρ_n του ζεύγους των από κοινού κανονικών τ.μ. $\ln(A_C)$ και $\ln(A_I)$ υπολογίζεται με βάση το χωρικό συντελεστή συσχέτισης $\rho_{A_C A_I}$ του ζεύγους των από κοινού λογαριθμοκανονικών τ.μ. A_C και A_I μέσω της σχέσης (Γ.22) του Παραρτήματος Γ.

Συνεπώς, το ποσοστό του χρόνου στη διάρκεια του οποίου το σύστημα απλής λήψης λειτουργεί παρουσία βροχής, αλλά υποφέρει από παρεμβολή, και εκφράζεται μέσω της δεσμευμένης πιθανότητας της σχέσης (5.5), υπολογίζεται από το πηλίκο P_A/P_{Π} , όπου αριθμητής και παρονομαστής δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις (5.24) και (5.25). Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται η ανάλυση του προβλήματος των παρεμβολών σε σύστημα LMDS απλής λήψης (και απλής πόλωσης) από γειτονικό επίγειο σταθμό βάσης που λειτουργεί στην ίδια ζώνη συχνοτήτων υπό συνθήκες διάλειψης βροχής. Στη συνέχεια, αντιμετωπίζεται το αντίστοιχο πρόβλημα διπλής λήψης, κατά το οποίο υπάρχει εφαρμογή διπλής διαφορικής προστασίας σε επίγειο σύστημα LMDS.

5.3 Σύστημα LMDS διπλής διαφορικής προστασίας

Στην παρούσα ενότητα μελετάται η χρήση της τεχνικής διπλής διαφορικής λήψης κελιού σε κυψελωτά συστήματα LMDS για τη μείωση επίδρασης των παρεμβολών που υφίστανται λόγω της ύπαρξης γειτονικών επίγειων σταθμών βάσης, οι οποίοι λειτουργούν στην ίδια συχνότητα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά την εφαρμογή της τεχνικής αυτής, ένας τερματικός σταθμός χρήστη λαμβάνει σήμα ταυτόχρονα από δύο σταθμούς βάσης του ίδιου συστήματος και επιλέγει κάθε φορά να εξυπηρετηθεί από εκείνον που του εξασφαλίζει καλύτερη στάθμη σηματοθορυβικού λόγου και κατεπέκταση καλύτερη ποιότητα προσφερόμενων υπηρεσιών.

Η γεωμετρία του συγκεκριμένου προβλήματος απεικονίζεται στο σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3: Γεωμετρία συστήματος LMDS διπλής διαφορικής λήψης με παρεμβολή από γειτονικό σταθμό BS₁

Σύμφωνα με αυτό, ο τερματικός σταθμός χρήστη TS διατηρεί ταυτόχρονα συνδέσεις και επικοινωνεί και με τους δύο σταθμούς βάσης, BS1 και BS2, του συστήματος LMDS είτε διαθέτοντας δύο κεραίες λήψης είτε κάνοντας χρήση μιας ευφυούς κεραίας με τον τρόπο που περιγράφηκε στην παράγραφο §4.1. Η απόσταση της ζεύξης TS-BS1 είναι L_{C1} και η απόσβεση που εισάγεται λόγω βροχής κατά μήκος αυτής είναι A_{C1} , ενώ, αντίστοιχα, L_{C2} και A_{C2} είναι το μήκος της ζεύξης TS-BS2 και η απόσβεση λόγω βροχής που επιβαρύνει αυτήν. Η γωνιακή απόσταση μεταξύ των

σταθμών BS1 και BS2 ως προς το TS είναι ίση με $\Delta\psi$. Σε απόσταση L_1 από το σταθμό TS βρίσκεται ένας άλλος επίγειος σταθμός βάσης BS_i που λειτουργεί στην ίδια ζώνη συχνοτήτων με τους BS1 και BS2 και η γωνιακή του απόσταση από τον πρώτο, ως προς το TS, είναι $\Delta\theta$. Η απόσβεση λόγω βροχής που εισάγεται στο παρεμβάλλον ανεπιθύμητο σήμα από τον BS_i στο TS συμβολίζεται με A_i . Όσον αφορά τις γωνίες ανύψωσης των διαφόρων ραδιοδρόμων, που υπεισέρχονται κατά την ανάλυση του προβλήματος λαμβάνονται όλες ίσες με μηδέν (0°). Επίσης, θεωρείται ότι η πόλωση τόσο του κύριου όσο και του παρεμβάλλοντος συστήματος είναι απλή.

Στην ανάλυση που ακολουθεί, λαμβάνεται υπόψη η γενικότερη περίπτωση μη ισοσταθμισμένου συστήματος διπλής διαφορικής προστασίας. Έτσι, οι αποστάσεις L_{C1} και L_{C2} θεωρούνται διαφορετικές μεταξύ τους. Ωστόσο, μπορεί να θεωρηθεί γενικά ότι καθεμία από τις δύο ραδιοζεύξεις λειτουργεί με κοινό περιθώριο διάλειψης λόγω βροχής M_d (dB) το οποίο υπολογίζεται με τον τρόπο που περιγράφηκε στην παράγραφο §4.2.2. Συνεπώς, το συνολικό σύστημα θεωρείται ότι τίθεται εκτός λειτουργίας όταν οι αποσβέσεις λόγω βροχής και των δύο ραδιοδρόμων υπερβούν το κοινό περιθώριο διάλειψης λόγω βροχής, δηλαδή όταν ισχύει $A_{C1} > M_d$ και ταυτόχρονα $A_{C2} > M_d$.

Επίσης, θεωρείται ότι ο χρησιμοποιούμενος RF εξοπλισμός στους σταθμούς βάσης του συστήματος είναι κοινός. Συνεπώς, η ισχύς εκπομπής (P_{TX}) και τα κέρδη των κεραιών εκπομπής (G_{TX}) στους σταθμούς βάσης του συστήματος είναι κοινά για κάθε περίπτωση ζεύξης που υπεισέρχεται κατά την ανάλυση του προβλήματος. Κοινές επίσης είναι και οι απώλειες ελευθέρου χώρου (FSL) που υφίσταται η παρεμβάλλουσα ζεύξη μεταξύ TS- BS_i κάθε φορά που το TS εξυπηρετείται από τον αντίστοιχο κύριο σταθμό BS_i ($i=1,2$). Ωστόσο, τα μεγέθη που διαφέρουν κάθε φορά είναι οι απώλειες ελευθέρου χώρου που υφίστανται σε κάθε ζεύξη του TS με τον αντίστοιχο κύριο σταθμό BS_i ($i=1,2$) ($L_{C1} \neq L_{C2}$) καθώς και η γωνία υπό την οποία “βλέπει” η κεραία λήψης του TS τον παρεμβάλλοντα σταθμό BS_i όταν εξυπηρετείται από τον αντίστοιχο κύριο σταθμό BS_i ($i=1,2$). Επομένως, η ονομαστική τιμή του λόγου C/I για τη λειτουργία της ζεύξης TS- BS_i ($i=1,2$) ως κύριας, απουσία βροχής υπό συνθήκες καθαρού ουρανού, δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{i,nom} = \left(\frac{C}{I}\right)_i^* - G_R(\theta_i) \quad (i=1,2) \quad (5.27)$$

όπου

$\left(\frac{C}{I}\right)_i^*$ ($i=1,2$) είναι ο λόγος C/I που αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου η κεραία λήψης του σταθμού TS παρουσιάζει μέγιστο κέρδος στη διεύθυνση TS-BS_i ($i=1,2$). Τα αντίστοιχα μεγέθη για $i=1,2$ συνδέονται μέσω της σχέσης

$$\left(\frac{C}{I}\right)_1^* - \left(\frac{C}{I}\right)_2^* = FSL_2 - FSL_1 = 20 \cdot \log\left(\frac{L_{C2}}{L_{C1}}\right) \quad (5.28)$$

$G_R(\theta)$ η συνάρτηση κατευθυντικού κέρδους της κεραίας λήψης του σταθμού TS που δίνεται στη σχέση (2.1), και

θ_i ($i=1,2$) η γωνία απόκλισης (off-axis angle) που σχηματίζει η διεύθυνση της διαδρομής TS-BS_i με την αντίστοιχη διεύθυνση της διαδρομής TS-BS_i ($i=1,2$) στην οποία αντιστοιχεί το μέγιστο κέρδος της κεραίας δέκτη του σταθμού TS, και η οποία με βάση το σχήμα 5.3, προκύπτει

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \Delta\theta \quad , \quad \text{Κύρια Ζεύξη TS - BS1} \\ \theta_2 &= \Delta\theta + \Delta\psi \quad , \quad \text{Κύρια Ζεύξη TS - BS2} \end{aligned} \quad (5.29)$$

Με βάση τις σχέσεις (5.27)-(5.29), η σχέση μεταξύ των μεγεθών $\left(\frac{C}{I}\right)_{i,nom}$ ($i=1,2$)

προκύπτει

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{2,nom} = \left(\frac{C}{I}\right)_{1,nom} + 20 \cdot \log\left(\frac{L_{C1}}{L_{C2}}\right) + G_R(\Delta\theta) - G_R(\Delta\theta + \Delta\psi) \quad (5.30)$$

Κάθε χρονική στιγμή, το τερματικό χρήστη TS διατηρεί παράλληλα συνδέσεις και με τους δύο σταθμούς βάσης και επιλέγει να εξυπηρετηθεί από εκείνον που του εξασφαλίζει χαμηλότερο ποσοστό σφαλμάτων (Bit Error Ratio, BER). Έτσι, η έξοδος του συστήματος προέρχεται από τον BS_i ($i=1,2$) με τον υψηλότερο σηματοθορυβικό λόγο. Στην υπό μελέτη περίπτωση, όπου ο παρεμβάλλον σταθμός βάσης BS_i είναι κοινός και συνεπώς η στάθμη της ισχύος του παρεμβάλλοντος σήματος στο δέκτη του TS είναι κοινή ανεξάρτητα από την ταυτότητα της κύριας ζεύξης, προκύπτει ότι η έξοδος του συνολικού συστήματος προέρχεται από το σταθμό βάσης BS_i ($i=1,2$) εκείνον, του οποίου το σήμα προς το TS υφίσταται τις μικρότερες αποσβέσεις. Οι απώλειες ελευθέρου χώρου που οφείλονται στη διαφορά των μηκών L_{C1} και L_{C2} αποτελούν μια σταθερή ποσότητα

στο χρόνο και δεν μπορούν να μελετηθούν με στοχαστική ανάλυση. Θεωρώντας ότι η βροχή, που μεταβάλλεται στο χρόνο και στο χώρο ως χωροχρονική στοχαστική διαδικασία, αποτελεί τον κυρίαρχο μηχανισμό διαλείψεων στο υπό μελέτη σύστημα, έπεται ότι οι αποσβέσεις που καθορίζουν ποια από τις δύο ζεύξεις πρόκειται να αποτελέσει την κύρια ζεύξη εξυπηρέτησης του TS είναι οι αποσβέσεις λόγω βροχής A_{C_i} ($i=1,2$) σε κάθε ραδιοδρόμο. Συνεπώς, εκείνος ο σταθμός βάσης BS_i ($i=1,2$) που αντιστοιχεί στη μικρότερη απόσβεση λόγω βροχής A_{C_i} ($i=1,2$) αποτελεί τον κύριο σταθμό εξυπηρέτησης του σταθμού χρήστη TS. Όσον αφορά το λόγο C/I στην είσοδο του σταθμού χρήστη TS, ισχύει η εξής σχέση (σε dB)

$$\left(\frac{C}{I}\right)_i = \left(\frac{C}{I}\right)_{i,nom} - A_{C_i} + A_I, \quad (i=1,2) \quad (5.31)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, θα υπολογισθεί η δεσμευμένη πιθανότητα που εκφράζει το ποσοστό του χρόνου λειτουργίας του συστήματος στη διάρκεια του οποίου υφίσταται παρεμβολές υπό συνθήκες διάλειψης βροχής. Πρόκειται για την ίδια δεσμευμένη πιθανότητα που δίνεται στην (5.5), η οποία στην προκειμένη περίπτωση της διπλής διαφορικής λήψης λαμβάνει την εξής ειδική μορφή

$$P\left(\left(\frac{C}{I}\right) < r_d \mid 0.5 < \min\{A_{C_1}, A_{C_2}\} < M_d\right) = \frac{P\left(\left(\frac{C}{I}\right) < r_d, 0.5 < \min\{A_{C_1}, A_{C_2}\} < M_d\right)}{P(0.5 < \min\{A_{C_1}, A_{C_2}\} < M_d)} = \frac{P_A}{P_\Pi} \quad (5.32)$$

Η μαθηματική έκφραση του ενδεχομένου της επιλογής του σταθμού ($BS1$ ή $BS2$) από τον οποίο θα εξυπηρετείται το τερματικό χρήστη TS, όπως έχει αναφερθεί, είναι

$$\Pi = \{0.5 < \min\{A_{C_1}, A_{C_2}\} < M_d\} \quad (5.33)$$

και ορίζοντας τα επιμέρους ενδεχόμενα

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \{\text{Λειτουργία Κύριας Ζεύξης TS} - BS1\} = \{0.5 < A_{C_1} < M_d, A_{C_1} < A_{C_2}\} \\ \Pi_2 &= \{\text{Λειτουργία Κύριας Ζεύξης TS} - BS2\} = \{0.5 < A_{C_2} < M_d, A_{C_2} < A_{C_1}\} \end{aligned} \quad (5.34)$$

τότε προφανώς θα ισχύει

$$\left. \begin{aligned} \Pi &= \Pi_1 \cup \Pi_2 \\ \Pi_1 \cap \Pi_2 &= \emptyset \end{aligned} \right\} \Rightarrow P(\Pi) = P(\Pi_1) + P(\Pi_2) \quad (5.35)$$

Αντίστοιχα, το ενδεχόμενο της λειτουργίας του συστήματος υπό συνθήκες διάλειψης βροχής υφιστάμενο παράλληλα τις παρεμβολές του γειτονικού σταθμού BS_i, εκφράζεται μαθηματικά ως εξής

$$A = \left\{ \left(\frac{C}{I} \right) < r_d, 0.5 < \min\{A_{C1}, A_{C2}\} < M_d \right\} \quad (5.36)$$

Κατά τη διάρκεια όπου ισχύει το επιμέρους ενδεχόμενο Π_i ($i=1,2$), το σύστημα υποφέρει από παρεμβολές όταν ισχύει αντίστοιχα $\left(\frac{C}{I} \right)_i < r_d$ ($i=1,2$). Το ενδεχόμενο αυτό εκφράζεται από την πιθανότητα

$$A_i = \{ \text{Παρεμβολή, Λειτουργία Κύριας Ζεύξης TS - BS}_i \} = \left\{ \left(\frac{C}{I} \right)_i < r_d, \Pi_i \right\} \quad (5.37)$$

όπου ($i=1,2$).

Αναλύοντας περαιτέρω τα επιμέρους ενδεχόμενα A_1 και A_2 , έχουμε

$$\begin{aligned} A_1 &= \left\{ \left(\frac{C}{I} \right)_1 < r_d, 0.5 < A_{C1} < M_d, A_{C1} < A_{C2} \right\} \Rightarrow \\ A_1 &= \left\{ \left(\frac{C}{I} \right)_{1,nom} - A_{C1} + A_I < r_d, 0.5 < A_{C1} < M_d, A_{C1} < A_{C2} \right\} \Rightarrow \\ A_1 &= \left\{ A_I < A_{C1} - \left(\frac{C}{I} \right)_{1,nom} + r_d, 0.5 < A_{C1} < M_d, A_{C1} < A_{C2} \right\} \end{aligned} \quad (5.38\alpha)$$

και ομοίως

$$A_2 = \left\{ A_I < A_{C2} - \left(\frac{C}{I} \right)_{2,nom} + r_d, 0.5 < A_{C2} < M_d, A_{C2} < A_{C1} \right\} \quad (5.38\beta)$$

Είναι προφανές ότι για τα επιμέρους ενδεχόμενα A_1, A_2 ισχύουν τα εξής

$$\left. \begin{aligned} A &= A_1 \cup A_2 \\ A_1 \cap A_2 &= \emptyset \end{aligned} \right\} \Rightarrow P(A) = P(A_1) + P(A_2) \quad (5.39)$$

Με προσεκτική παρατήρηση και συνδυάζοντας κατάλληλα τα παραπάνω επιμέρους ενδεχόμενα Π_i και A_i ($i=1,2$), προκύπτει ότι η δεσμευμένη πιθανότητα που δίνεται στην (5.32) είναι

$$\frac{P_A}{P_{\Pi}} = \frac{P(A_1) + P(A_2)}{P(\Pi_1) + P(\Pi_2)} = \frac{P_{A_1} + P_{A_2}}{P_{\Pi_1} + P_{\Pi_2}} \quad (5.40)$$

όπου

$$P_{\Pi_1} = P(0.5 < A_{C1} < M_d, A_{C1} < A_{C2}) \quad (5.41\alpha)$$

$$P_{\Pi_2} = P(0.5 < A_{C2} < M_d, A_{C2} < A_{C1}) \quad (5.41\beta)$$

$$P_{A_1} = P\left(A_I < A_{C1} - \left(\frac{C}{I}\right)_{1,nom} + r_d, 0.5 < A_{C1} < M_d, A_{C1} < A_{C2}\right) \quad (5.41\gamma)$$

$$P_{A_2} = P\left(A_I < A_{C2} - \left(\frac{C}{I}\right)_{2,nom} + r_d, 0.5 < A_{C2} < M_d, A_{C2} < A_{C1}\right) \quad (5.41\delta)$$

Στις ανωτέρω σχέσεις η στάθμη 0.5dB τίθεται και πάλι ως ένα ενδεικτικό κάτω όριο για την απόσβεση λόγω βροχής, που είναι απαραίτητο ώστε να διασφαλισθεί η αναγκαιότητα μελέτης της παρεμβολής. Για αποσβέσεις A_{Ci} ($i=1,2$) μικρότερες των 0.5dB, αρκεί η απόρριψη του σήματος παρεμβολής από το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας λήψης του τερματικού χρήστη TS, ώστε οι ζεύξεις TS-BS i ($i=1,2$) να λειτουργούν χωρίς παρενόχληση. Το μέγεθος r_d (dB) είναι η μέγιστη επιτρεπτή τιμή του λόγου C/I παρουσία βροχής για το σύστημα διπλής διαφορικής προστασίας και θεωρείται κοινό για τις δύο ζεύξεις TS-BS i ($i=1,2$). Η θεώρηση αυτή επιτρέπεται εφόσον, γενικά, ενδιαφέρει η μελέτη της ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών στους χρήστες του συστήματος και ως εκ τούτου ο λόγος C/I που αντιστοιχεί στο σύστημα θεωρείται μοναδικός.

Στο σημείο αυτό, ορίζονται για μεγαλύτερη ευκολία των υπολογισμών, τα μεγέθη:

$$r'_{d1} = \left(\frac{C}{I}\right)_{1,nom} - r_d \quad (5.42\alpha)$$

$$r'_{d2} = \left(\frac{C}{I}\right)_{2,nom} - r_d \quad (5.42\beta)$$

Με βάση τις σχέσεις (5.42), οι σχέσεις (5.41γ) και (5.41δ), παίρνουν την εξής μορφή

$$P_{A_1} = P(A_I < A_{C1} - r'_{d1}, 0.5 < A_{C1} < M_d, A_{C1} < A_{C2}) \quad (5.43\alpha)$$

$$P_{A_2} = P(A_I < A_{C2} - r'_{d2}, 0.5 < A_{C2} < M_d, A_{C2} < A_{C1}) \quad (5.43\beta)$$

5.3.1 Παράμετροι κατανομής των τ.μ. A_{C1} , A_{C2} και A_I

Όπως έχει αναφερθεί στην εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου, γίνεται η βασική υπόθεση ότι η σημειακή ένταση βροχόπτωσης και η προκαλούμενη εξ αυτής απόσβεση ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή. Με βάση αυτή την υπόθεση θεωρείται ότι οι τ.μ. A_{C1} , A_{C2} και A_I ακολουθούν ανά τρεις την τρισδιάστατη από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή.

Οι παράμετροι A_m και S_a της περιθώριας σ.π.π. των τ.μ. A_{C1} , A_{C2} και A_I , δίνονται αντίστοιχα από τους παρακάτω τύπους

$$\left. \begin{aligned} S_{a1}^2 &= \ln \left\{ 1 + \frac{H_{1C1}}{L_{C1}^2} \cdot [\exp(b^2 \cdot S_r^2) - 1] \right\} \\ A_{m1} &= \alpha \cdot R_m^b \cdot L_{C1} \cdot \exp \left(\frac{b^2 \cdot S_r^2 - S_{a1}^2}{2} \right) \end{aligned} \right\} \text{τ.μ. } A_{C1} \quad (5.44)$$

$$\left. \begin{aligned} S_{a2}^2 &= \ln \left\{ 1 + \frac{H_{1C2}}{L_{C2}^2} \cdot [\exp(b^2 \cdot S_r^2) - 1] \right\} \\ A_{m2} &= \alpha \cdot R_m^b \cdot L_{C2} \cdot \exp \left(\frac{b^2 \cdot S_r^2 - S_{a2}^2}{2} \right) \end{aligned} \right\} \text{τ.μ. } A_{C2} \quad (5.45)$$

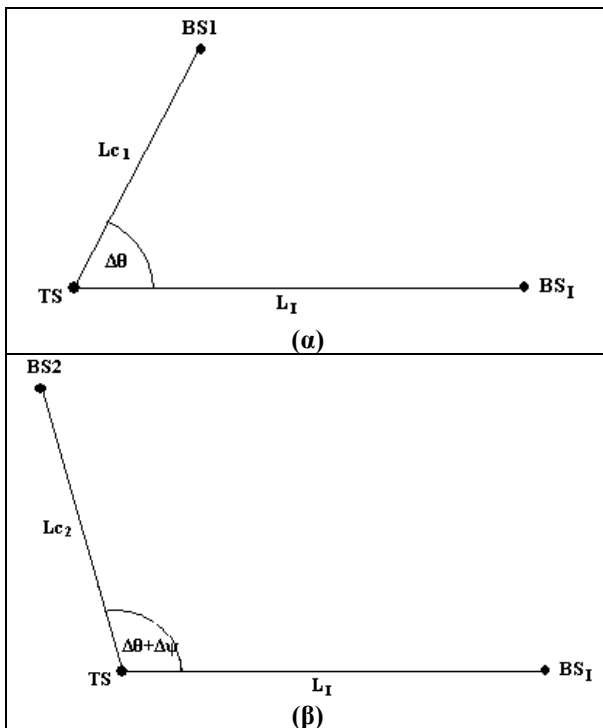
$$\left. \begin{aligned} S_{ai}^2 &= \ln \left\{ 1 + \frac{H_{1I}}{L_I^2} \cdot [\exp(b^2 \cdot S_r^2) - 1] \right\} \\ A_{mi} &= \alpha \cdot R_m^b \cdot L_I \cdot \exp \left(\frac{b^2 \cdot S_r^2 - S_{ai}^2}{2} \right) \end{aligned} \right\} \text{τ.μ. } A_I \quad (5.46)$$

όπου R_m , S_r είναι οι παράμετροι της σημειακής έντασης βροχόπτωσης για την υπό μελέτη περιοχή (βλ. Παράρτημα Ε), a και b είναι οι συντελεστές που καθορίζονται από το Διεθνή Οργανισμό ITU-R για την ειδική απόσβεση A_0 (dB/km) και δίνονται στις σχέσεις (3.4) και (3.5), και τα μεγέθη H_{1C1} , H_{1C2} και H_{1I} υπολογίζονται με τη βοήθεια της σχέσης (3.17) με αντικατάσταση του L από τα L_{C1} , L_{C2} και L_I , αντίστοιχα.

Από τις σχέσεις (5.43α) και (5.43β), είναι, επίσης, φανερό ότι ο υπολογισμός της θεωρούμενης δεσμευμένης πιθανότητας όπως εκφράζεται από την (5.40), απαιτεί τον προσδιορισμό των συντελεστών συσχέτισης των τ.μ. A_{C1} , A_{C2} και A_I . Για το σκοπό αυτό, ακολουθείται, όπως και στην περίπτωση της απλής λήψης, το μοντέλο του L_{in} .

