



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΙΩΑΝΝΗ ΦΑΣΣΑ

Επιβλέπων : Αθανάσιος Παναγόπουλος

Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ
ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΙΩΑΝΝΗ ΦΑΣΣΑ

Επιβλέπων : Αθανάσιος Παναγόπουλος

Λέκτορας ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

Ιουλίου 2012

.....

.....

.....

Α. Παναγόπουλος

Ι. Κανελλόπουλος

Φ. Κωνσταντίνου

Λέκτορας ΕΜΠ

Καθηγητής ΕΜΠ

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2012

.....
Ιωάννης Φάσσας

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

Copyright © Ιωάννης Φάσσας, 2012.
δικαιώματος. All rights reserved.

Με επιφύλαξη παντός

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 πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Λέκτορα κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο που με εμπιστεύτηκε αναθέτοντας μου την παρούσα προπτυχιακή διπλωματική εργασία, καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά την εκπόνησή της.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερές μου ευχαριστίες στον υποψήφιο Διδάκτορα του ΕΜΠ, Χ. Κουρόγιωργα, για την αμέριστη συμβολή του στην εξέλιξη και περαίωση της διπλωματικής μου εργασίας. Η συνεργασία μας και η σωστή καθοδήγησή του υπήρξαν καθοριστικοί παράγοντες στην επίτευξη αυτού του αποτελέσματος.

Ακόμη, η συμπαράσταση και η βοήθεια, σε αρκετές περιπτώσεις, των φίλων μου υπήρξαν καθοριστικές στην πορεία της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να σταθώ στην πολύτιμη βοήθεια δύο φίλων μου, της Μ. Ψυχογιού και του Ν. Μαριγούδη.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου για την υποστήριξη, έμπρακτη και ψυχολογική, που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	10
ABSTRACT	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ	14
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
1.2 ΔΟΜΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	15
1.3 ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ.....	18
1.3.1 Απόσβεση από αέρια της ατμόσφαιρας.....	20
1.3.2 Εξασθένηση λόγω νεφώσεων και ομίχλης	26
1.3.3 Τροποσφαιρικοί σπινθηρισμοί	34
1.3.4 Απόσβεση λόγω βροχής	39
1.3.5 Συνολική εξασθένηση	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΝΤΙΜΕΤΡΑ ΔΙΑΛΕΙΨΕΩΝ (FADE MITIGATION TECHNIQUES).....	52
2.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ EIRP	55
2.1.1 Έλεγχος Ισχύος Άνω Ζεύξης.....	56
2.1.2 Έλεγχος Ισχύος Κάτω Ζεύξης.....	57
2.1.3 Διαμόρφωση Κατευθυνόμενης Δέσμης.....	58
2.2 ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ.....	59
2.2.1 Ιεραρχημένη Κωδικοποίηση.....	59
2.2.2 Ιεραρχημένη Διαμόρφωση	61
2.2.3 Ελάττωση Ρυθμού Μετάδοσης.....	64
2.3 ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ	64
2.3.1 Site Diversity	65
2.3.2 Orbital Diversity.....	68
2.3.3 Frequency Diversity	69
2.3.4 Time Diversity.....	69
2.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ / ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΘΕ FMT	70
2.5 ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ FMT	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ TERABIT/s.....	76
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	76
3.2 ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ & ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ	80
3.3 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	81
3.4 ΑΣΥΡΜΑΤΟ ΚΑΝΑΛΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	82

3.5 ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ	83
3.6 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	86
3.7 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ SMART GATEWAYS ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ.....	86
3.8 ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ ΑΠΟ ΓΕΙΤΟΝΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ	88
3.9 ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ TERABIT/s ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: SMART GATEWAYS ΣΤΗ Q/V ΖΩΝΗ	94
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	94
4.2 UB-NGateways σχεδίαση.....	96
4.2.1 Μεταπομπή στη UB-NGateways σχεδίαση.....	98
4.2.1.1 Εντοπισμός Απωλειών Στη Ζεύξη.....	98
4.2.2.2 Λήψη Απόφασης Για Μεταπομπή.....	99
4.2.2.3 Εκτέλεση Μεταπομπής.....	99
4.2.2 Εκτίμηση Διαθεσιμότητας στη UB-NGateways σχεδίαση.....	100
4.2.2.1 ΣΕΝΑΡΙΟ 1: Όλοι οι συνδεδεμένοι μεταξύ τους	102
4.2.2.2 ΣΕΝΑΡΙΟ 2: Ύπαρξη Clusters	104
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ	110
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΚΩΔΙΚΑΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ	116

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Δορυφορικό σύστημα επικοινωνιών.....	16
Εικόνα 2: Δορυφορικές τροχιές.....	17
Εικόνα 3: Δορυφορική ζεύξη που υφίσταται απώλειες.....	18
Εικόνα 4: Η διαδρομή που ακολουθεί το σήμα διαμέσου των διαφορετικών στρωμάτων της ατμόσφαιρας	20
Εικόνα 5: Εξασθένηση λόγω απορρόφησης από αέρια στην ατμόσφαιρα με γωνία ανύψωσης 90° μοιρών για μηδενική και κανονική πυκνότητα νερού.	24
Εικόνα 6: Εξασθένηση λόγω απορρόφησης από αέρια στην ατμόσφαιρα για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης.....	25
Εικόνα 7: Συντελεστής ειδικής εξασθένησης για διαφορετικές θερμοκρασίες.....	28
Εικόνα 8: Χάρτης περιεκτικότητας νερού L σε όλη τη γη για πιθανότητα υπέρβασης 0.1%. Ο οριζόντιος άξονας είναι το γεωγραφικό μήκος και ο κατακόρυφος το γεωμετρικό πλάτος ...	29
Εικόνα 9: Χάρτης περιεκτικότητας νερού L σε όλη τη γη για πιθανότητα υπέρβασης 5%. Ο οριζόντιος άξονας είναι το γεωγραφικό μήκος και ο κατακόρυφος το γεωμετρικό πλάτος. ..	29
Εικόνα 10: Εξασθένηση λόγω νεφώσεων για διαφορετικές θερμοκρασίες και για γωνία ανύψωσης 10°.....	30
Εικόνα 11: Εξασθένηση λόγω νεφώσεων για διαφορετικές θερμοκρασίες και για γωνία ανύψωσης 30°	31
Εικόνα 12: Εξασθένηση λόγω νεφώσεων για διαφορετικές θερμοκρασίες και λειτουργία στα 50 GHz	31
Εικόνα 13: Εξασθένηση λόγω νεφώσεων για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας.....	32
Εικόνα 14: Εξασθένηση λόγω νεφώσεων για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης.	33
Εικόνα 15: Εξασθένηση λόγω νεφώσεων σε διαφορετικές περιοχές.....	34
Εικόνα 16: Εξασθένηση εξαιτίας τροποσφαιρικών σπινθηρισμών για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας σε περιοχή με ωκεάνιο κλίμα όπως η Γερμανία.....	36
Εικόνα 17: Εξασθένηση εξαιτίας τροποσφαιρικών σπινθηρισμών για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας σε περιοχή στη τροπική ζώνη, όπως η Βραζιλία.....	37
Εικόνα 18: Εξασθένηση εξαιτίας τροποσφαιρικών σπινθηρισμών για διάφορες γωνίες ανύψωσης	38
Εικόνα 19: Εξασθένηση εξαιτίας τροποσφαιρικών σπινθηρισμών για διαφορετικές διαμέτρους.....	39
Εικόνα 20: Σχηματική παρουσίαση του μονοπατιού μεταξύ Γης και δορυφόρου δοθέντων των αναγκαίων παραμέτρων για τον υπολογισμό της απόσβεσης	40

Εικόνα 21: Εξασθένηση λόγω βροχής για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας σε περιοχή με ωκεάνειο κλίμα.....	43
Εικόνα 22: Εξασθένηση λόγω βροχής για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας σε περιοχή με τροπικό κλίμα	43
Εικόνα 23: Εξασθένηση λόγω βροχής για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας σε περιοχή με μεσογειακό κλίμα.	44
Εικόνα 24: Εξασθένηση λόγω βροχής για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης.	45
Εικόνα 25: Συνολική εξασθένηση για διάφορες γωνίες ανύψωσης.....	47
Εικόνα 26: Συνολική εξασθένηση για διάφορες συχνότητες λειτουργίας	48
Εικόνα 27: Συνολική εξασθένηση για διάφορες περιοχές.....	48
Εικόνα 28: Συνολική εξασθένηση για διάφορες διαμέτρους κεραιών των σταθμών βάσης..	49
Εικόνα 29: Συνολική εξασθένηση για διάφορες θερμοκρασίες	50
Εικόνα 30: Βρόχος ελέγχου για την πρόβλεψη των διαλείψεων.....	54
Εικόνα 31: Χαρακτηριστική εισόδου-εξόδου ενισχυτή	57
Εικόνα 32: Σύγκριση τριών διαφορετικών σχημάτων διαμόρφωσης για δορυφορική ζεύξη καθόδου που λειτουργεί στα 20 GHz στην Αθήνα.....	63
Εικόνα 33: Γεωμετρία σχήματος διπλής διαφορικής λήψης θέσης.....	66
Εικόνα 34: Εξάρτηση του δείκτη συσχέτισης των διαλείψεων.....	66
Εικόνα 35: Σύγκριση τριών διαφορετικών site diversity συστημάτων για δορυφορική ζεύξη καθόδου που λειτουργεί στη Ka ζώνη στην Αθήνα	67
Εικόνα 36: Γεωμετρία σχήματος διπλής διαφορικής λήψης τροχιάς.....	68
Εικόνα 37: Εξάρτηση του δείκτη συσχέτισης των διαλείψεων σε σχέση με την γωνιακή απόσταση των δορυφόρων	69
Εικόνα 38: Αρχιτεκτονική πλαίσιο στο ACTS.....	72
Εικόνα 39: Περιοχή κάλυψης από δορυφορικό σύστημα α) με μία ακτίνα β) με πολλαπλές ακτίνες (multi beam)και επαναχρησιμοποίηση συχνότητας	77
Εικόνα 40: Σύστημα πολλαπλών ακτίνων με επαχρησιμοποίηση συχνότητας.....	83
Εικόνα 41: 175 ακτίνες προς τερματικά χρηστών.....	84
Εικόνα 42: 88 ακτίνες με διπλή πόλωση προς τερματικά χρηστών	85
Εικόνα 43: 19 ακτίνες με διπλή πόλωση προς σταθμούς βάσης	85
Εικόνα 44: Smart Gateways	87

Εικόνα 45: UB-NGateways σχεδίαση	95
Εικόνα 46: UB-Gateway σχεδίαση.....	95
Εικόνα 47: UB-NGateways σχεδίαση όταν ένας gateway έχει απώλειες.	96
Εικόνα 48: Κάθε ακτίνα εξυπηρετείται από διαφορετικό cluster.....	97
Εικόνα 49: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής της ρυθμοαπόδοσης για διαφορετικές πιθανότητες διακοπής λειτουργίας	102
Εικόνα 50: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής της ρυθμοαπόδοσης για πιθανότητα διακοπής λειτουργίας 10% και για διαφορετικά clusters.....	105
Εικόνα 51: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής της ρυθμοαπόδοσης για πιθανότητα διακοπής λειτουργίας 5% και για διαφορετικά clusters.....	106
Εικόνα 52: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής της ρυθμοαπόδοσης για πιθανότητα διακοπής λειτουργίας 2% και για διαφορετικά clusters.....	106

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Ζώνες συχνοτήτων.....	17
Πίνακας 2: Σύγκριση των διαφόρων μεθόδων FMT βασισμένη στα συμπεράσματα του COST 255.....	71
Πίνακας 3: Παράμετροι κυματομορφής.....	81
Πίνακας 4: Συνολική εξασθένηση για διάφορες περιοχές.....	104

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι να γίνει μία πρώτη εκτίμηση της ρυθμοαπόδοσης και της διαθεσιμότητας δορυφορικών δικτύων νέας γενιάς σε συνθήκες ατμοσφαιρικών διαλείψεων. Η νέα γενιά δορυφορικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων θα λειτουργεί στην Q/V ζώνη συχνοτήτων και θα χαρακτηρίζεται από χωρητικότητα που θα φτάνει τα Terabit/s. Ωστόσο η υλοποίηση των συστημάτων αυτών, είναι προς το παρόν ανέφικτη εξαιτίας των πολύ υψηλών διαλείψεων στη Q/V ζώνη σε σχέση με τις Ku και Ka ζώνες που χρησιμοποιούνται σήμερα. Οι σύγχρονες τεχνικές άμβλυνσης των διαλείψεων δεν αρκούν και αναζητούνται νέοι τρόποι αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος. Οι Smart Gateways αρχιτεκτονικές, η διασύνδεση και η επικοινωνία δηλαδή, ήδη εγκατεστημένων σταθμών βάσης μέσω ενός κοινού επίγειου δικτύου, φαίνεται πως είναι η λύση.

Στα πλαίσια της εργασίας συνοψίζονται τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα που επικρατούν κατά τη διάδοση του σήματος. Μέσω της υλοποίησης των μοντέλων της Διεθνούς Τηλεπικοινωνιακής Ένωσης (International Telecommunication Union - ITU) υπολογίζεται ξεχωριστά η εξασθένηση που οφείλεται στη βροχή, στην απορρόφηση από τα αέρια της ατμόσφαιρας, στα σύννεφα και στην ομίχλη και στους σπινθηρισμούς και έπειτα υπολογίζεται η συνολική εξασθένηση του σήματος λόγω συνύπαρξης των προαναφερθέντων φαινομένων διάδοσης. Στη συνέχεια αναφέρονται οι τεχνικές άμβλυνσης των διαλείψεων. Γίνεται αναφορά στα Δορυφορικά Συστήματα χωρητικότητας της τάξης των Terabit/s και στα βασικά χαρακτηριστικά τους, όπως αυτά προκύπτουν από απλουστεύσεις και γενικές θεωρήσεις. Παρουσιάζεται μία Smart Gateways αρχιτεκτονική, η UB-NGateways και εκτιμάται η ρυθμοαπόδοση και η διαθεσιμότητα που προσφέρει για δύο διαφορετικά σενάρια λειτουργίας. Το συμπέρασμα που εξάγεται είναι πως τα δορυφορικά συστήματα χωρητικότητας Terabit/s αν και προσφέρουν περισσότερα πλεονεκτήματα από τα επίγεια ασύρματα συστήματα, επιπλέον έρευνες με αντικείμενα μελέτης, τη προσαρμοστική κωδικοποίηση και διαμόρφωση στις ζώνες συχνοτήτων Ka και πάνω, C/I του συστήματος, τα Smart Gateways και τις απαιτήσεις ισχύος στον δορυφόρο είναι απαραίτητες, ώστε τα συστήματα αυτά να αποτελέσουν πραγματικότητα. Τέλος η διπλωματική ολοκληρώνεται με τη παράθεση του κώδικα, βάση του οποίου έγινε η εκτίμηση της ρυθμοαπόδοσης και της διαθεσιμότητας της UB-NGateways αρχιτεκτονικής.

Λέξεις – κλειδιά:

Δορυφορικά συστήματα νέας γενιάς, ατμοσφαιρικά φαινόμενα διάδοσης, εξασθένηση σήματος, FMTs, συστήματα Terabit, Smart Gateways, απόδοση δορυφορικού συστήματος, διαθεσιμότητα δορυφορικού συστήματος.

ABSTRACT

This thesis aims to make a first estimation of the performance and availability of the new generation of satellite networks under atmospheric fading. The new generation of satellite communication systems will operate in the Q/V band and will be characterized by a capacity of Terabit/s. However, the implementation of these systems is currently impossible due to the higher fading in Q/V band than that at the Ku and Ka bands which are currently used. Modern fade mitigation techniques are not enough and new ways to solve this problem are required. The Smart Gateways architecture, i.e the interconnection and communication of already installed base stations through a shared terrestrial network, seems to be the solution.

This thesis summarizes the prevailing atmospheric phenomena during the signal propagation. By the implementation of the models of International Telecommunication Union (ITU) the attenuation due to rain, gaseous absorption, clouds and scintillation and afterwards the total signal attenuation due to the coexistence of these phenomena are calculated. Thereafter, the fade mitigation techniques are presented. In addition, the Satellite Systems capacity of Terabit/s and their key characteristics, as they arise from general considerations and simplifications are referred. Moreover, this paper studies a Smart Gateways architecture, the UB-NGateways, and estimates its performance and availability when two different scenarios of function are implemented. It is concluded that even though satellite systems with a capacity of Terabit/s offer advantages over terrestrial wireless systems, additional research on adaptive coding and modulation at frequency bands Ka and above, C/I system, Smart Gateways and power requirements on the satellite is necessary, so that these systems can become a reality. Finally, the paper presents the code which is used in order to estimate the performance and availability of the UB-NGateways architecture.

Keywords:

New Generation of Satellite systems, atmospheric propagation phenomena, signal Attenuation, FMTs, Terabit systems, Smart Gateways, throughput of the satellite system, availability of the satellite system

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών αποτελούν την λύση στην ανάγκη για ασύρματες επικοινωνίες σε πολύ μεγάλες αποστάσεις όπου επικρατούν οι περιορισμοί που οφείλονται στην καμπυλότητα της Γης. Μία πρώτη προσπάθεια για την αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών ήταν με τη διάδοση κυμάτων συχνότητας από 1 έως 300 MHz. Η μέθοδος αξιοποιούσε την ανάκλαση των κυμάτων στην ιονόσφαιρα και επικράτησε μέχρι την υλοποίηση των δορυφορικών συστημάτων.

Οι γεωστατικοί δορυφόροι που χρησιμοποιούνται σήμερα για την παροχή τηλεοπτικών υπηρεσιών ξεκίνησαν σαν ιδέα του Arthur Clarke [1]. Τον Οκτώβριο του 1945 δημοσίευσε στις σελίδες του περιοδικού Wireless World ένα άρθρο που ανέφερε πως είναι δυνατό να επιτευχθεί παγκόσμια επικοινωνία μέσω γεωστατικών δορυφόρων. Κατά τον Clarke τρεις γεωστατικοί δορυφόροι ήταν αρκετοί για να καλύψουν τις επικοινωνιακές απαιτήσεις ολόκληρου του πλανήτη γη

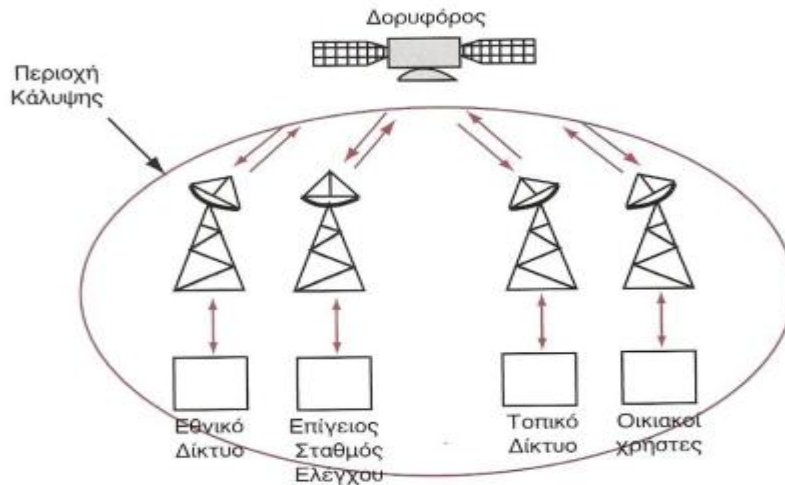
Ο Β' Παγκόσμιος Πόλεμος ευνόησε την ανάπτυξη δύο πολύ ξεχωριστών τεχνολογιών των πυραύλων και των μικροκυμάτων. Οι τεχνολογίες αυτές έκαναν δυνατή την τοποθέτηση διαστημικών συσκευών σε τροχιά καθώς και η εφεύρεση του transistor που αντικατέστησε τις βαριές και ογκώδεις λυχνίες που χρησιμοποιούνταν μέχρι τότε στους ενισχυτές και σε άλλα ηλεκτρονικά συστήματα [2]. Η γνώση που αποκτήθηκε από τη συνδυασμένη χρήση αυτών των δύο τεχνολογιών εγκαινίασε και την εποχή των δορυφορικών επικοινωνιών. Η υλοποίηση των δορυφορικών επικοινωνιών πραγματοποιήθηκε για τις ανάγκες του ψυχρού πολέμου. Έτσι η διαστημική εποχή άρχισε το 1957 με την εκτόξευση του πρώτου τεχνητού δορυφόρου (Sputnik) που εκτόξευσε η πρώην ΕΣΣΔ. Ο πρώτος τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος ήταν ο Telstar, ο οποίος τέθηκε σε τροχιά το 1962 και χρησιμοποιείται για τις τηλεφωνικές ζεύξεις μεταξύ Αμερικής και Ευρώπης. Ο δορυφόρος αυτός λειτουργούσε σαν παθητικός επαναλήπτης, δηλαδή απλά επανεξέπεμπε το λαμβανόμενο σήμα και μετέπειτα προστέθηκαν δυνατότητες για επεξεργασία του σήματος όπως ενίσχυση και αλλαγή φέρουσας συχνότητας.

Αρχικά οι τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι χρησιμοποιούνται για διηπειρωτικές τηλεφωνικές ζεύξεις, κυρίως μεταξύ Βορείου Αμερικής και Ευρώπης ή και για τηλεφωνικές ζεύξεις στην ίδια ήπειρο [2]. Αργότερα όμως και με τη διάδοση του internet το εύρος των υπηρεσιών που προσφέρουν αυξήθηκε. Ανάμεσα στις υπηρεσίες αυτές είναι κινητή τηλεφωνία, τηλεοπτική κάλυψη ευρείας περιοχής - DBS (Direct Broadcasting Satellite- Απευθείας Δορυφορική Εκπομπή), συστήματα ναυσιπλοΐας (GPS) (Global Positioning Systems - Συστήματα Παγκοσμίου Εντοπισμού), Teletext (Τηλε-κείμενο), Facsimile (FAX), Electronic mail (Email (Ηλεκτρονικό Ταχυδρομείο)), Teleconferencing (Τηλεδιασκέψεις) και επικοινωνίες σε πλοία και αεροσκάφη [1].

Η θέσπιση κανονισμών και προδιαγραφών για θέματα που αφορούν δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών γίνεται από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union – ITU).

1.2 ΔΟΜΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Ένα σύστημα δορυφορικών επικοινωνιών αποτελείται από δύο τμήματα, το επίγειο και το δορυφορικό τμήμα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1 [3]. Οι επίγειοι σταθμοί βάσης, που εξυπηρετούν τους χρήστες και εκπέμπουν ή λαμβάνουν σήματα, αποτελούν το επίγειο τμήμα του συστήματος και ο δορυφόρος και ο επίγειος σταθμός ελέγχου του δορυφόρου αποτελούν το δορυφορικό. Επιπρόσθετα ως ζεύξη ανόδου/uplink ορίζεται η ζεύξη από τον επίγειο σταθμό προς τον δορυφόρο και η αντίστροφη ζεύξη ονομάζεται ζεύξη καθόδου/downlink.

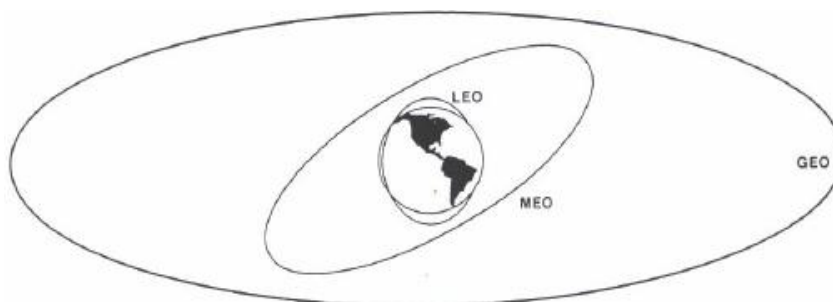


Εικόνα 1: Δορυφορικό σύστημα επικοινωνιών

Ο επίγειος σταθμός ενισχύει το σήμα και το στέλνει στο δορυφόρο. Αφού το σήμα υποστεί κάποιες απώλειες εξαιτίας της διάδοσής του μέσω της ατμόσφαιρας φτάνει τελικά στον δορυφόρο. Με τη σειρά του ο δορυφόρος επεξεργάζεται το σήμα, του αλλάζει φέρουσα συχνότητα, ώστε να μην έχουμε παρεμβολή του σήματος ανόδου και του σήματος καθόδου, και το στέλνει ενισχυμένο στο δέκτη.

Δύο κατηγορίες των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων είναι οι γεωστατικοί και οι γεωσύγχρονοι. Γεωσύγχρονος είναι εκείνος ο δορυφόρος που περιστρέφεται σε ύψος περίπου 37,786 Km πάνω από τη Γη, έχει την ίδια περίοδο περιστροφής, δηλαδή $T=23\text{h } 56\text{min } 4,1\text{sec}$, και επόμενος η γωνιακή του ταχύτητα ταυτίζεται με αυτήν της Γης, είναι δηλαδή 3075 m/s [3]. Επίσης σε ένα γεωσύγχρονο δορυφόρο τόσο η κλίση, όσο και η εκκεντρότητα της γεωσύγχρονης τροχιάς μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή. Ο γεωστατικός δορυφόρος είναι ένας γεωσύγχρονος δορυφόρος του οποίου η τροχιά έχει μηδενική εκκεντρότητα και κλίση [3]. Επομένως, ο δορυφόρος GEO βρίσκεται σε τροχιά πάνω από τον ισημερινό και φαίνεται ακίνητος από ένα παρατηρητή που βρίσκεται στην επιφάνεια της γης. Αν και θεωρητικά οι γεωστατικοί δορυφόροι έχουν μηδενική κλίση στην πραγματικότητα αυτό δεν ισχύει. Παρουσιάζουν μια μικρή κλίση που οφείλεται σε φαινόμενα έλξης από τον ήλιο ή από την σελήνη, γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει γωνία κλίσης αρκετών μοιρών κατά τη διάρκεια ενός έτους. Για το λόγο αυτό η τροχιά του δορυφόρου διορθώνεται περιοδικά ώστε να παραμένει στο ισημερινό επίπεδο.

Επιπλέον οι τροχιές των γεωστατικών δορυφόρων δεν είναι αποκλειστικά οι γεοσύγχρονες αλλά υπάρχουν οι Μεσαίες και οι Χαμηλές τροχιές. Ως Μεσαίες (Medium Earth Orbits, MEO) ορίζουμε τις τροχιές το ύψος των οποίων κυμαίνεται στα 5000-12000Km με κλίση περίπου 50° ως προς το επίπεδο που διέρχεται από τον ισημερινό. Ως Χαμηλές (Low Earth Orbits, LEO) ορίζουμε τις τροχιές το ύψος των οποίων είναι μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα (500-900Km) και η κλίση τους συνήθως είναι περίπου 90° ως προς το επίπεδο που διέρχεται από τον ισημερινό. Η εικόνα 2 [2] απεικονίζει όλες τις δορυφορικές τροχιές των GEO δορυφόρων.



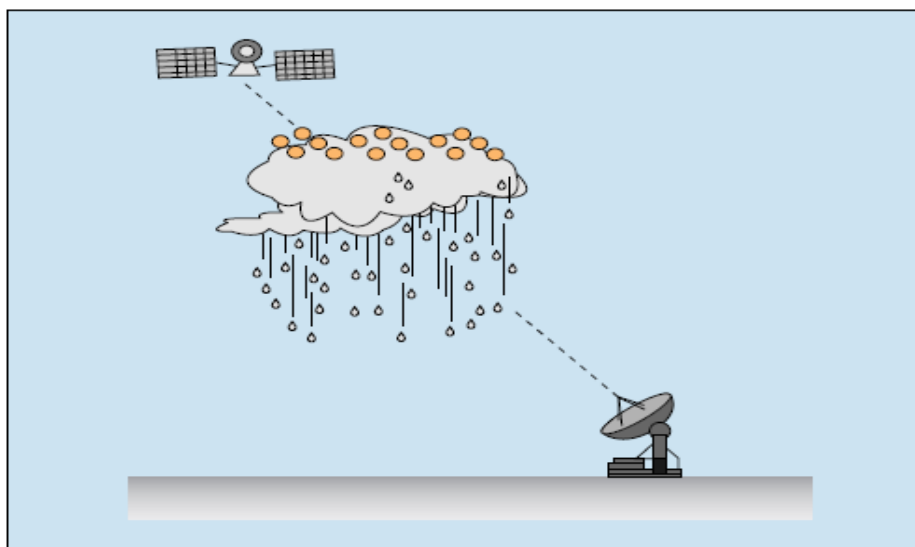
Εικόνα 2: Δορυφορικές τροχιές

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ολοένα και υψηλότερη ζήτηση για δορυφορικές υπηρεσίες που να ικανοποιούν τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες για διαύλους με αυξημένη χωρητικότητα. Αυτό, σε συνδυασμό με τη φασματική συμφόρηση στις ζώνες συχνοτήτων κάτω των 10 GHz καθιστά απαραίτητη την αξιοποίηση των υψηλότερων ζωνών. Ο πίνακας 1 [4] παρουσιάζει τις ζώνες συχνοτήτων που λειτουργούν ή θα λειτουργούν τα δορυφορικά συστήματα .

Ku Band	12 με 18 GHz
K Band	18 με 26.5 GHz
Ka Band	26.5 με 40 GHz
Q Band	30 με 50 GHz
V Band	50 με 75 GHz

Πίνακας 1: Ζώνες συχνοτήτων

Προτού επεκταθώ στα Fade Mitigation Techniques (FMTs), θα αναφέρω επιγραμματικά τα φαινόμενα διάδοσης που προκαλούν προβλήματα στη δορυφορική ζεύξη. Η κύρια αιτία των διαλείψεων στα δορυφορικά συστήματα είναι τα φαινόμενα διάδοσης (Εικόνα 3 [5]) στην ατμόσφαιρα και τα διακρίνουμε σε δύο κατηγορίες, τα ιονοσφαιρικά και τα τροποσφαιρικά. Επειδή όμως ενδιαφερόμαστε για συστήματα που λειτουργούν σε συχνότητες μεγαλύτερες των 10 GHz δίνουμε βαρύτητα στα τροποσφαιρικά.



Εικόνα 3: Δορυφορική ζεύξη που υφίσταται απώλειες

1.3 ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

Τα τροποσφαιρικά φαινόμενα τα οποία επηρεάζουν την απόδοση της ζεύξης μπορούν να συνοψιστούν ως εξής [5]:

-Εξασθένιση λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων. Στις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις συμπεριλαμβάνονται κυρίως η βροχή, το χαλάζι και το χιόνι. Παρόλα αυτά στις συχνότητες τις οποίες μελετάμε, τον κυριότερο λόγο απόσβεσης της ισχύος του σήματος προκαλείται από τη βροχή.

-Απορρόφηση από τα αέρια της ατμόσφαιρας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα μόρια του οξυγόνου και οι υδρατμοί απορροφούν την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια με αποτέλεσμα να αποσβέννει η ισχύς του σήματος.

-*Απόσβεση λόγω νεφών.* Τα σύννεφα και η ομίχλη προκαλούν απώλεια ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος λόγω των σωματιδίων του νερού που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα.

-*Σπινθηρισμοί λόγω τροποσφαιρικών στροβιλισμών.* Οι στροβιλισμοί που προκαλούνται στην ατμόσφαιρα έχουν ως αποτέλεσμα τη γρήγορη χρονική και χωρική μεταβολή του δείκτη διάθλασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον σπινθηρισμό της ισχύς του σήματος.

- *Εξασθένηση από το στρώμα τήξης του πάγου.* Ως στρώμα τήξης ορίζεται η περιοχή, η οποία βρίσκεται σε συγκεκριμένο υψόμετρο και στην οποία το χιόνι και οι παγοκρύσταλλοι μετατρέπονται σε σταγόνες βροχής. Η εξασθένηση αυτή είναι υπολογίσιμη σε περιπτώσεις όπου έχουμε ελαφρές βροχοπτώσεις και η γωνία ανύψωσης είναι μικρή.

- *Αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου.* Όλοι οι παράγοντες που προκαλούν την εξασθένηση του σήματος προκαλούν και αύξηση της ακτινοβολίας θορύβου. Επομένως όσο υψηλότερη εξασθένηση έχουμε τόσο μεγαλύτερη είναι και η ακτινοβολία θορύβου.

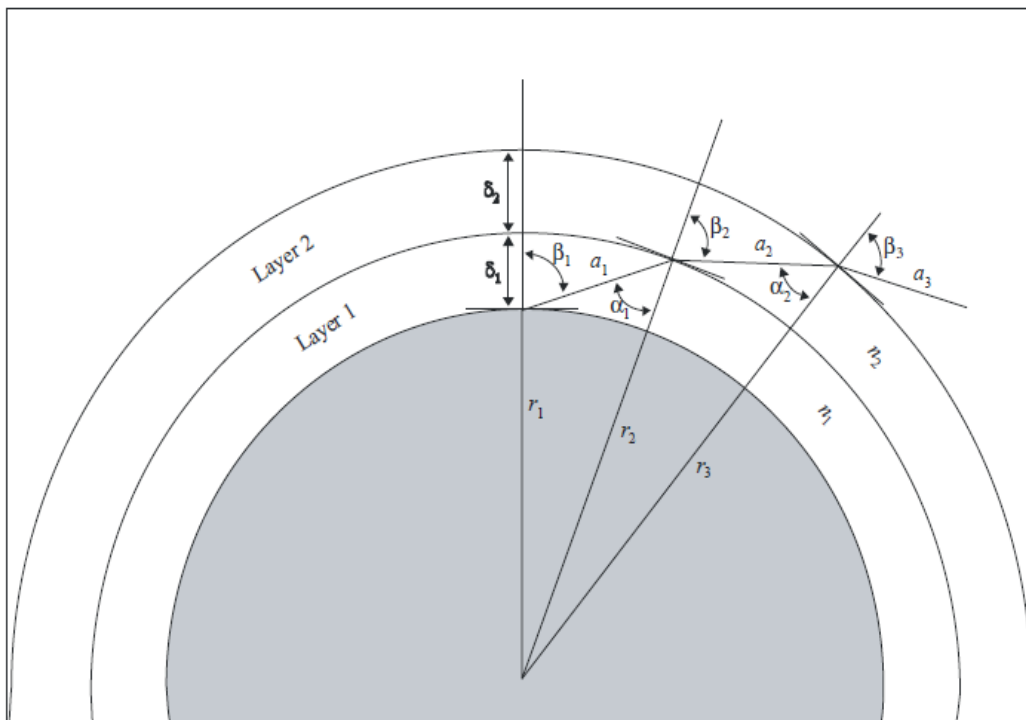
- *Αποπόλωση,* οφείλεται στη διαφορική απόσβεση και διαφορική ολίσθησης φάσης που προκαλούνται από μη σφαιρικούς σκεδαστές όπως οι σταγόνες βροχής και οι παγοκρύσταλλοι και επηρεάζει σημαντικά συστήματα επαναχρησιμοποίησης συχνότητας που χρησιμοποιούν δύο ορθογώνιες πολώσεις.

Έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για τον υπολογισμό των επιδράσεων της ατμόσφαιρας στην ισχύ του σήματος και για την πρόβλεψη των απωλειών αυτής. Παρόλα αυτά τα περισσότερα μοντέλα δεν έχουν εξετασθεί με μετρήσεις για συχνότητες άνω των 30 GHz, που μας ενδιαφέρουν, Στη συνέχεια θεωρούμε πως τα κύρια φαινόμενα διάδοσης που επικρατούν και προκαλούν απώλειες είναι η βροχή, η απορρόφηση από τα αέρια της ατμόσφαιρας, οι σπινθηρισμοί, τα σύννεφα και η ομίχλη τα οποία και αναλύονται. Επιπλέον, τα μοντέλα των συστάσεων της Διεθνούς Τηλεπικοινωνιακής Ένωσης υλοποιούνται σε κώδικα.

1.3.1 Απόσβεση από αέρια της ατμόσφαιρας

Η εξασθένηση του σήματος οφείλεται στην απορρόφηση από το οξυγόνο και τους υδρατμούς. Αν και για συχνότητες κάτω των 30 GHz η εξασθένηση αυτή δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική σε σύγκριση με την εξασθένηση λόγω βροχής, σε υψηλότερες συχνότητες αποτελεί την πλέον καθοριστική συνιστώσα της συνολικής εξασθένησης. Η ITU (International Telecommunication Union) στην 676-9 σύστασή της [6] παραθέτει μία μέθοδο για τον υπολογισμό της εξασθένησης από τα αέρια της ατμόσφαιρας.

Η μέθοδος αυτή θεωρεί ότι η ατμόσφαιρα αποτελείται από στρώματα, όπου κάθε στρώμα έχει διαφορετική θερμοκρασία, διαφορετική ατμοσφαιρική πίεση, διαφορετική υγρασία και επιπλέον χαρακτηρίζεται από μία γραμμή συντονισμού για το οξυγόνο και τους υδρατμούς αντίστοιχα. Οι διαφορετικές τιμές στα μεγέθη αυτά σημαίνουν ότι ο δείκτης διάθλασης και η απορρόφηση σε κάθε στρώμα διαφέρουν και επομένως είναι διαφορετικό και το μήκος της διαδρομής που θα ακολουθήσει το σήμα και η εξασθένηση που υφίσταται (εικόνα 4 [6]). Για την εύρεση της συνολικής εξασθένησης κατά μήκος της δορυφορικής ζεύξης, η μέθοδος υπολογίζει το άθροισμα των απωλειών σε κάθε στρώμα.



Εικόνα 4: Η διαδρομή που ακολουθεί το σήμα διαμέσου των διαφορετικών στρωμάτων της ατμόσφαιρας.

Η συνολική εξασθένηση λόγω των αερίων στην ατμόσφαιρα δίνεται από τον ακόλουθο τύπο.

$$A_G = \sum_{n=1}^k a_n \gamma_n \quad (1)$$

Όπου γ_n : συντελεστής εξασθένησης λόγω αερίων στο n στρώμα.

a_n : το μήκος της διαδρομής (km) που θα διανύσει το σήμα στο n στρώμα.

