



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

**Επίδοση και διαθεσιμότητα δορυφορικών ευρυζωνικών
ζεύξεων αναχρησιμοποίησης συχνότητας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Γ. ΛΑΖΑΡΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων : Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2005



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

**Επίδοση και διαθεσιμότητα δορυφορικών ευρυζωνικών
ζεύξεων αναχρησιμοποίησης συχνότητας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Γ. ΛΑΖΑΡΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων : Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15^η Ιουλίου 2005

.....
Π. Κωττής
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Χ. Καγάλης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ι. Κανελλόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2005

.....
Αθανάσιος Γ. Λαζαρόπουλος

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

Copyright © Αθανάσιος Γ. Λαζαρόπουλος, Αθήνα Ιούλιος 2005

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για υπηρεσίες φωνής και δεδομένων, και ιδιαίτερα για υπηρεσίες ευρείας ζώνης (γρήγορη πρόσβαση στο Internet, υψηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, βίντεο, συνομιλία σε πραγματικό χρόνο). Με γνώμονα τη ζήτηση, οι παροχείς υπηρεσιών και οι εταιρίες κινητών επικοινωνιών για να ενδυναμώσουν τη θέση τους στη σκακιέρα του ανταγωνισμού και της ελεύθερης αγοράς ζητούν γρήγορες, εύκολες και προπαντός φθηνές λύσεις (σε θέματα εγκαταστάσεων, διασύνδεσης σταθμών βάσεων). Μια από τις λύσεις που έχουν προταθεί τα τελευταία χρόνια από την πλευρά των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων είναι η χρησιμοποίηση των δορυφορικών επικοινωνιών. Επιπλέον, το γεγονός ότι οι χαμηλές μικροκυματικές φέρουσες συχνότητες είναι σχεδόν πλήρως κατειλημμένες, σε συνδυασμό με την απαίτηση για μεγαλύτερο εύρος ζώνης και την ολοένα μεγαλύτερη συρρίκνωση του διαθέσιμου φάσματος σε συχνότητες άνω των 10GHz, μετατρέπουν το ραδιοφάσμα σε ένα σπάνιο και πολύτιμο αγαθό. Και πάλι η λύση έρχεται από τις δορυφορικές επικοινωνίες μέσω της τεχνικής βελτιστοποίησης χρήσης του ραδιοφάσματος (optimum spectrum utilization) και ειδικά μέσω της τεχνικής αναχρησιμοποίησης συχνότητας. Η τεχνική αναχρησιμοποίησης συχνότητας επιτρέπει στην ουσία να διπλασιάσουμε το διαθέσιμο φάσμα με την ταυτόχρονη μετάδοση δυο κυμάτων σε πολώσεις κάθετες μεταξύ τους.

Σε όλα τα ψηφιακά συστήματα επικοινωνιών η ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών περιγράφεται από δύο βασικές παραμέτρους, τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα υπηρεσιών (QoS: Quality of Service) του συστήματος. Για τα ασύρματα συστήματα που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz, η βροχή αποτελεί τον κυρίαρχο μηχανισμό διαλείψεων.

Σκοπός, λοιπόν, της εργασίας αυτής είναι η αναλυτική εξέταση της διαθεσιμότητας και της ποιότητας υπηρεσιών ενός δορυφορικού συστήματος αναχρησιμοποίησης συχνότητας ευρείας ζώνης.

Στο Κεφ.1 παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για το αντικείμενο των δορυφορικών επικοινωνιών. Το κεφάλαιο ξεκινά με μια αναφορά στη βάση πάνω στην οποία στηρίζονται οι δορυφορικές επικοινωνίες τους τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους. Στη συνέχεια, το κεφάλαιο συνεχίζεται με τις εφαρμογές των

δορυφορικών εφαρμογών στο παρελθόν, στο παρόν και στο μέλλον και ολοκληρώνεται με την παρουσίαση της τεχνολογίας συστημάτων VSAT και των χαρακτηριστικών τους.

Στο Κεφ.2 θίγεται το θέμα των προβλημάτων διάδοσης και ειδικά το πως η ατμόσφαιρα λόγω της σύστασής της επιδρά δυσμενώς στις δορυφορικές ζεύξεις.

Στο Κεφ.3 παρουσιάζεται η κατάσταση προόδου (state of the art) των τεχνικών άμβλυνσης των διαλείψεων σε δορυφορικά δίκτυα επικοινωνιών.

Στο Κεφ.4 παρουσιάζεται αναλυτικά η στοχαστική μοντελοποίηση της απόσβεσης λόγω βροχής. Η ανάλυση βασίζεται στη χρήση του μοντέλου των συνεκτικών βροχοπυρήνων και τη βασική υπόθεση ότι ο σημειακός ρυθμός βροχόπτωσης ακολουθεί λογαριθμοκανονική, γάμμα ή Weibull κατανομή ανάλογα με τη γεωγραφική θέση του επίγειου σταθμού λήψης. Το κεφάλαιο κλείνει με μια παρουσίαση της θεωρητικής μοντελοποίησης της τεχνικής αναχρησιμοποίησης της συχνότητας και τα συνηθισμένα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τη στατιστική ανάλυση.

Στο Κεφ.5 εξετάζεται εκτενώς η στατιστική κατανομή του σηματοθορυβικού λόγου ενός συστήματος αναχρησιμοποίησης συχνότητας. Ανάλογα με το είδος διαλείψεων (fading) που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (lognormal, gamma, Weibull μοντέλο) αναλύεται πώς επηρεάζεται μια ζεύξη διπλής πόλωσης σε συνθήκες βροχοπτώσεων και παγοκρυστάλλων θεωρητικά και παρατίθενται αναλυτικές εκφράσεις και σχέσεις.

Στο Κεφ.6 προτείνεται θεωρητικό μοντέλο υπολογισμού της πιθανότητας λανθασμένου ψηφίου BEP (Bit Error Probability) σε ένα σύστημα αναχρησιμοποίησης συχνότητας. Εξετάζεται το πώς το μέγεθος φασματική απόδοση (spectral efficiency) επιδρά στην επίδοση μιας ζεύξης. Επιπλέον, δίνεται σχετικό θεωρητικό μοντέλο υπολογισμού της στατιστικής κατανομής της χωρητικότητας δορυφορικού καναλιού.

Τέλος, στο Κεφ.7 δίνονται αριθμητικά αποτελέσματα για διάφορα μήκη και πλάτη της γης, γωνίες πόλωσης, συχνότητες, είδη κεραιών, χρόνους εκτός λειτουργίας ενός συστήματος, ρυθμούς μετάδοσης, διαμορφώσεις και κωδικοποιήσεις. Το κεφάλαιο κλείνει με την εφαρμογή του μοντέλου για πόλεις της Ευρώπης, Αφρικής και Ασίας, χρησιμοποιώντας τους πρόσφατα προτεινόμενους από

την ITU-R αλγορίθμους υπολογισμού δεδομένων βροχόπτωσης με βάση την περιοχή κάλυψης του δορυφόρου Hellas Sat.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ευρυζωνικές Δορυφορικές Επικοινωνίες, Συστήματα Αναχρησιμοποίησης Συχνότητας, BER Επίδοση, Χωρητικότητα Καναλιού.

ABSTRACT

During the last years it is observed a continuously growing demand for voice and data services, and for broadband services (fast Internet access, high speed data transmission, video, real-time communication). This fact is a great challenge for the new service providers and the network operators who wish a fast, easy and cheap installation of their equipment. In addition, mobile network operators seek for a cost-effective solution to link base stations.

A proposed solution is the dual-polarized operation of satellite communications channels (dual-polarization frequency reuse). This operation allows for an efficient use of the radioelectric spectrum. In that case, reuse of frequency allows doubling the available spectrum with the simultaneous transmission of two waves in orthogonal polarizations (optimum spectrum utilization).

The low microwave frequencies are almost completely occupied, and the demand for bandwidth leads to the allocation of frequencies above 10GHz for the operation of these systems.

In all digital communications systems the quality of provided service is described with two basic terms, the availability and the reliability of the system. For wireless systems operating at frequencies above 10GHz, rain is the dominant propagation fading mechanism. The extension of fixed wireless access systems and the coexistence with other wireless networks operating at the same frequency band, result in interference problems. Interference effects must be taken into account when system's availability and reliability are concerned. The subject of this thesis is the analytical examination of the availability and the reliability on a dual-polarized satellite system under rain fades and depolarization-induced interference.

In chapter 1 satellite communications technology is presented, as well as various characteristics of these systems.

Chapter 2 refers to propagation phenomena. Crossing the 10GHz frequency limit gives rise to signal fading due to physical phenomena related to the propagation of radiowaves through the atmosphere. Those phenomena are presented.

In chapter 3 the situation of progress (state of the art) of techniques which focus on the various fade mitigation methods developed to counteract tropospheric

signal impairments and, therefore, preserve the necessary availability and Quality of Service (QoS) of satellite systems is presented.

In chapter 4 special weight was given to the presentation of lognormal, gamma and Weibull statistical models. The chapter closes with a presentation of theoretical modelling of frequency reuse.

Chapter 5 contains the final expressions for the calculation of availability and reliability, which are obtained by straightforward algebra. This chapter suggests an analytical model for the computation of carrier-to noise ratio (C/N) improvement in a subscriber's receiver, suffering from rain fades and depolarization-induced interference.

In chapter 6 the configuration of the problem under consideration is presented. The Bit Error Probability is calculated in a subscriber's receiver, suffering from rain fades and depolarization-induced interference.

Finally, in chapter 7 numerical results for various climatic regions, path lengths, angular polarizations and outage times of the dual-polarized satellite systems are presented. The chapter ends with the application of the model in international cities using the recently proposed ITU-R Recommendations.

KEY WORDS: Broadband Satellite Communications, Frequency reuse Systems, BEP Performance, Channel Capacity.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Ολοκληρώνοντας την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας και τις προπτυχιακές μου σπουδές στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, νοιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους εκείνους που υπήρξαν αρωγοί αυτής της προσπάθειας.

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

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

Ακόμη, θα ήθελα από τα βάθη της καρδιάς μου να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου, τον πατέρα μου Γεώργιο Α. Λαζαρόπουλο, τη μητέρα μου Αικατερίνη Δ. Λαζαροπούλου και τον αδερφό μου Παναγιώτη Γ. Λαζαρόπουλο, για τα εχέγγυα που μου προσέφερε για την ολοκλήρωση των σπουδών μου και για την αμέριστη στήριξη και συμπαράσταση σε όλες τις ως τώρα προσπάθειές μου.

Τέλος, ευχαριστώ το φίλο Δημήτριο Σ. Κουτσονικόλα, ο οποίος συνετέλεσε και αυτός στην ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών.

Αθήνα, Ιούλιος 2005

Αθανάσιος Γ. Λαζαρόπουλος

Αφιερώνεται στην οικογένειά μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1^ο Σύγχρονες Δορυφορικές Επικοινωνίες

1.1 Γενικά.....	33
1.1.1 Εισαγωγή.....	33
1.1.2 Τι είναι δορυφόρος.....	34
1.1.3 Τροχιακή ταχύτητα και ύψος	36
1.1.4 Από τι αποτελείται ένας δορυφόρος.....	38
1.1.5 Ποιο είναι το κόστος ενός δορυφόρου.....	40
1.2 Η επανάσταση της τεχνολογίας των δορυφόρων και οι εφαρμογές τους.....	41
1.2.1 Εισαγωγή.....	41
1.2.2 Οι βασικές αρχές των δορυφορικών δικτύων.....	44
1.2.3 Δορυφορικοί τύποι εφαρμογών.....	49
1.2.3.1 Τηλεόραση.....	49
1.2.3.2 Σταθερή τηλεφωνία.....	51
1.2.3.3 Υπηρεσία κινητών επικοινωνιών.....	52
1.2.3.4 Δίκτυα υπολογιστών και δεδομένων.....	53
1.3 Εισαγωγικά στοιχεία για τα VSAT (Very Small Aperture Terminal).....	55
1.3.1 Ορισμός.....	55
1.3.2 Περιγραφή ενός VSAT.....	56
1.3.3 Εσωτερική μονάδα VSAT.....	57
1.3.4 Εξωτερική μονάδα VSAT.....	58
1.4 Κεντρικός σταθμός (hub).....	59
1.5 Τοπολογία δικτύων VSAT.....	61
1.5.1 Τοπολογία αστέρα (star).....	62
1.5.2 Τοπολογία πλέγματος (mesh).....	62

Κεφάλαιο 2^ο Προβλήματα Διάδοσης

2.1 Γενικά.....	65
2.2 Δυσμενείς επιδράσεις της ατμόσφαιρας στη διάδοση δορυφορικών σημάτων.....	67
2.3 Αποπόλωση λόγω βροχής και παγοκρυστάλλων.....	74
2.3.1 Τεχνολογία αναχρησιμοποίησης συχνότητας.....	75

Κεφάλαιο 3^ο Τεχνικές Άμβλυνσης

3.1 Γενικά.....	77
3.2 Έλεγχος της Ισχύος.....	80
3.2.1 Έλεγχος ισχύος της άνω ζεύξης (ULPC).....	81
3.2.2 Έλεγχος ισχύος της κάτω ζεύξης (DLPC).....	82
3.2.3 Μορφοποίηση διαγράμματος ακτινοβολίας κεραίας (Spot Beam Shaping SBS).....	82
3.3 Κωδικοποίηση για διόρθωση σφαλμάτων.....	83
3.4 Προσαρμοστική Διαμόρφωση (Adaptive Modulation AM).....	85
3.5 Ρυθμός Μείωσης Δεδομένων (Data Rate Reduction DRR).....	86
3.6 Σχήματα διαφορικής προστασίας.....	86
3.6.1 Διαφορική λήψη συχνότητας.....	87
3.6.2 Τεχνικές διαφορικής λήψης θέσης και τροχιάς.....	89
3.6.2.1 Εκτίμηση τεχνικών διαφορικής λήψης θέσης και τροχιάς	93
3.6.2.2 Μοντέλο εκτίμησης του διαφορικού κέρδους θέσης και τροχιάς.....	95

Κεφάλαιο 4^ο Στατιστικά Μοντέλα Περιγραφής

4.1 Γενικά.....	99
4.2 Περιγραφή του μέσου βροχής.....	100
4.3 Ορισμός της ειδικής απόσβεσης.....	101
4.4 Γεωμετρία δορυφορικής ζεύξης και ενεργό ύψος βροχής.....	103
4.5 Χωρική μεταβολή της βροχής στο κατακόρυφο επίπεδο.....	106
4.6 Μοντέλο λογαριθμοκανονικής κατανομής.....	106
4.7 Μοντέλο γάμα κατανομής.....	109
4.8 Μοντέλο Weibull κατανομής.....	111
4.9 Αποπόλωση λόγω βροχής και παγοκρυστάλλων.....	115

Κεφάλαιο 5^ο Επίδοση Δορυφορικής Ζεύξης με μελέτη της Στατιστικής κατανομής Σηματοθορυβικού Λόγου

5.1 Γενικά.....	119
5.2 Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας δορυφορικού συστήματος παρουσία βροχής και παγοκρυστάλλων.....	120
5.2.1 Σύστημα απλής πόλωσης.....	120

5.2.2 Σύστημα διπλής πόλωσης με βροχή και χωρίς παγοκρυστάλλους.....	127
5.2.3 Σύστημα διπλής πόλωσης με βροχή και παγοκρυστάλλους.....	130
5.3 Επιδείνωση Διπλής Πόλωσης (Dual Polarization Aggravation DPA).....	133
5.3.1 Σύστημα απλής πόλωσης.....	134
5.3.2 Σύστημα διπλής πόλωσης με βροχή και χωρίς παγοκρυστάλλους.....	135
5.3.3 Σύστημα διπλής πόλωσης με βροχή και παγοκρυστάλλους.....	136

Κεφάλαιο 6^ο Στατιστική Κατανομή Πιθανότητας Λανθασμένου Ψηφίου BEP

6.1 Γενικά.....	137
6.2 Μέθοδος πρόβλεψης διαθεσιμότητας.....	139
6.3 Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας δορυφορικού συστήματος παρουσία βροχής και παγοκρυστάλλων.....	147
6.3.1 Σύστημα απλής πόλωσης.....	147
6.3.2 Σύστημα διπλής πόλωσης με βροχή και χωρίς παγοκρυστάλλους.....	151
6.3.3 Σύστημα διπλής πόλωσης με βροχή και παγοκρυστάλλους.....	152
6.4 Επιδείνωση Διπλής Πόλωσης (Dual Polarization Aggravation DPA).....	153
6.4.1 Σύστημα απλής πόλωσης.....	154
6.4.2 Σύστημα διπλής πόλωσης με βροχή και χωρίς παγοκρυστάλλους.....	155
6.4.3 Σύστημα διπλής πόλωσης με βροχή και παγοκρυστάλλους.....	156
6.5 Αποδοτική χρησιμοποίηση καναλιού.....	157
6.5.1 Η χωρητικότητα καναλιού θεωρώντας τις απώλειες διάδοσης.....	157
6.5.2 Προσδιορισμός της επίδοσης μη κωδικοποιημένης M-PSK διαμόρφωσης.....	160

Κεφάλαιο 7^ο Αριθμητικά Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

7.1 Γενικά.....	163
7.2 Παραδείγματα δορυφορικών ζεύξεων.....	166
Πιθανότητα υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$	167
Επιδείνωση Διπλής Πόλωσης.....	179
Επιδείνωση διπλής πόλωσης από τους παγοκρυστάλλους.....	184
Πιθανότητα υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(E_b/N_o)_{thr}$	189

Η χωρητικότητα καναλιού.....	197
Πιθανότητα υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C_{Shannon}/B)_{thr}$	200
Πιθανότητα Λάθους ενός bit (BER).....	208
Καμπύλες επίδοσης συστημάτων.....	209
Πιθανότητα υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ σε συνάρτηση με τη συχνότητα.....	216
Πιθανότητα υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ με μη ιδανική κεραία.....	219
Συμπεράσματα.....	228
Παράρτημα Α Λογαριθμοκανονική κατανομή	
A.1 Μονοδιάστατη.....	231
A.2 Λογαριθμικός συντελεστής συσχέτισης.....	233
A.3 Υπολογισμός παραμέτρων λογαριθμοκανονικής κατανομής από πειραματικά δεδομένα.....	234
Παράρτημα Β Γάμμα κατανομή	
B.1 Μονοδιάστατη.....	237
Παράρτημα Γ Υπολογισμός Παραμέτρων που αφορούν τη Χωρική Δομή του Μέσου Βροχόπτωσης	
Γ.1 Υπολογισμός του H1.....	239
Γ.2 Μοντέλο Lin.....	240
Γ.3 Μοντέλο Morita-Higuti.....	241
Παράρτημα Δ Ο Σηματοθορυβικός Λόγος	
Δ.1 Απόδειξη της σχέσης σε συστήματα διπλής πόλωσης	243
Παράρτημα Ε Ο Σηματοθορυβικός Λόγος με το XPD Κεραίας	
E.1 Απόδειξη της σχέσης σε συστήματα διπλής πόλωσης.....	245
Παράρτημα ΣΤ Ο Λόγος Eb/no	

ΣΤ.1 Απόδειξη της σχέσης σε συστήματα διπλής πόλωσης.....	249
Παράρτημα Ζ Ο Λόγος Eb/no με το XPD Κεραίας	
Ζ.1 Απόδειξη της σχέσης σε συστήματα διπλής πόλωσης.....	253
Παράρτημα Η Πρόγραμμα ZBRENT στο MATLAB	
Η.1 Γενικά.....	257
Παράρτημα Θ Χαρακτηριστικά δορυφόρου HELLAS Sat	
Θ.1 Γενικά.....	261
Παράρτημα Ι Πιθανότητες Λάθους PSK Διαμορφώσεων	
Ι.1 Γενικά.....	269
Παράρτημα Κ Ανάλυση Κατανομής Σημειακής Έντασης Βροχόπτωσης	
Κ.1 Ανάλυση Κατανομής.....	273
Κ.2 Βελτιωμένο μοντέλο Mourfouma	282
Κ.3 Παλαιότερο μοντέλο κλιματικών ζωνών	290
Παράρτημα Λ Οικονομικά Στοιχεία	
Λ.1 Γενικά.....	303
Βιβλιογραφία.....	305

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

1.1	NAVSTAR GPS δορυφόρος.....	34
1.2	Σπούτνικ 1, ο πρώτος δορυφόρος, εδώ παρουσιάζεται με τις τέσσερις κεραίες του.....	35
1.3	Οι τρεις πιο δημοφιλείς τροχιές είναι οι LEO, MEO και GEO. Αντίστοιχα τα τους είναι 500-900 km, 5.000-12.000 km και 36.000 km. Μόνο μια τροχιά ανά ύψος παρουσιάζεται, αν και υπάρχει η ανάγκη για αστερισμό δορυφόρων όταν πρόκειται για τις τροχιές LEO και MEO για να παρασχεθούν αδιάλειπτες υπηρεσίες.....	41
1.4	Οι πιο δημοφιλείς αμερικάνικοι GEO δορυφόροι καλωδιακής τηλεόρασης.....	43
1.5	Συμβάλλοντες στη ρυθμαπόδοση και στην ολική καθυστέρηση μιας σύνδεσης δεδομένων από χρήστη VSAT με σταθμό hub.....	54
1.6	Κεραία VSAT.....	56
1.7	Μπλοκ διάγραμμα ενός VSAT.....	57
1.8	Διάγραμμα εσωτερικής μονάδας.....	58
1.9	Το block διάγραμμα ενός VSAT Hub σταθμού.....	59
1.10	Τοπολογίες σύνδεσης VSAT.....	61
1.11	Τοπολογία σύνδεσης αστέρα.....	62
1.12	Τοπολογία σύνδεσης πλέγματος.....	63
2.1	Επηρεασμός δορυφορικής ζεύξης από υδρομετεωρίτες και παγοκρυστάλλους..	67
2.2	Ειδική εξασθένηση προς συχνότητα. Η καμπύλη Α παρουσιάζει την ειδική απορρόφηση σε μια ατμόσφαιρα 7,5gr/m ³ ενώ η καμπύλη Β παρουσιάζει μια υγρή ατμόσφαιρα.....	70
2.3	Χαρακτηριστική εικόνα των διακυμάνσεων απόσβεσης λόγω βροχής και σπινθηρισμών.....	72
2.4	Εξασθένηση από τα σύννεφα και την ομίχλη προς το ποσοστό του χρόνου λειτουργίας στην Αθήνα με γωνία ανύψωσης 30 μοιρών.....	73
2.5	Κεραία διπλής πόλωσης δορυφορικού σταθμού.....	75
3.1	Υψηλότερες συχνότητες σε συνθήκες καθαρού ουρανού και χαμηλότερες υπό ισχυρές κατακρημνίσεις.....	88
3.2α	Γεωμετρία απλοποιημένου συστήματος διπλής διαφορικής λήψης θέσης	90

3.2β Γεωμετρικές παράμετροι της τεχνικής διπλής διαφορικής λήψης θέσης	90
3.3α Γεωμετρία απλοποιημένου συστήματος διπλής λήψης τροχιάς.....	91
3.3β Γεωμετρικές παράμετροι της τεχνικής διπλής διαφορικής λήψης τροχιάς.....	92
4.1 Ενεργό μήκος δορυφορικής ζεύξης για $\varphi \geq 10^\circ$	103
4.2 Ενεργό μήκος δορυφορικής ζεύξης για $\varphi \leq 10^\circ$	105
5.1 Γεωμετρία δορυφορικού συστήματος.....	120
6.1 Λήψη ορθογωνικών πολώσεων.....	140
6.2 Γεωμετρία δορυφορικού συστήματος.....	142
7.1 Γεωμετρία δορυφορικού συστήματος με γωνία ανύψωσης φ	164
7.2 Η Αθήνα στον παγκόσμιο χάρτη.....	167
7.3 Η Αθήνα στη γεωγραφική κάλυψη του HELLAS Sat.....	167
7.4 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης $46,4^\circ$)...168	
7.5 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης $46,4^\circ$)...169	
7.6 Το Ντουμπάι στον παγκόσμιο χάρτη.....	170
7.7 Το Ντουμπάι στη γεωγραφική κάλυψη του HELLAS Sat.....	170
7.8 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης $55,4^\circ$)...171	
7.9 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης $55,4^\circ$)...172	
7.10 Το Γιοχάνεσμπουργκ στον παγκόσμιο χάρτη.....	173
7.11 Το Γιοχάνεσμπουργκ στη γεωγραφική κάλυψη του HELLAS Sat.....	173
7.12 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης $57,1^\circ$)...174	

7.13 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης $57,1^\circ$)....	175
7.14 Το Μονακό στον παγκόσμιο χάρτη.....	176
7.15 Το Μονακό στη γεωγραφική κάλυψη του HELLAS Sat.....	176
7.16 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης $30,7^\circ$)....	177
7.17 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης $30,7^\circ$)....	178
7.18 Καμπύλες επιδείνωσης διπλής πόλωσης για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης (0,01% του συνολικού χρόνου) δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της γωνίας πόλωσης. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης $46,4^\circ$).....	180
7.19 Καμπύλες επιδείνωσης διπλής πόλωσης για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης (0,01% του συνολικού χρόνου) δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της γωνίας πόλωσης. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης $55,4^\circ$).....	181
7.20 Καμπύλες επιδείνωσης διπλής πόλωσης για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης (0,01% του συνολικού χρόνου) δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της γωνίας πόλωσης. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης $57,1^\circ$).....	182
7.21 Καμπύλες επιδείνωσης διπλής πόλωσης για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης (0,01% του συνολικού χρόνου) δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της γωνίας πόλωσης. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης $30,7^\circ$).....	183
7.22 Καμπύλες επιδείνωσης διπλής πόλωσης από παγοκρυστάλλους για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης (0,01% του συνολικού χρόνου) δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της γωνίας πόλωσης. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης $46,4^\circ$).....	185

- 7.23 Καμπύλες επιδείνωσης διπλής πόλωσης από παγοκρυστάλλους για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης (0,01% του συνολικού χρόνου) δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της γωνίας πόλωσης. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 55,4 °).....186
- 7.24 Καμπύλες επιδείνωσης διπλής πόλωσης από παγοκρυστάλλους για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης (0,01% του συνολικού χρόνου) δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της γωνίας πόλωσης. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 57,1 °).....187
- 7.25 Καμπύλες επιδείνωσης διπλής πόλωσης από παγοκρυστάλλους για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης (0,01% του συνολικού χρόνου) δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της γωνίας πόλωσης. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 30,7 °).....188
- 7.26 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(E_b / N_o)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °)...189
- 7.27 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(E_b / N_o)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °)...190
- 7.28 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(E_b / N_o)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 55,4 °)...191
- 7.29 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(E_b / N_o)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 55,4 °)...192
- 7.30 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(E_b / N_o)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 57,1 °)...193
- 7.31 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(E_b / N_o)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 57,1 °)....194
- 7.32 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης

για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(E_b / N_o)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 30,7 °)...	195
7.33 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(E_b / N_o)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 30,7 °)....	196
7.34 Καμπύλη χωρητικότητας καναλιού $C_{shannon}$ σε συνάρτηση του σηματοθορυβικού λόγου και του εύρους ζώνης.....	198
7.35 Καμπύλη χωρητικότητας καναλιού $C_{shannon}$ προς το εύρος ζώνης σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο.....	199
7.36 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C_{shannon} / B)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °)...	200
7.37 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C_{shannon} / B)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °)...	201
7.38 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C_{shannon} / B)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 55,4 °)....	202
7.39 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C_{shannon} / B)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 55,4 °)...	203
7.40 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C_{shannon} / B)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 57,1 °)...	204
7.41 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C_{shannon} / B)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 57,1 °)...	205
7.42 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C_{shannon} / B)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 30,7 °)...	206

7.43 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C_{Shannon} / B)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 30,7 °)...	207
7.44 Ψηφιακές κωδικοποιήσεις.....	208
7.45 Καμπύλες επίδοσης για συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών σε συστήματα απλής, διπλής πόλωσης χωρίς παγοκρυστάλλους και διπλής πόλωσης με παγοκρυστάλλους για το λογαριθμοκανονικό μοντέλο. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).....	210
7.46 Καμπύλες επίδοσης για συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών σε συστήματα απλής, διπλής πόλωσης χωρίς παγοκρυστάλλους και διπλής πόλωσης με παγοκρυστάλλους για το μοντέλο γάμμα. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).....	211
7.47 Καμπύλες επίδοσης για συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών σε συστήματα απλής, διπλής πόλωσης χωρίς παγοκρυστάλλους και διπλής πόλωσης με παγοκρυστάλλους για το μοντέλο Weibull. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).....	212
7.48 Καμπύλες επίδοσης για συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών σε συστήματα απλής, διπλής πόλωσης χωρίς παγοκρυστάλλους και διπλής πόλωσης με παγοκρυστάλλους για το λογαριθμοκανονικό μοντέλο. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).....	213
7.49 Καμπύλες επίδοσης για συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών σε συστήματα απλής, διπλής πόλωσης χωρίς παγοκρυστάλλους και διπλής πόλωσης με παγοκρυστάλλους για το μοντέλο γάμμα. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).....	214
7.50 Καμπύλες επίδοσης για συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών σε συστήματα απλής, διπλής πόλωσης χωρίς παγοκρυστάλλους και διπλής πόλωσης με παγοκρυστάλλους για το μοντέλο Weibull. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).....	215
7.51 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C / N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °)...	216
7.52 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης	

για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C / N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 18GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °)....	217
7.53 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C / N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 24GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °)....	218
7.54 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C / N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων με τη χρήση μη ιδανικής κεραίας. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).....	220
7.55 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C / N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων με τη χρήση μη ιδανικής κεραίας. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).....	221
7.56 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C / N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων με τη χρήση μη ιδανικής κεραίας. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 55,4 °).....	222
7.57 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C / N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων με τη χρήση μη ιδανικής κεραίας. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 55,4 °).....	223
7.58 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C / N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων με τη χρήση μη ιδανικής κεραίας. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 57,1 °).....	224
7.59 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C / N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων με τη χρήση μη ιδανικής κεραίας. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 57,1 °).....	225
7.60 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C / N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την	

παρουσία παγοκρυστάλλων με τη χρήση μη ιδανικής κεραίας. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 30,7 °).....	226
7.61 Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων με τη χρήση μη ιδανικής κεραίας. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 30,7 °).....	227
Θ.1 Η εκτόξευση του Hellas Sat.....	262
Θ.2 Σχέδιο του δορυφορικού αναμεταδότη.....	263
Θ.3 Ο δορυφορικός αναμεταδότης.....	264
Θ.4 Hellas Sat.....	266
Θ.5 Κάλυψη σταθερής δέσμης F1.....	267
Θ.6 Κάλυψη σταθερής δέσμης F2.....	267
Θ.7 Κάλυψη σταθερής δέσμης S1.....	268
Θ.8 Κάλυψη σταθερής δέσμης S2.....	268
K.1 Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα και Weibull μοντέλο για την Αθήνα.....	276
K.2 Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα και Weibull μοντέλο για το Ντουμπάι.....	277
K.3 Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα και Weibull μοντέλο για το Γιοχάνεσμπουργκ.....	278
K.4 Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα και Weibull μοντέλο για το Μονακό.....	279
K.5 Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα και Weibull μοντέλο για τη Τζακάρτα.....	280
K.6 Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα και Weibull μοντέλο για τη Νέα Υόρκη.....	281
K.7 Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Mourofouma μοντέλο για την Αθήνα.....	284
K.8 Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Mourofouma μοντέλο για το Ντουμπάι.....	285
K.9 Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Mourofouma μοντέλο για το Γιοχάνεσμπουργκ.....	286
K.10 Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα,	

Weibull και Μουρφουμα μοντέλο για το Μονακό.....	287
K.11 Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Μουρφουμα μοντέλο για τη Τζακάρτα.....	288
K.12 Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Μουρφουμα μοντέλο για τη Νέα Υόρκη.....	289
K.13 Γεωγραφική κατανομή των διαφορών κλιματικών ζωνών	294
K.14 Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R (mm/hr) για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Μουρφουμα μοντέλο με χάρτες βροχής και κλιματικές ζώνες για την Αθήνα.....	296
K.15 Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R (mm/hr) για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Μουρφουμα μοντέλο με χάρτες βροχής και κλιματικές ζώνες για το Ντουμπάι.....	297
K.16 Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R (mm/hr) για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Μουρφουμα μοντέλο με χάρτες βροχής και κλιματικές ζώνες για το Γιοχάνενσμπουργκ.....	298
K.17 Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R (mm/hr) για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Μουρφουμα μοντέλο με χάρτες βροχής και κλιματικές ζώνες για το Μονακό.....	299
K.18 Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R (mm/hr) για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Μουρφουμα μοντέλο με χάρτες βροχής και κλιματικές ζώνες για τη Τζακάρτα.....	300
K.19 Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R (mm/hr) για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Μουρφουμα μοντέλο με χάρτες βροχής και κλιματικές ζώνες για τη Νέα Υόρκη.....	301

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

1.1 Δορυφορικές ζώνες συχνοτήτων και οι υπηρεσίες τους.....	46
7.1 Τιμές R_m , S_r , v_r , b_r , w , m σε διάφορες πόλεις.....	165
Θ.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του Hellas Sat.....	266
I.1 Εκφράσεις P_b για διάφορα συστήματα ψηφιακής διαμόρφωσης	270
K.1 Ο κατά ITU-R διαχωρισμός της γης σε κλιματικές ζώνες, καθώς και οι αντίστοιχοι παράμετροι της λογαριθμοκανονικής, γάμμα και Weibull κατανομής της έντασης R που τις χαρακτηρίζουν.....	295
Λ.1 Οι οικονομικές συναρτήσεις	304

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

1

ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

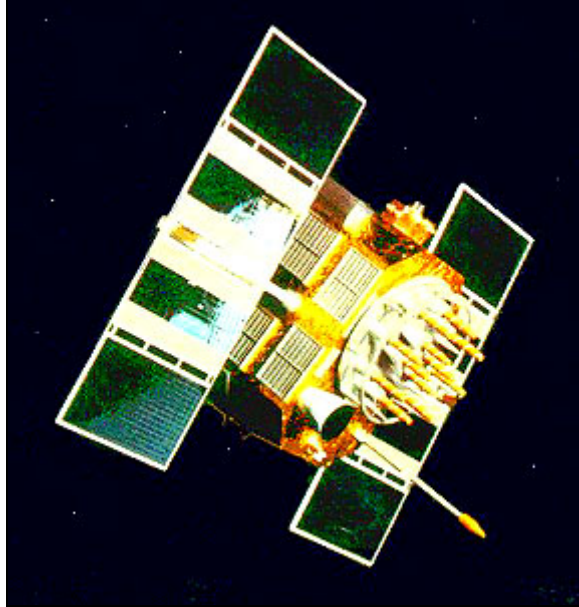
1.1 Γενικά

1.1.1 Εισαγωγή

Μέχρι πριν μερικά χρόνια, οι δορυφόροι χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για στρατιωτικούς σκοπούς και για δραστηριότητες, όπως η ναυσιπλοΐα και η κατασκοπεία. Στη σημερινή εποχή αποτελούν μέρος της καθημερινότητας. Καθένας βλέπει και αναγνωρίζει τη χρήση τους στις προγνώσεις καιρού, στην απευθείας τηλεοπτική μετάδοση και στις τηλεφωνικές κλήσεις εξωτερικού. Σε πολλές άλλες περιπτώσεις, οι δορυφόροι αποτελούν υπόβαθρο για εφαρμογές που μπορεί να ξεφεύγουν της αντίληψής μας, όπως:

- Μερικές εφημερίδες και περιοδικά εκδίδονται γρηγορότερα χάρη στη διαβίβαση του κειμένου και των εικόνων τους στις διάφορες περιοχές εκτύπωσης μέσω δορυφόρων.
- Στην καλωδιακή τηλεόραση, πριν το σήμα σταλεί από το καλώδιο στα σπίτια μεταδίδεται από τους δορυφόρους οι οποίοι διανέμουν το σήμα στους επίγειους σταθμούς.
- Οδηγοί αυτοκινήτων χρησιμοποιούν το δορυφορικό Global Positioning System (GPS) για να λάβουν τον κατάλληλο προσανατολισμό για δεδομένο προορισμό.