Με βάση την ανάλυση που έχει προηγηθεί στην παράγραφο §5.2.1 για την περίπτωση απλής λήψης, όπου ένας σταθμός βάσης BS_I παρεμβάλλει στη ζεύξη κάποιου

σταθμού βάσης BSi (i=1,2) με το σταθμό τερματικού χρήστη TS, αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν όσον αφορά το συντελεστή συσχέτισης των ζευγών των τ.μ. {A_{C1} και A_I} και {A_{C2} και A_I} και στην περίπτωση της διπλής διαφορικής λήψης. Το γεγονός αυτό γίνεται πιο εύκολα κατανοητό εάν θεωρηθεί ότι καθεμία από τις ζεύξεις TS-BS1 και TS-BS2 λειτουργεί μόνη της κάθε φορά, δεχόμενη μόνο την παρενόχληση του σταθμού BSi, ως αν υπάρχουν δύο ξεχωριστές ανεξάρτητες κύριες ζεύξεις που λειτουργούν υπό την παρεμβολή κάποιου τρίτου σταθμού βάσης. Συνεπώς για τους συντελεστές συσχέτισης $\rho_{A_{C1}A_I}$ και $\rho_{A_{C2}A_I}$, με βάση την ανάλυση της παραγράφου §5.2.1 περί συντελεστών συσχέτισης, προκύπτουν



$$\rho_{A_{C1}A_I} = \frac{H_{2a1}}{\sqrt{H_{1C1} \cdot H_{1I}}} \quad (5.47)$$

$$\rho_{A_{C2}A_I} = \frac{H_{2a2}}{\sqrt{H_{1C2} \cdot H_{1I}}} \quad (5.48)$$

Σχήμα 5.4:

Γεωμετρία προβλήματος υπολογισμού των $\rho_{A_{C1}A_I}$
και $\rho_{A_{C2}A_I}$ (Τεμνόμενα Ραδιοβήματα)

Το μέγεθος H_{2a1} υπολογίζεται με τη βοήθεια της σχέσης (5.18) με αντικατάσταση του L_C από το L_{C1} ενώ ο υπολογισμός του μεγέθους H_{2a2} γίνεται στην παράγραφο §Α.2.2 του Παραρτήματος Α. Στο σημείο αυτό αξίζει να τονισθεί ότι η γωνία μεταξύ των δύο

τεμνόμενων ραδιοβημάτων στην μεν περίπτωση του $\rho_{A_{C1}A_t}$ είναι $\Delta\theta$ (βλ. σχήμα 5.4α) στη δε περίπτωση του $\rho_{A_{C2}A_t}$ είναι $\Delta\theta+\Delta\psi$ (βλ. σχήμα 5.4β).

Όσον αφορά το συντελεστή συσχέτισης των τ.μ. A_{C1} και A_{C2} υπολογίζεται από τη σχέση

$$\rho_{A_{C1}A_{C2}} = \frac{E[A_{C1} \cdot A_{C2}] - E[A_{C1}] \cdot E[A_{C2}]}{\sqrt{Var[A_{C1}]} \cdot \sqrt{Var[A_{C2}]}} \quad (5.49)$$

Σύμφωνα με την σχέση (3.9), ισχύει

$$E[A_{C1}] = \mu_o \cdot L_{C1} \quad (5.50\alpha)$$

$$E[A_{C2}] = \mu_o \cdot L_{C2} \quad (5.50\beta)$$

ενώ σύμφωνα με τη σχέση (3.10), ισχύει

$$Var[A_{C1}] = \sigma_o^2 \cdot H_{1C1} \quad (5.51\alpha)$$

$$Var[A_{C2}] = \sigma_o^2 \cdot H_{1C2} \quad (5.51\beta)$$

Η μέση τιμή $E[A_{C1} \cdot A_{C2}]$ υπολογίζεται ως εξής

$$E[A_{C1} \cdot A_{C2}] = E\left[\int_0^{L_{C1}} dl_{c1} \int_0^{L_{C2}} dl_{c2} A_0(l_{c1}) \cdot A_0(l_{c2})\right] = \int_0^{L_{C1}} dl_{c1} \int_0^{L_{C2}} dl_{c2} E[A_0(l_{c1}) \cdot A_0(l_{c2})] \quad (5.52)$$

Με άμεση στατιστική ανάλυση προκύπτει ότι

$$E[A_0(l_{c1}) \cdot A_0(l_{c2})] = \rho_{2p}(l_{c1}, l_{c2}) \cdot \sigma_o^2 + \mu_o^2 \quad (5.53)$$

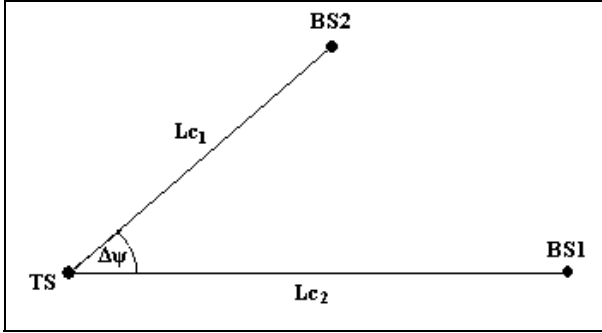
όπου το μέγεθος $\rho_{2p}(l_{c1}, l_{c2})$ εκφράζει το σημειακό συντελεστή συσχέτισης και δίνεται στην παράγραφο §A.2.3 του Παραρτήματος Α. Στο σημείο αυτό αξίζει να τονισθεί ότι η γωνιά μεταξύ των δύο τεμνόμενων ραδιοβημάτων είναι ίση με $\Delta\psi$ (βλ. σχήμα 5.5).

Με εισαγωγή της σχέσης (5.53) στην (5.52), προκύπτει

$$E[A_{C1} \cdot A_{C2}] = \sigma_o^2 \cdot H_{2p} + \mu_o^2 \cdot L_{C1} \cdot L_{C2} \quad (5.54)$$

$$\text{όπου } H_{2p} = \int_0^{L_{C1}} dl_{c1} \int_0^{L_{C2}} dl_{c2} \rho_{2p}(l_{c1}, l_{c2}) \quad (5.55)$$

Από τις σχέσεις (5.49) έως και (5.55), για το συντελεστή συσχέτισης $\rho_{A_{C1}A_{C2}}$ των τ.μ. A_{C1} και A_{C2} προκύπτει ότι



Σχήμα 5.5:

Γεωμετρία προβλήματος υπολογισμού του $\rho_{A_{C1}A_{C2}}$

(Τεμνόμενα Ραδιοβήματα)

$$\rho_{A_{C1}A_{C2}} = \frac{H_{2p}}{\sqrt{H_{1C1} \cdot H_{1C2}}} \quad (5.56)$$

5.3.2 Υπολογισμός δεσμευμένης πιθανότητας P_A/P_Π

Για τον υπολογισμό της θεωρούμενης δεσμευμένης πιθανότητας, όπως προκύπτει από την (5.40), απαιτείται ο υπολογισμός των επιμέρους πιθανοτήτων P_{A1} , P_{A2} , $P_{\Pi1}$ και $P_{\Pi2}$.

Από τις σχέσεις (5.43) προκύπτει

$$P_{A_1} = P(0.5 < A_{C1} < M_d, A_{C1} < A_{C2}, A_I < A_{C1} - r'_{d1}) \Rightarrow$$

$$P_{A_1} = P(0.5 < y_1 < M_d, y_1 < y_2, y_3 < y_1 - r'_{d1}) \Rightarrow$$

$$P_{A_1} = \int_{x_{d1}}^{M_d} dy_1 \int_{y_1}^{+\infty} dy_2 \int_0^{y_1 - r'_{d1}} dy_3 f_{A_{C1}A_{C2}A_I}(y_1, y_2, y_3) \quad (5.57\alpha)$$

και ομοίως

$$P_{A_2} = \int_{x_{d2}}^{M_d} dy_2 \int_{y_2}^{+\infty} dy_1 \int_0^{y_2 - r'_{d2}} dy_3 f_{A_{C2}A_{C1}A_I}(y_2, y_1, y_3) \quad (5.57\beta)$$

όπου

$$x_{d1} = \begin{cases} 0.5 & , \quad r'_{d1} < 0.5 \\ r'_{d1} & , \quad 0.5 < r'_{d1} < M_d \\ M_d & , \quad M_d \leq r'_{d1} \end{cases} \quad (5.58\alpha)$$

$$x_{d2} = \begin{cases} 0.5 & , \quad r'_{d2} < 0.5 \\ r'_{d2} & , \quad 0.5 < r'_{d2} < M_d \\ M_d & , \quad M_d \leq r'_{d2} \end{cases} \quad (5.58\beta)$$

Ακολουθώντας τη διαδικασία μετασχηματισμού ολοκληρωμάτων που αναπτύσσεται στο Παράρτημα Δ, οι σχέσεις (5.57) μετατρέπονται αντίστοιχα στις

$$P_{A_1} = \int_{u_{1kd1}}^{u_{1pd1}} du_1 \int_{u_1}^{+\infty} du_2 f_{U_1 U_2}(u_1, u_2) \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{u_{3d1} - \mu_{3/1,2}}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{3/1,2}} \right) \right] \quad (5.59\alpha)$$

$$P_{A_2} = \int_{u_{1kd2}}^{u_{1pd2}} du_2 \int_{u_2}^{+\infty} du_1 f_{U_2 U_1}(u_2, u_1) \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{u_{3d2} - \mu_{3/1,2}}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{3/1,2}} \right) \right] \quad (5.59\beta)$$

όπου

$$u_{1kd1} = \frac{\ln(x_{d1}) - \ln(A_{m1})}{S_{a1}} \quad (5.60\alpha)$$

$$u_{1pd1} = \frac{\ln(M_d) - \ln(A_{m1})}{S_{a1}} \quad (5.60\beta)$$

$$u_{3d1} = \frac{\ln[\exp(u_1 \cdot S_{a1}) \cdot A_{m1} - r'_{d1}] - \ln(A_{mi})}{S_{ai}} \quad (5.60\gamma)$$

$$u_{1kd2} = \frac{\ln(x_{d2}) - \ln(A_{m2})}{S_{a2}} \quad (5.61\alpha)$$

$$u_{1pd2} = \frac{\ln(M_d) - \ln(A_{m2})}{S_{a2}} \quad (5.61\beta)$$

$$u_{3d2} = \frac{\ln[\exp(u_2 \cdot S_{a2}) \cdot A_{m2} - r'_{d2}] - \ln(A_{mi})}{S_{ai}} \quad (5.61\gamma)$$

Οι στατιστικές παράμετροι $\mu_{3/1,2}$ και $\sigma_{3/1,2}$ ορίζονται στο Παράρτημα Δ μέσω των λογαριθμικών συντελεστών συσχέτισης ρ_{nij} ($i, j = 1, 2, 3$ $i \neq j$). Οι συντελεστές ρ_{n12} , ρ_{n13} και ρ_{n23} προκύπτουν με κατάλληλη αντιστοιχία από τους χωρικούς συντελεστές συσχέτισης, οι οποίοι έχουν ήδη υπολογιστεί στις σχέσεις (5.56), (5.47) και (5.48), αντίστοιχα, μέσω της σχέσης (Δ.2) του Παραρτήματος Δ.

Από τις σχέσεις (5.41α) και (5.41β), για τις πιθανότητες του παρονομαστή της δεσμευμένης πιθανότητας, $P_{\Pi 1}$ και $P_{\Pi 2}$, ισχύουν

$$P_{\Pi 1} = P(0.5 < A_{C1} < M_d, A_{C1} < A_{C2}) \Rightarrow$$

$$P_{\Pi 1} = P(0.5 < y_1 < M_d, y_1 < y_2) \Rightarrow$$

$$P_{\Pi_1} = \int_{0.5}^{M_d} dy_1 \int_{y_1}^{+\infty} dy_2 f_{A_{C1}A_{C2}}(y_1, y_2) \quad (5.62\alpha)$$

και ομοίως

$$P_{\Pi_2} = \int_{0.5}^{M_d} dy_2 \int_{y_2}^{+\infty} dy_1 f_{A_{C2}A_{C1}}(y_2, y_1) \quad (5.62\beta)$$

Ακολουθώντας τη διαδικασία μετασηματισμού ολοκληρωμάτων που αναπτύσσεται στο Παράρτημα Γ, οι σχέσεις (5.65) μετατρέπονται αντίστοιχα στις

$$P_{\Pi_1} = \int_{u_{001}}^{u_{1pd1}} du_1 f_{U_1}(u_1) \cdot \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{u_1 - \rho_{n12} \cdot u_1}{\sqrt{2 \cdot (1 - \rho_{n12}^2)}} \right] \quad (5.63\alpha)$$

$$P_{\Pi_2} = \int_{u_{002}}^{u_{1pd2}} du_2 f_{U_2}(u_2) \cdot \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{u_2 - \rho_{n12} \cdot u_2}{\sqrt{2 \cdot (1 - \rho_{n12}^2)}} \right] \quad (5.63\beta)$$

όπου τα μεγέθη u_{1pd1}, u_{1pd2} έχουν ορισθεί αντίστοιχα στις σχέσεις (5.60β) και (5.61β), ενώ για τα u_{001} και u_{002} ισχύει

$$u_{001} = \frac{\ln(0.5) - \ln(A_{m1})}{S_{a1}} \quad (5.64\alpha)$$

$$u_{002} = \frac{\ln(0.5) - \ln(A_{m2})}{S_{a2}} \quad (5.64\beta)$$

Με παρατήρηση των σχέσεων (5.63), προκύπτει ότι, η μεν ολοκληρωτέα συνάρτηση είναι ίδια, ωστόσο αλλάζουν κάθε φορά τα όρια ολοκλήρωσης για τον υπολογισμό των ολοκληρωμάτων ορισμού των P_{Π_1} και P_{Π_2} . Συνεπώς, στη γενική περίπτωση του μη ισοσταθμισμένου συστήματος, οι δύο αυτές πιθανότητες δεν είναι ίσες διότι οι τ.μ. A_{C1}, A_{C2} δεν είναι ισόνομες, δηλαδή οι κατανομές τους δεν έχουν τις ίδιες παραμέτρους ($A_{m1} \neq A_{m2}$ και $S_{a1} \neq S_{a2}$). Αντίθετα, στην ειδική περίπτωση του ισοσταθμισμένου συστήματος, ισχύει $P_{\Pi_1} = P_{\Pi_2}$.

Συνεπώς, το ποσοστό του χρόνου στη διάρκεια του οποίου το σύστημα LMDS διπλής διαφορικής προστασίας λειτουργεί παρουσία βροχής, αλλά υποφέρει από παρεμβολή και εκφράζεται μέσω της δεσμευμένης πιθανότητας της γενικής σχέσης (5.5), υπολογίζεται από το λόγο $(P_{A1} + P_{A2}) / (P_{\Pi_1} + P_{\Pi_2})$, όπου αριθμητής και παρονομαστής

δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις (5.59α), (5.59β) και (5.63α), (5.63β). Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται η ανάλυση του προβλήματος των παρεμβολών σε σύστημα LMDS διπλής διαφορικής λήψης κελιού (και απλής πόλωσης) από γειτονικό επίγειο σταθμό βάσης που λειτουργεί στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, υπό συνθήκες διάλειτουργίας βροχής. Στη συνέχεια, δίνεται ο ακριβής ορισμός του διαφορικού κέρδους C/I.

5.4 Διαφορικό κέρδος C/I

Το μέγεθος που περιγράφει ποσοτικά την αποτελεσματικότητα της τεχνικής διαφορικής λήψης κελιού στην αντιμετώπιση των παρεμβολών στα συστήματα LMDS είναι το Διαφορικό Κέρδος C/I (C/I Cell-Site Diversity Gain, $CSDG_{C/I}$). Προκύπτει με όμοια λογική προς το “συμβατικό” διαφορικό κέρδος (συμβατικό υπό την έννοια του διαφορικού κέρδους C/N), του οποίου η έννοια αναλύθηκε στην παράγραφο §4.3. Ουσιαστικά πρόκειται για τη διαφορά της στάθμης r(dB) για ένα σύστημα απλής λήψης (r_s) από την αντίστοιχη στάθμη για ένα σύστημα διπλής λήψης (r_d) και αναφέρεται στην ίδια δεσμευμένη πιθανότητα P_A/P_{II} και προφανώς στην ίδια διαθεσιμότητα συστήματος. Δηλαδή

$$CSDG_{C/I} (dB) = r_d - r_s \quad (5.65)$$

Υπενθυμίζεται ότι r_s και r_d είναι η μέγιστη επιτρεπτή στάθμη του λόγου C/I παρουσία βροχής για σύστημα απλής και διπλής λήψης, αντίστοιχα.

Η φυσική ερμηνεία του διαφορικού κέρδους C/I σχετίζεται άμεσα με το πόσο κοντά προς την ονομαστική τιμή του λόγου ισχύος σήματος προς ισχύ παρεμβολής υπό συνθήκες καθαρού ουρανού (C/I_{nom}) βρίσκεται η στάθμη r ενός συστήματος LMDS. Με βάση την αρχή λειτουργίας της τεχνικής διαφορικής λήψης κελιού και όπως θα δειχθεί στο επόμενο κεφάλαιο μέσω των αριθμητικών αποτελεσμάτων, η στάθμη r_d που επιτυγχάνεται σε σύστημα LMDS διπλής λήψης έχει γενικά υψηλότερη τιμή σε σχέση με τη στάθμη r_s συστήματος απλής λήψης και μάλιστα πλησιάζει περισσότερο προς την ονομαστική τιμή C/I_{nom} του συστήματος. Αυτό συμβαίνει διότι στο σύστημα διπλής λήψης είναι μικρότερη η απόσβεση λόγω βροχής A_C στο φέρον σήμα κι αντίστοιχα μικρότερη είναι η εισαγόμενη διαφορική απόσβεση λόγω βροχής $\Delta A = A_C - A_I$, που ενδεχομένως υπάρχει μεταξύ του σήματος της υπό θεώρηση κύριας ζεύξης και του ανεπιθύμητου παρεμβάλλοντος σήματος από το γειτονικό επίγειο σταθμό βάσης.

Αν είναι ήδη γνωστά τα μεγέθη του διαφορικού κέρδους C/I και της στάθμης r_s για ένα σύστημα LMDS απλής λήψης δεδομένης δεσμευμένης πιθανότητας P_A/P_{Π} και διαθεσιμότητας, είναι δυνατό να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της μείωσης επίδρασης των παρεμβολών στο σύστημα αν εφαρμοστεί σε αυτό η τεχνική της διπλής διαφορικής λήψης κελιού. Αυτό γίνεται μέσω του υπολογισμού, με βάση την (5.65), της μεγίστης επιτρεπτής στάθμης του λόγου C/I παρουσία βροχής για σύστημα διπλής λήψης που λειτουργεί με την ίδια δεσμευμένη πιθανότητα P_A/P_{Π} και διαθεσιμότητα.

Στο επόμενο κεφάλαιο, παρατίθενται και σχολιάζονται ορισμένα αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούν τη μείωση της επίδρασης των παρεμβολών από γειτονικό σταθμό βάσης σε σύστημα LMDS, το οποίο λειτουργεί υπό βροχή και εφαρμόζει την τεχνική διπλής διαφορικής λήψης κελιού. Η εκτίμηση της βελτίωσης επίδοσης του συστήματος γίνεται βάσει του κριτηρίου του διαφορικού κέρδους C/I θεωρώντας διάφορα σενάρια παρεμβολών.

6. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

6.1 Γενικά

Με βάση την ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου, στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιασθούν και θα σχολιασθούν αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούν το πρόβλημα παρεμβολών που υφίσταται ένα σύστημα LMDS από γειτονικό επίγειο σταθμό βάσης, ο οποίος λειτουργεί στην ίδια συχνότητα. Τα συστήματα LMDS που θα εξετασθούν είναι απλής λήψης και διπλής διαφορικής λήψης κελιού, ισοσταθμισμένα και μη. Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι ο συμβολισμός των παραμέτρων των υπό εξέταση συστημάτων γίνεται με αναφορά στο σχήμα 5.1 για τα συστήματα απλής λήψης και στο σχήμα 5.3 για τα συστήματα διπλής διαφορικής λήψης.

Συγκεκριμένα, θεωρούνται συστήματα LMDS απλής και διπλής λήψης που λειτουργούν στις περιοχές της Αθήνας και της Σιγκαπούρης. Η επιλογή των περιοχών αυτών γίνεται με βάση τις κλιματολογικές συνθήκες λόγω βροχόπτωσης που επικρατούν και τη χωρική ανομοιογένεια της βροχής που συναντάται σε κάθε περιοχή. Η Αθήνα (κλιματική ζώνη L) είναι μια περιοχή όχι ιδιαίτερα επιβαρημένη από τις βροχοπτώσεις και στην οποία η βροχή παρουσιάζει σχετικά μικρή χωρική ανομοιογένεια κατά μήκος ενός απλού ραδιοβήματος. Αντίθετα, στη Σιγκαπούρη (κλιματική ζώνη P) παρουσιάζεται εντονότερη χωρική ανομοιογένεια της βροχής ως προς την τιμή του R και επικρατεί υψηλότερος ρυθμός βροχόπτωσης. Όπως θα δειχθεί στη συνέχεια, οι δύο αυτές διαφορετικές περιπτώσεις περιοχών λειτουργίας των συστημάτων LMDS έχουν διαφορετική απόκριση στις κοινές παραμέτρους εισόδου του εκάστοτε προβλήματος και οι έξοδοί τους διαφοροποιούνται ανάλογα.

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων R_m και S_r της κατανομής της σημειακής έντασης βροχόπτωσης R λαμβάνεται υπόψη η Σύσταση του ITU-R για τους χάρτες βροχής (βλ. §E.1) ενώ οι παράγοντες a και b για τον υπολογισμό της ειδικής απόσβεσης λόγω βροχής υπολογίζονται με τη μέθοδο της παραγράφου §3.2 με την πρόσθετη υπόθεση ότι η πόλωση του ΗΜ κύματος (τόσο του κύριου όσο και του παρεμβάλλοντος

συστήματος) είναι γραμμική κατακόρυφη ($\tau=90^\circ$). Για τις παραμέτρους G (σταθερά του Lin) και D_r (διάσταση βροχοπυρήνα) δεν υπάρχουν ακριβείς τιμές οπότε λαμβάνονται $G=1.5\text{km}$ και $D_r=30\text{km}$, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές προκύπτουν από στατιστικές εκτιμήσεις των διαθεσίμων δεδομένων απόσβεσης λόγω βροχής για απλή και πολλαπλή λήψη και λαμβάνονται κοινές για τις δύο περιοχές που εξετάζονται [21]. Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές όλων των παραμέτρων των υπό εξέταση συστημάτων που θεωρούνται σταθερές καθόλη την ανάλυση που ακολουθεί.

Περιοχή	ΑΘΗΝΑ	ΣΙΓΚΑΠΟΥΡΗ
Γεωγραφικό πλάτος	37.58°N	1.16°N
Γεωγραφικό μήκος	23.43°E	103.51°E
R_m	0.01214533624026	0.14668656756487
S_r	1.97894857727886	1.80030005205199
Σταθερά G	1.5km	1.5km
Σταθερά D_r	30km	30km
Πόλωση HM κύματος	$\tau = 90^\circ$	$\tau = 90^\circ$

Πίνακας 6.1: Σταθερές παράμετροι των υπό εξέταση συστημάτων

Τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται υπό μορφή διαγραμμάτων και σχολιάζονται στη συνέχεια κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:

- Διαγράμματα της δεσμευμένης πιθανότητας συναρτήσει της στάθμης r του μεγέθους C/I παρουσία βροχής:

Η χρησιμότητα των διαγραμμάτων αυτών για τη σχεδίαση και αξιολόγηση των συστημάτων LMDS είναι μεγάλη καθώς βάσει αυτών, για δεδομένη στάθμη r του συστήματος απλής ή διπλής λήψης, ανάλογα, υπολογίζεται το ποσοστό του χρόνου στη διάρκεια του οποίου το σύστημα λειτουργεί παρουσία βροχής αλλά υποφέρει από παρεμβολή και αντίστροφα. Όπως προκύπτει από τα αντίστοιχα σχήματα, όσο αυξάνεται η στάθμη r του συστήματος αυξάνεται η δεσμευμένη πιθανότητα που αφορά το χρόνο δυσλειτουργίας λόγω παρεμβολών του συστήματος.

- Διαγράμματα της μεταβολής του λόγου C/I συναρτήσει της γωνίας $\Delta\theta$ μεταξύ των ραδιοδρόμων του επιθυμητού και του παρεμβάλλοντος σήματος:

Ομοίως, η χρησιμότητα των διαγραμμάτων αυτής της κατηγορίας για τη σχεδίαση και αξιολόγηση των συστημάτων LMDS είναι, επίσης, εξαιρετικής σημασίας

διότι μέσω αυτών συνδέεται η τιμή του λόγου C/I παρουσία βροχής με τη γωνιακή απόσταση $\Delta\theta$ μεταξύ δύο γειτονικών σταθμών βάσης που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα και παρεμβάλει ο ένας στον άλλο. Όπως αναμένεται, όσο αυξάνεται η γωνιακή απόσταση των δύο σταθμών, ο λόγος C/I αυξάνεται, διότι μειώνεται η ισχύς παρεμβολών στο σύστημα, εμφανίζοντας οριζόντια ασυμπτωτική συμπεριφορά.