Ο συντελεστής εξασθένησης υπολογίζεται με βάση το τύπο:

$$\gamma = 0.1820 f N''(f) \quad \text{dB/} \quad (2)$$

Όπου f : συχνότητα λειτουργίας (GHz)

Το φανταστικό μέρος της σύνθετης διαθλαστικότητας $N''(f)$ υπολογίζεται ως εξής:

$$N''(f) = \sum_i S_i F_i + N''_D(f) \quad (3)$$

Τα S_i και F_i σχετίζονται με την ισχύ και τη μορφή της I γραμμής συντονισμού και υπολογίζονται σύμφωνα με τους εξής τύπους:

$$S_i = a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp[a_2(1-\theta)] \quad \text{για οξυγόνο} \quad (4)$$

$$S_i = b_1 \times 10^{-1} e \theta^{3.5} \exp[b_2(1-\theta)] \quad \text{για υδρατμούς} \quad (5)$$

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right] \quad (6)$$

Όπου

p : ατμοσφαιρική πίεση χωρίς ύπαρξη υδρατμών (hPa)

e : πίεση αποκλειστικά από υδρατμούς (hpa) (συνολική ατμοσφαιρική

πίεση $pot = p + e$)

$\theta = 300/T$

T : θερμοκρασία (K)

f_i : η συχνότητα στη I γραμμή

Δf : το εύρος της I γραμμής

$$e = \frac{\rho T}{216.7} = \frac{\rho}{(7.223 \cdot \theta) \cdot 10} \quad \text{hpa} \quad (7)$$

$$\Delta f = a_3 \times 10^{-4} \left(p\theta^{(0.8-\alpha_4)} + 1.1e\theta \right) \quad \text{για οξυγόνο} \quad (8)$$

$$\Delta f = b_3 \times 10^{-4} \left(p\theta^{b_4} + b_5 e\theta^{b_6} \right) \quad \text{για υδρατμούς} \quad (9)$$

Αν συνυπολογίσουμε και το φαινόμενο Doppler τότε το εύρος διαφοροποιείται ως εξής:

$$\Delta f = \sqrt{\Delta f^2 + 2.25 \times 10^{-6}} \quad \text{για οξυγόνο} \quad (10)$$

$$\Delta f = 0.535\Delta f + \sqrt{0.217\Delta f^2 + \frac{2.1316 \times 10^{-12} f_i^2}{\theta}} \quad \text{για υδρατμούς} \quad (11)$$

Το δ είναι ένας συντελεστής διόρθωσης ο οποίος προκύπτει εξαιτίας φαινομένων παρεμβολής στις γραμμές οξυγόνου.

$$\delta = (\alpha_5 + \alpha_6 \theta) \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0.8} \quad \text{για οξυγόνο} \quad (12)$$

$$\delta = 0 \quad \text{για υδρατμούς} \quad (13)$$

Οι φασματικοί συντελεστές $if, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ και b_6 που αναφέρονται στους προηγούμενους τύπους λαμβάνονται από πίνακες που δίνονται στη σύσταση.

Στη σχέση (3) υπάρχει και ο όρος $N_D''(f)$ ο οποίος αφορά την εξασθένηση που προκύπτει από το άζωτο στην ατμόσφαιρα για συχνότητες μεγαλύτερες των 100 GHz και τη μη συντονισμένη απορρόφηση από το οξυγόνο για συχνότητες μικρότερες των 10 GHz και υπολογίζεται ως εξής.

$$N_D''(f) = fp\theta^2 \left[\frac{6.14 \times 10^{-5}}{d \left[1 + \left(\frac{f}{d} \right)^2 \right]} + \frac{1.4 \times 10^{-12} p\theta^{1.5}}{1 + 1.9 \times 10^{-5} f^{1.5}} \right] \quad (14)$$

όπου

$$d = 5.6 \times 10^{-4} (p + e)\theta^{0.8} \quad (15)$$

Η απόσταση που διανύει το σήμα στο n στρώμα υπολογίζεται με τον τύπο:

$$a_n = -r_n \cos \beta_n + \frac{1}{2} \sqrt{4r_n^2 \cos^2 \beta_n + 8r_n \delta_n + 4\delta_n^2} \quad (16)$$

Οι γωνίες α_n και β_{n+1} απεικονίζονται και στην εικόνα 4. Η α_n είναι η γωνία υπό την οποία φτάνει το σήμα στο $n+1$ στρώμα και η β_{n+1} είναι η γωνία υπό την οποία ξεκινά το σήμα στο $n+1$ στρώμα. Ο υπολογισμός τους γίνεται με βάση τους ακόλουθους τύπους.

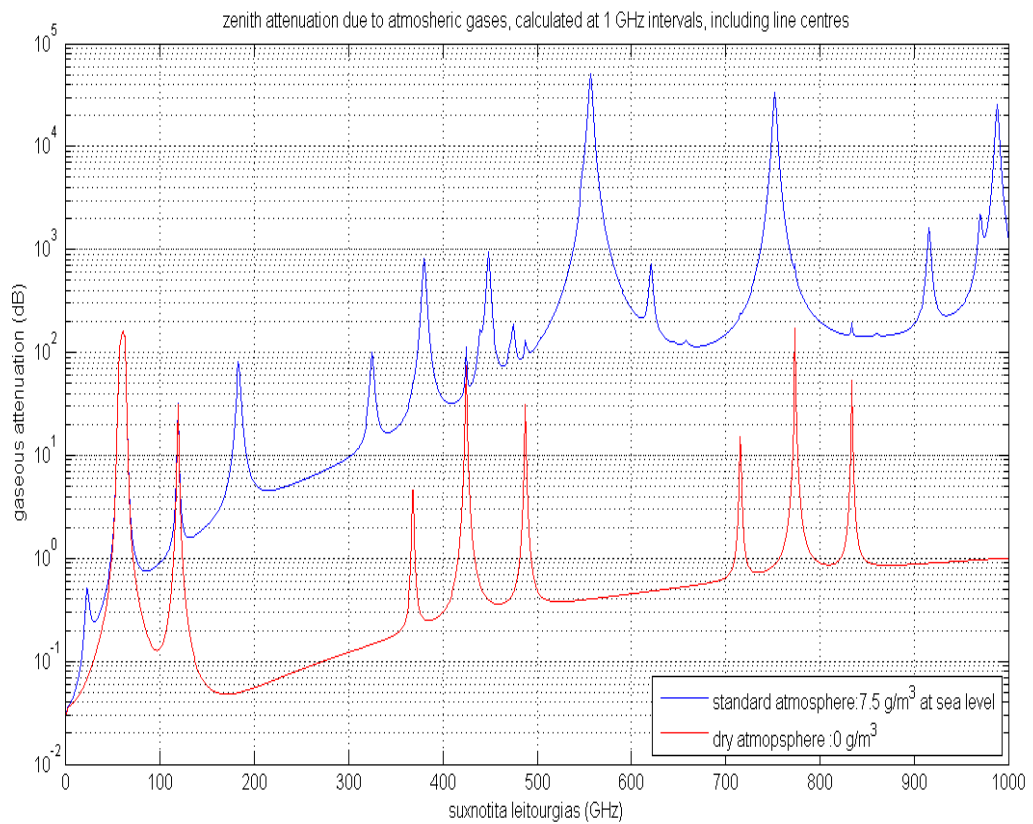
$$\alpha_n = \pi - \arccos \left(\frac{-a_n^2 - 2r_n \delta_n - \delta_n^2}{2a_n r_n + 2a_n \delta_n} \right) \quad (17)$$

$$\beta_{n+1} = \arcsin\left(\frac{n_n}{n_{n+1}} \sin(\alpha_n)\right) \quad (18)$$

Όπου n_n : ο δείκτης διάθλασης στο n στρώμα

r_n : η απόσταση του n στρώματος από το κέντρο της γης

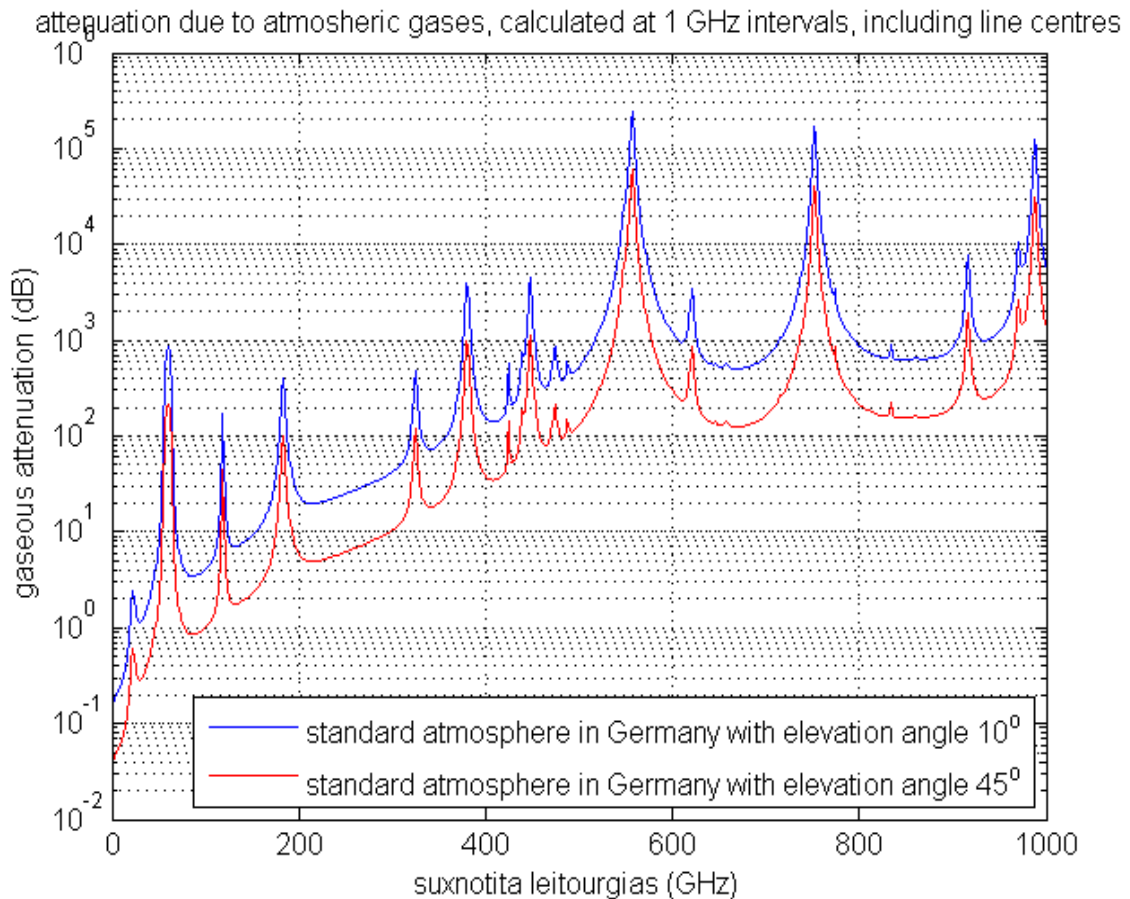
δ_n : το πάχος του n στρώματος



Εικόνα 5: Εξασθένιση λόγω απορρόφησης από αέρια στην ατμόσφαιρα με γωνία ανύψωσης 90° μοιρών για μηδενική και κανονική πυκνότητα νερού.

Στην εικόνα αυτή παρατηρούμε αυτό που αναφέραμε αρχικά, δηλαδή ότι μέχρι τα 30 GHz περίπου οι διαλείψεις λόγω απορρόφησης από αέρια στην ατμόσφαιρα είναι πολύ μικρές και ουσιαστικά άνευ σημασίας. Από τα 30 GHz και πάνω βλέπουμε να αυξάνονται σημαντικά και μάλιστα στα 60 GHz ξεπερνούν τα 100 dB είτε έχουμε υδρατμούς στην ατμόσφαιρα είτε όχι. Η απορρόφηση σε αυτή τη

συχνότητα οφείλεται αποκλειστικά στο οξυγόνο κάτι που παρουσιάζεται και στα 120 και στα 430 GHz ενώ υπάρχουν και άλλες συχνότητες που η απορρόφηση από το οξυγόνο είναι μεγαλύτερη από την απορρόφηση από τους υδρατμούς. Ωστόσο όσο προχωράμε προς μεγαλύτερες συχνότητες είναι εμφανές ,από τη σύγκριση των δύο καμπυλών, ότι οι υδρατμοί είναι ο καθοριστικός παράγοντας της εξασθένηση του σήματος. Στα 550 GHz για παράδειγμα βλέπουμε ότι η διαφορά ανάμεσα στην εξασθένηση όταν έχουμε υδρατμούς και όταν δεν έχουμε είναι της τάξης των 10^4 dB.



Εικόνα 6: Εξασθένηση λόγω απορρόφησης από αέρια στην ατμόσφαιρα για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης.

Όπως παρατηρούμε από την παραπάνω εικόνα οι αλλαγές στη γωνία ανύψωσης έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην εξασθένηση τόσο για συχνότητες μεγαλύτερες από 200 GHz όσο και για συχνότητες στη V ζώνη. Χαρακτηριστικά βλέπουμε πως στα 60 GHz η απόσβεση για γωνία ανύψωσης 45° είναι 200 dB και για γωνία ανύψωσης 10° η απόσβεση τετραπλασιάζεται.

1.3.2 Εξασθένηση λόγω νεφώσεων και ομίχλης

Οι διαλείψεις στο σήμα που προκαλούν τα σύννεφα και η ομίχλη οφείλονται στο νερό που εμπεριέχουν. Σε συστήματα που λειτουργούν σε συχνότητες αρκετά πάνω από τα 10 GHz ή έχουν μικρή διαθεσιμότητα η εξασθένηση αυτή πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη. Για να εκτιμήσουμε την απόσβεση εξαιτίας νεφώσεων και ομίχλης χρησιμοποιούμε τη μέθοδο που προτείνει η ITU-R 840-5 σύσταση [7]. Για συχνότητες μέχρι 200 GHz το μοντέλο Rayleigh εκφράζει επιτυχώς την εξασθένηση ανά χωρητικότητα νερού ανά μονάδα. Η ειδική εξασθένηση ορίζεται από τον τύπο:

$$\gamma_c = K_l M \text{ dB/km} \quad (19)$$

Όπου γ_c : ειδική εξασθένηση (dB/km) μέσα στο σύννεφο.

K_l : συντελεστής ειδικής εξασθένησης $((\text{dB/km})/(\text{g/m}^3))$

M : πυκνότητα νερού στο σύννεφο ή στην ομίχλη. (g/m^3)

Για τον υπολογισμό του K_l μέχρι και για συχνότητες που φτάνουν τα 1000 GHz χρησιμοποιούμε τον τύπο:

$$K_l = \frac{0.819 f}{\varepsilon''(1+n^2)} ((\text{dB/km})/(\text{g/m}^3)) \quad (20)$$

όπου f : συχνότητα λειτουργίας

ε'' : διηλεκτρική σταθερά του νερού

$$\text{και } n = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''} \quad (21)$$

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f \left[1 + (f/f_p)^2 \right]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s \left[1 + (f/f_s)^2 \right]} \quad (22)$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{\left[1 + (f/f_p)^2 \right]} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\left[1 + (f/f_s)^2 \right]} + \varepsilon_2 \quad (23)$$

στις σχέσεις αυτές όπου: $\varepsilon_0 = 77.6 + 103.3(\theta - 1)$ (24)

$$\varepsilon_1 = 5.48 \quad (25)$$

$$\varepsilon_2 = 3.51 \quad (26)$$

$$\theta = 300/T \quad (27)$$

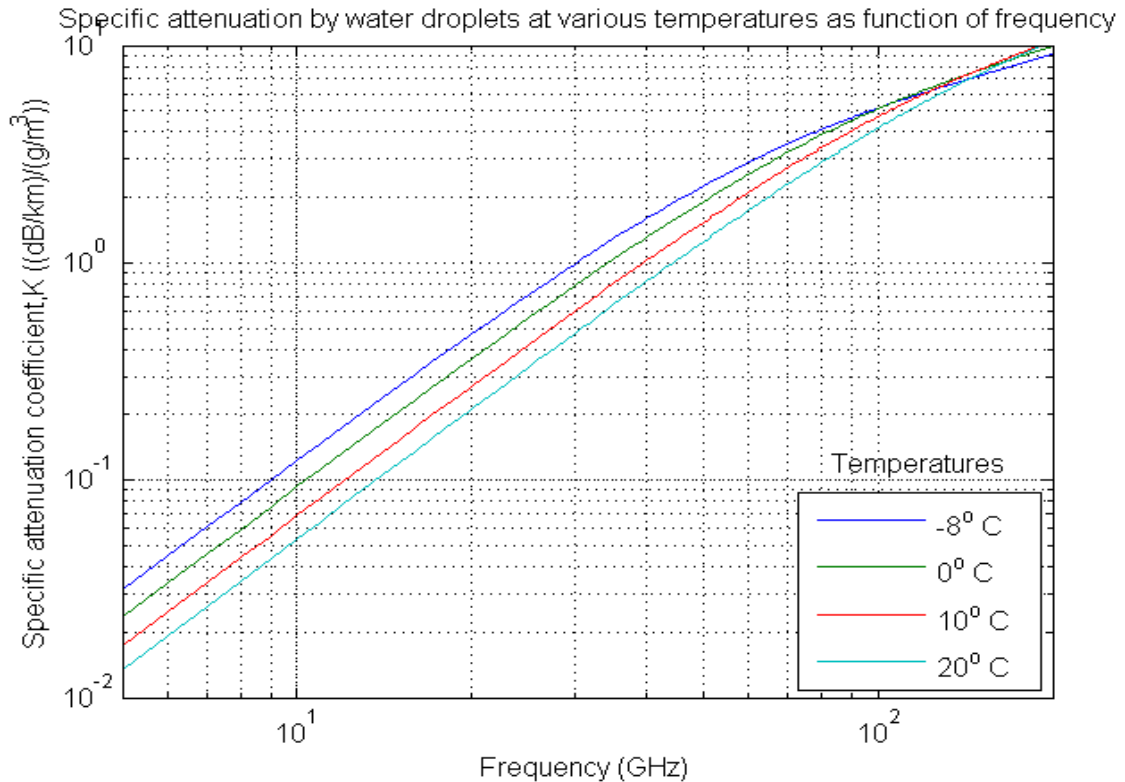
όπου T είναι η θερμοκρασία σε Kelvin.

και για τις κύριες και δευτερεύουσες συχνότητες χαλάρωσης ισχύουν:

$$f_p = 20.09 - 142(\theta - 1) + 294(\theta - 1)^2 \quad \text{GHz} \quad (28)$$

$$f_s = 590 - 1500(\theta - 1) \quad \text{GHz} \quad (29)$$

Οι τιμές του συντελεστή ειδικής απόσβεσης για συχνότητες από 5 μέχρι 200 GHz και για θερμοκρασίες από -8°C έως 20°C φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 7: Συντελεστής ειδικής εξασθένησης για διαφορετικές θερμοκρασίες

Όπως βλέπουμε από την εικόνα 7, συντελεστής ειδικής εξασθένησης είναι μεγαλύτερος στις χαμηλές θερμοκρασίες επομένως αναμένουμε και η εξασθένηση να είναι μεγαλύτερη όταν έχουμε χαμηλές θερμοκρασίες.

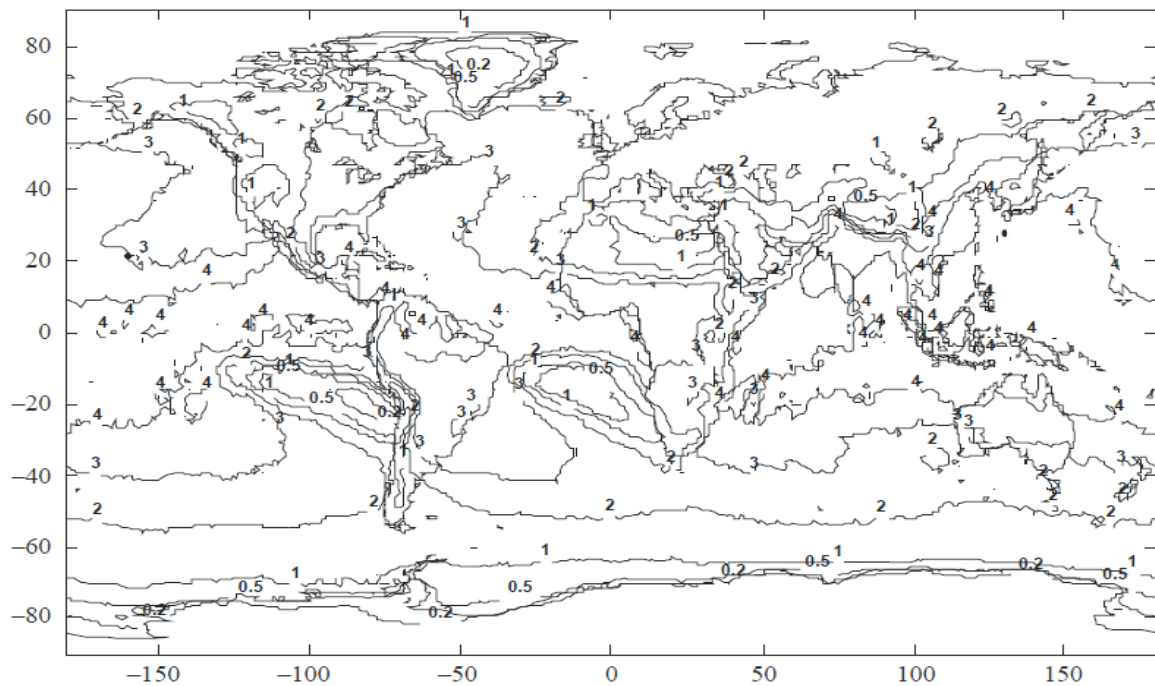
Για συγκεκριμένη πιθανότητα υπέρβασης η εξασθένηση υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$A_c = \frac{LK_l}{\sin \varphi} \quad \text{για} \quad 90^\circ \geq \varphi \geq 5^\circ \quad (30)$$

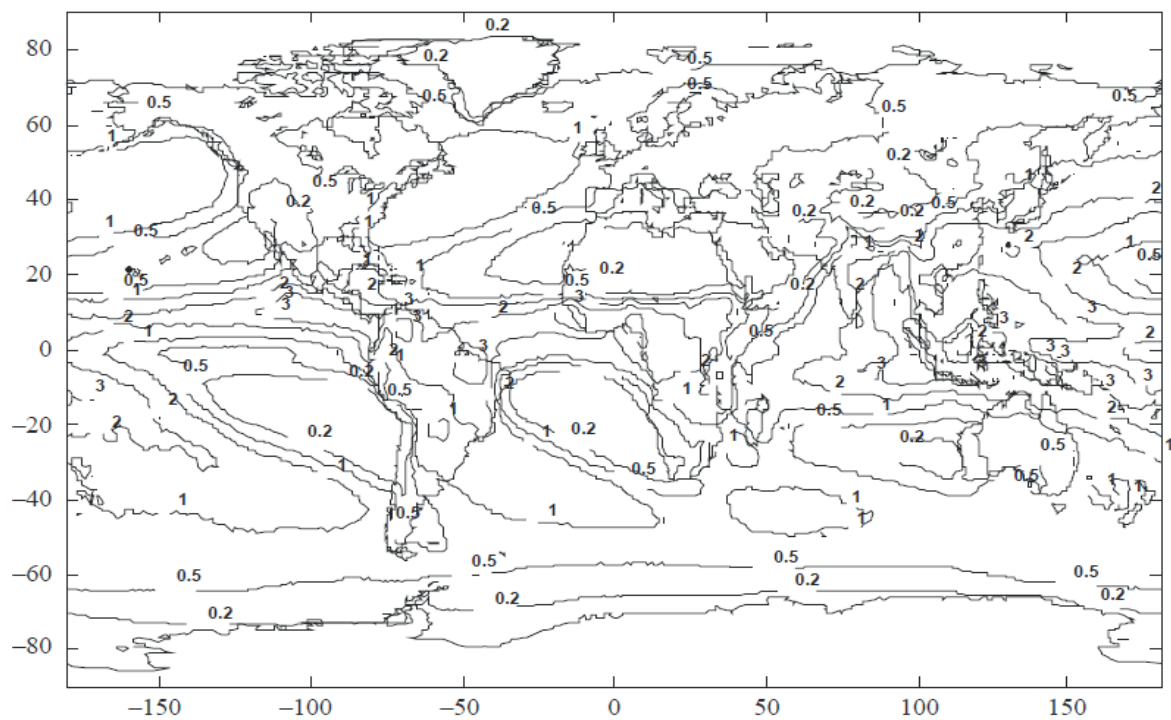
, όπου φ η γωνία ανύψωσης της ζεύξης.

Παρατηρούμε ότι για τον υπολογισμό της απόσβεσης λόγω νεφών και ομίχλης, πρέπει να γνωρίζουμε τα στατιστικά στοιχεία που αφορούν τη συνολική περιεκτικότητα L σε νερό, τη γωνία ανύψωσης καθώς και τον συντελεστή ειδικής εξασθένησης τον οποίο παίρνουμε από την εικόνα 5. Οι τιμές της περιεκτικότητας σε νερό στη δορυφορική ζεύξη λαμβάνονται από ραδιομετρικές μετρήσεις και είναι διαθέσιμες με τη μορφή ψηφιακών χαρτών. Οι χάρτες αυτοί περιέχουν τιμές της περιεκτικότητας L για μια συγκεκριμένη ομάδα πιθανοτήτων υπέρβασης, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 99% κατά τη διάρκεια ενός

μέσου έτους. Οι χάρτες [7] που ακολουθούν απεικονίζουν τη περιεκτικότητα L για δυο διαφορετικές πιθανότητες υπέρβασης.



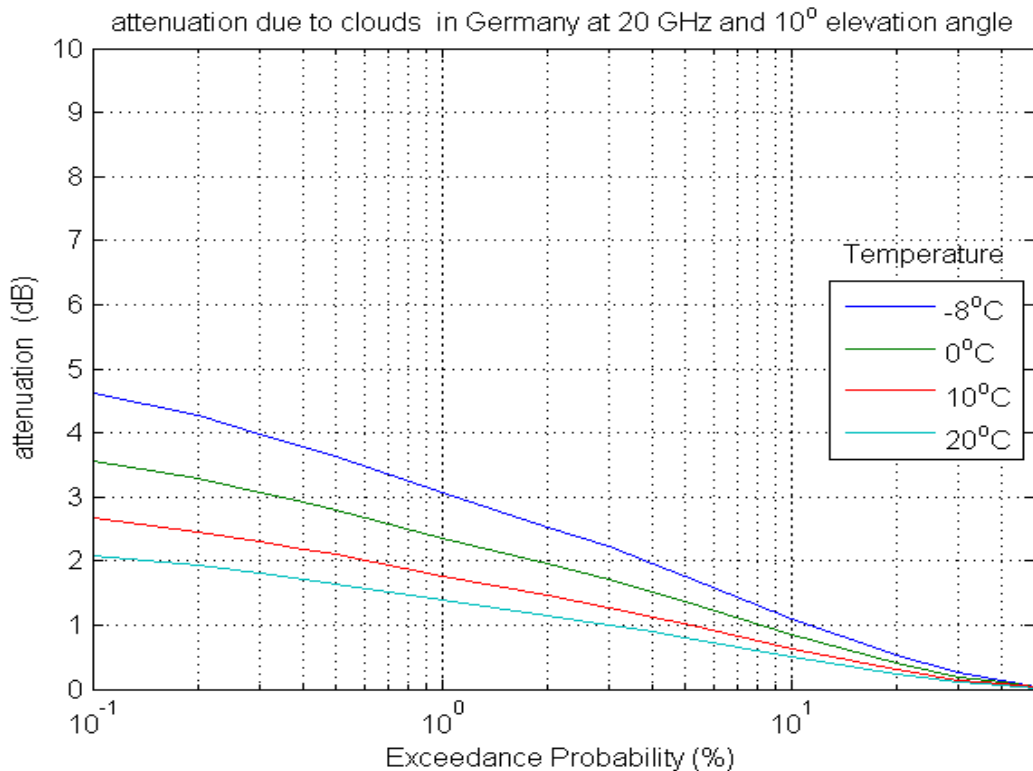
Εικόνα 8: Χάρτης περιεκτικότητας νερού L σε όλη τη γη για πιθανότητα υπέρβασης 0.1%. Ο οριζόντιος άξονας είναι το γεωγραφικό μήκος και ο κατακόρυφος το γεωμετρικό πλάτος



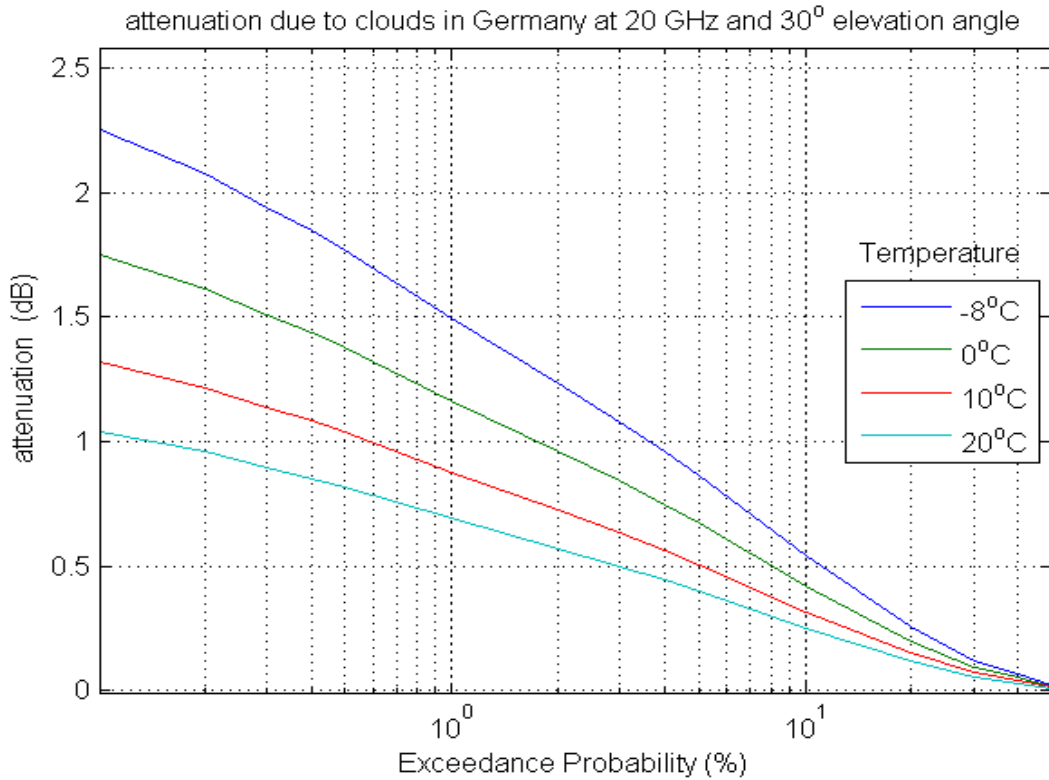
Εικόνα 9: Χάρτης περιεκτικότητας νερού L σε όλη τη γη για πιθανότητα υπέρβασης 5%. Ο οριζόντιος άξονας είναι το γεωγραφικό μήκος και ο κατακόρυφος το γεωμετρικό πλάτος.

Για να βρούμε την περιεκτικότητα L σε μία συγκεκριμένη περιοχή ακολουθούμε τέσσερα βήματα. Πρώτο βήμα είναι να καθορίσουμε τις πιθανότητες p_{above} και p_{below} , από την προαναφερθείσα ομάδα πιθανοτήτων, πάνω και κάτω από την επιθυμητή πιθανότητα. Δεύτερο βήμα είναι για τις δύο πιθανότητες αυτές να βρούμε την περιεκτικότητα στα τέσσερα πιο κοντινά σημεία, στη περιοχή που μας ενδιαφέρει, στο χάρτη. Το τρίτο βήμα είναι μέσω της διγραμμικής παρεμβολής για τις τέσσερις τιμές της περιεκτικότητας, για τις πιθανότητες p_{above} και p_{below} αντίστοιχα, να βρούμε τις περιεκτικότητες L_{above} & L_{below} . Και τέλος το τέταρτο βήμα είναι να υπολογίσουμε τη περιεκτικότητα L στην επιθυμητή πιθανότητα p με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής, όπου ο ένας άξονας είναι ο L και ο άλλος ο $\ln p$.

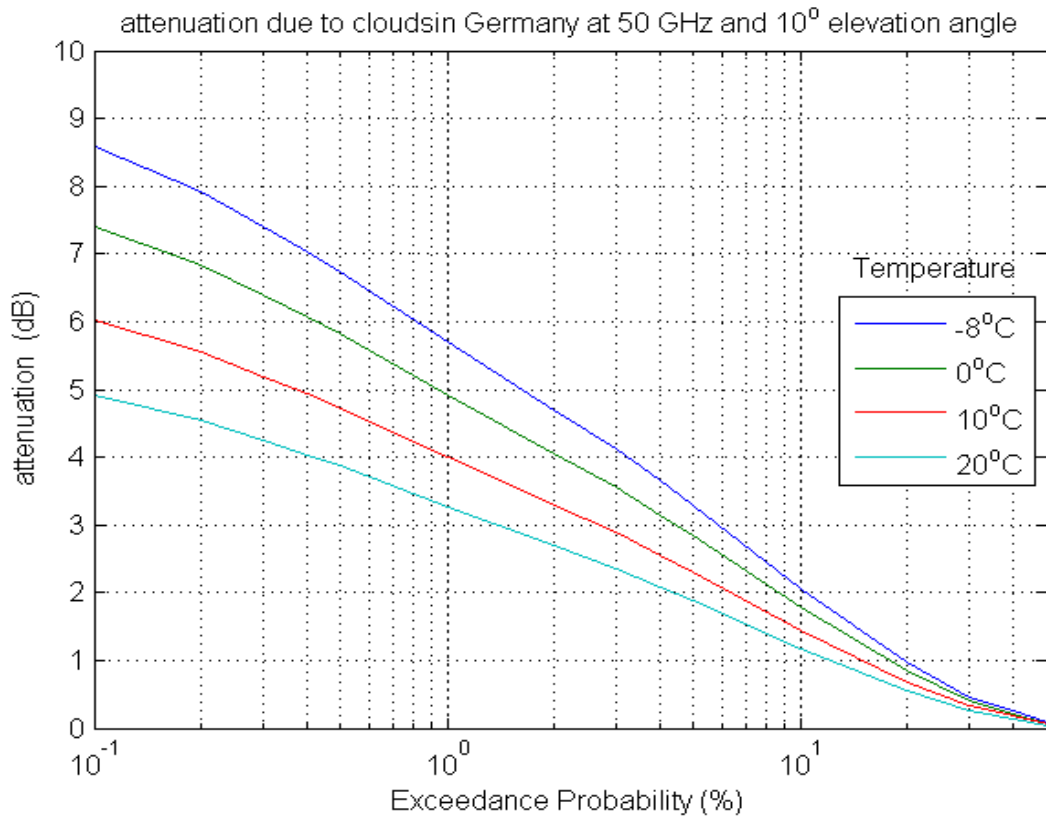
Υπολογίζοντας το L με την παραπάνω μέθοδο και το K_l από τον τύπο (20), με αντικατάσταση στην (30) βρίσκουμε τη ζητούμενη εξασθένηση λόγω σύννεφων και ομίχλης. Τέλος, να σημειωθεί ότι για τον υπολογισμό της εξασθένησης λόγω σύννεφων υπολογίζεται για θερμοκρασία ίση με 0°C . Ακολουθούν γραφήματα της εξασθένησης για διαφορετικές θερμοκρασίες, γωνίες ανύψωσης και συχνότητες λειτουργίας.



Εικόνα 10: Εξασθένηση λόγω νεφώσεων για διαφορετικές θερμοκρασίες και για γωνιά ανύψωσης 10° .

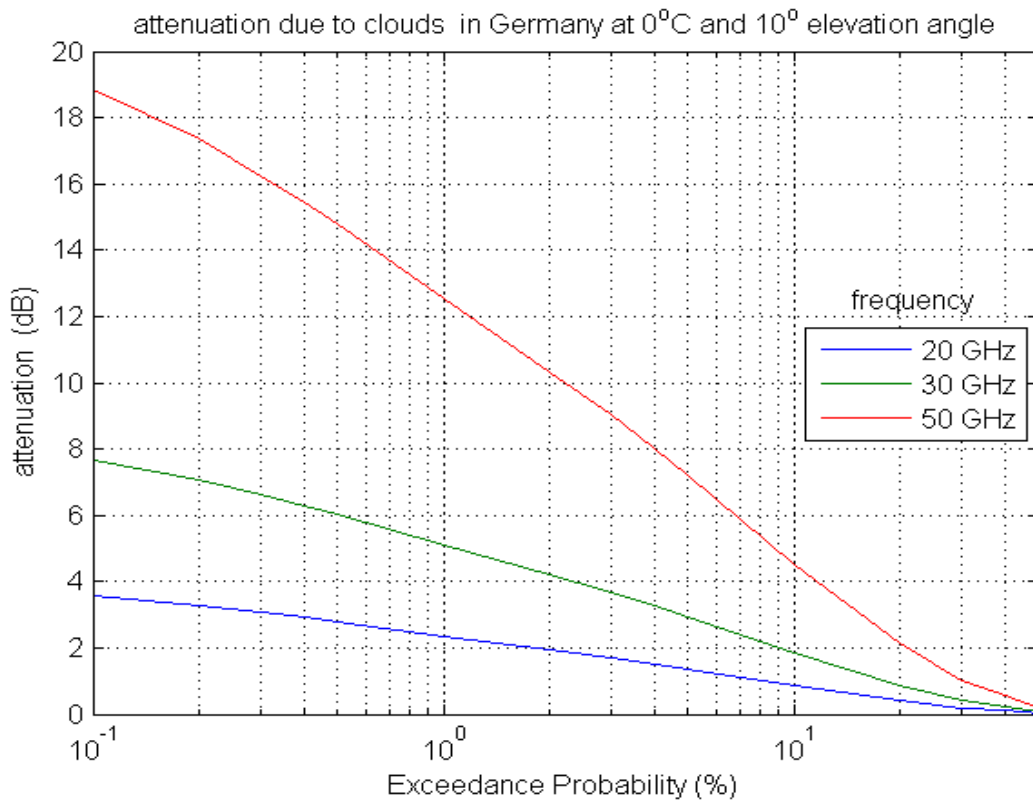


Εικόνα 11: Εξασθένιση λόγω νεφώσεων για διαφορετικές θερμοκρασίες και για γωνία ανύψωσης 30°.

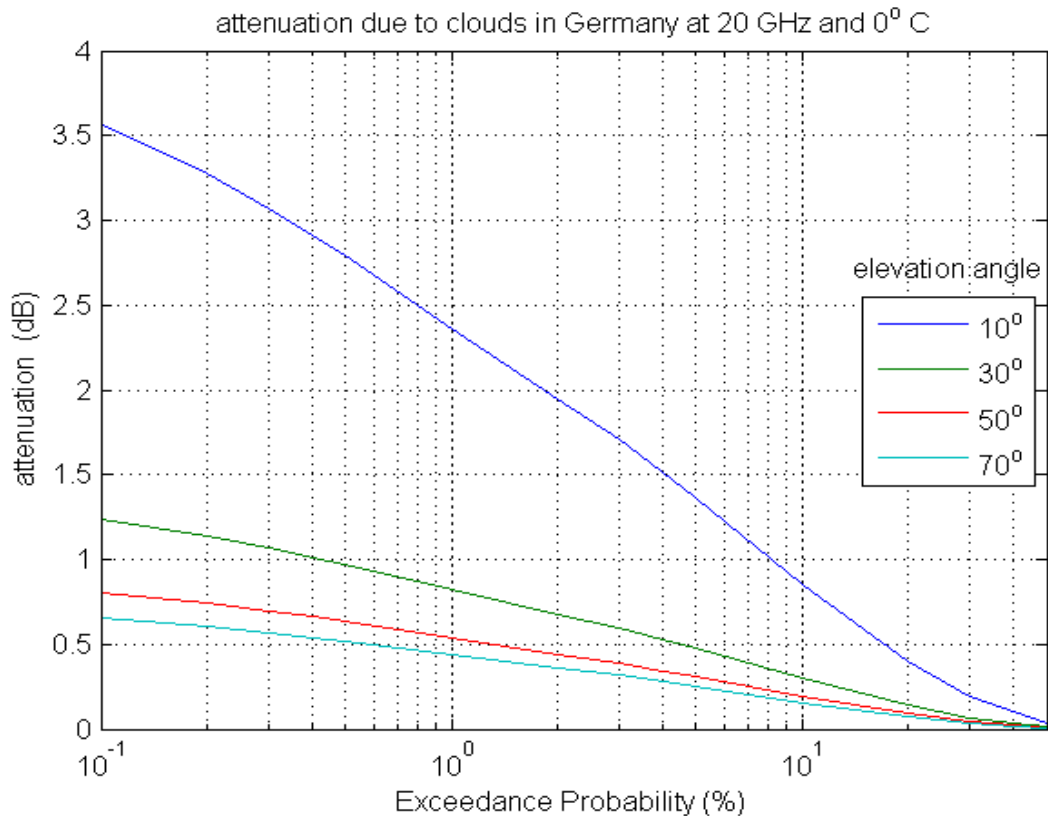


Εικόνα 12: Εξασθένιση λόγω νεφώσεων για διαφορετικές θερμοκρασίες και λειτουργία στα 50 GHz

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από τις εικόνες 10, 11 και 12 είναι ότι οι διαλείψεις είναι μεγαλύτερες στις χαμηλότερες θερμοκρασίες κάτι που περιμέναμε γιατί όπως φαίνεται και στην εικόνα 7, ο συντελεστής εξασθένησης είναι μεγαλύτερος σε αυτές τις θερμοκρασίες. Επιπλέον βλέπουμε ότι η αύξηση της συχνότητας λειτουργίας και της γωνίας ανύψωσης οδηγεί σε αύξηση και μείωση αντίστοιχα της εξασθένησης. Η παρατήρηση αυτή γίνεται πιο εμφανής στις ακόλουθες εικόνες.