- Τα ραδιοαναγνωριστικά σήματα έκτακτης ανάγκης από τα ‘χαμένα’ αεροσκάφη και τα σκάφη σε κίνδυνο μπορούν να φθάσουν στις ομάδες αναζήτησης και διάσωσης όταν τα αναμεταδίδουν οι δορυφόροι.



Σχήμα 1.1: NAVSTAR GPS δορυφόρος.

Στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί ο τρόπος λειτουργίας των τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων, τα συστήματα και υποσυστήματα που περιλαμβάνουν, τα διάφορα είδη τροχιών και τα κριτήρια της επιλογής τους ανάλογα με την εφαρμογή.

1.1.2 Τι είναι δορυφόρος

Ένας δορυφόρος είναι οποιοδήποτε αντικείμενο περιστρέφεται γύρω από ένα πλανήτη σε μια κυκλική ή ελλειπτική τροχιά. Η σελήνη είναι φυσικός δορυφόρος, όμως υπάρχουν πολλοί τεχνητοί δορυφόροι, που περιφέρονται κοντά στη γη.

Η πορεία που ένας δορυφόρος ακολουθεί είναι η τροχιά του. Στην τροχιά, το απώτατο σημείο από τη γη ονομάζεται απόγειο και το εγγύτερο σημείο περίγειο.

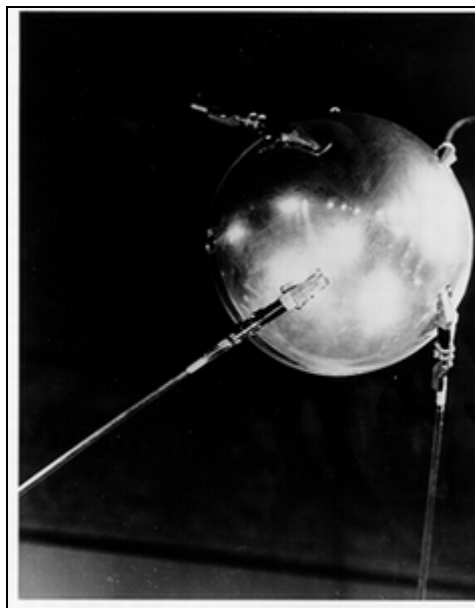
Οι τεχνητοί δορυφόροι δεν κατασκευάζονται μαζικά. Οι περισσότεροι δορυφόροι κατασκευάζονται για να εκτελέσουν συγκεκριμένες λειτουργίες. Οι εξαιρέσεις περιλαμβάνουν δορυφόρους GPS (με πάνω από 20 σε τροχιά).

Περίπου 23.000 είναι τα διαστημικά σκουπίδια (αντικείμενα αρκετά μεγάλα ώστε να μπορούν να εντοπίζονται από τα ραντάρ), τα οποία τοποθετήθηκαν ακούσια

σε τροχιά ή έχει παρέλθει η χρησιμότητά τους που περιστρέφονται γύρω από τη γη. Ο πραγματικός αριθμός ποικίλλει ανάλογα με το τι μέγεθος κάθε φορά μετράται. Ωφέλιμα στοιχεία που οδηγούνται ή τίθενται σε λανθασμένη τροχιά, δορυφόροι με εξαντλημένες μπαταρίες και οι εναπομείναντες ενισχυτές πυραύλων προσθέτουν στο πλήθος αυτών των σκουπιδιών. Ο κατάλογος των δορυφόρων έχει σχεδόν 26.000 καταχωρήσεις.

Αν και οποιοδήποτε αντικείμενο βρίσκεται σε τροχιά γύρω από τη γη είναι τυπικά ένας δορυφόρος, ο συγκεκριμένος όρος χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα χρήσιμο αντικείμενο που τοποθετείται σε τροχιά για να εκτελέσει εσκεμμένα κάποια συγκεκριμένη αποστολή ή στόχο.

Ο σοβιετικός δορυφόρος Σπούτνικ ήταν ο πρώτος που μπήκε σε τροχιά γύρω από τη γη. Προωθήθηκε σε τροχιά στις 4 Οκτωβρίου 1957.



Σχήμα 1.2: Σπούτνικ 1, ο πρώτος δορυφόρος, εδώ παρουσιάζεται με τις τέσσερις κεραιές του.

1.1.3 Τροχιακή ταχύτητα και ύψος

Ένας πύραυλος πρέπει να επιταχύνει τουλάχιστον με 40.320Kmh για να δραπετεύσει εντελώς από τη γήινη βαρύτητα και να πετάξει μακριά στο διάστημα (ταχύτητα διαφυγής).

Η ταχύτητα γήινης διαφυγής είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που απαιτείται για να τοποθετηθεί ένας γήινος δορυφόρος σε τροχιά. Με τους δορυφόρους, το θέμα δεν είναι να δραπετεύσουν από τη γήινη βαρύτητα, αλλά να ισορροπήσουν στην τροχιακή ταχύτητα. Τροχιακή ταχύτητα δορυφόρου είναι η ταχύτητα που απαιτείται για να επιτευχθεί η ισορροπία μεταξύ της έλξης της βαρύτητας στο δορυφόρο και της αδράνειας της κίνησης του δορυφόρου, δηλαδή της τάσης του δορυφόρου να διαφύγει. Αυτή είναι περίπου 27.359Kmh σε ένα ύψος 242Km. Χωρίς βαρύτητα, η αδράνεια του δορυφόρου θα τον έστελνε μακριά στο διάστημα. Ακόμη και με τη βαρύτητα, εάν ο δορυφόρος κινείται πολύ γρήγορα, θα διαφύγει τελικά μακριά στο διάστημα. Στην περίπτωση που ο δορυφόρος κινείται πολύ αργά, η βαρύτητα θα τον τραβήξει πίσω στη γη. Στη σωστή τροχιακή ταχύτητα, η βαρύτητα ισορροπεί ακριβώς την αδράνεια του δορυφόρου, έλκοντάς τον προς το γήινο κέντρο τόσο ακριβώς ώστε να κρατήσει την πορεία του.

Η τροχιακή ταχύτητα του δορυφόρου εξαρτάται από το ύψος που βρίσκεται ο δορυφόρος πάνω από τη γη. Όσο πιο κοντά βρίσκεται στη γη, τόσο μεγαλύτερη η απαραίτητη τροχιακή ταχύτητα.

Ο όρος γεωσύγχρονος δορυφόρος προσδιορίζει τον δορυφόρο εκείνο, ο οποίος έχει περίοδο περιστροφής ίση με την περίοδο περιστροφής της γης, δηλαδή $T=23h\ 56min\ 4,1sec$. Από τη σχέση (1.1) είναι δυνατόν να υπολογιστεί ότι το ύψος του γεωσύγχρονου δορυφόρου θα πρέπει να είναι 37.786Km.

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{(R + h)^3}{G \cdot M}} \quad (1.1)$$

όπου $R=6.378Km$, η ακτίνα της γης, h το ύψος του δορυφόρου πάνω από την επιφάνεια της γης, G είναι η παγκόσμια σταθερά της βαρύτητας, $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \cdot kg^{-1} \cdot m^3 \cdot sec^{-2}$ και M είναι η μάζα της γης, $M = 5,674 \cdot 10^{24} kg$.

Η ταχύτητα του δορυφόρου στην τροχιά αυτή θα είναι 11.070Kmh. Τόσο η κλίση, όσο και η εκκεντρότητα της γεωσύγχρονης τροχιάς μπορούν να έχουν γενικά οποιαδήποτε τιμή.

Ο γεωστατικός δορυφόρος είναι ο γεωσύγχρονος δορυφόρος του οποίου η τροχιά έχει μηδενικές εκκεντρότητα και κλίση. Εάν το επίπεδο τροχιάς του δορυφόρου είναι το ισημερινό επίπεδο, τροχιά του είναι κυκλική και η ταχύτητα περιστροφής του ταυτίζεται με αυτή της γης, θα φαίνεται από τον επίγειο σταθμό ως ένα σταθερό σημείο στον ουρανό. Οι γεωστατικές τροχιές είναι ιδανικές για τους μετεωρολογικούς δορυφόρους και τους δορυφόρους επικοινωνιών [Κωττής, Καψάλης, 2003]^[1].

Η σελήνη βρίσκεται σε ένα ύψος περίπου 384.400Km, με ταχύτητα περίπου 3.700Kmh και η τροχιά του διαρκεί 27,322 ημέρες. (Ας σημειωθεί ότι η τροχιακή ταχύτητα της σελήνης είναι μικρότερη επειδή είναι πιο μακριά από τη γη σε σχέση με τους τεχνητούς δορυφόρους).

Γενικά, όσο υψηλότερη η τροχιά, τόσο περισσότερο ο δορυφόρος μπορεί να μείνει στην τροχιά. Στα χαμηλότερα ύψη, ένας δορυφόρος κινείται κοντά στη γήινη ατμόσφαιρα, η οποία δημιουργεί έλξη. Η έλξη αναγκάζει την τροχιά του δορυφόρου να αποσυντεθεί έως ότου αυτός πέσει στην ατμόσφαιρα. Σε μεγαλύτερα υψόμετρα, όπου το διάστημα είναι σχεδόν κενό, δεν υπάρχει σχεδόν καμία έλξη και ένας δορυφόρος μπορεί να μείνει στην τροχιά επί αιώνες (όπως για παράδειγμα η σελήνη).

Οι δορυφόροι αρχίζουν σε μια τροχιά που είναι ελλειπτική. Ο σταθμός επίγειου ελέγχου ελέγχει τις μικρές μηχανές πυραύλων για να παράσχουν τη διόρθωση. Ο στόχος είναι να αποκτηθεί τροχιά όσο το δυνατόν κυκλικότερη. Με την απόρριψη ενός πυραύλου όταν η τροχιά είναι στο απόγειό της (το πλέον απομακρυσμένο σημείο της τροχιάς από τη γη), και την εφαρμογή της ώθησης κατά την κατεύθυνση της πορείας πτήσης, το περίγειο (χαμηλότερο σημείο της τροχιάς από τη γη) κινείται περαιτέρω προς τα έξω δημιουργώντας τροχιά που πλησιάζει προς την κυκλική.

1.1.4 Από τι αποτελείται ένας δορυφόρος

Οι δορυφόροι υφίστανται σε όλες τις μορφές και τα μεγέθη και διαδραματίζουν ποικίλους ρόλους. Παραδείγματος χάρη:

- Οι μετεωρολογικοί δορυφόροι βοηθούν τους μετεωρολόγους να προβλέπουν τον καιρό. Οι δορυφόροι περιέχουν γενικά τις φωτογραφικές μηχανές που μπορούν να επιστρέψουν τις φωτογραφίες του γήινου καιρού, είτε από τις σταθερές γεωστατικές θέσεις είτε από τις πολικές τροχιές.
- Οι δορυφόροι επικοινωνιών επιτρέπουν τηλεφωνικές συνομιλίες και μετάδοση δεδομένων. Οι χαρακτηριστικότεροι δορυφόροι επικοινωνιών περιλαμβάνουν τους Telstar και INTELSAT. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό γνώρισμα ενός δορυφόρου επικοινωνιών είναι ο αναμεταδότης (μέσω εκπεμπόμενων σημάτων λαμβάνει μια συνομιλία σε μια συχνότητα και αφού την ενισχύσει, την αναμεταδίδει πίσω στη γη σε μια άλλη συχνότητα). Ένας δορυφόρος περιέχει εκατοντάδες ή χιλιάδες αναμεταδότες. Οι δορυφόροι επικοινωνιών είναι συνήθως γεωσύγχρονοι.
- Οι δορυφόροι ραδιοφωνικής και τηλεοπτικής μετάδοσης μεταδίδουν ραδιοφωνικά και τηλεοπτικά σήματα από ένα σημείο σε ένα άλλο (παρεμφερής λειτουργία με αυτή που διενεργούν και οι δορυφόροι επικοινωνιών).

Οι επιστημονικοί δορυφόροι εκτελούν ποικίλες επιστημονικές αποστολές. Το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble είναι ο διασημότερος επιστημονικός δορυφόρος, αλλά υπάρχουν πολλοί άλλοι επιστημονικοί δορυφόροι που εξετάζουν διάφορα γεγονότα σε όλο το σύμπαν που άπτονται του επιστημονικού ενδιαφέροντος (αυτά τα γεγονότα είναι από σημεία του ηλίου έως ακτίνες γάμα).

- Οι δορυφόροι πλοήγησης βοηθούν τα σκάφη και τα αεροπλάνα. Ο διασημότερος τύπος είναι αυτός των δορυφόρων GPS.
- Οι δορυφόροι διάσωσης ανταποκρίνονται στα ραδιοσήματα κινδύνου.
- Οι δορυφόροι γήινης παρατήρησης παρατηρούν τον πλανήτη και τις αλλαγές του (από τη θερμοκρασία έως την κάλυψη της γης από πάγο). Ο διασημότερος τύπος είναι οι σειρές LANDSAT.
- Ένας μεγάλος αριθμός στρατιωτικών δορυφόρων βρίσκονται σε τροχιά, εντούτοις ένα μεγάλο μέρος των εφαρμογών τους παραμένει μυστικό. Με τη βοήθεια της τεχνητής νοημοσύνης, συλλέγουν πληροφορίες, χρησιμοποιώντας

τον ηλεκτρονικό και τον περίπλοκο φωτοαναγνωριστικό εξοπλισμό υψηλής τεχνολογίας. Οι εφαρμογές μπορούν να περιλάβουν:

- Αναμετάδοση κρυπτογραφημένων επικοινωνιών.
- Πυρηνικός έλεγχος.
- Παρατήρηση των εχθρικών μετακινήσεων.
- Έγκαιρη προειδοποίηση εκτόξευσης βλημάτων.
- Υποκλοπή επίγειων ραδιοσυνδέσεων.
- Απεικόνιση ραντάρ.

Παρά τις σημαντικές διαφορές μεταξύ όλων αυτών των δορυφόρων, υπάρχουν αρκετά κοινά στοιχεία. Παραδείγματος χάριν:

- Όλοι τους έχουν μεταλλικό ή ένα συνθετικό πλαίσιο.
- Όπως και με τους υπόλοιπους δορυφόρους, ένα όχημα μεταφοράς, συνήθως διαστημικό λεωφορείο, τους θέτει σε τροχιά. Το λεωφορείο κρατά το δορυφόρο μέχρι το επιθυμητό υψόμετρο. Εκεί τον θέτει σε τροχιά και του παρέχει αρκετή ενέργεια.
- Όλοι τους έχουν μια πηγή ενέργειας (συνήθως ηλιακά κύτταρα) και μπαταρίες για την αποθήκευση της ενέργειας.

Οι σειρές ηλιακών κυττάρων δίνουν τη δυνατότητα να φορτιστούν οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες των δορυφόρων. Η πυρηνική ενέργεια έχει χρησιμοποιηθεί σε διαστημικές αποστολές σε άλλους πλανήτες. Τα συστήματα ενέργειας ελέγχονται συνεχώς, και τα δεδομένα λειτουργίας του δορυφόρου όσον αφορά την ενέργεια και όλα τα άλλα συστήματα, στέλνονται στον επίγειο σταθμό παρακολούθησης του δορυφόρου υπό μορφή σημάτων τηλεμετρίας.

- Όλοι τους έχουν ένα ιδιαίτερα προσεγμένο υπολογιστικό σύστημα, έτσι ώστε να ελέγχονται και να επιτηρούνται τα διαφορετικά συστήματά τους.
- Όλοι τους έχουν ένα ραδιοσύστημα και μια κεραία. Στη χειρότερη περίπτωση, οι περισσότεροι δορυφόροι έχουν μια ραδιοσυσκευή αποστολής σημάτων και έναν δέκτη έτσι ώστε το πλήρωμα εδάφους να μπορεί να ζητήσει τις πληροφορίες θέσης από το δορυφόρο και να ελέγξει την κατάστασή του.
- Όλοι τους έχουν ένα σύστημα ελέγχου τοποθέτησης. Το ACS κρατά το δορυφόρο στη σωστή κατεύθυνση.

Το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble έχει ένα περίπλοκο σύστημα ελέγχου έτσι ώστε το τηλεσκόπιο να μπορεί να παρατηρεί την ίδια θέση στο διάστημα όλες τις ημέρες

σε διάστημα ενός χρόνου (παρά το γεγονός ότι το τηλεσκόπιο ταξιδεύει με 27.359Kmh. Το σύστημα περιέχει γυροσκόπια, επιταχύνετρα, ένα σύστημα σταθεροποίησης, προωθητές και ένα σύνολο αισθητήρων που χρησιμοποιούν ως οδηγό τα αστέρια για να καθορίσουν τη θέση του διαστημικού τηλεσκοπίου.

1.1.5 Ποιο είναι το κόστος ενός δορυφόρου

Η δορυφορική αποστολή hurricane-watch κόστισε \$290 εκατομμύρια. Το σύστημα προειδοποίησης πυραύλων είχε κόστος \$682 εκατομμύρια.

Οι δορυφορικές εκτόξευσεις δεν πηγαίνουν πάντοτε καλά για αυτό το λόγο το κόστος της εκτόξευσης είναι ένας σημαντικός παράγοντας. Μια εκτόξευση δορυφόρου μπορεί να κοστίσει μεταξύ \$50 εκατομμυρίων και \$400 εκατομμυρίων. Μια αποστολή με διαστημικό λεωφορείο συμπίπτει στο μισό το κόστος (αυτό συμβαίνει γιατί μια αποστολή με διαστημικό λεωφορείο μπορεί εύκολα να φέρει αρκετούς δορυφόρους σε τροχιά).

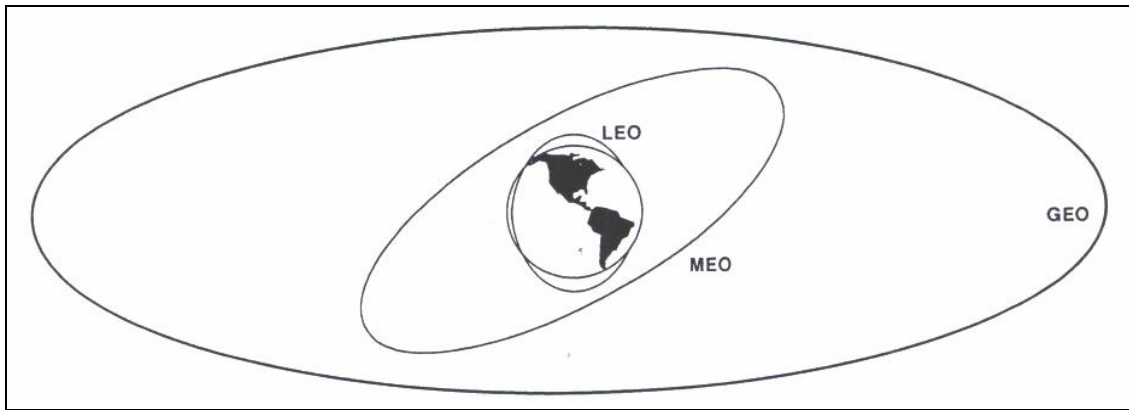
Σημαντικές αμερικανικές εταιρίες κατασκευής δορυφόρων είναι:

- Hughes
- Ball Aerospace & Technologies Corp.
- Boeing
- Lockheed Martin

1.2 Η επανάσταση της τεχνολογίας των δορυφόρων και οι εφαρμογές τους

1.2.1 Εισαγωγή

Έχοντας λοιπόν μεγάλο αριθμό τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων, οι τηλεπικοινωνιακοί αυτοί δορυφόροι είτε βρίσκονται σε γεωστατική τροχιά (GEO) είτε σε χαμηλή τροχιά (LEO), προσφέρουν μια αποτελεσματική πλατφόρμα για την εκπομπή ραδιοσημάτων από σημείο σε σημείο σε όλη τη Γη (σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3: Οι τρεις πιο δημοφιλείς τροχιές είναι οι LEO, MEO και GEO. Αντίστοιχα τα ύψη τους είναι 500-900 km, 5.000-12.000 km και 36.000 km. Μόνο μια τροχιά ανά ύψος παρουσιάζεται, αν και υπάρχει η ανάγκη για αστερισμό δορυφόρων όταν πρόκειται για τις τροχιές LEO και MEO για να παρασχεθούν αδιάλειπτες υπηρεσίες.

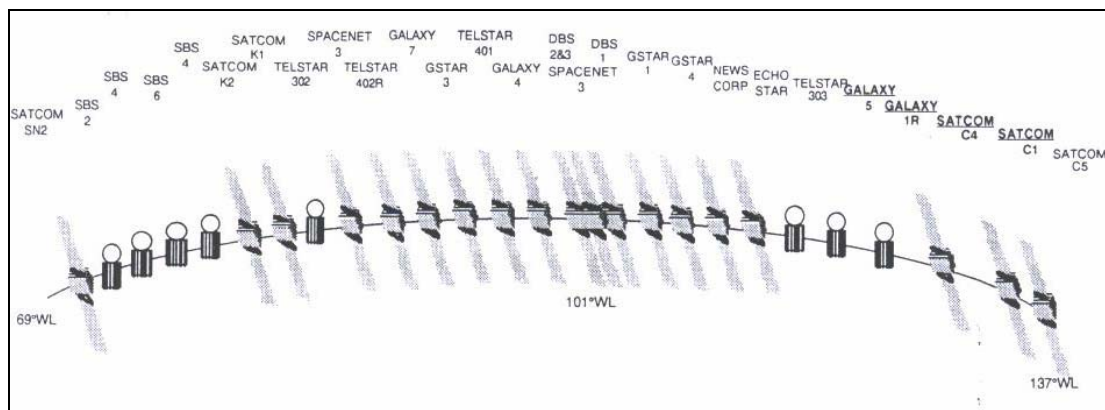
Οι χρήστες αυτών των σημάτων απολαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα από τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες σε έδαφος, θάλασσα και αέρα. Στα προσεχή χρόνια, τέτοια συστήματα θα αξιοποιηθούν αρκετά αφού και το τελευταίο νοικοκυριό θα έχει δορυφορικό πιάτο. Το αν θα κατακτηθεί η παγκόσμια αποδοχή των δορυφορικών υπηρεσιών αυτό εξαρτάται από τον ανταγωνισμό με τα πιο εδραιωμένα μέσα, όπως την καλωδιακή τηλεόραση και τις υπηρεσίες που παρέχονται μέσω internet. Σε κάθε περίπτωση, οι GEO και LEO δορυφόροι προσφέρουν τη δυνατότητα για υπηρεσίες όπως κινητές τηλεπικοινωνίες και εφαρμογές πολυμέσων, αλλά η αξιοποίηση αυτών των υπηρεσιών εξαρτάται από το πόσο αυτές οι εφαρμογές θα γίνουν εμπορικά εκμεταλλεύσιμες.

Οι εφαρμογές δορυφορικών επικοινωνιών επεκτείνονται σε όλη την ανθρώπινη δραστηριότητα (επαγγελματική και ψυχαγωγική). Πολλές μεγάλες επιχειρήσεις έχουν στηρίξει την εύρυθμη λειτουργία τους στις δορυφορικές υπηρεσίες όπως η καλωδιακή τηλεόραση, οι μεταδόσεις δεδομένων, η διανομή πληροφοριών, οι θαλάσσιες επικοινωνίες και ο απομακρυσμένος έλεγχος. Για άλλες επιχειρήσεις, οι δορυφόροι έχουν γίνει ένας κρυμμένος άσπος με την παροχή μιας αξιόπιστης υποδομής επικοινωνιών. Στο δημόσιο τομέα, οι δορυφορικές εφαρμογές είναι εξαιρετικά αποτελεσματικές στις καταστάσεις έκτακτης ανάγκης όπου οι επίγειες γραμμές και τα κινητά τηλέφωνα δεν είναι διαθέσιμες ή είναι ατελέσφορες λύσεις για ποικίλους λόγους [Elbert, 1997]^[2].

Έτσι οδηγείται κανείς στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν δύο βασικοί σκοποί στη δημιουργία και τη λειτουργία των δορυφορικών εφαρμογών. Πρώτον, για κερδοφορία μέσω του συστήματος εμπορικής εκμετάλλευσης υπηρεσιών και δεύτερον, για να ικανοποιηθεί μια ζωτικής σημασίας ανάγκη, αυτή της επικοινωνίας. Η σύνθεση της αγοράς δορυφορικών επικοινωνιών έχει αλλάξει κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών. Το ποσοστό επιστροφής της επένδυσης (ROI) είναι, κατά μέσον όρο, συγκρίσιμο με άλλα τμήματα της βιομηχανίας των τηλεπικοινωνιών. Στη δεκαετία του '90, η τηλεοπτική μετάδοση καθιερώθηκε ως η πιο οικονομικά αποδοτική εφαρμογή. Η μετάδοση δεδομένων κατέχει τη δεύτερη θέση στην εμπορικότητα των εφαρμογών. Οι υπηρεσίες φωνής δεν είναι πλέον η κυρίαρχη εμπορική εφαρμογή στις βιομηχανικές χώρες αλλά κατέχουν την πρώτη θέση στις αγροτικές περιοχές και το διεθνές πεδίο τηλεπικοινωνιών. Οι ειδικής χρήσης εφαρμογές φωνής μέσω δορυφορικών συνδέσεων όπως οι επικοινωνίες κινητών τηλεφώνων και έκτακτης ανάγκης συνεχίζουν να επεκτείνονται. Το γεγονός ότι τα μεγάλης χωρητικότητας οπτικά συστήματα ινών επεκτείνονται κυριολεκτικά παντού στον κόσμο, υποβάλλει τις δορυφορικές υπηρεσίες ως συμπληρωματικό μέσο σε αυτόν τον τομέα. Οι δορυφορικές επικοινωνίες απολαμβάνουν τη γρήγορη υιοθέτηση τους στις περιοχές όπου οι σταθερές εγκαταστάσεις είναι μη συμφέρουσες. Παραδείγματος χάρη, τα πλοία δεν υιοθετούν πλέον τον κώδικα Μορς αλλά, λόγω της επιτυχίας των δορυφορικών συστημάτων, χρησιμοποιούν το σύστημα INMARSAT.

Οι προμηθευτές δορυφορικών υπηρεσιών για να πετύχουν σε μια ανταγωνιστική αγορά, πρέπει να κερδίσουν ένα σημαντικό αριθμό χρηστών. Οι περιοχές οι οποίες εξυπηρετούνται από έναν δορυφόρο, θεωρούνται επικερδείς για

τους εμπορικούς εκμεταλλευτές του δορυφόρου, ανάλογα με τον αριθμό των συνδρομητών-πελατών που δέχονται τις υπηρεσίες του δεδομένου δορυφόρου. Όσο περισσότεροι πελάτες εξυπηρετούνται, τόσο περισσότερο περιζήτητη χαρακτηρίζεται η θέση του δορυφόρου. Στην ουσία λοιπόν, η αγορά θέσης δορυφόρου αποτελεί μια αγορά real estate. Τελικά, με αυτόν τον τρόπο κάποιος μπορεί να δημιουργήσει έναν επιτυχημένο οικονομικά δορυφόρο ο οποίος μπορεί να προσελκύσει μια μεγάλη κοινότητα χρηστών δορυφορικών πιάτων. Το GALAXY I, ένα πολύ επιτυχημένος οικονομικά δορυφόρος καλωδιακής τηλεόρασης (σχήμα 1.4), ίδρυσε το πρώτο εμπορικό κέντρο στον ουρανό, με μισθωτές του τις εταιρίες HBO και ESPN και με μαγαζιά τις A&E και το Discovery Channel.



Σχήμα 1.4: Οι πιο δημοφιλείς αμερικάνικοι GEO δορυφόροι καλωδιακής τηλεόρασης.

Με την εμπειρία εκείνων που έχουν προσφέρει δορυφορικές υπηρεσίες στις μεγαλύτερες κοινότητες χρηστών, είναι γνωστό ότι οι τρεις σημαντικότερες λέξεις στο μάρκετινγκ δορυφορικών υπηρεσιών είναι η θέση, θέση, θέση. Αυτό σημαίνει ότι όλοι οι μισθωτές δορυφόρων θέλουν να είναι ο δορυφόρος που μισθώνουν στην καλύτερη 'γειτονιά' δορυφορικών χρηστών.

1.2.2 Οι βασικές αρχές των δορυφορικών δικτύων

Κάθε δορυφορική εφαρμογή αξιολογείται ως προς την αποτελεσματικότητά της με το να στηριχτεί στις ‘δυνάμεις’ της δορυφορικής σύνδεσής της. Ένας δορυφόρος είναι στην ουσία ένας επαναλήπτης μικροκυμάτων για τους σταθμούς στη γη που βρίσκονται μέσα στην περιοχή κάλυψής του, που καθορίζεται από το ύψος του δορυφόρου και το διάγραμμα ακτινοβολίας του συστήματος κεραιών του. Η ρύθμιση της βασικής διαμόρφωσης τροχιάς εμφανίζεται στο σχήμα 1.3. Ένας δορυφόρος GEO μπορεί να καλύψει σχεδόν το ένα τρίτο της επιφάνειας της Γης, με εξαίρεση τις πολικές περιοχές. Αυτό περιλαμβάνει το περισσότερο από 99% του παγκόσμιου πληθυσμού και ουσιαστικά όλη την οικονομική δραστηριότητα.