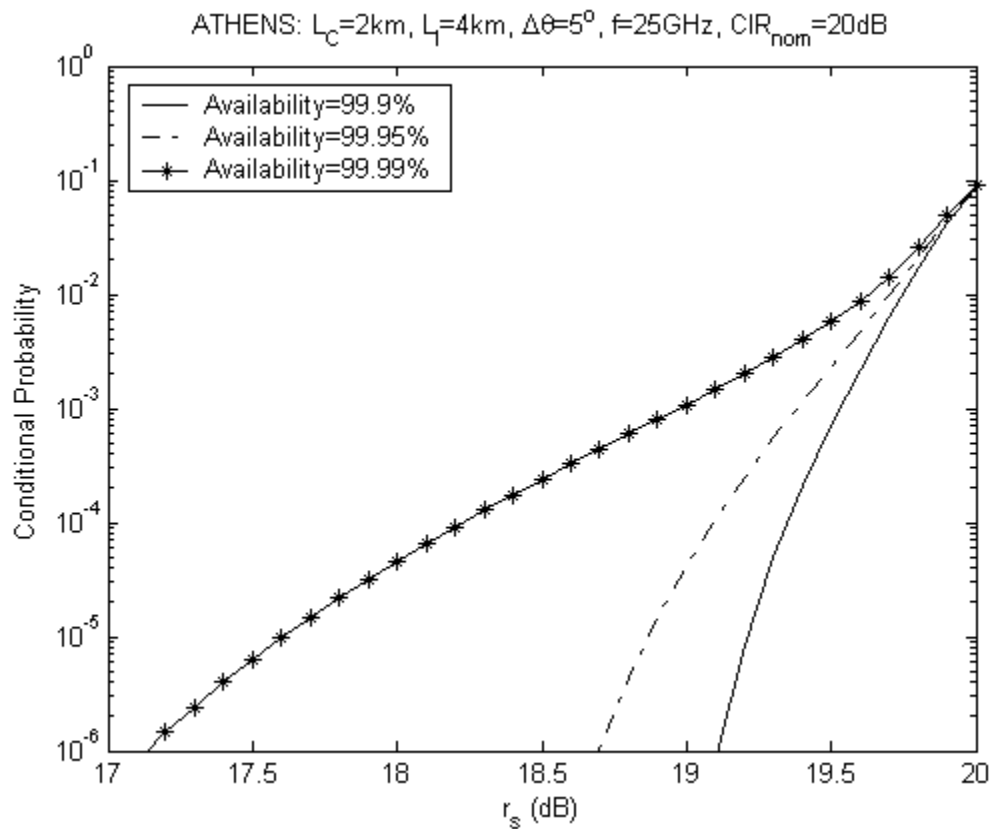
- Διαγράμματα του διαφορικού κέρδους C/I συναρτήσει της γωνίας $\Delta\theta$ μεταξύ των ραδιοδρόμων του επιθυμητού και του παρεμβάλλοντος σήματος και της γωνίας $\Delta\psi$ μεταξύ των ραδιοδρόμων των δύο επιθυμητών σημάτων:

Με τη βοήθεια των διαγραμμάτων αυτών περιγράφεται ποσοτικά η αποτελεσματικότητα της τεχνικής διαφορικής λήψης κελιού στην αντιμετώπιση των παρεμβολών. Όπως προκύπτει από τα αντίστοιχα σχήματα, όσο αυξάνεται είτε η γωνία $\Delta\theta$ είτε η $\Delta\psi$, το διαφορικό κέρδος C/I αυξάνεται παρουσιάζοντας οριζόντια ασυμπτωτική συμπεριφορά.

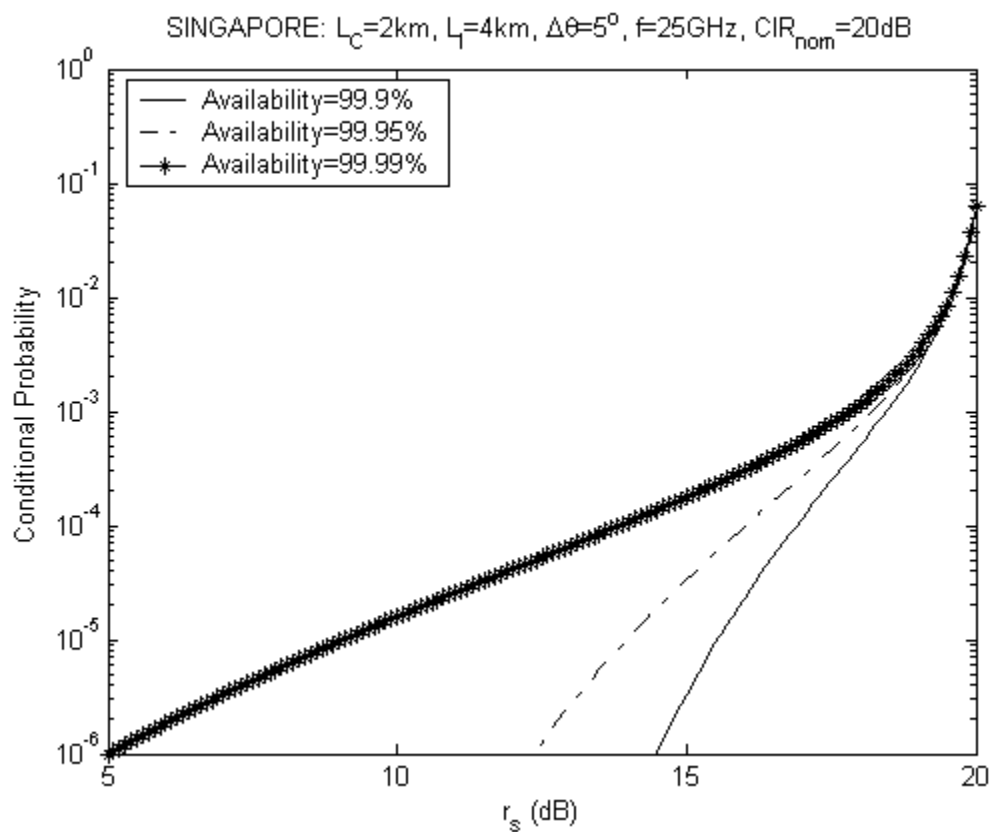
Στη συνέχεια, μελετάται ξεχωριστά η επίδραση των παρεμβολών σε συστήματα LMDS απλής λήψης και σε ισοσταθμισμένα και μη- συστήματα LMDS διπλής διαφορικής προστασίας, ενώ παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα.

6.2 Επίδραση παρεμβολών σε σύστημα LMDS απλής λήψης

Στα σχήματα 6.1 παρουσιάζεται η δεσμευμένη πιθανότητα συναρτήσει της στάθμης r_s του συστήματος απλής λήψης για διαφορετικές τιμές διαθεσιμότητας και δεδομένες τις υπόλοιπες παραμέτρους του συστήματος, των οποίων οι τιμές αναγράφονται στην επικεφαλίδα του αντίστοιχου σχήματος. Παρατηρείται ότι για δεδομένη τιμή δεσμευμένης πιθανότητας, όσο αυξάνονται οι τιμές διαθεσιμότητας του συστήματος μειώνεται η μέγιστη επιτρεπτή τιμή του μεγέθους C/I παρουσία βροχής που τελικά επιτυγχάνεται στο σύστημα. Αυτό εξηγείται ως εξής: όσο μεγαλώνει το μέγεθος της διαθεσιμότητας, το περιθώριο διάλειψης λόγω βροχής αυξάνεται και κατεπέκταση αυξάνεται η μέγιστη τιμή της απόσβεσης A_C του επιθυμητού σήματος αφού ο τύπος της δεσμευμένης πιθανότητας αναφέρεται σε τιμές $0.5 \leq A_C \leq M_S$. Συνεπώς μειώνεται η ισχύς φέροντος σήματος C, άρα και η στάθμη r_s (για δεδομένη δεσμευμένη πιθανότητα). Ωστόσο, τα περιθώρια διάλειψης λόγω βροχής στο σύστημα που λειτουργεί στη Σιγκαπούρη είναι πολύ μεγαλύτερα αυτών του συστήματος στην Αθήνα για την ίδια τιμή διαθεσιμότητας λόγω του έντονου ρυθμού βροχόπτωσης που επικρατεί στη Σιγκαπούρη. Συνεπώς, ενώ στην Αθήνα δεν φαίνεται να δημιουργείται έντονο πρόβλημα δυσλειτουργίας λόγω παρεμβολών στο σύστημα ακόμα και για υψηλές τιμές διαθεσιμότητας, στη Σιγκαπούρη οι τιμές που παίρνει η στάθμη r_s είναι ιδιαίτερα χαμηλές, γεγονός που υποδηλώνει άμεσα την επιτακτική λήψη κάποιου αντίμετρου για την αντιμετώπιση του προβλήματος.



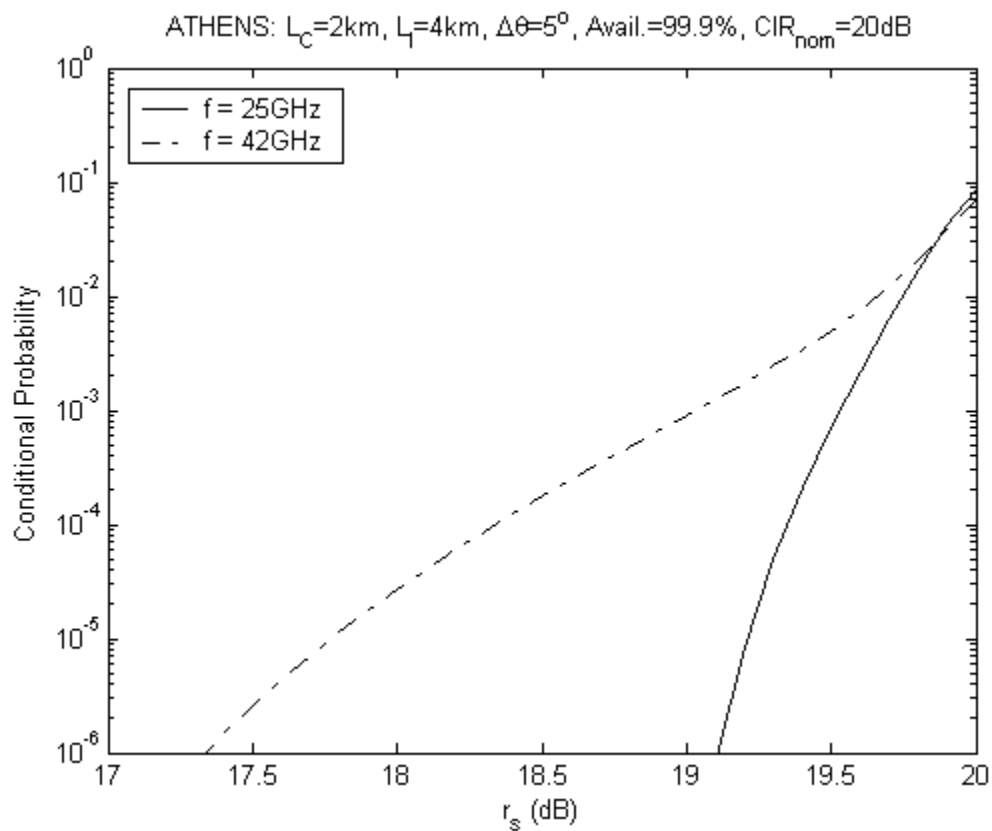
(a)



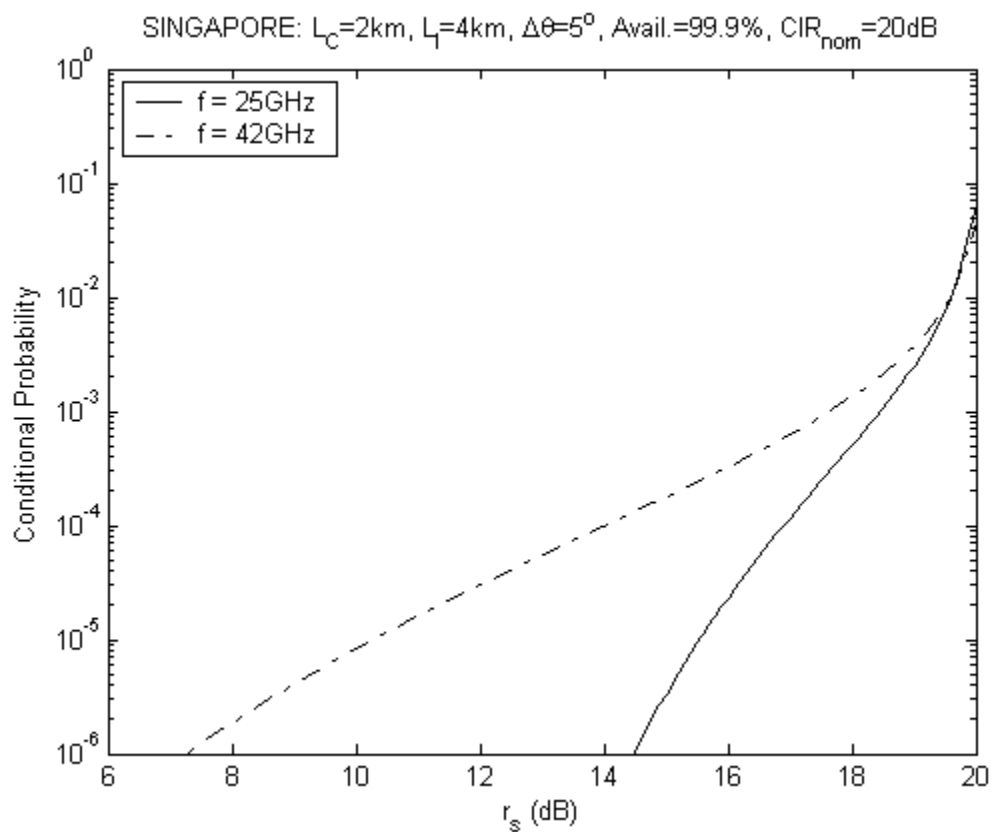
(b)

Σχήμα 6.1

Στα σχήματα 6.2 παρουσιάζεται η δεσμευμένη πιθανότητα ως συνάρτηση της στάθμης r_s του συστήματος απλής λήψης για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας $f=25\text{GHz}$ και $f=42\text{GHz}$ και για δεδομένες τις υπόλοιπες παραμέτρους του συστήματος, των οποίων οι τιμές αναγράφονται στην επικεφαλίδα του αντίστοιχου σχήματος. Με βάση τα σχήματα αυτά, για δεδομένη τιμή δεσμευμένης πιθανότητας, όσο αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος μειώνεται η στάθμη r_s και συνεπώς αυξάνεται η επίδραση των παρεμβολών σε αυτό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος αυξάνονται οι αποσβέσεις λόγω βροχής στο φέρον σήμα C και ο λόγος C/I του συστήματος χειροτερεύει. Το συγκεκριμένο πρόβλημα δεν είναι τόσο έντονο στην περιοχή της Αθήνας όσο στην περιοχή της Σιγκαπούρης όπου η ανάγκη εφαρμογής τεχνικών άμβλυνσης των διαλείψεων λόγω βροχής είναι εμφανής από το γεγονός ότι η τελική στάθμη r_s είναι σχετικά πολύ χαμηλή όσο αυξάνει η συχνότητα και ελαττώνεται η δεσμευμένη πιθανότητα του συστήματος. Για το λόγο αυτό, άλλωστε, σε τροπικές περιοχές όπως η Σιγκαπούρη τα συστήματα LMDS είναι επιθυμητό να λειτουργούν στη μικρότερη δυνατή, από άποψη διαθεσιμότητας και ανοχής παρεμβολών, ζώνη συχνοτήτων.



(a)



(b)

Σχήμα 6.2

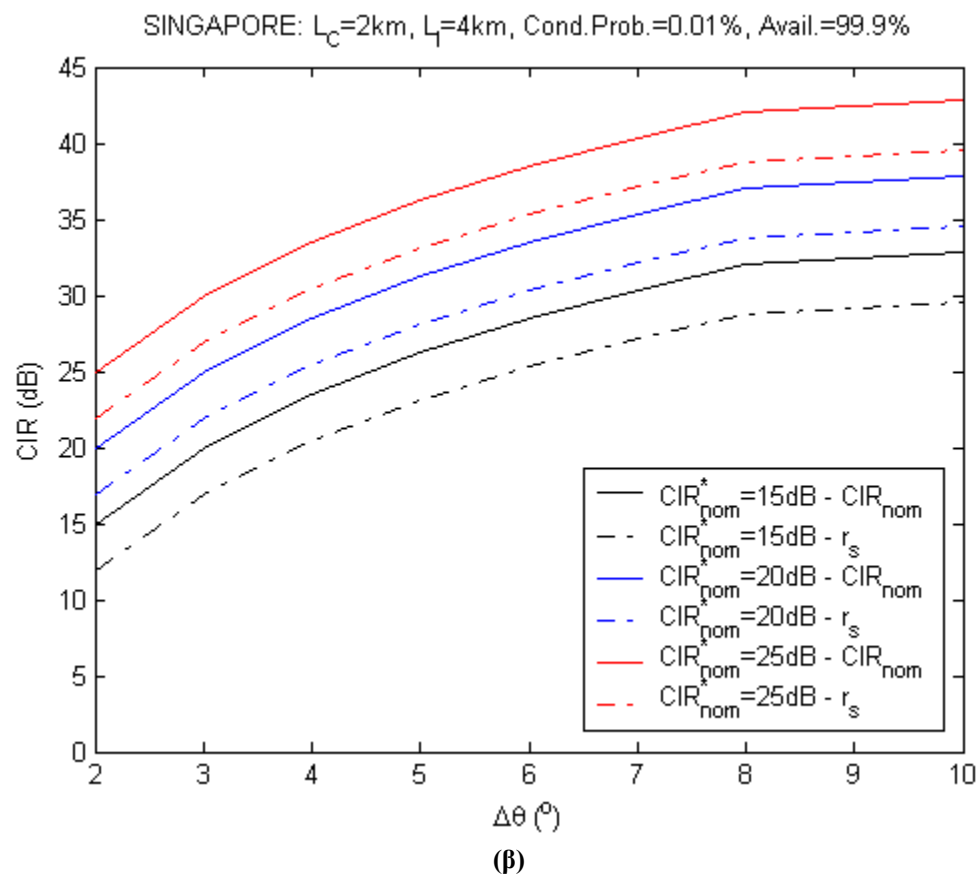
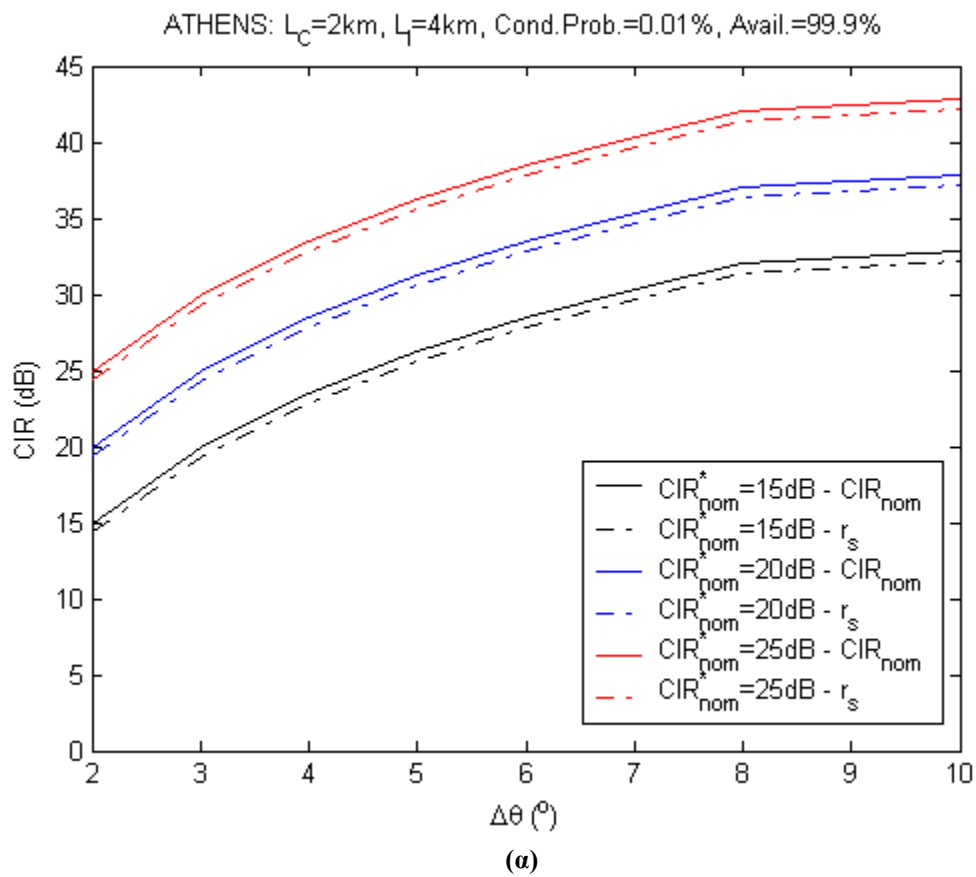
Στα σχήματα 6.3 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου C/I συναρτήσει της γωνίας $\Delta\theta$ μεταξύ των ραδιοδρόμων του επιθυμητού και του παρεμβάλλοντος σήματος για διαφορετικά σενάρια παρεμβολών και για δεδομένες τις υπόλοιπες παραμέτρους του συστήματος, των οποίων οι τιμές αναγράφονται στην επικεφαλίδα του αντίστοιχου σχήματος. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας λήψης του τερματικού χρήστη TS. Η συνάρτηση $G_R(\theta)$ του (κανονικοποιημένου) κατευθυντικού κέρδους της κεραίας λήψης του TS έχει δοθεί στη σχέση (2.1), ενώ για συνθήκες καθαρού ουρανού ισχύει

$$CIR_{nom} = CIR_{nom}^* - G_R(\Delta\theta) \quad (6.1)$$

όπου CIR_{nom}^* είναι η ονομαστική τιμή του λόγου C/I που αντιστοιχεί στο σύστημα για $\Delta\theta=1^\circ$.

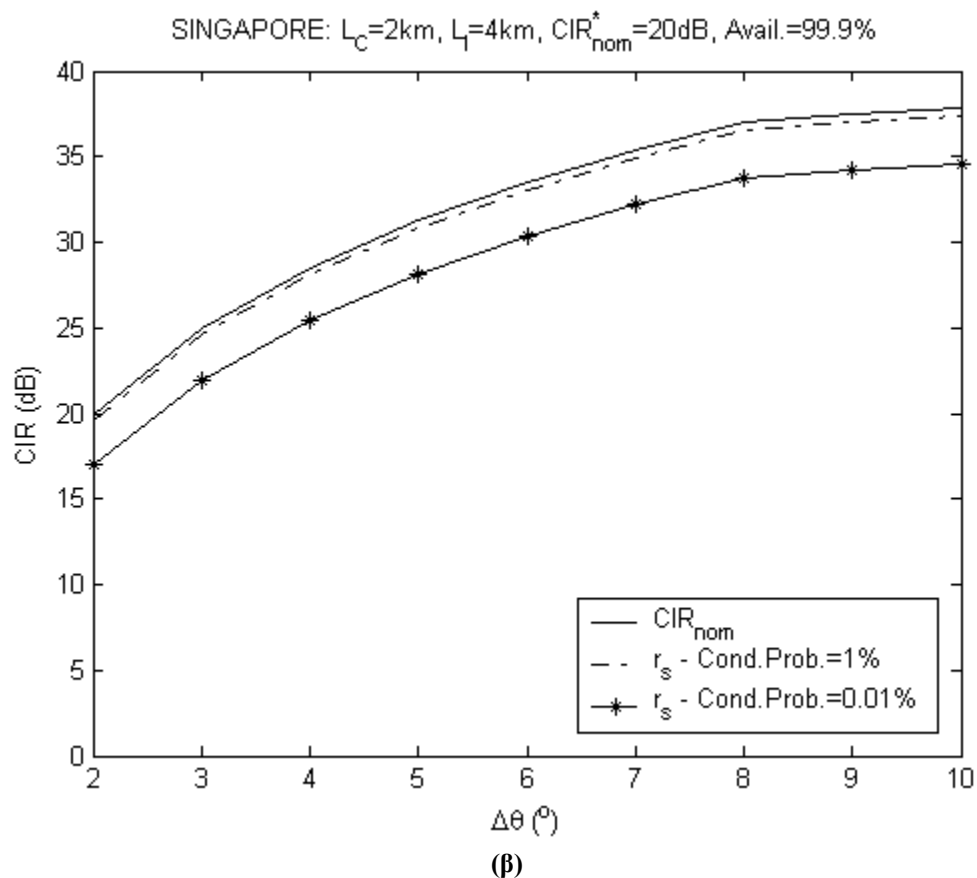
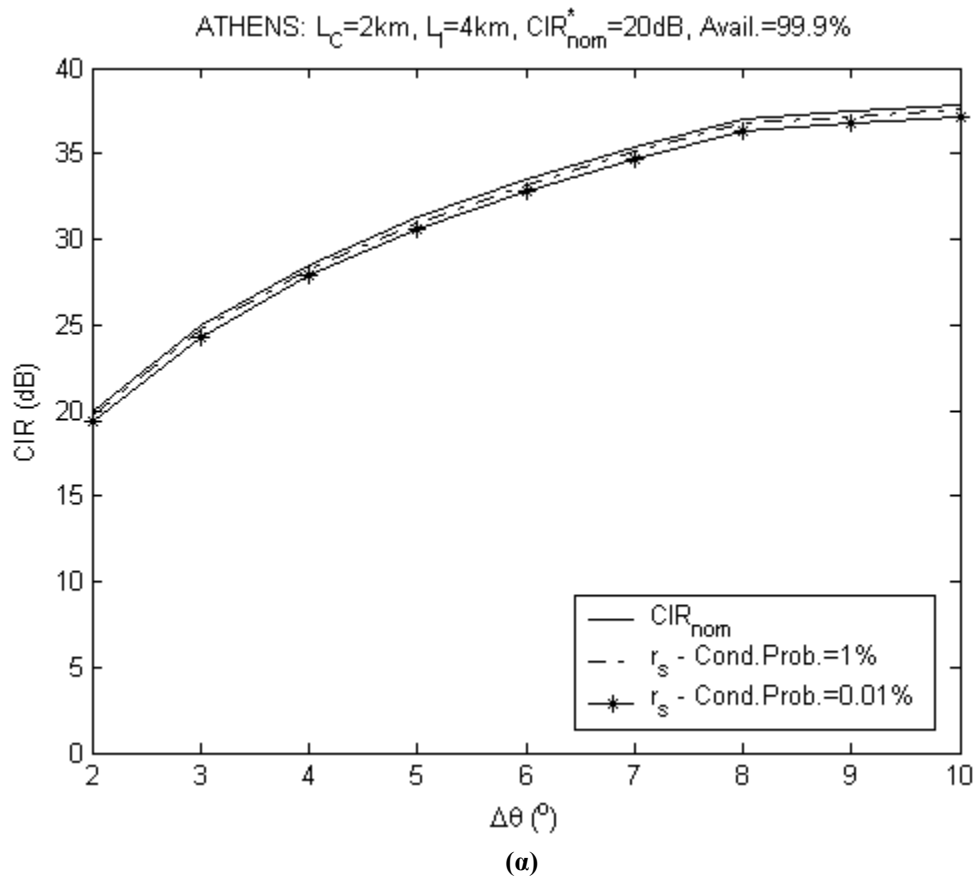
Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι οι όποιες απότομες μεταβολές παρουσιάζονται στα διαγράμματα του C/I που ακολουθούν οφείλονται στο γεγονός ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας λήψης του TS έχει μοντελοποιηθεί με τεθλασμένες γραμμές, όπως δείχνεται στο σχήμα 2.9α.