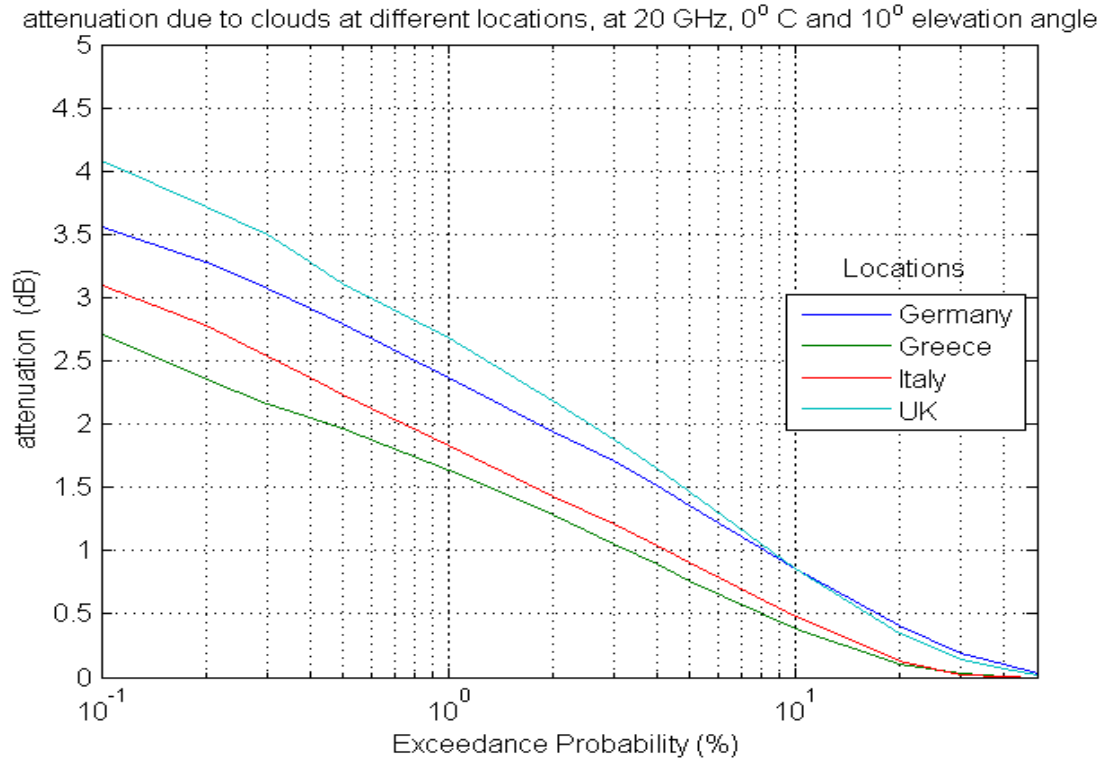
Εικόνα 13: Εξασθένηση λόγω νεφώσεων για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας



Εικόνα 14:Εξασθένηση λόγω νεφώσεων για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης.

Από την εικόνα 13 παρατηρούμε την αύξηση των διαλείψεων με την αύξηση της συχνότητας. Η αύξηση στη συχνότητα ουσιαστικά επηρεάζει το συντελεστή εξασθένησης όπως φαίνεται και στη σχέση (20). Παρόμοια, στην εικόνα 14 βλέπουμε ότι για μεγαλύτερες γωνίες ανύψωσης οι διαλείψεις που οφείλονται στα σύννεφα και στην ομίχλη μειώνονται. Η διαπίστωση αυτή είναι απολύτως λογική αφού όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία ανύψωσης τόσο μικρότερο είναι το μήκος της διαδρομής που βρίσκεται σε σύννεφα και κατ'επέκταση τόσο μικρότερη είναι η εξασθένηση. Επίσης επιβεβαιώνεται και μαθηματικά από την σχέση (30) που εκφράζει την εξασθένηση.

Η εικόνα 15 που ακολουθεί παρουσιάζει την εξασθένηση του σήματος, που οφείλεται στα σύννεφα, όταν ο επίγειος σταθμός είναι εγκατεστημένος σε διαφορετικές περιοχές. Είναι εμφανές ότι όσο απομακρυνόμαστε από τη τροπική ζώνη και κινούμαστε προς την πολική ζώνη, η συγκέντρωση σωματιδίων νερού αυξάνεται και επομένως αυξάνονται και οι απώλειες του σήματος.



Εικόνα 15: Εξασθένηση λόγω νεφώσεων σε διαφορετικές περιοχές

1.3.3 Τροποσφαιρικοί σπινθηρισμοί

Οι σπινθηρισμοί προκαλούν διακυμάνσεις της στάθμης και της φάσης του σήματος και οφείλονται στις μεταβολές του δείκτη διάθλασης της τροπόσφαιρας. Ο δείκτης διάθλασης σε κάθε περιοχή εξαρτάται από τη μέση θερμοκρασία, τη μέση υγρασία και τη πίεση των υδρατμών στη συγκεκριμένη περιοχή. Οι διακυμάνσεις αυτές αυξάνονται με τη συχνότητα και εξαρτώνται από το μήκος διαδρομής που θα διανύσει το σήμα καθώς και από τη διάμετρο της κεραίας. Η 618-10 [8] σύσταση της ITU-R αναφέρει την γενική τεχνική για τον υπολογισμό των διαλείψεων λόγω τροποσφαιρικών σπινθηρισμών για γωνίες ανύψωσης μεγαλύτερες από 4°. Σύμφωνα λοιπόν με τη τεχνική αυτή πρέπει να γνωρίζουμε:

f : συχνότητα λειτουργίας (GHz).

θ : γωνία ανύψωσης.

D : γεωμετρική διάμετρος της κεραίας του επίγειου σταθμού βάσης (m).

η : απόδοση κεραίας ($\eta=0.5$ αν δεν τη γνωρίζουμε).

N_{wet} : δείκτης διάθλασης, τον οποίο παίρνουμε από τους χάρτες της ITU-R 453 σύστασης [9].

Από τη στιγμή που γνωρίζουμε τα παραπάνω υπολογίζουμε τη τυπική απόκλιση σ_{ref} του πλάτους του σήματος με βάση τον εξής τύπο:

$$\sigma_{ref} = 3.6 \times 10^{-3} + 10^{-4} \times N_{wet} \quad \text{dB} \quad (31)$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε το μήκος της διαδρομής που θα ακολουθήσει το σήμα.

$$L = \frac{2h_L}{\sqrt{\sin^2 \theta + 2.35 \times 10^{-4} + \sin \theta}} \quad \text{m} \quad (32)$$

Από τη γεωμετρική διάμετρο D και την απόδοση της κεραίας υπολογίζω την ωφέλιμη διάμετρο της κεραίας.

$$D_{eff} = \sqrt{\eta} D \quad \text{m} \quad (33)$$

Μετάπειτα υπολογίζω τον ακόλουθο παράγοντα:

$$g(x) = \sqrt{3.86(x^2 + 1)^{11/12} \sin \left[\frac{11}{6} \arctan \frac{1}{x} \right] - 7.08x^{5/6}} \quad (34)$$

Όπου $x = 1.22 D_{eff}^2 (f/L)$

Αν η υπόριζος ποσότητα είναι αρνητική, που συμβαίνει όταν $x \geq 7.0$, η προβλεπόμενη εξασθένηση είναι μηδενική. Σε αντίθετη περίπτωση συνεχίζουμε για τον υπολογισμό της εξασθένησης με επόμενο βήμα τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης του σήματος για τη διαδρομή που θα ακολουθήσει.

$$\sigma = \sigma_{ref} f^{7/12} \frac{g(x)}{(\sin \theta)^{1.2}} \quad (35)$$

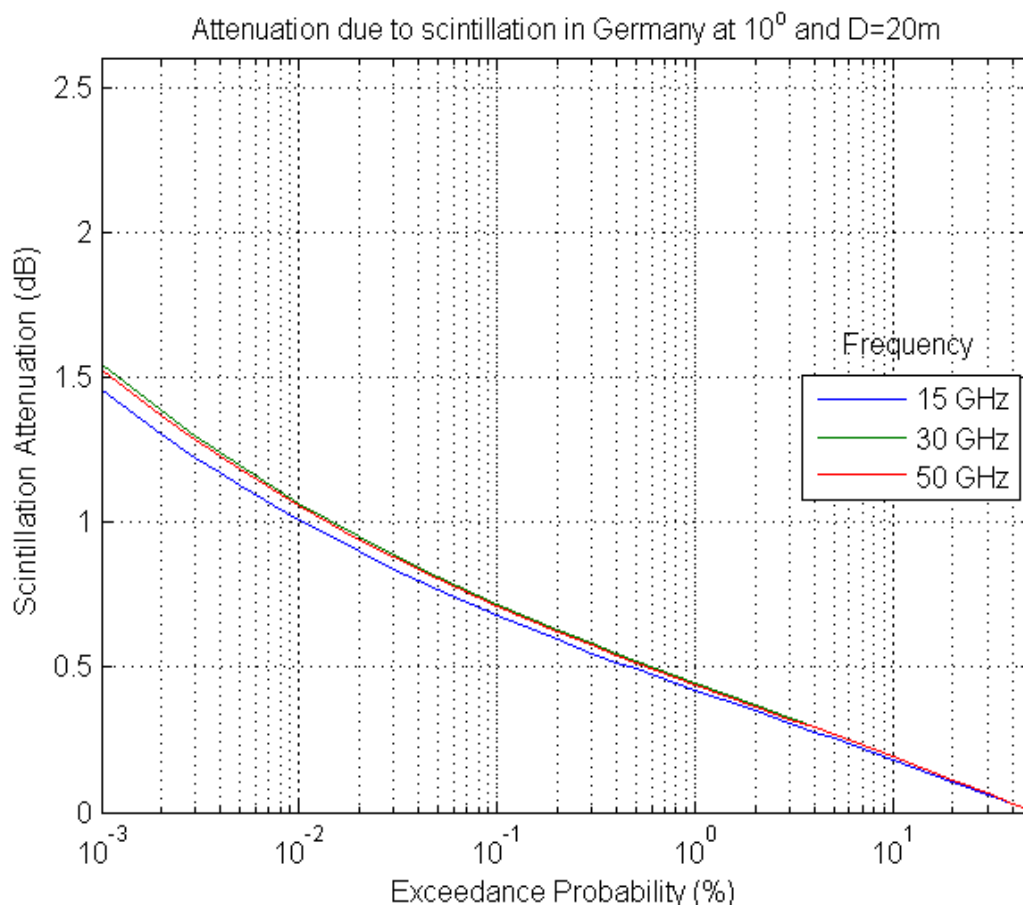
Υπολογίζω το ποσοστιαίο χρονικό παράγοντα $a(p)$, για το p ποσοστό του χρόνου όπου $0.01 < p \leq 50$.

$$a(p) = -0.061(\log_{10} p)^3 + 0.072(\log_{10} p)^2 - 1.71\log_{10} p + 3.0 \quad (36)$$

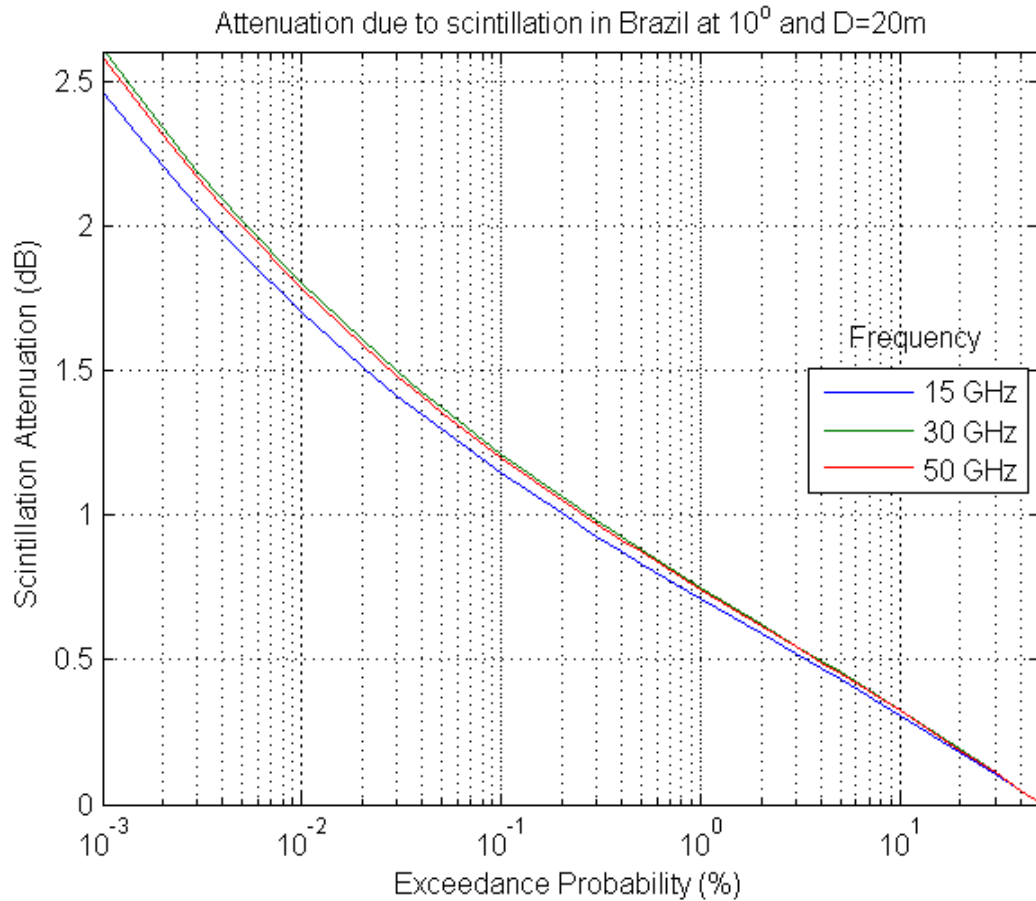
Και τέλος αφού έχω βρει τα παραπάνω υπολογίζω την εξασθένηση από τους τροποσφαιρικούς σπινθηρισμούς από τον εξής τύπο:

$$A_s(p) = a(p) \cdot \sigma \quad (37)$$

Οι εικόνες που ακολουθούν προέκυψαν από την εφαρμογή της προαναφερθείσας μεθόδου.

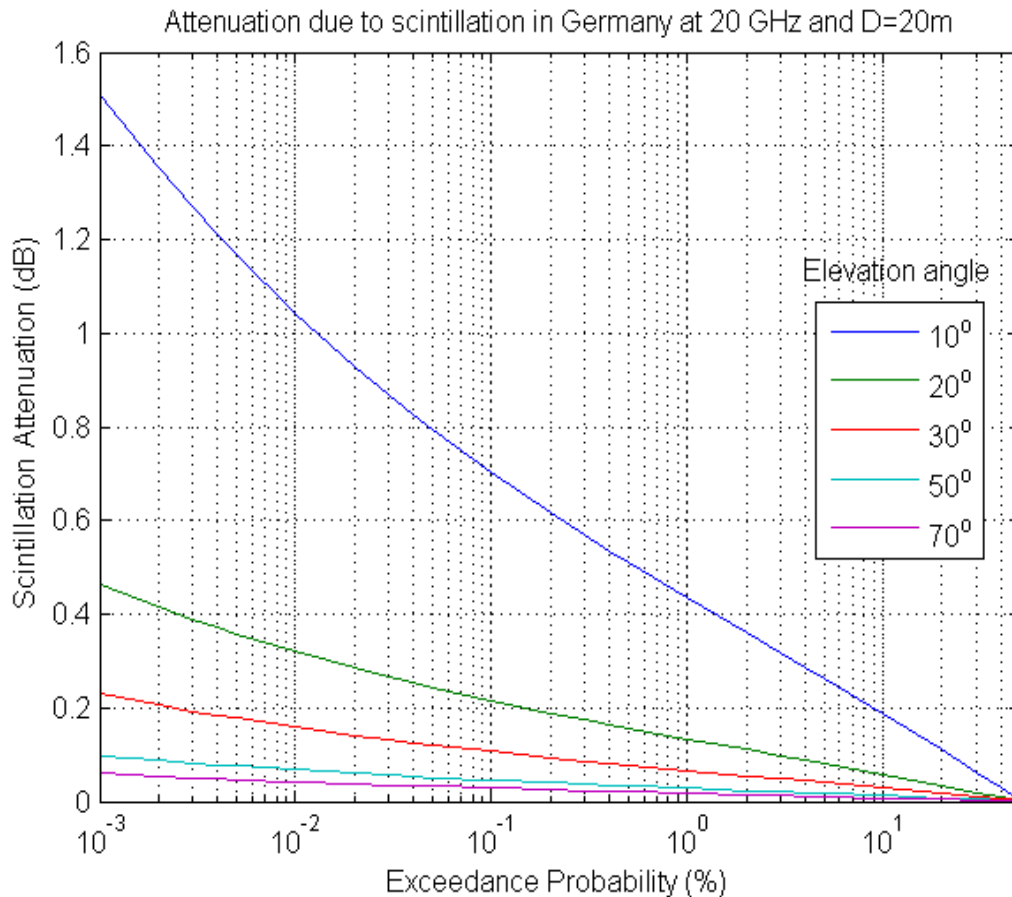


Εικόνα 16: Εξασθένηση εξαιτίας τροποσφαιρικών σπινθηρισμών για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας σε περιοχή με ωκεάνιο κλίμα όπως η Γερμανία



Εικόνα 17: Εξασθένηση εξαιτίας τροποσφαιρικών σπινθηρισμών για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας σε περιοχή στη τροπική ζώνη, όπως η Βραζιλία

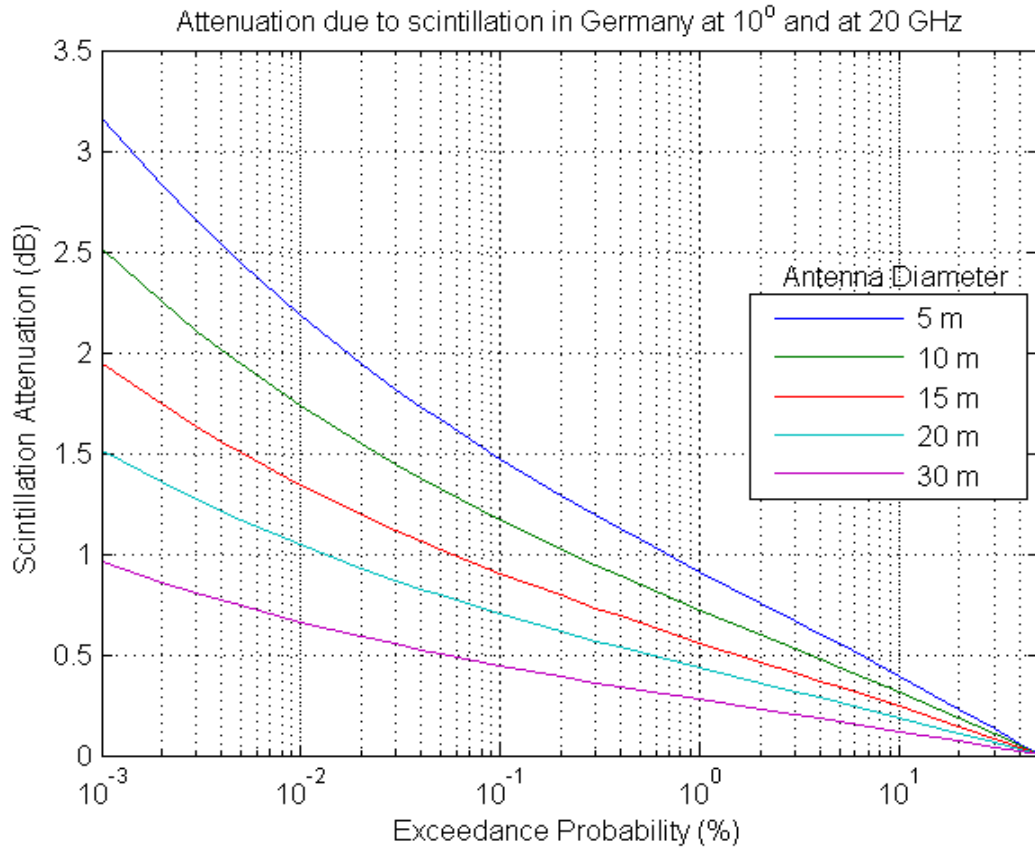
Από τις δύο αυτές εικόνες παρατηρούμε πρώτον ότι στις συχνότητες που μας ενδιαφέρουν οι διαλείψεις λόγω σπινθηρισμών είναι σχεδόν ίσες και δεύτερον ότι η εξασθένηση του σήματος είναι υψηλότερη σε περιοχές με τροπικό κλίμα.



Εικόνα 18: Εξασθένηση εξαιτίας τροποσφαιρικών σπινθηρισμών για διάφορες γωνίες ανύψωσης.

Στην εικόνα αυτή βλέπουμε ότι η αύξηση της γωνίας ανύψωσης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της εξασθένησης λόγω σπινθηρισμών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για μεγάλες γωνίες το μήκος της διαδρομής που θα ακολουθήσει το σήμα είναι μικρότερο με συνέπεια και οι διαλείψεις να είναι μικρότερες.

Όπως είδαμε και στις εικόνες 16,17 & 18 η συχνότητα λειτουργίας και η γωνία ανύψωσης παίζουν καθοριστικό ρόλο στη τιμή της εξασθένησης. Παρατηρώντας λοιπόν ότι τα μεγέθη αυτά συνδέονται μεταξύ τους μέσω της μεταβλητής $x = 1.22D_{eff}^2 (f/L)$, και ότι η μεταβλητή αυτή περιλαμβάνει και τη διάμετρο της κεραίας αναμένουμε ότι και η τιμή της διαμέτρου θα είναι καθοριστικής σημασίας για τη τιμή της εξασθένησης. Αυτό επιβεβαιώνεται από την επόμενη εικόνα.



Εικόνα 19: Εξασθένηση εξαιτίας τροποσφαιρικών σπινθηρισμών για διαφορετικές διαμέτρους.

Το συμπέρασμα που βγαίνει από την εικόνα αυτή είναι ότι για να μην έχουμε μεγάλη εξασθένηση του σήματος από τροποσφαιρικούς σπινθηρισμούς είναι προς όφελος μας να έχουμε κεραίες με μεγάλη διάμετρο.

1.3.4 Απόσβεση λόγω βροχής

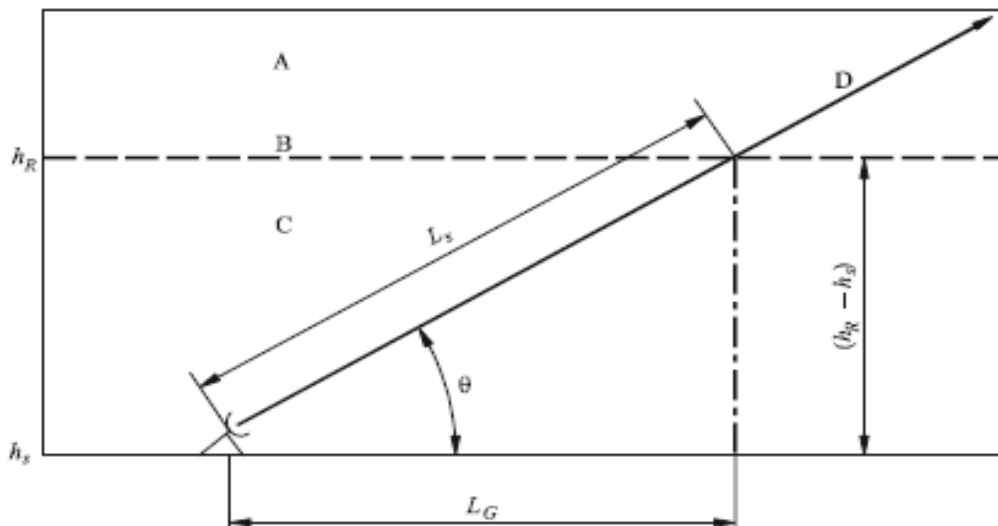
Οι βροχοπτώσεις αποτελούν το σημαντικότερο περιοριστικό παράγοντα της διαθεσιμότητας και της αξιοπιστίας των δορυφορικών ζεύξεων αφού η εξασθένηση που εισάγουν συνδέεται με το τετράγωνο της συχνότητας. Δηλαδή όσο αυξάνουμε τη συχνότητα λειτουργίας οι διαλείψεις γίνονται ακόμα πιο έντονες. Επίσης παράγοντες που καθορίζουν το βάθος των διαλείψεων λόγω βροχής είναι η ένταση της βροχόπτωσης, το μέγεθος των σταγόνων, η γωνία ανύψωσης του δορυφόρου και η πόλωση του δορυφορικού ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Πιο συγκεκριμένα σε υψηλές συχνότητες το μήκος κύματος του σήματος είναι τόσο μικρό που μπορεί να συγκριθεί με το μέγεθος της σταγόνας της βροχής και κατά συνέπεια κάθε σταγόνα γίνεται και

σκεδαστής του σήματος και απορροφά ένα μέρος του. Συνεπώς η σκέδαση και η απορρόφηση στις βροχοσταγόνες μπορεί να προκαλέσει και φαινόμενα παρεμβολών μεταξύ γειτονικών συστημάτων, κυρίως μεταξύ επίγειων και δορυφορικών ζεύξεων.

Για τον υπολογισμό της εξασθένησης λόγω βροχόπτωσης βασιζόμαστε στην 618-10 σύσταση της ITU-R [8]. Σύμφωνα λοιπόν με την 618 πρέπει να ξέρουμε τα εξής:

- ✓ $R_{0.01}$: ο ρυθμός βροχόπτωσης στη τοποθεσία που βρίσκεται ο επίγειος σταθμός για 0.01% του χρόνου (mm/h).
- ✓ h_s : το υψόμετρο του επίγειου σταθμού από την επιφάνεια θαλάσσης (Km).
- ✓ h_R : το ύψος της βροχής(Km).
- ✓ θ : γωνία ανύψωσης (degrees).
- ✓ φ : γεωγραφικό πλάτος του επίγειου σταθμού (degrees).
- ✓ f : συχνότητα λειτουργίας (GHz).
- ✓ R_e : ακτίνα Γης (8500 Km).

Εικόνα 20: Σχηματική παρουσίαση του μονοπατιού μεταξύ Γης και δορυφόρου δοθέντων των αναγκαίων παραμέτρων για τον υπολογισμό της απόσβεσης



- A: βροχόπτωση όπου οι σταγόνες είναι παγωμένες
- B: ύψος βροχής
- C: βροχόπτωση όπου οι σταγόνες είναι σε υγρή μορφή
- D: μονοπάτι Γης-δορυφόρου

ακόμα πρέπει να πραγματοποιήσουμε τα ακόλουθα βήματα:

1. Το h_R υπολογίζεται από τη σύστασης ITU-R 839 [10].
2. Στη συνέχεια υπολογίζουμε και τη διαδρομή μέχρι το h_R .

Αν $\theta \geq 5^\circ$ τότε :

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \quad \text{Km} \quad (38)$$

Αν $\theta < 5^\circ$ τότε:

$$L_s = \frac{2(h_R - h_s)}{\left(\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e} \right)^{1/2} + \sin \theta} \quad \text{Km.} \quad (39)$$

3. Υπολογίζουμε την οριζόντια προβολή του L_s

$$L_G = L_s \cos \theta \quad (40)$$

4. Το ρυθμό βροχόπτωσης $R_{0.01}$ τον υπολογίζει η 837 σύστασης της ITU-R [11].
5. Την ειδική εξασθένηση γ_R την υπολογίζουμε ,αφού πάρουμε τις παραμέτρους a και k που προκύπτουν από τη 838 σύσταση [12], από την εξής σχέση:

$$\gamma_R = k (R_{0.01})^a \quad (41)$$

6. Υπολογίζουμε το συντελεστή οριζόντιας εξασθένησης για 0.01% του χρόνου.

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38 (1 - e^{-2L_G})} \quad (42)$$

7. Υπολογίζουμε το συντελεστή κατακόρυφης προσαρμογής , $v_{0.01}$, για 0.01% του χρόνου

$$\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_s}{L_G r_{0.01}} \right) \text{ degrees}$$

για $\zeta > \theta$, $L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} \quad \text{Km}$

αλλιώς,
$$L_R = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \quad \text{km}$$

Αν $|\phi| < 36^\circ$,
$$\chi = 36 - |\phi| \quad \text{degrees}$$

αλλιώς,
$$\chi = 0 \quad \text{degrees}$$

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left(31 \left(1 - e^{-\theta/(1+\chi)} \right) \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0.45 \right)}$$

8. Το μήκος διαδρομής που επηρεάζει τη μετάδοση είναι

$$L_E = L_R v_{0.01} \quad \text{km} \quad (43)$$

9. Η προβλεπόμενη εξασθένηση για 0.01% ενός μέσου έτους είναι

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \quad \text{dB} \quad (44)$$

10. Η προβλεπόμενη εξασθένηση για άλλα ποσοστά, μεταξύ του 0.001% και 5%, ενός μέσου έτους υπολογίζεται με βάση το $A_{0.01}$.

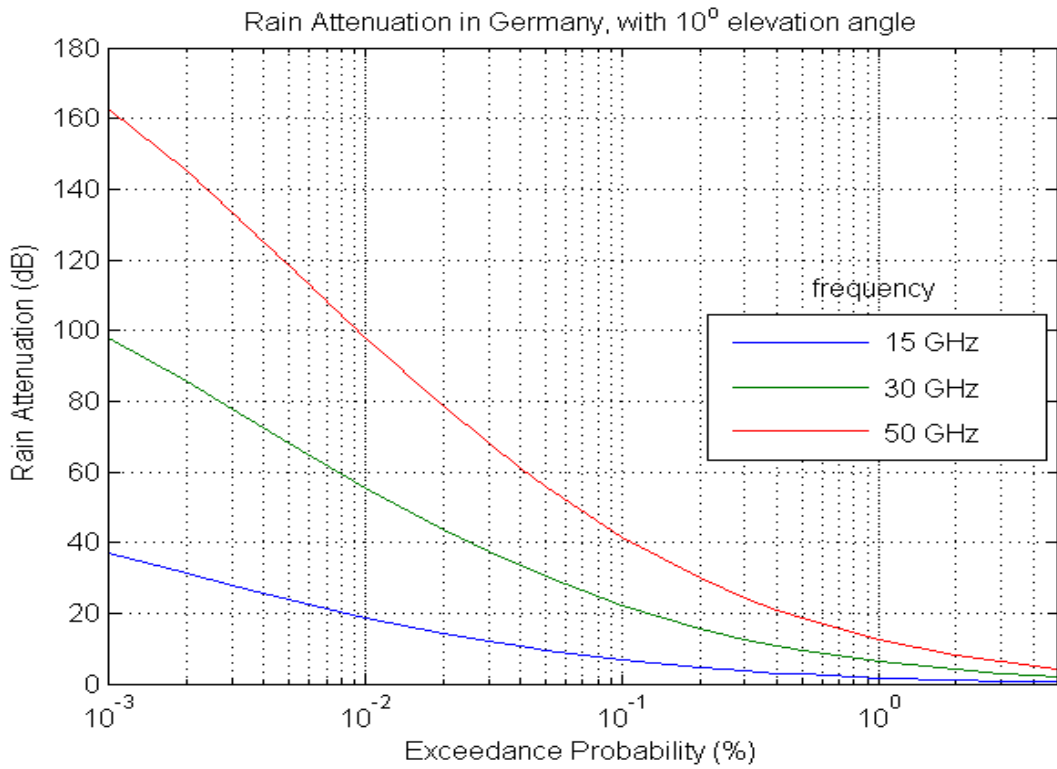
Αν $p \geq 1\%$ και $|\phi| \geq 36^\circ$:
$$\beta = 0$$

Αν $p < 1\%$ και $|\phi| < 36^\circ$ και $\theta \geq 25^\circ$:
$$\beta = -0.005(|\phi| - 36)$$

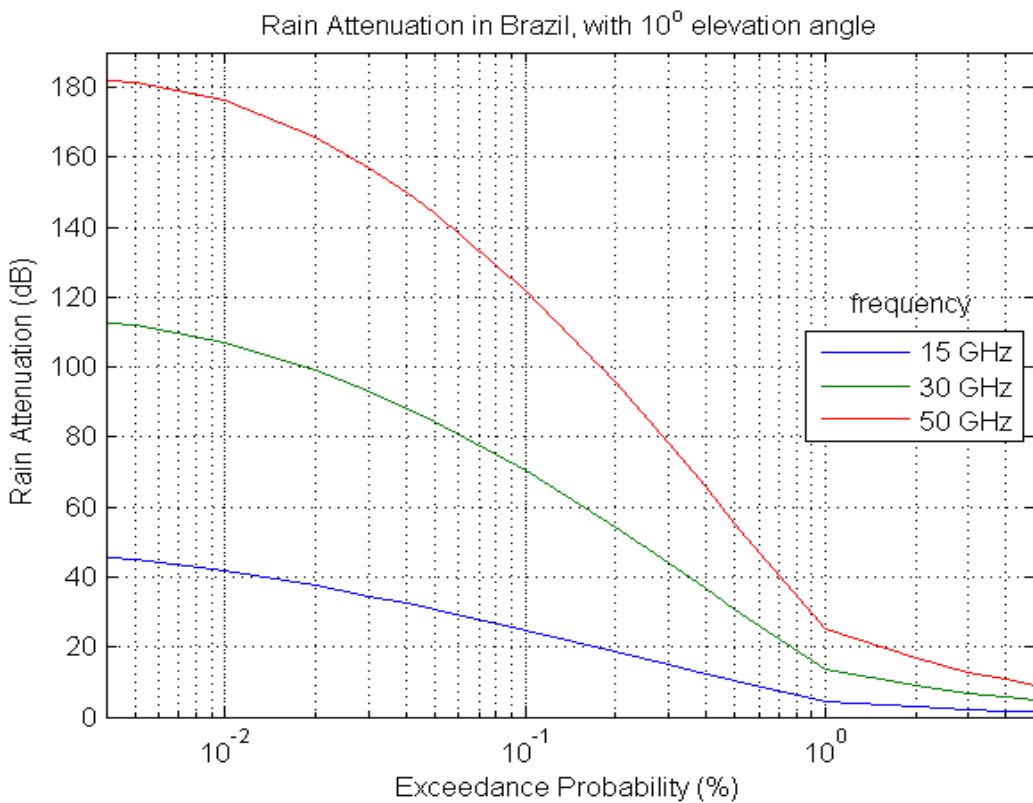
Αλλιώς
$$\beta = -0.005(|\phi| - 36) + 1.8 - 4.25 \sin \theta$$

$$A_R(p) = A_{0.01} \left(\frac{P}{0.01} \right)^{-(0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-p) \sin \theta)} \quad \text{dB} \quad (45)$$

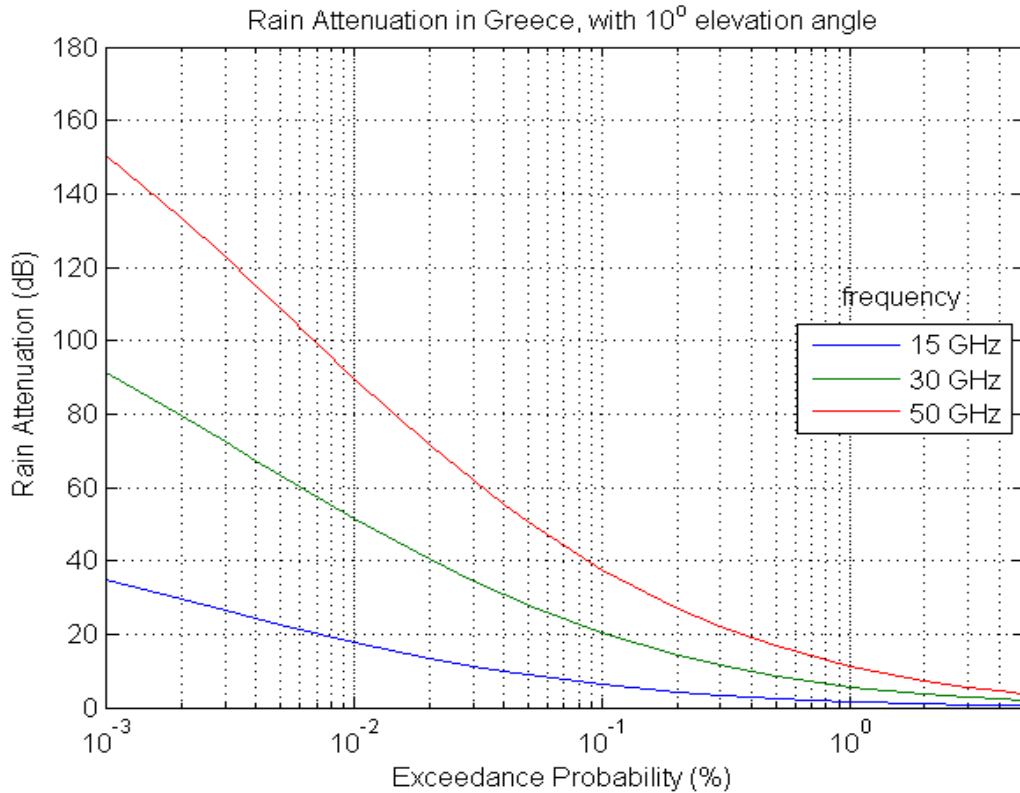
Πραγματοποιώντας λοιπόν τα παραπάνω βήματα παίρνουμε τις ακόλουθες εικόνες.