Οι δορυφόροι LEO και οι μέσης προσέγγισης τροχιάς δορυφόροι (MEO) χρειάζονται περισσότερους δορυφόρους για να επιτύχουν αυτό το επίπεδο κάλυψης. Εξαιτίας του γεγονότος ότι οι δορυφόροι κινούνται σε σχέση με την επιφάνεια της γης, ένας πλήρης αστερισμός δορυφόρων χρειάζεται για να παρέχονται συνεχείς υπηρεσίες. Η εναλλακτική περίπτωση εδώ, είναι η χρήση δορυφόρων GEO, που είναι πιο απομακρυσμένοι σε σχέση με τους δορυφόρους LEO και MEO. Αν και οι δορυφόροι GEO χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο μήκος ραδιοδρόμου για τη διάδοση των σημάτων από τους επίγειους σταθμούς, μπορούν να παρέχουν αδιάλειπτες υπηρεσίες χωρίς να είναι απαραίτητα η δημιουργία αστερισμών δορυφόρων. Τα συστήματα LEO υπόσχονται κοντινούς ραδιοδρόμους, όχι όμως συγκρίσιμους και με αυτούς των επίγειων συστημάτων. Το μήκος των ραδιοδρόμων εισάγει μια καθυστέρηση διάδοσης δεδομένου ότι τα ραδιοσήματα ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός. Ανάλογα με τη φύση της υπηρεσίας, η αυξανόμενη καθυστέρηση για τις τροχιές MEO και GEO μπορεί να επιβάλει κάποια υποβάθμιση στην ποιότητα ή τη ρυθμαπόδοση αυτής της υπηρεσίας. Ο βαθμός στον οποίο αυτό έχει επιπτώσεις στην αποδοχή της υπηρεσίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η φύση της αλληλεπίδρασης, η καθυστέρηση άλλων στοιχείων του συστήματος, και τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για να συντονίσουν τη μεταφορά πληροφοριών και την αποκατάσταση σφαλμάτων.

Οι δορυφόροι συνίστανται από τους επαναλήπτες μικροκυμάτων. Οι συσκευές αυτές λειτουργούν σε ένα ανατεθειμένο τμήμα φάσματος συχνοτήτων από 1 έως 30GHz. Όπως, τα μικροκύματα, τα σήματα που διαβιβάζονται μεταξύ του δορυφόρου και των επίγειων σταθμών διαδίδονται κατά μήκος των ραδιοδρόμων και σύμφωνα με

τις απώλειες του ελευθέρου χώρου, η απώλεια αυξάνεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης. Οι κατανομές φάσματος δίνονται στις ακόλουθες κατά προσέγγιση σειρές:

Όνομασία Ζώνης Συχνότητων	Συχνότητα κάτω ζεύξης	Συχνότητα άνω ζεύξης	Κατηγορίες Τηλεπικοινωνιακών Υπηρεσιών
L-ζώνη	1 GHz	2 GHz	Κινητή υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Mobile Satellite Service, MSS)
			Κινητή υπηρεσία ξηράς μέσω δορυφόρου (Land Mobile Satellite Service, LMSS)
S-ζώνη	2 GHz	4 GHz	Κινητή υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Mobile Satellite Service, MSS)
			Υπηρεσία έρευνας του διαστήματος (Space Research Service)
C-ζώνη	4 GHz	8 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS)
X-ζώνη	8 GHz	12,5 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου για στρατιωτικούς σκοπούς (Fixed Satellite Service military communication)
Ku-ζώνη	12,5 GHz	18 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS)
			Υπηρεσία εκπομπής μέσω δορυφόρου (Broadcast Satellite Service, BSS)

K-ζώνη	18 GHz	26,5 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS)
			Υπηρεσία εκπομπής μέσω δορυφόρου (Broadcast Satellite Service, BSS)
Ka-ζώνη	26,5 GHz	30 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS)
			Υπηρεσία εκπομπής μέσω δορυφόρου (Broadcast Satellite Service, BSS)
V-ζώνη	40-26,5 GHz	30 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS)
			Υπηρεσία εκπομπής μέσω δορυφόρου (Broadcast Satellite Service, BSS)

Πίνακας 1-1: Δορυφορικές ζώνες συχνοτήτων και οι υπηρεσίες τους.

Μερικές παρατηρήσεις επί του Πίνακα 1-1:

- Εκτός από τις τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες που εμφανίζονται στον πίνακα, ο Διεθνής Κανονισμός Ραδιοεπικοινωνιών έχει θεσπίσει και άλλες (περισσότερο εξειδικευμένες) κατηγορίες υπηρεσιών (συνολικά 18). Τέτοιες είναι η διαδορυφορική υπηρεσία, η κινητή ναυτική υπηρεσία μέσω δορυφόρου, η υπηρεσία ραδιοεντοπισμού μέσω δορυφόρου, η υπηρεσία εξερεύνησης της γης μέσω δορυφόρου, η υπηρεσία μετεωρολογίας κ.α..
- Αξίζει να επισημανθεί το γεγονός της χρήσης σε όλες τις ζώνες διαφορετικών συχνοτήτων μεταξύ της ζεύξης γης-δορυφόρου και της ζεύξης δορυφόρου-γης, με τη χαμηλότερη συχνότητα να αποδίδεται τις περισσότερες φορές στη δεύτερη. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται οι παρεμβολές ανάμεσα στους δύο δυνατούς τρόπους λειτουργίας του δορυφόρου (ως πομπού και ως δέκτη), ενώ

προφυλάσσεται η προς τα κάτω ζεύξη από τις μεγαλύτερες αποσβέσεις που συνεπάγεται η διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε υψηλότερες συχνότητες (θέμα το οποίο θα αναλυθεί εκτενέστερα στη συνέχεια).

Αν και τυπικά προσφέρονται οι παραπάνω ζώνες συχνοτήτων για κάθε υπηρεσία, οι πραγματικές αναθέσεις δορυφόρων είναι περαιτέρω περιορισμένες από τις διάφορες υπηρεσίες αδειών.

Κατά την εγκατάσταση ενός δορυφορικού δικτύου λαμβάνονται υπόψη δυο βασικές αρχές. Καταρχάς αν οι χρήστες είναι μεγάλοι οργανισμοί, όπως για παράδειγμα πολυεθνικές εταιρίες, τράπεζες κτλ. Αν ισχύει αυτό, οι εταιρίες αυτές προχωρούν στην αγορά ενός ολοκληρωμένου δικτύου VSAT συμπεριλαμβανομένου και του hub. Σε διαφορετική περίπτωση οι χρήστες αγοράζουν ή χρονομισθώνουν μόνο τα τερματικά και διαπραγματεύονται τους όρους πρόσβασης τους στο hub με το διαχειριστή του συστήματος.

Στα συστήματα VSAT, ο δορυφόρος παρέχει το κοινό σημείο της σύνδεσης για το δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο αποβάλλεται η απαίτηση για μια χωριστή φυσική σύνδεση μεταξύ του hub με κάθε απομακρυσμένου σημείου ή με μια λιγότερο αξιόπιστη συμβολοσειρά συνδέσεων αποκαλούμενων γραμμή multidrop. Πολλές διπλής κατεύθυνσης εφαρμογές μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις από σημείο σε σημείο συνδέσεις για να αποκαταστήσουν τηλεφωνικό δίκτυο, αν και αυτό τείνει να χρησιμοποιηθεί για τις αγροτικές και τις κινητές υπηρεσίες. Η αναμενόμενη δημιουργία δορυφορικών δικτύων στην Ka μπάντα, μπάντα στην οποία δραστηριοποιούνται χαμηλού κόστους VSATs, αναμένεται να μειώσει τα εμπόδια στα δορυφορικά δίκτυα μαζικής αγοράς.

Το γεγονός ότι οι δορυφορικές επικοινωνίες είναι ανώτερες από τις επίγειες εναλλακτικές λύσεις εξαρτάται από πολλούς αλληλένδετους παράγοντες. Η εμπειρία έχει δείξει ότι τα ακόλουθα χαρακτηριστικά γνωρίσματα τείνουν να δώσουν στις δορυφορικές επικοινωνίες πλεονεκτήματα για τις διάφορες εφαρμογές:

- Ευρεία κάλυψη μιας χώρας, μιας περιοχής ή μιας ηπείρου.
- Διαθέσιμο εύρος ζώνης.
- Ανεξαρτησία από την επίγεια υποδομή.
- Γρήγορη εγκατάσταση του επίγειου δικτύου.
- Χαμηλότερο κόστος ανά προστιθέμενη περιοχή.
- Ομοιόμορφα χαρακτηριστικά υπηρεσιών.

- Συνολικά χαρακτηριστικά υπηρεσιών.
- Συνολική υπηρεσία από έναν ενιαίο προμηθευτή.
- Κινητή/ ασύρματη επικοινωνία, ανεξάρτητη από τη θέση.

Αν και οι δορυφορικές επικοινωνίες δε θα ξεπεράσουν τις επίγειες τηλεπικοινωνίες σε χρήση, οι δορυφορικές επικοινωνίες μπορούν να δημιουργήσουν θέσεις εργασίας στην αγορά. Μόλις τοποθετήσει ο δορυφορικός χειριστής το δορυφόρο σε λειτουργία, ένα δίκτυο μπορεί εύκολα να εγκατασταθεί και να ρυθμιστεί από μια ενιαία οργάνωση. Αυτό είναι δυνατό σε εθνική ή περιφερειακή βάση (συμπεριλαμβανομένου παγκόσμιας βάσης στην περίπτωση των συστημάτων μη-GEO). Οι κατανομές συχνότητας στις ζώνες συχνοτήτων C, Ku και Ka προσφέρουν εύρη ζώνης 1GHz ή και περισσότερο ανά δορυφόρο, που διευκολύνει μια σειρά ευρυζωνικών υπηρεσιών που δεν περιορίζονται από τις τοπικές υποδομές. Οι δορυφόροι παραδίδουν το ίδιο σύνολο υπηρεσιών με δαπάνες που είναι ενδεχομένως πολύ χαμηλότερες από εκείνες των επίγειων συστημάτων.

Αρχικά, οι σταθμοί ήταν μεγάλοι, ακριβοί και εντοπίζονταν στις αγροτικές περιοχές ώστε να μη παρεμποδίζουν τα επίγεια συστήματα μικροκυμάτων που λειτουργούσαν στις ίδιες ζώνες συχνοτήτων. Αυτοί οι σταθμοί έπρεπε να χρησιμοποιήσουν τις ευρείας ζώνης επίγειες συνδέσεις για να φθάσουν στην πιο απομακρυσμένη πόλη. Η ερχόμενη παραγωγή των τερματικών VSATs θα μειώσει το κόστος και θα αυξήσει τη χρήση (από τη μεγαλύτερη επιχείρηση έως το τελευταίο σπίτι).

1.2.3 Δορυφορικοί τύποι εφαρμογών

Οι εφαρμογές στις δορυφορικές επικοινωνίες έχουν εξελιχθεί κατά τη διάρκεια των ετών για να προσαρμοστούν στις ανταγωνιστικές αγορές. Η εξελικτική ανάπτυξη είναι μια φυσική πορεία της τεχνολογίας. Σε αυτήν την πορεία, οι δορυφορικές επικοινωνίες είναι εξαιρετικά ευπροσάρμοστες. Αυτό είναι σημαντικό στην επέκτασή τους σε νέες εφαρμογές [Elbert, 1987]^[3]. Οι νέες αυτές εφαρμογές μπορούν γενικά να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

1. Εφαρμογές Τηλεόρασης
2. Σταθερή Τηλεφωνία
3. Υπηρεσίες Κινητών Επικοινωνιών
4. Δίκτυα Υπολογιστών και Δεδομένων

1.2.3.1 Τηλεόραση

Η εμπορική τηλεόραση αποτελεί το μεγαλύτερο τμήμα της βιομηχανίας ψυχαγωγίας και αντιπροσωπεύει την πιο οικονομικά επικερδή ομάδα δορυφορικών χρηστών. Ανάλογα με τους τρόπους χρέωσης των χρηστών και το πώς υποστηρίζεται η εκάστοτε τηλεοπτική εφαρμογή από τον δορυφόρο μπορεί να αναφερθεί η τεχνική Εκπομπής Τηλεοπτικού Σήματος μέσω της Ατμόσφαιρας (Over-the-air TV Broadcasting), η Καλωδιακή Τηλεόραση (Cable TV) και η Απευθείας-στην-Οικία του χρήστη τεχνική (Direct-to-Home TV, DTHTV) [Elbert, 1997]^[2].

- Η μέσω της ατμόσφαιρας εκπομπή τηλεοπτικού σήματος (Over-the-air TV Broadcasting) είναι ο παραδοσιακός τρόπος παροχής τηλεοπτικού προγράμματος στις ζώνες συχνοτήτων VHF (30 έως 300MHz) και UHF (300 έως 3.000MHz) μέσω επίγειων τοπικών πομπών που καλύπτουν μία πόλη ή μία περιοχή. Ο ρόλος του δορυφόρου στην προκειμένη περίπτωση αφορά τη μεταφορά του σήματος από το κεντρικό στούντιο του τηλεοπτικού σταθμού σε πολλαπλούς λαμβάνοντες δορυφορικούς επίγειους σταθμούς, καθένας από τους οποίους συνδέεται με έναν τοπικό πομπό. Η διαδικασία αυτή έχει ονομαστεί διανομή (TV distribution) ή επανεκπομπή (TV rebroadcast) τηλεοπτικού σήματος. Στη συγκεκριμένη υποκατηγορία ανήκουν τόσο η

δημόσια όσο και η ιδιωτική τηλεόραση, των οποίων τα έσοδα προέρχονται από τη φορολόγηση των πολιτών και τις διαφημίσεις αντίστοιχα. Ιστορικά, μπορεί να πήρε δέκα έτη για τα κύρια δίκτυα στις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ευρώπη για να υιοθετήσουν τους δορυφόρους για διανομή του προγράμματός τους, αλλά από το 1985, η δορυφορική μετάδοση έγινε προτεραιότητα. Πριν από το 1985, οι πρωτοποριακές προσπάθειες στην Ινδονησία και την Ινδία επέτρεψαν σε αυτές τις χώρες να εισαγάγουν σε εθνικό επίπεδο διανομή τηλεοπτικού προγράμματος μέσω των δορυφόρων προτού ακόμη οι Ηνωμένες Πολιτείες κάνουν μετατροπή του επίγειου ραδιοσήματός τους. Οι ευρωπαϊκοί προμηθευτές τηλεοπτικού προγράμματος συγκέντρωσαν τα δεδομένα τους μέσω της EBU και του περιφερειακού δορυφορικού συστήματος Eutelsat. Πολύ γρήγορα, τα έθνη Ασίας και Λατινικής Αμερικής υιοθέτησαν τη δορυφορική μετάδοση τηλεοπτικού προγράμματος, γεγονός που αποδεικνύει ότι η μετάδοση μέσω δορυφόρων αποτελεί ένα γρήγορα αναπτυσσόμενο και δημοφιλή τρόπο μετάδοσης προγράμματος σε διεθνές επίπεδο.

- Στην καλωδιακή τηλεόραση (Cable TV), η χρηματοδότηση βασίζεται σε μηνιαίες συνδρομές των χρηστών της. Σύμφωνα και με την ονομασία της τεχνικής αυτής, το τηλεοπτικό σήμα διανέμεται στο τελικό άκρο του χρήστη μέσω ομοαξονικού καλωδίου, με αφετηρία κάποιον κεντρικό κόμβο συνδεδεμένο με δορυφορικούς δέκτες. Στην πορεία, το σήμα υπόκειται σε διαδοχικές ενισχύσεις.
- Η απευθείας-στην-οικία του χρήστη τηλεόραση (Direct-to-Home TV, DTHTV) είναι η μοναδική περίπτωση διανομής τηλεοπτικού σήματος, με άμεση ζεύξη του δορυφόρου με το χρήστη, χωρίς να υπεισέρχεται δίκτυο άλλης μορφής ανάμεσά τους. Μέσω των δυνατοτήτων κάλυψης μεγάλων περιοχών στο έδαφος που διαθέτει ένας δορυφόρος GEO μπορεί να εκπέμψει το ίδιο σήμα σε όλη την έκταση μίας χώρας με χαμηλό κόστος ανά χρήστη. Η εξέλιξη της DTHTV βασίσθηκε σε μεγάλο βαθμό στη μείωση του μεγέθους των κεραιών λήψης γεγονός το οποίο προσφέρει πλεονεκτήματα όπως της εύκολης εγκατάστασης και συντήρησης, της φθηνότερης τιμής και της διακριτικότητας συνδυασμένη με την αισθητική. Κρίσιμη υπήρξε, επίσης, η αύξηση της χωρητικότητας των αναμεταδοτών με συνέπεια τη διεύρυνση των προγραμμάτων από τα οποία μπορούν να επιλέξουν οι χρήστες. Από την άλλη

πλευρά, τα συστήματα DTH ακριβώς εξαιτίας των κεραιών μικρής διαμέτρου στην πλευρά της λήψης (και συνακόλουθα μεγάλου εύρους δέσμης), υποφέρουν από παρεμβολές γειτονικών δορυφόρων. Επί του θέματος έχει λάβει θέση και η ITU μέσω του Διεθνούς Κανονισμού Ραδιοεπικοινωνιών, στον οποίο προδιαγράφεται η μορφή του διάγραμματος ακτινοβολίας της οικιακής κεραίας λήψης.

1.2.3.2 Σταθερή τηλεφωνία

Εδώ και αρκετά χρόνια, οι δορυφορικοί οργανισμοί δραστηριοποιούνται στη μεταφορά τηλεφωνικών κλήσεων, επεκτείνοντας την ακτίνα δράσης των Δημόσιων Τηλεφωνικών Δικτύων Μεταγωγής (Public Switched Telephone Networks, PSTN). Εντούτοις, η πρόσφατη εξάπλωση δικτύων οπτικών ινών έχει υποκαταστήσει σε κάποιο βαθμό το ρόλο των δορυφορικών υπηρεσιών σταθερής τηλεφωνίας στις ανεπτυγμένες χώρες .

Παρόλα αυτά, οι αναπτυσσόμενες χώρες ή ακόμα οι αραιοκατοικημένες περιοχές του πλανήτη (όπου ζητούμενο είναι η γρήγορη και οικονομική ανάπτυξη βασικών τηλεπικοινωνιακών υποδομών), είναι πρόσφορο έδαφος για τηλεφωνικές υπηρεσίες μέσω δορυφόρου. Σημαντικό ρόλο παίζει το γεγονός ότι ένα δορυφορικό σύστημα επικοινωνιών απαιτεί μόλις 4-5 χρόνια από το στάδιο σχεδιασμού μέχρι την έναρξη λειτουργίας του. Αυτό συνεπάγεται άμεση και καθολική εξυπηρέτηση εφαρμογών [Richharia, 1999]^[4].

Στα δίκτυα σταθερής τηλεφωνίας μέσω δορυφόρου για κλήσεις εσωτερικού ακολουθείται η λογική της διάθεσης εύρους ζώνης κατόπιν ζήτησης (demand assigned bandwidth). Σε κάθε κανάλι φωνής διατίθεται μία συγκεκριμένη συχνότητα μέχρι να περατωθεί η κλήση, ενώ η διαχείριση των συχνοτήτων του αναμεταδότη γίνεται μέσω ενός κεντρικού συστήματος ελέγχου του δικτύου.

Στα δίκτυα σταθερής τηλεφωνίας μέσω δορυφόρου για διεθνείς κλήσεις ακολουθείται η λογική της προανάθεσης εύρους ζώνης (preassigned bandwidth). Επίσης πολύ συχνά, δορυφορικοί αναμεταδότες παίζουν το ρόλο διεθνών πυλών (international gateways) για τη διασύνδεση κλήσεων μεταξύ χωρών και ηπείρων. Ο

κυριότερος παροχέας δορυφορικής χωρητικότητας για διεθνείς FTS υπηρεσίες εξακολουθεί να είναι ο παγκόσμιος εμβέλεια INTELSAT.

Τέλος, επισημαίνεται ότι ανάμεσα στα πλεονεκτήματα των δορυφορικών επικοινωνιών είναι η δυνατότητα πολύπλεξης πλήθους τηλεφωνικών κλήσεων και ταυτόχρονης μετάδοσής τους.

1.2.3.3 Υπηρεσίες κινητών επικοινωνιών

Μετά τις διευκολύνσεις που μπορούν να προσφέρουν οι δορυφόροι στη σταθερή τηλεφωνία, στη συνέχεια εξετάζονται τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές στις οποίες ο σταθμός μπορεί να είναι κινητός και να βρίσκεται στη ξηρά, τη θάλασσα ή τον αέρα. Οι αντίστοιχες κατηγορίες υπηρεσιών που έχουν θεσπιστεί από την ITU για καθένα από τα περιβάλλοντα αυτά είναι η Κινητή Υπηρεσία Ξηράς μέσω Δορυφόρου (Land Mobile Satellite Service, LMSS), η Κινητή Ναυτική Υπηρεσία μέσω Δορυφόρου (Maritime Mobile Satellite Service, MMSS) και η Κινητή Αεροναυτική Υπηρεσία μέσω Δορυφόρου (Aeronautical Mobile Satellite Service, AMSS). Το γεγονός της κινητικότητας των επίγειων σταθμών αναιρεί τα πλεονεκτήματα της σταθερής θέσης των γεωστατικών δορυφόρων ως προς τη γη, οπότε και οι χαμηλότερες δορυφορικές τροχιές μπορούν να θεωρηθούν επί ίσοις όροις. Μάλιστα, προ ορισμένων ετών, η βιομηχανία των δορυφόρων διακατεχόταν από την αντίληψη πως μόνο συστήματα LEO και MEO θα μπορούσαν να παρέχουν απευθείας ζεύξεις σε φορητά τηλέφωνα χειρός, αντίληψη που τείνει να εξαλειφθεί.

Τα συστήματα κινητών δορυφορικών επικοινωνιών ήλθαν ως αποτέλεσμα της συσσωρευμένης εμπειρίας ετών που υπήρχε πάνω στους δορυφόρους γεωστατικής τροχιάς. Η ανάγκη, όμως, μείωσης των καθυστερήσεων διάδοσης (ειδικά σε εφαρμογές φωνής), έστρεψε τους σχεδιαστές σε χαμηλότερες τροχιές με αντίτιμο να χρειαστεί να εγκαταλείψουν τα οφέλη από το συγχρονισμό περιστροφής γης και δορυφόρου, που επιτυγχάνεται από τους γεωστατικούς δορυφόρους. Άμεσο επακόλουθο του γεγονότος αυτού είναι η αύξηση του απαιτούμενου αριθμού σταθμών στο διάστημα, ώστε οι χρήστες εφαρμογών πραγματικού χρόνου να μπορούν ανά πάσα στιγμή να αποκτούν πρόσβαση σε κάποιον δορυφόρο. Η οικονομική επιβάρυνση που συνοδεύει την αύξηση αυτή είναι σημαντική και η

βιωσιμότητα των LEO και MEO συστημάτων θα κριθεί τα επόμενα χρόνια [Marcario, 1991]^[5].

1.2.3.4 Δίκτυα υπολογιστών και δεδομένων

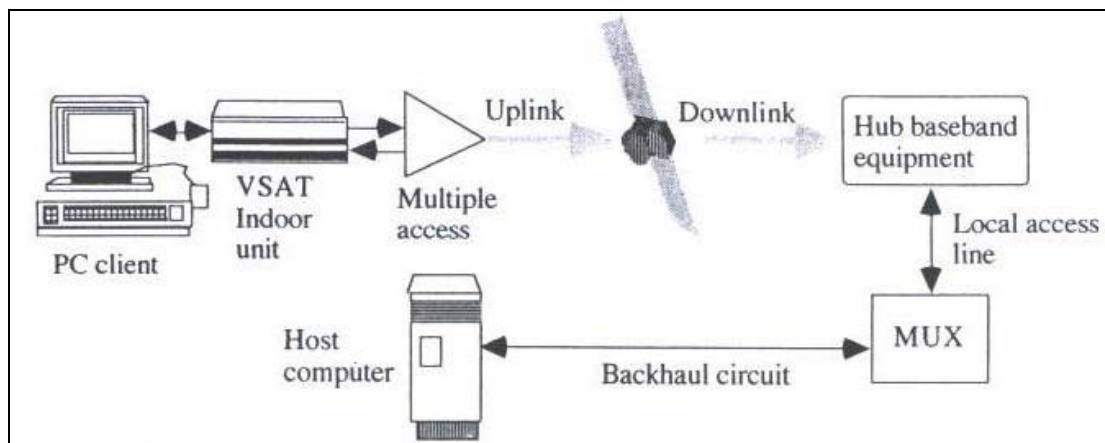
Τα δορυφορικά δίκτυα είναι σε θέση να ικανοποιήσουν μια ευρεία ποικιλία αναγκών μετάδοσης δεδομένων των επιχειρήσεων και των μη εμπορικών χρηστών. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα κάλυψης εκτενών ζωνών που συνδυάζεται με τη δυνατότητα να παραδοθούν μεγάλα εύρη ζώνης σε ένα συνεπές επίπεδο υπηρεσίας καθιστά τις δορυφορικές συνδέσεις ελκυστικές στον αναπτυσσόμενο κόσμο καθώς επίσης και στις γεωγραφικά μεγαλύτερες αναπτυγμένες χώρες και περιοχές.

Ενώ τα δίκτυα φωνής είναι πολύ τυποποιημένα, τα δίκτυα δεδομένων καλύπτουν ένα σχεδόν άπειρο φάσμα αναγκών, απαιτήσεων, και εφαρμογών. Όλο και περισσότερες επιχειρήσεις τα τελευταία χρόνια στηρίζουν τη λειτουργία τους σε ιδιωτικά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα για την εσωτερική μετάδοση δεδομένων και πληροφορίας. Αυτά είναι τα λεγόμενα Τοπικά Δίκτυα (Local Area Networks, LAN) που υλοποιούνται με μία ποικιλία προτύπων και πρωτοκόλλων. Για την κάλυψη των αναγκών των LAN, αναπτύχθηκαν παράλληλα με αυτά οι μικροσταθμοί VSAT με δυνατότητες υποστήριξης εφαρμογών φωνής, δεδομένων και βίντεο. Οι μικροσταθμοί αυτοί λόγω περιορισμένου μεγέθους μπορούν να λειτουργήσουν ως κόμβοι του δικτύου χωρίς να είναι απαραίτητη η διακαλωδίωση όλων των τμημάτων της επιχείρησης.

Μια επιχείρηση που μπορεί να χρησιμοποιήσει την ενημέρωση και τις επικοινωνίες αποτελεσματικότερα από τους ανταγωνιστές της θα μπορούσε να απολαύσει μια ισχυρότερη θέση στην αγορά για τα προϊόντα ή τις υπηρεσίες της. Ένα σύστημα επικοινωνιών δεδομένων είναι ένα στοιχείο της αρχιτεκτονικής που προορίζεται για την εκτέλεση των λειτουργιών επιχειρησιακής αυτοματοποίησης [Elbert, 1992]^[6].

Η δορυφορική επικοινωνία εισάγει μια σχετικά μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης, αλλά αυτό είναι μόνο ένας παράγοντας στο γενικό χρόνο απόκρισης. Υπάρχουν πολλοί συνεισφέροντες στο χρόνο απόκρισης και τη ρυθμαπόδοση όπως για παράδειγμα, το ποσοστό δεδομένων εισόδου, η καθυστέρηση διάδοσης μέσω της

σύνδεσης, η επεξεργασία και η καθυστέρησης αναμονής στον εξοπλισμό μετάδοσης δεδομένων και οποιαδήποτε άλλη καθυστέρηση που μπορεί να εισαχθεί από επίγειο στοιχείο μέχρι υπολογιστές (σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5: Συμβάλλοντες στη ρυθμαπόδοση και στην ολική καθυστέρηση μιας σύνδεσης δεδομένων από χρήστη VSAT με σταθμό hub.

Σύγχρονα πρότυπα μεταδόσεων δεδομένων, όπως το πρωτόκολλο ελέγχου μετάδοσης/ διαδικτύου (TCP/IP) και η δικτυακή αρχιτεκτονική συστημάτων/σύγχρονος έλεγχος συνδέσεων στοιχείων (SNA/SDLC), διασφαλίζουν τη ρυθμοαπόδοση του συστήματος. Για να βελτιστοποιηθεί η ρυθμαπόδοση, υπάρχει η ανάγκη να εξεταστεί και να συντονιστεί το κύκλωμα στην καθυστέρηση, στο είδος πληροφοριών και στο ποσοστό λάθους. Ακόμη, οι προμηθευτές του υλικού και του λογισμικού δικτύων VSAT επιλέγουν την χρήση κατάλληλου πρωτοκόλλου για να αντισταθμίσουν την προστιθέμενη καθυστέρηση μιας δορυφορικής σύνδεσης με ένα δορυφόρο GEO. Η καθυστέρηση για μεταφορά δεδομένων σε μια δορυφορική σύνδεση GEO μπορεί να συμπιεστεί έτσι ώστε να είναι χαμηλότερη από ένα επίγειο τηλεφωνικό κύκλωμα. Το πιο διαδεδομένο πρότυπο δικτύου σε τερματικά VSAT είναι το X.25. Το X.25 ακολουθεί τις αρχές διαστρωμάτωσης του OSI (Open Systems Interconnection), γεγονός που επιτρέπει στα δίκτυα εφαρμογές όπως η μεταφορά αρχείων, το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο και η ηλεκτρονική ενδοανταλλαγή δεδομένων. Άλλωστε, η ταχεία διάδοση της χρήσης του Διαδικτύου και του πρωτοκόλλου TCP/IP που το υποστηρίζει δεν άφησε αδιάφορους τους κατασκευαστές VSAT. Σήμερα, σε καλό δρόμο βρίσκονται προσπάθειες να ενσωματωθούν αυτά καθώς και άλλα πιο σύγχρονα πρωτόκολλα σε δίκτυα VSAT, κάνοντάς τα συμβατά και με Δίκτυα

Ευρείας Περιοχής (Wide Area Networks, WANs) [Elbert, Martyna, 1994]^[7] και [Αράπογλου, 2003]^[8].

1.3 Εισαγωγικά στοιχεία για τα VSAT (Very Small Aperture Terminal)

1.3.1 Ορισμός

Ο όρος VSAT αναφέρεται σε ένα τερματικό επίγειο σταθμό πολύ μικρής επιφάνειας, διαμέτρου μικρότερης από δύο μέτρα (το μέγεθος της κεραίας τους δεν πρέπει να ξεπερνά τα 3.8m εάν λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων Ku ή τα 7m εάν λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων C, με κατώτατο όριο που μπορεί να φτάσει τα 45cm σε διάμετρο), ο οποίος χρησιμοποιείται τόσο για τη λήψη όσο και για την εκπομπή δεδομένων, φωνής, video, fax κτλ. Ο παγκόσμιος οργανισμός ETSI έχει δώσει έναν πιο αυστηρό ορισμό για τα VSAT. Θεωρεί ως VSAT τα συστήματα εκείνα τα οποία έχουν τη δυνατότητα είτε αμφίδρομης είτε μονόδρομης επικοινωνίας με το δορυφόρο. Τα συστήματα VSAT είναι συνδεδεμένα σε διάφορες τοπολογίες. Κύριες τοπολογίες σύνδεσης συστημάτων VSAT είναι κατά αστέρα (star), πλέγμα (mesh) ή σημείο προς σημείο (point to point)..

Για να επιτευχθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός λαθών BER (Bit Error Rate) συνεχώς μειώνεται το μέγεθος της κεραίας (αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται το εύρος δέσμης ακτινοβολίας και να μεγαλώνουν οι παρεμβολές στο σύστημα παρόλα αυτά). Έτσι είναι διαθέσιμη μια νέα κατηγορία τερματικών που είναι ακόμη μικρότερα από τα VSATs τα USATs (Ultra Small Aperture Terminals).