Ανάλογα με το εκάστοτε σενάριο παρεμβολής, για δεδομένη τιμή δεσμευμένης πιθανότητας ($0.01\%=10^{-4}$) και διαθεσιμότητας (99.9%) του συστήματος έχουν θεωρηθεί τρεις διαφορετικές τιμές του λόγου CIR_{nom}^* , δηλαδή $CIR_{nom}^*=25\text{dB} \Leftrightarrow$ “σενάριο χαμηλής παρεμβολής”, $CIR_{nom}^*=20\text{dB} \Leftrightarrow$ “σενάριο μεσαίας παρεμβολής” και $CIR_{nom}^*=15\text{dB} \Leftrightarrow$ “σενάριο υψηλής παρεμβολής”. Όπως προκύπτει από τα σχήματα αυτά, όσο αυξάνεται η γωνιακή απόσταση $\Delta\theta$ τόσο αυξάνεται ο λόγος C/I του συστήματος και μειώνονται οι παρεμβολές σε αυτό. Είναι φανερό ότι για γωνίες $\Delta\theta>8^\circ$ το μέγεθος CIR μεταβάλλεται ελάχιστα εμφανίζοντας ασυμπτωτική συμπεριφορά, διότι η ισχύς παρεμβολής γίνεται πολύ χαμηλή. Η μείωση, δε, του C/I παρουσία βροχής (στάθμη r_s) ως προς την ονομαστική του τιμή CIR_{nom} οφείλεται στην εισαγόμενη διαφορική απόσβεση λόγω βροχής στο σύστημα. Όπως αναμένεται, εξαιτίας της αυξημένης απόσβεσης λόγω βροχής του φέροντος σήματος που έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη διαφορική απόσβεση λόγω βροχής στο σύστημα, στην περιοχή της Σιγκαπούρης η στάθμη r_s απέχει περισσότερο από την τιμή CIR_{nom} σε σχέση με την αντίστοιχη στην περιοχή της Αθήνας.



Σχήμα 6.3

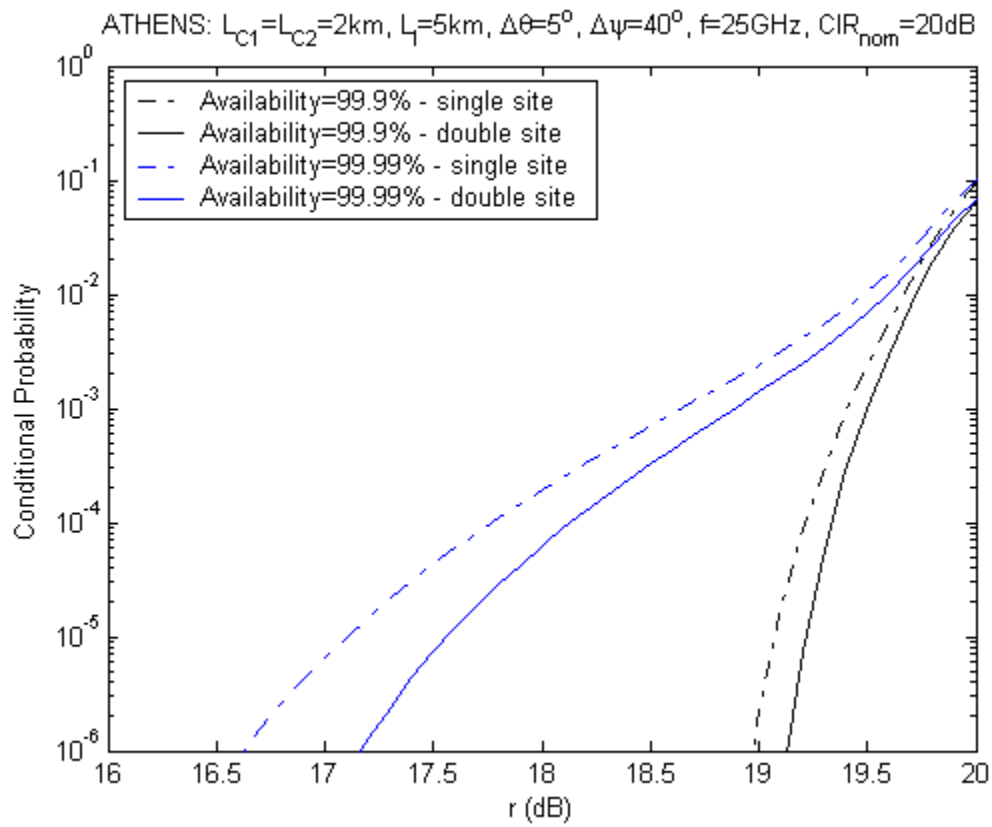
Τέλος, στα σχήματα 6.4 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου C/I συναρτήσει της γωνίας $\Delta\theta$ για διαφορετικές τιμές δεσμευμένης πιθανότητας και δεδομένες τις υπόλοιπες παραμέτρους του συστήματος, των οποίων οι τιμές αναγράφονται στην επικεφαλίδα του αντίστοιχου σχήματος. Συγκεκριμένα εξετάζονται τιμές δεσμευμένης πιθανότητας 1% και 0.01% και παρατηρείται ότι, για δεδομένη γωνία $\Delta\theta$, όσο μειώνεται η τιμή της δεσμευμένης πιθανότητας του συστήματος τόσο μειώνεται η μέγιστη στάθμη του λόγου C/I παρουσία βροχής. Η απομάκρυνση αυτή της στάθμης r_s από την ονομαστική τιμή CIR_{nom} οφείλεται, όπως και προηγουμένως, στην εισαγόμενη διαφορική απόσβεση λόγω βροχής στο σύστημα και είναι εντονότερη στο σύστημα που λειτουργεί στην περιοχή της Σιγκαπούρης σε σχέση με αυτό που λειτουργεί στην Αθήνα.



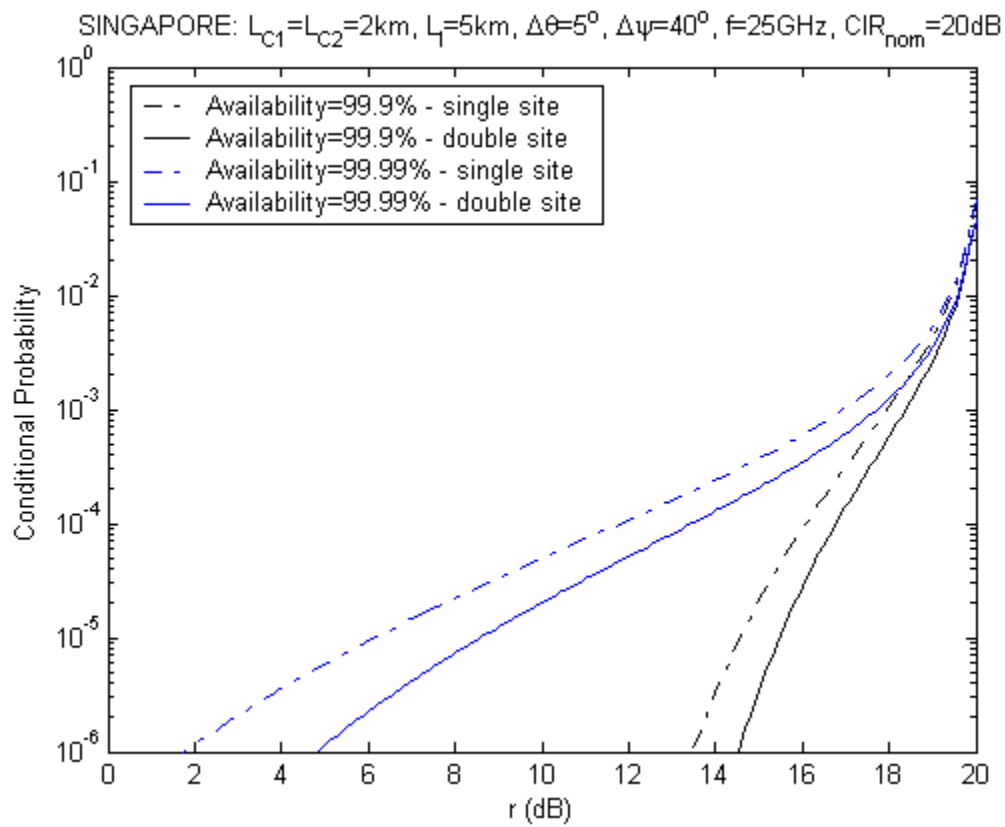
Σχήμα 6.4

6.3 Επίδραση παρεμβολών σε ισοσταθμισμένο σύστημα LMDS διπλής λήψης

Στα σχήματα 6.5 παρουσιάζεται η δεσμευμένη πιθανότητα συναρτήσει της στάθμης r των συστημάτων απλής και διπλής διαφορικής λήψης για διαφορετικές τιμές διαθεσιμότητας του συστήματος και δεδομένες τις υπόλοιπες παραμέτρους του συστήματος, των οποίων οι τιμές αναγράφονται στην επικεφαλίδα του αντίστοιχου σχήματος. Για δεδομένη δεσμευμένη πιθανότητα, όσο αυξάνονται οι τιμές διαθεσιμότητας του συστήματος μειώνεται η μέγιστη επιτρεπτή τιμή του μεγέθους C/I παρουσία βροχής τόσο στο σύστημα απλής όσο και στο σύστημα διπλής λήψης. Ο λόγος για τη μείωση αυτή έχει ήδη δοθεί παραπάνω στο σχολιασμό των σχημάτων 6.1. Ωστόσο, τα περιθώρια διάλειψης λόγω βροχής είναι μικρότερα στην περίπτωση της διπλής διαφορικής προστασίας με αποτέλεσμα η απόσβεση του φέροντος σήματος να είναι μικρότερη και η εισαγόμενη διαφορική απόσβεση λόγω βροχής στο σύστημα να είναι, επίσης, μικρότερη. Για το λόγο αυτό παρατηρείται ότι για δεδομένη τιμή δεσμευμένης πιθανότητας, η στάθμη r_d του συστήματος διπλής λήψης είναι πάντα μεγαλύτερη της αντίστοιχης r_s του συστήματος απλής λήψης, γεγονός το οποίο πιστοποιεί την αποτελεσματικότητα της τεχνικής διαφορικής λήψης κελιού στην αντιμετώπιση των παρεμβολών. Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών τιμών ($r_d - r_s$) αντιστοιχεί στο διαφορικό κέρδος C/I για δεδομένη δεσμευμένη πιθανότητα. Επίσης, παρατηρείται ότι η βελτίωση της επίδοσης του συστήματος που λειτουργεί στη Σιγκαπούρη είναι μεγαλύτερη αυτής του συστήματος που λειτουργεί στην Αθήνα. Το κέρδος που επιτυγχάνεται στην περιοχή της Αθήνας είναι πολύ μικρό σε σχέση με αυτό στην περιοχή της Σιγκαπούρης. Ωστόσο, οι σχετικά πολύ χαμηλές τιμές που αγγίζει η στάθμη r_d στην περίπτωση της Σιγκαπούρης για διαθεσιμότητα 99.99% υποδηλώνει έμμεσα ότι στην περιοχή αυτή, για τη δεδομένη διαθεσιμότητα, ενδεχομένως να χρειάζεται να ληφθούν πρόσθετα μέτρα αντιμετώπισης των διαλείψεων λόγω βροχής (π.χ. τριπλή διαφορική λήψη κελιού). Αντίθετα, στην περιοχή της Αθήνας, η εφαρμογή της τεχνικής διαφορικής λήψης κελιού φαίνεται μάλλον περιττή καθώς οι τιμές που αγγίζει η στάθμη r_d δεν διαφέρουν κατά πολύ από τις αντίστοιχες r_s .



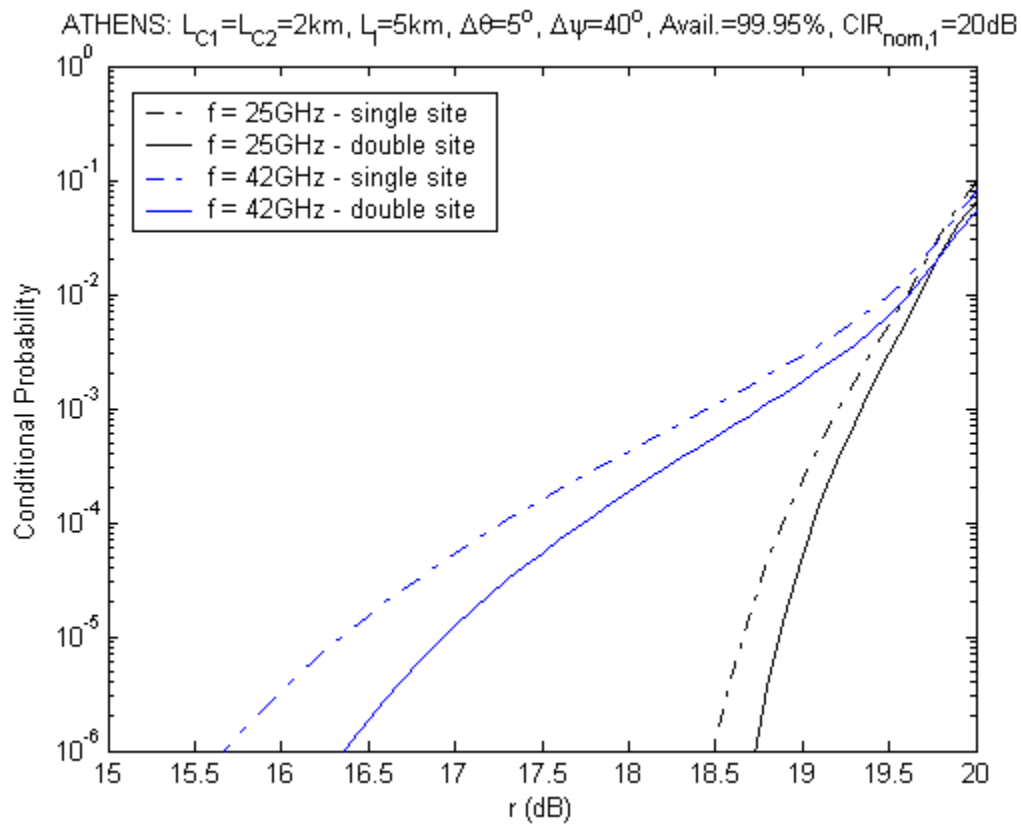
(a)



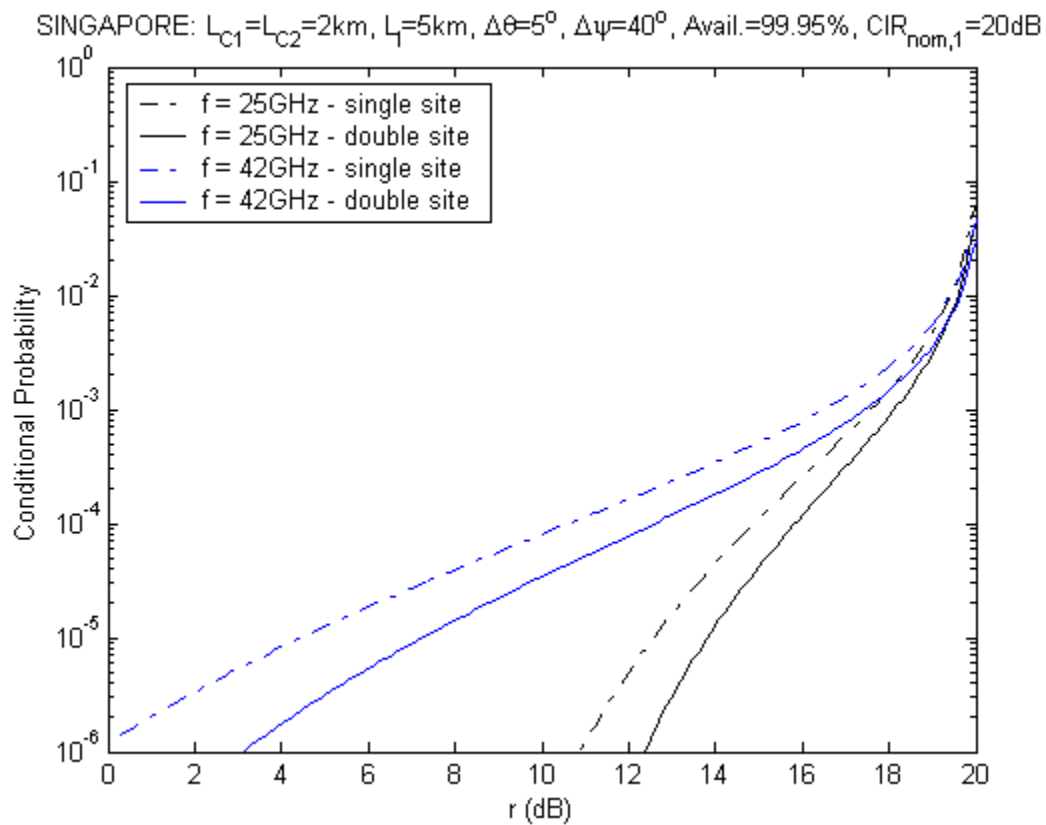
(b)

Σχῆμα 6.5

Στα σχήματα 6.6 παρουσιάζεται η δεσμευμένη πιθανότητα ως συνάρτηση της στάθμης r του συστήματος απλής και διπλής λήψης για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας $f=25\text{GHz}$ και $f=42\text{GHz}$ και για δεδομένες τις υπόλοιπες παραμέτρους του συστήματος, των οποίων οι τιμές αναγράφονται στην επικεφαλίδα του αντίστοιχου σχήματος. Με βάση τα σχήματα αυτά, για δεδομένη τιμή δεσμευμένης πιθανότητας, όσο αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος μειώνεται η στάθμη r των συστημάτων απλής και διπλής λήψης, για τον ίδιο λόγο που έχει αναφερθεί στο σχολιασμό των σχημάτων 6.2. Και πάλι η διαφορά μεταξύ των τιμών r_d και r_s (r_d-r_s) είναι πάντα θετική και αντιστοιχεί στο διαφορικό κέρδος C/I για τη δεδομένη δεσμευμένη πιθανότητα. Το διαφορικό κέρδος C/I που παρατηρείται στην περίπτωση του συστήματος LMDS που λειτουργεί στην Αθήνα είναι μικρότερο σε σχέση με αυτό που επιτυγχάνεται για την περιοχή της Σιγκαπούρης. Ωστόσο, στην περίπτωση της Σιγκαπούρης και για τη δεδομένη τιμή διαθεσιμότητας (99.95%) που αποτελεί πράγματι αρκετά απαιτητική προδιαγραφή για το σύστημα, η τεχνική διπλής διαφορικής λήψης κελιού αδυνατεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα στις υψηλές συχνότητες, όπου αυξάνονται κατά πολύ οι αποσβέσεις λόγω βροχής. Για το λόγο αυτό πρέπει, για τη δεδομένη διαθεσιμότητα, είτε η συχνότητα λειτουργίας των συστημάτων που λειτουργούν στην περιοχή να είναι αρκούντως μικρή είτε να εφαρμοστεί τριπλή διαφορική λήψη κελιού. Αντίθετα, στην περιοχή της Αθήνας τα λειτουργούντα συστήματα LMDS δεν φαίνονται να αντιμετωπίζουν το ίδιο έντονο πρόβλημα. Το διαφορικό κέρδος C/I , ωστόσο, που επιτυγχάνεται στην περιοχή αυτή είναι σχετικά χαμηλό με αποτέλεσμα η αποτελεσματικότητα της διαφορικής λήψης κελιού στη συγκεκριμένη περιοχή να είναι περιορισμένη για τα δεδομένα του προβλήματος.