Εικόνα 21: Εξασθένιση λόγω βροχής για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας σε περιοχή με ωκεάνιο κλίμα

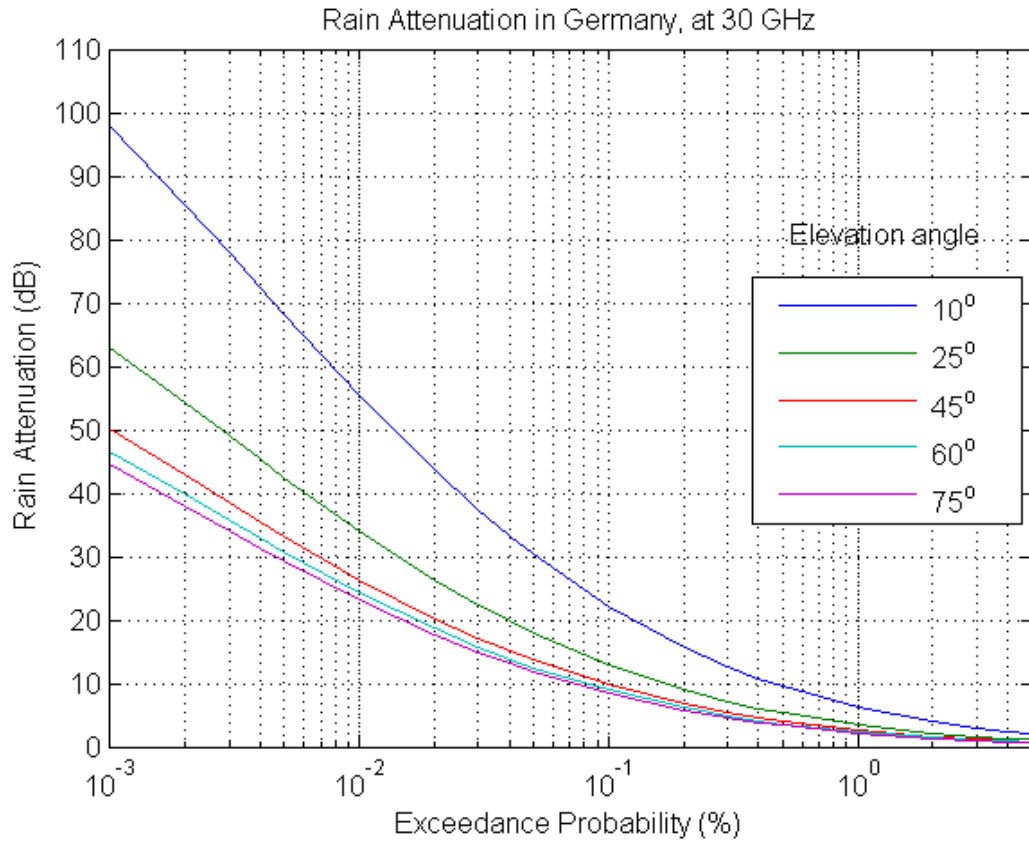


Εικόνα 22: Εξασθένιση λόγω βροχής για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας σε περιοχή με τροπικό κλίμα



Εικόνα 23: Εξασθένιση λόγω βροχής για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας σε περιοχή με μεσογειακό κλίμα.

Από τις εικόνες αυτές επιβεβαιώνεται ότι αύξηση στη συχνότητα ισοδυναμεί με ακόμα περισσότερες διαλείψεις. Χαρακτηριστικά στην Εικόνα 23 για πιθανότητα υπέρβασης 0.01%, αύξηση της συχνότητας λειτουργίας από τα 15 GHz στα 30 GHz επιφέρει αύξηση κατά περίπου 30 dB των διαλείψεων. Επίσης γίνεται εύκολα αντιληπτό από τη σύγκριση των τριών εικόνων ότι σε περιοχές που βρίσκονται στη τροπική ζώνη, όπως η Βραζιλία, η απόσβεση είναι ακόμα υψηλότερη ενώ σε περιοχές με μεσογειακό κλίμα όπου οι βροχοπτώσεις είναι λιγότερες, όπως η Ελλάδα, η απόσβεση είναι μικρότερη. Για παράδειγμα για πιθανότητα υπέρβασης 0.01% και συχνότητα λειτουργίας στα 30 GHz, οι διαλείψεις στη Γερμανία είναι περίπου 55 dB στη Βραζιλία αγγίζουν τα 105 dB και στην Ελλάδα είναι 35 dB.



Εικόνα 24: Εξασθένηση λόγω βροχής για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης.

Παρατηρούμε ότι και η γωνία ανύψωσης παίζει σημαντικό ρόλο στην απόσβεση. Όσο μικρότερη είναι η γωνία ανύψωσης τόσο μεγαλύτερες είναι οι διαλείψεις που αντιμετωπίζει η ζεύξη. Για πιθανότητα υπέρβασης 0.001% η διαφορά στην απόσβεση για 10° και για 45° είναι σχεδόν 50 dB.

1.3.5 Συνολική εξασθένηση

Μέχρι αυτό το σημείο θεωρήσαμε ότι στη δορυφορική ζεύξη επικρατεί ένα μόνο φαινόμενο διάδοσης και αναλόγως με το ποίο ήταν υπολογίζαμε την εξασθένηση που προκαλεί. Στην πραγματικότητα τα φαινόμενα διάδοσης που έχουν αναφερθεί συνυπάρχουν και γι αυτό τίθεται το ερώτημα πόσο ανεξάρτητα είναι μεταξύ τους. Η μέθοδος με την οποία υπολογίζουμε την συνολική εξασθένηση του σήματος στη ζεύξη θεωρεί κάποια φαινόμενα μερικώς εξαρτημένα και κάποια τελείως ανεξάρτητα. Η σχέση που δίνει τη συνολική εξασθένηση είναι η ακόλουθη:

$$A_T(p) = A_G(p) + \sqrt{(A_R(p) + A_C(p))^2 + A_S^2(p)} \quad (46)$$

Όπου :

p : πιθανότητα υπέρβασης της εξασθένησης και κυμαίνεται από 0.001% έως 50%

$A_G(p)$: Απόσβεση από τα αέρια της ατμόσφαιρας

$A_R(p)$: Απόσβεση λόγω βροχόπτωσης

$A_C(p)$: Απόσβεση λόγω νεφώσεων

$A_S(p)$: Απόσβεση λόγω σπινθηρισμών

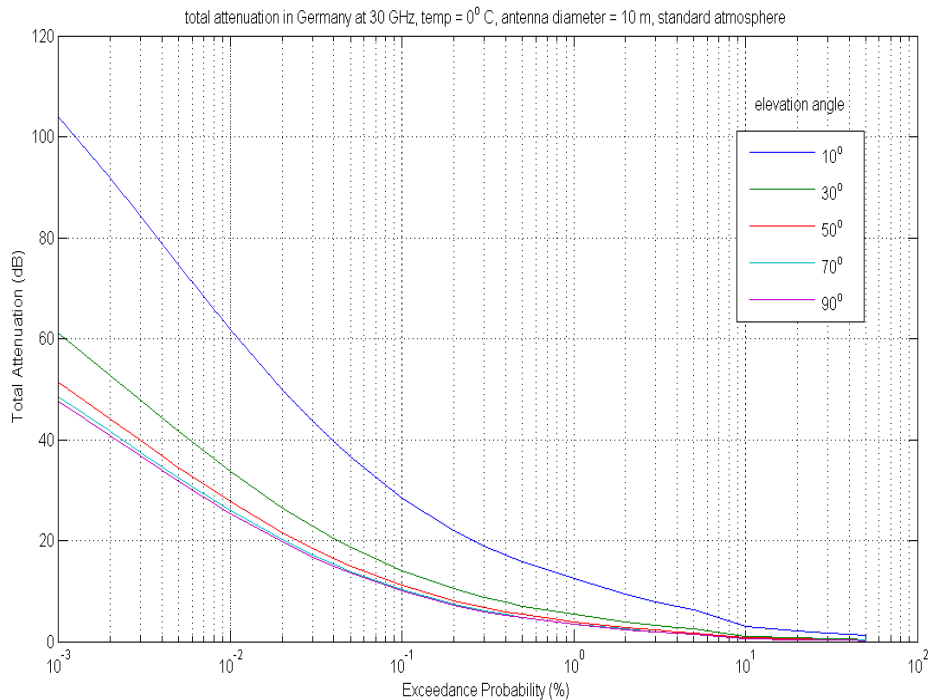
Από τη σχέση (20) βλέπουμε ότι η μέθοδος θεωρεί την απόσβεση λόγω βροχής και την απόσβεση λόγω νεφώσεων ασυσχέτιστες μεταξύ τους. Θεωρεί την απόσβεση που εισάγουν τα δύο αυτά φαινόμενα μερικώς συσχετισμένη με την απόσβεση που οφείλεται σε σπινθηρισμούς στην ατμόσφαιρα. Και τέλος θεωρεί την εξασθένηση που προκαλούν η βροχή, τα σύννεφα και οι σπινθηρισμοί ασυσχέτιστη με την εξασθένηση λόγω απορρόφησης αερίων από την ατμόσφαιρα.

Επίσης επειδή για πιθανότητες μικρότερες από 1.0% η εξασθένηση λόγω βροχής υπολογίζει μεγάλο μέρος της εξασθένησης που προκαλούν τα σύννεφα και τα αέρια στην ατμόσφαιρα θεωρούμε το εξής

$$A_C(p) = A_C(1\%) \quad \text{για } p < 1.0\% \quad (47)$$

$$A_G(p) = A_G(1\%) \quad \text{για } p < 1.0\% \quad (48)$$

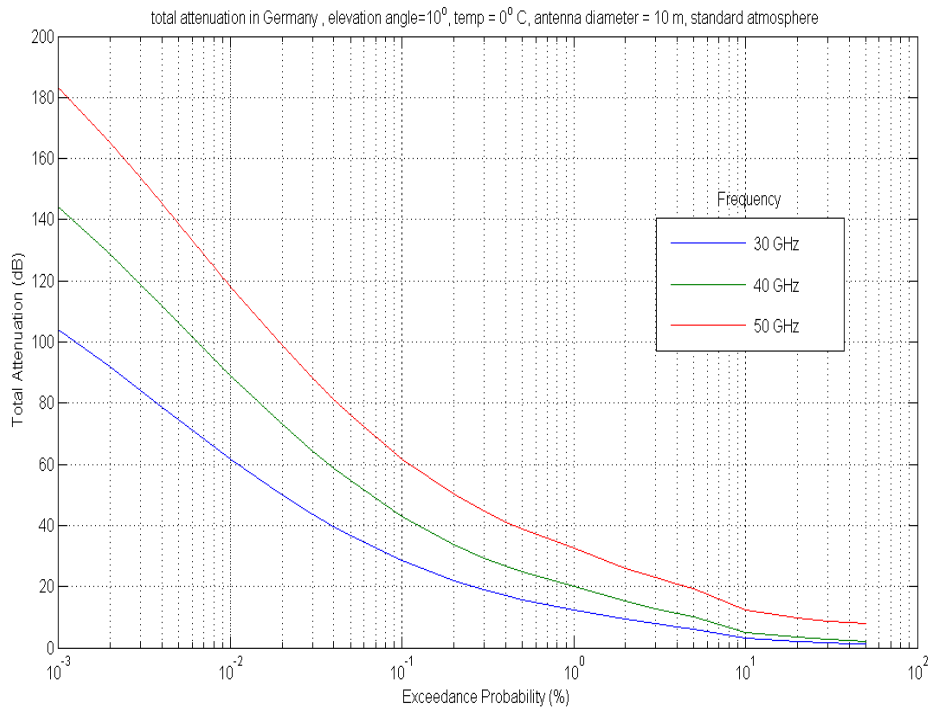
Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω η συνολική εξασθένηση για διάφορες περιπτώσεις ,που επηρεάζουν όλα ή μεμονωμένα κάποια από τα φαινόμενα που επικρατούν, απεικονίζεται στις εικόνες 25,26,27,28 & 29 που ακολουθούν.



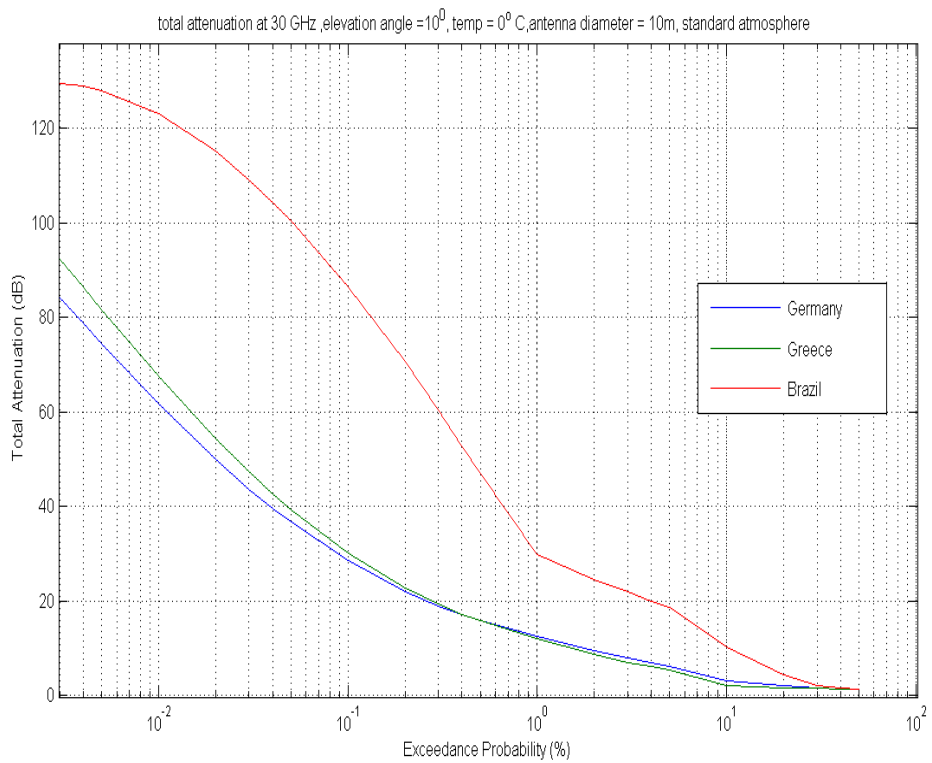
Εικόνα 25: Συνολική εξασθένηση για διάφορες γωνίες ανύψωσης

Σε όλα τα φαινόμενα που αναφέρθηκαν παραπάνω, η εξασθένηση που προκαλούν εξαρτάται από τη γωνία ανύψωσης της κεραίας, κάποια σε μικρότερο και κάποια σε μεγαλύτερο βαθμό, επομένως είναι δεδομένο ότι και η συνολική εξασθένηση που υφίσταται το σήμα θα επηρεάζεται σημαντικά από τη γωνία ανύψωσης. Αυτό επιβεβαιώνεται στη εικόνα 25 και μάλιστα διαπιστώνουμε πως για γωνίες μεγαλύτερες των 50° μοιρών η καμπύλη της συνολικής εξασθένησης είναι περίπου η ίδια.

Όπως ακριβώς λοιπόν και για τη γωνία ανύψωσης, στη συνολική εξασθένηση σημαντικό ρόλο έχουν η συχνότητα λειτουργίας και η περιοχή στην οποία είναι εγκατεστημένος ο επίγειος σταθμός βάσης. Οι εικόνες 26 & 27 το επιβεβαιώνουν.

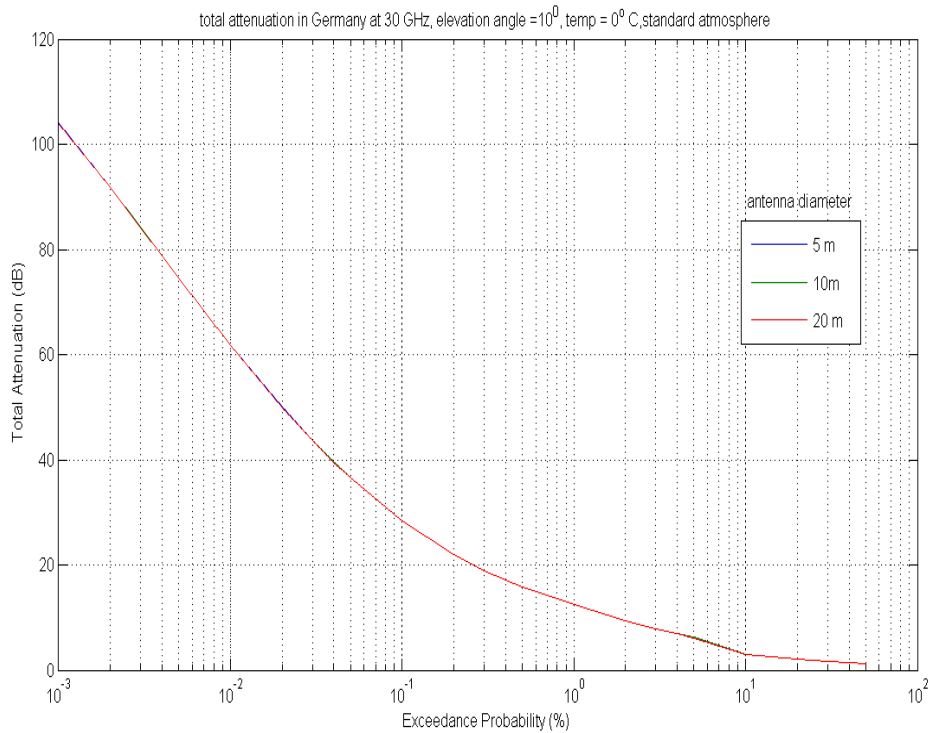


Εικόνα 26: Συνολική εξασθένιση για διάφορες συχνότητες λειτουργίας

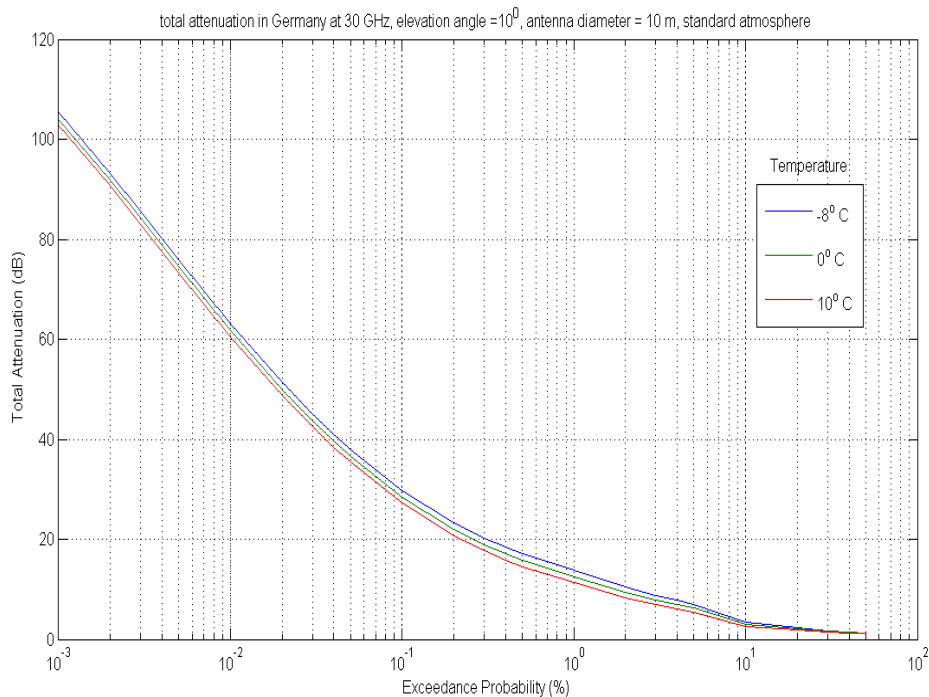


Εικόνα 27: Συνολική εξασθένιση για διάφορες περιοχές

Στις δύο εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται τη συνολική εξασθένηση για διαφορετικές παραμέτρους οι οποίες δε σχετίζονται με τις απώλειες λόγω βροχής. Η εικόνα 28 απεικονίζει τη συνολική εξασθένηση για διαφορετικές διαμέτρους κεραιών. Η διαφορά στις διαμέτρους παίζει ρόλο μόνο στις διαλείψεις λόγω σπινθηρισμών. Βλέποντας όμως ότι οι καμπύλες της συνολικής εξασθένησης ταυτίζονται για τις διάφορες διαμέτρους μπορούμε να πούμε η διάμετρος της κεραίας του επίγειου σταθμού βάσης δεν επηρεάζει τη συνολική εξασθένηση. Στην εικόνα 29 βλέπουμε ότι η συνολική εξασθένηση επηρεάζεται πολύ λίγο από τις αλλαγές στη θερμοκρασία, οι οποίες είναι σημαντικές για τις αποσβέσεις από σύννεφα και από τα αέρια της ατμόσφαιρας.



Εικόνα 28: Συνολική εξασθένηση για διάφορες διαμέτρους κεραιών των σταθμών βάσης



Εικόνα 29: Συνολική εξασθένηση για διάφορες θερμοκρασίες

Παρατηρώντας και συγκρίνοντας τις εικόνες της συνολικής εξασθένησης με τις αντίστοιχες εικόνες της εξασθένησης λόγω βροχής βλέπουμε ότι οι καμπύλες είναι παρόμοιες. Επομένως καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι απ'όλα τα φαινόμενα που επικρατούν στη δορυφορική ζεύξη η βροχή είναι το σημαντικότερο και αυτό που προκαλεί τις περισσότερες διαλείψεις. Πρέπει ωστόσο να αναφέρουμε ότι η βροχή είναι ο καθοριστικός παράγοντας εξασθένησης σε αυτές τις συχνότητες, δηλαδή έως τα 50 GHz. Για μεγαλύτερες συχνότητες η εξασθένηση που οφείλεται στην απορρόφηση από τα αέρια της ατμόσφαιρας γίνεται ολοένα και πιο έντονη (εικόνες 5&6) και μάλιστα αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής εξασθένησης στα 60 GHz .

Ανάλογα λοιπόν με τις διαλείψεις στη δορυφορική ζεύξη πρέπει να εφαρμόσουμε κατάλληλες τεχνικές για τον περιορισμό τους. Οι τεχνικές αυτές, το πως λειτουργούν, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους είναι το θέμα που αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] www.satspot.gr " Ιστορία των Δορυφορικών Συστημάτων"
- [2] Α. Δεστούνης «Βέλτιστος Έλεγχος Δορυφορικών Κεραιών Πολλαπλών Δεσμών για Δορυφορικά Δίκτυα Επικοινωνιών στη Ζώνη Ka (20/30 GHz)», Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π., 2009
- [3] Π. Γ. Κωττής, Χ. Ν. Καψάλης, «Δορυφορικές Επικοινωνίες» 2η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2006
- [4] www.microwaves101.com "Waveguide frequency bands and interior dimensions"
- [5] Α. D. Panagopoulos, P.M. Arapoglou, P.G. Cottis [2004], "Satellite Communications at Ku, Ka and V bands, Propagation Impairments and Mitigation Techniques", IEEE Communication Surveys and Tutorials, Vol.6, No.3
- [6] ITU-R Propagation Series, P.676-9, "Attenuation by atmospheric gases", 2012
- [7] ITU-R Propagation Series, P.840-5, "Attenuation due to clouds and fog", 2012
- [8] ITU-R Propagation Series, P.618-10, "Propagation data and prediction methods required for the Design of Earth-space telecommunication systems", 2009
- [9] ITU-R Propagation Series, P.453-9, "The radio refractive index: its formula and refractivity Data", 2003
- [10] ITU-R Propagation Series, P.839-3, "Rain Height Model for Prediction Methods", 2001
- [11] ITU-R Propagation Series, P.837-5, "Characteristics of Precipitation for Propagation Modelling", 2007
- [12] ITU-R Propagation Series, P.838-3, "Specific attenuation model for rain for use in prediction Methods", 2005

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΝΤΙΜΕΤΡΑ ΔΙΑΛΕΙΨΕΩΝ (FADE MITIGATION TECHNIQUES)

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάστηκαν οι κύριοι μηχανισμοί απόσβεσης του σήματος λόγω της ατμόσφαιρας. Για την αντιμετώπιση των διαλείψεων θα μπορούσαμε να εισάγουμε στο σύστημα ένα περιθώριο διαλείψεων. Παρόλα αυτά λόγω των υψηλών τιμών της απόσβεσης για συγκεκριμένο ποσοστό του χρόνου, ένα τέτοιο περιθώριο είτε δε θα ήταν ρεαλιστικό είτε θα οδηγούσε στη σπατάλη των πόρων του συστήματος. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί άλλα αντίμετρα, τα οποία διεθνώς ονομάζονται Fade Mitigation Techniques (FMTs).

Τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα ωστόσο εμφανίζουν στοχαστική συμπεριφορά ως προς τον χρόνο και τον χώρο και επομένως η επιλογή των κατάλληλων αντιμέτρων γίνεται με κριτήριο τη διαθεσιμότητα της δορυφορικής ζεύξης που θέλουμε να έχουμε [1]. Ως διαθεσιμότητα ορίζεται το ποσοστό του χρόνου σε ένα έτος κατά τη διάρκεια του οποίου το ποσοστό λαθών BER (Bit Error Rate) δεν υπερβαίνει ένα κατώφλι. Σε περιπτώσεις που έχουμε υπέρβαση της τιμής του κατωφλίου η ζεύξη τίθεται εκτός λειτουργίας. Στις σύγχρονες δορυφορικές επικοινωνίες επιδιώκουμε 95%-99,9% ή ακόμα και μέχρι 99,99% διαθεσιμότητα ετησίως. Ο λόγος που δεν απαιτούμε 100% διαθεσιμότητα είναι πολύ απλός. Για να έχουμε πλήρη διαθεσιμότητα θα έπρεπε η FMT να αντιμετωπίζει επιτυχώς την χειρότερη διάλεια που εμφανίζεται στο διάστημα του ενός έτους. Όμως η διάλεια αυτή καταλαμβάνει χρονικά ένα πολύ μικρό μέρος του έτους (λιγότερο του 0,1% ή 0,01%) και επομένως θα οδηγηθούμε σε υπερεκτίμηση των διαλείψεων και εφαρμογή πιο ισχυρής FMT και κατά συνέπεια δε θα έχουμε βέλτιστη αξιοποίηση της δορυφορικής ζεύξης.

Για την βελτίωση της διαθεσιμότητας οι Fade Mitigation Techniques εκτελούν μια σειρά από λειτουργίες [2]. Οι λειτουργίες αυτές επικεντρώνονται σε τρία κομμάτια τα οποία είναι:

- η παρακολούθηση της ζεύξης με συνεχείς μετρήσεις των συνθηκών μετάδοσης.

- η εκτίμηση της συμπεριφοράς και της διάρκειας της επόμενης κατάστασης του δορυφορικού διαύλου.
- η αλλαγή των παραμέτρων του συστήματος με βάση την προηγούμενη πρόβλεψη.

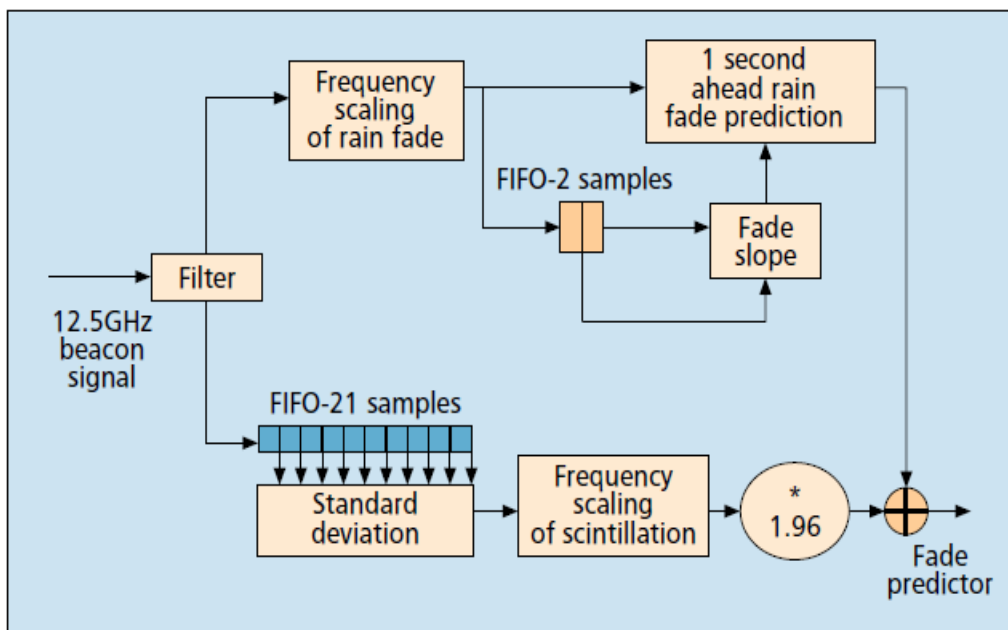
Η παρακολούθηση της ζεύξης πραγματοποιείται με μέτρηση του BER στην έξοδο του δέκτη από την οποία προσδιορίζεται ο αντίστοιχος λόγος ενέργειας ψηφίου προς πυκνότητα θορύβου E_b/n_0 . Ο έμμεσος αυτός τρόπος διαπίστωσης της συμπεριφοράς του διαύλου απαιτεί την παρατήρηση μεγάλου πλήθους λαθών προτού καθοριστεί το μέγεθος των διαλείψεων και έχει ως συνέπεια την καθυστερημένη ενεργοποίηση του κατάλληλου FMT για την αντιμετώπισή τους. Ένα άλλο μειονέκτημα αυτής της έμμεσης μεθόδου είναι ότι το ποσοστό των λαθών αυξάνεται πολύ απότομα με την επιδείνωση των συνθηκών διάδοσης. Ως εκ τούτου η άμεση εκτίμηση των διαλείψεων με μέτρηση του CNR (Carrier to Noise ratio) είναι η ενδεδειγμένη μέθοδος.

Όσον αφορά την εκτίμηση και πρόβλεψη της συμπεριφοράς του διαύλου, η πραγματοποίησή τους σε πραγματικό χρόνο είναι εξαιρετικά δύσκολη. Ο λόγος είναι η τυχαιότητα που χαρακτηρίζει τα διάφορα φυσικά φαινόμενα της ατμόσφαιρας και τα στατιστικά μεγέθη στα οποία βασίζονται τα μοντέλα πρόβλεψης αναφέρονται σε ετήσια βάση. Συνεπώς η σύγχρονη τάση στις μεθόδους πρόβλεψης είναι η αξιοποίηση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών των διαλείψεων, όπως το βάθος, η διάρκεια ή η περιβάλλουσα των διαλείψεων, ο ρυθμός επανάληψης των διαλείψεων σε συνδυασμό με κατάλληλες δειγματοληπτικές μετρήσεις του διαύλου.

Ένα κρίσιμο σημείο της εκτίμησης της απόσβεσης σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια της επόμενης κατάστασης είναι η ικανότητα να διαχωρίζονται τα διαφορετικά φαινόμενα διάδοσης που προκαλούν διαλείψεις ώστε να εφαρμοσθεί το κατάλληλο FMT. Προς αυτή την κατεύθυνση μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το φασματικό διαχωρισμό των παραγόντων που επηρεάζουν τη διάδοση. Σύμφωνα λοιπόν με αυτόν το διαχωρισμό, το χαμηλόσυχο μέρος του φάσματος της απόσβεσης σχετίζεται με την απορρόφηση από τα αέρια, το μέσο φασματικό μέρος σχετίζεται με την εξασθένηση λόγω νεφώσεων και βροχοπτώσεων και το υψηλόσυχο μέρος σχετίζεται με τους σπινθηρισμούς. Επομένως ο αναγκαίος διαχωρισμός μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλο φίλτράρισμα.

Επιπρόσθετα, σε πολλά από τα προτεινόμενα μοντέλα πρόβλεψης βραχείας διάρκειας, πραγματοποιείται αναγωγή συχνότητας. Αυτή εφαρμόζεται όταν η εξασθένιση λόγω βροχής έχει μετρηθεί σε διαφορετική συχνότητα από τη συχνότητα της υπό εξέταση δορυφορικής ζεύξης. Μια χαρακτηριστική εφαρμογή της αναγωγής συχνότητας είναι όταν μετρήσεις απόσβεσης που πραγματοποιούνται στη κάτω ζεύξη χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της απόσβεσης της άνω ζεύξης.

Στην εικόνα 30 [1] που ακολουθεί φαίνονται όλες οι διαδικασίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως για την εκτίμηση/πρόβλεψη των διαλείψεων να είναι ενσωματωμένες σε έναν βρόχο ελέγχου. Αν και το δορυφορικό σύστημα που αφορά η εικόνα λειτουργεί στη Ka ζώνη, το σήμα-φάρος που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση/πρόβλεψη των διαλείψεων λόγω διάδοσης του δορυφορικού σήματος στην ατμόσφαιρα είναι συχνότητας 12.5 GHz. Το σήμα αρχικά φιλτράρεται έτσι ώστε να διαχωρίσουμε τις αποσβέσεις που οφείλονται στη βροχή και αυτές που οφείλονται σε σπινθηρισμούς. Ύστερα ακολουθεί αναγωγή συχνότητας ώστε οι μετρήσεις μας να αναχθούν στην περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας.



Εικόνα 30: Βρόχος ελέγχου για την πρόβλεψη των διαλείψεων

Τα FMTs διακρίνονται στις εξής τρεις κύριες κατηγορίες:

- ✓ *Τεχνικές ελέγχου του EIRP*
- ✓ *Προσαρμοστικές τεχνικές μετάδοσης*
- ✓ *Διαφορική προστασία*

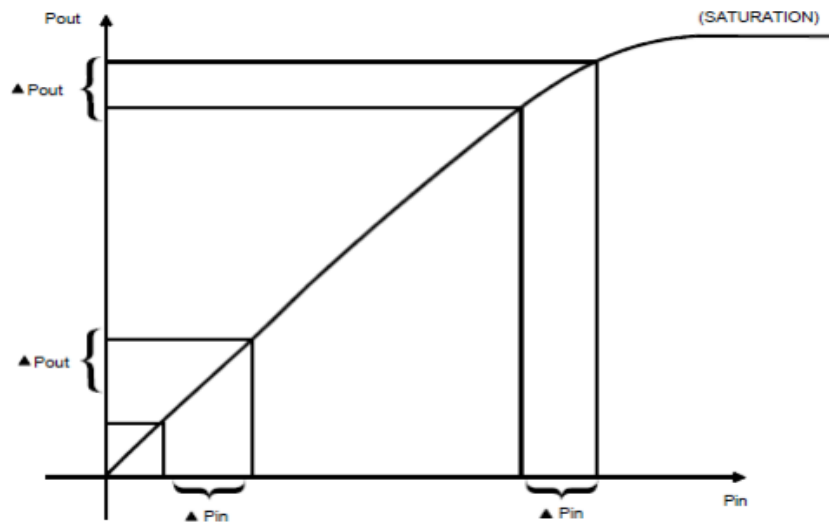
2.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ EIRP

Η πρώτη κατηγορία είναι οι τεχνικές ελέγχου του EIRP. Το EIRP είναι το γινόμενο της ισχύος και του κέρδους της κεραίας εκπομπής και οι τεχνικές αυτές αφορούν είτε τον έλεγχο της ισχύος εκπομπής είτε τον έλεγχο της κατευθυντικότητας της κεραίας ώστε να αντισταθμίσουμε τις απώλειες από τη διάδοση των κυμάτων στην ατμόσφαιρα. Ο έλεγχος της ισχύος ουσιαστικά είναι η ρύθμιση της ισχύος που εκπέμπει η κεραία και διακρίνεται στον έλεγχο ισχύος της άνω ζεύξης και στον έλεγχο ισχύος της κάτω ζεύξης. Ο έλεγχος της κατευθυντικότητας της κεραίας είναι η ρύθμιση του προσανατολισμού και του κατευθυντικού κέρδους της κεραίας. Σχετικά με τον έλεγχο ισχύος πρέπει να αναφέρουμε ότι η ρύθμιση της ισχύος γίνεται στον πομπό, βάσει είτε εκτιμήσεων από πρόσφατες μετρήσεις της λαμβανόμενης ισχύος (έλεγχος ισχύος ανοιχτού βρόχου) είτε αναφορών από τον δέκτη που στηρίζονται σε μετρήσεις επί του δορυφορικού διαύλου (έλεγχος ισχύος κλειστού βρόχου). Στα συστήματα κλειστού βρόχου , ο πομπός αποφασίζει για αλλαγή της ισχύος εκπομπής ή όχι βασιζόμενος σε ανατροφοδότηση πληροφοριών από τον δέκτη και όχι μόνο σε εκτιμήσεις της κατάστασης του διαύλου. Αν και η δεύτερη μέθοδος είναι πιο αποδοτική, η μεγάλη καθυστέρηση που εισάγει κατά τη μετάδοση των πληροφοριών, ειδικά σε δορυφορικά συστήματα που χρησιμοποιούν γεωστατικούς δορυφόρους (GEO satellites), αποτελεί σημαντικό ανασταλτικό παράγοντα για την εφαρμογή της και συνεπώς υιοθετείται ο έλεγχος ανοιχτού βρόχου.

2.1.1 Έλεγχος Ισχύος Άνω Ζεύξης

Εάν ο πομπός είναι επίγειος σταθμός βάσης τότε έχουμε έλεγχο ισχύος της άνω ζεύξης ULPC (Uplink Power Control)[1]. Με την μέθοδο ULPC ρυθμίζουμε την εκπεμπόμενη ισχύ ώστε η πυκνότητα ισχύος στον δορυφόρο να μην υπολείπεται μιας συγκεκριμένης στάθμης. Εφαρμόζοντας τον έλεγχο ισχύος ανοιχτού βρόχου η ρύθμιση της ισχύος εκπομπής του ενισχυτή high power amplifier (HPA) του επίγειου σταθμού βασίζεται σε μετρήσεις της απόσβεσης του διαύλου χωρίς να έχουμε ανατροφοδότηση πληροφοριών από τον δέκτη. Στη περίπτωση των διαφανών δορυφόρων, δηλαδή δορυφόρων που μετατρέπουν τη συχνότητα άνω ζεύξης σε κατάλληλη συχνότητα κάτω ζεύξης χωρίς καμία επεξεργασία του σήματος βασικής ζώνης, η ρύθμιση της ισχύος εκπομπής του επίγειου σταθμού αποσκοπεί στον έλεγχο της ισχύος της άνω και κάτω ζεύξης. Αυτό επιτυγχάνεται αντισταθμίζοντας τις απώλειες στη ζεύξη ανόδου αλλά και πιθανές απώλειες στη ζεύξη καθόδου.

Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η δημιουργία παρεμβολής σε γειτονικό δορυφόρο (Adjacent Satellite Interference) όταν για την αντιμετώπιση των διαλείψεων η ισχύς εκπομπής του επίγειου σταθμού αυξάνεται τόσο που γίνεται υπολογίσιμη ως παρεμβολή σε γειτονικό δορυφόρο άλλου συστήματος. Η αλματώδης ανάπτυξη των δορυφορικών επικοινωνιών τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει σε συμφόρηση στη γεωστατική τροχιά στην οποία βρίσκονται οι περισσότεροι τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι. Λόγω αυτής της συμφόρησης οι δορυφόροι διαχωρίζονται κατά 2-3 μοίρες και επομένως η παρεμβολή σε γειτονικούς δορυφόρους να αποκτά μεγάλη σημασία. Ένα άλλο μειονέκτημα της ULPC είναι ότι προκαλεί παρεμβολή γειτονικού καναλιού ACI (Adjacent Channel Interference) δηλαδή ένα μέρος της ενέργειας του σήματος "πέφτει" σε γειτονικά κανάλια. Για να αντισταθμίσουμε τις διαλείψεις πρέπει να αυξήσουμε την εκπεμπόμενη ισχύ που σημαίνει τη μείωση του περιθωρίου ισχύος εξόδου του ενισχυτή HPA και επομένως τη λειτουργία του στη μη γραμμική περιοχή. Ως περιθώριο ισχύος εξόδου ορίζουμε τη διαφορά της ισχύος που αποδίδει ο ενισχυτής από τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να αποδώσει. Συνέπεια της λειτουργίας στην μη γραμμική περιοχή είναι η εμφάνιση προϊόντων αναδιαμόρφωσης με επακόλουθο τη μερική αποκατάσταση των δευτερευόντων λοβών του φάσματος του δορυφορικού σήματος οι οποίοι με τη σειρά τους προκαλούν παρεμβολή σε γειτονικά κανάλια. Οι περιοχές λειτουργίας φαίνονται στην εικόνα 31 [3].