Μερικές από τις εφαρμογές ενός συστήματος VSAT είναι το δορυφορικό internet, η μεταφορά δεδομένων και φωνής, video conference, fax κτλ

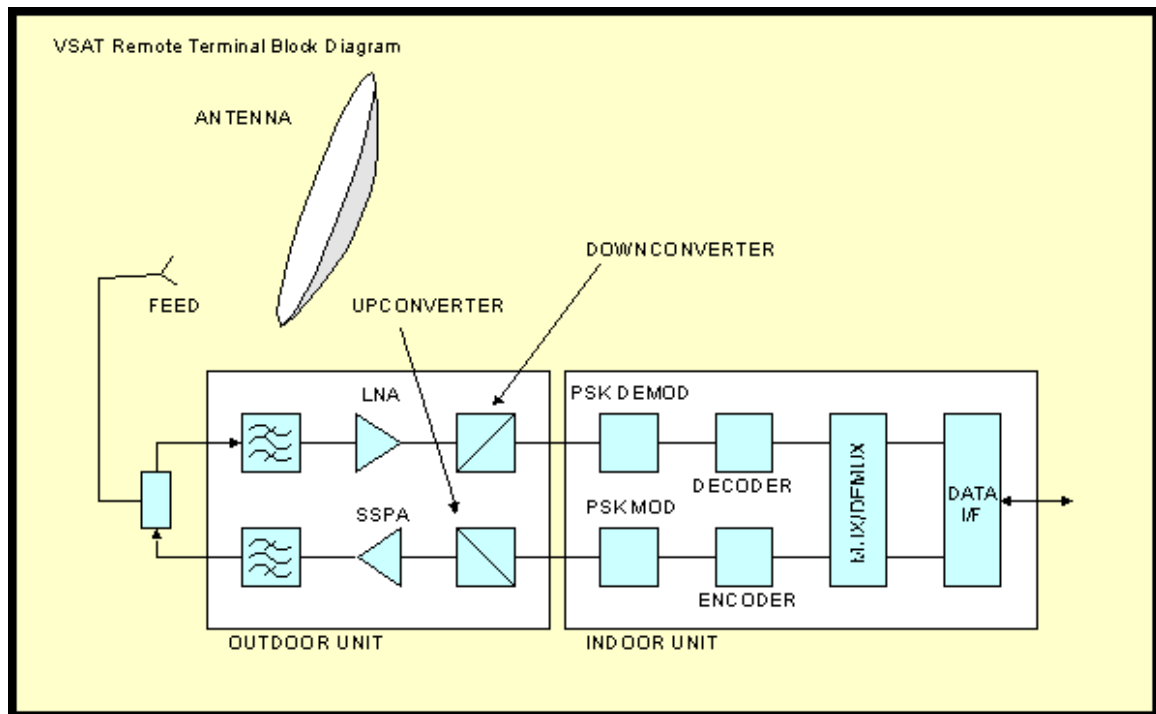
1.3.2 Περιγραφή ενός VSAT

Το VSAT αποτελείται από την εξωτερική μονάδα, που συχνά αναφέρεται και ως ODU (Out Door Unit) και την εσωτερική μονάδα IDU (In Door Unit). Η εξωτερική μονάδα αποτελείται από την κεραία και ένα πομποδέκτη ραδιοσυχνοτήτων RFT (Radio Frequency Transceiver). Η εσωτερική περιέχει το modem καθώς επίσης και διεπαφές για να επιτευχθεί σύνδεση μεταξύ του VSAT και άλλων συσκευών όπως ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, το τηλέφωνο κ.α.



Σχήμα 1.6: Κεραία VSAT.

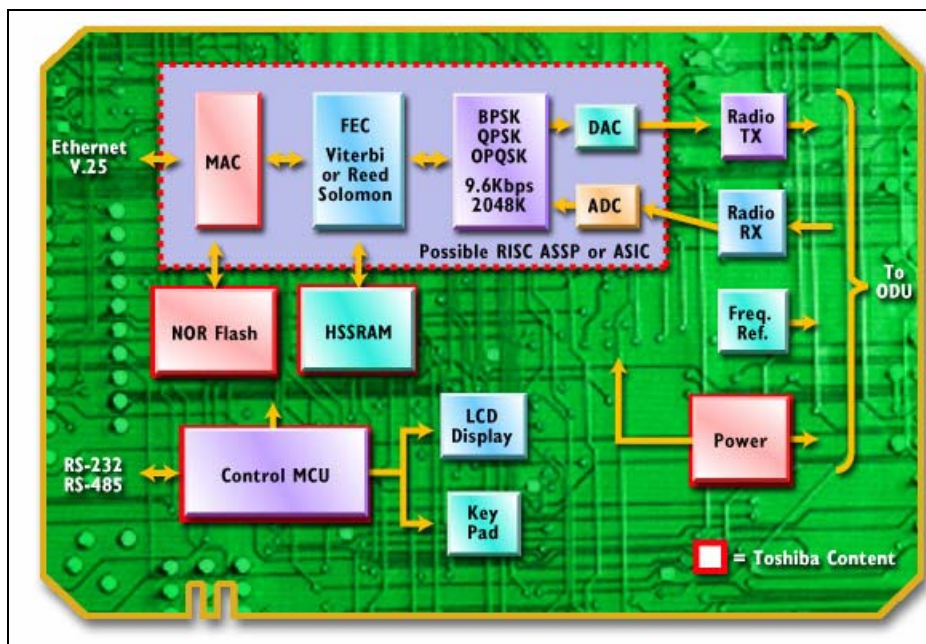
Στη συνέχεια παρουσιάζεται, το block διάγραμμα ενός συστήματος VSAT. Παρουσιάζει την εξωτερική και την εσωτερική μονάδα και κάθε υπομονάδα που τις απαρτίζει.



Σχήμα 1.7: Μπλοκ διάγραμμα ενός VSAT.

1.3.3 Εσωτερική μονάδα VSAT

Η εσωτερική μονάδα στην ουσία συνδέει τον χρήστη και το σύστημα VSAT. Η εξωτερική μονάδα είναι υπεύθυνη για τη μετάδοση. Η εσωτερική και εξωτερική μονάδα συνδέονται μέσω καλωδίου που λειτουργεί στα 70MHz, 140MHz ή στην περιοχή 950-1450 MHz και έχει μήκος έως και εκατό μέτρα. Στην εσωτερική μονάδα τώρα, πριν τη μετάδοση, τα σήματα πολυπλέκονται, κωδικοποιούνται και διαμορφώνονται κατά φάση. Τα σήματα προτού επεξεργασθούν εισάγονται στο σύστημα μέσω των εξωτερικών συσκευών όπως προσωπικούς υπολογιστές, τηλέφωνα κτλ. Η εσωτερική μονάδα ενός συστήματος VSAT παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Στο σχήμα 1.8 παρουσιάζεται το διάγραμμα μιας ευρέως χρησιμοποιούμενης εσωτερικής μονάδας που δημιουργήθηκε από την Toshiba και παρουσιάζει όλα τα πρωτόκολλα διεπαφών που χρησιμοποιούνται (RS-232, RS-485 και V-25 για ανταλλαγή δεδομένων με εξωτερικές συσκευές).



Σχήμα 1.8: Διάγραμμα εσωτερικής μονάδας.

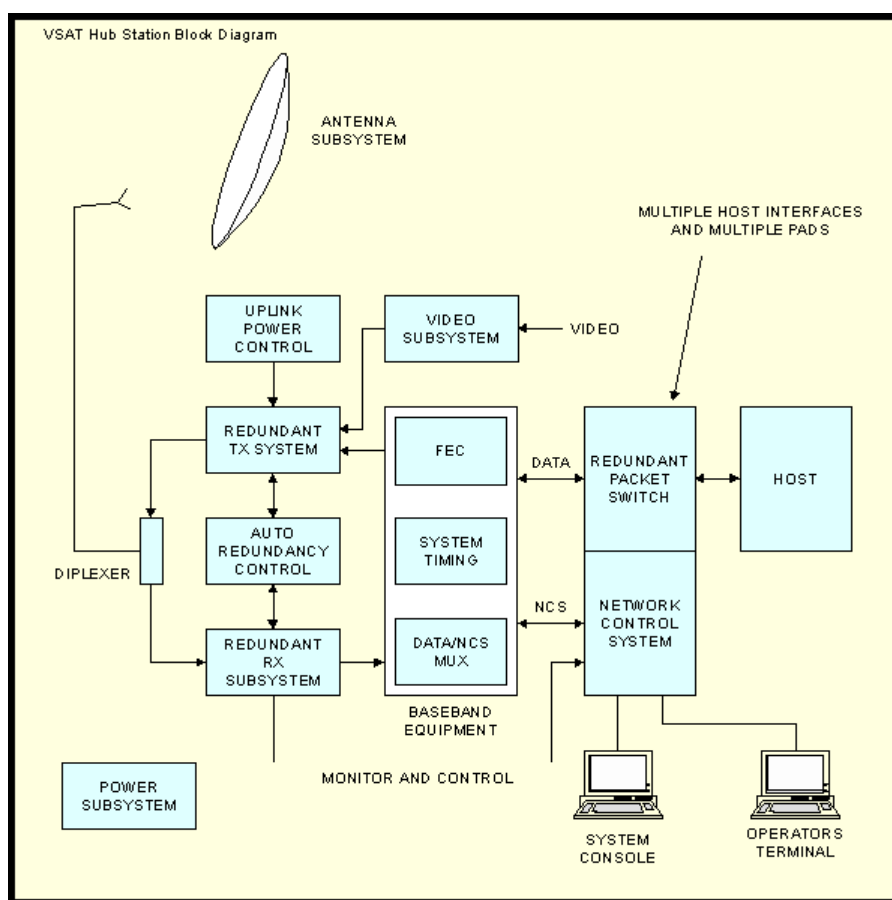
Επιπλέον στο παραπάνω σχήμα περιλαμβάνονται κωδικοποιητές-αποκωδικοποιητές FEC, καθώς και διαμορφωτές που δίνουν τη δυνατότητα επιλογής διαμόρφωσης ανάμεσα σε BPSK, QPSK ή OPQSK . Τέλος περιέχει ψηφιακούς - αναλογικούς (DAC) μετατροπείς για αποστολή δεδομένων καθώς και αναλογικούς-ψηφιακούς (ADC) για λήψη δεδομένων.

1.3.4 Εξωτερική μονάδα VSAT

Η εξωτερική μονάδα VSAT αποτελείται από ένα κύκλωμα γνωστό ως RTF. Το κύκλωμα αυτό περιέχει ένα διπλέκτη, ο οποίος είναι απαραίτητος ώστε το VSAT να μπορεί να λειτουργεί και ως πομπός και ως δέκτης, ενισχυτής ισχύος και άνω μετατροπέας (όταν πρόκειται για εκπομπή), ενισχυτής χαμηλού θορύβου και κάτω μετατροπέας συχνότητας (όταν πρόκειται για λήψη).

1.4 Κεντρικός Σταθμός (Hub)

Ο κεντρικός σταθμός ενός VSAT είναι ένας μεγάλος , υψηλής επίδοσης επίγειος σταθμός. Αποτελείται από ένα κέντρο ελέγχου για τη διαχείριση του δορυφορικού δικτύου, καθώς επίσης και από μια εξωτερική κεραία για τη λήψη και τη μετάδοση σημάτων. Η κεραία αυτή έχει διάμετρο από 6 έως 11m. Ταυτόχρονα στο HUB βρίσκονται εγκατεστημένα και ένας μεγάλος αριθμός διεπαφών για την επικοινωνία του με εξωτερικές συσκευές. Στο σχήμα 1.5 παρουσιάζεται το μπλοκ διάγραμμα ενός VSAT Hub.



Σχήμα 1.9: Το block διάγραμμα ενός VSAT Hub σταθμού.

Ένα HUB αποτελείται από αρκετά κύρια και εφεδρικά υποσυστήματα. Αυτά είναι οι μεταγωγείς πακέτων, οι διαμορφωτές και οι αποδιαμορφωτές, το RTF, το υποσύστημα λήψης και το υποσύστημα της κεραίας.

Ο μεταγωγέας πακέτων ελέγχει τη δρομολόγηση μεταξύ του host και των διαμορφωτών, αποδιαμορφωτών. Ο έλεγχος αυτός γίνεται με την ανάγνωση και την

προσθήκη επικεφαλίδων στα πακέτα που πρέπει να δρομολογηθούν προς τις υπόλοιπες IDU.

Οι διαμορφωτές παίρνουν τα σήματα, που έχουν ήδη υποστεί πολύπλεξη με διαίρεση χρόνου (TDM), από το μεταγωγέα και τα κωδικοποιούν με χρήση κατάλληλης τεχνικής (BPSK, QPSK, OPSK κτλ). Από την άλλη μεριά οι αποδιαμορφωτές παίρνουν τα σήματα που προέρχονται από την κεραία και αφού τα αποκωδικοποιήσουν τα προωθούν στο μεταγωγέα.

Το RTF (Radio Frequency Terminal) αποτελείται από το υποσύστημα μετάδοσης, το υποσύστημα λήψης και το υποσύστημα της κεραίας.

Το υποσύστημα μετάδοσης αποτελείται από άνω μετατροπείς συχνότητας οι οποίοι παίρνουν το σήμα από την IF περιοχή συχνοτήτων και το μεταφέρουν στην κατάλληλη συχνότητα όπου θα γίνει η μετάδοση.

Στη συνέχεια το σήμα ενισχύεται με τη βοήθεια ενισχυτών υψηλής ισχύος (HPA). Αν το HUB χρησιμοποιεί μονό φέρον τότε είναι πιθανόν η ενίσχυση να γίνει με ενισχυτή τύπου SSPA (Solid State Power Amplifier). Σε αντίθετη περίπτωση είναι επιβεβλημένη η χρήση ενισχυτών τύπου TWTA (Traveling Wave Tube Amplifier). Παράλληλα γίνεται και έλεγχος ισχύος της προς τα άνω ζεύξης. Αυτό συμβαίνει διότι σε περιπτώσεις βροχοπτώσεων οι αποσβέσεις που εισάγονται είναι έντονες. Έτσι είναι πιθανό το σύστημα να μην ικανοποιεί τις προδιαγραφές που θέτει η ITU. Το υποσύστημα λήψης αποτελείται από ένα ενισχυτή χαμηλού θορύβου (LNA) με θερμοκρασία θορύβου της τάξης των 150 -175° K (Ku Band) και ένα κάτω μετατροπέα συχνότητας που μεταφέρει το σήμα στην IF περιοχή συχνοτήτων.

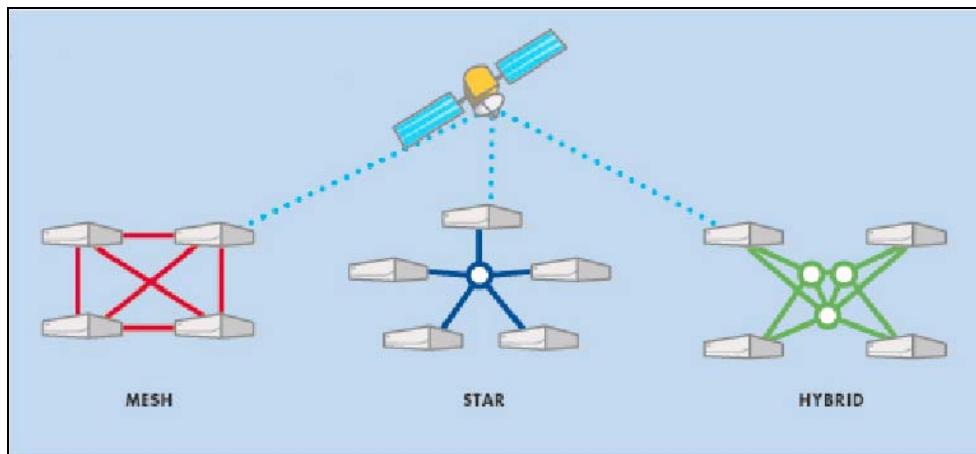
Επίσης, η κεραία αποτελείται, εκτός από την επιφάνεια συλλογής σημάτων διαμέτρου 6-11m, και από ένα σύστημα σκόπευσης για τη μείωση των παρεμβολών από γειτονικούς δορυφόρου.

Στο Hub ακόμη είναι εγκατεστημένο το υποσύστημα ελέγχου του δικτύου NCC (Network Control Center). Αυτό ελέγχει και καταγράφει τις λειτουργίες του Hub και των υπολοίπων τερματικών που βρίσκονται στο δίκτυο.

Τέλος, υπάρχει και η κύρια πηγή παροχής ενέργειας που εγγυάται σε συνεργασία με τα εφεδρικά συστήματα την αδιάλειπτη παροχή ενέργειας στο σύστημα.

1.5 Τοπολογία δικτύων VSAT

Οι βασικές τοπολογίες των VSAT δικτύων είναι η τοπολογία αστέρα, η τοπολογία πλέγματος (mesh) και οι υβριδικές τοπολογίες (hybrid) οι οποίες παρουσιάζονται στο σχήμα 1.10.



Σχήμα 1.10: Τοπολογίες σύνδεσης VSAT.

Η τοπολογία αστέρα είναι πιο κατάλληλη για κεντροποιημένες εφαρμογές. Για παράδειγμα η μεταφορά δεδομένων μεταξύ υποκαταστημάτων και κεντρικού καταστήματος μιας επιχείρησης, η μετάδοση τηλεοπτικού σήματος, η τηλεϊατρική είναι μερικές από τις εφαρμογές όπου η τοπολογία αστέρα προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα.

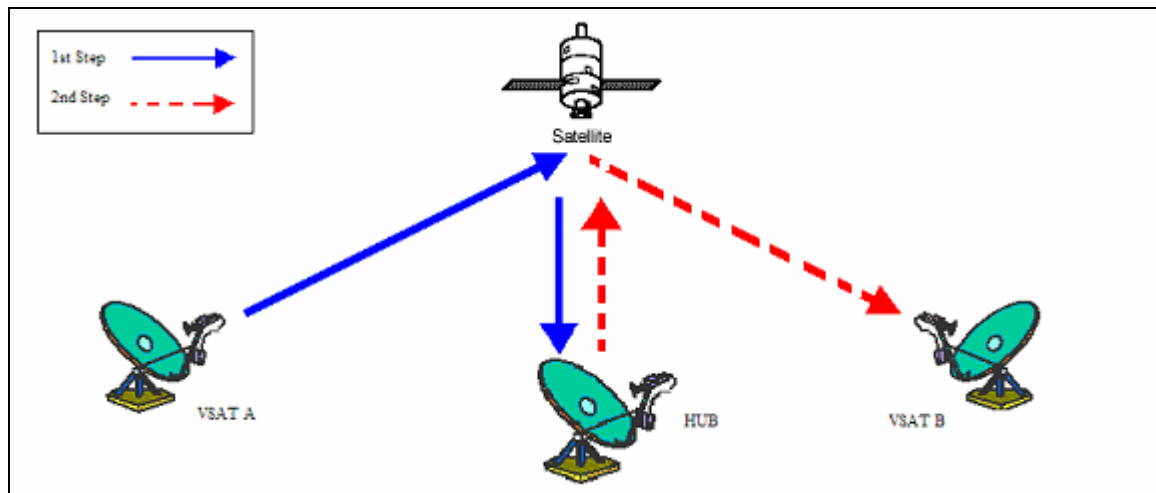
Η τοπολογία πλέγματος (mesh) χρησιμοποιείται συχνά για δίκτυα τηλεφωνίας. Στα δίκτυα αυτά ορισμένοι σταθμοί λειτουργούν και ως σημεία διασύνδεσης με το επίγειο δίκτυο τηλεφωνίας (PSTN). Οι σταθμοί αυτοί ονομάζονται Gateway Earth Stations και βρίσκονται τοποθετημένοι σε κομβικά σημεία όπου υπάρχει εγκατεστημένο δίκτυο σταθερής τηλεφωνίας. Η κίνηση που κατευθύνεται προς αυτούς τους κόμβους είναι σαφώς μεγαλύτερη και προφανώς το κόστος τους είναι αυξημένο σε σχέση με ένα απλό VSAT.

Η επιλογή της κατάλληλης τοπολογίας καθορίζεται από τις απαιτήσεις των εφαρμογών. Οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι:

- Η δομή της ροής πληροφορίας στο δίκτυο.
- Η απαιτούμενη ποιότητα ζεύξης και χωρητικότητα.
- Η επιτρεπόμενη χρονική καθυστέρηση μετάδοσης.

1.5.1 Τοπολογία Αστέρα (star)

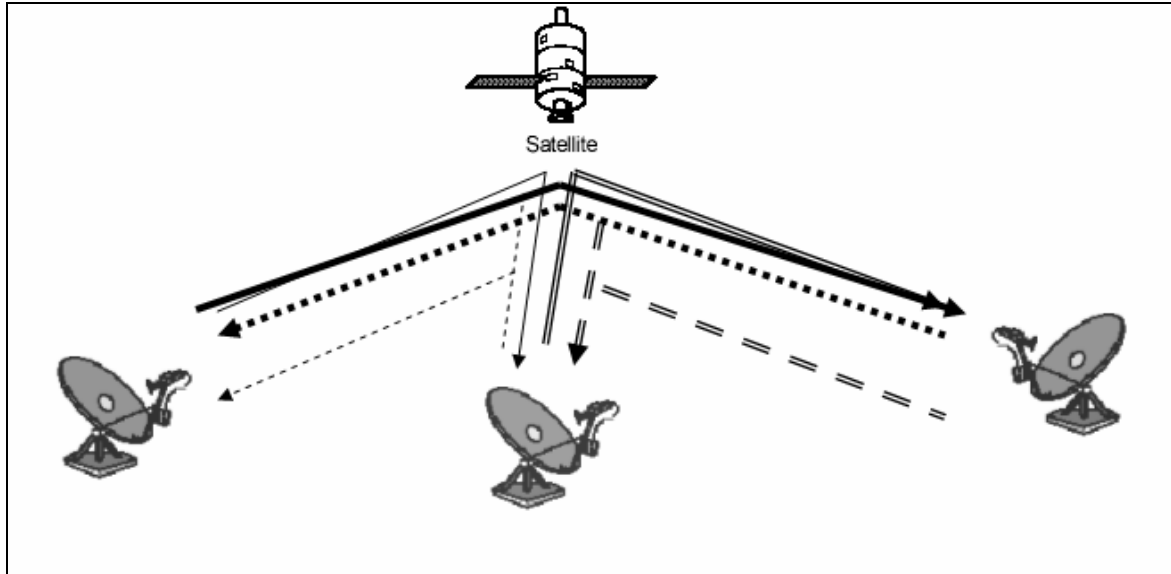
Η τοπολογία αστέρα (σχήμα 1.11) είναι η πιο διαδεδομένη και προσφέρει διασύνδεση σημείου προς πολλά σημεία (point to multipoint connectivity). Στη συγκεκριμένη τοπολογία υπάρχει ένας μεγάλος κεντρικός σταθμός, το hub, ο οποίος ελέγχει και παρακολουθεί ένα μεγάλο αριθμό από διασκορπισμένα VSAT και ο οποίος επικοινωνεί με το VSAT με μια μετάβαση διαμέσου του δορυφόρου. Αντίθετα η επικοινωνία μεταξύ δυο VSAT γίνεται σε δυο βήματα, χρησιμοποιώντας ως ενδιάμεσο κόμβο το hub.



Σχήμα 1.11: Τοπολογία σύνδεσης αστέρα.

1.5.2 Τοπολογία πλέγματος (mesh)

Η τοπολογία πλέγματος (σχήμα 1.12) προσφέρει διασύνδεση σημείου προς σημείο. Το δίκτυο αποτελείται από πολλά VSAT των οποίων η επικοινωνία γίνεται απευθείας χωρίς την διαμεσολάβηση του hub. Το hub στην περίπτωση αυτή είναι υπεύθυνο μόνο για την παρακολούθηση και τον έλεγχο του δικτύου και ευθύνεται για τη δυναμική κατανομή των πόρων γεγονός που αποτελεί και τα μειονέκτημα της τοπολογίας (απαιτείται η δέσμευση περισσότερων πόρων του δικτύου). Το πλεονέκτημα όμως της τοπολογίας αυτής, είναι ότι η καθυστέρηση στην επικοινωνία γίνεται ελάχιστη [Αναστασόπουλος, 2004]^[9].



Σχήμα 1.12: Τοπολογία σύνδεσης πλέγματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

2

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

2.1 Γενικά

Η μετάδοση του σήματος στις δορυφορικές ζεύξεις πραγματοποιείται με τη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω της ατμόσφαιρας. Η ατμόσφαιρα που περιβάλλει τη γη χαρακτηρίζεται ως ανομοιογενές και απορροφητικό μέσο διάδοσης. Λόγω της σύστασης της ατμόσφαιρας, παρουσιάζεται μία σειρά μηχανισμών η οποία επιδρά δυσμενώς στη διάδοση των ραδιοκυμάτων. Τα στρώματα της ατμόσφαιρας τα οποία συμβάλλουν κατά κύριο λόγο στην υποβάθμιση της δορυφορικής ζεύξης είναι η τροπόσφαιρα (το εγγύτερο στην επιφάνεια της γης στρώμα της ατμόσφαιρας) και η ιονόσφαιρα (το πιο απομακρυσμένο από τη γη στρώμα).

Η τροπόσφαιρα είναι το κατώτερο τμήμα της ατμόσφαιρας στο οποίο κάτω από κανονικές συνθήκες η τιμή της θερμοκρασίας ελαττώνεται με το ύψος. Η τροπόσφαιρα εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους έως ένα ύψος που κυμαίνεται από περίπου 6Km τους πόλους μέχρι και 17Km στον ισημερινό. Μια μέση τιμή που δεν ανήκει στα δυο ακραία αυτά υψόμετρα είναι 10Km. Η τροπόσφαιρα είναι εκείνο το τμήμα της ατμόσφαιρας όπου οι μεταβολές του δείκτη διάθλασης, της πίεσης και της υγρασίας καθώς, επίσης, τα νέφη και οι υδρομετεωρίτες (βροχή, χιόνι, χαλάζι) επηρεάζουν σημαντικά τη διάδοση των ραδιοσυχνοτήτων [Κανελλόπουλος, 2001]^[10] . Συγκεκριμένα [Hall, 1979]^[11]:

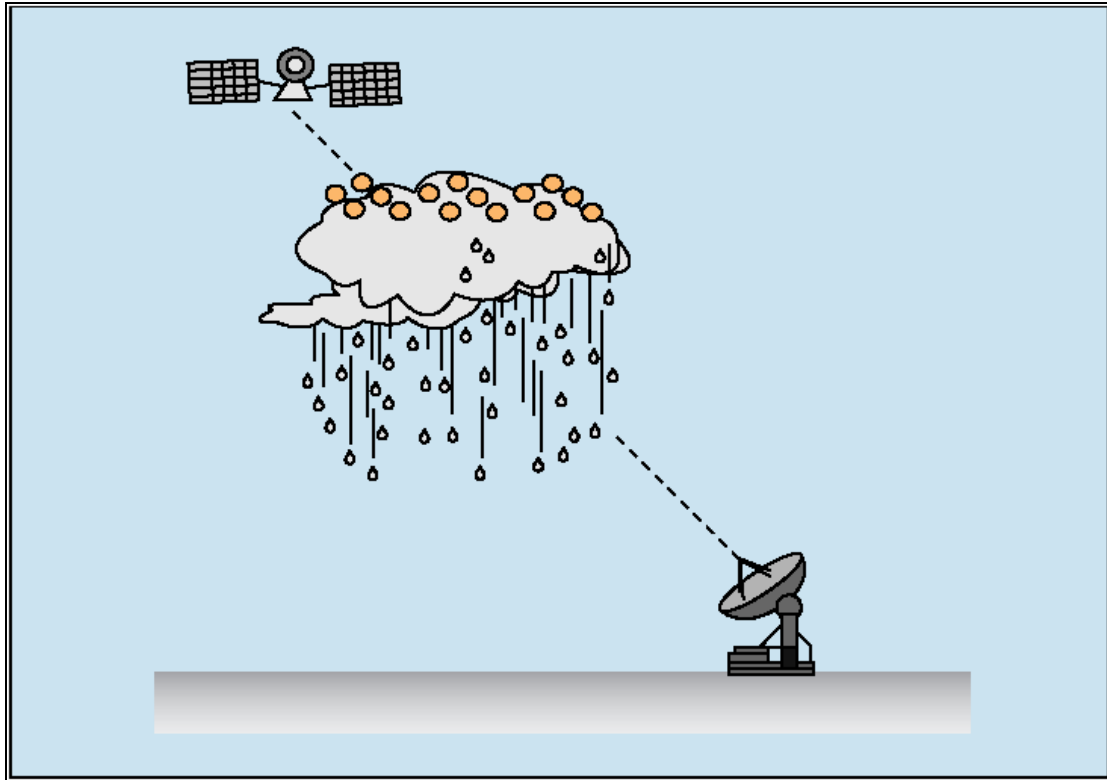
- Τοπικές μεταβολές του δείκτη διάθλασης στην τροπόσφαιρα μπορεί να σκεδάσουν την ενέργεια

- Απότομες μεταβολές της κατακόρυφης δομής του δείκτη διάθλασης μπορεί να προκαλέσουν φαινόμενα ανάκλασης
- Εκτεταμένες ανωμαλίες στη μεταβολή του δείκτη διάθλασης με το ύψος δημιουργούν φαινόμενα παγίδευσης των ραδιοακτίνων. (ducting propagation).

Επιπρόσθετα, στην τροπόσφαιρα η διάδοση των ραδιοκυμάτων μπορεί να επηρεασθεί εντονότατα σε συχνότητες πάνω από 3GHz από την παρουσία ισχυρών βροχοπτώσεων. Επιπλέον, πάνω από 15GHz η απόσβεση που προκαλείται από το οξυγόνο και τους υδρατμούς που υπάρχουν στην τροπόσφαιρα μπορεί να είναι αρκετά σημαντική σε σχέση με την εκάστοτε εφαρμογή. Σε ακόμη πιο υψηλές συχνότητες, κτίρια και άλλα αντικείμενα έχουν επίσης αξιοσημείωτη επίδραση στη διάδοση, ειδικά όταν το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι μικρό σε σύγκριση με τις διαστάσεις των αντικειμένων.

Η ιονόσφαιρα είναι το άνω στρώμα της ατμόσφαιρας που εκτείνεται πάνω από τα 60Km. Χαρακτηρίζεται τουλάχιστον στα υψηλότερα στρώματα από υψηλή πυκνότητα ελεύθερων ηλεκτρονίων και συμπεριφέρεται ως αγωγικό στρώμα για μεγάλη ζώνη συχνοτήτων απορροφώντας και ανακλώντας τα προσπίπτοντα κύματα.

Λόγω της διέλευσης του κύματος μέσα από τα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας, επηρεάζονται δυσμενώς τόσο η στάθμη της λαμβανόμενης ισχύος όσο και η πόλωση του μεταδιδόμενου κύματος (σχήμα 2.1) [Παναγόπουλος και Αράπογλου, 2004]^[12].



Σχήμα 2.1: Επηρεασμός δορυφορικής ζεύξης από υδρομετεωρίτες και παγοκρυστάλλους.

2.2 Δυσμενείς επιδράσεις της ατμόσφαιρας στη διάδοση δορυφορικών σημάτων

Τα ατμοσφαιρικά αυτά φαινόμενα που περιγράφονται στην §2.1 δεν είναι κοινά για όλες τις περιπτώσεις αλλά παρουσιάζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις. Παράγοντες που επηρεάζουν τις διαφοροποιήσεις αυτές είναι οι εξής:

- Η συχνότητα λειτουργίας της ζεύξης.
- Το μήκος της διαδρομής μέσα από την ατμόσφαιρα
- Η γωνία ανύψωσης του κεκλιμένου ραδιοδρόμου γης-δορυφόρου.

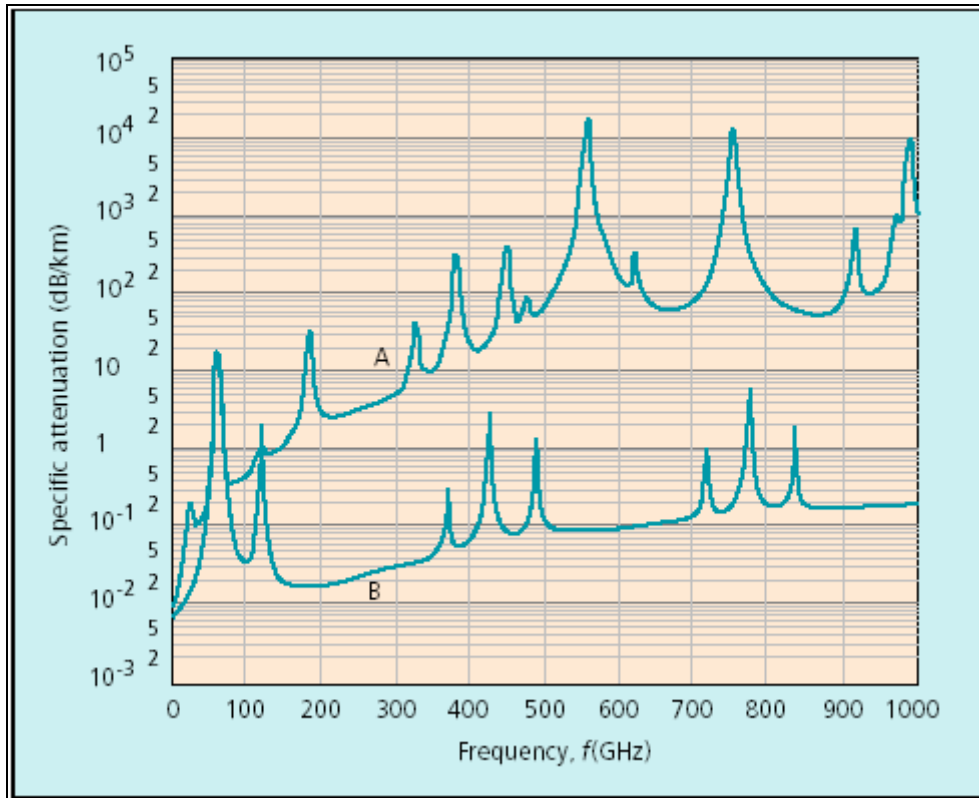
Υπενθυμίζεται ότι η γωνία ανύψωσης είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία που ενώνει το δορυφόρο με τον επίγειο σταθμό και την εφαπτόμενη στην επιφάνεια της γης στο σημείο όπου είναι τοποθετημένος ο επίγειος σταθμός.