(a)

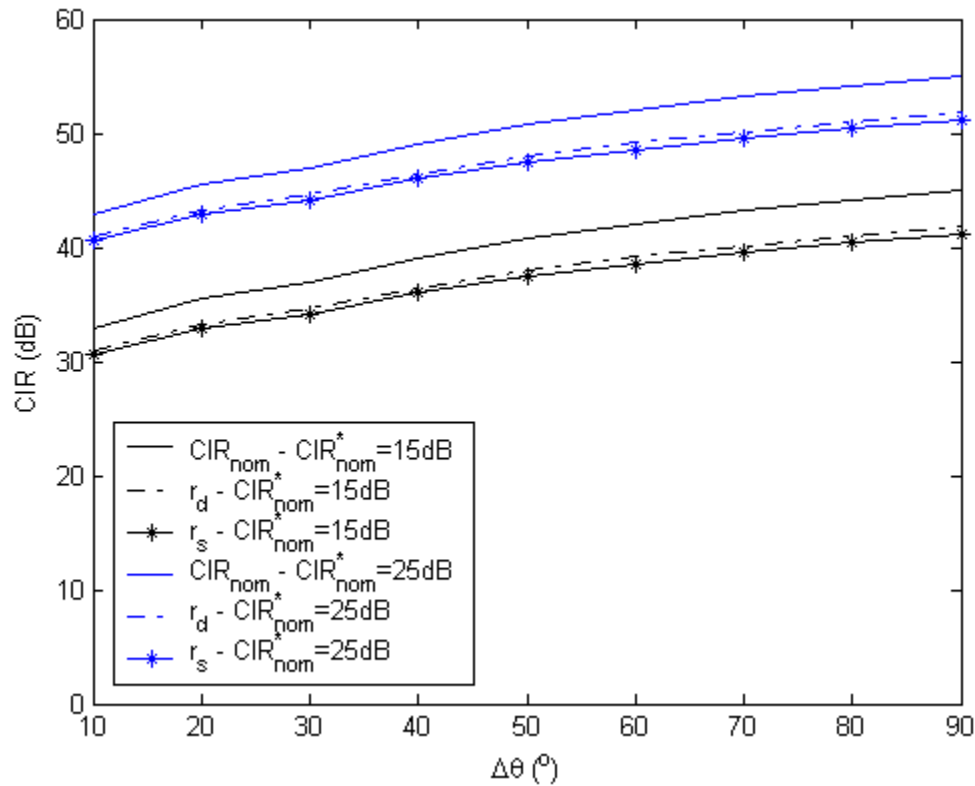


(b)

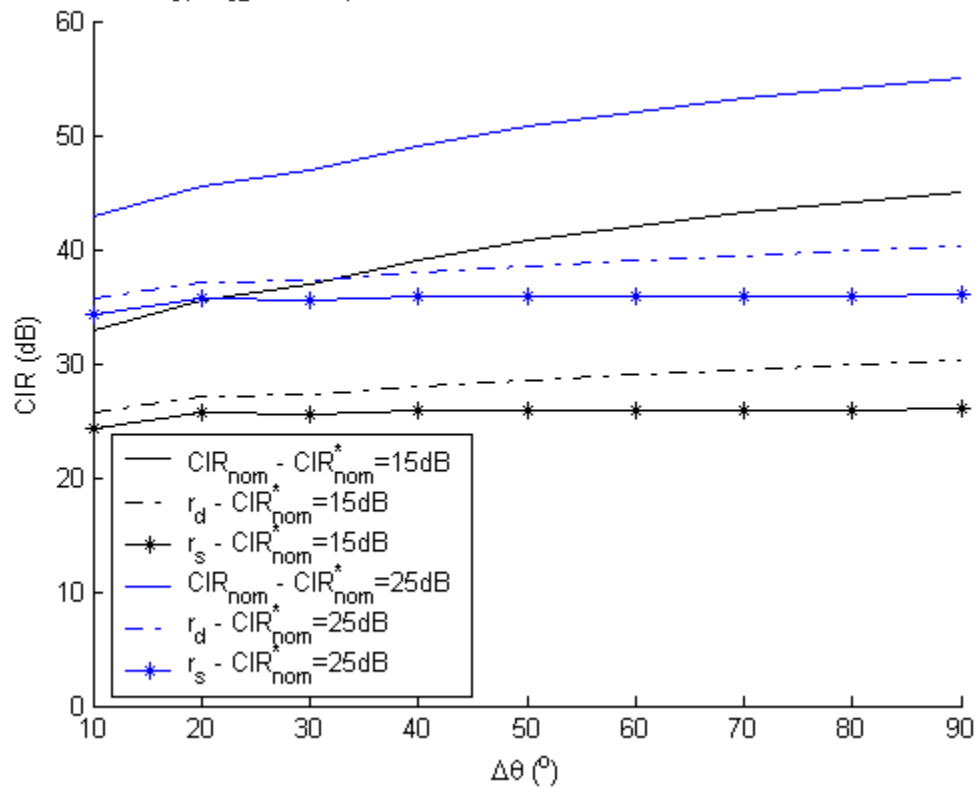
Σχήμα 6.6

Στα σχήματα 6.7 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου C/I συναρτήσει της γωνίας $\Delta\theta$ μεταξύ των ραδιοδρόμων του επιθυμητού και του παρεμβάλλοντος σήματος για διαφορετικές τιμές του λόγου $CIR_{nom,1}^*$ της ζεύξης TS-BS1 και δεδομένες τις υπόλοιπες παραμέτρους του συστήματος, των οποίων οι τιμές αναγράφονται στην επικεφαλίδα του αντίστοιχου σχήματος. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραιάς λήψης του τερματικού χρήστη TS. Όπως παρατηρείται, πλησιέστερα στην καμπύλη της ονομαστικής τιμής του λόγου C/I απουσία βροχής (CIR_{nom}) βρίσκεται η καμπύλη r_d του συστήματος διπλής λήψης ενώ η αντίστοιχη καμπύλη r_s του συστήματος απλής λήψης απέχει περισσότερο. Η απόσταση μεταξύ των καμπυλών r_d και r_s από την καμπύλη του CIR_{nom} οφείλεται στην απόσβεση λόγω βροχής του επιθυμητού σήματος, η οποία είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της απλής λήψης. Η διαφορά μεταξύ των καμπυλών r_d και r_s δίνει το διαφορικό κέρδος C/I συναρτήσει της γωνίας $\Delta\theta$. Όπως παρατηρείται, όσο αυξάνεται η γωνία $\Delta\theta$, οι καμπύλες r_d και r_s απομακρύνονται περισσότερο μεταξύ τους και κατεπέκταση αυξάνει το διαφορικό κέρδος C/I. Η αύξηση αυτή είναι περισσότερο εμφανής στην περίπτωση της Σιγκαπούρης, όπου η τεχνικής διαφορικής λήψης κελιού είναι περισσότερο αποτελεσματική και το διαφορικό κέρδος αγγίζει την τιμή των 5dB. Αντίθετα, στην περιοχή της Αθήνας, οι δύο καμπύλες r_d και r_s πλησιάζουν πολύ η μία την άλλη, γεγονός που υποδηλώνει την μειωμένη αποτελεσματικότητα της τεχνικής. Αξίζει να σημειωθεί ο επίπεδος χαρακτήρας των παραπάνω καμπυλών που παρατηρείται για γωνίες $\Delta\theta$ μεγαλύτερες ενός κατωφλίου. Για γωνίες $\Delta\theta$ μικρότερες αυτού του κατωφλίου η μεταβολή του C/I είναι πιο απότομη προσδιορίζοντας με αυτό τον τρόπο τη μικρότερη αποδεκτή γωνιακή απόσταση μεταξύ των δύο σταθμών βάσης, BS1 και BS_i, για δεδομένη διαθεσιμότητα και ποσοστό χρόνου δυσλειτουργίας λόγω παρεμβολών του συστήματος.

ATHENS: $L_{C1}=L_{C2}=2\text{km}$, $L_1=5\text{km}$, $\Delta\psi=40^\circ$, $f=25\text{GHz}$, Avail.=99.99%, Cond.Prob.=0.01%



SINGAPORE: $L_{C1}=L_{C2}=2\text{km}$, $L_1=5\text{km}$, $\Delta\psi=40^\circ$, $f=25\text{GHz}$, Avail.=99.99%, Cond.Prob.=0.01%

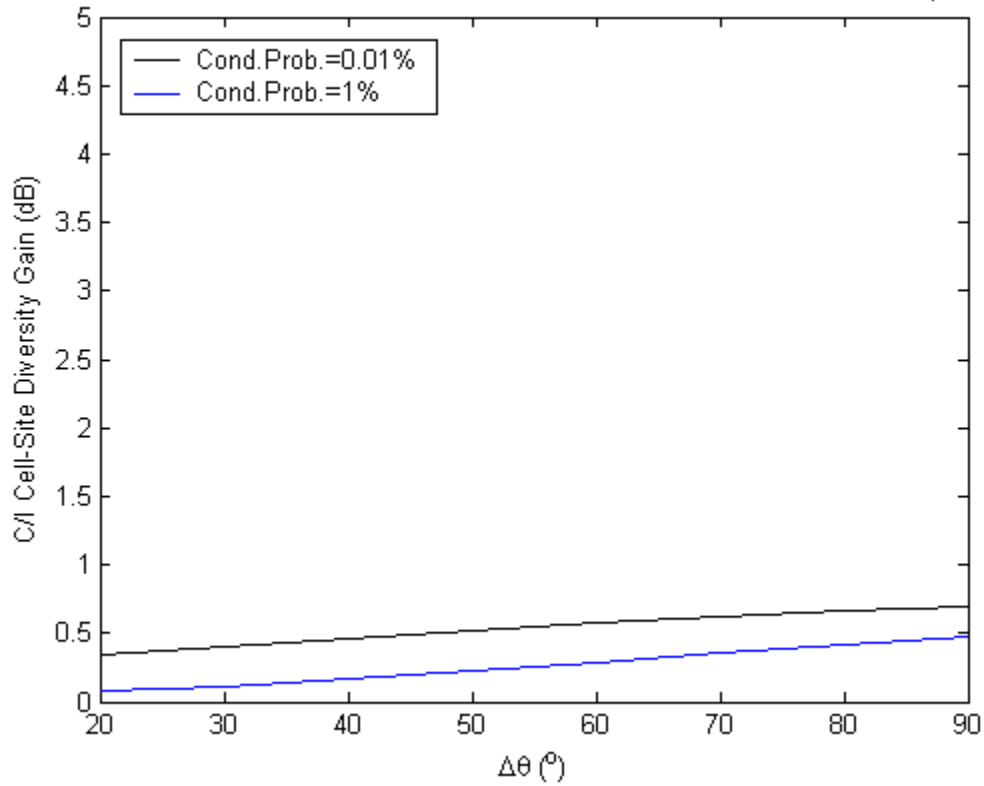


Σχήμα 6.7

Τέλος, στα σχήματα 6.8 και 6.9 παρουσιάζεται το διαφορικό κέρδος C/I συναρτήσει της γωνίας $\Delta\theta$ και $\Delta\psi$, αντίστοιχα, για διαφορετικές τιμές δεσμευμένης πιθανότητας του συστήματος και δεδομένες τις υπόλοιπες παραμέτρους του συστήματος, των οποίων οι τιμές αναγράφονται στην επικεφαλίδα του αντίστοιχου σχήματος. Όπως προκύπτει από τα σχήματα αυτά, το διαφορικό κέρδος C/I αυξάνει τόσο με την αύξηση της γωνίας $\Delta\theta$ όσο και της $\Delta\psi$. Η συμπεριφορά των καμπυλών παρουσιάζει οριζόντιο ασυμπτωτικό χαρακτήρα για μεγάλες τιμές γωνιών, καθώς από ένα σημείο και μετά, η κατευθυντική κεραία δέκτη του σταθμού TS παύει πλέον να “βλέπει” τον παρεμβάλλοντα σταθμό και οι παρεμβολές στο σύστημα είναι σταθερές. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι το διαφορικό κέρδος C/I αυξάνεται μειούμενης της δεσμευμένης πιθανότητας του συστήματος. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει άμεσα ότι το όφελος της τεχνικής διαφορικής λήψης, η οποία χρησιμοποιείται για τη μείωση των περιθωρίων διάλειψης λόγω βροχής που αντιστοιχούν σε πολύ μικρούς χρόνους διακοπής λειτουργίας, επεκτείνεται και για τη μείωση του πρόσθετου χρόνου δυσλειτουργίας εξαιτίας παρεμβολών.

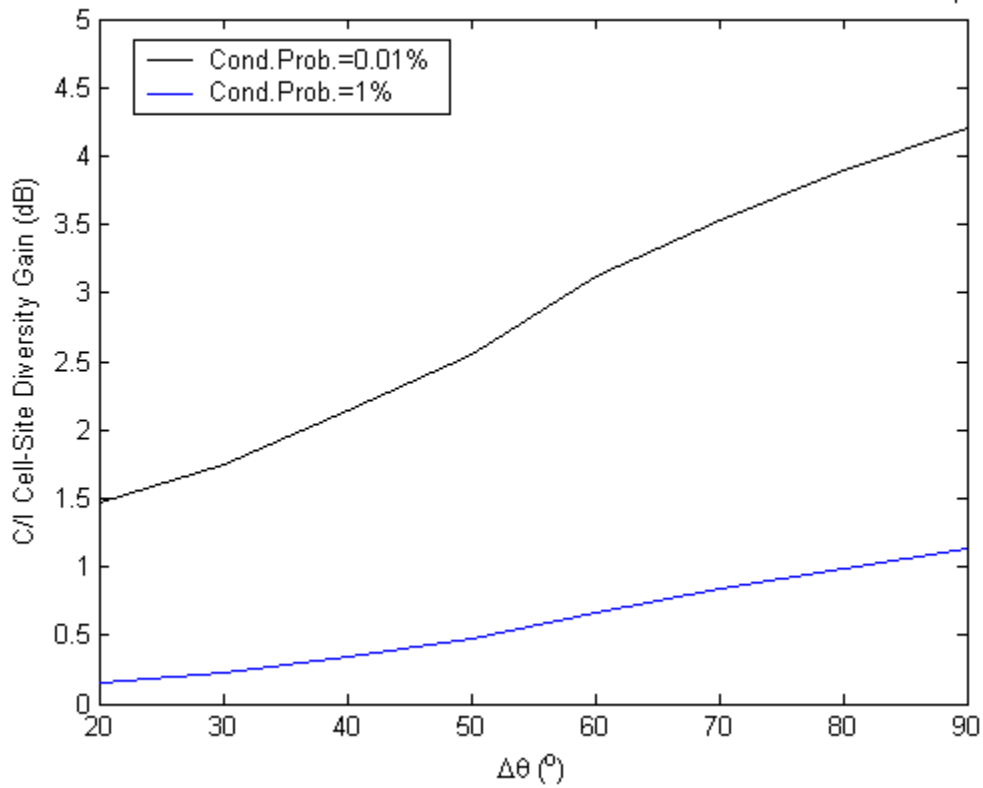
Στην περίπτωση συστημάτων LMDS που λειτουργούν στην περιοχή της Αθήνας και εφαρμόζουν την τεχνική διαφορικής λήψης κελιού, το διαφορικό κέρδος C/I είναι πολύ μικρότερο σε σύγκριση με το αντίστοιχο των συστημάτων που λειτουργούν στην περιοχή της Σιγκαπούρης. Συγκριτικά αναφέρεται ότι για διαθεσιμότητα 99.99%, δεσμευμένη πιθανότητα ίση με 0.01% και γωνίες $\Delta\psi=40^\circ$ και $\Delta\theta=90^\circ$, το διαφορικό κέρδος C/I στην μεν περίπτωση της Αθήνας ισούται με 0.7dB, στη δε περίπτωση της Σιγκαπούρης με 4.3dB. Αντίστοιχα, για γωνίες $\Delta\psi=180^\circ$ και $\Delta\theta=5^\circ$, στην περιοχή της Αθήνας επιτυγχάνεται κέρδος ίσο με 1dB ενώ στην περιοχή της Σιγκαπούρης ίσο με 5dB. Συνεπώς, η χρησιμοποίηση της διαφορικής λήψης κελιού ως τεχνική αντιμετώπισης των παρεμβολών δεν έχει τα ίδια αποτελέσματα σε όλες τις περιοχές όπου εφαρμόζεται. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται σε παράγοντες όπως η χωρική ανομοιογένεια του μέσου βροχής και οι κλιματολογικές συνθήκες λόγω βροχόπτωσης που επικρατούν στην υπόψη περιοχή.

ATHENS: $L_{C1}=L_{C2}=2\text{km}$, $L_I=5\text{km}$, $\Delta\psi=40^\circ$, $f=25\text{GHz}$, $\text{Avail.}=99.99\%$, $\text{CIR}_{\text{nom},1}^*=20\text{dB}$



(a)

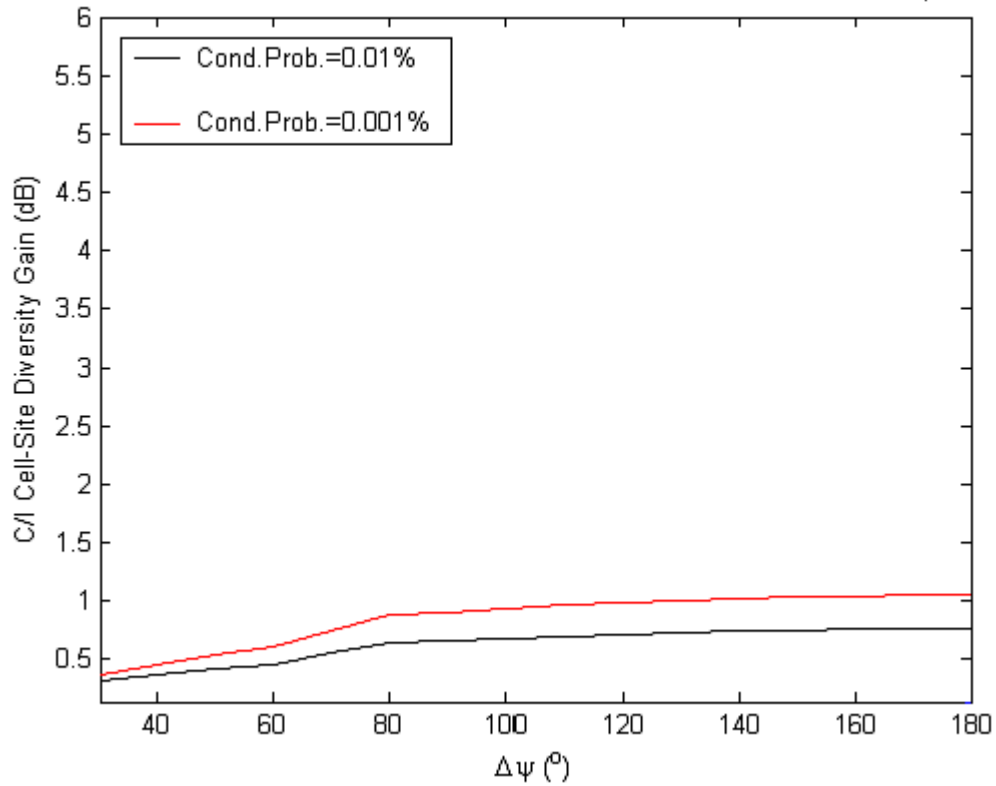
SINGAPORE: $L_{C1}=L_{C2}=2\text{km}$, $L_I=5\text{km}$, $\Delta\psi=40^\circ$, $f=25\text{GHz}$, $\text{Avail.}=99.99\%$, $\text{CIR}_{\text{nom},1}^*=20\text{dB}$



(b)

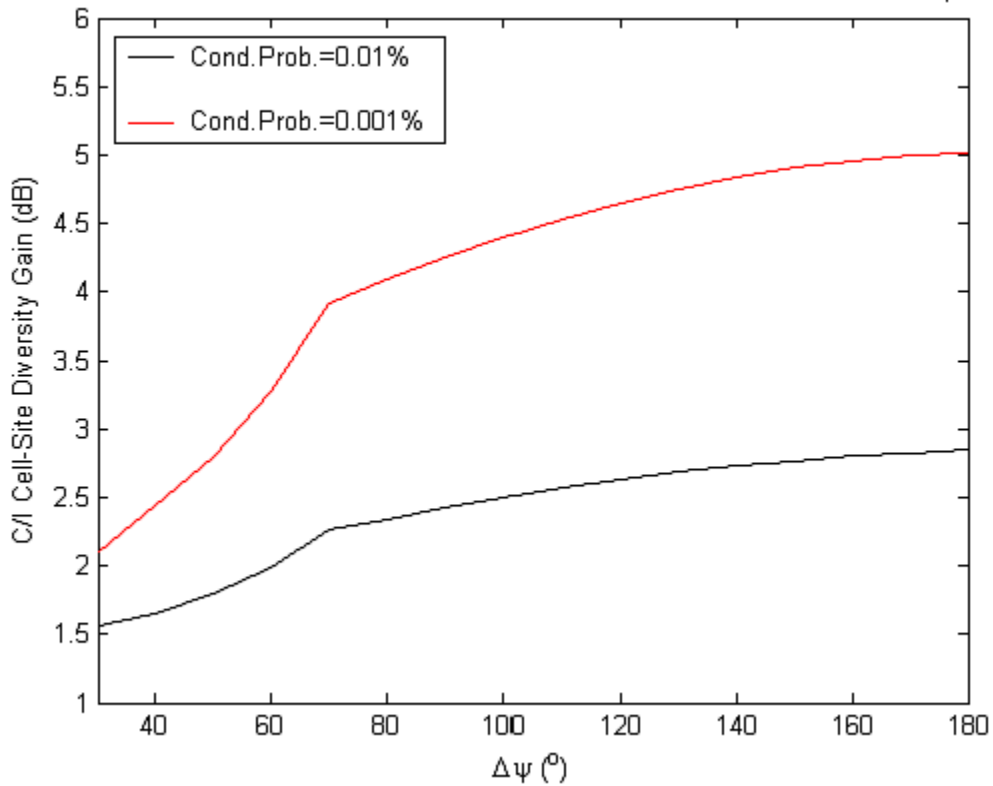
Σχήμα 6.8

ATHENS: $L_{C1}=L_{C2}=2\text{km}$, $L_T=5\text{km}$, $\Delta\theta=5^\circ$, $f=25\text{GHz}$, $\text{Avail.}=99.99\%$, $\text{CIR}_{\text{nom},1}^*=20\text{dB}$



(α)

SINGAPORE: $L_{C1}=L_{C2}=2\text{km}$, $L_T=5\text{km}$, $\Delta\theta=5^\circ$, $f=25\text{GHz}$, $\text{Avail.}=99.99\%$, $\text{CIR}_{\text{nom},1}^*=20\text{dB}$



(β)

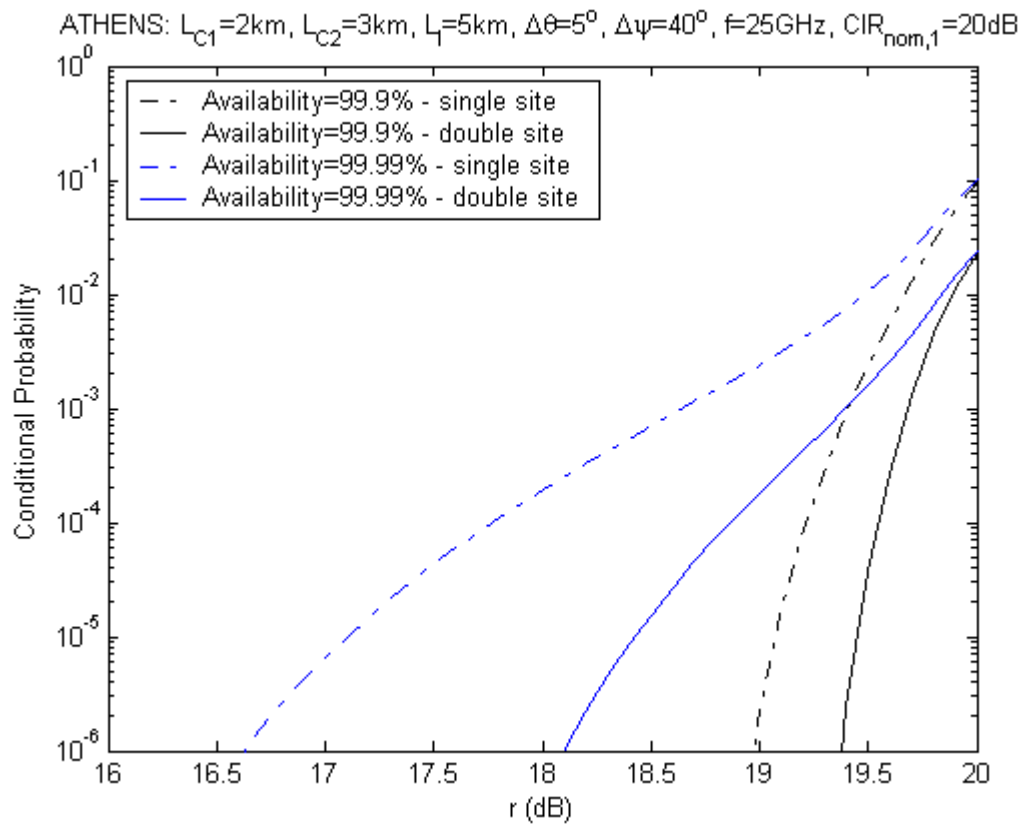
Σχήμα 6.9

6.4 Επίδραση παρεμβολών σε μη ισοσταθμισμένο σύστημα LMDS διπλής λήψης

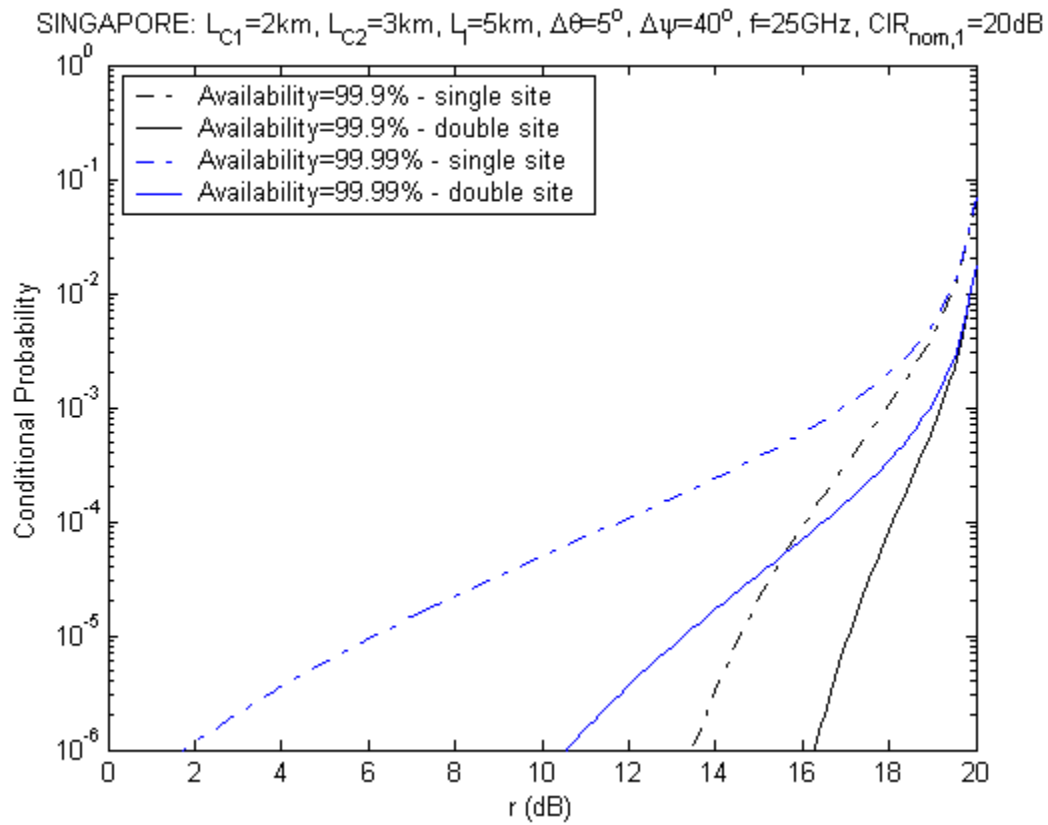
Η περίπτωση που εξετάστηκε στην προηγούμενη ενότητα αφορούσε την επίδραση παρεμβολών σε σύστημα LMDS διπλής διαφορικής λήψης κελιού, στο οποίο τα μήκη L_{C1} και L_{C2} θεωρούνταν ίσα. Στην παρούσα ενότητα μελετάται το ίδιο πρόβλημα για μη ισοσταθμισμένο, όμως, σύστημα LMDS όπου τα μήκη L_{C1} και L_{C2} είναι μεταξύ τους άνισα και μάλιστα ισχύει $L_{C1} < L_{C2}$. Αυτή αποτελεί τη συνηθέστερη και πιο πρακτική περίπτωση διότι κάθε χρήστης διατηρεί συνήθως μόνιμη σύνδεση με τον πλησιέστερο σε αυτόν σταθμό βάσης (σε απόσταση L_{C1}) και πραγματοποιεί το switchover, που προβλέπει η τεχνική διαφορικής λήψης κελιού, στον αμέσως επόμενο πλησιέστερο σταθμό βάσης (σε απόσταση L_{C2}). Συνεπώς, για την ανάλυση που ακολουθεί θεωρείται η περίπτωση όπου $L_{C1}=2\text{km}$, $L_{C2}=3\text{km}$ και $L_I=5\text{km}$.