Εικόνα 31: Χαρακτηριστική εισόδου-εξόδου ενισχυτή

Στη γραμμική περιοχή του ενισχυτή, η ισχύς εξόδου αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της ισχύος εισόδου. Στη μη γραμμική περιοχή, ο ρυθμός, που αυξάνεται η ισχύς εξόδου, είναι μικρότερος και στην περιοχή κόρου (saturation) είναι μηδενικός. Στη περιοχή κόρου δηλαδή η ισχύς εξόδου είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τη ισχύ εισόδου.

2.1.2 Έλεγχος Ισχύος Κάτω Ζεύξης

Αν ο πομπός είναι ο δορυφόρος, τότε έχουμε έλεγχο ισχύος της κάτω ζεύξης DLPC (Downlink Power Control). Η υλοποίηση της DLPC είναι πολύ δύσκολη λόγω των περιορισμών στο μέγεθος και το βάρος του δορυφόρου και της περιορισμένης δυνατότητας ελέγχου της λειτουργίας του δορυφόρου. Το μέγεθος και το βάρος του περιορίζουν την δυνατότητα χρήσης ενισχυτών οδεύοντος κύματος TWTA (Travelling Wave Tube Amplifier) οι οποίοι θα πρέπει να λειτουργούν υπό μικρό περιθώριο ισχύος. Εκτός από την πιθανή παρεμβολή σε γειτονικά κανάλια, η τεχνική DLPC μπορεί να προκαλέσει παρεμβολή ενδοδιαμόρφωσης λόγω της μη γραμμικής ενίσχυσης του πολλαπλών φερόντων ενός δορυφορικού σήματος. Για παράδειγμα, στην περίπτωση χρησιμοποίησης σχημάτων πολλαπλής προσπέλασης που στηρίζονται στην πολυπλεξία διαφορετικών σημάτων σε γειτονικά κανάλια στο πεδίο της συχνότητας, FDMA (Frequency Division Multiple Access), η ύπαρξη

προϊόντων ενδοδιαμόρφωσης δημιουργεί πρόσθετα προβλήματα. Συγκεκριμένα, όταν η ενίσχυση του σήματος γίνεται μετά τη σύζευξη των επιμέρους καναλιών, γεγονός που αποτελεί απλή, ευέλικτη και ως εκ τούτου συνηθισμένη προσέγγιση, απαιτείται η λειτουργία του ενισχυτή στη γραμμική περιοχή για την αποφυγή δημιουργίας προϊόντων ενδοδιαμόρφωσης, γεγονός που περιορίζει ακόμα περισσότερο τις δυνατότητες σε ό, τι αφορά την ισχύ εξόδου [4]. Αντιθέτως στα συστήματα πολλαπλής προσπέλασης διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA) χρησιμοποιείται μόνο ένα φέρον και επομένως προτιμάται. Ένα ακόμα μειονέκτημα της μεθόδου DLPC είναι ότι πιθανή αύξηση της ισχύος εκπομπής του δορυφόρου μπορεί να προκαλέσει παρεμβολή σε φασματικά επικαλυπτόμενα συστήματα, συμβάλλει δηλαδή στη δημιουργία διασυστημικής παρεμβολής [1].

2.1.3 Διαμόρφωση Κατευθυνόμενης Δέσμης

Οι τεχνικές ULPC & DLPC αφορούν τον έλεγχο της ισχύος της κεραίας εκπομπής, ο έλεγχος όμως του EIRP γίνεται και με κατάλληλη ρύθμιση της κατευθυντικότητας της κεραίας, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω. Τέτοια τεχνική είναι η διαμόρφωση κατευθυνόμενης δέσμης SBS (Spot Beam Shaping). Αν και με την τεχνική αυτή μειώνεται η περιοχή που καλύπτει η κεραία, η κατευθυντικότητά της αυξάνεται, άρα επιτυγχάνουμε μεγαλύτερο EIRP στην νέα περιοχή. Παρόλα αυτά μέσω πολλαπλών δεσμών ακτινοβολίας μπορούμε να έχουμε αύξηση του EIRP και η κάλυψη του δορυφόρου να παραμένει σταθερή. Η SBS βασίζεται στην κατάλληλη διαμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας της δορυφορικής κεραίας ώστε ακόμα και σε περίπτωση βροχής, η ισχύς λήψης στην περιοχή κάλυψης να είναι περίπου σταθερή. Από τον τρόπο λειτουργίας της SBS προκύπτουν δύο πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα. Το πρώτο είναι ότι την βελτίωση του EIRP την πετυχαίνουμε με αύξηση του κατευθυντικού κέρδους της κεραίας, δηλαδή ρύθμιση του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας και όχι με μείωση του περιθωρίου διαλείψεων και επομένως δεν έχουμε προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης. Ένα δεύτερο πλεονέκτημα είναι ότι δε χρειάζονται μετρήσεις και εκτιμήσεις της απόσβεσης, το οποίο είναι και το πιο δύσκολο σε ένα βρόγχο ελέγχου του FMT εφόσον η συγκεκριμένη τεχνική υλοποιείται για μία συνολική περιοχή κάλυψης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται στιγμιαία μετεωρολογικά δεδομένα από

μετεωρολογικούς δορυφόρους ή δεδομένα μικρής διάρκειας πρόβλεψης, τα οποία και ονομάζονται nowcasting. Η συγκεκριμένη τεχνική αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη τεχνική αντιμετώπισης των διαλείψεων για τα μελλοντικά δορυφορικά συστήματα και οι περιορισμοί που επιβάλλονται σχετίζονται με τη δυνατότητα μορφοποίησης του διαγράμματος ακτινοβολίας χωρίς να επηρεάζεται η κάλυψη των περιοχών που μας ενδιαφέρουν.

2.2 ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Η δεύτερη κατηγορία των FMTs είναι οι προσαρμοστικές τεχνικές μετάδοσης. Οι τεχνικές αυτές είναι αντίμετρα που στηρίζονται στην αλλαγή του τρόπου επεξεργασίας ή μετάδοσης των σημάτων όταν έχουμε διαλείψεις. Οι τεχνικές αυτές κάνουν χρήση κοινών τηλεπικοινωνιακών πόρων αφού οι διάφοροι τύποι επεξεργασίας του σήματος είναι διαθέσιμοι σε περισσότερους από έναν επίγειους σταθμούς. Όπως και οι τεχνικές ελέγχου του EIRP έτσι και οι προσαρμοστικές τεχνικές διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, την ιεραρχημένη κωδικοποίηση (Hierarchical Coding) HC, την ιεραρχημένη διαμόρφωση (Hierarchical Modulation) HM, και την ελάττωση του ρυθμού μετάδοσης (Data Rate Reduction) DRR.

2.2.1 Ιεραρχημένη Κωδικοποίηση

Γενικά η κωδικοποίηση στηρίζεται στην προσθήκη πλεοναζόντων ψηφίων στην πληροφορία για βελτιώσουμε το BER, μέσω της ανίχνευσης και διόρθωσης εσφαλμένων bit. Όσο αυξάνεται το πλήθος των πλεοναζόντων ψηφίων τόσο μειώνεται η πιθανότητα λάθους, με ταυτόχρονη όμως, αύξηση του απαιτούμενου εύρους ζώνης. Ουσιαστικά δηλαδή έχουμε ανταλλαγή εύρους ζώνης και ισχύος ώστε να πετύχουμε το επιθυμητό BER.

Η κωδικοποίηση προσφέρει δύο πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα στα δορυφορικά συστήματα. Το πρώτο είναι πως μια υπηρεσία που χωρίς κωδικοποίηση χρειαζόταν μία ελάχιστη τιμή (κατώφλι) σηματοθορυβικού λόγου SNR, με κωδικοποίηση η υπηρεσία αυτή υποστηρίζεται σε μικρότερο SNR δηλαδή με μικρότερη ισχύ σήματος. Το δεύτερο πλεονέκτημα της κωδικοποίησης είναι, ότι λόγω

της μείωσης του BER που προσφέρει, μπορούν να υποστηριχθούν πιο απαιτητικές υπηρεσίες, δηλαδή υπηρεσίες με μεγάλο QoS (Quality of Service).

Στις δορυφορικές επικοινωνίες η κωδικοποίηση εφαρμόζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε η ανίχνευση και η διόρθωση σφαλμάτων να γίνεται στο δέκτη χωρίς αυτός να προσφεύγει σε κάποιας μορφής ανάδραση από τον πομπό[3]. Η κωδικοποίηση αυτού του τύπου ονομάζεται πρόσθια διόρθωση λαθών (Forward Error Correction, FEC) και επιτρέπει τη δυνατότητα αυτόματης διόρθωσης σφαλμάτων. Μια άλλη μέθοδος κωδικοποίησης για τη διόρθωση λαθών είναι η αυτόματη αίτηση επανεκπομπής (Automatic Repeat Request, ARQ). Με αυτή τη μέθοδο επιτυγχάνεται η διόρθωση λαθών με την επανεκπομπή όλων των blocks των λανθασμένων ψηφίων και χρησιμοποιείται κυρίως σε δίκτυα δεδομένων VSAT.

Οι κώδικες διόρθωσης λαθών αρχικά σχεδιάστηκαν για την καταπολέμηση λαθών ανεξάρτητων και διεσπαρμένων κατά τυχαίο τρόπο μέσα στην ακολουθία ψηφίων και οφείλονται κυρίως στο θερμικό θόρυβο[2]. Σε δορυφορικά συστήματα που λειτουργούν σε συχνότητες μεγαλύτερες των 10GHz, τα λάθη οφείλονται κυρίως στις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, έχουν παροξυσμικό χαρακτήρα και δεν είναι ανεξάρτητα. Επομένως, η διαθεσιμότητα και η ποιότητα υπηρεσιών μιας ζεύξης μπορεί να διατηρηθεί μεταβάλλοντας τη διορθωτική ικανότητα κωδικών που αντιμετωπίζουν τα λάθη αυτά. Μία τεχνική κωδικοποίησης που είναι αρκετά αποτελεσματική για τέτοιου είδους λάθη είναι η παρεμβολή ψηφίων (interleaving). Η τεχνική αυτή επιτυγχάνει το άπλωμα των μηνυμάτων στον χρόνο έτσι ώστε τα σφάλματα σε μία κωδικολέξη να είναι ανεξάρτητα και να μην εντοπίζονται περιπτώσεις που ο αριθμός λαθών σε μία κωδικοποιημένη λέξη υπερβαίνει τη διορθωτική ικανότητα του κώδικα.

Σε περιπτώσεις όπου οι διαλείψεις που επιβαρύνουν τη ζεύξη είναι μεγάλες, χρησιμοποιούνται πιο αποδοτικά σχήματα κωδικοποίησης, που προέρχονται από συνδυασμούς συμπαγών και συνελεκτικών κωδικών. Μια σχετικά πρόσφατη κατηγορία κωδικών είναι ο συνδυασμός συνελεκτικών κωδικών και της κωδικοποίησης με παρεμβολή ψηφίων. Οι κώδικες αυτοί, που ονομάζονται και κώδικες turbo, παρέχουν σημαντικό κέρδος κωδικοποίησης και παρόλο που η διαδικασία κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης είναι αργή και πολύπλοκη έχουν αρχίσει να καθιερώνονται σε δορυφορικές εφαρμογές μικρών τερματικών.

Πρέπει να τονιστεί πως η χρήση κωδικοποίησης έχει και κάποιες αρνητικές επιπτώσεις στο σύστημα. Όσο πιο απαιτητικός είναι ο κώδικας που χρησιμοποιούμε τόσο μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και κόστος εισάγει. Οπότε είναι σκόπιμο στις έντονες διαλείψεις, οι οποίες αφορούν ένα μικρό τμήμα του έτους να χρησιμοποιούμε απαιτητικούς κώδικες και για υπόλοιπο μέρος του χρόνου να χρησιμοποιούμε απλούς κώδικες.

2.2.2 Ιεραρχημένη Διαμόρφωση

Η ιεραρχημένη διαμόρφωση μειώνει το λόγο της ενέργειας ψηφίου προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου (E_b/N_o) που απαιτείται για την επίτευξη μιας δεδομένης BER μέσω της μείωσης της φασματικής απόδοσης της ζεύξης ώστε να αντισταθμίσει τη μείωση του SNR που συμβαίνει όταν έχουμε διαλείψεις [1]. Η φασματική απόδοση υποδηλώνει το πόσο καλά χρησιμοποιούμε το διαθέσιμο εύρος ζώνης RF και επιπλέον αποτελεί και έναν έμμεσο δείκτη του ρυθμού μετάδοσης που μπορούμε να πετύχουμε σε αυτό το εύρος ζώνης. Όσο αυξάνεται η φασματική απόδοση αυξάνεται και ο ρυθμός μετάδοσης που μπορούμε να πετύχουμε με το ίδιο SNR.

Σύμφωνα με τον τύπο 49 [2], όταν έχουμε διαλείψεις η ελάττωση της ισχύος του σήματος που παρατηρείται αντιμετωπίζεται με μείωση του απαιτούμενου E_b/n_0 για μία συγκεκριμένη στάθμη BER.

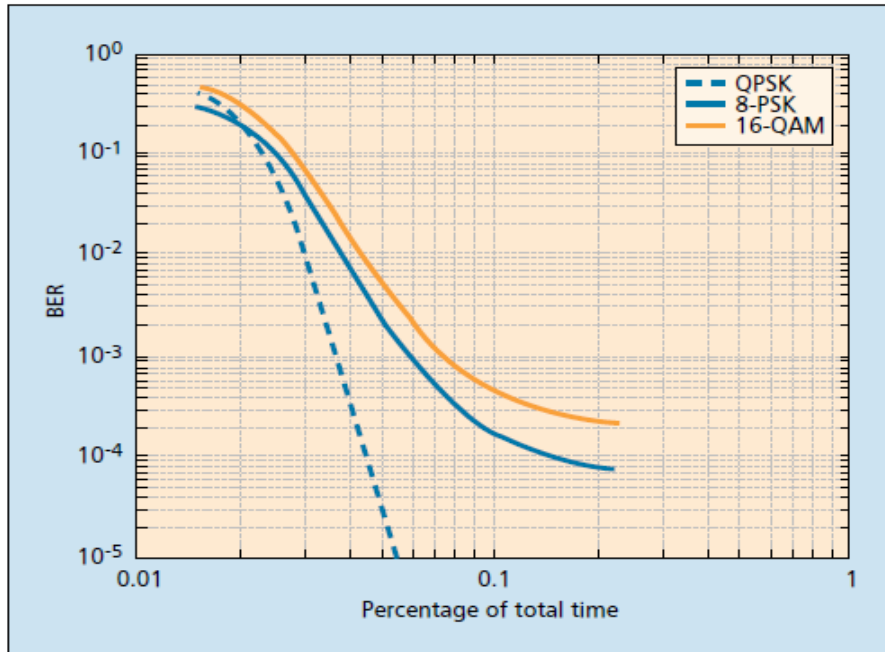
$$R = \frac{B \cdot \frac{S}{N}}{\frac{E_b}{n_0}} \quad (49)$$

Όπου B : Εύρος ζώνης

S/N : Σηματοθορυβικός λόγος

E_b/n_0 : Λόγος ενέργειας ψηφίου προς πυκνότητα θορύβου

Η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται περισσότερο στις δορυφορικές επικοινωνίες είναι η PSK (Phase Shift Keying), δηλαδή η μεταβολή της φάσης του διαμορφωμένου σήματος. Για να αυξήσουμε τη φασματική απόδοση χρησιμοποιούμε MPSK σχήματα διαμόρφωσης όπου M το πλήθος των δυνατών σταθμών. Τέτοια σχήματα διαμόρφωσης είναι τα QPSK, 8-PSK, 16-PSK ή 64-PSK που αντιστοιχούν σε 4, 8, 16 ή 64 στάθμες φάσης αντίστοιχα. Πέρα όμως από αυτά τα σχήματα υπάρχουν και σχήματα διαμόρφωσης που μεταβάλουν ταυτόχρονα τη φάση και το πλάτος του διαμορφωμένου σήματος και ονομάζονται QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Επειδή όμως η ύπαρξη πολλών σταθμών φάσης και πλάτους κάνει τα αντίστοιχα σχήματα διαμόρφωσης πιο ευάλωτα σε σφάλματα, χρησιμοποιούμε τα 16-PSK ή 64-PSK ή 256-QAM σχήματα όταν οι διαλείψεις δεν είναι έντονες και τα BPSK ή QPSK σχήματα όταν οι διαλείψεις είναι έντονες. Η επιβεβαίωση αυτού φαίνεται και στην εικόνα 32 [1], η οποία παρουσιάζει την απόδοση τριών διαφορετικών σχημάτων διαμόρφωσης όταν έχουμε διαλείψεις που οφείλονται σε βροχόπτωση. Επιπρόσθετα οι QPSK και 8PSK, διαθέτουν σχεδόν σταθερή περιβάλλουσα επομένως δεν επηρεάζονται εύκολα από τη πιθανή λειτουργία του ενισχυτή στη μη γραμμική περιοχή, το οποίο συνήθως συμβαίνει σε περιπτώσεις που έχουμε διαλείψεις [5]. Από την άλλη μεριά, τα σχήματα υψηλότερης τάξης απαιτούν τη λειτουργία σε σχεδόν γραμμικά δορυφορικά κανάλια, δηλαδή ο δορυφορικός ενισχυτής θα πρέπει να λειτουργεί με μεγάλο περιθώριο ισχύος εξόδου άρα στη γραμμική περιοχή.



Εικόνα 32: Σύγκριση τριών διαφορετικών σχημάτων διαμόρφωσης για δορυφορική ζεύξη καθόδου που λειτουργεί στα 20 GHz στην Αθήνα

Στην εικόνα 30 ο οριζόντιος άξονας είναι το ποσοστό του συνολικού χρόνου όπου το σύστημα τίθεται εκτός λειτουργίας. Αν λοιπόν έχουμε μια υπηρεσία που απαιτεί το ποσοστό λαθών να είναι το πολύ 10^{-3} παρατηρούμε ότι για QPSK το διάστημα που έχουμε διακοπή υποστήριξης της υπηρεσίας είναι 0.036% του χρόνου, για 8-PSK το αντίστοιχο διάστημα είναι 0.058% και για 16-QAM είναι 0.073%. Επομένως επιβεβαιώνεται ότι σε περιπτώσεις που έχουμε διαλείψεις η χρησιμοποίηση σχημάτων χαμηλότερης διαμόρφωσης είναι απαραίτητη.

Η ιεραρχημένη διαμόρφωση είναι προτιμότερο να υλοποιείται ως ένα FMT κλειστού βρόχου όπου ο επίγειος σταθμός-δέκτης επικοινωνεί με τον σταθμό-πομπό μέσω επίγειας ζεύξης χαμηλού ρυθμού μετάδοσης. Όταν υλοποιείται ως FMT ανοιχτού βρόχου, είναι απαραίτητη η ύπαρξη διαμορφωτών και αποδιαμορφωτών που να μπορούν να προσαρμόζονται στις αλλαγές της διαμόρφωσης που επιτάσσουν οι συνθήκες διάδοσης. Σε κάθε περίπτωση πάντως η χρήση της ιεραρχημένης διαμόρφωσης είναι κατάλληλη για εντοπισμένα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών όπως τα VSAT (Very Small Aperture Terminals).

2.2.3 Ελάττωση Ρυθμού Μετάδοσης

Τέλος η τρίτη κατηγορία των προσαρμοστικών τεχνικών είναι η ελάττωση του ρυθμού μετάδοσης. Όπως δηλώνει και το όνομά της, η τεχνική αυτή μειώνει τον ρυθμό μετάδοσης των ψηφίων πληροφορίας όταν προβλέπεται επιδείνωση των συνθηκών. Κατά την τεχνική αυτή η μείωση του ρυθμού μετάδοσης επιφέρει ένα κέρδος όσον αφορά στον απαιτούμενο λόγο E_b/n_o . Η τεχνική αυτή είναι δίκαιη στην κατανομή των πόρων στους χρήστες συστημάτων πολλαπλής προσπέλασης TDMA ή FDMA σε αντίθεση με την ιεραρχημένη κωδικοποίηση και διαμόρφωση όπου περισσότεροι πόροι διατίθενται για την εξυπηρέτηση χρηστών που αντιμετωπίζουν προβλήματα. Η εφαρμογή της ωστόσο εξαρτάται από το κατά πόσο ορισμένες υπηρεσίες είναι ανθεκτικές στην ελάττωση του ρυθμού μετάδοσης.

2.3 ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

Η τρίτη και τελευταία κατηγορία που διακρίνονται τα αντίμετρα των διαλείψεων είναι η διαφορική προστασία. Οι τεχνικές αυτές είναι οι πιο διαδεδομένες αφού αντιμετωπίζουν καλύτερα την εξασθένηση λόγω βροχής που είναι η κύρια πηγή διαλείψεων στα δορυφορικά συστήματα σε συχνότητες πάνω από 10 GHz. Οι τεχνικές αυτές διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με ποιά χαρακτηριστικά της βροχής εκμεταλλεύονται για την αντιμετώπιση των διαλείψεων. Αναλυτικότερα οι τεχνικές διαφορικής λήψης θέσης (**site diversity-SD**) και διαφορικής λήψης τροχιάς (**orbital diversity-OD**) είναι γεωμετρικές τεχνικές και εκμεταλλεύονται τη χωρική δομή της βροχής, ενώ ο διαφορισμός συχνότητας (**frequency diversity-FD**) και ο διαφορισμός χρόνου (**time diversity-TD**) βασίζονται στη φασματική και χρονική εξάρτηση της βροχής αντίστοιχα. Όσον αφορά τη χωρική δομή της βροχής, αυτή διακρίνεται σε ομοιογενής και ανομοιογενής. Μεγάλη χωρική ομοιογένεια έχουμε σε περιπτώσεις που η βροχή είναι στρωσιγενούς τύπου, όταν δηλαδή η ένταση της βροχής είναι χαμηλή έως μέτρια. Αντίθετα σε περιπτώσεις που η ένταση της βροχόπτωσης είναι ισχυρή τότε έχουμε περιοχές διαμέτρου μερικών χιλιομέτρων (βροχοπυρήνες) στις οποίες έχουμε ανομοιογένεια. Αυτή η ανομοιογένεια στους βροχοπυρήνες εξασφαλίζει τη μικρή συσχέτιση των σημάτων που διαδίδονται σε αυτή την περιοχή. Οι τεχνικές διαφορικής λήψης εκμεταλλεύονται αυτή την

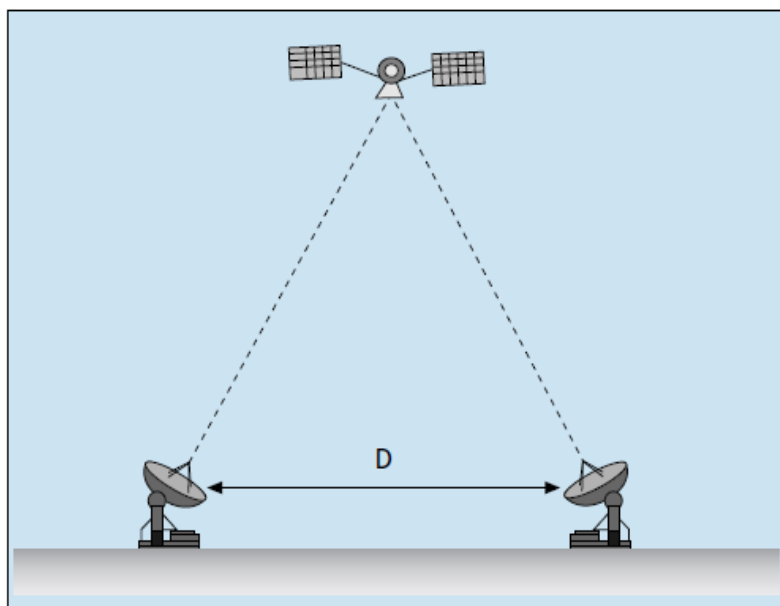
αποσυσχέτιση, με αποτέλεσμα σχεδόν κάθε χρονική στιγμή η εξασθένηση να μην είναι ταυτοχρόνως ισχυρή στις δύο ή περισσότερες εναλλακτικές διαδρομές του σήματος.

Η βελτίωση που προσφέρουν οι τεχνικές διαφορικής προστασίας μπορεί να φανεί από δύο δείκτες, το διαφορικό κέρδος (gain diversity) G και το διαφορικό πλεονέκτημα (diversity improvement) I . Ο πρώτος ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της απόσβεσης κατά την απλή λήψη και της απόσβεσης κατά την διαφορική λήψη, και ο δεύτερος ως ο λόγος του ποσοστιαίου χρόνου κατά την απλή λήψη προς τον ποσοστιαίο χρόνο κατά τη διαφορική λήψη, στον οποίο έχουμε υπέρβαση μιας συγκεκριμένης στάθμης απόσβεσης.

2.3.1 Site Diversity

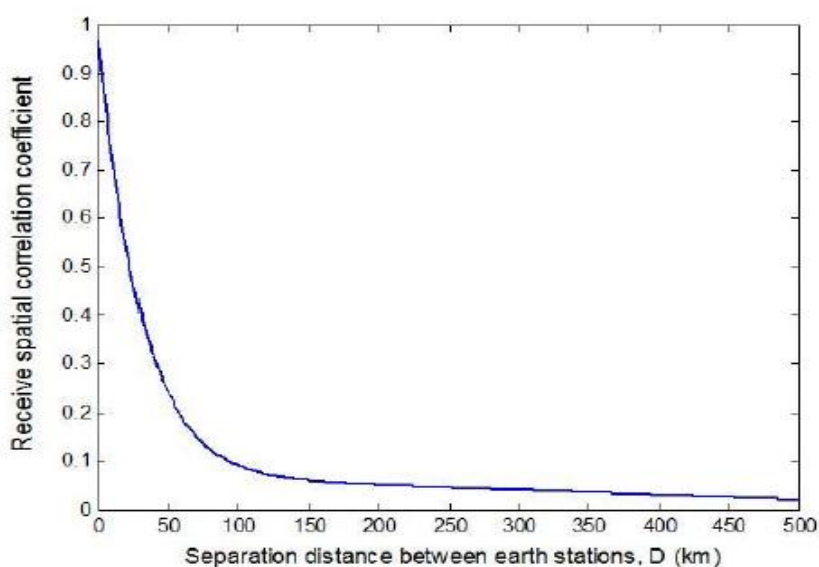
Με τη Site Diversity (εικόνα 33 [1]) έχουμε την ταυτόχρονη λήψη του σήματος από περισσότερους του ενός επίγειους σταθμούς οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με ένα κέντρο ελέγχου (Network Control Center). Στο NCC αποστέλλονται τα σήματα που έχουν ληφθεί από όλους του επίγειους σταθμούς βάσης και στη συνέχεια επιλέγει ένα από τα σήματα με βάση κάποιο κριτήριο, συνήθως προτιμάτε το σήμα με το υψηλότερο SNR.

Η ύπαρξη μεγάλης απόστασης μεταξύ των επίγειων σταθμών είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας αυτής της τεχνικής καθώς εξασφαλίζει τη μεγάλη αποσυσχέτιση των αποσβέσεων, και αποτυπώνεται και στην εικόνα 34 [6], και την επίτευξη υψηλών τιμών διαφορικού κέρδους, που συνήθως είναι οι μεγαλύτερες ανάμεσα σε όλες τις τεχνικές άμβλυνσης των διαλείψεων. Παρά την δεδομένη αποτελεσματικότητα που προσφέρει η διαφορική λήψη θέσης, η απαίτηση για επιπλέον επίγειους σταθμούς βάσης αυξάνει το κόστος υλοποίησής της.



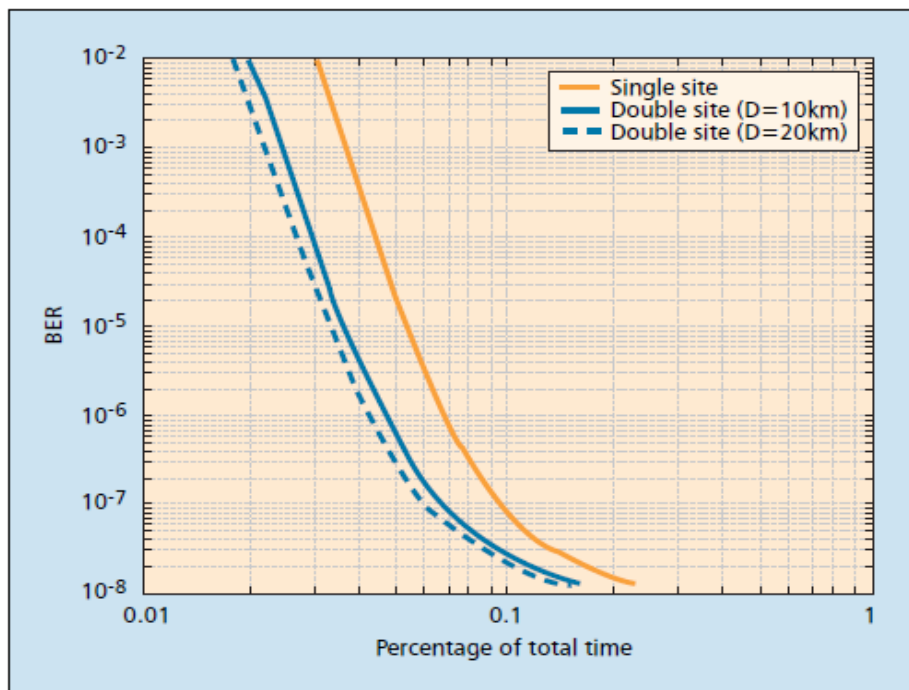
Εικόνα 33: Γεωμετρία σχήματος διπλής διαφορικής λήψης θέσης

Όπως βλέπουμε στην εικόνα 34 που ακολουθεί, όσο αυξάνεται η απόσταση των επίγειων σταθμών μειώνεται ο δείκτης συσχέτισης των διαλείψεων. Ακόμα για αποστάσεις μεγαλύτερες των 100 km ο δείκτης συσχέτισης παραμένει περίπου σταθερός οπότε εάν θέλουμε να έχουμε ασυσχέτιστες διαλείψεις η ελάχιστη απόσταση που πρέπει υπάρχει ανάμεσα στους επίγειους σταθμούς είναι 100 km.



Εικόνα 34: Εξάρτηση του δείκτη συσχέτισης των διαλείψεων

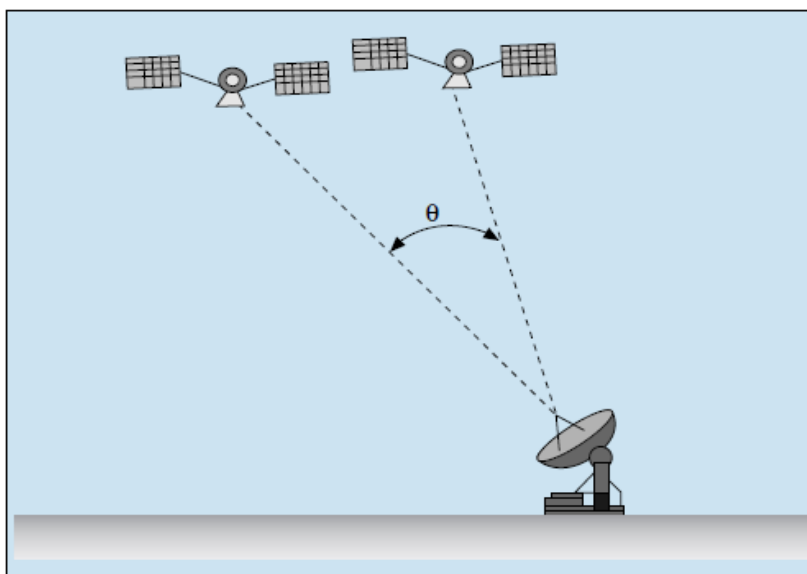
Στην εικόνα 35 [1], βλέπουμε το όφελος από την εφαρμογή site diversity συστημάτων για την αντιμετώπιση των διαλείψεων. Ο οριζόντιος άξονας είναι το ποσοστό του συνολικού χρόνου όπου το σύστημα τίθεται εκτός λειτουργίας. Παρατηρούμε λοιπόν ότι για μέγιστο αποδεκτό BER 10^{-6} το ποσοστό του συνολικού χρόνου που έχουμε διακοπή λειτουργίας είναι 0.069% , 0.048% και 0.041% για σύστημα χωρίς διαφορική λήψη θέσης, για σύστημα διπλής διαφορικής λήψης θέσης με απόσταση των σταθμών στα 10 km και για σύστημα διπλής διαφορικής λήψης θέσης με απόσταση των σταθμών στα 20 km αντίστοιχα. Επομένως η διαφορική λήψη θέσης με μεγάλες αποστάσεις των επίγειων σταθμών αποτελεί σημαντική τεχνική αντιμετώπισης των διαλείψεων



Εικόνα 35: Σύγκριση τριών διαφορετικών site diversity συστημάτων για δορυφορική ζεύξη καθόδου που λειτουργεί στη Κα ζώνη στην Αθήνα

2.3.2 Orbital Diversity

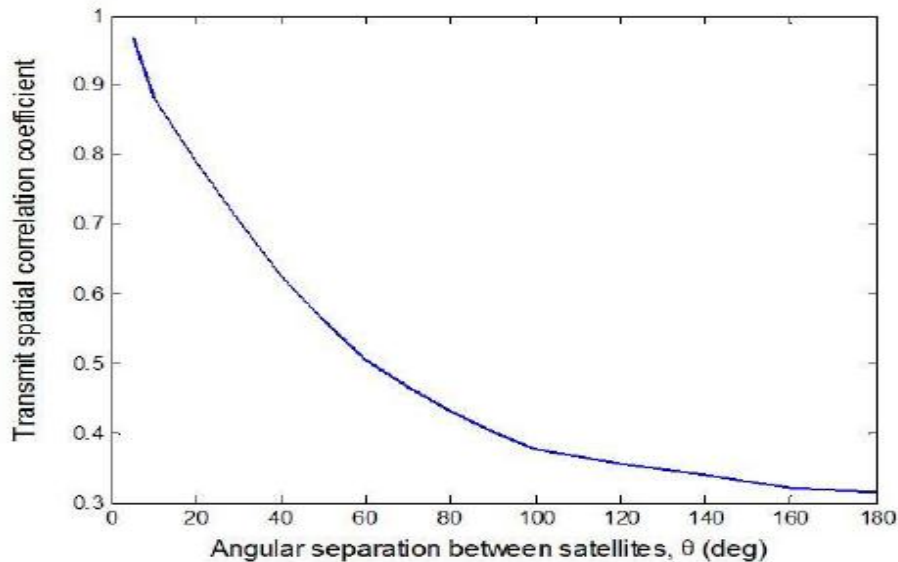
Το προηγούμενο αρνητικό της Site Diversity οδήγησε στην ανάπτυξη μίας άλλης εναλλακτικής, της διαφορικής λήψης τροχιάς (orbital diversity-OD). Στην OD έχουμε έναν μόνο επίγειο σταθμό βάσης και δύο ή τρεις δορυφόρους (εικόνα 36 [1]). Οι δορυφόροι αυτοί δημιουργούν νέες διαδρομές στις οποίες μπορεί να μεταδοθεί το σήμα και ο επίγειος σταθμός επιλέγει τη διαδρομή με το υψηλότερο σηματοθορυβικό λόγο. Η σχεδίαση της OD είναι διαφορετική σε σύγκριση με τη SD. Στην τελευταία οι επιπλέον σταθμοί βάσης στο έδαφος λειτουργούν μονίμως, ενώ στην πρώτη η χρησιμοποίηση των πρόσθετων δορυφόρων γίνεται μόνο όταν η εξασθένηση στη ζεύξη του κύριου δορυφόρου υπερβαίνει κάποιο κατώφλι. Παρόμοια με την SD που μεγάλη απόσταση των σταθμών βάσης εξασφαλίζει ασυσχέτιστες αποσβέσεις στη διαφορική λήψη τροχιάς μεγάλες γωνιακές αποστάσεις των δορυφόρων εξασφαλίζουν την αποσυσχέτιση των διαλείψεων.



Εικόνα 36: Γεωμετρία σχήματος διπλής διαφορικής λήψης τροχιάς

Όπως βλέπουμε στην εικόνα 37[6] που ακολουθεί, όσο αυξάνεται η γωνιακή απόσταση των δορυφόρων μειώνεται ο δείκτης συσχέτισης των διαλείψεων. Μάλιστα για γωνίες μικρότερες των 10° μοιρών η αποσυσχέτιση των διαλείψεων

είναι αδύνατη. Μια ακόμα παρατήρηση που προκύπτει από την σύγκριση με την εικόνα 34 όσο και να αυξήσουμε τη γωνιακή απόσταση των δορυφόρων η αποσυσχέτιση των διαλείψεων είναι πάντα μικρότερη από αυτή που μπορούμε να πετύχουμε με διαφορική λήψη θέσης.



Εικόνα 37: Εξάρτηση του δείκτη συσχέτισης των διαλείψεων σε σχέση με την γωνιακή απόσταση των δορυφόρων

2.3.3 Frequency Diversity

Εκτός όμως από τις παραπάνω τεχνικές διαφορισμού, μπορούμε να εφαρμόσουμε διαφορισμό συχνότητας και χρόνου[1]. Frequency Diversity είναι η τεχνική που επιτρέπει την μετάδοση σε χαμηλότερη ζώνη συχνοτήτων. Η μετάδοση σε χαμηλότερες συχνότητες γίνεται εφικτή με την χρησιμοποίηση κάποιου από τους επαναληπτές του δορυφόρου που λειτουργεί σε αυτή τη ζώνη και αποσκοπεί στον περιορισμό των προβλημάτων που προκαλούν οι διαλείψεις στις υψηλότερες συχνότητες.

2.3.4 Time Diversity

Ο διαφορισμός χρόνου (time diversity) είναι ουσιαστικά η επανεκπομπή των τμημάτων πληροφορίας που έχουν αλλοιωθεί ή έχουν χαθεί. Αν και μοιάζει με την διαδικασία διόρθωσης λαθών ARQ (Automatic Repeat reQuest) η διαφορά τους έγκειται στην περίοδο αναμετάδοσης. Ενώ στα ARQ η περίοδος αναμετάδοσης είναι

σταθερή ή και τυχαία σε κάποιες περιπτώσεις, στην TD η αναμετάδοση γίνεται όταν δεν έχουμε διαλείψεις ή πολύ χαμηλές διαλείψεις. Από το προηγούμενο διαπιστώνουμε εύκολα ότι η εφαρμογή της TD γίνεται σε συστήματα που είναι πολύ ανεκτικά σε πιθανά λάθη.

2.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ / ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΘΕ FMT

Ανακεφαλαιώνοντας αναφέρω επιγραμματικά το θετικό και το αρνητικό κομμάτι κάθε FMT. Οι τεχνικές ULPC και DLPC είναι πολύ ευέλικτες τεχνικές γιατί μπορούν να ρυθμίζουν την ισχύ του επίγειου σταθμού εκπομπής και των δορυφορικών αναμεταδοτών αντίστοιχα, για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ωστόσο οι τεχνικές αυτές αντισταθμίζουν ένα μέρος μόνο των διαλείψεων και συγκεκριμένα όσες οφείλονται στις ελαφρές βροχοπτώσεις και νεφώσεις.