Οι δυσμενείς επιπτώσεις που υφίστανται τα δορυφορικά σήματα λόγω της διάδοσης στους στην ατμόσφαιρα είναι:

- Απόσβεση (Attenuation): Η απόσβεση (ή αλλιώς εξασθένηση) αντιπροσωπεύει μία σταθερή συνήθως με το χρόνο απώλεια ισχύος του σήματος λόγω διάδοσης. Προκαλείται από την απώλεια ισχύος που υφίσταται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα όταν κατά τη διάδοσή του συναντά βροχή, χαλάζι, χιόνι, παγοκρυστάλλους, δηλαδή το σύνολο των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων που δημιουργούνται στην τροπόσφαιρα. Από τους παράγοντες αυτούς, σε συχνότητες άνω των 10GHz, όπου το μήκος κύματος γίνεται συγκρίσιμο με το μέγεθος της σταγόνας βροχής, σημαντικότερη είναι η επίδραση των βροχοπτώσεων [Crane, 1996]^[13]. Μάλιστα, η απόσβεση λόγω βροχής αυξάνει σημαντικά με την αύξηση της συχνότητας (σε dB ανάλογα προς το τετράγωνο της συχνότητας [Stutzman, 1993]^[14]). Το χιόνι και το χαλάζι έχουν σαφώς μικρότερη επίδραση στα ραδιοκύματα σε σχέση με τη βροχόπτωση, με εξαίρεση την περίπτωση νιφάδων χιονιού, οι οποίες κατά την πτώση τους λιώνουν και παίρνουν μορφή πολύ μεγαλύτερων σταγόνων συγκριτικά με την απλή βροχή [Κανελλόπουλος, 2001]^[10]. Ανάλογα με την εποχή του έτους και τη γεωγραφική περιοχή, η βροχή μπορεί να είναι είτε στρωσιγενούς τύπου (stratiform rain), δηλαδή με μεγάλο βαθμό ομοιομορφίας, είτε συνεκτικού τύπου (convective rain) [Goldhirsh et al, 1997]^[15]. Η βροχή συνεκτικού τύπου είναι η πλέον ζημιογόνος για τις δορυφορικές επικοινωνίες. Αποτελείται από περιοχές με ασθενή βροχόπτωση αλλά και από μικρότερες περιοχές (τους λεγόμενους βροχοπυρήνες) με έντονη βροχόπτωση όπου παράγονται βαθιές διαλείψεις.
- Διαλείψεις (Fading): Το φαινόμενο αυτό είναι παρόμοιο με εκείνο της απόσβεσης (στη βιβλιογραφία πολύ συχνά ταυτίζονται), αφού και για τις διαλείψεις το κυρίαρχο αίτιο είναι οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις σε συχνότητες φέροντος κύματος που υπερβαίνουν τα 10GHz. Μία διαφορά των διαλείψεων από την απόσβεση είναι ότι είναι μικρής και τυχαίας χρονικής διάρκειας και εμφανίζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις όσον αφορά το βάθος τους (δηλαδή το μέγεθος της πτώσης της ισχύος του σήματος). Μεγαλύτερο πρόβλημα δημιουργούν οι λεγόμενες βαθιές διαλείψεις, όταν η γωνία ανύψωσης των επίγειων σταθμών είναι μικρή. Στην περίπτωση αυτή, η βροχή επηρεάζει μεγαλύτερο τμήμα του κεκλιμένου δρόμου προς το δορυφόρο. Μείωση στη στάθμη λήψης του σήματος μίας ραδιοζεύξης (διάλειψη)

προκαλείται, επίσης, όταν στο δέκτη συμβάλλουν κύματα τα οποία έχουν ακολουθήσει διαφορετικές οδεύσεις. Το φαινόμενο των πολλαπλών οδεύσεων (multipath propagation) είναι σημαντικό μόνο σε τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις που λειτουργούν σε συχνότητες κάτω από τα 10GHz και δεν λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά τη σχεδίαση δορυφορικών ζεύξεων.

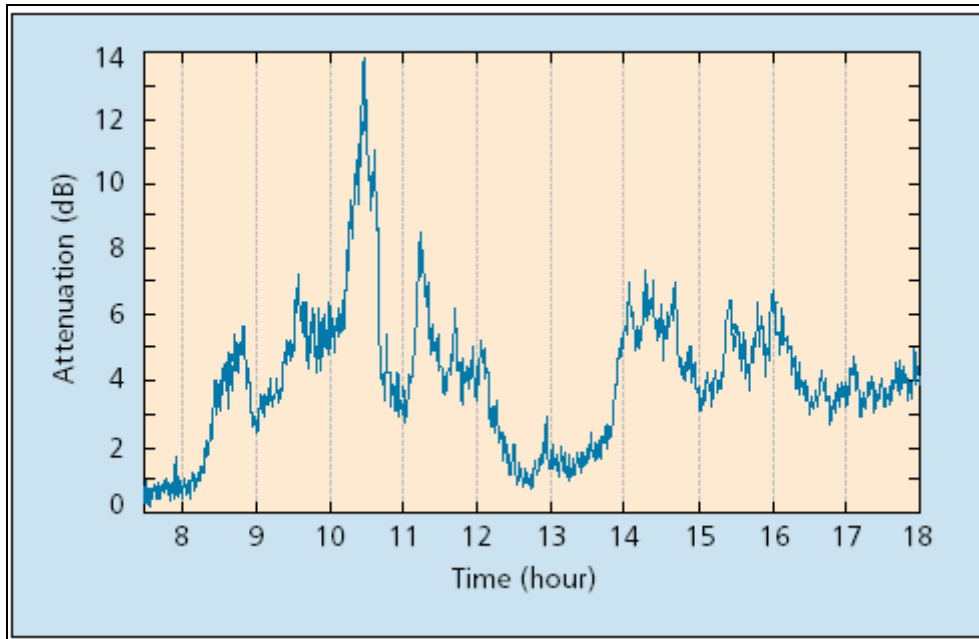
- Απορρόφηση από αέρια (Gaseous Absorption): Η απορρόφηση την οποία εισάγουν στο ραδιοκύμα τα αέρια της ατμόσφαιρας και οι υδρατμοί εξαρτάται, εκτός από τις γνωστές παραμέτρους (συχνότητα, γωνία ανύψωσης) και από το ύψος του επίγειου σταθμού από την επιφάνεια της θάλασσας, τη θερμοκρασία, την ατμοσφαιρική πίεση, καθώς και από την υγρασία της περιοχής. Αν και σε συχνότητες κάτω από τα 10GHz η επίδραση του φαινομένου αυτού είναι συνήθως αμελητέα, για συχνότητες πάνω από το όριο αυτό η απορρόφηση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο μόνο σε συγκεκριμένες συχνότητες, όπου και μεγιστοποιείται. Για τους υδρατμούς η μέγιστη απορρόφηση εντοπίζεται στις συχνότητες 22,5GHz, 183GHz και 320GHz, ενώ το οξυγόνο απορροφά έντονα την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια στα 60GHz και 119GHz [Hall, 1979]^[1]. Στο σχήμα παρουσιάζεται η ειδική εξασθένηση προς τη συχνότητα.



Σχήμα 2.2: Ειδική εξασθένιση προς συχνότητα. Η καμπύλη A παρουσιάζει την ειδική απορρόφηση σε μια ατμόσφαιρα 7,5gr/m³ ενώ η καμπύλη B παρουσιάζει μια υγρή ατμόσφαιρα.

- Αποπόλωση (Depolarization): Η ανάγκη για αύξηση του μέγιστου ρυθμού αξιόπιστης μετάδοσης πληροφορίας από δορυφορικούς διαύλους, δηλαδή η ανάγκη για αύξηση της χωρητικότητάς τους, έχει οδηγήσει πολλούς σχεδιαστές στην υιοθέτηση της τεχνικής της αναχρησιμοποίησης συχνότητας (frequency reuse). Στις δορυφορικές επικοινωνίες η τεχνική αυτή συνίσταται στην εκπομπή δύο ορθογώνια πολωμένων μεταξύ τους κυμάτων που μεταφέρουν σήματα με την ίδια φέρουσα συχνότητα. Έτσι, το διαθέσιμο εύρος ζώνης διπλασιάζεται, ενώ, το ραδιοφάσμα που καταλαμβάνει το σήμα διπλής πόλωσης είναι ίδιο με αυτό της απλής πόλωσης. Στην περίπτωση αυτή, ο περιοριστικός παράγοντας (αποπόλωση) προέρχεται και πάλι από τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις σε συχνότητες υψηλότερες των 10GHz. Η αποπόλωση, ιδιαίτερα αυτή λόγω βροχής, αναιρεί την κατά 90° απομόνωση μεταξύ των δύο πολώσεων, με αποτέλεσμα μέρος της ισχύος της μίας πόλωσης να δημιουργεί παρεμβολή στην ορθογώνιά της.

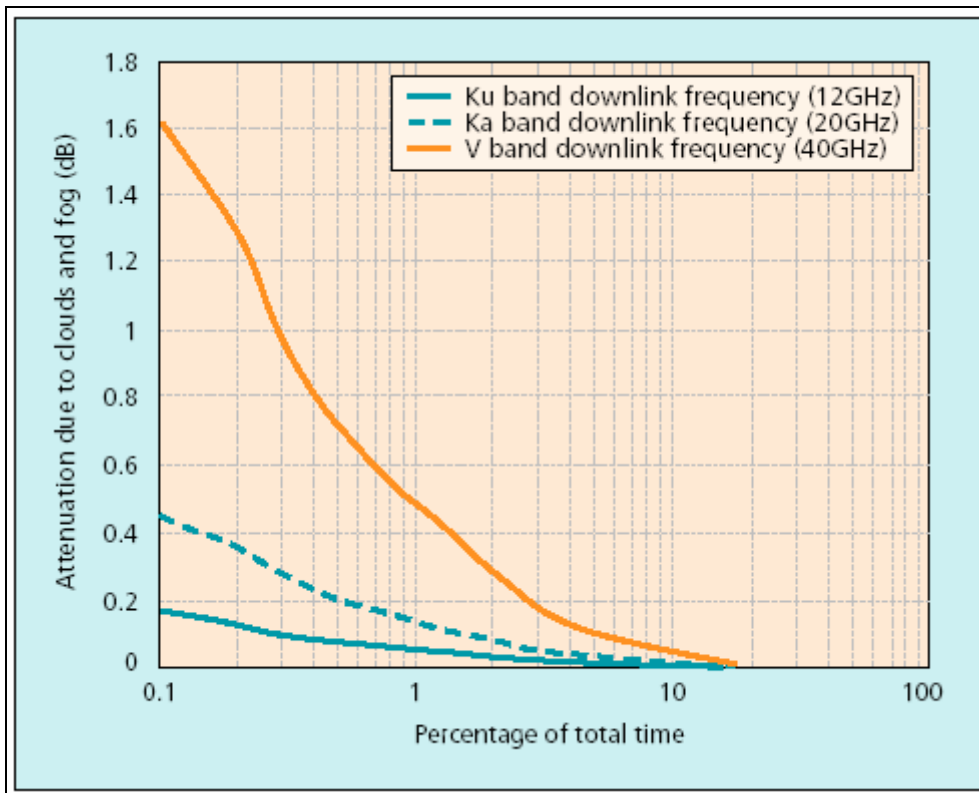
- Σπινθηρισμοί (Scintillations): Το πλάτος των σπινθηρισμών δηλαδή των διακυμάνσεων στην ισχύ του σήματος λόγω της διάδοσης μέσω της τροπόσφαιρας, εξαρτάται άμεσα από τον τρόπο μεταβολής του δείκτη διάθλασης στο στρώμα αυτό της ατμόσφαιρας. Από την άλλη πλευρά, σπινθηρισμοί λαμβάνουν χώρα και στην ιονόσφαιρα, όπου οι ανομοιογένειες της πυκνότητας ηλεκτρονίων έχουν ως συνέπεια διακυμάνσεις στο πλάτος, στη φάση και τη γωνία άφιξης των ραδιοκυμάτων. Οι σπινθηρισμοί αυτού του είδους μειώνονται καθώς αυξάνεται η συχνότητα, σε αντίθεση με τους τροποσφαιρικούς σπινθηρισμούς όπου ισχύει το αντίστροφο. Η συμπεριφορά τους προβλέπεται δύσκολα, αφού εξαρτάται από την εποχή του έτους, την ηλιακή δραστηριότητα, την περιοχή (με σημαντικές διαλείψεις να παρουσιάζονται για σταθμούς κατά μήκος του γεωμαγνητικού ισημερινού) και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δορυφορικής ζεύξης [Rec. ITU-R P.618-7]^[16], [Rec. ITU-R P.618-8]^[17]. Εντούτοις, η απόσβεση που εισάγει ο μηχανισμός των σπινθηρισμών προβλέπεται προσεγγιστικά από τους σχεδιαστές δορυφορικών συστημάτων με βάση εμπειρική σχέση, σύμφωνα με την οποία η ενεργός τιμή σε dB είναι ανάλογη της συχνότητας υψωμένης στον εκθέτη 7/12 [Stutzman, 1993]^[14]. Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η απόσβεση που οφείλεται στους σπινθηρισμούς και τη βροχή.



Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστική εικόνα των διακυμάνσεων απόσβεσης λόγω βροχής και σπινθηρισμών.

- Στροφή Faraday (Faraday Rotation) και Διασπορά συχνοτήτων (Frequency Dispersion): Πρόκειται για επιβαρυντικούς ατμοσφαιρικούς μηχανισμούς που οφείλονται σε ιονοσφαιρικά φαινόμενα και ενδιαφέρουν μόνο τα δορυφορικά συστήματα που λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων C (4/6GHz). Ως προς τον πρώτο μηχανισμό, κατά τη διάδοση ενός γραμμικά πολωμένου κύματος μέσω της ιονόσφαιρας, το επίπεδο της πόλωσής του στρέφεται προοδευτικά υπό την επίδραση του μαγνητικού πεδίου της γης (στροφή Faraday). Για τη ζώνη συχνοτήτων C η στροφή της πόλωσης υπολογίζεται γύρω στις 10° . Στο στρώμα της ιονόσφαιρας συντελείται και διασπορά συχνοτήτων. Διαφορετικές φασματικές συνιστώσες οδεύουν με διαφορετική ταχύτητα προκαλώντας τη χρονική διαπλάτυνση του σήματος. Η χρονική διαπλάτυνση, που στα 4GHz λαμβάνει τιμές γύρω στα 10^{-5} psec/Hz, μειώνεται σε ασήμαντα επίπεδα στις υψηλές ζώνες συχνοτήτων.
- Απόσβεση λόγω νεφώσεων: Η περιεκτικότητα σε νερό των νεφών είναι η φυσική αιτία της απόσβεσης αυτής [Papatsoris, 1997]^[18]. Πρότυπα πρόβλεψης για αυτόν τον ιδιαίτερο παράγοντα εξασθένησης έχουν αναπτυχθεί από το πλαίσιο της ITU-R. Στο σχήμα 2.3 απεικονίζονται οι τιμές της απόσβεσης λόγω νεφώσεων και ομίχλης για μια ορισμένη σειρά πιθανοτήτων

υπέρβασης. Το πρότυπο ITU-R επιλέχτηκε ως μέθοδος πρόβλεψης για αυτές καμπύλες, οι οποίες αντιστοιχούν στις ζώνες τριών συχνοτήτων.



Σχήμα 2.4: Εξασθένιση από τα σύννεφα και την ομίχλη προς το ποσοστό του χρόνου λειτουργίας στην Αθήνα με γωνία ανύψωσης 30 μοιρών.

Συνοψίζοντας, το θεμελιώδες συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η συχνότητα των 10GHz αποτελεί το όριο κάτω από το οποίο οι ατμοσφαιρικές συνθήκες για τη διάδοση κυμάτων είναι περισσότερο ευνοϊκές. Αντίθετα, για φέρουσες συχνότητες υψηλότερες του κατωφλίου των 10GHz, οι συνθήκες διάδοσης μεταβάλλονται δραστικά: Οι δορυφορικές ζεύξεις υπό συνθήκες βροχής υποφέρουν από μεγάλες αποσβέσεις, βαθιές διαλείψεις και καθίστανται ευάλωτες σε αποπόλωση. Ευνόητο είναι ότι σε περιοχές του πλανήτη με υποτροπικά και τροπικά κλίματα το πρόβλημα παρουσιάζεται οξυμένο. Προχωρώντας ένα βήμα περαιτέρω, στην περιοχή των EHF συχνοτήτων (30 έως 300GHz), η βροχοπτώση παύει να είναι το κυρίαρχο αίτιο απόσβεσης αφού το ενδεχόμενο της ταυτόχρονης εμφάνισης διαφόρων παραγόντων απόσβεσης είναι ιδιαίτερα πιθανό [Arbesser-Rastburg & Paraboni, 1997]^[19] και [Paraboni and Riva, 1994]^[20]. Η παρατήρηση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία αφού η τάση των τελευταίων ετών είναι η σχεδίαση συστημάτων που

χρησιμοποιούν με αυξανόμενο ρυθμό τη ζώνη συχνοτήτων Ka (20/30GHz) ενώ μελετάται η επέκταση στη ζώνη V (40/50GHz).

Για όλους αυτούς τους λόγους, πολλοί ερευνητές προσπαθούν να προσδιορίσουν μεθόδους ώστε να μετρηθούν οι μεγάλες αποσβέσεις λόγω βροχής σε μικροκυματικές ζεύξεις άνω των 10GHz [Κατσάμπας, 2003]^[21].

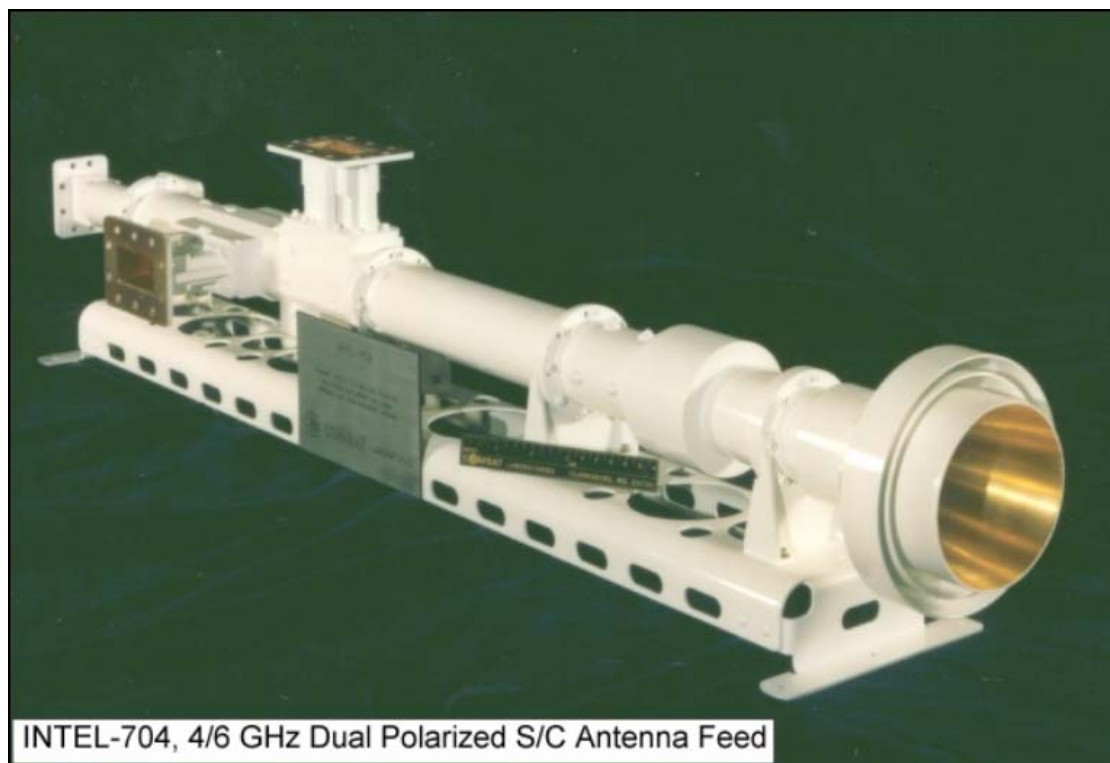
2.3 Αποπόλωση λόγω βροχής και παγοκρυστάλλων

Οι κυριότεροι μηχανισμοί αποπόλωσης ενός μικροκυματικού κύματος που διαδίδεται στην ατμόσφαιρα είναι η μεταβολή του δείκτη διάθλασης και, ειδικά για συχνότητες άνω των 10GHz, οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις. Οι παγοκρυστάλλοι που υπάρχουν στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας επιδεινώνουν το φαινόμενο της αποπόλωσης αλλά για την περιοχή συχνοτήτων από 10 έως 30GHz η βροχή αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα.

Οι κυριότερες παράμετροι του μέσου βροχής που συμβάλλουν στην αποπόλωση του Η/Μ κύματος είναι, αφενός, το όχι πλήρως σφαιρικό σχήμα των σταγόνων και αφετέρου, η γωνία κλίσης ως προς την κατακόρυφο. Ως αποτέλεσμα προκύπτει η εμφάνιση διαφορικής απόσβεσης και διαφορικής ολίσθησης φάσης στο διαδιδόμενο σήμα διπλής πόλωσης [Oguchi, 1977]^[22]. Όσον αφορά τη συνεισφορά των παγοκρυστάλλων στην αποπόλωση του σήματος, λόγω έλλειψης πληροφοριών για την κατανομή, τον προσανατολισμό των παγοκρυστάλλων, τους τύπους των σχημάτων καθώς και το ύψος του στρώματος των παγοκρυστάλλων, δεν έχουν αναπτυχθεί μέχρι τώρα αξιόπιστες μέθοδοι πρόβλεψης που να βασίζονται σε μετεωρολογικά δεδομένα. Έχουν αναπτυχθεί, όμως, κάποια μοντέλα που εκτιμούν την επίδραση της αποπόλωσης λόγω παγοκρυστάλλων στη λειτουργία ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος αναχρησιμοποίησης συχνότητας [Bostian and Allnutt, 1979]^[23] και [Papatsoris, 1997]^[18].

2.3.1 Τεχνολογία αναχρησιμοποίησης συχνότητας

Η τεχνική αναχρησιμοποίησης της συχνότητας έχει το σημαντικό πλεονέκτημα ότι στην ουσία διπλασιάζει το ραδιοφάσμα μέσω της εκπομπής δύο σημάτων στην ίδια συχνότητα με κάθετες πολώσεις. Το τίμημα, όμως, της εκμετάλλευσης αυτού του πολύτιμου πόρου είναι η εμφάνιση νέων προβλημάτων από τα ήδη υπάρχοντα στην απλή πόλωση (τα φαινόμενα της αποπόλωσης) αλλά και η ανάγκη χρησιμοποίησης νέων συσκευών για εκπομπή και λήψη δορυφορικών σημάτων διπλής πόλωσης τόσο σε δορυφορικούς όσο και σε επίγειους σταθμούς. Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται μια κεραία διπλής δορυφορικής λήψης η οποία είναι εγκατεστημένη σε δορυφόρο με συχνότητες κάτω και άνω ζεύξης στα 4/6GHz αντίστοιχα.



Σχήμα 2.5: Κεραία διπλής πόλωσης δορυφορικού σταθμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

3

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΙΑΛΕΙΨΕΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

3.1 Γενικά

Εξαιτίας των διαλείψεων λόγω βροχής και παγοκρυστάλλων επιβάλλεται η σωστή επιλογή της ζώνης λειτουργίας του δορυφορικού συστήματος. Εξετάζοντας τα δεδομένα των εξασθενήσεων, κρίνεται αναγκαίο τα σύγχρονα δορυφορικά συστήματα να λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων πάνω από τα 10GHz (κυρίως στις Ku και Ka), ώστε να επωφεληθούν από τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα που συνεπάγεται η χρήση αυτών των φασματικών περιοχών. Σε αυτές τις ζώνες συχνοτήτων, ένα σημαντικό ποσοστό της εκπεμπόμενης ισχύος χάνεται στη διαδρομή μεταξύ του δορυφόρου και των τερματικών επίγειων σταθμών λόγω σκέδασης και απορρόφησης από υδρομετεωρόλιθους. Λόγω της μεγάλης απόστασης που διανύουν τα ραδιοκύματα στα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών, η προαναφερθείσα απώλεια, η οποία υπερτίθεται σε αυτήν του ελεύθερου χώρου, είναι τεράστια. Η απώλεια ελεύθερου χώρου είναι η χαμηλότερη δυνατή απόσβεση η οποία αναμένεται να έχει οποιαδήποτε ασύρματη ζεύξη. Με αυτό το γεγονός και συνδυαζόμενο με τον προσθετικό χαρακτήρα των απωλειών λόγω σκέδασης και απορρόφησης από υδρομετεωρόλιθους, η απώλεια ελεύθερου χώρου μπορεί να ιδωθεί ως στάθμη αναφοράς για τη συνολική απώλεια διάδοσης.

Για τα αναλογικά δορυφορικά συστήματα (όπου το ζητούμενο είναι η πιστή αναπαραγωγή του εκπεμπόμενου σήματος), η επίπτωση από τις απώλειες είναι η μεγάλη χειροτέρευση της ποιότητας επικοινωνίας η οποία σε περιπτώσεις μεγάλων αποσβέσεων οδηγεί σε αδυναμία ανάκτησης του αναλογικού σήματος πληροφορίας. Με την επανάσταση των ψηφιακών επικοινωνιών τα αναλογικά συστήματα τείνουν σήμερα να αντικατασταθούν πλήρως από ψηφιακά με μοναδικό λόγο διατήρησης των αναλογικών συστημάτων τις μεγάλες επενδύσεις που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί στους υπάρχοντες αναλογικούς επίγειους σταθμούς [Ha, 1989]^[24].

Οι δυσμενείς επιδράσεις των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων πρέπει πρώτα να ορισθούν μέσα από ορισμένα βασικά μεγέθη ενός συστήματος ψηφιακών επικοινωνιών. Ένα πολύ κρίσιμο για την ποιότητα του συστήματος μέγεθος, είναι το ποσοστό εσφαλμένων ψηφίων (Bit Error Ratio, BER), του οποίου οι μεταβολές μετρώνται στην έξοδο του δέκτη μέσω του ρυθμού μετάδοσης της ψηφιακής πληροφορίας R (Bit Rate) που περιγράφει την ταχύτητα μετάδοσης δυαδικών ψηφίων σε bits/sec. Συναφής με το προηγούμενο μέγεθος είναι η πιθανότητα λήψης εσφαλμένου ψηφίου (Bit Error Probability, BEP) που εκτιμάται στο στάδιο της σχεδίασης και αντιπαραβάλλεται σε σχέση με το BER στο στάδιο της λειτουργίας του ψηφιακού συστήματος. Σε αντιδιαστολή με τα αναλογικά συστήματα, η λειτουργία του δέκτη είναι απλούστερη αφού αφορά μόνο την ορθή αναγνώριση του μεταδοθέντος δυαδικού ψηφίου. Οι δύο δυνατές τιμές των ψηφίων πληροφορίας είναι το 1 και το 0. Σφάλμα στα ψηφιακά συστήματα επικοινωνιών ανακύπτει όταν στο δέκτη αναγνωρίζεται ότι έχει ληφθεί 1 ενώ έχει μεταδοθεί 0 ή το αντίστροφο και όχι την αναπαραγωγή ολόκληρου του σήματος.

Η επίδοση του δέκτη χειροτερεύει υπό συνθήκες βροχής, αφού τότε η απαραίτητη για την αναγνώριση τιμή του λόγου της ισχύος του χρήσιμου σήματος προς την ισχύ του θορύβου είναι μειωμένη. Υπό συνθήκες καταιγίδας (παροξυσμικής βροχής), η μεγάλη απόσβεση μειώνει σε τέτοιο βαθμό την ισχύ του χρήσιμου σήματος, ώστε είναι δυνατό ο δέκτης να χάσει το συγχρονισμό του (δηλαδή το σημείο έναρξης του κάθε bit) και το δορυφορικό σύστημα να τεθεί εκτός λειτουργίας (outage). Το γεγονός αυτό μειώνει τη διαθεσιμότητα (availability) του συστήματος, το χρονικό ποσοστό δηλαδή στη διάρκεια ενός έτους στο οποίο είναι ικανό να προσφέρει υπηρεσίες στους χρήστες του. Ένας τεχνικός ορισμός της διαθεσιμότητας είναι η πιθανότητα του ενδεχομένου το ποσοστό BER να είναι χαμηλότερο από

κάποιο κατώφλι (σύνηθες κατώφλι είναι το 10^{-3}) πέρα από το οποίο ο δέκτης χάνει το συγχρονισμό του [Livieratos & Cottis, 2001]^[25]. Η διαθεσιμότητα αποτελεί το συμπληρωματικό ως προς τη διακοπή της λειτουργίας του συστήματος ενδεχόμενο. Σε άλλες περιπτώσεις, όταν οι κλιματολογικές συνθήκες είναι ηπιότερες, οι αποσβέσεις/ διαλείψεις λόγω βροχής πλήττουν μόνο την ποιότητα του δορυφορικού συστήματος και όχι τη διαθεσιμότητά του.

Η ποιότητα των δορυφορικών ζεύξεων στα σύγχρονα ψηφιακά συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών αξιολογείται από τη διαθεσιμότητα (availability) και την αξιοπιστία (performance) που επιτυγχάνονται. Η διαθεσιμότητα εκφράζει το ποσοστό του χρόνου στη διάρκεια του οποίου το σύστημα διατηρεί το συγχρονισμό του δηλαδή ο ρυθμός εμφάνισης λανθασμένων ψηφίων δεν υπερβαίνει ένα κατώφλι το οποίο επιλέγεται από τον σχεδιαστή της ζεύξης. Ο ρυθμός λανθασμένων ψηφίων είναι φθίνουσα συνάρτηση του λόγου ισχύος του φέροντος σήματος προς την ισχύ θορύβου και εξαρτάται από το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και το διατιθέμενο εύρος ζώνης συχνότητας [Ha, 1989]^[24]. Η διαθεσιμότητα και η αξιοπιστία ενός δορυφορικού συστήματος προδιαγράφονται από τις συστάσεις του διεθνούς οργανισμού ITU-R. Κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος στόχος είναι η ικανοποίηση των προδιαγραφών ποιότητας των παρεχόμενων επικοινωνιών σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση του οικονομικού κόστους. Ειδικότερα για τα δορυφορικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα τα οποία λειτουργούν σε συχνότητες πάνω από 10GHz, ο κυριότερος ανασταλτικός παράγοντας είναι η βροχή η οποία προκαλεί απόσβεση και απόπλωση στο μεταδιδόμενο σήμα. Για αυτό το λόγο, τα τελευταία χρόνια έχουν μελετηθεί διεξοδικά τα προβλήματα που εισάγει η βροχή στη υλοποίηση των δορυφορικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων [Παναγόπουλος, 2002]^[26].

Προκειμένου να αναιρεθούν μερικώς οι παραπάνω δυσμενείς συνέπειες έχουν προταθεί διάφορες λύσεις. Τα αντίμετρα κατά των διαλείψεων λόγω βροχής (Rain Fade Countermeasures) χωρίζονται γενικά σε πέντε κατηγορίες

- Έλεγχος της Ισχύος (Power Control)
- Κωδικοποίηση για Διόρθωση Σφαλμάτων (FEC)
- Προσαρμοστική Διαμόρφωση (Adaptive Modulation -AM)
- Ρυθμός Μείωσης Δεδομένων (Data Rate Reduction -DRR)
- Σχήματα Διαφορικής Προστασίας (Diversity Schemes)

Ένας τρόπος που προτείνεται για τη βελτιστοποίηση χρήσης (optimum spectrum utilization) του ραδιοφάσματος είναι η τεχνική αναχρησιμοποίησης συχνότητας (χρήση δύο σημάτων με πολώσεις κάθετες η μια στην άλλη) η οποία αξίζει να αναφερθεί.