Τα διαγράμματα που παρατίθενται στη συνέχεια απεικονίζουν τα ίδια μεγέθη και την εξάρτηση αυτών από τις ίδιες παραμέτρους του συστήματος, με ανάλογο τρόπο όπως και στην προηγούμενη ενότητα. Η μορφή των αντιστοιχών καμπυλών είναι ίδια όπως, επίσης, ίδια είναι και τα συμπεράσματα που προκύπτουν σε κάθε περίπτωση. Για το λόγο αυτό, η παρουσίαση των αριθμητικών αποτελεσμάτων δεν συνοδεύεται από τον ανάλογο σχολιασμό.

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι η αποτελεσματικότητα των μη ισοσταθμισμένων συστημάτων διπλής διαφορικής λήψης στην αντιμετώπιση των παρεμβολών προκύπτει μεγαλύτερη από αυτή των αντίστοιχων ισοσταθμισμένων, για τις ίδιες παραμέτρους συστήματος κάθε φορά. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον τρόπο υπολογισμού του περιθωρίου διάλειψης λόγω βροχής M_d (dB), που περιγράφεται στην παράγραφο §4.2.2 και οδηγεί σε μια υποεκτίμηση (underestimation) του αντίστοιχου μεγέθους για την περίπτωση όπου $L_{C1} < L_{C2}$. Συνεπώς, με τον τρόπο αυτό, μειώνεται η μέγιστη τιμή της απόσβεσης A_C του επιθυμητού σήματος, αφού ο τύπος της δεσμευμένης πιθανότητας αναφέρεται σε τιμές $0.5 \leq \min\{A_{C1}, A_{C2}\} \leq M_d$, και υπερεκτιμάται το διαφορικό κέρδος C/I .



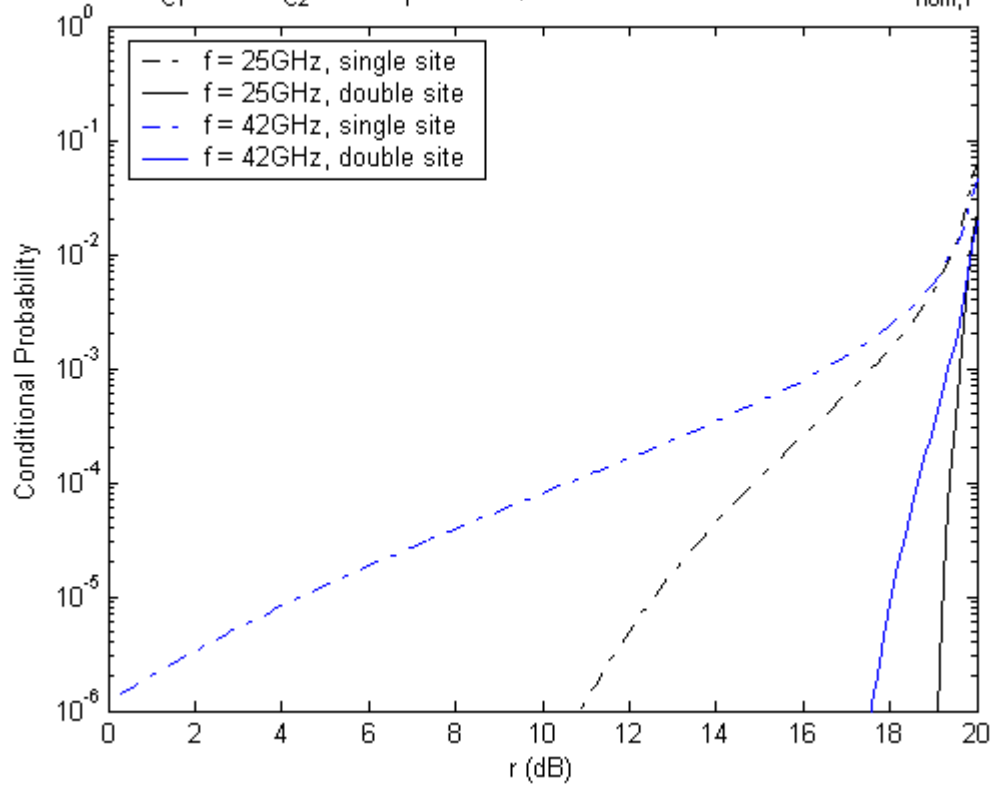
(a)



(b)

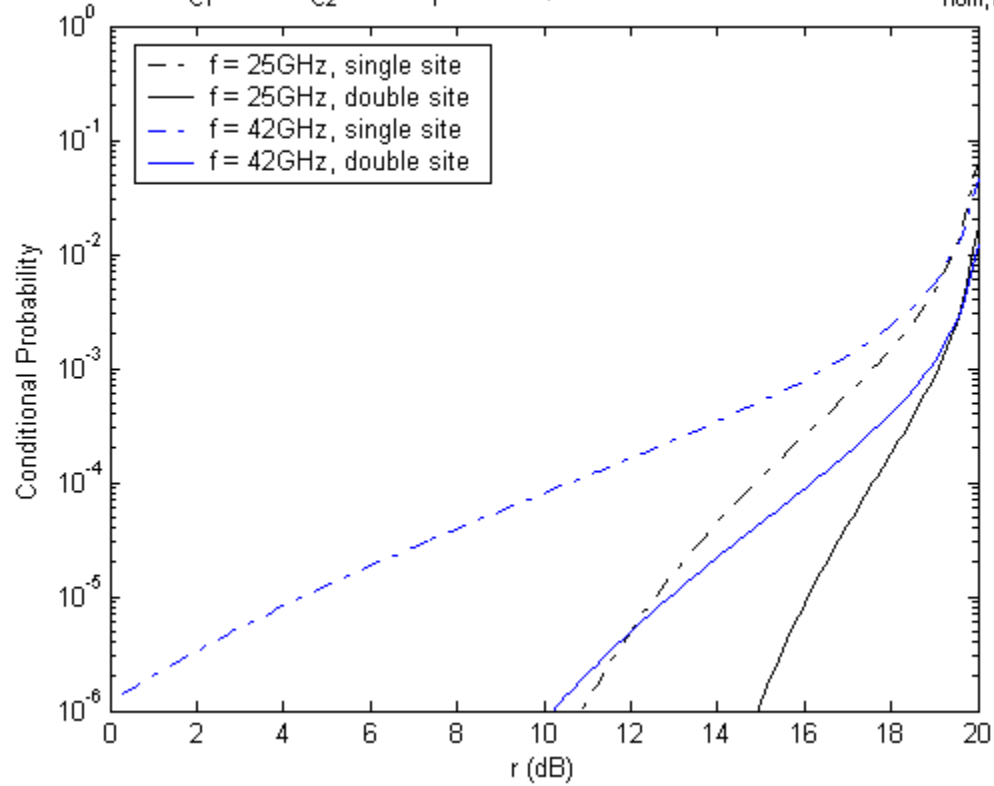
Σχήμα 6.10

ATHENS: $L_{C1}=2\text{km}$, $L_{C2}=3\text{km}$, $L_1=5\text{km}$, $\Delta\psi=40^\circ$, $\Delta\theta=5^\circ$, Avail.=99.95%, $\text{CIR}_{\text{nom},1}=20\text{dB}$



(a)

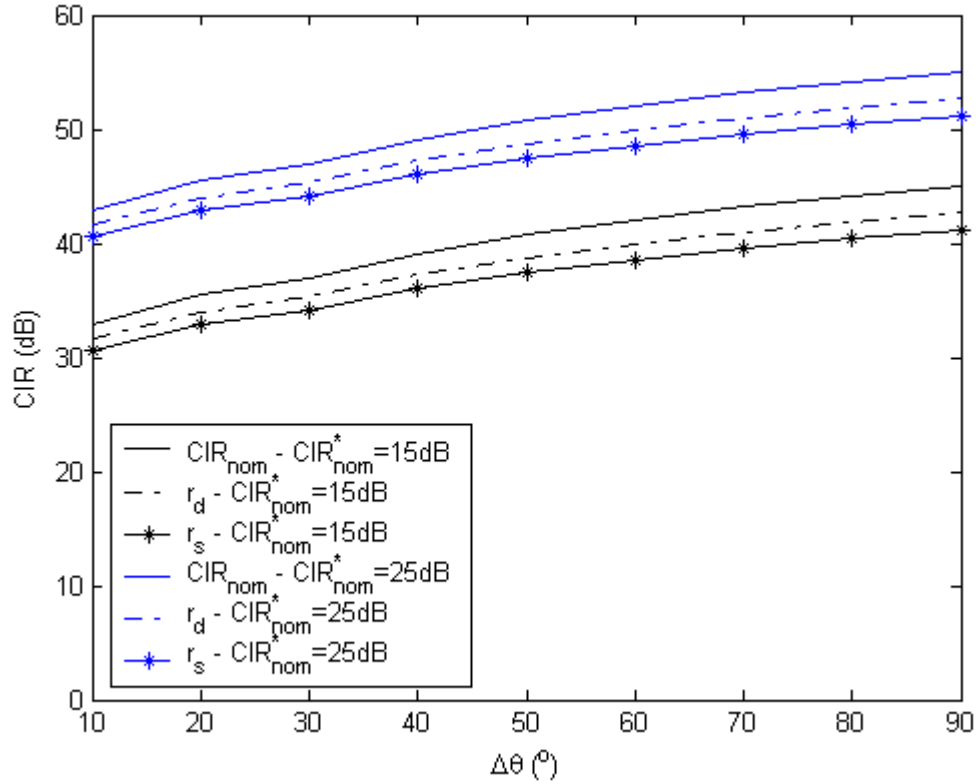
SINGAPORE: $L_{C1}=2\text{km}$, $L_{C2}=3\text{km}$, $L_1=5\text{km}$, $\Delta\psi=40^\circ$, $\Delta\theta=5^\circ$, Avail.=99.95%, $\text{CIR}_{\text{nom},1}=20\text{dB}$



(b)

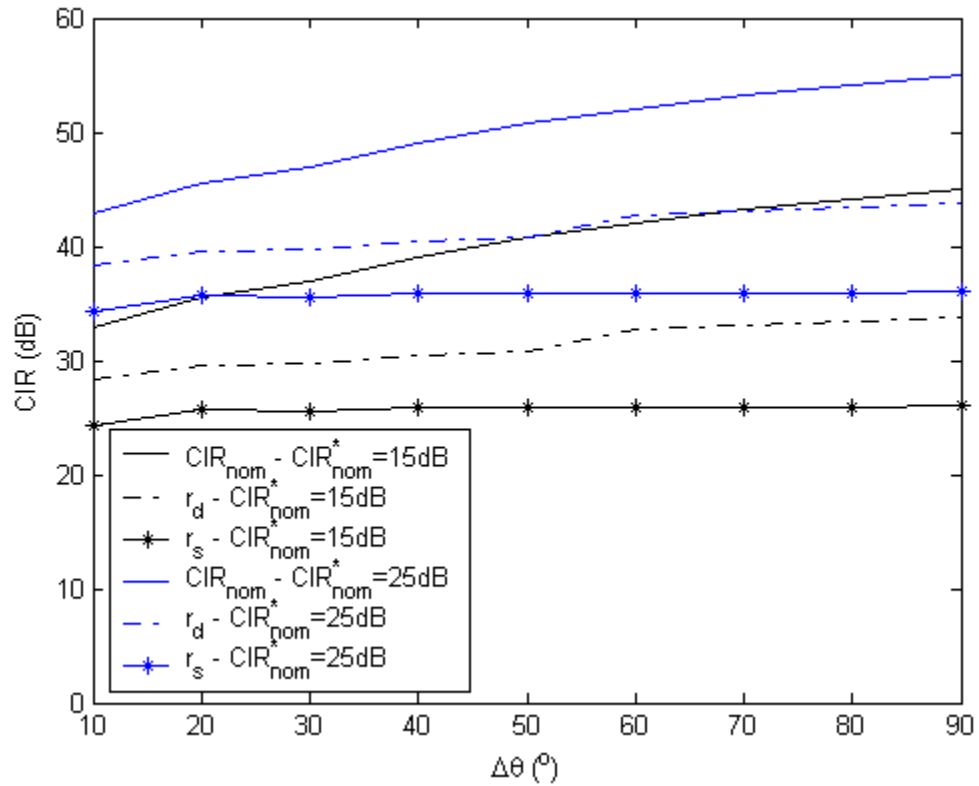
Σχήμα 6.11

ATHENS: $L_{C1}=2\text{km}, L_{C2}=3\text{km}, L_1=5\text{km}, \Delta\psi=40^\circ, f=25\text{GHz}, \text{Avail.}=99.99\%, \text{Cond.Prob.}=0.01\%$



(a)

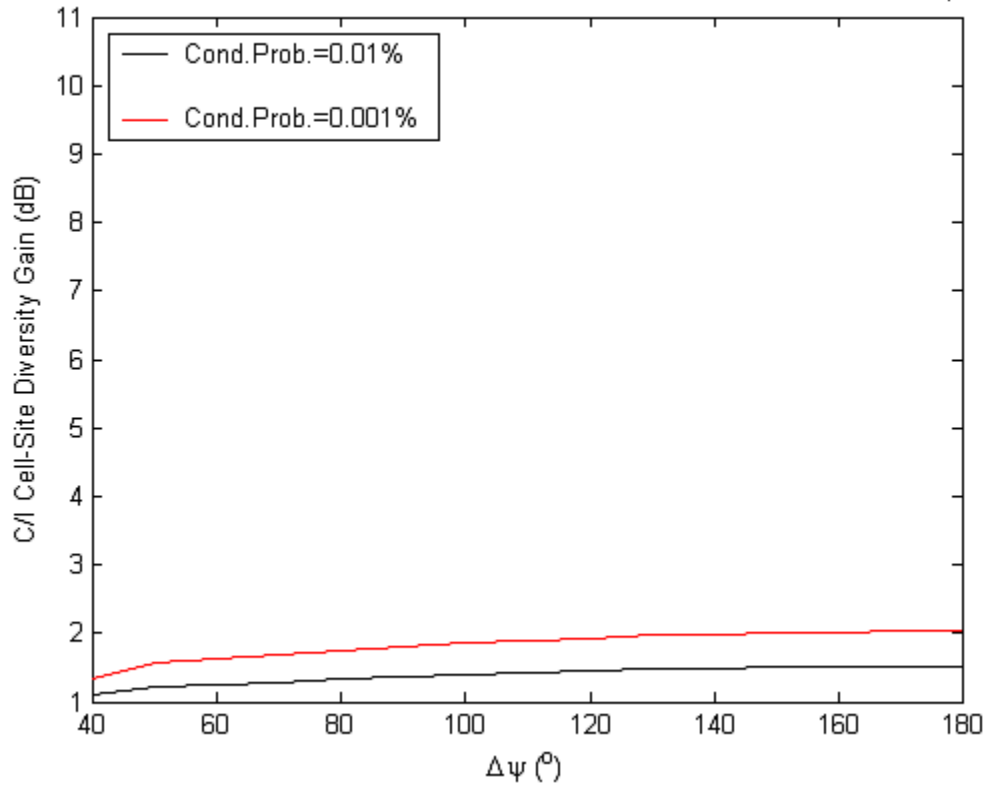
SINGAPORE: $L_{C1}=2\text{km}, L_{C2}=3\text{km}, L_1=5\text{km}, \Delta\psi=40^\circ, f=25\text{GHz}, \text{Avail.}=99.99\%, \text{Cond.Prob.}=0.01\%$



(b)

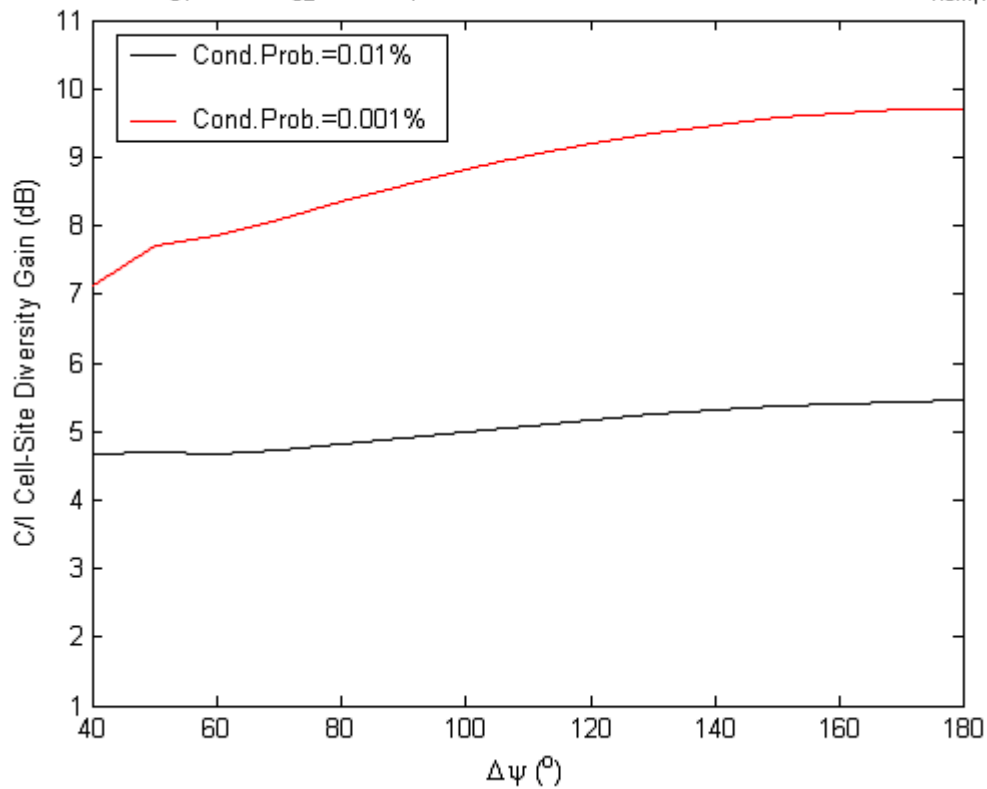
Σχήμα 6.12

ATHENS: $L_{C1}=2\text{km}$, $L_{C2}=3\text{km}$, $L_1=5\text{km}$, $\Delta\theta=5^\circ$, $f=25\text{GHz}$, Avail.=99.99%, $\text{CIR}_{\text{nom},1}^*=20\text{dB}$



(α)

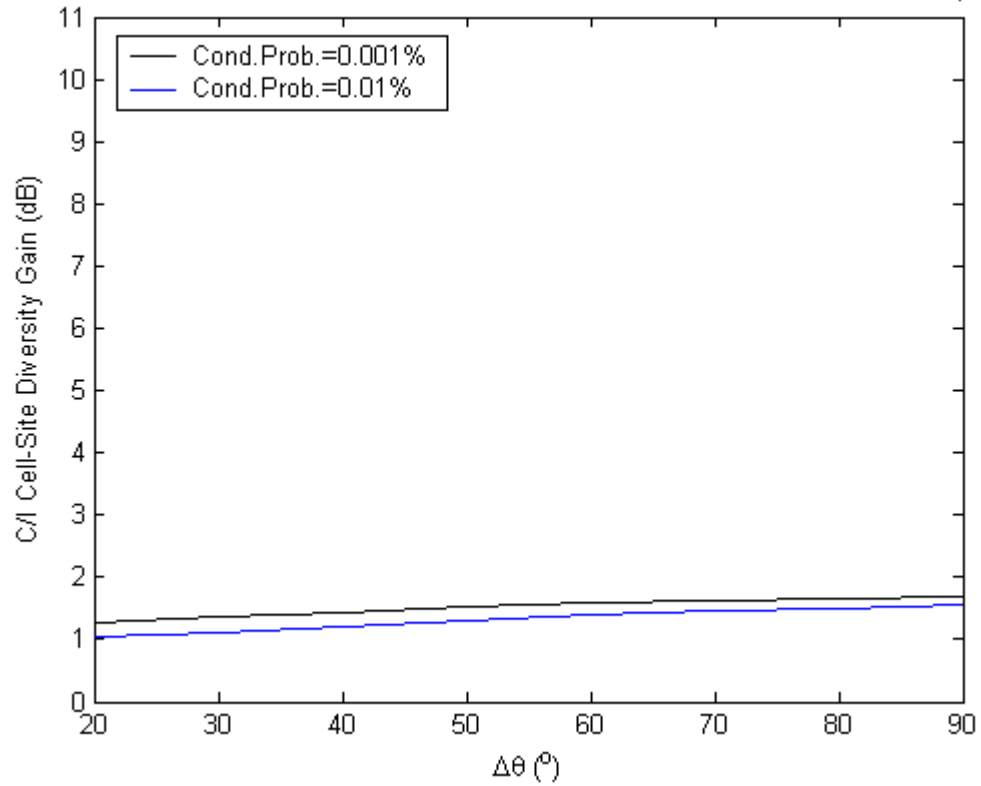
SINGAPORE: $L_{C1}=2\text{km}$, $L_{C2}=3\text{km}$, $L_1=5\text{km}$, $\Delta\theta=5^\circ$, $f=25\text{GHz}$, Avail.=99.99%, $\text{CIR}_{\text{nom},1}^*=20\text{dB}$



(β)

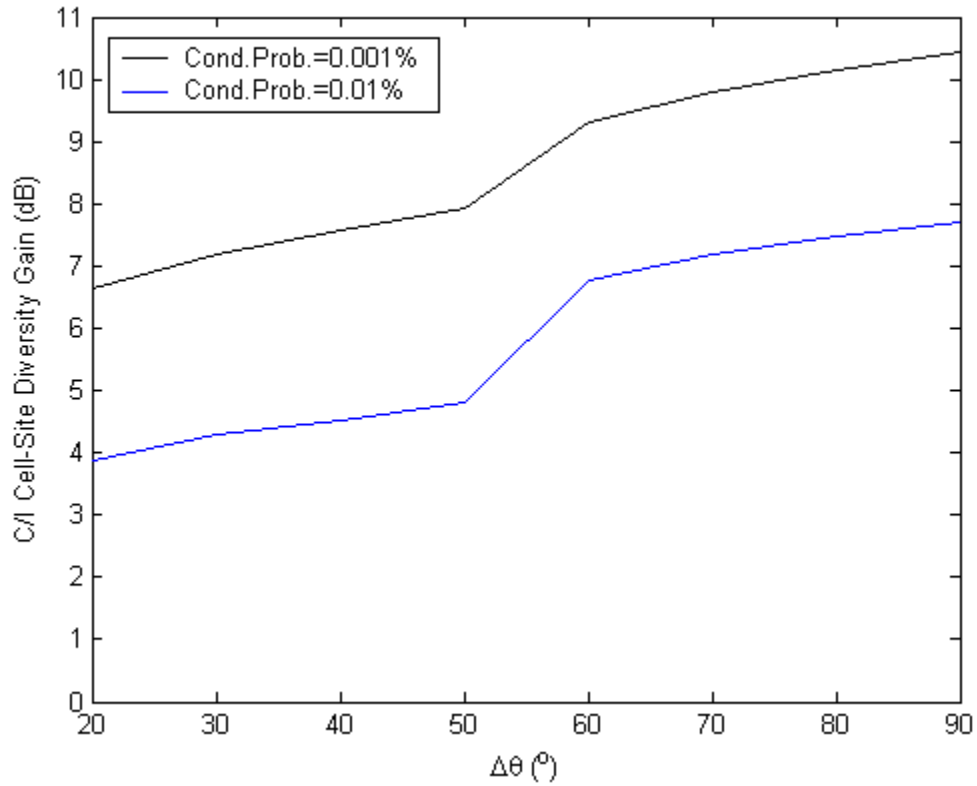
Σχήμα 6.13

ATHENS: $L_{C1}=2\text{km}$, $L_{C2}=3\text{km}$, $L_1=5\text{km}$, $\Delta\psi=40^\circ$, $f=25\text{GHz}$, $\text{Avail.}=99.99\%$, $\text{CIR}_{\text{nom},1}^*=20\text{dB}$



(a)

SINGAPORE: $L_{C1}=2\text{km}$, $L_{C2}=3\text{km}$, $L_1=5\text{km}$, $\Delta\psi=40^\circ$, $f=25\text{GHz}$, $\text{Avail.}=99.99\%$, $\text{CIR}_{\text{nom},1}^*=20\text{dB}$



(b)

Σχήμα 6.13

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΗ ΧΩΡΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

A.1 Υπολογισμός του H_1

Η παράμετρος H_1 προσδιορίζεται με διπλή ολοκλήρωση του σημειακού συντελεστή αυτοσυσχέτισης ρ κατά μήκος της διαδρομής μήκους L , δηλαδή

$$H_1 = \int_0^L \int_0^L \rho_1(l_1, l_1') dl_1 dl_1' \quad (\text{A.1})$$

Εξάλλου ο συντελεστής ρ εξαρτάται μόνο από την απόσταση

$$d = |l_1 - l_1'| \quad (\text{A.2})$$

και επομένως

$$\rho(l_1, l_1') = \rho(l_1', l_1) \quad (\text{A.3})$$

Από τις (A.1) και (A.2) προκύπτει

$$H_1 = 2 \cdot \int_0^L \int_0^{l_1} \rho dl_1 dl_1' \quad (\text{A.4})$$

Αν θεωρηθεί ότι

$$x = l_1 - l_1' \quad (\text{A.5})$$

$$y = l_1' \quad (\text{A.6})$$

με αλλαγή μεταβλητών η (A.4) γράφεται

$$H_1 = 2 \cdot \int_0^L \int_0^{L-x} \rho(x) \cdot dx \cdot dy \quad (\text{A.7})$$

που δίνει

$$H_1 = 2 \cdot \int_0^L \rho(x) \cdot (L - x) \cdot dx \quad (\text{A.8})$$

Σύμφωνα με το μοντέλο Lin, ο συντελεστής ρ εκφράζεται από τη μεταβλητή x με βάση τη σχέση

$$\rho_1(x) = \begin{cases} \frac{G}{\sqrt{G^2 + x^2}} & x \leq D_r \\ \frac{G}{\sqrt{G^2 + D_r^2}} & x > D_r \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

όπου D_r είναι μια σταθερά που αντιστοιχεί στη μέγιστη διάσταση του βροχοπυρήνα.