Η τεχνική SBS αντιμετωπίζει τις διαλείψεις σε περιπτώσεις που έχουμε βροχή στρωσιγενούς τύπου σε περιοχές με ακτίνα εκατοντάδων χιλιομέτρων. Το μείον της τεχνικής αυτής είναι ο μη πλήρης έλεγχος του κατευθυντικού κέρδους των κεραιών στον δορυφόρο.

Οι προσαρμοστικές τεχνικές μετάδοσης είναι αντίμετρα που κάνουν χρήση κοινών τηλεπικοινωνιακών πόρων, και είναι πολύ αποτελεσματικές όταν οι επίγειοι σταθμοί που παρουσιάζουν προβλήματα είναι λίγοι, ενώ σε αντίθετη περίπτωση οι κοινοί πόροι εξαντλούνται. Η DRR τεχνική εφαρμόζεται μόνο σε συστήματα που μπορούν να ανεχθούν ελάττωση του ρυθμού μετάδοσης.

Όσον αφορά τις τεχνικές διαφορικής λήψης είναι οι πλέον αποτελεσματικές σε περιπτώσεις που έχουμε έντονες διαλείψεις αλλά και αυτές έχουν τα μειονεκτήματά τους. Η διαφορική λήψη θέσης για παράδειγμα έχει το αρνητικό ότι η υλοποίηση της συνεπάγεται με μεγάλο οικονομικό κόστος, αφού απαιτείται η τοποθέτηση επιπλέον επίγειων σταθμών και επίγειας ζεύξης για την επεξεργασία του πολλαπλού σήματος. Η διαφορική λήψη τροχιάς έχει ως κύριο αρνητικό την ενδεχόμενη διακοπή εξυπηρέτησης κατά τη διάρκεια της μεταγωγής στον εφεδρικό δορυφόρο. Όλα τα παραπάνω βρίσκονται συγκεντρωτικά στον επόμενο πίνακα [2].

FMT	Εύρος διακύμανσης της ετήσιας διαθεσιμότητας (%)	Μέγιστο κέρδος (dB)	Περιοριστικοί παράγοντες
ULPC	0.01 - 10	5 (σε VSAT) 15 (σε HUB)	Το εύρος διακύμανσης της ισχύος εκπομπής των επίγειων σταθμών
DLPC	0.01 - 10	3 (Ενισχυτές TWTA στο δορυφόρο)	Το εύρος διακύμανσης της ισχύος εκπομπής των δορυφόρων
SBS	0.01 - 10	5 (Κεραία δορυφόρου)	Η περιορισμένη μέχρι τώρα έρευνα της μεθόδου
HC/HM	0.01 - 1	10 -15 (Εύρος διακύμανσης της παραμέτρου E_b / n_o)	Οι ταυτόχρονες διαλείψεις σε πολλούς επίγειους σταθμούς
DRR	0.01 - 10	3 - 9	Υπάρχουν εφαρμογές που δεν επιδέχονται αυτή τη μέθοδο
SD	0.01 - 0.1	10 - 30 (Βροχή συνεκτικού τύπου)	Το υψηλό κόστος
OD	0.01 - 1	3 - 10	Η δυσκολία μεταγωγής μεταξύ δορυφόρων
FD	0.01 - 10	30 (Μεταξύ των ζωνών Ka και Ku)	Το υψηλό κόστος

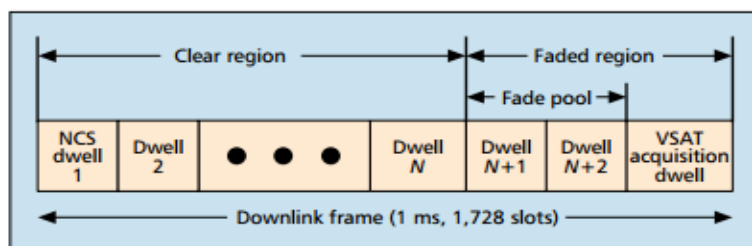
Πίνακας 2: Σύγκριση των διαφόρων μεθόδων FMT βασισμένη στα συμπεράσματα του COST 255

2.5 ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ FMT

Τέλος τα σύγχρονα δορυφορικά συστήματα κάνουν χρήση κάποιου συνδυασμού από τα παραπάνω FMT περιορίζοντας έτσι τα αρνητικά που επιφέρει ξεχωριστά κάθε FMT και επιτυγχάνοντας ακόμα καλύτερη αποτελεσματικότητα στην αντιμετώπιση των διαλείψεων. Ένας συνδυασμός των FMTs αποτελεί η MF-TDMA (Multifrequency TDMA) τεχνική, που χρησιμοποιείται ευρέως σε συνδυασμό με τερματικό πολύ / εξαιρετικά μικρής επιφάνειας (VSAT / USAT) και RCST (Return Channel Satellite Terminal) δίκτυα, είναι μια χαρακτηριστική εφαρμογή των μικτών FMT. Σε γενικές γραμμές, τα προσαρμοστικά MF-TDMA συστήματα υιοθετούν μια προσέγγιση κοινών πόρων, διατηρώντας μια ομάδα χρονικών σχισμών εντός του πλαισίου η οποία και κατανέμεται μεταξύ όλων των επίγειων τερματικών σε περιόδους που η εξασθένιση του σήματος είναι πολύ υψηλή. Αυτές οι χρονικές

σχισμές χρειάζονται έτσι ώστε το σύστημα να προσφέρει χαμηλότερους ρυθμούς κωδικοποίησης και σχήματα διαμόρφωσης χαμηλότερου επιπέδου, και ως εκ τούτου να παρέχουν το επιπρόσθετο περιθώριο διαλείψεων που είναι απαραίτητο. Ως αποτέλεσμα, όταν ένα τερματικό υπόκειται σε διαλείψεις, ένα μέρος των κοινών πόρων διατίθεται, με μια αλλαγή στο σχέδιο καταιγισμών (BTP-Burst Time Plan). Το κέρδος που επιτυγχάνεται με εφαρμογή ενός τέτοιου ευέλικτου συστήματος TDMA είναι το αθροιστικό κέρδος των HC, HM, DRR τεχνικών άμβλυνσης. Συνήθως, ένας κεντρικός επίγειος σταθμός κατανέμει το διαθέσιμο εύρος ζώνης μεταξύ των τερματικών της γης, λαμβάνοντας υπόψη την κίνηση και τα φαινόμενα διάδοσης. Ένα πιθανό πρόβλημα μπορεί να προκύψει αν μια διακοπή σύνδεσης συμβεί στην περίπτωση που οι κοινοί φυσικοί πόροι έχουν ήδη διατεθεί σε άλλους σταθμούς του δικτύου. Ο χρόνος διακοπής εξαρτάται από το κατά πόσο είναι συσχετισμένες μεταξύ τους οι διαλείψεις, με άλλα λόγια να έχουμε υπέρβαση του περιθωρίου διαλείψεων σε πολλές τοποθεσίες ταυτόχρονα. Αυτό αναφέρεται ως διαφορισμός μεγάλης κλίμακας σε αντίθεση με την τεχνική SD που αναφέρθηκε νωρίτερα.

Μία υλοποίηση του προσαρμοστικού TDMA που αξίζει να αναφερθεί είναι το ACTS (Advanced Communication Technology Satellite) πρωτόκολλο για αποσβέσεις λόγω βροχής. Το πρωτόκολλο δοκιμάστηκε για ένα VSAT σύστημα με συχνότητα λειτουργίας στη Ka ζώνη. Προσφέρει επιπλέον περιθώριο διαλείψεων 10dB μειώνοντας στο μισό τους ρυθμούς καταιγισμών πληροφορίας και εφαρμόζοντας FEC κωδικοποίηση με ρυθμό 1/2. Για να ληφθεί η απόφαση, σε πραγματικό χρόνο, για το πότε πρέπει να γίνει η αντιστάθμιση των διαλείψεων χρησιμοποιούνται 2 κατώφλια, το faded και το clear (εικόνα 38 [1]) και καθορίζονται για κάθε VSAT, από μετρήσεις του BER.



Εικόνα 38: Αρχιτεκτονική πλαίσιο στο ACTS

Τρία ακόμα σχήματα TDMA συστημάτων που ενσωματώνουν διάφορα FMT είναι τα FODA/IBEA , DRIFS, and FEEDERS TDMA πρωτόκολλα , με την ανάπτυξη και τον έλεγχο του FODA/IBEA να έγινε στον ITALSAT GSO δορυφόρο. Τα κοινά FMT στα τρία αυτά σχήματα είναι το ULPC για την άνω ζεύξη και η μείωση του ρυθμού κωδικοποίησης και μετάδοσης και στην άνω και στην κάτω ζεύξη. Συγκεκριμένα ο κεντρικός επίγειος σταθμός, που λειτουργεί ως ο διαχειριστής του δικτύου στο NCC, εκτιμά την απόσβεση στη κάτω ζεύξη χρησιμοποιώντας έναν δέκτη, και τη συνολική απόσβεση με έναν έναν εκτιμητή καναλιού στενής ζώνης. Στη συνέχεια ένα modem καθορίζει την ισχύ εκπομπής και το ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας και κωδικοποίησης ανάλογα με τις διαλείψεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A. D. Panagopoulos, P.M. Arapoglou, P.G. Cottis [2004], “Satellite Communications at Ku, Ka and V bands, Propagation Impairments and Mitigation Techniques”, IEEE Communication and Tutorials, Vol.6, No.3
- [2] Π. Γ. Κωττής, Χ. Ν. Καψάλης, «Δορυφορικές Επικοινωνίες» 2η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2006
- [3] Χ. Κ. Καλαλάς, «Αντιστάθμιση Μη Γραμμικών Φαινομένων σε Δορυφορικούς Αναμεταδότες. Εφαρμογή στο πρότυπο DVB-S2», Διπλωματική Εργασία, ΗΜΜΥ ΕΜΠ, 2011
- [4] Α. Δρούγκας, «Περιορισμοί στην επίδοση του TCP σε Δορυφορικές Ζεύξεις και Τεχνικές Βελτιστοποίησης », Διπλωματική Εργασία, ΗΜΜΥ ΕΜΠ, 2004
- [5] Η. Γ. Τσαγλής, «Το Νέο Δορυφορικό Πρότυπο Εκπομπής DVB-S2: Θέματα Ενθυλάκωσης, Σηματοδοσίας και Συμβατότητας», Διπλωματική Εργασία, ΗΜΜΥ ΕΜΠ, 2006
- [6] Pantelis-Daniel Arapoglou, , Konstantinos Liolis, Massimo Bertinelli, , Athanasios Panagopoulos, Panayotis Cottis, and Riccardo De Gaudenzi [2011], “MIMO over Satellite: A Review”, IEEE Communication Surveys and Tutorials, Vol.13, No.1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ TERABIT/s

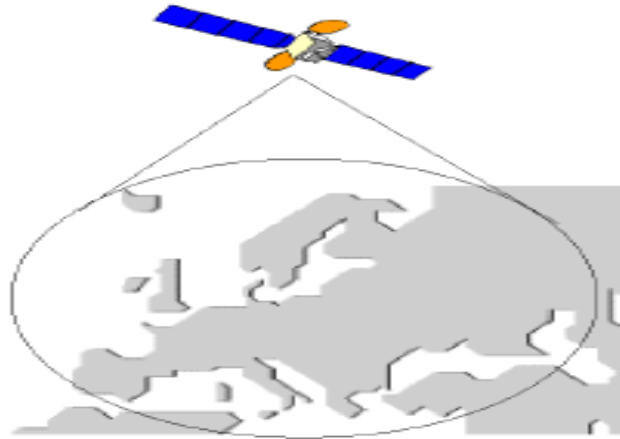
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια η κατεύθυνση που ακολουθούν οι δορυφορικές επικοινωνίες είναι προς την ανάπτυξη δορυφορικών συστημάτων τηλεπικοινωνιών με μεγαλύτερη ισχύ και με μεγαλύτερη κάλυψη, χρησιμοποιώντας τεχνικές πολλαπλών ακτινών [1]. Οι τεχνικές αυτές επιτρέπουν την επαχρησιμοποίηση συχνότητας που οδηγεί σε καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Αυτό το σημαντικό πλεονέκτημα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της χωρητικότητας. Πολλοί είναι αυτοί που αναφέρονται ήδη στην χρησιμοποίηση μέχρι το 2020 δορυφόρων η χωρητικότητα των οποίων θα φτάνει τα Terabit. Η υλοποίηση όμως τέτοιων δορυφορικών συστημάτων προς το παρόν συναντά πρακτικές και τεχνολογικές δυσκολίες στις οποίες θα γίνει αναφορά στην συνέχεια.

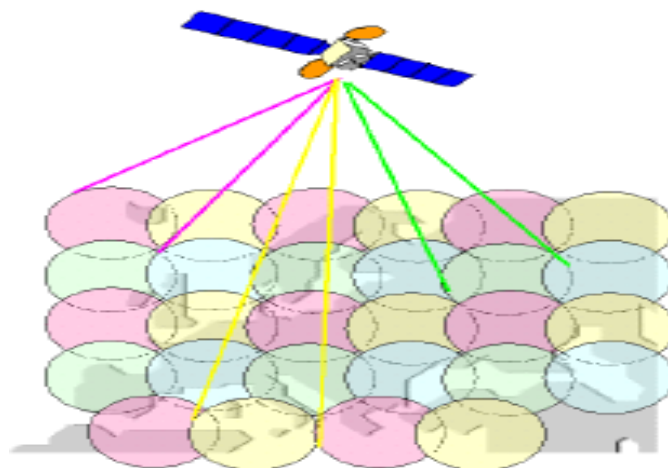
Τα δορυφορικά συστήματα τηλεπικοινωνιών δρουν μέσα σε μια πολύ ανταγωνιστική και απαιτητική αγορά. Οι κατασκευαστές των επίγειων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων προσπαθούν συνεχώς να περιορίσουν το κομμάτι της αγοράς που εξυπηρετούν οι δορυφόροι. Για να αντιμετωπίσουν λοιπόν το ανταγωνισμό, τα δορυφορικά συστήματα πρέπει να περιορίσουν το κόστος των υπηρεσιών τους. Για την μείωση του κόστους των μεταδιδόμενων bit ανά δευτερόλεπτο ένας απλός τρόπος είναι η αύξηση της χωρητικότητας του δορυφόρου και επιτυγχάνεται με αύξηση του εύρους ζώνης και της ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος. Καλύτερη απόδοση των δορυφόρων μπορούμε να πετύχουμε με δύο τεχνικές. Η πρώτη είναι η εφαρμογή κεραιών πολλαπλών ακτίνων (multi beam) με επαχρησιμοποίηση συχνότητας και αποφέρει την αύξηση του εύρους ζώνης (Εικόνα 39 [1]). Η δεύτερη τεχνική είναι η τοποθέτηση επαναληπτών μεγάλης ισχύος και προσφέρει στο σύστημα μεγαλύτερη φασματική απόδοση.

Οι τεχνικές αυτές δημιούργησαν αρχικά προσδοκίες και υστέρησαν αποτέλεσαν την αρχή για την ανάπτυξη δορυφόρων που λειτουργούν στις υψηλές ζώνες συχνοτήτων όπως η Ka. Τέτοια παραδείγματα δορυφόρων είναι ο spaceway δορυφόρος της Boeing ο οποίος εξασφαλίζει κάλυψη πολλαπλών ακτίνων (multi

beam) πάνω από τις ΗΠΑ και έχει απόδοση που ξεπερνά τα 10 Gbps. Η Eutelsat σχεδιάζει δορυφόρο που θα λειτουργεί στην Ka ζώνη, θα καλύπτει την Ευρώπη με 80 ακτίνες και η απόδοσή του θα φτάνει τα 70 Gbps .



(α)



(β)

Εικόνα 39: Περιοχή κάλυψης από δορυφορικό σύστημα α) με μία ακτίνα β) με πολλαπλές ακτίνες (multi beam) και επαναχρησιμοποίηση συχνότητας

Σήμερα οι δορυφόροι που χρησιμοποιούνται χαρακτηρίζονται από χωρητικότητα που φτάνει τα 10 Gb/s και το βάρος τους ανέρχεται στους 6 τόνους [2]. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν στις C και Ku ενώ στην Ka ζώνη ,που χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο, επιστρατεύονται οι τεχνικές πολλαπλών ακτίνων (multi beam), με λιγότερο από 100 ακτίνες ανά δορυφόρο. Η επόμενη γενιά

δορυφορικών συστημάτων αναμένεται να εμφανιστεί το 2015 ή λίγο αργότερα και θα χαρακτηρίζεται από δορυφόρους με χωρητικότητα που θα αγγίζει τα 100 Gb/s, το βάρος τους θα είναι περίπου το ίδιο και θα χρησιμοποιούν μεγαλύτερο αριθμό ακτίνων. Μετά από την γενιά αυτή θα ακολουθήσουν τα συστήματα χωρητικότητας της τάξης των Terabit. Η προσπάθεια για μεγαλύτερες χωρητικότητες αποσκοπεί κυρίως στην εξυπηρέτηση δύο υπηρεσιών, των Broadcast Satellite Service (BSS) και της High-Density Fixed Satellite Service (HD-FSS), η οποία αφορά την αγορά της γρήγορης πρόσβασης στο διαδίκτυο από δορυφόρο [1].

Η ανάγκη για αύξηση της χωρητικότητας των Broadcast Satellite Services προκύπτει από τρεις λόγους. α) τη πρόσφατη εμφάνιση της τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας (High Definition Television / HD-TV) , η οποία απαιτεί αρκετά μεγάλο ρυθμό μετάδοσης, β) η αύξηση των καναλιών στα οποία πρέπει να γίνει μετάδοση, γ) η βελτίωση της χωρητικότητας των hot spots. Με τον όρο hot spot εννοούμε ένα σημείο στο οποίο είναι στραμμένος μεγάλος αριθμός δορυφορικών πιάτων. Οι λύσεις λοιπόν για αυτές τις υπηρεσίες είναι σήματα υψηλής φασματικής απόδοσης και η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων όταν έχουμε κάλυψη από πολλαπλές ακτίνες (multi beam satellite).

Όσον αφορά την Broadband Fixed Satellite Service, η αύξηση της χωρητικότητας είναι αναγκαία ώστε τα δορυφορικά συστήματα τηλεπικοινωνιών να πετύχουν χαμηλό κόστος bit ανά δευτερόλεπτο και με αυτό το τρόπο να διατηρήσουν και να προσελκύσουν νέους χρήστες. Επειδή η πρόσβαση στο διαδίκτυο από δορυφόρο είναι νέα υπηρεσία για να γίνει κερδοφόρα πρέπει ο δορυφόρος να έχει πολύ υψηλή χωρητικότητα. Πέρα τούτου όμως μπορούμε να πούμε ότι η ευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο αποτελεί υπηρεσία όπου η χρησιμοποίηση δορυφόρων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και συμφέρουσα σε αντίθεση με τα επίγεια συστήματα όπου το κόστος για την παροχή υπηρεσιών σε συγκεκριμένες περιοχές αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα. Οι λύσεις και για αυτές τις υπηρεσίες είναι σήματα υψηλής φασματικής απόδοσης και η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων όταν έχουμε κάλυψη από πολλαπλές ακτίνες

Για το 2012 η Cisco έχει προβλέψει ότι οι απαιτήσεις από το διαδίκτυο θα ανέρχονται στα 104 Peta bytes ανά δευτερόλεπτο για την Ευρώπη, τιμή δέκα φορές μεγαλύτερη από τη διαδικτυακή κίνηση (internet trafic) το 2007 [2]. Μέχρι το 2013 το μέσο διαθέσιμο εύρος για ένα νοικοκυριό θα είναι 500GB ανά μήνα το οποίο αντιστοιχεί σε 30 Mb/s για όλους τους χρήστες της οικίας. Η τιμή αυτή είναι πολύ

μεγαλύτερη από τα 2 Mb/s σε κάθε χρήστη που ισχύει σήμερα. Σε αυτούς τους ρυθμούς τα επίγεια συστήματα δεν θα μπορούν, από οικονομική άποψη, να καλύψουν όλο τον πληθυσμό και ως εκ τούτου η ευρυζωνική κάλυψη από δορυφόρο θα είναι επικρατέστερη στις μελλοντικές αρχιτεκτονικές συστημάτων διαδικτυακής πρόσβασης.

Μέχρι πρόσφατα οι Fixed Satellite Service δορυφόροι έχουν σχεδιαστεί ώστε να μπορούν να εξυπηρετούν αγορές οι απαιτήσεις των οποίων διαφέρουν μεταξύ τους. Αυτά τα συστήματα όμως δεν είναι ιδανικά για την κάλυψη ευρυζωνικών υπηρεσιών, είναι περιορισμένα από πλευρά ισχύος και τείνουν στο να έχουν περιορισμένο εύρος ζώνης. Η σχεδίαση αυτή αποτελεί και το τροχοπέδη στην προσπάθεια των δορυφορικών συστημάτων να προσφέρουν υπηρεσίες με κόστος παρεμφερές με εκείνο των επίγειων συστημάτων. Ωστόσο καλύπτουν μεγάλες περιοχές γεγονός που υπερισχύει σε broadcast & multicast υπηρεσίες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε περιοχές με χαμηλή πυκνότητα χρηστών, όπως οι αγροτικές περιοχές. Το κόστος ανά bit παραμένει υψηλό και είναι πιθανό οι χρήστες τέτοιων περιοχών να πληρώσουν λίγο παραπάνω.

Η τρέχουσα ευρυζωνική ζήτηση εξυπηρετείται με επίγεια τοπικά συστήματα βρόγχων όπως το ADSL 2, αλλά καθώς οι απαιτήσεις ξεπερνούν τα 10 Mb/s μόνο το 40% των νοικοκυριών στη Μεγάλη Βρετανία θα μπορούν να εξυπηρετηθούν από επίγεια συστήματα. Η χρησιμοποίηση επίγειων ασύρματων δικτύων δεν προσφέρει κάποιο όφελος αφού και αυτά υποφέρουν από μη ομοιόμορφη κατανομή του φάσματος.

Μελέτη από την IDATE [3] το 2009 εκτιμά ότι τα νοικοκυριά που δεν εξυπηρετούνται ευρυζωνικά είναι ως εξής:

- **Δυτική Ευρώπη** 5.2 εκατομμύρια
- **Χώρες Βαλτικής** 0.6 εκατομμύρια
- **Ανατολική Ευρώπη** 6.6 εκατομμύρια
- **Βόρεια Αφρική** 18.0 εκατομμύρια

Επιπλέον υπάρχουν τρεις μελέτες που έγιναν το 2009 και έχουν σαν αντικείμενο μελέτης τη ζήτηση της αγοράς για ευρυζωνική πρόσβαση. Σύμφωνα με την Northen

Sky μελέτη [4], έως το 2018 στην Ευρώπη 1.2 εκατομμύρια νοικοκυριά θα εξυπηρετούνται από δορυφόρους. Η SES ASTRA [5] είναι μια λεπτομερής μελέτη για κάθε χώρα ξεχωριστά και εκτιμά το πλήθος των νοικοκυριών που δεν θα εξυπηρετούνται από τα επίγεια συστήματα. Τέλος η Eutelsat [6] μελέτη εκτιμά τον αριθμό των νοικοκυριών που θα μπορούν να εξυπηρετηθούν από δορυφόρους στα 3.5 εκατομμύρια. Αν συνυπολογίσουμε και την Βόρεια Αφρική εύκολα συμπεραίνουμε ότι το κομμάτι της αγοράς που θα χρησιμοποιεί τα δορυφορικά συστήματα για πρόσβαση στο διαδίκτυο είναι αρκετά μεγάλο.

3.2 ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ & ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στην αύξηση της χωρητικότητας των δορυφόρων, ωστόσο αμέσως προκύπτει το εξής πρόβλημα. Οι σύγχρονοι δορυφόροι λειτουργούν ως επί το πλείστον στη Ku ζώνη και το διαθέσιμο φάσμα στη ζώνη αυτή δεν είναι αρκετό για την κάλυψη των προβλεπόμενων απαιτήσεων. Επιπλέον οι δορυφόροι αυτοί έχουν κατασκευαστεί ώστε να καλύπτουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές και επομένως είναι περιορισμένοι ως προς την υποστήριξη μιας ευέλικτης κατανομής εύρους ζώνης που χρειάζεται για μια Ευρωπαϊκή ευρυζωνική εφαρμογή. Τα παραπάνω μας οδηγούν στην αξιοποίηση ζωνών όπως η Ka και πάνω όπου είναι ευκολότερο να επιτύχουμε την εκπομπή περισσότερων ακτίνων από τον δορυφόρο και με την επαναχρησιμοποίηση συχνότητας να φτάσουμε στις επιθυμητές τιμές χωρητικότητας.

Στην Ka ζώνη αποκλειστικές ζώνες για τους δορυφόρους είναι 19.7-20.2 και 29.5-30 GHz . Η ζώνη 20.2- 21.2 GHz χρησιμοποιείται από τον στρατό ενώ τα υπόλοιπα κομμάτια της Ka ζώνης χρησιμοποιούνται και από άλλες υπηρεσίες και όχι αποκλειστικά από δορυφόρους και επομένως πρέπει να γίνεται συντονισμός στους επίγειους σταθμούς. Πιο συγκεκριμένα για την άνω ζεύξη οι ζώνες που χρησιμοποιούνται και από άλλες υπηρεσίες είναι οι 27.5-29.5 και 24.75-25.25 GHz , δηλαδή συνολικά 2.5 GHz είναι διαθέσιμα αλλά με περιορισμούς. Τα αντίστοιχα κομμάτια της Ka ζώνης για την κάτω ζεύξη είναι 17.3-19.7 και 21.4-22 GHz , δηλαδή 3 GHz είναι διαθέσιμα και πάλι όπως και πριν με περιορισμούς. Πέρα όμως από τη Ka ζώνη μπορούμε να αξιοποιήσουμε και την Q/V ζώνη. Σε αυτή τη ζώνη

συχνοτήτων δεν υπάρχουν ζώνες αποκλειστικά για δορυφορικές υπηρεσίες όπως προηγουμένως και συνεπώς πρέπει να υπάρχει συντονισμός μεταξύ των χρηστών. Για την άνω ζεύξη 5 GHz και για την κάτω ζεύξη 4 GHz είναι διαθέσιμα αλλά και πάλι με περιορισμούς και με ύπαρξη συντονισμού.

3.3 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Για την επίτευξη χωρητικότητας που φτάνει τα Terabit/s, είναι απαιτούμενη η ύπαρξη προηγμένων ασύρματων καναλιών και η εκπομπή ακτίνων με επαναχρησιμοποίηση συχνότητας από τη μεριά του δορυφόρου, που συνήθως είναι 3 ή 4 χρωμάτων. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 39 (β), με τη έννοια 3 ή 4 χρωμάτων ορίζουμε τον αριθμό των υποζωνών, στις οποίες χωρίζεται το εύρος ζώνης που λειτουργεί ο δορυφόρος και αντιστοιχούμε σε κάθε υποζώνη ένα χρώμα. Η χρησιμοποίηση όμως περισσότερων από 4 χρώματα δεν είναι αποδοτική για το σύστημα. Οι σύγχρονοι δορυφόροι που λειτουργούν στην Ka ζώνη χρησιμοποιούν από 80 μέχρι 100 ακτίνες. Για τα ασύρματα κανάλια τώρα, επειδή η ανάπτυξη δορυφορικών συστημάτων με τόσο υψηλή χωρητικότητα είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο, ορίζονται όπως στο τρέχων DVB-S2 standard [7].

Modulation	Eb/No (dB)	C/N in BW	Spectral efficiency (b/s-Hz in BW)	FEC
16 APSK	6.4	10.8	2.75	5/6
32 APSK	8.1	13.5	3.43	5/6

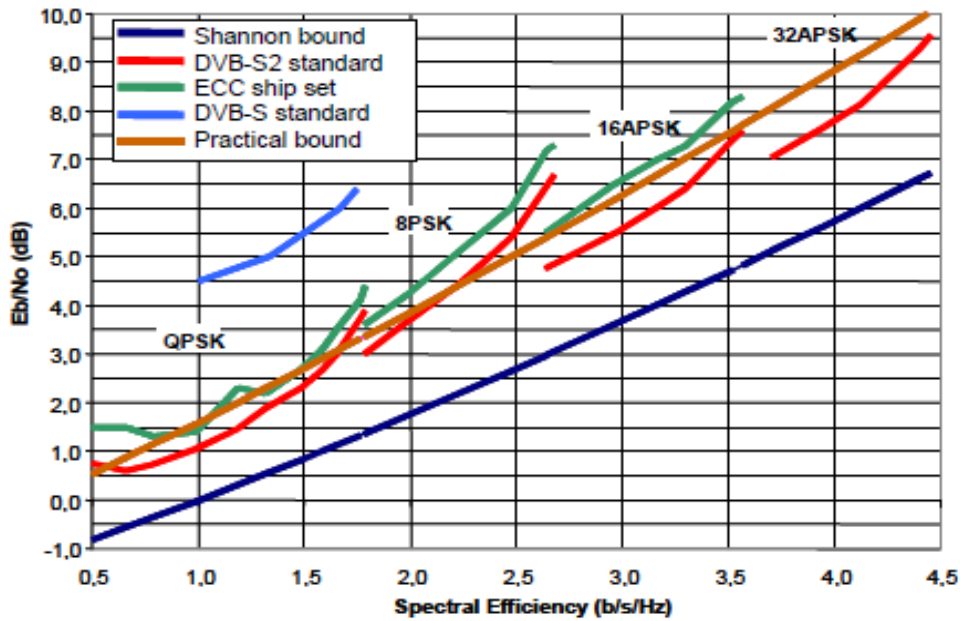
Πίνακας 3: Παράμετροι κυματομορφής

Μια πρώτη και γενική εκτίμηση για τον αριθμό των ακτίνων που θα εκπέμπουν οι δορυφόροι μπορεί να γίνει με βάση τον παραπάνω Πίνακα 3. Πρέπει να σημειωθεί ότι η εκτίμηση αυτή βασίζεται στο εύρος ζώνης, στη φασματική απόδοση,

την επαναχρησιμοποίηση συχνότητας και πόλωσης ενώ άλλοι παράγοντες όπως το EIRP, C/N και C/I δε λαμβάνονται υπόψη, γιατί σκοπός είναι η εκτίμηση του αριθμού των ακτίνων και όχι ο καθορισμός της λύσης. Η ζητούμενη λοιπόν εκτίμηση, γίνεται υποθέτοντας πρώτον ότι και πάλι η επαναχρησιμοποίηση συχνότητας θα είναι 3 ή 4 χρωμάτων, δεύτερον ότι οι gateways (πύλες δρομολόγησης) απέχουν πολύ μεταξύ τους ώστε κάθε ακτίνα να μπορεί να αξιοποιήσει όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης, τρίτον ότι μέχρι το 2020 η συνηθέστερη διαμόρφωση θα είναι είτε η 16-APSK είτε η 32-APSK, και τέλος ότι η κίνηση είναι ομοιόμορφη σε κάθε ακτίνα.

3.4 ΑΣΥΡΜΑΤΟ ΚΑΝΑΛΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Αναφέρθηκε προηγουμένως πως θεωρούμε το ασύρματο κανάλι όπως αυτό ορίζεται στο DVB-S2 standard. Μία συνήθης υπόθεση θα ήταν να θεωρήσουμε το δορυφορικό κανάλι ως ένα κανάλι που χαρακτηρίζεται από λευκό προσθετικό θόρυβο (additive white Gaussian noise channel) [1]. Στη πραγματικότητα όμως, η συμπεριφορά του καναλιού είναι διαφορετική από τη θεωρητική. Οι παρεμβολές από γειτονικά κανάλια, η μη γραμμικότητα στη φάση και στο πλάτος, απώλειες από την διάδοση στην ατμόσφαιρα και άλλοι παράγοντες εμποδίζουν το κανάλι να λειτουργήσει στη θεωρητική του απόδοση. Ωστόσο τα σύγχρονα σχήματα κωδικοποίησης, όπως οι LDPC (Low Density Parity Check Codes) που περιλαμβάνονται στο DVB-S2, βοηθούν στη προσέγγιση της θεωρητικής ρυθμοαπόδοσης. Αυτό αποτυπώνεται και στην εικόνα 40[1] που ακολουθεί η οποία παρουσιάζει τον απαιτούμενο λόγο Eb/No σε σχέση με τη φασματική απόδοση για το όριο Shannon (Shannon bound), για το DVB-S2 standard, για έναν πραγματικό εξοπλισμό και για το DVB-S standard. Από αυτές τις καμπύλες μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι απώλειες αυξάνονται γραμμικά με τη φασματική απόδοση. Ως όριο Shannon ορίζεται το όριο της χωρητικότητας το οποίο δεν μπορεί να υπερβεί ο ρυθμός μετάδοσης [8].



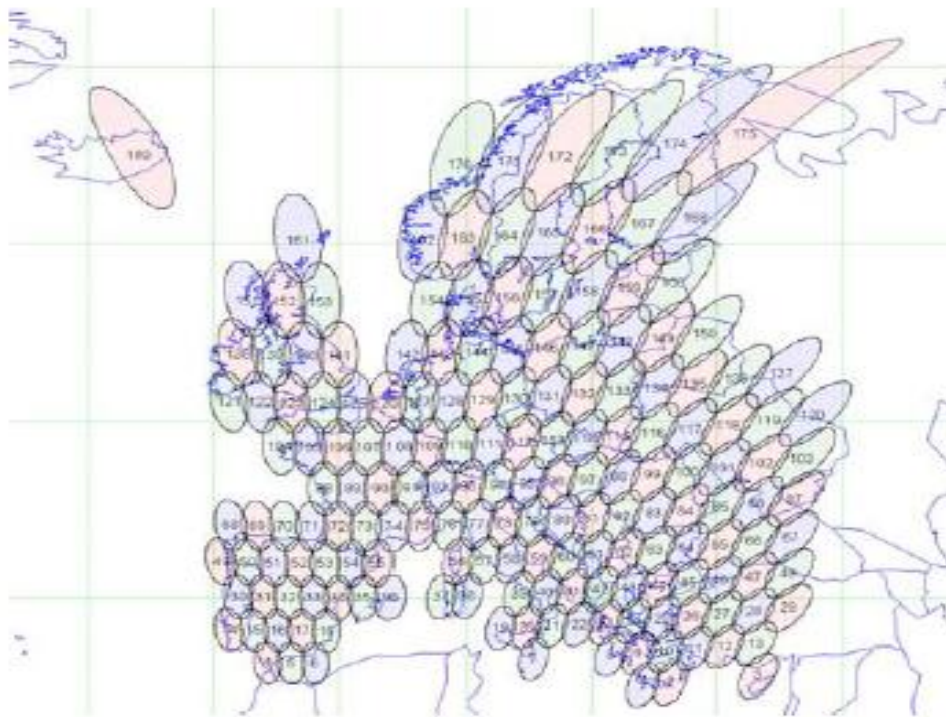
Εικόνα 40: Σύστημα πολλαπλών ακτίνων με επαχρησιμοποίηση συχνότητας

Παρατηρούμε πως για διαμόρφωση 16-APSK ή 32-APSK πλησιάζουμε περισσότερο στο θεωρητικό όριο Shannon. Συνεπώς αυτά τα σχήματα διαμόρφωσης αυξάνουν την χωρητικότητα περισσότερο από τα άλλα, και επομένως είναι λογικό να είναι τα επικρατέστερα στο μέλλον.

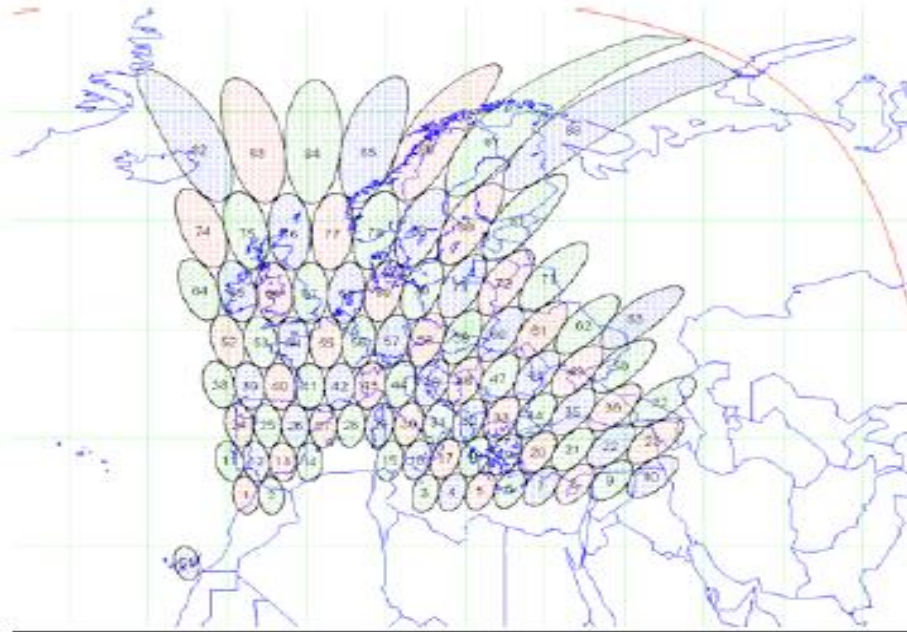
3.5 ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ

Η αρχιτεκτονική των συστημάτων διαχωρίζει τις ακτίνες σε αυτές που εξυπηρετούν τερματικά και σε αυτές που εξυπηρετούν επίγειους σταθμούς βάσης [2]. Οι τελευταίοι μάλιστα εξυπηρετούν πολλαπλές ακτίνες (multi beam) χρηστών και ως εκ τούτου οι ακτίνες για τα gateways θα είναι λιγότερες αλλά ταυτόχρονα τους διατίθεται μεγαλύτερο εύρος ζώνης αφού θα πρέπει να έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα. Επιπρόσθετα μία αρχική αρχιτεκτονική, με λειτουργία στη Ka και Q/V ζώνη φαίνεται πως προσφέρει την καλύτερη απόδοση. Πιο αναλυτικά σε αυτήν την αρχιτεκτονική, για τα τερματικά χρηστών η Ka ζώνη θα χρησιμοποιηθεί στην

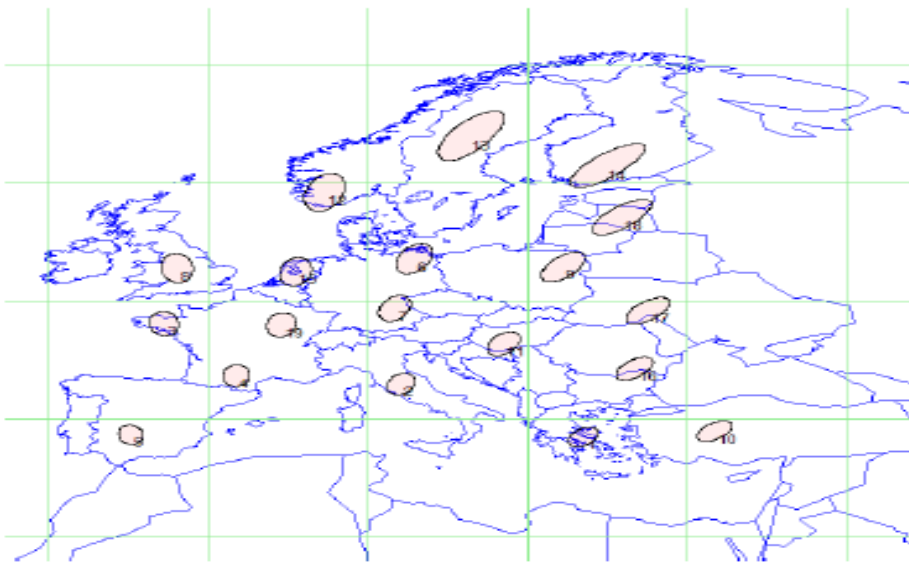
άνω ζεύξη και η Q/V στην κάτω ζεύξη. Για τους επίγειους σταθμούς βάσης η επικοινωνία θα γίνει στην Q/V ζώνη. Για την άνω ζεύξη στις ακτίνες των χρηστών ο αριθμός των ακτίνων εκτιμάται κοντά στις 175 ή 88 με διπλή πόλωση, πάντα σύμφωνα με τις υποθέσεις που έγιναν προηγουμένως και με διαμόρφωση 32-APSK, ενώ για τους σταθμούς βάσης ο αριθμός ανέρχεται στις 38 ή 19 με διπλή πόλωση. Αν εφαρμόσουμε 16-APSK διαμόρφωση, ο αριθμός των ακτίνων αυξάνεται σημαντικά. Οι ακόλουθες εικόνες [2] απεικονίζουν τις παραπάνω εκτιμήσεις.