3.2 Έλεγχος της Ισχύος

EIRP (ενεργώς ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς) είναι το γινόμενο της εκπεμπόμενης ισχύος με το κέρδος της κεραίας και συνήθως εκφράζεται σε dBw. Ο έλεγχος της ισχύος (ή κατεπέκταση έλεγχος του EIRP) συνίσταται στη μεταβολή είτε της ισχύος εκπομπής είτε του κέρδους της κεραίας προκειμένου να αντισταθμιστούν οι απώλειες ισχύος λόγω των προβλημάτων διάδοσης. Η ρύθμιση της ισχύος μπορεί να καθοριστεί από τον επίγειο σταθμό (uplink έλεγχος ισχύος (ULPC)) ή από το δορυφόρο (downlink έλεγχος ισχύος (DLPC)). Επιπλέον, η ρύθμιση του κέρδους κεραιών που πραγματοποιείται επί του δορυφόρου, είναι μια τεχνική που αναφέρεται ως μορφοποίηση διαγράμματος ακτινοβολίας κεραίας (SBS), τεχνική η οποία μπορεί να αντιμετωπισθεί ως ένας άλλος τύπος δορυφορικού ελέγχου του EIRP. Σε γενικές γραμμές, ο έλεγχος της ισχύος μπορεί να εφαρμοστεί με δύο τρόπους

- Σύστημα ελέγχου ισχύος ανοιχτού βρόχου είναι το σύστημα εκείνο όπου η ισχύς εξόδου του πομπού τροποποιείται ανάλογα με τις πρόσφατες μετρήσεις της ισχύος λήψης είτε σε μια συχνότητα πιλότο και αναγωγή της μέτρησης με χρήση της τεχνικής frequency scaling είτε με απευθείας μέτρηση του ίδιου του σήματος πληροφορίας.
- Σύστημα ελέγχου ισχύος κλειστού βρόχου είναι το σύστημα εκείνο όπου η ισχύς εξόδου του πομπού μεταβάλλεται ανάλογα με συνεχείς μετρήσεις ισχύος του δορυφορικού διαύλου. Στα κλειστά συστήματα ελέγχου ισχύος η συσκευή αποστολής σημάτων (επίγειος σταθμός ή δορυφόρος) αποφασίζει εάν πρέπει να αλλάξει η εκπεμπόμενη ισχύς μετά τη λήψη πληροφοριών ανατροφοδότησης από το δέκτη και όχι από εκτιμήσεις της απόσβεσης.

Στην πράξη, όταν εφαρμόζεται στα δορυφορικά συστήματα το κλειστό σύστημα ελέγχου ισχύος πρέπει να αντιμετωπιστούν οι καθυστερήσεις διάδοσης.

3.2.1 Έλεγχος ισχύος της άνω ζεύξης (ULPC)

Η ισχύς μετάδοσης ενός επίγειου σταθμού ρυθμίζεται προκειμένου να διατηρηθεί η πυκνότητα ροής στη δορυφορική εισαγωγή πάνω από ένα ορισμένο κατώφλι. Στη συνέχεια, γίνεται η υιοθέτηση της αρχής ανοικτών βρόχων για το υπόλοιπο αυτού του τμήματος της ανάλυσης. Η ρύθμιση του ενισχυτή υψηλής ισχύος (HPA) στον επίγειο σταθμό βασίζεται μόνο στις μετρήσεις εξασθένησης χωρίς προσφυγή σε οποιαδήποτε ανατροφοδότηση από το δέκτη.

Εξάλλου, οι ενισχυτές HPA που αναλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος ενίσχυσης του προς εκπομπή σήματος δεν είναι πάντοτε δυνατό να αυξήσουν την ισχύ εξόδου τους. Ο λόγος είναι ότι πολλοί ενισχυτές κατά την κανονική τους λειτουργία έχουν ήδη μικρά περιθώρια ισχύος στην έξοδο, δηλαδή λειτουργούν με ισχύ εκπομπής κοντά στην ισχύ κορεσμού τους (μέγιστη τιμή ισχύος που μπορεί να αποδώσει ο ενισχυτής). Ακόμη όμως και αν είναι δυνατή η μείωση του περιθωρίου ισχύος στην έξοδο, οι επιπτώσεις από τη λειτουργία του ενισχυτή στη μη γραμμική περιοχή είναι ιδιαίτερος δυσμενείς.

Ένα πιθανό πρόβλημα που προκαλείται στο ULPC είναι η παρεμβολή γειτονικού καναλιού όταν μέρος της ενέργειας του δορυφορικού σήματος επηρεάζει παρακείμενα κανάλια.

Η παρακείμενη δορυφορική παρεμβολή είναι ένας τύπος διασυστημικής παρεμβολής λόγω του ULPC. Η ταχεία ανάπτυξη των δορυφορικών επικοινωνιών στο παρελθόν έχει οδηγήσει σε συμφόρηση της γεωστατικής τροχιάς. Σήμερα, οι δορυφόροι βρίσκονται με 1–2 ° διαφορά επί της γεωστατικής τροχιάς και, επομένως, μια αύξηση της ισχύος εκπομπής από ένα επίγειο σταθμό μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία των παρακείμενων δορυφορικών συστημάτων. Παρά τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα, η τεχνική ULPC αποτελεί ένα αποτελεσματικό αντίμετρο για την αντιμετώπιση της εξασθένησης των σημάτων και είναι προτιμητέο σήμερα από πολλούς δορυφορικούς χειριστές.

3.2.2 Έλεγχος ισχύος της κάτω ζεύξης (DLPC)

Η ισχύς εκπομπής ενός δορυφόρου ρυθμίζεται προκειμένου να διατηρηθεί η πυκνότητα ροής στην επίγεια εισαγωγή πάνω από ένα ορισμένο κατώφλι.

Αντίθετα από την τεχνική ULPC, η τεχνική DLPC είναι δύσκολο να εφαρμοστεί λόγω των περιορισμών στο μέγεθος και το βάρος του δορυφόρου, καθώς επίσης, και της περιορισμένης δυνατότητας ελέγχου της δορυφορικής λειτουργίας. Συγκεκριμένα, ο δορυφόρος (το μέγεθος και το βάρος του) περιορίζουν τη χρήση TWTA (ενισχυτής διακινούμενων κυμάτων σε σωλήνες). Εκτός από την πιθανή παρεμβολή σε γειτονικά κανάλια, η τεχνική DLPC μπορεί να δημιουργήσει την παρεμβολή ενδοδιαμόρφωσης, ένα τύπος παρεμβολής που προκαλείται από τα προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης που παράγονται λόγω της μη γραμμικής ενίσχυσης πολλαπλών φερόντων.

3.2.3 Μορφοποίηση διαγράμματος ακτινοβολίας κεραίας (Spot Beam Shaping SBS)

Στην ουσία η τεχνική Spot Beam Shaping είναι η διαμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας του δορυφόρου ώστε να ικανοποιούνται συγκεκριμένες απαιτήσεις διαθεσιμότητας στις διάφορες γεωγραφικές περιοχές ενδιαφέροντος.

Η τεχνική SBS συνίσταται στην κατάλληλη σχεδίαση του διαγράμματος ακτινοβολίας του δορυφορικού αναμεταδότη, έτσι ώστε η ισχύς που λαμβάνεται στη γη να παραμένει σχεδόν σταθερή ακόμα και υπό συνθήκες ισχυρών ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων

Για την εφαρμογή της SBS δεν χρειάζεται στιγμιαία εκτίμηση της απόσβεσης, εφόσον η αντιστάθμιση γίνεται σε μια ολόκληρη περιοχή και όχι σε ένα σημείο. Η SBS χρειάζεται βραχυπρόθεσμες προβλέψεις των καιρικών φαινομένων, όπως Nowcasting μέσω των εικόνων από δορυφόρους (satellite imaging).

Επιπλέον, η αντιστάθμιση ισχύος γίνεται με αύξηση του κατευθυντικού κέρδους και όχι με αύξηση της ισχύος. Έτσι, δε δημιουργούνται προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης.

Η τεχνική SBS είναι περίπτωση μιας γενικότερης έννοιας της On Board Processing (OBP). Σκοπός της OBP είναι να εμπλουτίσει τις δυνατότητες επεξεργασίας του δορυφορικού αναμεταδότη ώστε να προσφέρει υπηρεσίες προσανατολισμένες στο χρήστη (πχ. TCP/IP, DTH services on demand).

3.3 Κωδικοποίηση για διόρθωση σφαλμάτων

Η τεχνική της κωδικοποίησης αφορά την εισαγωγή πλεοναζόντων ψηφίων (redundant bits) στη μεταδιδόμενη ακολουθία ψηφίων πληροφορίας με σκοπό την ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων και χρησιμοποιείται μόνο όταν το σήμα έχει ψηφιακή μορφή. Όσο αυξάνουν τα πλεονάζοντα ψηφία, η πιθανότητα λάθους μειώνεται αλλά το απαιτούμενο εύρος ζώνης αυξάνεται .

Στις δορυφορικές επικοινωνίες η κωδικοποίηση εφαρμόζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε η ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων να γίνεται στο δέκτη χωρίς αυτός να προσφεύγει σε κάποιας μορφής ανάδραση από τον πομπό. Η κωδικοποίηση αυτού του τύπου ονομάζεται FEC (Forward Error Correction). Συγκεκριμένα, ένα σύστημα που χρησιμοποιεί FEC έχει τη δυνατότητα αυτόματης διόρθωσης σφαλμάτων με επακόλουθο μία σημαντική βελτίωση του ποσοστού σφαλμάτων και της διαθεσιμότητας.

Μια άλλη μέθοδος για διόρθωση λαθών είναι η αυτόματη αίτηση επανάληψης ARQ (Automatic Repeat Request). Με αυτή τη μέθοδο επιτυγχάνεται η διόρθωση λαθών με την επανεκπομπή όλων των blocks των λανθασμένων ψηφίων. Η ARQ χρησιμοποιείται κυρίως σε δίκτυα δεδομένων VSAT.

Οι κώδικες διόρθωσης λαθών αρχικά σχεδιάστηκαν για την καταπολέμηση τυχαίως κατανεμημένων λαθών που οφείλονται στο θερμικό θόρυβο. Με τη χρήση συχνοτήτων υψηλότερων των 10GHz, τα λάθη στις ασύρματες ζεύξεις οφείλονται στις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, εμφανίζουν παροξυσμικό χαρακτήρα (bursts) και δεν είναι ανεξάρτητα. Για το λόγο αυτό, η διαθεσιμότητα μιας δορυφορικής ζεύξης αυξάνεται με κατάλληλη μεταβολή του ρυθμού κωδικοποίησης.

Συνεπώς, με την εισαγωγή βαθμίδων κωδικοποίησης στον πομπό και το δέκτη καθίσταται δυνατό με μικρότερη τιμή του σηματοθορυβικού λόγου να επιτυγχάνεται στην έξοδο του δέκτη, BER ίδιος με αυτόν ενός συστήματος που δεν

κάνει χρήση κωδικοποίησης. Με τον τρόπο αυτό, αντισταθμίζεται η πτώση της τιμής του λόγου ενέργειας ψηφίου προς φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου (E_b / n_o) που οφείλεται σε βροχοπτώσεις. Εντούτοις, όταν χρησιμοποιείται κωδικοποίηση εγείρονται μεγαλύτερες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης. Επομένως, η κωδικοποίηση για διόρθωση λαθών αποτελεί μια μέθοδο ανταλλαγής ισχύος με εύρος ζώνης, λόγω της απαίτησης για μεγαλύτερη χωρητικότητα που οφείλεται στα πρόσθετα ψηφία που εισάγονται κατά την κωδικοποίηση.

Οι βασικές κατηγορίες κωδίκων είναι οι συμπαγείς και οι συνελκτικοί κώδικες, και η υλοποίησή τους πραγματοποιείται εύκολα μέσω απλών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων VLSI (καταχωρητές ολίσθησης, αθροιστές modulo-2, πολλαπλασιαστές). Τα πλέον συνήθη σχήματα κωδικοποίησης είναι οι αλυσιδωτοί κώδικες (Concatenated Codes), δηλαδή συνδυασμός συμπαγών κωδίκων με συνελκτικούς (block codes & convolutional codes). Το πλέον διαδεδομένο παράδειγμα χρήσης αλυσιδωτών κωδίκων είναι ο συνδυασμός των κωδίκων Reed&Solomon (block) ως εξωτερικών (outer) κωδίκων και συνελκτικών κωδίκων ως εσωτερικών (inner) κωδίκων με αποκωδικοποίηση Viterbi στο δέκτη. Μια τελευταία εξέλιξη στη περιοχή των κωδίκων είναι η χρήση των παραλλήλων αλυσιδωτών συνελκτικών κωδίκων, που είναι γνωστοί ως κώδικες turbo (turbo codes).

Ωστόσο, οι τεχνικές κωδικοποίησης δεν είναι πάντα το κατάλληλο εργαλείο για να αντιμετωπισθούν οι δυσμενείς επιδράσεις της ατμόσφαιρας κατά τη διάδοση των κυμάτων σε συχνότητες υψηλότερες των 10GHz, αφού η διορθωτική τους ικανότητα περιορίζεται στη διόρθωση ενός αριθμού συνεχόμενων σφαλμάτων. Συγκεκριμένα, οι κατηγορίες κωδίκων που προαναφέρθηκαν ανταποκρίνονται με επιτυχία όταν αντιμετωπίζουν μεμονωμένα και απομακρυσμένα μεταξύ τους σφάλματα, όπως είναι σφάλματα που οφείλονται στο θερμικό θόρυβο. Αντίθετα, τα σφάλματα εξαιτίας παροξυσμικής βροχόπτωσης είναι συνεχόμενα (καταιγισμός σφαλμάτων) και, όταν αυτά υπερβούν ένα ορισμένο πλήθος, η δορυφορική ζεύξη παύει να λειτουργεί. Ένας μη αποδοτικός τρόπος να αποφευχθεί αυτή η κατάσταση είναι η επιλεκτική μείωση του ρυθμού δεδομένων R σε χρονικές περιόδους κατά τις οποίες τα καιρικά φαινόμενα αναμένονται ακραία.

3.4 Προσαρμοστική Διαμόρφωση (Adaptive Modulation AM)

Η προσαρμοστική διαμόρφωση αυξάνει το λόγο (E_b / n_o) που απαιτείται για να επιτευχθεί συγκεκριμένη στάθμη BER μειώνοντας τη φασματική απόδοση σε bps/Hz, όταν ο σηματοθορυβικός λόγος μειώνεται λόγω των φαινομένων διάδοσης.

Στην ουσία και με τη βοήθεια των τεχνικών Adaptive Modulation και ελέγχου του EIRP, κατά τη διάρκεια ισχυρών κατακρημνίσεων προκύπτει κάποιου είδους ανταλλαγή. Διαπιστώνεται ότι στην τεχνική Adaptive Modulation ανταλλάσσεται η φασματική απόδοση με τις απαιτήσεις για ισχύ.

Υψηλότερη φασματική επίδοση σημαίνει μετάδοση περισσότερων ψηφίων ανά δευτερόλεπτο χωρίς να αυξάνεται το εύρος ζώνης (RF, M-PSK ή M-QAM (M=2,4,8,16,32,64)). Όσο αυξάνει η παράμετρος M τόσο αυξάνει και η φασματική απόδοση.

Σε ένα σύστημα που χρησιμοποιεί Προσαρμοστική Διαμόρφωση υπό συνθήκες καθαρού ουρανού χρησιμοποιούνται 16-PSK, 64-PSK, 256-QAM, ενώ όταν υπάρχουν ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις χρησιμοποιούνται οι σταθερές και εύρωστες διαμορφώσεις BPSK, QPSK, 16QAM.

Συνεπώς, με την τεχνική AM επιτυγχάνεται η απαιτούμενη απόδοση μειώνοντας τα ψηφία ανά σύμβολο υπό δεδομένο ρυθμό και εύρος ζώνης.

3.5 Ρυθμός Μείωσης Δεδομένων (DRR)

Η τεχνική αυτή σχετίζεται με τη μείωση του ρυθμού δεδομένων πληροφορίας όταν το σύστημα ελέγχου που παρακολουθεί το κανάλι προβλέψει πιθανή μεγάλη διάλειψη.

Η εφαρμογή της DRR (Data Rate Reduction) εξαρτάται από το κατά πόσο η υπηρεσία μπορεί να αντέξει τη μείωση του ρυθμού μετάδοσης πληροφορίας. Η τεχνική αυτή, εφαρμόστηκε με το δορυφόρο Olympus μέσω συστήματος VSAT για την εφαρμογή τηλεδιάσκεψης. Υπό συνθήκες καθαρού ουρανού, ο ρυθμός δεδομένων πληροφορίας ήταν 2.048Mbits/sec.

Στη συνέχεια και εξαιτίας μεγάλων διαλείψεων, ο ρυθμός των δεδομένων μειώθηκε κατά ένα παράγοντα 2, 4 ή 8 για να επιτευχθεί η κατάλληλη ποιότητα

καναλιού. Το κέρδος που επιτεύχθηκε ήταν 3, 6 και 9dB αντίστοιχα. Σε σύγκριση με τη χρήση των τεχνικών Προσαρμοστικής Διαμόρφωσης και Προσαρμοστικής Κωδικοποίησης σε συστήματα πολλαπλής πρόσβασης, οι τεχνικές αυτές υστερούν στο γεγονός ότι απαιτούν μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα σε ένα TDMA frame και μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε ένα FDMA σύστημα για τους χρήστες που αντιμετωπίζουν τα μεγαλύτερα προβλήματα διάδοσης.

Με την τεχνική DRR το εύρος ζώνης και ο συγχρονισμός στη τιμή του BER κατοφλίου παραμένουν σταθερά συνδυάζοντας το ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας με μια ψευδοτυχαία ακολουθία κατάλληλου ρυθμού.

3.6 Σχήματα διαφορικής προστασίας

Αν και βασίζονται σε μία εντελώς διαφορετική φιλοσοφία αντιμετώπισης των διαλείψεων από τις προηγούμενες, και οι τεχνικές της διαφορικής προστασίας (diversity protection) έχουν τον ίδιο στόχο να διατηρήσουν τη διαθεσιμότητα της δορυφορικής ζεύξης εντός των προδιαγραφών και να καταστήσουν δυνατή τη λειτουργία υπό χαμηλά περιθώρια διαλείψεων. Αυστηρά οριζόμενο, το περιθώριο διάλειψης (fade margin) ισοδυναμεί με τη διαφορά μεταξύ της τιμής της απόσβεσης η οποία οδηγεί το σύστημα σε απώλεια του συγχρονισμού του και της τιμής της απόσβεσης υπό συνθήκες καθαρού ουρανού (με τα δύο μεγέθη να είναι εκφρασμένα σε dB). Η τιμή της απόσβεσης υπό συνθήκες καθαρού ουρανού προκύπτει από το άθροισμα όλων των παραγόντων που συνεισφέρουν στην απόσβεση της δορυφορικής ζεύξης, πλην της απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης, και για δεδομένη δορυφορική ζεύξη είναι μία σχεδόν σταθερή ποσότητα. Αντίθετα, η απόσβεση που οφείλεται στη βροχή μεταβάλλεται ισχυρά στη διάρκεια του έτους δυσκολεύοντας τη σχεδίαση της ζεύξης.

Γενικότερα, λοιπόν, το περιθώριο διάλειψης είναι ο σχεδιασμός του συστήματος με επαρκές κέρδος (system gain), ώστε αυτό να αντιπαρέρχεται τις διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης και να διασφαλίζεται έτσι ότι θα διατηρείται η απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service, QoS). Ανάμεσα στα κρίσιμα ζητήματα που υπεισέρχονται κατά το σχεδιασμό είναι τόσο η επιλογή κατάλληλης τεχνικής αντιμετώπισης των διαλείψεων λόγω βροχής, όσο και η επιτυχής ισορρόπηση μεταξύ επίδοσης και κόστους του συστήματος.

Τα σχήματα διαφορικής προστασίας χωρίζονται σε τέσσερις επιμέρους κατηγορίες

- Διαφορική Λήψη Συχνότητας (Frequency Diversity, FD)
- Διαφορική Λήψη Θέσης (Site Diversity, SD)
- Διαφορική Λήψη Τροχιάς (Orbital Diversity, OD)
- Διαφορική Λήψη Χρόνου (Time Diversity, TD)

3.6.1 Διαφορική λήψη συχνότητας

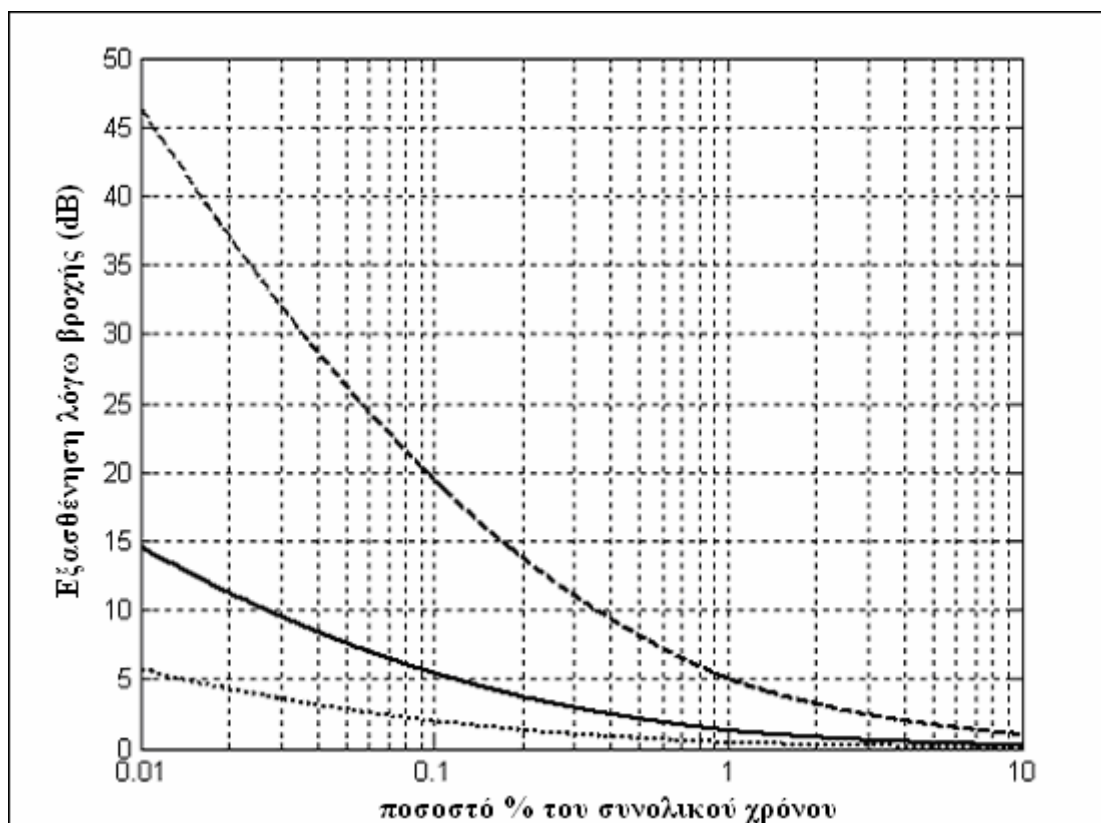
Η διαφορική λήψη συχνότητας εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι ανεξάρτητα από το μηχανισμό διαλείψεων, η συσχέτιση των διαλείψεων στα σήματα που λαμβάνονται είναι μικρή, εάν η πληροφορία μεταδίδεται ταυτόχρονα σε δύο φέρουσες συχνότητες [Κανελλόπουλος, 2001]^[10]. Με δεδομένη τη μικρή συσχέτιση μεταξύ των δύο φασματικά μετατοπισμένων σημάτων, όταν το ένα υπόκειται σε βαθιές διαλείψεις στο άλλο οι συνέπειες θα είναι ηπιότερες, καίτοι αυτά ακολουθούν τον ίδιο δρόμο διάδοσης.

Στις περιπτώσεις διαφορικής λήψης συχνότητας, ένας αναμεταδότης που λαμβάνει/εκπέμπει σε ραδιοσυχνότητα μικρότερη από τα 10GHz (για παράδειγμα στη ζώνη C) αναλαμβάνει να συζεύξει το διαστημικό με τους τερματικούς επίγειους σταθμούς (η διαφορική λήψη συχνότητας χρησιμοποιείται από τις δορυφορικές επικοινωνίες με ελαφρώς διαφορετικό τρόπο, όταν η απόσβεση λόγω των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων επιδεινώνει τη λειτουργία της ζεύξης). Η διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε συχνότητες κάτω από τα 10GHz, όπως έχει αναφερθεί, πραγματοποιείται υπό καλύτερες συνθήκες όσον αφορά τους ατμοσφαιρικούς μηχανισμούς διάδοσης. Οι δορυφόροι που εκτοξεύονται τα τελευταία χρόνια διαθέτουν πολυάριθμους διασυνδεδεμένους αναμεταδότες στις ζώνες C, Ku και (σπανιότερα) Ka (ένας δορυφόρος είναι εφοδιασμένος με πομποδέκτες (ή αναμεταδότες) που λειτουργούν σε διάφορες ζώνες συχνοτήτων σύμφωνα με τη σημερινή πραγματικότητα των δορυφορικών επικοινωνιών) ώστε να καλύπτουν επίγειους σταθμούς όλων των κατηγοριών. Ως μορφή διαφορικής λήψης συχνότητας μπορεί, ωστόσο, να εκληφθεί και η χρήση διαφορετικής (συνήθως χαμηλότερης) συχνότητας μόνο στην προς τα κάτω ζεύξη (συγκρινόμενη με τη

συχνότητα της προς τα άνω ζεύξης), που υιοθετείται πάντοτε από το σύνολο των δορυφορικών σταθμών και ανεξάρτητα από τη ζώνη συχνοτήτων στην οποία λειτουργούν.

Για τους επίγειους σταθμούς παρόλα αυτά δε συμβαίνει το ίδιο εξαιτίας της ανάγκης για προσθήκη επιπλέον κεραιών και εξειδικευμένου RF εξοπλισμού στο τελικό άκρο του επίγειου σταθμού [Matricciani, 1987]^[27], με συνέπεια μία σημαντική οικονομική επιβάρυνση.

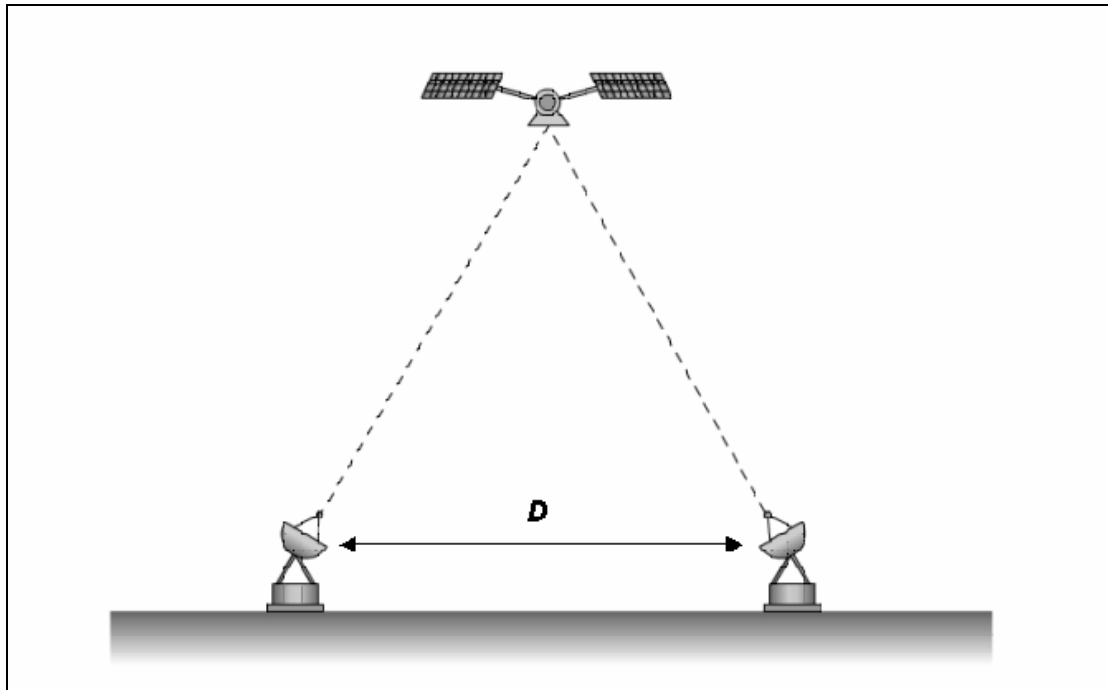
Εν γένει με την αύξηση της συχνότητας, μια δορυφορική ζεύξη, υποφέρει περισσότερο από τις κατακρημνίσεις. Με την τεχνική διαφορικής λήψης συχνότητας χρησιμοποιούνται υψηλότερες συχνότητες σε συνθήκες καθαρού ουρανού και χαμηλότερες υπό ισχυρές κατακρημνίσεις (σχήμα 3.1) (βλέπε Κεφάλαιο 7^ο).



Σχήμα 3.1: Υψηλότερες συχνότητες σε συνθήκες καθαρού ουρανού και χαμηλότερες υπό ισχυρές κατακρημνίσεις.

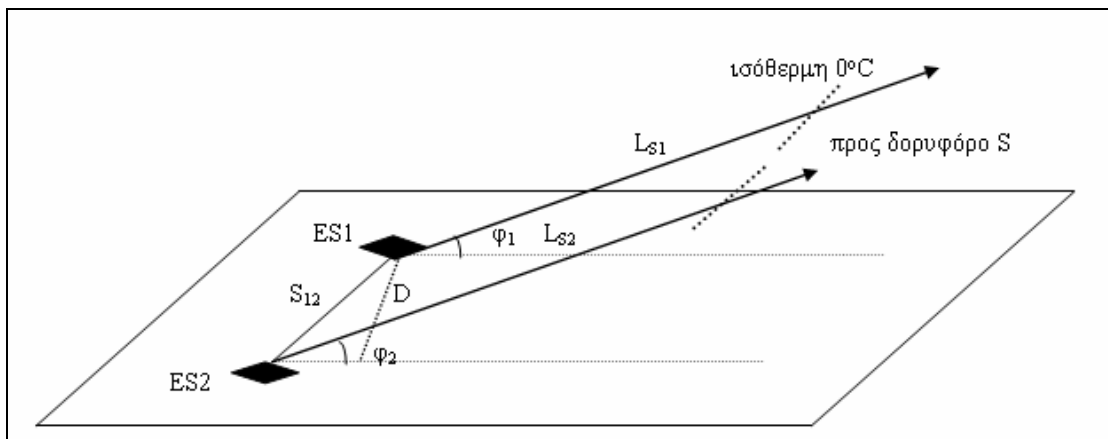
3.6.2 Τεχνικές διαφορικής λήψης θέσης και τροχιάς

Τα άλλα δύο σχήματα διαφορικής προστασίας στηρίζονται στην ταυτόχρονη λήψη του σήματος μέσω δύο (διπλή διαφορική λήψη), ή σε περιοχές με έντονες βροχοπτώσεις μέσω τριών (τριπλή διαφορική λήψη) διαφορετικών οδεύσεων του ηλεκτρομαγνητικού κύματος και αφορούν την προς τα κάτω ζεύξη. Όταν οι πολλαπλές οδεύσεις του ίδιου σήματος έχουν ως κατάληξη περισσότερους του ενός επίγειους σταθμούς η τεχνική ονομάζεται διαφορική λήψη θέσης. Η διαφορική λήψη θέσης, που συχνά στη βιβλιογραφία αναφέρεται και ως διαφορική λήψη χώρου, περιλαμβάνει δύο ή τρεις σταθμούς στο έδαφος που λαμβάνουν σήμα από τον ίδιο δορυφόρο σε τέτοια απόσταση μεταξύ τους ώστε σε κάθε χρονική στιγμή μόνο η μία από τις ζεύξεις να υποφέρει από υψηλή απόσβεση. Για να λειτουργήσει η τεχνική αυτή απαιτείται οι σηματοθορυβικοί λόγοι που λαμβάνονται από τους επίγειους σταθμούς να υποβάλλονται διαρκώς σε σύγκριση, ώστε στην έξοδο του συστήματος να εμφανίζεται πάντοτε ο μεγαλύτερος. Είναι φανερό, λοιπόν, ότι για τη διαφορική λήψη θέσης είναι απαραίτητη η επικοινωνία-σύνδεση (είτε ενσύρματα είτε ασύρματα σε μία χαμηλότερη συχνότητα που δεν επηρεάζεται από τη βροχή) μεταξύ των σταθμών και η σύγκριση στην έξοδο του συστήματος. Ένα μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι απαιτείται διασύνδεση των επίγειων σταθμών. Η απλοποιημένη γεωμετρία ενός συστήματος διπλής διαφορικής λήψης θέσης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2α.



Σχήμα 3.2α: Γεωμετρία απλοποιημένου συστήματος διπλής διαφορικής λήψης θέσης.

Οι γεωμετρικές παράμετροι που εμπλέκονται σε ένα σύστημα διπλής διαφορικής προστασίας αποσαφηνίζονται από το σχήμα 3.2β.