Συνεπώς, η (A.8) για $x \leq D_r$ γράφεται

$$H_1 = 2 \cdot \int_0^L \frac{G \cdot (L - x)}{\sqrt{G^2 + x^2}} dx \quad (\text{A.10})$$

ή

$$H_1 = 2 \cdot LG \cdot \int_0^{L/G} \frac{dz}{\sqrt{1 + z^2}} - 2G^2 \cdot \int_0^{L/G} \frac{z \cdot dz}{\sqrt{1 + z^2}} \quad (\text{A.11})$$

Όπως εύκολα αποδεικνύεται

$$\int \frac{dz}{\sqrt{1 + z^2}} = \sinh^{-1}(z) + C \quad (\text{A.12})$$

$$\int \frac{z \cdot dz}{\sqrt{1 + z^2}} = \sqrt{1 + z^2} + C \quad (\text{A.13})$$

Άρα, η (A.11) γράφεται

$$H_1 = 2 \cdot L \cdot G \cdot \sinh^{-1}\left(\frac{L}{G}\right) + 2G^2 \cdot \left(1 - \sqrt{\left(\frac{L}{G}\right)^2 + 1}\right) \quad (\text{A.14})$$

Επίσης, εύκολα αποδεικνύεται ότι

$$H_1 = 2 \cdot L \cdot G \cdot \sinh^{-1}\left(\frac{D_r}{G}\right) + 2G^2 \cdot \left(1 - \sqrt{\left(\frac{D_r}{G}\right)^2 + 1}\right) + \frac{G \cdot (L - G)^2}{\sqrt{G^2 + D_r^2}} \quad \text{για } x < D_r \quad (\text{A.15})$$

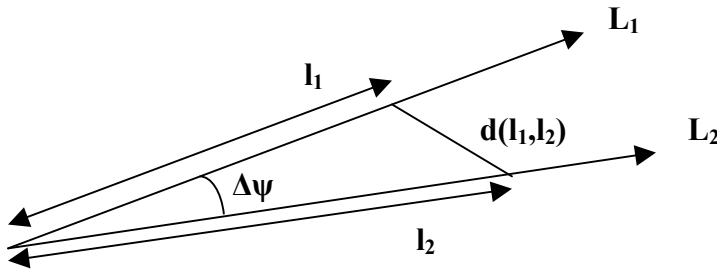
A.2 Υπολογισμός των μεγεθών H_2 τεμνόμενων ραδιοβημάτων

Η γενική σχέση υπολογισμού του μεγέθους H_2 εκφράζει διπλή ολοκλήρωση του σημειακού συντελεστή συσχέτισης, σύμφωνα με τη σχέση

$$H_2 = \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} \rho_2(l_1, l_2) dl_1 dl_2 \quad (\text{A.16})$$

Το μέγεθος ρ_2 εξαρτάται από την απόσταση των δύο σημείων στις δύο διαδρομές. Αν υποθεθεί ότι σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία $\Delta\psi$ και ότι τα δύο σημεία απέχουν αποστάσεις l_1 και l_2 από την κοινή αρχή, η απόσταση μεταξύ τους είναι :

$$d(l_1, l_2) = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos \Delta\psi} \quad (\text{A.17})$$



Σχήμα A.1

Γεωμετρία υπολογισμού του μεγέθους H_2 τεμνόμενων ραδιοβημάτων

Σύμφωνα πάλι με το μοντέλο του Lin ο συντελεστής συσχέτισης σε αυτή την περίπτωση είναι

$$\rho_2 = \begin{cases} \frac{G}{\sqrt{G^2 + d^2(l_1, l_2)}} & , d(l_1, l_2) \leq D_r \\ \frac{G}{\sqrt{G^2 + D_r^2}} & , d(l_1, l_2) > D_r \end{cases} \quad (\text{A.18})$$

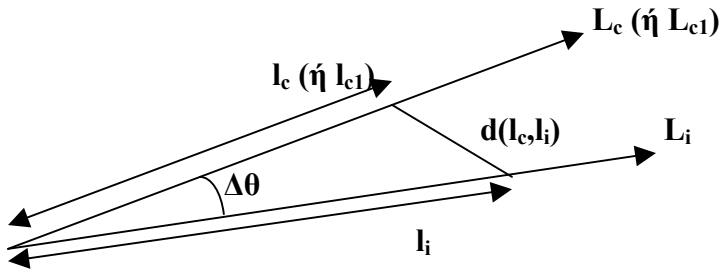
οπότε η έκφραση (A.16) γίνεται

$$H_2 = \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} \rho_2(d(l_1, l_2)) dl_1 dl_2 \quad (\text{A.19})$$

A.2.1 Υπολογισμός του μεγέθους H_{2a1}

Ο ορισμός του μεγέθους H_{2a1} δίνεται στη σχέση (5.18) και επαναλαμβάνεται στη συνέχεια

$$H_{2a1} = \int_0^{L_c} dl_c \int_0^{L_i} dl_i \rho_{2a1}(l_c, l_i) \quad (\text{A.20})$$



Σχήμα A.2

Γεωμετρία υπολογισμού του μεγέθους H_{2a1} τεμνόμενων ραδιοβημάτων

Στην περίπτωση αυτή, όπως φαίνεται στο σχήμα A.2, οι δύο επίγειες διαδρομές σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία $\Delta\theta$. Συνεπώς ισχύει

$$\rho_{2a1}(l_c, l_i) = \begin{cases} \frac{G}{\sqrt{G^2 + d^2(l_c, l_i)}} & d \leq D_r \\ \frac{G}{\sqrt{G^2 + D_r^2}} & d > D_r \end{cases} \quad (\text{A.21})$$

όπου

$$d(l_c, l_i) = \sqrt{l_c^2 + l_i^2 - 2 \cdot l_c \cdot l_i \cdot \cos(\Delta\theta)} \quad (\text{A.22})$$

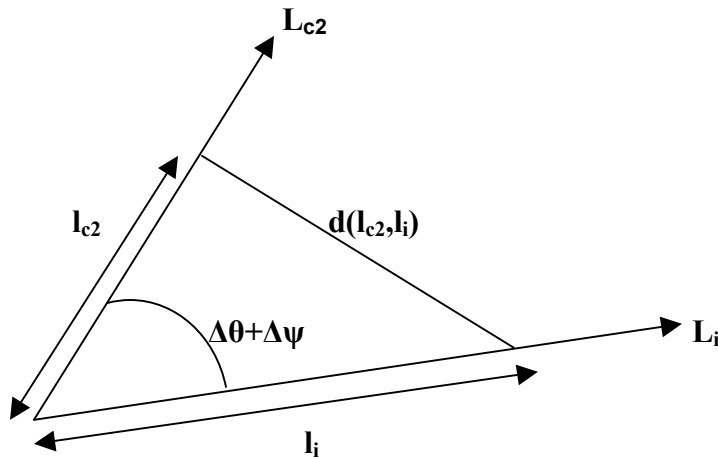
Οπότε η έκφραση (A.20) γίνεται

$$H_{2a1} = \int_0^{L_c} dl_c \int_0^{L_i} dl_i \rho_{2a1}[d(l_c, l_i)] \quad (\text{A.23})$$

A.2.2 Υπολογισμός του μεγέθους H_{2a2}

Το μέγεθος H_{2a2} υπολογίζεται βάσει της σχέσης

$$H_{2a2} = \int_0^{L_{c2}} dl_{c2} \int_0^{L_i} dl_i \rho_{2a2}(l_{c2}, l_i) \quad (\text{A.24})$$



Σχήμα A.3

Γεωμετρία υπολογισμού του μεγέθους H_{2a2} τεμνόμενων ραδιοβημάτων

Στην περίπτωση αυτή, όπως φαίνεται στο σχήμα A.3, οι δύο επίγειες διαδρομές σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία $\Delta\theta + \Delta\psi$. Συνεπώς ισχύει

$$\rho_{2a2}(l_{c2}, l_i) = \begin{cases} \frac{G}{\sqrt{G^2 + d^2(l_{c2}, l_i)}} & d \leq D_r \\ \frac{G}{\sqrt{G^2 + D_r^2}} & d > D_r \end{cases} \quad (\text{A.25})$$

όπου

$$d(l_{c2}, l_i) = \sqrt{l_{c2}^2 + l_i^2 - 2 \cdot l_{c2} \cdot l_i \cdot \cos(\Delta\theta + \Delta\psi)} \quad (\text{A.26})$$

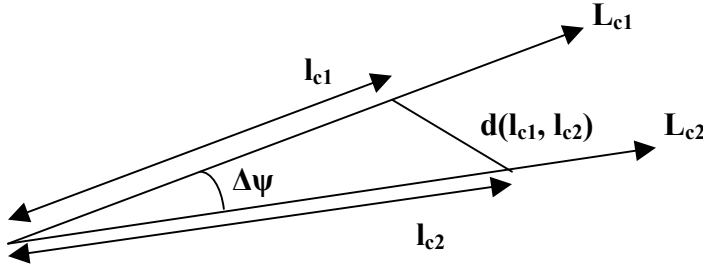
Οπότε η έκφραση (A.24) γίνεται

$$H_{2a2} = \int_0^{L_{c2}} dl_{c2} \int_0^{L_i} dl_i \rho_{2a2}[d(l_{c2}, l_i)] \quad (\text{A.27})$$

A.2.3 Υπολογισμός του μεγέθους H_{2p}

Ο ορισμός του μεγέθους H_{2p} δίνεται στη σχέση (5.56) και επαναλαμβάνεται στη συνέχεια

$$H_{2p} = \int_0^{L_{c1}} dl_{c1} \int_0^{L_{c2}} dl_{c2} \rho_{2p}(l_{c1}, l_{c2}) \quad (\text{A.28})$$



Σχήμα A.4

Γεωμετρία υπολογισμού του μεγέθους H_{2a1} τεμνόμενων ραδιοβημάτων

Στην περίπτωση αυτή, όπως φαίνεται στο σχήμα A.4, οι δύο επίγειες διαδρομές σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία $\Delta\psi$. Συνεπώς ισχύει

$$\rho_{2p}(l_{c1}, l_{c2}) = \begin{cases} \frac{G}{\sqrt{G^2 + d^2(l_{c1}, l_{c2})}} & d \leq D_r \\ \frac{G}{\sqrt{G^2 + D_r^2}} & d > D_r \end{cases} \quad (\text{A.29})$$

όπου

$$d(l_{c1}, l_{c2}) = \sqrt{l_{c1}^2 + l_{c2}^2 - 2 \cdot l_{c1} \cdot l_{c2} \cdot \cos(\Delta\psi)} \quad (\text{A.30})$$

Οπότε η έκφραση (A.28) γίνεται

$$H_{2p} = \int_0^{L_{c1}} dl_{c1} \int_0^{L_{c2}} dl_{c2} \rho_{2p} d[l_{c1}, l_{c2}] \quad (\text{A.31})$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

B.1 Ορισμός λογαριθμοκανονικής κατανομής

Έστω ότι η τ.μ. X ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή μ και τυπική απόκλιση σ . Η σ.π.π. της τ.μ. X είναι

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (\text{B.1})$$

Η τ.μ.

$$Y = g(X) = e^X \quad (\text{B.2})$$

ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή, της οποίας η σ.π.π υπολογίζεται παρακάτω.

Η εξίσωση $y = g(x) = e^x$ για $y > 0$ έχει αντίστροφη συνάρτηση $x = g^*(y) = \ln y$. Συνεπώς ισχύει

$$f_Y(y) = f_X(g^*(y)) \left| \frac{dg^*(y)}{dy} \right| = \frac{f_X(g^*(y))}{|g'(x)|} \Rightarrow$$

$$f_Y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot y} \exp\left[-\frac{(\ln y - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad y > 0 \quad (\text{B.3})$$

Ορίζοντας

$$\mu = \ln Y_m \quad (\text{B.4}\alpha)$$

$$\sigma = S_Y \quad (\text{B.4}\beta)$$

η σ.π.π. της τ.μ. Y γράφεται

$$f_Y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot S_Y \cdot y} \exp\left[-\frac{(\ln y - \ln Y_m)^2}{2S_Y^2}\right] \quad (\text{B.5})$$

όπου Y_m , S_Y οι παράμετροι της κατανομής.

B.2 Ολοκληρώματα λογαριθμοκανονικής κατανομής

Έστω ότι η τ.μ. Y ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους Y_m, S_Y . Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω είναι φανερό ότι η τ.μ.

$$X = \frac{\ln Y - \ln Y_m}{S_Y} \quad (\text{B.6})$$

ακολουθεί την τυπική κανονική κατανομή $N(\mu=0, \sigma=1)$, οπότε ισχύει

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{x^2}{2}\right] \quad (\text{B.7})$$

Συνεπώς, ο υπολογισμός της πιθανότητας οποιουδήποτε ενδεχομένου για την τ.μ. X που αντιστοιχεί σε ολοκλήρωση της σ.π.π. $f_X(x)$ στο χωρίο που καθορίζεται από το ενδεχόμενο, γίνεται ως εξής:

$$P(A < X < B) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_A^B \exp\left[-\left(\frac{x^2}{2}\right)\right] dx \quad (\text{B.8})$$

Εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό

$$z = \frac{u}{\sqrt{2}} \quad (\text{B.9})$$

προκύπτει ότι

$$P(A < X < B) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_{A/\sqrt{2}}^{B/\sqrt{2}} \exp(-z^2) dz \quad (\text{B.10})$$

Συνεπώς, με βάση τον ορισμό της συμπληρωματικής συνάρτησης σφάλματος $\text{erfc}(\)$ ισχύει

$$P(A < X < B) = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{A}{\sqrt{2}}\right) - \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{B}{\sqrt{2}}\right) \quad (\text{B.11})$$

B.3 Ροπές λογαριθμοκανονικής κατανομής

Οι κεντρικές ροπές της τ.μ. Y ορίζονται ως εξής

$$m_k = E[Y^k] = E[e^{kx}] \quad (\text{B.12})$$

Από τον ορισμό της λογαριθμοκανονικής κατανομής προκύπτει ότι η τ.μ. $X=\ln Y$ ακολουθεί την κανονική κατανομή. Η ροπογεννήτρια συνάρτηση της κανονικής μεταβλητής είναι ίση με

$$\Phi(s)=E(e^{sX}) = \exp\left(\mu \cdot s + \frac{1}{2} \cdot \sigma^2 \cdot s^2\right) \quad (\text{B.13})$$

Επομένως

$$m_k = E[e^{kX}] = \exp\left(\mu \cdot k + \frac{1}{2} \cdot \sigma^2 \cdot k^2\right) \quad (\text{B.14})$$

όπου μ , σ η μέση τιμή και τυπική απόκλιση της τ.μ. X . Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (B.4) η σχέση (B.14) γίνεται

$$m_k = Y^m \exp\left(\frac{k^2 S_Y^2}{2}\right) \quad (\text{B.15})$$

Θέτοντας $Y=R$ και $k=b$ ή $k=2b$ προκύπτουν οι σχέσεις (3.18), (3.19). Η μέση τιμή και τυπική απόκλιση της λογαριθμοκανονικής κατανομής βρίσκονται ως εξής:

$$\mu_Y = E[Y]=m_1 \Rightarrow$$

$$\mu_Y = Y_m \exp\left(\frac{S_Y^2}{2}\right) \quad (\text{B.16})$$

$$\sigma_Y^2 = E[Y^2] - (E[Y])^2 = m_2 - m_1^2 = Y_m^2 \exp(2 \cdot S_Y^2) - Y_m^2 \exp(S_Y^2) \Rightarrow$$

$$\sigma_Y^2 = Y_m^2 \cdot \exp(S_Y^2) \cdot (\exp S_Y^2 - 1) \quad (\text{B.17})$$

Θέτοντας $\mu_Y=\mu_\alpha$, $\sigma_Y=\sigma_\alpha$, $Y_m = A_m$ και $S_Y=S_\alpha$ στις σχέσεις (B.16) και (B.17) προκύπτουν οι σχέσεις (3.20) και (3.21).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

Γ.1 Ορισμός δισδιάστατης λογαριθμοκανονικής κατανομής

Η δισδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή ορίζεται μέσω της δισδιάστατης κανονικής κατανομής. Αν οι τ.μ. X_1, X_2 ακολουθούν από κοινού κανονική κατανομή, η από κοινού σ.π.π. είναι

$$f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho_n^2}} \exp\left\{-\frac{Q(x_1, x_2)}{2 \cdot (1-\rho_n^2)}\right\} \quad (\Gamma.1)$$

όπου έχει οριστεί

$$Q(x_1, x_2) = \frac{(x_1 - \mu_1)^2}{\sigma_1^2} - 2\rho_n \frac{(x_1 - \mu_1) \cdot (x_2 - \mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(x_2 - \mu_2)^2}{\sigma_2^2} \quad (\Gamma.2)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης ρ_n των τ.μ. X_1, X_2 ορίζεται ως εξής

$$\rho_n = \frac{E[X_1 X_2] - \mu_1 \mu_2}{\sigma_1 \sigma_2} \quad (\Gamma.3)$$

Έστω οι τ.μ.

$$Y_1 = e^{X_1} \quad (\Gamma.4\alpha)$$

$$Y_2 = e^{X_2} \quad (\Gamma.4\beta)$$

Από αυτές προκύπτει το σύστημα

$$\begin{cases} y_1 = e^{x_1} \\ y_2 = e^{x_2} \end{cases}$$

Λύνοντας το παραπάνω σύστημα για $y_1, y_2 > 0$ παίρνουμε τη μοναδική λύση

$$x_1 = \ln y_1$$

$$x_2 = \ln y_2$$

Η Ιακωβιανή ορίζουσα του μετασχηματισμού είναι ίση με

$$J(x_1, x_2) = \begin{vmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_1} & \frac{\partial y_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial y_2}{\partial x_1} & \frac{\partial y_2}{\partial x_2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} e^{x_1} & 0 \\ 0 & e^{x_2} \end{vmatrix} \Rightarrow J(x_1, x_2) = e^{x_1} e^{x_2} \quad (\Gamma.5)$$

Συνεπώς η από κοινού σ.π.π. των Y_1, Y_2 προσδιορίζεται ως εξής

$$f_{Y_1, Y_2}(y_1, y_2) = \frac{f_{X_1, X_2}(x_1, x_2)}{|J(x_1, x_2)|} \Rightarrow$$

$$f_{Y_1, Y_2}(y_1, y_2) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot y_1 \cdot y_2 \cdot \sqrt{1 - \rho_n^2}} \exp\left\{-\frac{Q'(y_1, y_2)}{2 \cdot (1 - \rho_n^2)}\right\} \quad (\Gamma.6)$$

όπου

$$Q(y_1, y_2) = \frac{(\ln y_1 - \mu_1)^2}{\sigma_1^2} - 2\rho_n \frac{(\ln y_1 - \mu_1) \cdot (\ln y_2 - \mu_2)}{\sigma_1 \sigma_2} + \frac{(\ln y_2 - \mu_2)^2}{\sigma_2^2} \quad (\Gamma.7)$$

Αν ορισθούν οι εξής παράμετροι

$$\mu_1 = \ln Y_{m1} \quad (\Gamma.8\alpha)$$

$$\mu_2 = \ln Y_{m2} \quad (\Gamma.8\beta)$$

$$\sigma_1 = S_{Y1} \quad (\Gamma.8\gamma)$$

$$\sigma_2 = S_{Y2} \quad (\Gamma.8\delta)$$

τότε η από κοινού σ.π.π. των τ.μ. Y_1, Y_2 εκφράζεται ως εξής

$$f_{Y_1, Y_2}(y_1, y_2) = \frac{1}{2\pi \cdot S_{Y1} \cdot S_{Y2} \cdot y_1 \cdot y_2 \cdot \sqrt{1 - \rho_n^2}} \exp\left\{-\frac{Q'(y_1, y_2)}{2 \cdot (1 - \rho_n^2)}\right\} \quad (\Gamma.9)$$

όπου

$$Q'(y_1, y_2) = \frac{\ln \frac{y_1}{Y_{m1}}}{S_{Y1}^2} - 2 \cdot \rho_n \frac{\ln \frac{y_1}{Y_{m1}} \cdot \ln \frac{y_2}{Y_{m2}}}{S_{Y1} \cdot S_{Y2}} + \frac{\ln \frac{y_2}{Y_{m2}}}{S_{Y2}^2} \quad (\Gamma.10)$$

και $Y_{m1}, Y_{m2}, S_{Y1}, S_{Y2}$ και ρ_n οι παράμετροι της κατανομής.

Γ.2 Ολοκληρώματα δισδιάστατης λογαριθμοκανονικής κατανομής

Έστω ότι οι τ.μ. Y_1, Y_2 ακολουθούν την από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους $Y_{m1}, Y_{m2}, S_{Y1}, S_{Y2}$ και ρ_n . Από τον ορισμό της λογαριθμοκανονικής κατανομής προκύπτει ότι οι τ.μ

$$X_1 = \frac{\ln Y_1 - \ln Y_{m1}}{S_{Y1}} \quad (\Gamma.11\alpha)$$

$$X_2 = \frac{\ln Y_2 - \ln Y_{m2}}{S_{Y2}} \quad (\Gamma.11\beta)$$

έχουν την εξής από κοινού σ.π.π.

$$f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_n^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(x_1^2 - 2\rho_n x_1 x_2 + x_2^2\right)\frac{1}{1-\rho_n^2}\right] \quad (\Gamma.12)$$

Η παραπάνω σ.π.π. μπορεί να εκφραστεί με τη βοήθεια της περιθώριας σ.π.π.

$f_{X_2}(x_2)$ και της υπό συνθήκη σ.π.π. $f_{X_1|X_2}(x_1, x_2)$. Από τη σχέση (Γ.12) προκύπτει

$$\begin{aligned} f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x_2^2}{2}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi(1-\rho_n^2)}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(x_1^2 - 2\rho_n x_1 x_2 + x_2^2\right) + \frac{x_2^2}{2}\right] \Rightarrow \\ f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x_2^2}{2}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi(1-\rho_n^2)}} \cdot \exp\left[-\frac{(x_1 - \rho_n x_2)^2}{2(1-\rho_n^2)}\right] \end{aligned} \quad (\Gamma.13)$$

Ωστόσο, ισχύουν οι εξής σχέσεις

$$f_{X_1}(x_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{2}\right) \equiv N(0,1) \quad (\Gamma.14\alpha)$$

$$f_{X_1|X_2}(x_1, x_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sqrt{1-\rho_n^2}} \exp\left[-\frac{(x_1 - \rho_n x_2)^2}{2(1-\rho_n^2)}\right] \equiv N(\rho_n x_2, \sqrt{1-\rho_n^2}) \quad (\Gamma.14\beta)$$

Οπότε ισχύει

$$f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) = f_{X_1}(x_1) \cdot f_{X_2|X_1}(x_1, x_2) = f_{X_2}(x_2) \cdot f_{X_1|X_2}(x_1, x_2) = f_{X_2, X_1}(x_2, x_1) \quad (\Gamma.15)$$

Ο υπολογισμός της πιθανότητας οποιουδήποτε ενδεχομένου για το ζεύγος των τ.μ. X_1, X_2 που αντιστοιχεί σε ολοκλήρωση της από κοινού σ.π.π. στο χωρίο που καθορίζεται

από το ενδεχόμενο, διευκολύνεται με την εφαρμογή της προηγούμενης ιδιότητας και είναι

$$\begin{aligned}
 P(A_1 < X_1 < B_1, A_2 < X_2 < B_2) &= \int_{A_1}^{B_1} dx_1 \int_{A_2}^{B_2} dx_2 f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) = \\
 &= \int_{A_1}^{B_1} dx_1 f_{X_1}(x_1) \int_{A_2}^{B_2} dx_2 f_{X_2/X_1}(x_1, x_2) = \\
 &= \int_{A_1}^{B_1} dx_1 f_{X_1}(x_1) \frac{1}{2} \cdot \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{A_2 - \rho_n x_1}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{B_2 - \rho_n x_1}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}} \right) \right] = \\
 &= \int_{A_2}^{B_2} dx_2 f_{X_2}(x_2) \int_{A_1}^{B_1} dx_1 f_{X_1/X_2}(x_1, x_2) = \\
 &= \int_{A_2}^{B_2} dx_2 f_{X_2}(x_2) \frac{1}{2} \cdot \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{A_1 - \rho_n x_1}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{B_1 - \rho_n x_1}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{Γ.16}$$

Γ.3 Ροπές δισδιάστατης λογαριθμοκανονικής κατανομής

Έστω ότι οι τ.μ. Y_1, Y_2 ακολουθούν την από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή. Η από κοινού μέση τιμή, ως δευτεροβάθμια ροπή, ορίζεται ως εξής

$$\mu_{11} = E[Y_1 Y_2] = E[e^{X_1 + X_2}] \tag{Γ.17}$$

ενώ οι τ.μ. $X_1 = \ln Y_1, X_2 = \ln Y_2$ ακολουθούν την από κοινού κανονική κατανομή.