Εικόνα 41: 175 ακτίνες προς τερματικά χρηστών



Εικόνα 42: 88 ακτίνες με διπλή πόλωση προς τερματικά χρηστών



Εικόνα 43: 19 ακτίνες με διπλή πόλωση προς σταθμούς βάσης

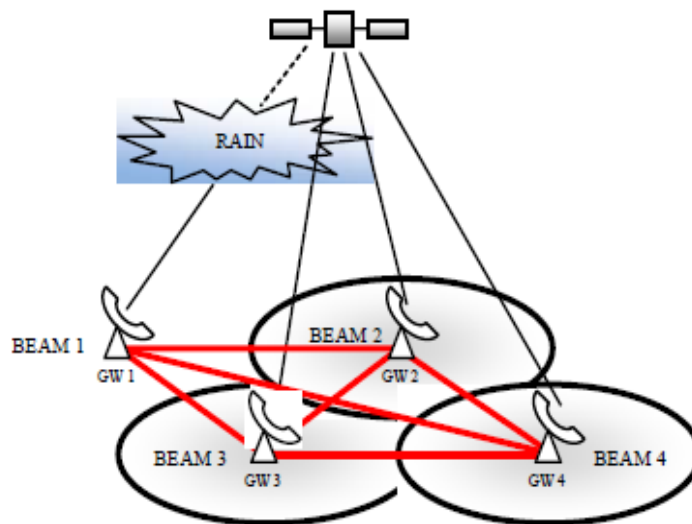
3.6 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ

Πέρα από την εκτίμηση του αριθμού των ακτίνων πρέπει να δούμε και τις απαιτήσεις ως προς την ισχύ ώστε να είναι δυνατή η πραγματοποίηση τέτοιων συστημάτων. Θεωρώντας ότι η αρχιτεκτονική των συστημάτων είναι η ίδια με παραπάνω και επιπλέον ότι στον δορυφόρο η κεραία που θα εξυπηρετεί τα τερματικά και η κεραία που θα εξυπηρετεί τους επίγειους σταθμούς βάσης έχουν διάμετρο 5 και 2.5 μέτρα αντίστοιχα, και ότι η αποδοτικότητα είναι της τάξης του 65% ,προκύπτει ότι το κέρδος κεραίας εκπομπής για τους επίγειους σταθμούς είναι 60.5 dBi ,το κέρδος λήψης είναι 58.5 dBi και θερμοκρασία θορύβου στα 400 K το G/T είναι 34.4 dB/K ενώ οι αντίστοιχες τιμές για την κεραία των τερματικών είναι 62 dBi, 58.5 dBi και 36 dB/K. Χρησιμοποίηση αναμεταδότη με ισχύ 15 W δίνει EIRP 70.3 dBW και 67.3 dBW στα όρια της περιοχής κάλυψης, ενώ αναμεταδότης ισχύος 50 W δίνει EIRP 75.5 dBW και 72.5 dBW στα όρια της περιοχής. Επιπρόσθετα τα τερματικά και οι επίγειοι σταθμοί βάσης έχουν κεραίες με διάμετρο 0.75 και 5 μέτρα αντίστοιχα. Το κέρδος κεραίας εκπομπής και λήψης των σταθμών είναι 66.5 dBi και 64.5 dBi, η τιμή του EIRP είναι 76.5 dBW και θεωρώντας θερμοκρασία θορύβου στα 450 K έχουμε G/K ίσο με 38 dB/K. Για τα τερματικά οι τιμές του EIRP και του G/K ,για θερμοκρασία θορύβου 150 K, είναι 55 dBW και 20.3 dB/K αντίστοιχα. Αυτές οι εκτιμήσεις έγιναν υπό συνθήκες καθαρού ουρανού και θεωρούμε ότι πιθανές διαλείψεις θα αντιμετωπίζονται με εφαρμογή κατάλληλων αντιμέτρων.

3.7 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ SMART GATEWAYS ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ

Η επίγεια διασύνδεση πολλών σταθμών βάσης (Smart Gateways) είναι μια πολύ έξυπνη αρχιτεκτονική η οποία συμβάλει και στην αντιμετώπιση πιθανών διαλείψεων που εμφανίζονται σε μια ζεύξη (εικόνα 44 [2]). Γενικά σύμφωνα με αυτή την σχεδίαση οι σταθμοί βάσης

- δημιουργούν ένα επίγειο δίκτυο
- κάθε χρήστης εξυπηρετείται από ένα ή περισσότερα κανάλια του σταθμού βάσης
- σε περιπτώσεις που ένας σταθμός βάσης τίθεται εκτός λειτουργίας ή η χωρητικότητα του δικτύου μειώνεται και μέρος ή όλη η κίνηση του χρήστη κατευθύνεται σε κάποιον από τους υπόλοιπους σταθμούς.



Εικόνα 44: Smart Gateways

Η σχεδίαση αυτή έχει θετικά αλλά και αρνητικά. Στα πλεονεκτήματά της είναι ότι :

- προσφέρει διαφορετικό κέρδος.
- έχει μικρό κόστος αφού δεν είναι απαραίτητη η προσθήκη νέων σταθμών ή κεραιών.
- αποδοτική χρησιμοποίηση των σταθμών μιας και όλοι οι σταθμοί λειτουργούν ταυτόχρονα.
- αποδοτική αξιοποίηση πόρων αφού μπορεί να αξιοποιήσει τυχόν διαθέσιμη χωρητικότητα
- ανοχή σε σφάλματα και δυνατότητα βελτίωσης της ρυθμοαπόδοσης.

Από την άλλη στα μειονεκτήματά της είναι ότι :

- είναι απαραίτητος ο συγχρονισμός στο επίγειο δίκτυο.

- ύπαρξη κάποιου βαθμού νοημοσύνης στο δίκτυο και στα τερματικά επίσης είναι απαραίτητη.
- χρειάζονται αλγόριθμοι έτσι ώστε να ανιχνεύονται αλλαγές στην χωρητικότητα και σε τέτοιες περιπτώσεις να γίνεται επαναπροσδιορισμός και εκ νέου διάθεσή της για να επιτευχθούν οι στόχοι.
- η διάθεση χωρητικότητας σε κάθε κανάλι είναι κρίσιμη διαδικασία.

Εν κατακλείδι παρόλο που η σχεδίαση αυτή είναι σε πρώιμο στάδιο οι Smart Gateways μπορούν υπό προϋποθέσεις να χρησιμοποιηθούν ώστε να αποφύγουμε παρεμβολές και να ελαχιστοποιήσουμε τα φαινόμενα διάδοσης για κάθε σταθμό βάσης. Αρχικές μελέτες έχουν δείξει ότι αυτή η σχεδίαση μπορεί να είναι χρήσιμη και προσομοιώσεις, που χρησιμοποίησαν υποθετικές τιμές κίνησης και καιρικών στατιστικών, έχουν παρουσιάσει τα πλεονεκτήματά της. Αν και η σχεδίαση αυτή είναι ελκυστική απαιτείται επιπλέον μελέτη ιδιαίτερα για το ωφέλιμο φορτίο. Τις προηγούμενες μελέτες πρέπει να ακολουθήσουν άλλες που να χρησιμοποιούν βελτιωμένες υποθέσεις για τη διερεύνηση της εξισορρόπησης της κίνησης.

3.8 ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ ΑΠΟ ΓΕΙΤΟΝΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ

Ένα ακόμα σημαντικό περιορισμό για την υλοποίηση δορυφορικών συστημάτων νέας γενιάς, αποτελούν οι παρεμβολές στο δορυφορικό κανάλι από άλλα κανάλια που χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη συχνοτήτων[1]. Για το forward link η παρεμβολή και ο θόρυβος στο κανάλι ($C/(N+I)$) είναι 14.6 dB αν έχουμε γειτονικό κανάλι με ισχύ παρεμβολής 20 dB, ενώ για τη ζεύξη καθόδου το $C/(N+I)$ είναι 15 dB[2]. Οι τιμές αυτές είναι 1.1 dB και 1.5 dB μεγαλύτερες από τα 13.5 dB που απαιτούνται. Αν στο forward link εφαρμόσουμε και beam hopping, δηλαδή επανεκχώρηση χωρητικότητας σε κάθε ακτίνα, ανάλογα με την κίνηση που πρέπει να εξυπηρετήσει, το C/I της κάτω ζεύξης είναι πιθανό να βελτιωθεί έως 25 dB, αλλά και πάλι χρειάζονται περισσότερες μελέτες. Στη μεριά του δορυφόρου τώρα, η

παρεμβολή στην άνω ζεύξη κυριαρχεί, ενώ η εφαρμογή beam hopping στο return link είναι αρκετά περίπλοκη καθώς απαιτείται συγχρονισμός μεταξύ των τερματικών και του δορυφόρου. Επομένως και πάλι πρέπει να δοθεί περισσότερη βαρύτητα στο πως θα μειώσουμε την παρεμβολή από γειτονικά κανάλια.

3.9 ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ TERABIT/s ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Το συμπέρασμα που προκύπτει απ' όσα αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής, είναι ότι με την σύγχρονη τεχνολογία δεν μπορούμε να κατασκευάσουμε δορυφόρους χωρητικότητας Terabit/s που να προσφέρουν ικανοποιητικό QoS και επομένως πρέπει να προσανατολιστούμε σε καινοτομίες που θα λύνουν αυτό το πρόβλημα. Τομείς με τους οποίους πρέπει να ασχοληθούμε εκτεταμένα είναι

- το C/I του συστήματος.
- οι απαιτήσεις ισχύος στην μεριά του δορυφόρου.
- Προσαρμοστικές τεχνικές κωδικοποίησης και διαμόρφωσης στην Καζώνη και πιο ψηλά.
- η διαθεσιμότητα των επίγειων σταθμών.

Το C/I στα συστήματα αυτά αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την απόδοσή τους. Για να πετύχουμε τόσο μεγάλη χωρητικότητα, ένας μεγάλος αριθμός ακτίνων με επαναχρησιμοποίηση συχνότητας είναι αναγκαίος. Ωστόσο το αρνητικό που προκύπτει, είναι η αύξηση των παρεμβολών γεγονός που περιορίζει τον αριθμό των ακτίνων που είναι δυνατόν να υποστηρίξει το σύστημα. Πιθανές λύσεις που έχουν προταθεί είναι να εφαρμόσουμε beam hopping στο forward link που αναφέρθηκε και παραπάνω ή διπλή πόλωση στα hot spots, χωρίς όμως να είναι δεδομένη η βελτίωση του C/I. Στο reverse link το beam hopping είναι αρκετά δύσκολο. Επιπρόσθετα επειδή αποτελείται από καταιγισμούς, θα υπάρχει ένας δείκτης που σχετίζεται με τη μετάδοση στις ακτίνες οπότε η συνολική παρεμβολή που εκτιμάται μέχρι στιγμής δεν είναι η πραγματική.

Το δεύτερο κομμάτι στο οποίο πρέπει να ρίξουμε βάρος είναι η ισχύς στον δορυφόρο. Το μεγαλύτερο μέρος της ισχύς το χρησιμοποιούν οι ενισχυτές και ως εκ'τούτου τοποθέτηση επιπλέον εφαρμογών ,όπως δρομολόγηση, θα απαιτούν περισσότερη ισχύ. Η πρόοδος που έχει γίνει στην κωδικοποίηση και διαμόρφωση,

μας έχουν οδηγήσει κοντά στο όριο Shannon. Η Adaptive Coding Modulation (ACM) χρησιμοποιείται αποδοτικά στο DVB-S2 για την αντιμετώπιση διαλείψεων που οφείλονται σε βροχόπτωσης. Ειδικότερα σε περιπτώσεις βροχής η ACM επιλέγει ένα από τα 28 ζευγάρια MOD/COD για να αντιμετωπίσει τις διαλείψεις. Η τρέχουσα ACM στην Ka ζώνη και για τερματικά χρηστών εκτιμάται ότι μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά όλο το εύρος των διαλείψεων εξασφαλίζοντας διαθεσιμότητα 99.7 %. Για την Q/V ζώνη όμως τόσο για τα τερματικά όσο και για τους επίγειους σταθμούς το εύρος διαλείψεων είναι μεγαλύτερο και χρειάζεται να αυξήσουμε τα ζευγάρια MOD/COD ώστε να μπορέσουμε να το αντιμετωπίσουμε πλήρως. Η βροχή προκαλεί σοβαρά προβλήματα στις ζεύξεις ανόδου και ειδικά στην Q/V ζώνη τα προβλήματα εντείνονται. Το να προσπαθήσουμε να ελέγξουμε την ισχύ της εκπομπής δεν είναι αποτελεσματικό γιατί αφενός το περιθώριο διαλείψεων είναι αρκετά μεγάλο για να αντιμετωπιστεί με αυτόν τον τρόπο και αφετέρου με τη μέθοδο αυτή δημιουργούνται επιπλέον προβλήματα όπως εμφάνιση προϊόντων ενδοδιαμόρφωσης.

Μια ενδεδειγμένη λύση είναι η δημιουργία συστημάτων με ευφυής τρόπους διαφορισμού θέσης (smart site diversity systems). Στα συστήματα αυτά όλοι οι σταθμοί βάσης είναι συνδεδεμένοι σε ένα κέντρο ελέγχου το NCC. Το NCC με τη σειρά του καθορίζει το σταθμό με τον οποίο θα εξυπηρετηθούν οι χρήστες. Αν διαπιστώσει ότι η ζεύξη ενός σταθμού παρουσιάζει προβλήματα τότε μεταφέρει όλους τους χρήστες που εξυπηρετεί ο σταθμός σε κάποιον άλλο που δεν αντιμετωπίζει διαλείψεις. Μάλιστα το γεγονός ότι οι σταθμοί απέχουν πολύ ο ένας από τον άλλο καθιστά τις διαλείψεις ασυσχέτιστες. Στα συστήματα αυτά το κρίσιμο κομμάτι είναι η διαδικασία μετακίνησης των χρηστών σε άλλο σταθμό έτσι ώστε να μη χάσουμε την κίνηση που εξυπηρετεί ο σταθμός που εμφανίζει διαλείψεις. Επίσης είναι δυνατή η εισαγωγή μηχανισμού που να εξισορροπεί την κίνηση, για να αποφύγουμε την τροφοδότηση άλλου σταθμού με παραπάνω κίνηση από αυτήν που μπορεί να εξυπηρετήσει.

Συνοπτικά η κατασκευή συστημάτων χωρητικότητας της τάξης των Terabit/s είναι μονόδρομος για τις δορυφορικές επικοινωνίες και για την προσπάθεια τους να αντιμετωπίσουν τον ανταγωνισμό. Εκτός από το μειωμένο κόστος ανά bit που θα προσφέρουν, θα μπορούν να εξυπηρετήσουν περιοχές που τα επίγεια συστήματα δεν μπορούν λόγω αυξημένου κόστους και ταυτόχρονα θα προσφέρουν υπηρεσίες καλύτερης ποιότητας. Αν και η υλοποίηση τους με τα σημερινά δεδομένα είναι

δύσκολη και απαιτείται περαιτέρω μελέτη σε θέματα όπως το C/I , το ACM στις υψηλές συχνότητες, και την επίγεια διασύνδεση σταθμών βάσης , εκτιμάται ότι μέχρι το 2020 τα συστήματα αυτά θα είναι πραγματικότητα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

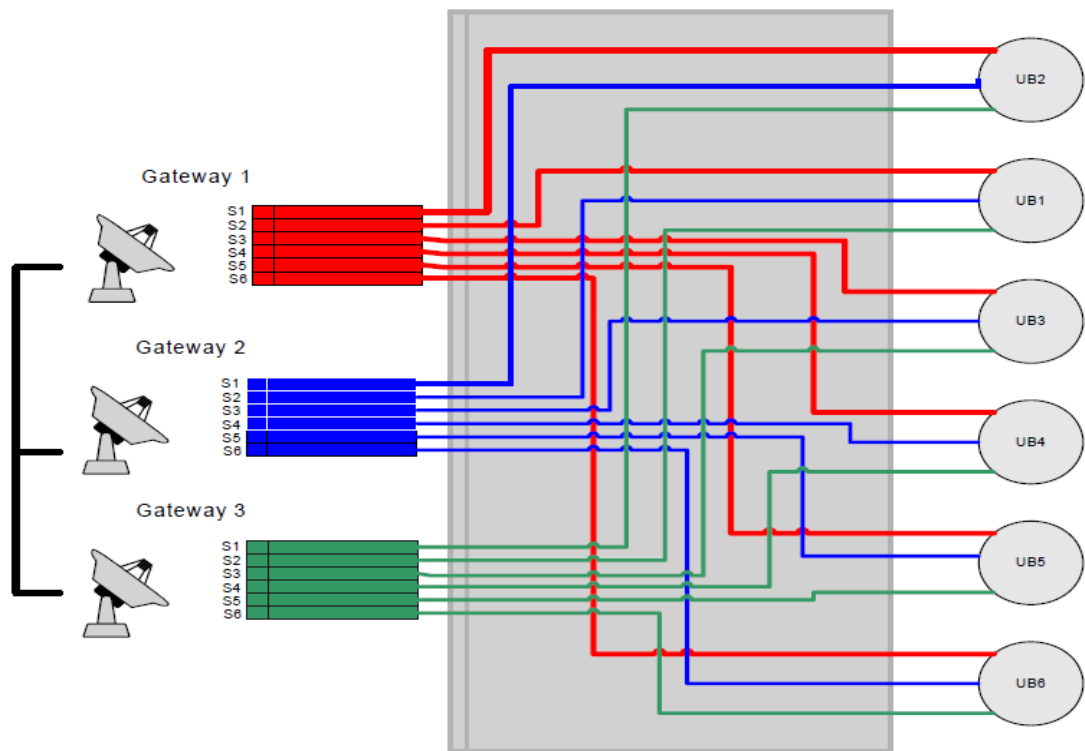
- [1] Jean-Didier Gayraud [2009], “Terabit Satellite: Myth or Reality?”, First International Conference
on Advances in Satellite and Space Communications
- [2] Paul Thompson, Barry Evans, Michel Bousquet, Laurent Castenet, Takis Mathiopoulos [2011],
“Concepts and Technologies for a Terabit/s Satellite”, SPACOMM, The Third International
Conference on Advances in Satellite and Space Communications
- [3] IDATE consulting and research report ‘Broadband satellite in Europe and North Africa,
residential market outlook’ March 2009
- [4] Northern Sky Research-Broadband satellite market study 2009
- [5] SES ASTRA compilation of external sources 2009
- [6] Eutelsat internal study; Broadband satellite addressable markets 2009
- [7] ETSI EN 302 307: Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure,
channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering
and other broadband satellite applications (DVB-S2)
- [8] Π. Γ. Κωττής, Χ. Ν. Καψάλης, «Δορυφορικές Επικοινωνίες» 2η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2006

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: SMART GATEWAYS ΣΤΗ Q/V ΖΩΝΗ

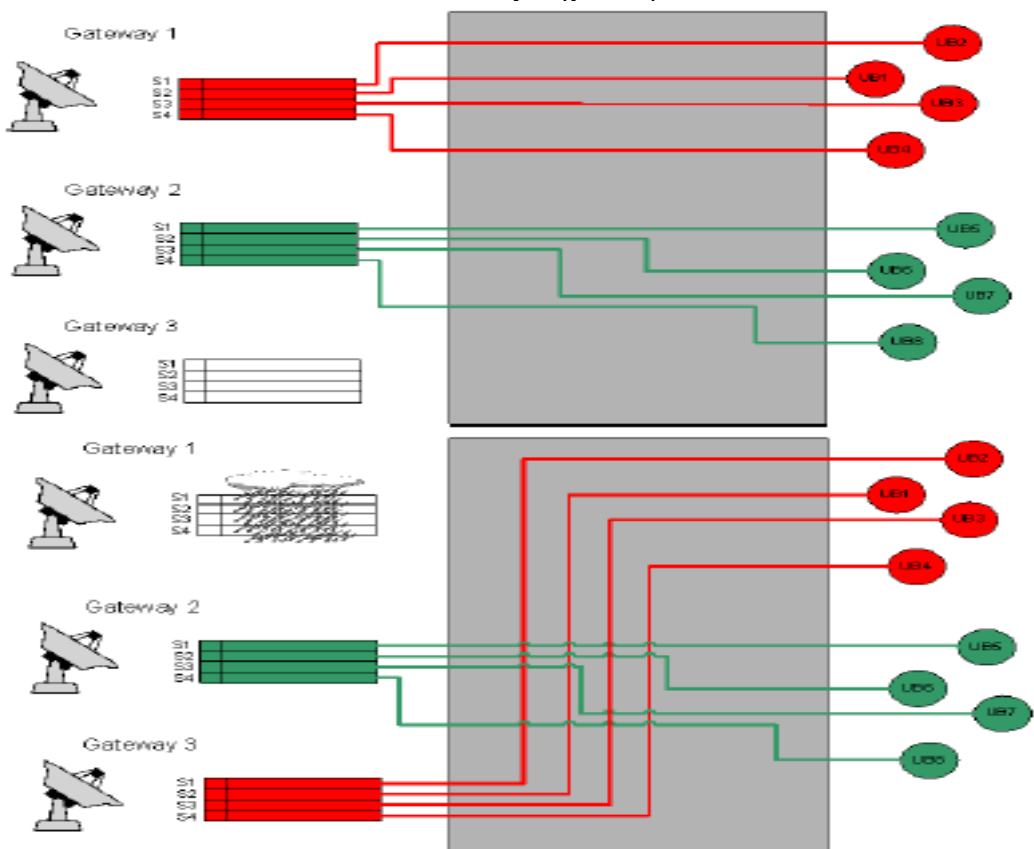
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αξιολόγηση της ρυθμοαπόδοσης και της διαθεσιμότητας που προσφέρει η χρησιμοποίηση smart gateways στη ζεύξη ανόδου δορυφορικών συστημάτων που λειτουργούν στη Q/V ζώνη και επιδιώκουν χωρητικότητα Terabit/s.

Είναι δεδομένο ότι η διάδοση σε συχνότητες αυτής της ζώνης υφίσταται μεγάλες απώλειες όχι μόνο εξαιτίας της βροχόπτωσης αλλά και λόγω των σύννεφων και της απορρόφησης από τα αέρια της ατμόσφαιρας. Η εφαρμογή απλής side diversity δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτική όσον αφορά στην οικονομική αξιοποίηση γιατί απαιτεί την κατασκευή και εγκατάσταση επιπρόσθετου επίγειου εξοπλισμού. Έτσι οδηγηθήκαμε στην αναζήτηση λύσεων που θα πετυχαίνουν smart diversity και θα στηρίζονται στην επικοινωνία ήδη εγκατεστημένων gateways με μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους. Όπως έχουμε αναφέρει και στο Κεφάλαιο 2, επιδιώκουμε οι αποστάσεις των Gateways να είναι μεγάλες ώστε οι διαλείψεις που αντιμετωπίζουν να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο ασυσχέτιστες μεταξύ τους. Δύο τέτοιες λύσεις είναι η UB-NGateways σχεδίαση και η UB-Gateway σχεδίαση. Η βασική ιδέα πίσω από τη πρώτη λύση, με την οποία και θα ασχοληθούμε, είναι κάθε εκπεμπόμενη ακτίνα από τον δορυφόρο (User Beam) να εξυπηρετείται από κανάλια από όλους ή κάποιους gateways (εικόνα 45[1]). Η δεύτερη λύση προτείνει την εγκατάσταση επιπλέον gateways και αν κάποιος gateway έχει πολλές απώλειες, όλοι οι χρήστες που εξυπηρετεί να μεταφερθούν σε έναν από τους πλεονάζοντες (εικόνα 46[1]).



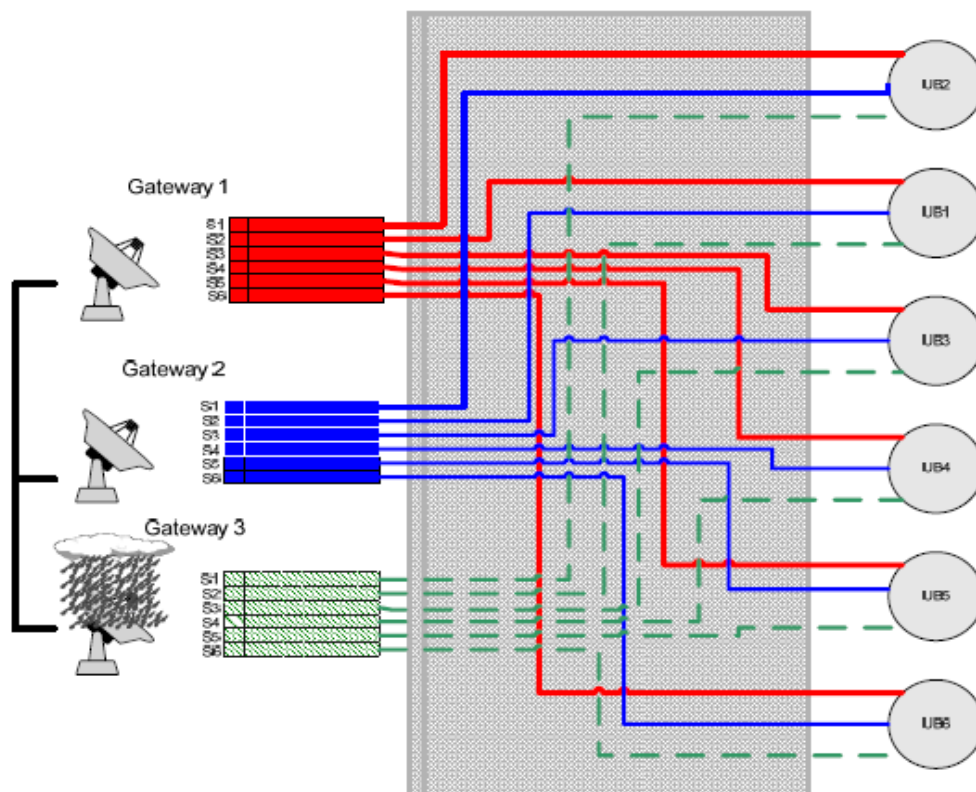
Εικόνα 45: UB-NGateways σχεδίαση



Εικόνα 46: UB-Gateway σχεδίαση

4.2 UB-NGateways σχεδίαση

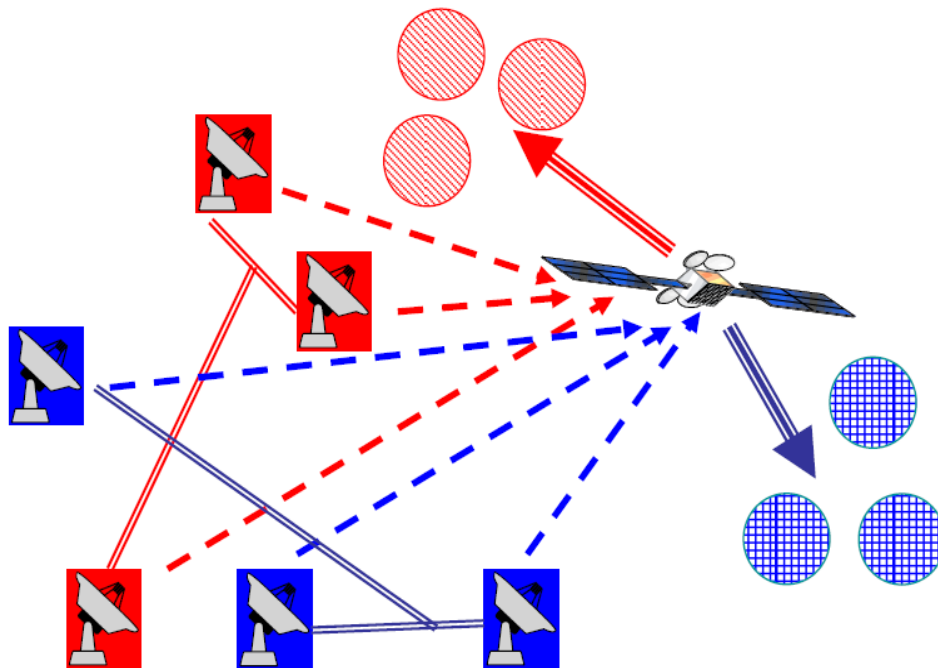
Αναλυτικότερα τώρα για τη UB-NGateways σχεδίαση, πιθανές απώλειες σε έναν gateway (εικόνα 47 [1]) δε θα προκαλέσουν τη διακοπή λειτουργίας του συστήματος αλλά τη μείωση της ρυθμοαπόδοσής της κάθε δέσμης κατά $1/N$, όπου N ο αριθμός των gateways. Για παράδειγμα στην εικόνα 47, οι χρήστες της gateway 3 θα ανατεθούν σε κανάλια των άλλων gateways και η απόδοση κάθε ακτίνας θα μειωθεί κατά $1/3$. Μπορούμε να κάνουμε ένα βήμα παραπέρα και να εφαρμόσουμε ACM, και τότε η απόδοση μειώνεται κατά $1/N*n$, όπου n η διαφορά ανάμεσα στη φασματική απόδοση όταν όλοι οι gateways βρίσκονται σε συνθήκες καθαρού ουρανού και στη φασματική απόδοση στις επικρατούσες συνθήκες. Η δυνατότητα να γίνει η μεταπομπή χρηστών, προϋποθέτει τη διασύνδεση των gateways σε ένα επίγειο δίκτυο και την συνεργασία των επιμέρους διαχειριστών σε περίπτωση που δεν υπάρχει κοινός.



Εικόνα 47: UB-NGateways σχεδίαση όταν ένας gateway έχει απώλειες.

Επιπρόσθετα η UB-NGateways σχεδίαση είναι συμβατή με αρχιτεκτονική τύπου bent-pipe για το ωφέλιμο φορτίο αλλά και με τεχνικές αντιμετώπισης προβλημάτων κατά τη διάδοση όπως beam forming, beam hopping και άλλες. Στόχος της UB-NGateways σχεδίασης είναι τις επιπτώσεις από τη διακοπή λειτουργίας ενός ή περισσότερων gateways να τις επωμιστούν όλοι οι gateways και όχι μόνο οι προβληματικοί. Θετικό της σχεδίασης αυτής είναι ότι η πιθανότητα κάποιοι χρήστες να μην εξυπηρετηθούν να είναι από ελάχιστη έως μηδενική. Στα αρνητικά της όμως είναι η προσωρινή μείωση της ρυθμοαπόδοσης, οι ενισχυτές HPA στο δορυφόρο θα λειτουργούν σε multicarrier mode και η ύπαρξη προϊόντων ενδοδιαμόρφωσης.

Εκτός των παραπάνω στη UB-NGateways σχεδίαση, υπάρχει έντονος προβληματισμός για τον καθορισμό του αριθμού των καναλιών (carriers) , και κατ' επέκταση και του αριθμού των gateways που θα αποτελούν την εκπεμπόμενη από τον δορυφόρο ακτίνα. Παραδείγματος χάρη αν ένα σύστημα περιλαμβάνει N gateways και P ακτίνες, ο συνολικός αριθμός των καναλιών είναι $N \times P$ και επομένως P κανάλια ανά gateway. Ωστόσο πολλές φορές είτε για να γλυτώσουμε τη πολυπλοκότητα που επιφέρουν τα πολλά κανάλια σε μια ακτίνα είτε για να αποφύγουμε τη συνεργασία διαφορετικών διαχειριστών αναθέτουμε σε κάθε ακτίνα μια ομάδα (cluster) από gateways όπως φαίνεται στο Εικόνα 48[1].



Εικόνα 48: Κάθε ακτίνα εξυπηρετείται από διαφορετικό cluster

4.2.1 Μεταπομπή στη UB-NGateways σχεδίαση

Ένα ακόμα κρίσιμο ζήτημα στη UB-NGateways σχεδίαση είναι η διαδικασία μεταπομπής των χρηστών ενός gateway που υφίσταται απώλειες. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται handover και μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια[1]:

- ✓ εντοπισμός απωλειών στη ζεύξη μεταξύ του gateway και του δορυφόρου.
- ✓ η λήψη της απόφασης για τη μεταγωγή των χρηστών σε άλλα κανάλια γίνεται από το NCC το οποίο γνωρίζει την κατάσταση που βρίσκονται όλα τα κανάλια.
- ✓ η εκτέλεση της παραπάνω απόφασης περιλαμβάνει την ειδοποίηση του χρήστη να αλλάξει κανάλι και ταυτόχρονα την ενημέρωση του πίνακα δρομολόγησης του επίγειου δικτύου για την αλλαγή.

Γενικά το handover σε αυτά τα συστήματα είναι παρόμοιο με αυτό των δικτύων ασύρματης κινητής τηλεπικοινωνίας. Η κύρια διαφορά τους βρίσκεται στο δεύτερο στάδιο, δηλαδή στο ποιός αποφασίζει για το handover. Στις ασύρματες κινητές τηλεπικοινωνίες η απόφαση αυτή λαμβάνεται από τον receiver και όχι από το NCC που ισχύει στην περίπτωση μας.

4.2.1.1 Εντοπισμός Απωλειών Στη Ζεύξη

Σε όλη τη διάρκεια του πρώτου σταδίου γίνεται παρακολούθηση της μετάδοσης και όλοι οι gateways στέλνουν στο NCC την κατάσταση των καναλιών τους. Οι πληροφορίες που αποστέλλονται στο NCC διαφέρουν αν έχουμε ACM ή όχι. Αν δεν έχουμε τότε η πληροφορία σχετίζεται με το αν θα είναι διαθέσιμο το κανάλι στο μέλλον. Αν όμως έχουμε ACM τότε ο gateway αναφέρει το ποιο αποδοτικό ζευγάρι διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (modcod) που μπορεί να μεταδοθεί από το κανάλι.

4.2.2.2 Λήψη Απόφασης Για Μεταπομπή

Όπως αναφέρεται και παραπάνω το δεύτερο στάδιο είναι η λήψη απόφασης από το NCC για τη μεταγωγή ή όχι των χρηστών σε άλλο κανάλι. Για να πραγματοποιηθεί αυτό το στάδιο είναι απαραίτητη η κατασκευή ενός πίνακα που να περιέχει τους χρήστες που εξυπηρετεί κάθε ακτίνα καθώς και τα κανάλια/gateways που χρησιμοποιούνται. Η κατάσταση κάθε καναλιού είναι διαθέσιμη και στη συνέχεια ένας αλγόριθμος, που συνυπολογίζει την πληροφορία αυτή καθώς και άλλες παραμέτρους όπως η πραγματοποιήσιμη απόδοση και ο αριθμός των χρηστών προς μεταπομπή, αποφαινεται για την υλοποίηση ή όχι της μεταπομπής.

4.2.2.3 Εκτέλεση Μεταπομπής

Τέλος το τρίτο στάδιο αποτελείται από δύο σκέλη τα οποία εκτελούνται παράλληλα. Το πρώτο είναι ο χρήστης να αλλάξει κανάλι. Την ενημέρωση του χρήστη για να την αλλαγή αναλαμβάνει ο gateway που χρησιμοποιούσε μέχρι πρότινος. Η ενημέρωση αυτή περιλαμβάνει την κεντρική συχνότητα και το "πρόγραμμα" του νέου καναλιού έτσι ώστε σε προκαθορισμένη στιγμή ο χρήστης να αλλάξει τις παραμέτρους του για να πετύχει συντονισμό με το νέο κανάλι. Το δεύτερο σκέλος είναι η ενημέρωση του πίνακα δρομολόγησης για την αλλαγή. Επιγραμματικά κάθε cluster αποτελεί ένα ανεξάρτητο δίκτυο με δικό του διαχειριστή. Κάθε gateway στον cluster λειτουργεί ως κόμβος ανταπόκρισης στον οποίο είναι συνδεδεμένοι τα τερματικά μέσω των καναλιών, ενώ σε κάθε τερματικό είναι συνδεδεμένος ένας ή περισσότεροι χρήστες. Όπως σε κάθε δίκτυο έτσι και εδώ υπάρχει πίνακας όπου κάθε τερματικό και κάθε χρήστης έχει τη δική του μοναδική διεύθυνση IP. Αν λοιπόν κάποιος χρήστης ενημερωθεί για αλλαγή καναλιού, η IP του διαγράφεται από τον πίνακα του κόμβου που βρισκόταν μέχρι εκείνη τη στιγμή και προστίθεται στον αντίστοιχο πίνακα του κόμβου από τον οποίο θα εξυπηρετείται πλέον. Έτσι αν κίνηση προς τον χρήστη φτάσει στον παλιό κόμβο θα δρομολογηθεί αυτόματα στον νέο.

4.2.2 Εκτίμηση Διαθεσιμότητας στη UB-NGateways σχεδίαση

Για την εκτίμηση της διαθεσιμότητας που προσφέρουν τα συστήματα που εφαρμόζουν τη UB-NGateways σχεδίαση, θεωρούμε ότι πιθανές διακοπές λειτουργίας σε κάποιους gateways είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους. Αυτό παρατηρείται όταν οι αποστάσεις μεταξύ των gateways είναι μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα επομένως και στην περίπτωση μας. Η αρχιτεκτονική των συστημάτων αυτών προβλέπει ότι σε όλη την περιοχή που καλύπτει κάθε εκπεμπόμενη από τον δορυφόρο ακτίνα, υπάρχει ένας μόνο gateway.

Μια πρώτη εκτίμηση για την απόδοση των συστημάτων μπορεί να γίνει κάνοντας κάποιες απλουστεύσεις, όπως για παράδειγμα, οι μετρήσεις γίνονται σε συνθήκες καθαρού ουρανού και η μη ύπαρξη ACM που επηρεάζει σημαντικά τη διαθεσιμότητα και τη χωρητικότητα. Στη σχεδίαση που μελετάμε το να τεθεί εκτός λειτουργίας ένας gateway συνεπάγεται τη μείωση της ρυθμοαπόδοσης κάθε ακτίνας στην οποία είναι συνδεδεμένος, κατά $1/N_{gateway}$ της ονομαστικής ρυθμοαπόδοσης του συστήματος, όπου $N_{gateway}$ ο συνολικός αριθμός των συνδεδεμένων gateways στην ακτίνα. Αν θεωρήσουμε p την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας ενός gateway, η πιθανότητα να έχουμε ταυτόχρονα n gateways εκτός λειτουργίας δίνεται από την σχέση[1]:

$$P(N_{out} = n) = C_{N_{gateway}}^n P^n (1-p)^{N_{gateway}-n} \quad \text{όπου} \quad C_{N_{gateway}}^n = \frac{N_{gateway}!}{n!(N_{gateway}-n)!}$$

Το τμήμα της ρυθμοαπόδοσης που είναι διαθέσιμο T δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$T = 1 - \frac{N_{out}}{N_{gateways}}$$

Από τον παραπάνω τύπο βλέπουμε ότι για N_{out} gateways εκτός λειτουργίας η διαθέσιμη απόδοση μειώνεται κατά $\frac{N_{out}}{N_{gateways}}$ % .