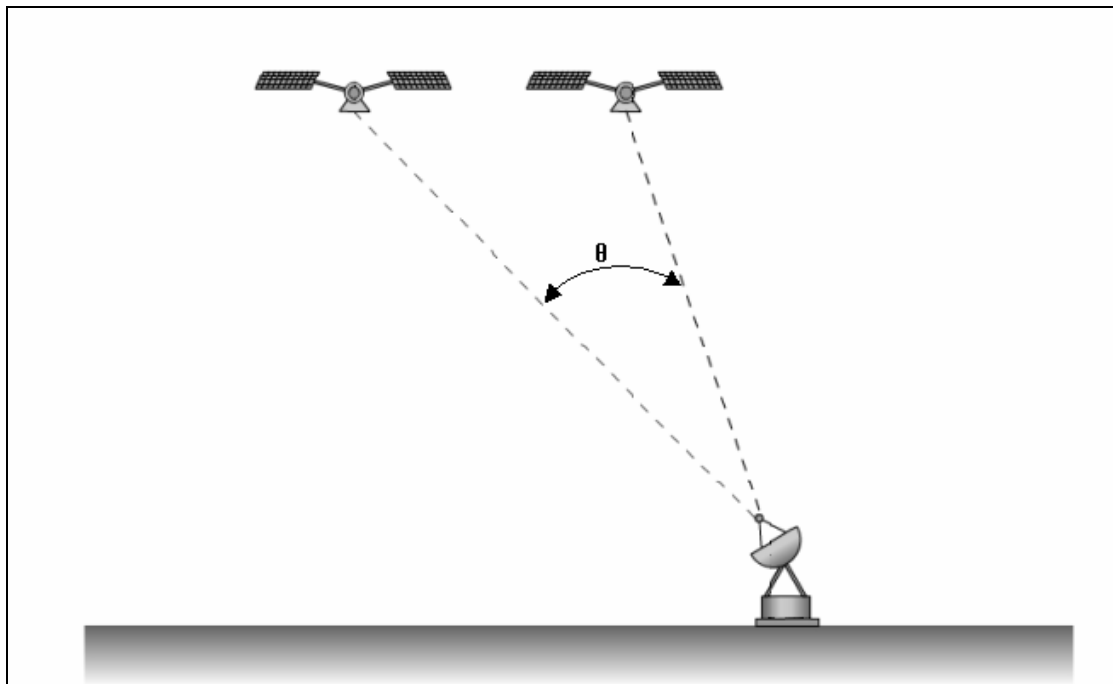


Σχήμα 3.2β: Γεωμετρικές παράμετροι της τεχνικής διπλής διαφορικής λήψης θέσης.

Αναφορικά με το σχήμα 3.2β, το ζευγάρι των επίγειων σταθμών που λαμβάνει ταυτόχρονα από τον κοινό δορυφόρο S συμβολίζεται με ES1 και ES2 (Earth Station 1,2). Οι σταθμοί απέχουν μεταξύ τους απόσταση και οριζόντια απόσταση S_{12} και D αντίστοιχα. Γενικά, ισχύει $S_{12} > D$, με εξαίρεση την περίπτωση όπου η ευθεία μεταξύ των ES1, ES2 είναι κάθετη προς το αζιμούθιο του δορυφόρου (οπότε και $S_{12} = D$). Τέλος, ο δορυφόρος φαίνεται από τους επίγειους σταθμούς υπό γωνίες ανύψωσης ϕ_1

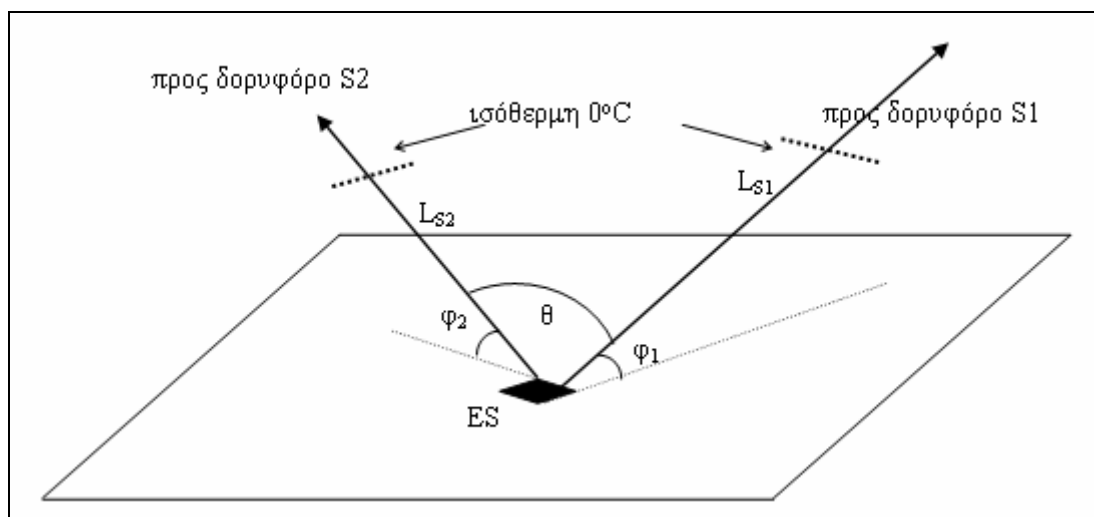
και φ_2 . Σημειώνεται ότι τα παραπάνω μεγέθη διατηρούν την ισχύ τους σε κάθε μοντέλο διπλής διαφορικής λήψης θέσης και δεν περιορίζονται μόνο στο παρόν.

Όταν οι πολλαπλές οδεύσεις του ίδιου σήματος έχουν ως αφετηρία περισσότερους του ενός διαστημικούς δορυφόρους, η τεχνική ονομάζεται διαφορική λήψη τροχιάς. Η διαφορική λήψη τροχιάς μπορεί επίσης να επιφέρει μία σημαντική μείωση στα περιθώρια διαλείψεων από αποσβέσεις βροχής για συγκεκριμένη στάθμη πιθανότητας διακοπής του συστήματος (outage probability). Αυτό επιτυγχάνεται με την ενεργοποίηση ενός καναλιού από ένα δεύτερο δορυφόρο, γωνιακά μετατοπισμένο ως προς τον κύριο δορυφόρο που συνήθως χρησιμοποιείται από το σύστημα. Και στην περίπτωση αυτή, η έξοδος στο μοναδικό επίγειο σταθμό λαμβάνεται από τον δορυφόρο που προσφέρει τον υψηλότερο σηματοθορυβικό λόγο. Ένα απλοποιημένο σχήμα της τεχνικής διαφορικής λήψης τροχιάς εμφανίζεται στο σχήμα 3.3α.



Σχήμα 3.3α: Γεωμετρία απλοποιημένου συστήματος διπλής λήψης τροχιάς.

Μία ευκρινέστερη εικόνα της γεωμετρίας της τεχνικής διπλής διαφορικής λήψης τροχιάς μπορεί να αποκτήσει κάποιος παρατηρώντας το σχήμα 3.3β.



Σχήμα 3.3β: Γεωμετρικές παράμετροι της τεχνικής διπλής διαφορικής λήψης τροχιάς.

Σύμφωνα με το σχήμα 3.3β, ο μοναδικός σταθμός στο έδαφος ES επικοινωνεί με τους δύο δορυφόρους S1, S2 υπό γωνίες ανύψωσης φ_1 και φ_2 αντιστοίχως. Επιπλέον, με θ συμβολίζεται το κρίσιμο μέγεθος της γωνίας διαχωρισμού μεταξύ των δορυφόρων.

Και τα δύο τελευταία συστήματα διαφορικής λήψης τίθενται εκτός λειτουργίας σπανιότερα από ένα σύστημα απλής λήψης. Η βελτίωση στη διαθεσιμότητα και στην επίδοση των συστημάτων αυτών προέρχεται από το φυσικά αποδεκτό γεγονός ότι οι πυρήνες καταιγιστικής βροχής (βροχοπυρήνες) είναι χωρικά περιορισμένοι. Η αναλυτική περιγραφή της δομής της βροχής αποτελεί ένα δύσκολο πρόβλημα, από τη στιγμή που η βροχή είναι ένα φαινόμενο με μεγάλη τυχαιότητα τόσο στο πεδίο του χώρου, όσο και στο πεδίο του χρόνου. Αναγκαστικά λοιπόν, η μελέτη του φαινομένου γίνεται μέσω εμπειρικών ή αναλυτικών στατιστικών μοντέλων, όπως είναι αυτά που αναλύονται στο 4^ο κεφάλαιο. Χαρακτηριστικό αυτών των περιοχών (περιοχές στις οποίες εμφανίζεται καταιγιστική βροχή) είναι ότι εκτείνονται σε έκταση λίγων δεκάδων χιλιομέτρων, στοιχείο που εκμεταλλεύεται η διαφορική λήψη θέσης απομακρύνοντας τους σταθμούς κατά μία απόσταση της αυτής τάξης μεγέθους. Ανάλογη είναι και η λειτουργία της διαφορικής λήψης τροχιάς: Ακόμα και εάν ο σταθμός στο έδαφος περιβάλλεται από ένα βροχοπυρήνα, υπάρχει πάντα αποσυσχέτιση στις αποσβέσεις κατά μήκος των ζεύξεων από τους διαφορετικούς δορυφόρους.

3.6.2.1 Εκτίμηση τεχνικών διαφορικής λήψης θέσης και τροχιάς

Η επίδοση οποιουδήποτε σχήματος διαφορικής λήψης εκτιμάται μέσω τριών μεγεθών του διαφορικού κέρδους, διαφορικού πλεονεκτήματος και της οικονομικής δαπάνης.

- Το διαφορικό κέρδος (diversity gain) είναι η διαφορά (σε dB) μεταξύ της τιμής της απόσβεσης στην απλή λήψη και της τιμής της απόσβεσης σε λειτουργία διαφορικής λήψης, για το ίδιο ποσοστό επί τοις εκατό του συνολικού χρόνου. Η υπέρβαση συγκεκριμένης τιμής απόσβεσης εξετάζεται πάντα σε σχέση με το ποσοστό επί ενός μεγάλου χρονικού διαστήματος (συνήθως διάρκειας ενός έτους), όπου το γεγονός αυτό λαμβάνει χώρα. Η απόσβεση που προκαλείται από ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις και μάλιστα από παροξυσμικές βροχοπτώσεις διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο για χαμηλά ποσοστά στη διάρκεια ενός έτους. Το μέγεθος του διαφορικού κέρδους ορίστηκε για πρώτη φορά από τον Hodge [Hodge, 1975]^[28] και [Hodge, 1982]^[29]. Με πιο απλά λόγια δείχνει κατά πόσα dB μειώνεται η στάθμη της απόσβεσης που προκαλείται από τη βροχή στην οποία υπόκειται η δορυφορική ζεύξη όταν στο σύστημα έχει προστεθεί ένας επιπλέον πόρος (σταθμός στη γη ή το διάστημα). Αυξάνει δε, όσο μεγαλώνει η απόσταση που χωρίζει τους σταθμούς στο έδαφος (διαφορική λήψη θέσης) ή η γωνιακή απόσταση μεταξύ των σταθμών στο διάστημα (διαφορική λήψη τροχιάς), αφού έτσι παρακάμπτεται σε μεγαλύτερο βαθμό ο υπερκείμενος πυρήνας βροχής. Σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης του μεγέθους του διαφορικού κέρδους είναι ότι όταν υπολογίζεται το διαφορικό κέρδος, δηλαδή η διαφορά των αποσβέσεων στην απλή και τη διαφορική λήψη, θεωρείται το ίδιο ποσοστό χρόνου γεγονός που επιτρέπει τον υπολογισμό του από πειράματα που μπορεί να έχουν διαφορετική συνολική διάρκεια. Αυτή η παράμετρος είναι πολύ σημαντική εξαιτίας του γεγονότος ότι ένα πείραμα που έχει διαρκέσει λιγότερο χρόνο μπορεί να μην έχουν απορροφηθεί στον ίδιο βαθμό οι στατιστικές αβεβαιότητες.

Όσον αφορά το ποια από τις δύο τεχνικές (θέσης, τροχιάς) επιτυγχάνει υψηλότερο διαφορικό κέρδος μια πρώτη απάντηση είναι ότι υπό δεδομένες γεωγραφικές και κλιματολογικές συνθήκες, το κέρδος διαφορικής λήψης

θέσης παρουσιάζει υψηλότερες τιμές σε σχέση με το κέρδος διαφορικής λήψης τροχιάς και αυτό γιατί οι κεκλιμένοι δρόμοι επί των οποίων διαδίδεται το σήμα συγκλίνουν στην περίπτωση διαφορικής λήψης τροχιάς στο έδαφος, δηλαδή σε πλησιέστερη απόσταση από τον βροχοπυρήνα, ενώ στην περίπτωση της διαφορικής λήψης χώρου οι συγκλίνοντες δρόμοι ξεκινούν από ένα σημείο στο διάστημα. Συνεπώς, η απόσβεση λόγω βροχής μεταξύ των εναλλακτικών ραδιοδρόμων γης-διαστήματος παρουσιάζει μικρότερη συσχέτιση κατά τη διαφορική λήψη θέσης.

- Το διαφορικό πλεονέκτημα (diversity improvement factor) ορίζεται ως ο λόγος του ποσοστού του χρόνου όπου ένα συγκεκριμένο βάθος διάλειψης υπερβαίνεται στην απλή λήψη, προς το αντίστοιχο ποσοστό του χρόνου κατά τη διαφορική λήψη. Προφανώς, όταν το σύστημα επιλέγει διαρκώς το σήμα με το μεγαλύτερο από τους διαθέσιμους στην είσοδό του σηματοθορυβικούς λόγους (τεχνική διαφορικής λήψης), η υπέρβαση συγκεκριμένης τιμής απόσβεσης θα συμβαίνει για λιγότερα λεπτά στη διάρκεια ενός έτους σε σχέση με το αντίστοιχο απλό σύστημα. Η προσέγγιση της επίδοσης ενός σχήματος διαφορικής λήψης μέσω του διαφορικού πλεονεκτήματος, εμπεριέχει μεγαλύτερη ανακρίβεια λόγω πειραματικών δυσκολιών κατά τον υπολογισμό του (αδυναμία μετρητών στάθμης σήματος στον συνυπολογισμό κατά τη διάρκεια γρήγορων διαλείψεων [Hodge, 1982]^[29], αδυναμία σύνθεσης πειραμάτων με διαφορετική συνολική διάρκεια). Μια πρόταση καθορισμού μοντέλου για τον προσδιορισμό του διαφορικού κέρδους δίνεται παρακάτω (βλέπε § 3.6.2.2).

Ενώ, λοιπόν, το διαφορικό κέρδος προσδιορίζει ποσοτικά τη βελτίωση του δορυφορικού συστήματος όσον αφορά την τιμή της απόσβεσης, το διαφορικό πλεονέκτημα εκφράζει τη βελτίωση όσον αφορά το χρονικό ποσοστό που μία συγκεκριμένη τιμή απόσβεσης επιδρά δυσμενώς στη ζεύξη [Παναγόπουλος, Αράπογλου και Κωττής, 2004]^[30].

- Οικονομική δαπάνη για τα συστήματα διαφορικής λήψης είναι το κόστος συντήρησης και αντικατάστασης ενός συστήματος απλής πόλωσης από ένα σύστημα διαφορικής λήψης. Κόστος συντήρησης στην ουσία για έναν δορυφόρο δε νοείται αφού μια βλάβη είναι συνήθως και ανίατο πρόβλημα. Εξαιτίας όμως των πολυάριθμων δορυφορικών σταθμών που ήδη λειτουργούν

σε γεωστατική τροχιά, η διαφορική λήψη τροχιάς έχει τον πρώτο λόγο χωρίς να υπάρχει η ανάγκη εγκατάστασης κάποιου νέου (υψηλού κόστους) σταθμού (για την εγκατάσταση ενός υψηλού κόστους σταθμού περιλαμβάνεται το σύνολο σχεδόν του εξοπλισμού ενός σταθμού κανονικής λειτουργίας) γεγονός που λογίζεται ως πλεονέκτημα στις περιπτώσεις διαφορικής λήψης τροχιάς (βλέπε Παράρτημα Λ).

3.6.2.2 Μοντέλο εκτίμησης του διαφορικού κέρδους θέσης και τροχιάς

Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται απλά μοντέλα που υπολογίζουν το διαφορικό κέρδος θέσης και τροχιάς βασισμένα στο φυσικό μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων.

- Μοντέλο εκτίμησης διαφορικού κέρδους θέσης G_{SD} . Μιας και ο υπολογισμός του διαφορικού κέρδους θέσης γίνεται με χρήση του μοντέλου των συνεκτικών βροχοπυρήνων, απαιτείται η λύση πολύπλοκης υπερβατικής εξίσωσης, τεχνικές παλινδρόμησης στις μετρήσεις που έχουν γίνει. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, η εξάρτηση του διαφορικού κέρδους από τους κλιματολογικούς όρους ερευνήθηκε και βρέθηκε αμελητέα, δεδομένου ότι για την ίδια τιμή εξασθένησης, οι τιμές του G_{SD} είναι σχεδόν ίδιες για τις περιοχές με τα διαφορετικά χαρακτηριστικά βροχοπτώσεων. Επίσης, παρατηρηθείσα η υπερεκτίμηση των διαθέσιμων στατιστικών από το πρότυπο μοντέλο των βροχοπυρήνων λήφθηκε υπόψη, με συνέπεια ένα νέο και ακριβέστερο μοντέλο της απλής μορφής της σχέσης (3.1)

$$G_{SD} = G_{Ac} \cdot G_D \cdot G_\theta \cdot G_f \cdot G_\Delta \quad (3.1)$$

όπου G_{Ac} , G_D , G_θ , G_f , G_Δ είναι ο παράγοντας εξάρτησης του διαφορικού κέρδους θέσης από την εξασθένηση απλής πόλωσης A_e (dB), ο παράγοντας που εξαρτάται από την απόσταση των επίγειων σταθμών D (Km), ο παράγοντας που εξαρτάται από την κοινή γωνία ανύψωσης και των δύο ραδιοδρόμων θ (deg), ο παράγοντας που εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας του συστήματος f (GHz) και ο παράγοντας που εξαρτάται από τον προσανατολισμό της βασικής γραμμής μεταξύ των δύο επίγειων σταθμών

Δ (deg) αντίστοιχα [Παναγόπουλος, Κανελλόπουλος, Αράπογλου και Κωττής]^[37].

Η αναλυτική σχέση κάθε παράγοντα της σχέσης (3.1) δίνεται από τη σχέση

$$\begin{cases} G_{Ac} = 8.19 \cdot A_C^{0.0004} + 0.1809 \cdot A_C - 8.2612 \\ G_D = \ln(3.6101 \cdot D) \\ G_\theta = 1.2347 \cdot (1 - \theta^{-0.356}) \\ G_f = \exp(-0.0006 \cdot f) \\ G_\Delta = 1 - 0.0006 \cdot \Delta \end{cases} \quad (3.2)$$

- Μοντέλο εκτίμησης διαφορικού κέρδους τροχιάς G_{OD} όπως και για το μοντέλο της διαφορικής λήψης θέσης, έτσι και εδώ σκοπός είναι η προβολή ενός απλού μοντέλου για τον υπολογισμό του διαφορικού κέρδους τροχιάς. Το μοντέλο που προτείνεται για τον υπολογισμό αυτό αποτελείται στην ουσία από δύο όρους Από το σταθμισμένο κέρδος (BG) και από τον όρο ΔG που αντιπροσωπεύει το διαφορικό περιθώριο που προκύπτει από τους δύο ραδιοδρόμους. Αν το σύστημα είναι σταθμισμένο τότε ο δεύτερος όρος ισούται με το μηδέν. Η σχέση για τον υπολογισμό του διαφορικού κέρδους τροχιάς δίνεται από τη σχέση

$$G_{ODi} = BG_i + \Delta G \quad (3.3)$$

Για το σταθμισμένο κέρδος το οποίο εξαρτάται από τις παραμέτρους του συστήματος έχουμε τη σχέση (3.4)

$$BG_i = G_s(A_{Ci}) \cdot G_f \cdot G_{\phi_i} \quad (3.4)$$

όπου

$$\begin{cases} G_\theta(A_{ci}) = [c_1 \cdot A_{ci} - c_2 \cdot (1 - \exp(-c_3 \cdot A_{ci}))] \cdot [1 - \exp(-(c_4 - c_5 \cdot A_{ci}) \cdot \theta)] \\ G_f = c_6 \cdot f^{-c_7} \\ G_\phi = c_8 \cdot \phi_i^{-c_9} \end{cases} \quad (3.5)$$

με περιορισμούς στις παραμέτρους $1\text{dB} \leq A_{ci} \leq 40\text{dB}$, $1^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, $10^\circ \leq \phi_i \leq 50^\circ$, $10\text{GHz} \leq f \leq 50\text{GHz}$ (συμπεριλαμβάνονται οι ζώνες συχνοτήτων Ku, Ka και V).

Ο παράγοντας ΔG προκύπτει κανονικοποιώντας τις παραμέτρους που δεν συμπεριλαμβάνονται στον παράγοντα BG και δίνεται από τη σχέση

$$\Delta G = c_{10} \cdot A_{ci}^{c_{11}} \cdot (\phi_1 - \phi_2) \cdot f^{c_{12}} \quad (3.6)$$

Το πρόσθετο του παράγοντα ΔG προκύπτει από τη σχέση μεταξύ των γωνιών ανύψωσης. Αν η γωνία ανύψωσης της δεύτερης ζεύξης είναι μεγαλύτερη από

τη γωνία της πρώτης, τότε $\Delta G > 0$ αλλιώς $\Delta G < 0$ [Κανελλόπουλος και Παναγόπουλος, 2001b]^[32].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

4

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

4.1 Γενικά

Από το προηγούμενο εισαγωγικό κεφάλαιο φαίνεται λοιπόν πόσο καθοριστικός είναι ο ρόλος των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων στις δορυφορικές ζεύξεις που λειτουργούν πάνω από τα 10GHz με σημαντικότερη από τις δυσμενείς αυτές επιδράσεις τη βροχής. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα, ερευνητές να προσπαθήσουν να ποσοτικοποιήσουν την απόσβεση που οφείλεται στη βροχή. Στο παρόν κεφάλαιο, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στο θέμα των μοντέλων πρόβλεψης της απόσβεσης λόγω βροχής σε ζεύξεις γης-δορυφόρου και, συγκεκριμένα, στην παρουσίαση του μοντέλου των συνεκτικών βροχοπυρήνων, στο οποίο λαμβάνεται υπόψη η χωρική δομή του μέσου βροχής. Στην ανάλυση εμπλέκεται το μέγεθος της σημειακής έντασης βροχόπτωσης, ο ορισμός και οι ιδιότητες του οποίου θα συζητηθούν εκτενώς στις επόμενες παραγράφους. Σε πρώτη φάση, γίνεται μία περιγραφή του μέσου βροχής τόσο σε επίπεδο σταγόνας βροχής (δηλαδή μικροσκοπικά), όσο και σε επίπεδο συμπεριφοράς του μέσου σε μεγάλη κλίμακα (μακροσκοπικά).

4.2 Περιγραφή του μέσου βροχής

Αρχικά, γίνεται περιγραφή της μικροσκοπικής δομής του μέσου βροχής. Το μέσο βροχής αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό σταγόνων με πεπλατυσμένο σφαιροειδές σχήμα των οποίων η διεύθυνση, το μέγεθος και η θερμοκρασία είναι τυχαίες μεταβλητές. Οι αποστάσεις μεταξύ τους είναι αρκετά μεγάλες συγκρινόμενες με τις διαστάσεις τους. Η βροχόπτωση αποτελεί μια τυχαία χωροχρονική διαδικασία που μπορεί να μελετηθεί μόνο με εφαρμογή στατιστικής ανάλυσης.

Οι Pruppacher και Pitter [1971]^[33] προσδιόρισαν το σχήμα των σταγόνων της βροχής με βάση τις δυνάμεις που δέχονται καθώς πέφτουν με την οριακή ταχύτητα. Οι θεωρητικές αυτές προσεγγίσεις έρχονται σε ικανοποιητική συμφωνία με πειραματικά δεδομένα [Pruppacher and Beard, 1970]^[34]. Οι οριακές ταχύτητες των σταγόνων έχουν υπολογιστεί από τους Gunn και Ginzer [1949]^[35] και έχει αποδειχθεί ότι εξαρτώνται από το μέγεθος τους καθώς και από την πυκνότητα του αέρα.

Η διεύθυνση της σταγόνας επηρεάζεται από δυο παράγοντες: την ένταση και την κατεύθυνση του πνέοντος ανέμου. Η επίδραση του ανέμου έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργείται μια γωνία κλίσης της σταγόνας ως προς την οριζόντιο. Η κατανομή αυτής της γωνίας αποτελεί μια καίρια παράμετρο για την επίδραση της βροχής στην αποπόλωση που εισάγεται στο διαδιδόμενο σήμα.

Μια άλλη ιδιότητα των σταγόνων που παίζει βασικό ρόλο στον υπολογισμό της απόσβεσης είναι η κατανομή του μεγέθους τους. Η κατανομή αυτή έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές, και αντιπροσωπευτικές κατανομές έχουν προταθεί από τους Laws και Parsons [1943]^[36] (προτείνεται από την ITU-R ως σύσταση για τον υπολογισμό των παραμέτρων της ειδικής απόσβεσης), τους Marshal και Palmer [1948]^[37], Ulbrich [1983]^[38] και Ajayi και Olsen [1985]^[39].

Η θερμοκρασία των σταγόνων της βροχής είναι και αυτή μια σημαντική παράμετρος στον υπολογισμό της απόσβεσης. Έχει αποδειχθεί ότι για συχνότητες πάνω από 15GHz η θερμοκρασία στην εξασθένηση έχει μικρή επίδραση στην εξασθένηση, ενώ στην περιοχή συχνοτήτων 11-14GHz η απόσβεση είναι πολύ ευαίσθητη σε μεταβολές της θερμοκρασίας [Olsen et al, 1978]^[40] [Upton et al, 1980]^[41] [Thompson et al, 1980]^[42].

Το πιο δύσκολο όμως πρόβλημα που αναφέρεται στον υπολογισμό της απόσβεσης είναι η αναλυτική περιγραφή της χωρικής κατανομής της βροχής.

Μετρήσεις με ραντάρ έδειξαν ότι η βροχή αποτελείται από μεγάλες περιοχές με χαμηλό ρυθμό βροχόπτωσης και από ένα αριθμό μικρότερων περιοχών με μεγάλο ρυθμό βροχόπτωσης (οι λεγόμενοι βροχοπυρήνες, δημιουργούν και τα περισσότερα προβλήματα στον υπολογισμό της απόσβεσης).

Η έκταση των βροχοπυρήνων εξαρτάται από την περιοχή που σχηματίζονται και φθάνει μέχρι δεκάδες χιλιόμετρα. Για ασθενείς βροχοπτώσεις (κάτω από 10-14 mm/hr) η βροχή εμφανίζεται χωρικά ομοιόμορφη [Stutzman and Dishman, 1982]^[43], [Sweeney and Bostonian, 1992]^[44]. Από την άλλη μεριά, μετρήσεις με ραντάρ στο κατακόρυφο επίπεδο έδειξαν ότι η βροχή είναι προσεγγιστικά ομοιόμορφη ανεξάρτητα από τον ρυθμό βροχόπτωσης [Stutzman and Dishman, 1982]^[43]. Το μέσο ύψος βροχής εξαρτάται γενικά από την τιμή της έντασης βροχόπτωσης και από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής.

4.3 Ορισμός της ειδικής απόσβεσης

Με αίτιο τη βροχή σε μία δορυφορική ζεύξη, μετά την εύρεση της κατανομής της σημειακής έντασης βροχόπτωσης, στόχος είναι ο υπολογισμός της ειδικής απόσβεσης. Η ειδική απόσβεση A_o (σε dB/km) ορίζεται ως η εξασθένιση ανά μονάδα μήκους που υφίσταται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα από ένα χωρικά ομοιογενές μέσο βροχής και συνδέεται με την ένταση βροχόπτωσης R μέσω της σχέσης (4.1)

$$A_o = a \cdot R^b \quad (4.1)$$

Απλουστευμένα, η σπουδαιότητα της σχέσης αυτής έγκειται στο ότι αποτελεί το συνδετικό κρίκο ανάμεσα στη βροχόπτωση και την απόσβεση, επιτρέποντας έτσι η ανάλυση να περάσει από το επίπεδο της κατανομής της βροχόπτωσης στο επίπεδο της κατανομής της απόσβεσης. Οι παράγοντες a , b που εμπλέκονται στον υπολογισμό της ειδικής απόσβεσης εξαρτώνται από τη ραδιοσυχνότητα λειτουργίας f του δορυφορικού συστήματος, τη γωνία πόλωσης τ του ραδιοκύματος ως προς τον ορίζοντα ($\tau=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ για οριζόντια, κυκλική και κατακόρυφη πόλωση αντίστοιχα), τη γωνία ανύψωσης ϕ του ραδιοβήματος και τέλος, από τη μικροσκοπική δομή του μέσου βροχής. Η αναλυτική έκφραση των παραγόντων αυτών είναι

$$a = \frac{a_H + a_V + (a_H - a_V) \cdot \cos^2 \phi \cdot \cos 2\tau}{2} \quad (4.2.a)$$

$$b = \frac{a_H b_H + a_V b_V + (a_H b_H - a_V b_V) \cdot \cos^2 \phi \cdot \cos 2\tau}{2a} \quad (4.2.b)$$

Οι συντελεστές a_H , b_H και a_V , b_V αποτελούν τις οριακές περιπτώσεις των a , b , όταν το κύμα που ακτινοβολείται από την κεραία του επίγειου σταθμού ή του δορυφόρου έχει οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση αντίστοιχα. Υπολογίζονται με τη σειρά τους από τις σχέσεις που ακολουθούν, για ραδιοσυχνότητες f από 10 έως 30GHz.

$$\left. \begin{aligned} a_H &= 2.1114 \cdot 10^{-5} \cdot f^{2.71896} \\ a_V &= 1.6953 \cdot 10^{-5} \cdot f^{2.76183} \\ b_H &= 1.79764 - 0.23202 \cdot \ln f \\ b_V &= 1.8376 - 0.25536 \cdot \ln f \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

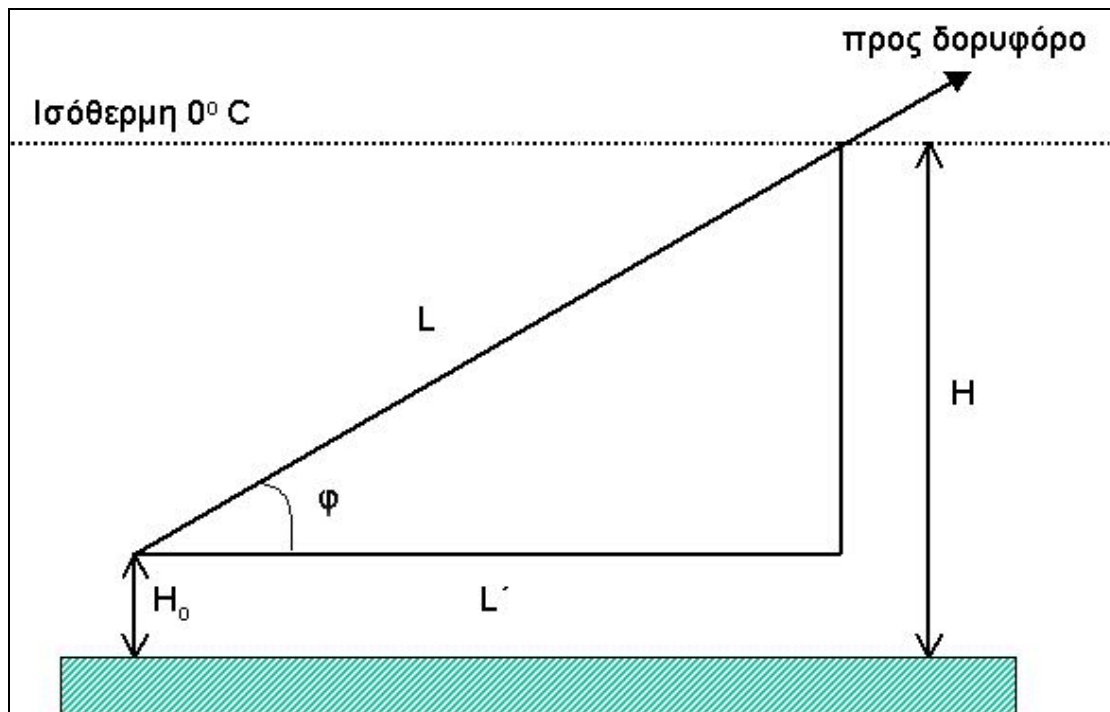
Στις σχέσεις (4.3) έχει ληφθεί υπόψη η μικροσκοπική δομή του μέσου βροχής, μέσω των υποθέσεων ότι η σταγόνα βροχής έχει σφαιρικό σχήμα, κατανομή μεγέθους που ακολουθεί την κατανομή των Laws και Parsons [Laws & Parsons, 1943]^[36] και μέσω επιπρόσθετων παραδοχών για το δείκτη διάθλασης, την οριακή ταχύτητα και τις διαστάσεις των σταγόνων. Οι προαναφερθείσες παραδοχές μπορεί να ειπωθεί ότι προσεγγίζουν καλύτερα τις ιδιότητες της σταγόνας βροχής σε εύκρατα κλίματα. Ασφαλώς, οι εκφράσεις αυτές δεν είναι ο μοναδικός τρόπος ώστε να ληφθεί υπόψη η μικροσκοπική δομή της βροχής. Αντίθετα, το ζήτημα του υπολογισμού των συντελεστών a_H , b_H και a_V , b_V είναι ανοικτό σε βελτιώσεις και προς την κατεύθυνση αυτή σημαντική συνεισφορά αναμένεται να έχουν μετρήσεις βροχής μεγαλύτερης αξιοπιστίας και αποτελεσματικότερες μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων σκέδασης.