Η ροπογεννήτρια συνάρτηση της δισδιάστατης κανονικής κατανομής των τ.μ. X_1, X_2 ισούται με

$$\Phi(s_1, s_2) = E[\exp(s_1 X_1 + s_2 X_2)] \Rightarrow$$

$$\Phi(s_1, s_2) = \exp(\mu_1 s_1 + \mu_2 s_2) \cdot \exp\left(\frac{s_1^2 \sigma_1^2 + 2 \cdot \rho_n \sigma_1 \sigma_2 \cdot s_1 s_2 + s_2^2 \sigma_2^2}{2}\right) \tag{Γ.18}$$

Θέτοντας $s_1 = s_2 = 1$ λαμβάνεται

$$m_{11} = E[\exp(X_1 + X_2)] = \exp(\mu_1 + \mu_2) \cdot \exp\left(\frac{\sigma_1^2 + 2 \cdot \rho_n \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2}{2}\right) \tag{Γ.19}$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (Γ.8) η έκφραση (Γ.19) γίνεται

$$m_{11} = Y_{m1} Y_{m2} \cdot \exp\left(\frac{S_{Y1}^2 + 2 \cdot \rho_n S_{Y1} S_{Y2} + S_{Y2}^2}{2}\right) \quad (\Gamma.20)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης των τ.μ. Y_1, Y_2 υπολογίζεται με βάση τη σχέση

$$\rho_{Y_1 Y_2} = \frac{E[Y_1 \cdot Y_2] - \mu_{Y1} \cdot \mu_{Y2}}{\sigma_{Y1} \cdot \sigma_{Y2}} \quad (\Gamma.21)$$

Αν εισαχθούν στην παραπάνω έκφραση η σχέση (Γ.20) καθώς και οι σχέσεις (B.16) και (B.17) του Παραρτήματος Β προκύπτει

$$\rho_n = \frac{\ln\left[1 + \rho_{Y_1 Y_2} \sqrt{(\exp(S_{Y_1}^2) - 1) \cdot (\exp(S_{Y_2}^2) - 1)}\right]}{S_{Y_1} \cdot S_{Y_2}} \quad (\Gamma.22)$$

η οποία σχέση συνδέει το συντελεστή συσχέτισης ρ_n του κανονικού ζεύγους τ.μ. X_1, X_2 με τον αντίστοιχο $\rho_{Y_1 Y_2}$ του λογαριθμοκανονικού ζεύγους Y_1, Y_2 .

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

Δ.1 Αναγωγή της τρισδιάστατης λογαριθμοκανονικής κατανομής στην τρισδιάστατη κανονική κατανομή

Η τρισδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή προκύπτει από την τρισδιάστατη κανονική κατανομή. Αν οι τ.μ. Y_1, Y_2 και Y_3 ακολουθούν την από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους Y_{mi} , S_{Y_i} ($i=1,2,3$) και εμφανίζουν ανά δύο μεταξύ τους συντελεστές συσχέτισης $\rho_{Y_i Y_j}$ ($i, j = 1,2,3$ $i \neq j$) τότε η τριάδα τ.μ. X_1, X_2 και X_3 που προκύπτει από το μετασχηματισμό

$$X_i = \frac{\ln Y_i - \ln Y_{mi}}{S_{Y_i}} \quad (i=1,2,3) \quad (\Delta.1)$$

Ακολουθεί την από κοινού τρισδιάστατη κανονική κατανομή με παραμέτρους $\mu_i=0$ και $\sigma_i=1$ ($i=1,2,3$) και αντίστοιχους συντελεστές συσχέτισης

$$\rho_{nij} = \frac{\ln \left[1 + \rho_{Y_i Y_j} \sqrt{(\exp(S_{Y_i}^2) - 1) \cdot (\exp(S_{Y_j}^2) - 1)} \right]}{S_{Y_i} \cdot S_{Y_j}} \quad (i, j = 1,2,3 \quad i \neq j) \quad (\Delta.2)$$

Η ισότητα που περιγράφεται στη σχέση (Δ.2) είναι η ίδια με την αντίστοιχη της (Γ.22) του Παραρτήματος Γ.

Αναφορικά, η σ.π.π. της τρισδιάστατης κανονικής κατανομής δίνεται στην ακόλουθη έκφραση

$$f_{X_1, X_2, X_3}(x_1, x_2, x_3) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^3 \cdot D}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \underline{x} \cdot C^{-1} \cdot \underline{x}' \right\} \quad (\Delta.3)$$

όπου

\underline{x} είναι το διάνυσμα γραμμής $\underline{x} = [x_1, x_2, x_3]$,

C ο 3x3 πίνακας συμμεταβλητότητας και

D η ορίζουσα του πίνακα C ($D = \det(C)$).

Δ.2 Ολοκληρώματα τρισδιάστατης λογαριθμοκανονικής κατανομής

Είναι φανερό ότι ο υπολογισμός ολοκληρωμάτων της τρισδιάστατης λογαριθμοκανονικής κατανομής ανάγεται σε υπολογισμό ολοκληρωμάτων της τρισδιάστατης κανονικής κατανομής μέσω του μετασχηματισμού που περιγράφεται από τη σχέση (Δ.1). Στην παρούσα παράγραφο αναπτύσσεται η μεθοδολογία υπολογισμού τριπλού ολοκληρώματος που αντιστοιχεί στην πιθανότητα του ενδεχομένου $\{A_1 < X_1 < B_1, A_2 < X_2 < B_2, A_3 < X_3 < B_3\}$, το οποίο ενδιαφέρει άμεσα την παρούσα εργασία.

Ισχύει

$$P(A_1 < X_1 < B_1, A_2 < X_2 < B_2, A_3 < X_3 < B_3) = \int_{A_1}^{B_1} dx_1 \int_{A_2}^{B_2} dx_2 \int_{A_3}^{B_3} dx_3 f_{X_1, X_2, X_3}(x_1, x_2, x_3) \quad (\Delta.4)$$

Σύμφωνα με το θεώρημα του Bayes ισχύει ότι

$$f_{X_1, X_2, X_3}(x_1, x_2, x_3) = f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) \cdot f_{X_3 / X_1, X_2}(x_1, x_2, x_3) \quad (\Delta.5)$$

Η τελευταία σχέση είναι ανάλογη προς τη (Γ.15) του Παραρτήματος Γ. Η ποσότητα $f_{X_1, X_2}(x_1, x_2)$ είναι η περιθώρια σ.π.π. του ζεύγους των τ.μ. X_1, X_2 και για την οποία ισχύει

$$f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_{n12}^2}} \exp\left[-\frac{x_1^2 + x_2^2 - 2 \cdot \rho_{n12} \cdot x_1 \cdot x_2}{2(1-\rho_{n12}^2)}\right] \quad (\Delta.6)$$

Η ποσότητα $f_{X_3 / X_1, X_2}(x_1, x_2, x_3)$ αποτελεί τη σ.π.π. της δεσμευμένης κατανομής της τ.μ. X_3 με δεδομένες τις τ.μ. X_1 και X_2 , η οποία είναι κανονική με τύπο

$$f_{X_3 / X_1, X_2}(x_1, x_2, x_3) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{3/1,2}} \exp\left[-\frac{(x_3 - \mu_{3/1,2})^2}{2 \cdot \sigma_{3/1,2}^2}\right] \quad (\Delta.7)$$

και παραμέτρους

$$\mu_{3/1,2} = E[X_3 / X_1 = x_1, X_2 = x_2] \quad (: \text{μέση τιμή}) \quad (\Delta.8)$$

$$\sigma_{3/1,2}^2 = Var[X_3 / X_1 = x_1, X_2 = x_2] \quad (: \text{διασπορά}) \quad (\Delta.9)$$

Όπως αποδεικνύεται στην [29], τα μεγέθη $\mu_{3/1,2}$ και $\sigma_{3/1,2}$ δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις

$$\mu_{3/1,2} = \frac{\rho_{n_{13}} - \rho_{n_{12}}\rho_{n_{23}}}{1 - \rho_{n_{12}}^2} x_1 + \frac{\rho_{n_{23}} - \rho_{n_{12}}\rho_{n_{13}}}{1 - \rho_{n_{12}}^2} x_2 \quad (\Delta.10\alpha)$$

$$\sigma_{3/1,2} = \left(\frac{1 - \rho_{n_{12}}^2 - \rho_{n_{13}}^2 - \rho_{n_{23}}^2 + 2\rho_{n_{12}}\rho_{n_{13}}\rho_{n_{23}}}{1 - \rho_{n_{12}}^2} \right)^{1/2} \quad (\Delta.10\beta)$$

Με εισαγωγή των σχέσεων (Δ.5),(Δ.6) και (Δ.7) καθώς και των (Δ.10) στη σχέση (Δ.4) προκύπτει ότι

$$\begin{aligned} P(A_1 < X_1 < B_1, A_2 < X_2 < B_2, A_3 < X_3 < B_3) = \\ \int_{A_1}^{B_1} dx_1 \int_{A_2}^{B_2} dx_2 f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) \int_{A_3}^{B_3} dx_3 f_{X_3 / X_1, X_2}(x_1, x_2, x_3) = \\ \int_{A_1}^{B_1} dx_1 \int_{A_2}^{B_2} dx_2 f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{A_3 - \mu_{3/1,2}}{\sqrt{2}\sigma_{3/1,2}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{B_3 - \mu_{3/1,2}}{\sqrt{2}\sigma_{3/1,2}} \right) \right] \end{aligned} \quad (\Delta.11)$$

Από την τελευταία σχέση διαπιστώνεται ότι ο υπολογισμός του τριπλού ολοκληρώματος ανάγεται τελικά σε υπολογισμό διπλού ολοκληρώματος, γεγονός που απλοποιεί σημαντικά τη διαδικασία υπολογισμού της πιθανότητας του ενδεχομένου $\{A_1 < X_1 < B_1, A_2 < X_2 < B_2, A_3 < X_3 < B_3\}$.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ

ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

E.1 Χάρτες βροχής (Rainmaps)

Ο διεθνής τηλεπικοινωνιακός οργανισμός ITU-R πολύ πρόσφατα πρότεινε ένα μοντέλο για να μπορεί να παράγει κανείς το ρυθμό βροχόπτωσης που υπερβαίνεται για ένα δεδομένο ποσοστό του συνολικού χρόνου για μια δεδομένη τοποθεσία [ITU-R, P.837-3]. Ως εκ τούτου προτάθηκαν οι λεγόμενοι χάρτες βροχής (rainmaps), στους οποίους θεωρείται ότι η Γη έχει χωριστεί σε τετραγωνάκια με εμβαδόν $1.5^\circ \times 1.5^\circ$. Το πλέγμα του γεωγραφικού πλάτους (latitude) είναι από $+90^\circ$ North έως -90° South με βήμα 1.5° ενώ το πλέγμα του γεωγραφικού μήκους (longitude) είναι 0° έως 360° με το ίδιο βήμα. Για κάθε ένα από αυτά τα σημεία παρουσιάζονται τιμές για ορισμένες παραμέτρους οι οποίες αναφέρονται σε 15 χρόνια δεδομένων του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μέσης Κλίμακας Πρόγνωσης Καιρικών Συνθηκών (European Center of Medium-range Weather Forecast, ECMWF) και παρέχονται με μορφή αρχείων κειμένου. Οι παράμετροι οι οποίοι χρησιμοποιούνται είναι:

$P_{r6}(\%)$: πιθανότητα υπέρβασης εξάωρων βροχερών περιόδων

M_C (mm): ετήσιο ποσό βροχόπτωσης τύπου συνεκτικών βροχοπυρήνων (convective-type rain)

M_S (mm): ετήσιο ποσό βροχόπτωσης στρωσιγενούς τύπου (stratiform-type rain)

Τα αρχεία αυτά παρέχονται από την Ευρωπαϊκή Διαστημική Ένωση (European Space Agency, ESA) και έχουν τις ονομασίες *ESARAINPR6.TXT*, *ESARAIN_MC.TXT* και *ESARAIN_MS.TXT*.

Ο υπολογισμός του ρυθμού βροχόπτωσης που υπερβαίνεται για ένα δεδομένο ποσοστό του συνολικού χρόνου για μια δεδομένη τοποθεσία γίνεται με τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1^ο: Υπολογισμός των παραμέτρων P_{r6} , M_C και M_S για τέσσερα σημεία των οποίων οι γεωγραφικές συντεταγμένες είναι οι πιο κοντινές στις γεωγραφικές συντεταγμένες της επιθυμητή τοποθεσίας.

Βήμα 2^ο: Από τις παραπάνω τιμές στα τέσσερα σημεία του πλέγματος με δι-γραμμική παρεμβολή (bi-linear interpolation) υπολογίζονται οι τιμές $P_{r6}(Lat, Lon)$, $M_C(Lat, Lon)$ και $M_S(Lat, Lon)$.

Βήμα 3^ο: Υπολογίζεται η πιθανότητα ύπαρξης βροχής P_0 από τον τύπο

$$P_0(Lat, Lon) = P_{r6}(Lat, Lon) \cdot \left(1 - e^{-0.0117 \cdot M_S(Lat, Lon) / P_{r6}(Lat, Lon)}\right) \quad (E.1)$$

Εάν το αποτέλεσμα της διαδικασίας δεν προσδιορίζεται, η πιθανότητα ύπαρξης βροχής $P_0(Lat, Lon)$ είναι ισοδύναμη με το μηδέν. Σε αυτή την περίπτωση ολοκληρώνεται η διαδικασία.

Βήμα 4^ο: Υπολογίζεται ο ρυθμός βροχόπτωσης R_p χρησιμοποιώντας την πιθανότητα ύπαρξης βροχής P_0 , που δίνεται από τη σχέση (E.1), ως εξής

$$R_p(Lat, Lon) = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (E.2)$$

όπου

$$A = ab \quad (E.3)$$

$$B = a + c \cdot \ln(p / P_0(Lat, Lon)) \quad (E.4)$$

$$C = \ln(p / P_0(Lat, Lon)) \quad (E.5)$$

και

$$\left. \begin{aligned} a &= 1.11 \\ b &= \frac{(M_c(Lat, Lon) + M_s(Lat, Lon))}{22932 \cdot P} \\ c &= 31.5b \end{aligned} \right\} \quad (E.6)$$

Σημειώνεται ότι η τιμή R_p αντιπροσωπεύει εκείνο το ρυθμό βροχόπτωσης ο οποίος υπερβαίνεται με πιθανότητα $p\%$ του ολικού χρόνου αναφοράς.

E.1.2 Υπολογισμός παραμέτρων λογαριθμοκανονικής κατανομής από πειραματικά δεδομένα

Τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για τις κατανομές των στοχαστικών μεγεθών R (ρυθμός βροχόπτωσης) ή A (απόσβεση λόγω βροχής ενός συστήματος απλής λήψης) βρίσκονται υπό μορφή αντιστοιχών ζευγών x_i, P_i ($i = 1, 2, \dots, n$), όπου x_i η τιμή του μεγέθους και P_i η πιθανότητα υπέρβασης της τιμής αυτής. Στην περίπτωση του ρυθμού βροχόπτωσης, με την βοήθεια των χαρτών βροχής υπάρχει για κάθε πιθανότητα υπέρβασης μια στάθμη ρυθμού βροχόπτωσης, για κάθε επιθυμητή περιοχή. Αυτό το γεγονός αντικαθιστά την ανάγκη τοπικών πειραματικών δεδομένων, που φυσικά αν είναι διαθέσιμα είναι πιο αξιόπιστα όπως επίσης και τα μοντέλα που προκύπτουν βάσει αυτών. Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία με την οποία υπολογίζονται οι παράμετροι της κατανομής της υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχής ή του ρυθμού βροχόπτωσης για την περίπτωση που ακολουθείται η λογαριθμοκανονική κατανομή.

Στην περίπτωση αυτή, για κάθε τιμή της πιθανότητας P_i υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή u_i της ανηγμένης κανονικής μεταβλητής U από τη σχέση

$$u_i = \sqrt{2} \cdot \operatorname{erfc}^{-1}(2 \cdot P_i) \quad (E.7)$$

Όμως, ισχύει

$$u_i = \frac{\ln(x_i) - \ln(X_m)}{S_X} \quad (\text{E.8})$$

ή

$$u_i = A \cdot z_i + B \quad (\text{E.9})$$

όπου

$$z_i = \ln x_i \quad (\text{E.10})$$

$$A = 1/S_X \quad (\text{E.11})$$

$$B = -\ln X_m / S_X \quad (\text{E.12})$$

δηλαδή τα u_i και z_i συνδέονται με γραμμική σχέση. Επομένως με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προσδιορίζονται εύκολα οι συντελεστές γραμμικής παλινδρόμησης A και B και από αυτούς οι παράμετροι S_X και X_m .

E.2 Κλιματικές ζώνες

Σε προηγούμενο στάδιο, ο ITU-R είχε προτείνει τις κλιματικές ζώνες, όπου ανάλογα με τα κλιματικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής η Γη χωρίζεται σε κλιματικές περιοχές, στο εύρος των οποίων η βροχή παρουσιάζει όμοια στατιστική συμπεριφορά. Στον πίνακα E.1 δίνεται ο κατά ITU-R διαχωρισμός της γης σε κλιματικές ζώνες καθώς και οι αντίστοιχοι παράμετροι της λογαριθμοκανονικής κατανομής της έντασης βροχόπτωσης R που τις χαρακτηρίζουν.

Κλιματική Ζώνη	R_m	S_r
A	2.1830E-03	2.096000
B	1.5650E-02	1.694000
C	2.0460E-02	1.712000
D	6.9270E-02	1.467000
E	8.4000E-03	2.040000
F	2.7200E-02	1.810000
G	6.8400E-02	1.596000
H	2.8490E-02	1.825000
K	1.6740E-02	2.020000
L	1.7630E-02	2.113500
M	4.9650E-02	1.867755
N	4.3900E-02	2.018000
P	8.1330E-02	2.000500
Q	1.3415E-01	1.856800

Πίνακας E.1: Κλιματικές ζώνες και παράμετροι λογαριθμοκανονικής κατανομής τ.μ. R

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Leonid G. Kazovsky, Giok-Djan Khoe, and M. Oskar van Deventer, "Future Telecommunications Networks: Major Trend Projections," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 36, no.11, Nov. 1998, pp. 122-127.
- [2] Geng-Sheng Kuo, "Telecommunications Industry Markets: Vision and Potential," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 36, no. 11, Nov. 1998, pp. 95-96.
- [3] Ιάκωβος Στ. Βενιέρης, "Δίκτυα Ευρείας Ζώνης", Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.
- [4] Fred Halsall, "Multimedia Communications; Applications, Networks, Protocols and Standards", Pearson Education Limited, 2001.
- [5] Milan Jankovic, and Zoran Petrovic, "Provision of Multimedia Services: The key to Deployment of Access Network Architectures in Developing Countries," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 36, no. 11, Nov. 1998, pp. 106-113.
- [6] DSL Tutorial (www.tcom.auth.gr/isdn/technologies/dsl-tutorial.html)
- [7] Ηρακλής Αβραμόπουλος, "Φωτονική Τεχνολογία για Τηλεπικοινωνίες", Έκδοση Ε.Μ.Π., 2001.
- [8] Α. Ατλάσης, Α. Ζάκος, Φ. Λαζαράκης, Μ. Λάμπρου, Ζ. Λιούπας, Ι. Ρουσσάκης, Ε. Πρωτονοτάριος, "Ποιοτική και ποσοτική ανάλυση της αναμενόμενης ανάπτυξης τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών στην Ελλάδα", Εργαστήριο Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων, Ε.Μ.Π., 1999.
- [9] J.Thorton, D.Grace, C.Spillard, T.Konefal and T.C.Tozer, "Broadband communications from a high-altitude platform: the European Helinet programme", *Electronics & Communication Engineering Journal*, pp. 138-144, June 2001.
- [10] T.C.Tozer and D.Grace, "High-altitude platforms for wireless communications", *Electronics & Communication Engineering Journal*, pp. 127-137, June 2001.
- [11] Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων, Ε.Ε.Τ.Τ. (www.eett.gr).
- [12] Local Multipoint Distribution System (LMDS), International Engineering Consortium, 2001 (www.iec.org).
- [13] Clint Smith, "LMDS", McGraw-Hill Professional Telecom, 2000.

- [14] Doug Gray, “WW Spectrum Allocations for BWA”, Lucent Technologies, 1999.
- [15] Vinod Tipparaju, “Local Multipoint Distribution Service (LMDS)”, Survey Paper, 2000.
- [16] ETSI EN 301 215-2 V1.3.1 (2002-06) “Fixed Radio Systems; Point-to-Multipoint Antennas; Antennas for point-to-multipoint fixed radio systems in the 11GHz to 60GHz band; Part 2: 24GHz to 30GHz”.
- [17] Μ.Ε. Θεολόγου, “Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών”, Έκδοση Ε.Μ.Π., 2002.
- [18] Χ. Καυάλης, Π. Κωττής, “Δορυφορικές Επικοινωνίες”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.
- [19] Νικόλαος Μήτρου, “Ψηφιακές Επικοινωνίες – Σημειώσεις”, Έκδοση Ε.Μ.Π., 2002.
- [20] Ana Bolea Alamañac, Michel Bousquet, “Millimetre-Wave Radio Systems: Guidelines on Propagation Modelling and Impairment Mitigation Techniques Research Needs”, Propagation Impairment Mitigation for Millimetre Wave Radio Systems, COST Action 280, 1st International Workshop, 2002.
- [21] Ι.Δ. Κανελλόπουλος, “Σχεδίαση Μικροκυματικών Ζεύξεων”, Έκδοση ΕΠΙΣΕΥ, 1999.
- [22] I.S. Usman, M.J. Willis and R.J. Watson, “Route Diversity Analysis And Modelling For Millimetre Wave Point To Multi-Point Systems”, Propagation Impairment Mitigation for Millimetre Wave Radio Systems, COST Action 280, 1st International Workshop, 2002.
- [23] Gamantyo Hendratoro, Robert J.C. Bultitude and David D. Falconer, “Use of Cell-Site Diversity in Millimetric-Wave Fixed Cellular Systems to Combat the Effects of Rain Attenuation”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 20, No. 3, April 2002.
- [24] Athanasios D. Panagopoulos and John D. Kanellopoulos, “Cell-Site Diversity Performance of Millimeter-Wave Fixed Cellular Systems Operating at Frequencies Above 20 GHz”, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 1, 2002.
- [25] A.D. Panagopoulos, P.-D.M. Arapoglou, G.E. Chatzarakis, J.D. Kanellopoulos and P.G. Cottis, “LMDS Diversity Systems: A New Performance Model

- Incorporating Stratified Rain”, accepted in IEEE Communication Letters, July 2004.
- [26] Athanasios D. Panagopoulos, John D. Kanellopoulos, “A Simple Model for Orbital Diversity Gain on Earth-Space Propagation Paths”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 51, No. 6, June 2003.
- [27] Csaba Sinka and János Bitó, “Site Diversity Against Rain Fading in LMDS Systems”, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 13, No. 8, August 2003.
- [28] Csaba Sinka, Borisláv Lakatos and János Bitó, “The Effects of Moving Rain Cell Over LMDS Systems”, Propagation Impairment Mitigation for Millimetre Wave Radio Systems, COST Action 280, 1st International Workshop, 2002.
- [29] Σπυρίδων Ν. Λιβιεράτος, “Ανάλυση παρεμβολών σε δορυφορικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα απλής/πολλαπλής λήψης παρουσία διαλείψεων βροχής”, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π., 1997.