Η σχετική αθροιστική κατανομή της ρυθμοαπόδοσης $P(T \geq \frac{k}{N_{Gateway}})$ μπορεί να υπολογιστεί από δύο τύπους.

- Ο πρώτος είναι ο εξής[1]:

$$P(T \geq \frac{k}{N_{Gateway}}) = P(N_{out} \leq k) = \sum_{i=0}^k C_{N_{Gateway}}^i p^i (1-p)^{N_{Gateway}-i} \quad (50)$$

Και δείχνει τη πιθανότητα, και κατ'επέκταση το ποσοστό του χρόνου, να έχουμε μέχρι k gateways εκτός λειτουργίας.

- Ο δεύτερος είναι [2] :

$$P(T \geq \frac{k}{N_{Gateway}}) = P(N_{out} \leq N_{Gateway} - k) = \sum_{i=0}^{N_{Gateway}-k} C_{N_{Gateway}}^i p^{N_{Gateway}-i} (1-p)^i$$

Και δείχνει τη πιθανότητα, και κατ'επέκταση το ποσοστό του χρόνου, να έχουμε μέχρι $N_{Gateway} - k$ gateways εκτός λειτουργίας ή διαφορετικά k gateways σε λειτουργία.

Η διαφορά τους ουσιαστικά έγκειται στο ότι ο πρώτος τύπος αναφέρεται σε gateways εκτός λειτουργίας ενώ ο δεύτερος σε gateways σε λειτουργία. Από αυτή διαπίστωση μπορούμε να πούμε ότι ισχύει $P(N_{out} \leq N_{Gateway} - k) = 1 - P(N_{out} \leq k)$.

Η μέση ονομαστική ρυθμοαπόδοση του συστήματος υπολογίζεται ως εξής :

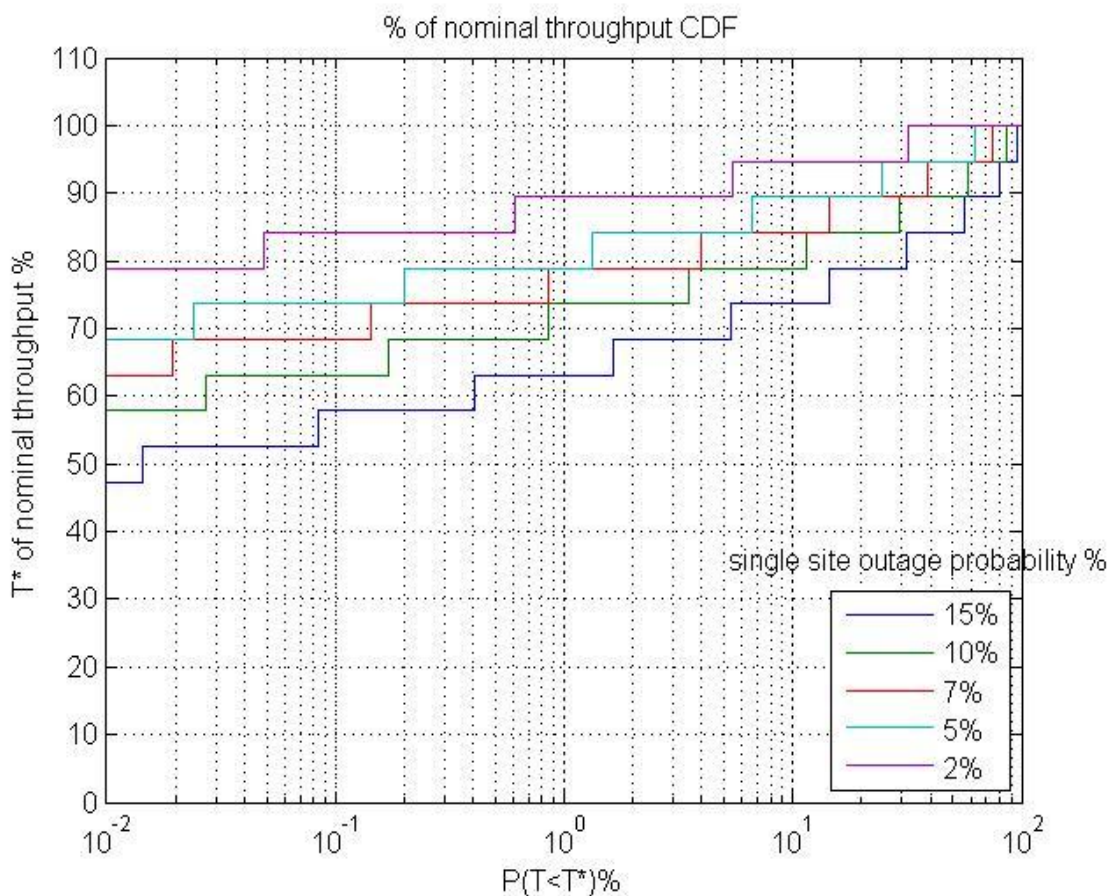
$$E[T] = \sum_{k=0}^{N_{gateway}} \left(1 - \frac{k}{N_{gateway}}\right) P(N_{out} = k) = \sum_{k=0}^{N_{gateway}} \left(\frac{N_{gateway} - k}{N_{gateway}}\right) \cdot C_{N_{gateway}}^k \cdot p^k (1-p)^{N_{gateway}-k} = 1 - p$$

Μάλιστα το $1-p$ αποτελεί και τη μέση ρυθμοαπόδοση ενός gateway, κάτι που είναι απολύτως λογικό αφού δε θα είναι διαθέσιμος για p % του χρόνου.

Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (CDF) της ρυθμοαπόδοσης, θεωρώντας ότι έχουμε έναν gateway εκτός λειτουργίας αν οι απώλειες είναι πολύ μεγάλες, υπολογίζεται σύμφωνα με την (50) σχέση. Στη συνέχεια προχωρούμε σε εκτίμηση της CDF θεωρώντας δύο σενάρια, την ύπαρξη ή όχι clusters.

4.2.2.1 ΣΕΝΑΡΙΟ 1: Όλοι οι συνδεδεμένοι μεταξύ τους

Τα συστήματα αυτά είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε σε κάθε ακτίνα να είναι συνδεδεμένοι όλοι οι gateways. Αυτό αποτυπώνεται στην επόμενη εικόνα για διαφορετικές πιθανότητες να έχουμε διακοπή λειτουργίας και με συνολικά 19 Gateways ανεξάρτητα από τον αριθμό των ακτίνων.



Εικόνα 49: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής της ρυθμοαπόδοσης για διαφορετικές πιθανότητες διακοπής λειτουργίας

Από τη παραπάνω εικόνα βλέπουμε ότι το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει, ανάλογα με τη πιθανότητα διακοπής, μεταξύ του 65 και 90% της ονομαστικής του ρυθμοαπόδοσης για το 99% του χρόνου. Επίσης μπορούμε να δούμε ότι αν έχουμε αύξηση του αριθμού των gateways που είναι εκτός λειτουργίας ταυτόχρονα, έχουμε αντίστοιχα μείωση του ποσοστού της ονομαστικής ρυθμοαπόδοσης στην οποία το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει. Η μείωση αυτή εξαρτάται από τη πιθανότητα διακοπής λειτουργίας ενός gateway. Μεγάλη πιθανότητα διακοπής σημαίνει και μεγάλη μείωση του ποσοστού. Η πιθανότητα να έχουμε την ίδια στιγμή πολλούς gateways εκτός λειτουργίας είναι πολύ μικρή και ως εκ τούτου αυτό μπορεί να συμβεί μόνο για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα ενώ το σύστημα δεν τίθεται ποτέ εκτός λειτουργίας.

Για τις πιθανότητες διακοπής λειτουργίας, που αναφέρονται στην εικόνα 49, υπολογίσαμε τη συνολική εξασθένηση για σταθμούς βάσης σε διαφορετικές περιοχές. Ο υπολογισμός έγινε σύμφωνα με τη μέθοδο που αναφέρθηκε στο 1 Κεφάλαιο (1.3.5), θεωρώντας πως οι σταθμοί λειτουργούν στα 30 GHz και με γωνία ανύψωσης 10° . Με τις τιμές που βρήκαμε συμπληρώσαμε τον ακόλουθο πίνακα:

Θέση Στ. Βάσης Outage Probability	Ελλάδα (Αθήνα)	Ιταλία (Ρώμη)	Γερμανία (Φρανκφούρτη)	Ηνωμένο Βασίλειο (Λονδίνο)
15 %	1,77 dB	1,82 dB	2,48 dB	2,49 dB
10 %	2,01 dB	2,29 dB	3,03 dB	3,14 dB
7 %	2,51 dB	2,76 dB	3,56 dB	3,80 dB
5 %	5,12 dB	6,04 dB	6,14 dB	6,14 dB
2 %	8,29 dB	9,74 dB	9,28 dB	9,29 dB

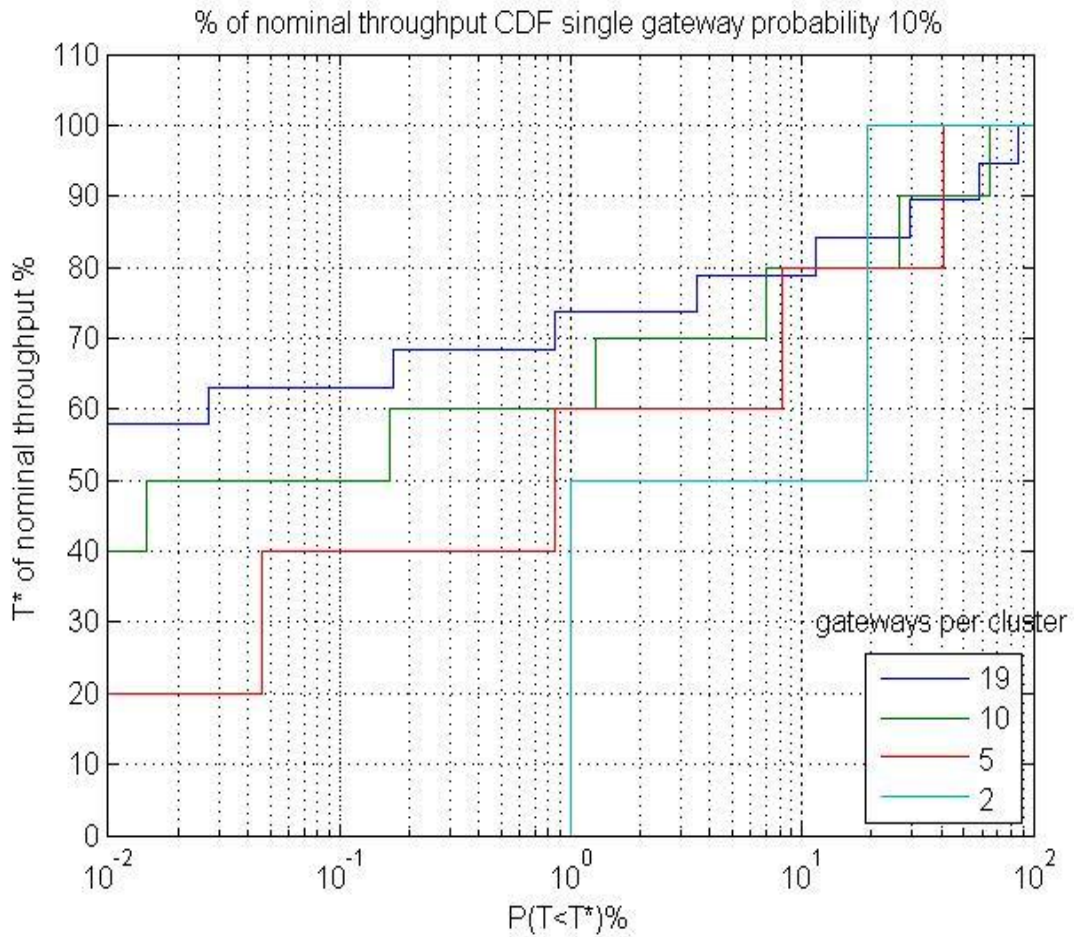
Πίνακας 4: Συνολική εξασθένηση για διάφορες περιοχές

Από τον πίνακα παρατηρούμε τα εξής: πρώτον μείωση της πιθανότητας να έχουμε διακοπή λειτουργίας συνεπάγεται αύξηση της τιμής της συνολικής εξασθένησης υπό την οποία μπορεί να λειτουργήσει ο σταθμός βάσης. Δεύτερον για τις συγκεκριμένες στάθμες πιθανοτήτων, παρατηρούμε ότι η συνολική εξασθένηση είναι μεγαλύτερη σε περιοχές, εκτός της τροπικής ζώνης, που βρίσκονται πιο μακριά από τον ισημερινό.

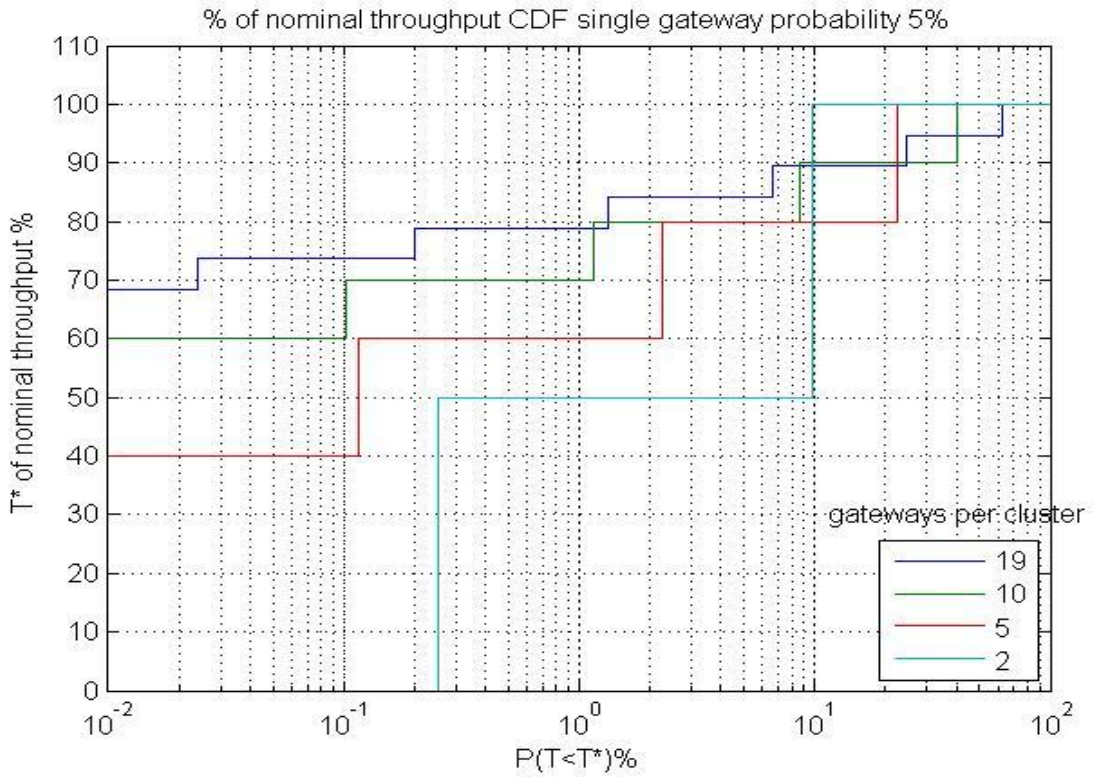
4.2.2.2 ΣΕΝΑΡΙΟ 2: Ύπαρξη Clusters

Όπως έχει ήδη αναφερθεί μερικές φορές είναι επιθυμητό να μειώσουμε τη πολυπλοκότητα του συστήματος, και επομένως να αντιστοιχίσουμε σε κάθε εκπεμπόμενη ακτίνα ένα cluster. Θεωρώντας λοιπόν αυτή τη σχεδίαση κάνουμε ότι

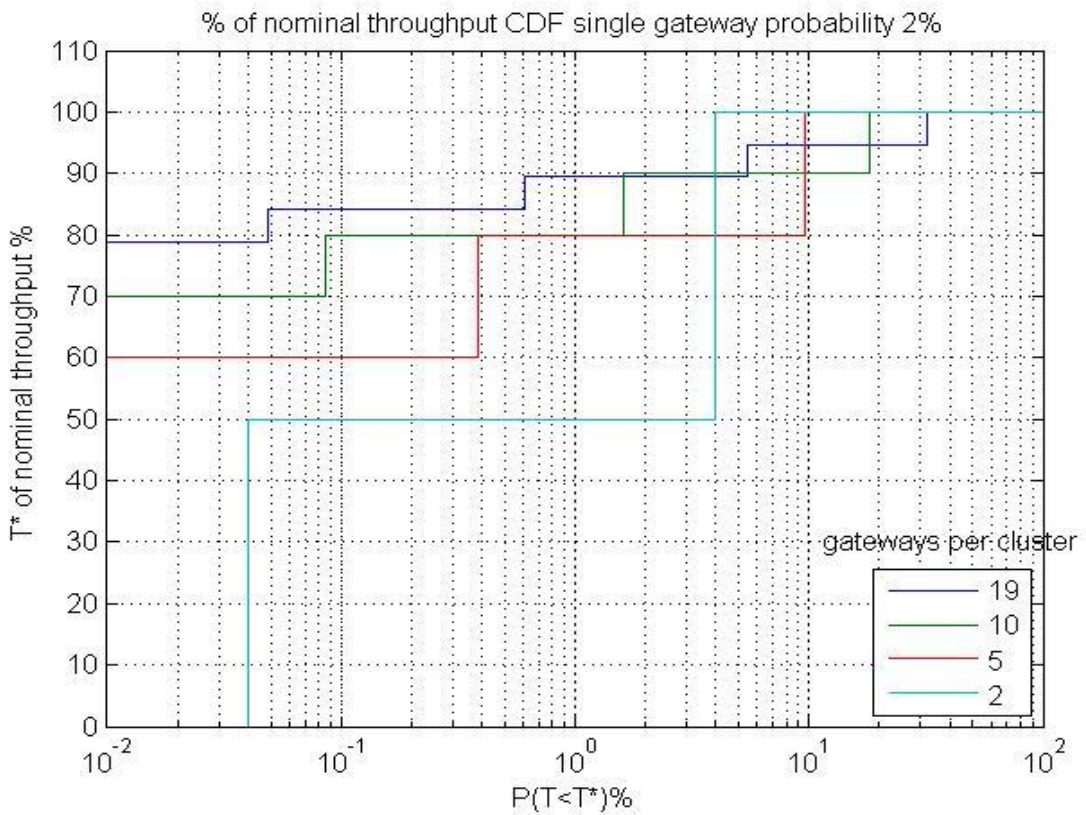
και προηγουμένως. Στις επόμενες εικόνες απεικονίζεται και πάλι η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της ρυθμοαπόδοσης για διαφορετικές πιθανότητες διακοπής λειτουργίας ενός gateway και για διαφορετικά clusters.



Εικόνα 50: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής της ρυθμοαπόδοσης για πιθανότητα διακοπής λειτουργίας 10% και για διαφορετικά clusters



Εικόνα 51: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής της ρυθμοαπόδοσης για πιθανότητα διακοπής λειτουργίας 5% και για διαφορετικά clusters



Εικόνα 52: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής της ρυθμοαπόδοσης για πιθανότητα διακοπής λειτουργίας 2% και για διαφορετικά clusters.

Από τις τρεις παραπάνω εικόνες εύκολα συμπεραίνουμε ότι η εφαρμογή clusters έχει σαν αποτέλεσμα τη λειτουργία σε χαμηλότερο ποσοστό της ονομαστικής ρυθμοαπόδοσης. Μάλιστα όσο λιγότερους gateways έχει ένα cluster, το ποσοστό αυτό μειώνεται ακόμα περισσότερο. Για παράδειγμα στην εικόνα 52 παρατηρούμε πως η ακτίνα, στην οποία είναι συνδεδεμένος ο cluster με 19 gateways, για ένα πολύ μικρό μέρος του χρόνου 0.03% λειτουργεί με λιγότερο από το 80 % της ονομαστικής ρυθμοαπόδοσης. Για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα η ακτίνα , στην οποία είναι συνδεδεμένος ο cluster με 10 gateways λειτουργεί στο 70% της ονομαστικής ρυθμοαπόδοσης ενώ στην περίπτωση του cluster με 2 gateways, πάλι για το ίδιο διάστημα και οι 2 gateways τίθενται εκτός λειτουργίας, δηλαδή η χωρητικότητα της ακτίνας είναι μηδέν και χρήστες του συγκεκριμένου cluster δεν εξυπηρετούνται .

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ESA, “ ESA support to the SatNEx III Network of Experts, CoO 1- Task 1.5 Smart gateway for Tb/s Satellite Deliverable Title TN 1.0 Assessment of the performance of the macro-diversity for Tb/s Satellite”
- [2] Nicolas Jeannin, Laurent Castanet ,Jose Radzik, Michel Bousquet ,Paul Thompson, Barry Evans,“Assessment of the availability of different macro-diversity schemes for Q/V band feeder links of systems targeting the Tb/s”, in 17th Ka Band Broadband Communications, Navigation and Earth Observation Conference, Palermo, Italy, 2011.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ

Στη παρούσα Διπλωματική εργασία γίνεται μια πρώτη εισαγωγή στα Δορυφορικά συστήματα χωρητικότητας Terabit. Τα συστήματα αυτά θα προσφέρουν μειωμένο κόστος ανά bit αλλά η υλοποίηση τους δεν αναμένεται νωρίτερα από το 2020. Η αιτία που τα συστήματα αυτά δεν είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν σήμερα είναι οι έντονες διαλείψεις στις πολύ υψηλές συχνότητες (>30 GHz) και οφείλονται κυρίως στη βροχόπτωση, στην απορρόφηση από τα αέρια της ατμόσφαιρας, στα σύννεφα και στους τροποσφαιρικούς σπινθηρισμούς. Ο υπολογισμός της εξασθένησης που εισάγει κάθε φαινόμενο, αλλά και η συνύπαρξή τους έγινε σύμφωνα με προτεινόμενα μοντέλα της ITU. Από τα μοντέλα αυτά εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τις αιτίες που προκαλούν την εξασθένηση του σήματος. Πιο συγκεκριμένα η λειτουργία του συστήματος σε υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων επηρεάζει όλα τα φαινόμενα. Πέραν όμως της συχνότητας λειτουργίας, και η μεταβολή της γωνίας ανύψωσης και τα κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής που βρίσκεται ο σταθμός βάσης, καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό τις διαλείψεις που εισάγει κάθε φαινόμενο. Αναλυτικότερα, μείωση της γωνίας ανύψωσης, συνεπάγεται αύξηση της διαδρομής που θα διανύσει το εκπεμπόμενο σήμα και επομένως αύξηση των διαλείψεων. Η αύξηση αυτή είναι πολύ μεγάλη στις διαλείψεις που οφείλονται σε βροχή και σε απορρόφηση από τα ατμοσφαιρικά αέρια. Όσον αφορά τα κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής, προκύπτει από τα μοντέλα της ITU πως σταθμοί που είναι εγκατεστημένοι σε περιοχές με τροπικό κλίμα αντιμετωπίζουν περισσότερες διαλείψεις από σταθμούς που βρίσκονται σε περιοχές με μεσογειακό (Νότια Ευρώπη) ή ωκεάνιο κλίμα (Κεντρική Ευρώπη). Ακόμη υπάρχουν και άλλοι παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η διάμετρος της κεραίας και επηρεάζουν την εξασθένηση του σήματος, που οφείλεται σε σπινθηρισμούς στην τροπόσφαιρα και στα σύννεφα. Όσον αφορά στη συνολική εξασθένηση, οι παράγοντες που την επηρεάζουν είναι κυρίως η συχνότητα λειτουργίας, η γωνία ανύψωσης και η θέση του σταθμού βάσης. Επιπλέον από τη μελέτη που έγινε στο πρώτο κεφάλαιο, συμπεραίνουμε ότι το φαινόμενο το

οποίο και επηρεάζει περισσότερο τη συνολική εξασθένηση στη Q/V ζώνη, είναι η βροχή.

Η αντιμετώπιση των διαλείψεων σε αυτές τις συχνότητες με τις σύγχρονες τεχνικές άμβλυνσης, όπως η UPLC, DPLC, SBS, DRR, ιεραρχημένη Κωδικοποίηση, ιεραρχημένη Διαμόρφωση, SD, OD, TD και FD, δεν είναι αρκετή. Για την υλοποίηση τους λοιπόν πρέπει να αναζητηθούν νέες λύσεις.

Μία τέτοια λύση είναι η χρησιμοποίηση δορυφόρων πολλαπλών ακτίνων (multi beam) με επαναχρησιμοποίηση συχνότητας και ένας συνδυασμός των ήδη υπάρχοντων FMTs. Αν και η μελέτη είναι σε αρχικό στάδιο η γενική σχεδίαση των συστημάτων θα προβλέπει την ύπαρξη ξεχωριστών ακτίνων, για την εξυπηρέτηση τερματικών χρηστών και ξεχωριστών ακτίνων για τους επίγειους σταθμούς βάσης. Η εκτίμηση του αριθμού των ακτίνων είτε προς του σταθμούς βάσης είτε προς τους χρήστες εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το σχήμα διαμόρφωσης που θα έχουμε. Οι 32-APSK και 16-APSK διαμορφώσεις αναμένεται να είναι οι επικρατέστερες το 2020 και ο προβλεπόμενος αριθμός ακτίνων με το πρώτο σχήμα διαμόρφωσης είναι 175 (ή 88 με διπλή πόλωση) για τερματικά χρηστών και 38 (ή 19 με διπλή πόλωση) για τους σταθμούς βάσης. Σε περίπτωση που το σχήμα διαμόρφωσης είναι το δεύτερο, δηλαδή 16 – APSK, ο αριθμός των ακτίνων αυξάνεται σημαντικά γεγονός που οδηγεί και σε αύξηση του C/I.

Πέραν όμως των ακτίνων που θα χρησιμοποιούν οι δορυφορικές κεραίες, τα δορυφορικά συστήματα θα πρέπει να εφαρμόσουν και έναν συνδυασμό τεχνικών άμβλυνσης των διαλείψεων. Οι Smart Gateways αρχιτεκτονικές είναι αυτές στις οποίες έχει στραφεί η προσοχή των δορυφορικών επικοινωνιών καθώς αξιοποιούν την site diversity τεχνική μειώνοντας ταυτόχρονα το αρνητικό της, που είναι το κόστος υλοποίησής της. Στις Smart Gateways δεν είναι απαραίτητο να εγκατασταθούν νέοι gateways καθώς η σχεδίαση τους προβλέπει την αξιοποίηση ήδη υπάρχοντων και τη διασύνδεση τους μέσω ενός κοινού επίγειου δικτύου.

Μία τέτοια αρχιτεκτονική είναι η UB-NGateways που παρουσιάστηκε στο τέταρτο Κεφάλαιο. Η εκτίμηση της ρυθμοαπόδοσης και της διαθεσιμότητας έγινε υποθέτοντας πως επικρατούν συνθήκες καθαρού ουρανού, οι διακοπές λειτουργίας είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους και δεν έχουμε εφαρμογή Adaptive Coding Modulation. Επιπλέον εκτιμήσαμε την ρυθμοαπόδοση του συστήματος για δύο σενάρια. Σύμφωνα με το πρώτο, κάθε εκπεμπόμενη ακτίνα (beam) από τον δορυφόρο εξυπηρετεί κίνηση από όλους τους Gateways. Αντίθετα το δεύτερο σενάριο θεωρεί

ότι κάθε ακτίνα εξυπηρετεί κίνηση από ένα cluster. Από τις προσομοιώσεις που έγιναν για την εκτίμηση της ρυθμοαπόδοσης και για τα δύο σενάρια, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα. Πρώτον τα συστήματα που δεν περιέχουν clusters προσφέρουν μεγαλύτερη ρυθμοαπόδοση από αυτά που χρησιμοποιούν. Ενδεικτικά, σύστημα με 19 Gateways και πιθανότητα διακοπής λειτουργίας 5%, λειτουργεί στο 75% της ονομαστικής ρυθμοαπόδοσής του για το 99,9 % του χρόνου ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για σύστημα με cluster, που αποτελείται από 10 Gateways, είναι 70%. Δεύτερον, ο αριθμός των gateways που συγκροτούν ένα cluster είναι καθοριστικής σημασίας για τη ρυθμοαπόδοση που μπορούν να προσφέρουν τα συστήματα. Όσο λιγότεροι είναι οι gateways σε ένα cluster τόσο χαμηλότερο είναι το ποσοστό της ονομαστικής ρυθμοαπόδοσης. Σύμφωνα πάλι με τις προαναφερθείσες προσομοιώσεις, για σύστημα με 10 Gateways/cluster η ονομαστική ρυθμοαπόδοση είναι στο 70% για το 99,9% του χρόνου και 40% για σύστημα με 2 Gateways/ cluster.

Συμπερασματικά λοιπόν, η υλοποίηση Δορυφορικών δικτύων νέας γενιάς δεν είναι δυνατή, προς το παρόν, λόγω των εξασθενήσεων που προκαλούν τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα διάδοσης. Γι'αυτό το λόγο οι δορυφορικές επικοινωνίες προσανατολίζονται στην εφαρμογή δορυφορικών κεραιών πολλαπλών ακτίνων με επαναχρησιμοποίηση συχνότητας και κάποιου FMT. Οι Smart Gateways είναι ένας έξυπνος τρόπος αντιμετώπισης των διαλείψεων και αναλόγως με το βαθμό πολυπλοκότητας που θέλουμε να έχει το σύστημα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε clusters. Τα παραπάνω όμως βρίσκονται ακόμα σε αρχικό στάδιο και απαιτείται η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και περαιτέρω έρευνα μέχρι τα συστήματα αυτά να γίνουν πραγματικότητα.

Υπάρχουν λοιπόν πολλές κατευθύνσεις στις οποίες μπορούν να κινηθούν τα δορυφορικά συστήματα. Δεδομένου της χρήσης υψηλών συχνοτήτων στα δορυφορικά συστήματα νέας γενιάς, μοντέλα για την ακριβή πρόβλεψη της συνολικής απόσβεσης καθώς και της απόσβεσης για κάθε ξεχωριστό φαινόμενο είναι αναγκαία. Τα ήδη υπάρχοντα μοντέλα έχουν δημιουργηθεί από επεξεργασία μετρήσεων στις Ku και Ka ζώνες συχνοτήτων και επομένως νέα πειράματα και νέα μοντέλα απαιτούνται για τις Q/V ζώνες. Επιπλέον, όλες οι εκτιμήσεις που αναφέρονται στην εργασία είναι πρώιμες και έγιναν με βάση κάποιες γενικές υποθέσεις και αποδοχές. Ειδικότερα στο τρίτο κεφάλαιο για την εκτίμηση του αριθμού των ακτίνων δεν λήφθηκαν υπόψη παράγοντες όπως το payload, το EIRP, το C/N και το C/I. Επιπλέον θεωρήσαμε πως η κίνηση είναι ομοιόμορφη, αλλά πολλές

φορές τα πραγματικά συστήματα, για περιπτώσεις μη ομοιόμορφης κίνησης, είναι πιθανόν να απαιτήσουν μεγαλύτερο αριθμό ακτίνων από αυτών που έχει εκτιμηθεί. Επομένως, η ακριβής εκτίμηση του αριθμού των ακτίνων που θα χρησιμοποιούν οι δορυφόροι, αποτελεί αντικείμενο που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Ακόμα στα συστήματα αυτά το φαινόμενο της παρεμβολής από γειτονικά κανάλια (C/I) είναι καθοριστικής σημασίας για την επίτευξη χωρητικότητας Terabit άρα η εκτενέστερη μελέτη του είναι αναγκαία. Μία άλλη κατεύθυνση για έρευνα και μελέτη είναι η προσαρμοστική κωδικοποίηση και διαμόρφωση στις συχότητες λειτουργίας των Δορυφορικών συστημάτων νέας γενιάς. Στη Q/V ζώνη, το εύρος των διαλείψεων είναι τόσο μεγάλο που καθιστά το υπάρχον εύρος MOD/COD συνδυασμών ανεπαρκές, κάνοντας έτσι επιτακτική την ανάγκη για εύρεση νέων συνδυασμών.

Περισσότερες μελέτες πρέπει να γίνουν και όσον αναφορά τις Smart Gateways αρχιτεκτονικές. Στη παρούσα εργασία για την εκτίμηση της ρυθμοαπόδοσης και της διαθεσιμότητας συστημάτων αρχιτεκτονικής UB-NGateways, θεωρήσαμε τις πιθανές διακοπές λειτουργίας σε ορισμένους Gateways ασυσχέτιστες μεταξύ τους. Με άλλα λόγια θεωρήσαμε πως οι διαλείψεις που υφίστανται οι Gateways είναι ανεξάρτητες λόγω των μεγάλων αποστάσεων μεταξύ τους. Ωστόσο αυτό δε μπορεί να συμβαίνει συνεχώς και συνεπώς πρέπει να γίνει μελέτη για τη περίπτωση που οι διαλείψεις είναι συσχετισμένες.

Επιπρόσθετα για την εκτίμηση της ρυθμοαπόδοσης της UB-NGateways αρχιτεκτονικής οι πιθανότητες διακοπής λειτουργίας ενός Gateway ήταν τυχαίες και αποσκοπούσαν στο να μας δώσουν μια πρώτη εικόνα για τη συμπεριφορά των συστημάτων. Επομένως η εκτίμηση της ρυθμοαπόδοσης των συστημάτων με βάση τις πιθανότητες διακοπής, όπως αυτές προκύπτουν από το $C/(N+I)$ του gateway και την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή $C/(N+I)$ για να λειτουργήσει, είναι ένα ακόμα θέμα προς μελέτη. Στην παρούσα διπλωματική εργασία δε λήφθηκε υπ'όψιν η εφαρμογή της ACM για τη μελέτη της ρυθμοαπόδοσης του UB-NGateways σχήματος. Μία μελλοντική μελέτη είναι η εφαρμογή της ACM τεχνικής και πως μεταβάλλεται η απόδοση του συστήματος για χωρικά συσχετισμένες και ασυσχέτιστες διαλείψεις.

Πέραν όμως της UB-NGateways αρχιτεκτονικής υπάρχουν και άλλες Smart Gateways αρχιτεκτονικές, όπως η UB-Gateway που αναφέρθηκε στην αρχή του τετάρτου κεφαλαίου. Αντίστοιχες λοιπόν μελέτες με αυτήν που παρουσιάζεται στη διπλωματική μπορούν να γίνουν και για τις άλλες αρχιτεκτονικές.

Τέλος ένας τομέας στον οποίο πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή λόγω της σημασίας του, είναι η διαδικασία μεταπομπής των χρηστών ενός Gateway που τίθεται εκτός λειτουργίας. Η διαδικασία αυτή, ή αλλιώς το handover, είναι ιδιαίτερα σημαντική ειδικά για τις Smart Gateways αρχιτεκτονικές και πιο συγκεκριμένα για την απόδοση που προσφέρουν. Η βελτίωση λοιπόν του handover είναι κάτι που πρέπει να μελετηθεί παραπέρα. Η βελτίωση της διαδικασίας μεταπομπής γίνεται μέσω της συνεχούς αναζήτησης και εύρεσης νέων αλγορίθμων που αναθέτουν τους διαθέσιμους πόρους με τέτοιο τρόπο ώστε η απόδοση του συστήματος να είναι η καλύτερη δυνατή είτε αυτό έχει gateways εκτός λειτουργίας είτε όχι.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΚΩΔΙΚΑΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

Στο παράρτημα αυτό παρατίθενται ο κώδικας MATLAB που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της ρυθμοαπόδοσης και της διαθεσιμότητας της UB-NGateways αρχιτεκτονικής που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4. Ακολουθούν τα σχετικά αρχεία:

```
% ta pithana outage probabilities
p=[0.02];
% o arithmos twn gateways ana cluster
Ng= [19 10 5 2];
i=1;
j=1;
k=1;

% το γράφημα που θα εμφανιστεί εξαρτάται από το μήκος του p και του Ng
%αν το p είναι μεγαλύτερο τότε παίρνουμε το γράφημα με τα διαφορετικά
% probabilities
% σε αντίθετη περίπτωση παίρνουμε το γράφημα με τα διαφορετικά clusters

if length(Ng)<=length(p)
    T=zeros(2*max(Ng)+2,length(p));
    y= zeros(2*max(Ng)+2,length(p));
    z= zeros(2*max(Ng)+2,length(p));
else
    T=zeros(2*max(Ng)+2,length(Ng));
    y= zeros(2*max(Ng)+2,length(Ng));
    z= zeros(2*max(Ng)+2,length(Ng));
end

while i<=length(Ng)& j<=length(p)

    N=zeros(max(Ng)+1,1);
    Nout=zeros(max(Ng)+1,1);

    N(1:Ng(i)+1)=[0:Ng(i)];
    Nout(1:2:2*max(Ng)+2)=N;
    Nout(2:2:2*max(Ng)+2)=N;
```

```

%upologismos tou fraction of throughput
T(1:length(Nout),k)=1-(Nout./Ng(i));

y=ones(length(Nout),k);

% η εντολή - binocdf(Nout,Ng(i),p(j)) - βρίσκει το ποσοστό του χρόνου που
% δεν έχουμε ή έχουμε τουλάχιστον ένα ή περισσότερους Gateways εκτός
% λειτουργίας.
% δηλαδή
% για Nout=0 βρίσκουμε το ποσοστό του χρόνου που όλοι οι Gateways
% λειτουργούν κανονικά.
% για Nout=1 βρίσκουμε το ποσοστό του χρόνου που ένας
% Gateway είναι εκτός λειτουργίας. κτλ
% επομένως το 1-binocdf(Nout,Ng(i),p(j)) δίνει τα "σημεία" διαδοχικά τίθενται
% εκτός λειτουργίας οι Gateways.

y(2:length(Nout)+1,k)=1-binocdf(Nout,Ng(i),p(j));

z(1:length(Nout),k)=y(1:length(Nout),k);

if length(Ng)<=length(p)
    i=1;
    j=j+1;
    k=j;
else
    i=i+1;
    j=1;
    k=i;
end
end

p=p.*100;
if length(Ng)<=length(p)

    semilogx(z.*100,T.*100)
    title('% of nominal throughput CDF')
    hleg =legend('15%', '10%', '7%', '5%', '2%', 'Location', 'SouthEast');
    xlabel('P(T<T*)%')
    ylabel('T* of nominal throughput %')
    axis([0.01 100 0 110])
    grid on
    set(get(legend, 'title'), 'string', 'single site outage probability %')
else
    semilogx(z.*100,T.*100)
    title('% of nominal throughput CDF single gateway probability 2%')
    hleg=legend('19', '10', '5', '2', 'Location', 'SouthEast');

```

```
xlabel('P(T<T*)%')
ylabel('T* of nominal throughput %')
axis([0.01 100 0 110])
grid on
set(get(legend,'title'),'string','gateways per cluster')
end
```