Οι διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα διάφορα μοντέλα ξεκινούν από το σημείο των υποθέσεων που γίνονται για τη χωρική δομή της βροχής. Έτσι, για παράδειγμα, αν θεωρηθεί ότι η βροχή είναι χωρικά ομοιογενής (δηλαδή στρωσιγενούς τύπου, στην πράξη δηλαδή μιλάμε για βροχή συνεκτικού τύπου η οποία χαρακτηρίζεται από μεγάλη χωρική ανομοιογένεια εντός των βροχοπυρήνων) η συνολική απόσβεση A που εισάγεται σε μήκος L της ζεύξης υπό βροχή προκύπτει πολύ απλά από το γινόμενο του A_o επί το L .

$$A = a \cdot R^b \cdot L \quad (4.4)$$

4.4 Γεωμετρία δορυφορικής ζεύξης και ενεργό ύψος βροχής

Η πρόσθετη δυσκολία που υπάρχει στις δορυφορικές σε σχέση με τις επίγειες μικροκυματικές ζεύξεις είναι η ανάγκη να περιγραφεί χωρικά η δομή της βροχής εκτός από το οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο. Η κατακόρυφη δομή του μέσου βροχής χαρακτηρίζεται από δύο περιοχές. Η άνω περιοχή αποτελείται από ένα μίγμα παγοκρυστάλλων και χιονιού και δεν συνεισφέρει σημαντικά στην απόσβεση του σήματος για συχνότητες μικρότερες των 60GHz. Στην κάτω περιοχή εμφανίζεται κυρίως η βροχόπτωση που είναι η κυριότερη αιτία απόσβεσης του δορυφορικού σήματος. Επομένως, γίνεται η υπόθεση ότι το σήμα εξασθενεί λόγω βροχής μόνο κατά το τμήμα της διαδρομής που βρίσκεται στην κάτω περιοχή. Το όριο μετάβασης μεταξύ των δύο περιοχών αντιστοιχεί κατά προσέγγιση στο υψόμετρο της ισόθερμης των 0°C και καλείται ενεργό ύψος βροχής [ITU-R, P. 839-3, 2001]^[45]. Η σχηματική παράσταση μιας δορυφορικής ζεύξεως φαίνεται στο σχήμα 4.1, όπου H_0 είναι το ύψος του επίγειου σταθμού ως προς το επίπεδο της θάλασσας, H είναι το μέσο ύψος της ισόθερμης των 0°C και φ η γωνία ανύψωσης του ραδιοδρόμου.



Σχήμα 4.1: Ενεργό μήκος δορυφορικής ζεύξης για $\varphi \geq 10^{\circ}$.

Η μέση εποχιακή τιμή του υψομέτρου H της ισόθερμης 0°C εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της υπό μελέτη τοποθεσίας και προσδιορίζεται προσεγγιστικά σε Km από την εξής σχέση [Crane, 1980]^[46]

$$H = \begin{cases} 4.8 & , |A| \leq 30^{\circ} \\ 7.8 - 0.1 \cdot |A| & , |A| > 30^{\circ} \end{cases} \quad (4.7)$$

όπου A είναι το γεωγραφικό πλάτος σε μοίρες.

Το μήκος του υπό κλίση τμήματος της διαδρομής, που βρίσκεται στην κάτω περιοχή, ονομάζεται ενεργό μήκος.

Όταν η γωνία ανύψωσης φ του ραδιοβήματος είναι μεγαλύτερη των 10° , τότε ισχύει η γεωμετρία του σχήματος 4.1. Τόσο η επιφάνεια της γης, όσο και η επιφάνεια που ορίζει η ισόθερμη των 0°C θεωρούνται επίπεδα, οπότε

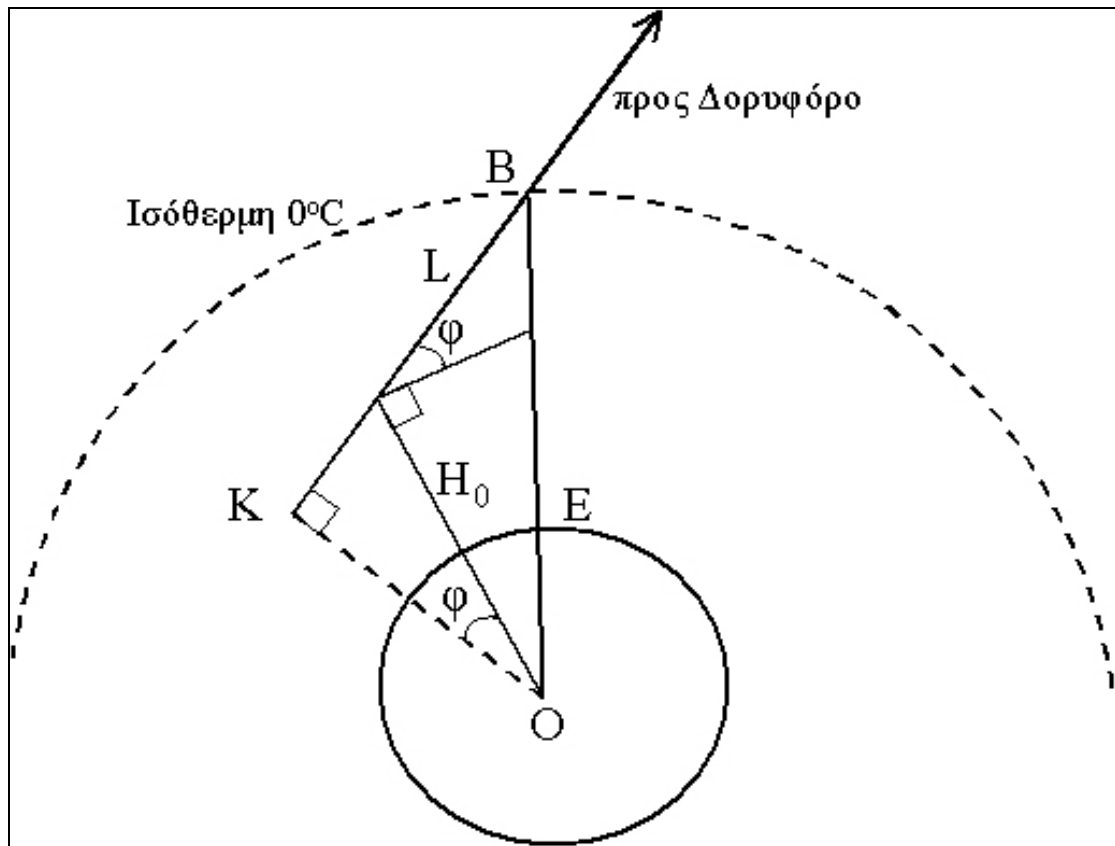
$$L = \frac{H - H_0}{\sin \varphi} \quad (4.8)$$

όπου το μέγεθος H , δίνεται από τη σχέση (4.7).

Όταν η γωνία ανύψωσης φ του ραδιοβήματος είναι μικρότερη ή ίση των 10° , τότε οι ανωτέρω επιφάνειες πρέπει να ληφθούν σφαιρικές με ακτίνες E και $E+H$ αντίστοιχα. Στην προκειμένη περίπτωση ισχύει η γεωμετρία του σχήματος 4.2.

Από το ορθογώνιο τρίγωνο OKB, ισχύει

$$\begin{aligned} (KB)^2 + (OK)^2 &= (OB)^2 \Leftrightarrow \\ [L + (E + H_0)\sin \varphi]^2 + [(E + H_0)\cos \varphi]^2 &= (E + H)^2 \Leftrightarrow \\ L &= \left\{ (E + H)^2 - [(E + H_0)\cos \varphi]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} - (E + H_0)\sin \varphi \end{aligned} \quad (4.9)$$



Σχήμα 4.2: Ενεργό μήκος δορυφορικής ζεύξης για $\varphi \leq 10^\circ$.

Οι τελικές σχέσεις για το μήκος του ραδιοδρόμου είναι

$$L = \frac{H - H_o}{\sin \varphi} \quad \varphi \geq 10^\circ \quad (4.10)$$

$$L = \left[(E + H)^2 - (E + H_o)^2 \cos^2 \varphi \right]^{1/2} - (E + H_o) \sin \varphi \quad \varphi < 10^\circ \quad (4.11)$$

όπου E είναι η μέση ακτίνα της γης (6378Km).

4.5 Χωρική μεταβολή της βροχής στο κατακόρυφο επίπεδο

Ο Crane [1980]^[46] έχει προτείνει μια απλουστευμένη θεώρηση της κατακόρυφης μεταβολής της δομής του μέσου βροχής. Σύμφωνα με αυτή, η κατανομή της βροχής στο κατακόρυφο επίπεδο θεωρείται ομοιόμορφη με αποτέλεσμα η απόσβεση λόγω βροχής κατά μήκος του κεκλιμένου ραδιοδρόμου, που έχει μήκος L , σχετίζεται με την αντίστοιχη απόσβεση κατά μήκος της υποθετικής επίγειας ζεύξης, που προκύπτει από την προβολή του συγκεκριμένου ραδιοδρόμου στο οριζόντιο επίπεδο και έχει μήκος L' όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1.

Η σχέση που συνδέει την εισαγόμενη απόσβεση λόγω βροχής κατά μήκος του κεκλιμένου ραδιοδρόμου (συμβολίζεται με A) και αυτή κατά μήκος της προβολής του ραδιοδρόμου στο οριζόντιο επίπεδο (συμβολίζεται με A') είναι

$$A' = A \cos \varphi \quad (4.12)$$

Από την ανωτέρω σχέση συνεπάγεται ότι ο υπολογισμός της πιθανότητας υπέρβασης μιας στάθμης περιθωρίου x , που αφορά την απόσβεση στον κεκλιμένο ραδιοδρόμο, μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση

$$P[A \geq x] = P[A' \geq x \cdot \cos \varphi] \quad (4.13)$$

4.6 Μοντέλο λογαριθμοκανονικής κατανομής

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, οι κατανομές της σημειακής έντασης βροχόπτωσης R καθώς και της απόσβεσης A' προσεγγίζονται ικανοποιητικά με τη λογαριθμοκανονική κατανομή. Οπότε η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της R δίνεται από τη σχέση

$$f_R(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot S_r} \cdot \frac{1}{R} \cdot \exp\left(-\left(\frac{\ln R - \ln R_m}{\sqrt{2} \cdot S_r}\right)^2\right) \quad (4.14)$$

όπου R_m και S_r είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του $\ln R$. Διευκρινίζεται ότι η κατανομή αυτή αναφέρεται για όλες τις χρονικές στιγμές (βροχόπτωσης και μη). Η λογαριθμοκανονική κατανομή η οποία έχει προταθεί αρχικά από τον Lin [1975]^[47], αναφέρεται μόνο στις χρονικές στιγμές που υπάρχει βροχή. Σαν συνέπεια όμως στον υπολογισμό της απόσβεσης υπεισέρχονται οι πιθανότητες $P(0)$ και $P(L)$ (πιθανότητα

σημειακής βροχόπτωσης και πιθανότητα βροχόπτωσης κατά μήκος της διόδου της ζεύξης) οι οποίες είναι αρκετά δύσκολο να μετρηθούν. Επιπλέον η επέκταση της σε προβλήματα διαφορικής λήψης είναι εξαιρετικά δύσκολο να πραγματοποιηθεί. Για αυτό τον λόγο κρίθηκε σκόπιμη η τροποποίηση της συγκεκριμένης κατανομής. Η κατανομή χωρίς συνθήκη βροχής ισχύει από μια ελάχιστη τιμή της σημειακής έντασης βροχόπτωσης και πάνω γιατί για πολύ μικρές εντάσεις βροχόπτωσης οδηγεί σε υπερεκτίμηση της πιθανότητας υπέρβασης. Το γεγονός αυτό δεν είναι ουσιαστικό μειονέκτημα γιατί οι χαμηλές εντάσεις βροχόπτωσης δεν έχουν σχεδόν κανένα πρακτικό ενδιαφέρον στην ανάλυση της οριακής συμπεριφοράς ενός συστήματος που υποφέρει από διαλείψεις λόγω βροχής.

Χρειάζεται ο υπολογισμός των παραμέτρων A_m και S_a της κατανομής της απόσβεσης A' που αφορά την υποθετική επίγεια ζεύξη μήκους L' . Αρχικά υπολογίζεται η μέση τιμή μ_a και η τυπική απόκλιση σ_a της τ.μ. A'

$$\mu_a = E[A'] = \int_0^{L'} a \cdot E[R^b(z)] \cdot dz = a \cdot E[R^b] \cdot L' \quad (4.15)$$

$$\sigma_a^2 = E[A'^2] - \mu_a^2 = E \left[\int_0^{L'} a \cdot R^b(z) \cdot dz \cdot \int_0^{L'} a \cdot R^b(z') \cdot dz' \right] - \mu_a^2 \Rightarrow$$

$$\sigma_a^2 = \int_0^{L'} \int_0^{L'} a^2 \cdot E[R^b(z) \cdot R^b(z')] \cdot dz \cdot dz' - \mu_a^2 \quad (4.16)$$

Στο σημείο αυτό ορίζεται ο σημειακός συντελεστής συσχέτισης ρ , ανάμεσα στις ειδικές αποσβέσεις $A'_o(z)$ και $A'_o(z')$, που περιγράφει την οριζόντια μεταβολή της χωρικής δομής της βροχής

$$\rho(z, z') = \frac{E[R^b(z) \cdot R^b(z')] - (E[R^b])^2}{E[(R^b)^2] - (E[R^b])^2} \quad (4.17)$$

Από τους τύπους (4.15), (4.16) και (4.17) ισχύει

$$\sigma_a^2 = a^2 \cdot \left\{ E[(R^b)^2] - (E[R^b])^2 \right\} \cdot H_1 \quad (4.18)$$

όπου

$$H_1 = \int_0^{L'} \int_0^{L'} \rho(z, z') \cdot dz \cdot dz' \quad (4.19)$$

Από τη σχέση (A.2) του Παραρτήματος Α, για $\kappa=b$ και $\kappa=2b$ ισχύει αντίστοιχα

$$E[R^b] = \exp\left[b \cdot R_m + \frac{b^2 \cdot S_r^2}{2}\right] \quad (4.20)$$

$$E[R^{2b}] = \exp[2b \cdot R_m + 2b^2 \cdot S_r^2] \quad (4.21)$$

Με αντικατάσταση των (4.20) και (4.21) στις (4.15) και (4.18) ισχύει

$$\mu_a = a \cdot \exp\left[b \cdot R_m + \frac{b^2 \cdot S_r^2}{2}\right] \cdot L' \quad (4.22)$$

$$\sigma_a^2 = a^2 \cdot \exp(2b \cdot R_m + b^2 \cdot S_r^2) \cdot [\exp(b^2 \cdot S_r^2) - 1] \cdot H_1 \quad (4.23)$$

Το διπλό ολοκλήρωμα H_1 υπολογίζεται αναλυτικά στο Παράρτημα Γ, χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές ημιεμπειρικές εκφράσεις του σημειακού συντελεστή συσχέτισης ρ

- Την προτεινόμενη έκφραση από τον Lin [1975]^[47] που έχει εφαρμογή για περιοχές της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής.
- Την προτεινόμενη έκφραση από τους Morita και Higuti [1976]^[48] που έχει εφαρμογή για περιοχές της Ιαπωνίας και γενικά υποτροπικές και τροπικές περιοχές.

Με αντικατάσταση των σχέσεων (4.22) και (4.23) στις σχέσεις (A.3) και (A.4) του Παραρτήματος Α, εξάγονται οι σχέσεις υπολογισμού των παραμέτρων A_m , S_a της κατανομής της απόσβεσης A'

$$S_a^2 = \ln \left\{ 1 + [\exp(b^2 \cdot S_r^2) - 1] \cdot \frac{H_1}{L'^2} \right\} \quad (4.24)$$

$$A_m = a \cdot R_m^b \cdot L' \cdot \exp\left(\frac{b^2 \cdot S_r^2 - S_a^2}{2}\right) \quad (4.25)$$

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας υπέρβασης της απόσβεσης κάποιας στάθμης x dB χρησιμοποιείται η σχέση (A.5) του Παραρτήματος Α

$$P[A' \geq x] = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{\ln x - \ln A_m}{\sqrt{2} \cdot S_a} \right] \quad (4.26)$$

όπου $\operatorname{erfc}(\)$, η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος (error complementary function).

$$P[R \geq r] = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{\ln r - \ln R_m}{\sqrt{2} \cdot S_r} \right]$$

4.7 Μοντέλο γάμμα κατανομής

Σύμφωνα με το μοντέλο των Morita και Higuti [1976]^[48] οι κατανομές της σημειακής έντασης βροχόπτωσης καθώς και της απόσβεσης A προσεγγίζονται με ικανοποιητική ακρίβεια από την γάμμα κατανομή για περιοχές της Ιαπωνίας και γενικά υποτροπικές και τροπικές περιοχές. Η κατανομή αυτή αναφέρεται επίσης σε όλες τις χρονικές στιγμές (βροχής και μη). Η διαδικασία που ακολουθείται για την εκτίμηση των παραμέτρων ν_a και β_a της απόσβεσης A είναι εντελώς ανάλογη με την αντίστοιχη που αναφέρθηκε στο λογαριθμοκανονικό μοντέλο.

Η μόνη διαφορά υπάρχει στο σημειακό συντελεστή συσχέτισης ρ_o μεταξύ των μεταβλητών $R^b(z)$ και $R^b(z')$ που βρίσκονται σε απόσταση $\Delta z = |z - z'|$. Για τον συντελεστή αυτόν χρησιμοποιείται η ακόλουθη έκφραση που έχει προταθεί από τους Morita και Higuti [1976]^[48]

$$\rho_o(\Delta z) = \exp(-\alpha_s \cdot \sqrt{\Delta z}) \quad (4.27)$$

όπου α_s μια σταθερά που εξαρτάται από τον συγκεκριμένο τόπο και με τιμές στην περιοχή από 0.2 μέχρι 0.3 Km^{-1/2}.

Το διπλό ολοκλήρωμα

$$H_1 = \int_0^{L'} \int_0^{L'} \rho_o(|z - z'|) \cdot dz \cdot dz' \quad (4.28)$$

μπορεί να μετατραπεί πάλι σε απλό και να υπολογιστεί αναλυτικά, όπως φαίνεται στο Παράρτημα Γ. Ισχύει τελικά η παρακάτω αναλυτική σχέση

$$H_1 = 4 \cdot \frac{(\alpha_s^2 \cdot L' - 6 + 2 \cdot (3 + 3 \cdot \alpha_s \cdot \sqrt{L'} + \alpha_s^2 \cdot L') \cdot \exp(-\alpha_s \cdot \sqrt{L'}))}{\alpha_s^4} \quad (4.29)$$

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που αναφέρθηκε προηγουμένως μπορεί να υπολογιστεί κατόπιν η μέση τιμή μ_a και η τυπική απόκλιση σ_a της απόσβεσης A .

Ισχύει λοιπόν

$$\mu_a = a \cdot E[R^b] \cdot L' \quad (4.30)$$

και

$$\sigma_a^2 = a^2 \cdot \left\{ E[(R^b)^2] - (E(R^b))^2 \right\} \cdot H_1 \quad (4.31)$$

Κάνοντας χρήση του τύπου (B-3) του Παραρτήματος Β για $\kappa=b$ και $\kappa=2b$ αντίστοιχα ισχύουν οι εκφράσεις

$$E[R^b] = \frac{\Gamma(v_R + b)}{\beta_R^b \cdot \Gamma(v_R)} \quad (4.32)$$

$$E[R^{2b}] = \frac{\Gamma(v_R + 2b)}{\beta_R^{2b} \cdot \Gamma(v_R)} \quad (4.33)$$

όπου v_R και β_R οι παράμετροι της κατανομής της σημειακής έντασης βροχόπτωσης, οι οποίες θεωρούνται σταθερές σε όλη την περιοχή της ζεύξης. Αντικατάσταση των (4.32) και (4.33) στις (4.30) και (4.31) δίνει

$$\mu_a = a \cdot \frac{\Gamma(v_R + b)}{\beta_R^b \cdot \Gamma(v_R)} \cdot L' \quad (4.34)$$

$$\sigma_a^2 = \frac{a^2 \cdot H_1}{\beta_R^{2b} \cdot \Gamma^2(v_R)} \cdot (\Gamma(v_R) \cdot \Gamma(v_R + 2b) - \Gamma^2(v_R + b)) \quad (4.35)$$

Αντικατάσταση των τύπων (4.34) και (4.35) στους τύπους (B.4) και (B.5) του Παραρτήματος Β δίνει τις παραμέτρους v_a και β_a της κατανομής της απόσβεσης A .

$$v_a = \frac{L^2}{H_1} \cdot \frac{\Gamma^2(v_R + b)}{(\Gamma(v_R) \cdot \Gamma(v_R + 2b) - \Gamma^2(v_R + b))} \quad (4.36)$$

$$\beta_a = \frac{\beta_R^b \cdot L'}{a \cdot H_1} \cdot \frac{\Gamma(v_R) \cdot \Gamma(v_R + b)}{(\Gamma(v_R) \cdot \Gamma(v_R + 2b) - \Gamma^2(v_R + b))} \quad (4.37)$$

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας υπέρβασης της απόσβεσης κάποιας στάθμης x dB με χρήση του τύπου (B.7) του Παραρτήματος Β ισχύει

$$P[A' \geq x] = 1 - \frac{\gamma(v_a, \beta_a \cdot x)}{\Gamma(v_a)} \quad (4.38)$$

όπου $\gamma()$ η ατελής γάμμα συνάρτηση (incomplete gamma function).

4.8 Μοντέλο Weibull κατανομής

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, οι κατανομές της σημειακής έντασης βροχόπτωσης R καθώς και της απόσβεσης A' προσεγγίζονται ικανοποιητικά χρησιμοποιώντας τη Weibull κατανομή.

Αρχικά θα γίνει ο υπολογισμός της μέσης τιμής και της διακύμανσης και στόχος είναι βήμα προς βήμα η ανάλυση να καταλήξει στις βασικές παραμέτρους του μοντέλου κατανομής Weibull. Έστω X τυχαία μεταβλητή (τ.μ.) η οποία ακολουθεί την κατανομή Weibull. Η συνάρτηση πυκνότητας της πιθανότητας δίνεται από τον τύπο

$$f_X(x) = wx^{m-1}e^{-wx^m}, x > 0 \quad (4.39)$$

Η μέση τιμή της τ.μ. X^k , όπου k πραγματικός αριθμός είναι

$$E\{x^k\} = \int_0^{+\infty} x^k f_X(x) dx = \int_0^{+\infty} x^k wx^{m-1} e^{-wx^m} dx = \int_0^{+\infty} wx^{k+m-1} e^{-wx^m} dx$$

Τίθεται $wx^m = z$, και ισοδύναμα θα ισχύει

$$\begin{aligned} E\{x^k\} &= \int_0^{+\infty} wm \left(\frac{z}{w}\right)^{\frac{k+m-1}{m}} \frac{1}{wm} \left(\frac{z}{w}\right)^{\frac{1-m}{m}} e^{-z} dz = \int_0^{+\infty} \left(\frac{z}{w}\right)^{\frac{k+m-1+1-m}{m}} e^{-z} dz = \int_0^{+\infty} \left(\frac{z}{w}\right)^{\frac{k}{m}} e^{-z} dz \\ &= w^{-\frac{k}{m}} \int_0^{+\infty} z^{\frac{k}{m}} e^{-z} dz \Rightarrow \\ E\{x^k\} &= w^{-\frac{k}{m}} \cdot \Gamma\left(\frac{k}{m} + 1\right) \end{aligned} \quad (4.40)$$

$$\text{Συνεπώς} \begin{cases} E\{x\} = w^{-\frac{1}{m}} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right) \\ E\{x^2\} = w^{-\frac{2}{m}} \cdot \Gamma\left(\frac{2}{m} + 1\right) \end{cases} \quad (4.41)$$

Από τη σχέση (4.40), συμπεραίνεται ότι η διακύμανση $V(X)$ της τ.μ. X θα ισούται με

$$V(x) = E\{x^2\} - E^2\{x\} \Leftrightarrow V(x) = w^{-\frac{2}{m}} \cdot \left[\Gamma\left(\frac{2}{m} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{m} + 1\right) \right] \quad (4.42)$$

Στη συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός της πιθανότητας υπέρβασης. Έστω X τυχαία μεταβλητή (τ.μ.) η οποία ακολουθεί την κατανομή Weibull. Θα υπολογιστεί η πιθανότητα υπέρβασης μιας στάθμης x

$$P(X > x) = \int_x^{+\infty} f(t) dt = \int_x^{+\infty} w m t^{m-1} e^{-w t^m} dt ,$$

$$\text{Τίθεται } z = w t^m \Rightarrow t = \left(\frac{z}{w}\right)^{\frac{1}{m}}, \quad \frac{dt}{dz} = \frac{1}{w m} \cdot \left(\frac{z}{w}\right)^{\frac{1-m}{m}} \text{ και ισοδύναμα θα ισχύει}$$

$$\Rightarrow P(X > x) = \int_{w x^m}^{+\infty} w m \left(\frac{z}{w}\right)^{\frac{m-1}{m}} \frac{1}{w m} \left(\frac{z}{w}\right)^{\frac{1-m}{m}} e^{-z} dz = \int_{w x^m}^{+\infty} e^{-z} dz$$

$$\Rightarrow P(X > x) = e^{-w x^m}, \quad x > 0. \quad (4.43)$$

Γίνεται η θεώρηση ότι η σημειακή ένταση βροχόπτωσης R καθώς και η προκαλούμενη, από αυτή, απόσβεση A' για την υποθετική επίγεια ζεύξη μήκους L' ακολουθούν Weibull κατανομή. Οι παράμετροι w και m της κατανομής της βροχόπτωσης θεωρούνται γνωστοί (έχουν προκύψει είτε από τεχνικές παλινδρόμησης σε πειραματικά δεδομένα εφόσον αυτά είναι διαθέσιμα, είτε από κατάλληλο πρόγραμμα της ITU-R για το αντίστοιχο πλάτος και μήκος του γεωγραφικού τόπου). Επίσης για την ειδική απόσβεση A_0 θα ισχύει

$$A_0 = a R^b \quad (4.44)$$

όπου a και b είναι οι παράμετροι κατά ITU-R (εξαρτώνται από τη συχνότητα, το είδος της πόλωσης και τη μικροσκοπική δομή του μέσου βροχής) που έχουν οριστεί στην παράγραφο 4.3. Επιπλέον

$$A' = \int_0^{L'} A_0 dl \Rightarrow E\{A'\} = E\left\{\int_0^{L'} A_0 dl\right\} = \int_0^{L'} E\{A_0\} dl = \int_0^{L'} E\{a R^b\} dl \quad (4.45)$$

Αντικαθίσταται το $E\{R^b\}$ από τη σχέση (4.40) και ισχύει

$$E\{A'\} = \int_0^{L'} a w \frac{b}{m} \cdot \Gamma\left(\frac{b}{m} + 1\right) dl \Rightarrow E\{A'\} = a w \frac{b}{m} \cdot \Gamma\left(\frac{b}{m} + 1\right) L' \quad (4.46)$$

όπου w και m είναι οι Weibull παράμετροι της σημειακής έντασης βροχόπτωσης.

Εφόσον η απόσβεση A' ακολουθεί επίσης την Weibull κατανομή, θα υπάρχουν w_1 , m_1 ώστε να ισχύει

$$E\{A'\} = w_1^{\frac{1}{m_1}} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{m_1} + 1\right) \quad (4.47)$$

Στη συνέχεια θα υπολογιστεί το $E\{A'^2\}$

$$E\{A'^2\} = E\left\{\int_0^{L'} \int_0^{L'} A_{01}(l) A'_{01}(l') dl dl'\right\} = \int_0^{L'} \int_0^{L'} E\{A_{01} A'_{01}\} dl dl' \quad (4.48)$$

Στο σημείο αυτό ορίζεται ο σημειακός συντελεστής αυτοσυσχέτισης ρ ανάμεσα στις ειδικές αποσβέσεις A_{0l} και A'_{0l}

$$\rho(A_{0l}, A'_{0l}) = \frac{E\{A_{0l}A'_{0l}\} - E\{A_{0l}\}E\{A'_{0l}\}}{\sqrt{V(A_{0l})} \cdot \sqrt{V(A'_{0l})}} \quad (4.49)$$

Αν A_{0l}, A'_{0l} είναι ισόνομες τότε ισοδύναμα ισχύει

$$E\{A'^2\} = \int_0^{L'} \int_0^{L'} [\rho(A_{0l}, A'_{0l}) \cdot V(A_0) + E^2\{A_0\}] dl dl' = V(A_0) \cdot H_1 + E^2\{A_0\} L^2 \quad (4.50)$$

$$\text{όπου } H_1 = \int_0^{L'} \int_0^{L'} \rho(A_{0l}, A'_{0l}) dl dl' \quad (4.51)$$

Η σχέση (4.50) ισοδύναμα γράφεται

$$\Rightarrow E\{A'^2\} - E^2\{A_0\} L^2 = V(A_0) \cdot H_1 \Leftrightarrow E\{A'^2\} - E^2\{A'\} = V(A_0) \cdot H_1 \quad (4.52)$$

Η σχέση (4.52) εκφράζει τη διακύμανση της τ.μ. A' , δηλαδή

$$\Rightarrow V(A) = V(A_0) \cdot H_1 \quad (4.53)$$

Από τις (4.46) και (4.47), θα ισχύει

$$w_1^{-\frac{1}{m_1}} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{m_1} + 1\right) = a w^{-\frac{b}{m}} \cdot \Gamma\left(\frac{b}{m} + 1\right) L' \quad (4.54)$$

Εφόσον το A' ακολουθεί τη κατανομή Weibull, τότε από τη σχέση (4.42) είναι γνωστό το $V(A')$. Άρα η (4.53) ισοδύναμα γράφεται

$$w_1^{-\frac{2}{m_1}} \cdot \left[\Gamma\left(\frac{2}{m_1} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{m_1} + 1\right) \right] = V(A_0) \cdot H_1 \quad (4.55)$$

Επιπλέον, ισχύει

$$\begin{aligned} V(A_0) &= V(aR^b) = a^2 V(R^b) = a^2 [E\{R^{2b}\} - E^2\{R^b\}] \Leftrightarrow \\ V(A_0) &= a^2 a^{-\frac{2b}{m}} \left[\Gamma\left(\frac{2b}{m} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{b}{m} + 1\right) \right] \end{aligned} \quad (4.56)$$

Από τις σχέσεις (4.55) και (4.56) έπεται ότι

$$w_1^{-\frac{2}{m_1}} \cdot \left[\Gamma\left(\frac{2}{m_1} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{m_1} + 1\right) \right] = H_1 a^2 w^{-\frac{2b}{m}} \left[\Gamma\left(\frac{2b}{m} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{b}{m} + 1\right) \right] \quad (4.57)$$

Οι σχέσεις (4.54) και (4.57) αποτελούν σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων προσδιορισμού των w_l και m_l . Εν συνεχεία θα επιλυθεί το ανωτέρω σύστημα.

Τίθεται $x = \frac{b}{m}$ και $y = a w^{-\frac{b}{m}} = a w^{-x}$. Ισοδύναμα το σύστημα γράφεται

$$\begin{cases} w_1^{\frac{1}{m_1}} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{m_1} + 1\right) = y \cdot \Gamma(x+1) L' \\ w_1^{\frac{2}{m_1}} \cdot \left[\Gamma\left(\frac{2}{m_1} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{m_1} + 1\right) \right] = H_1 y^2 \left[\Gamma(2x+1) - \Gamma^2(x+1) \right] \end{cases}$$

Αντικαθίσταται το α_l της πρώτης σχέσης στη δεύτερη και ισχύει

$$\begin{aligned} \frac{y^2 \cdot \Gamma^2(x+1) L^2}{\Gamma^2\left(\frac{1}{m_1} + 1\right)} \cdot \left[\Gamma\left(\frac{2}{m_1} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{m_1} + 1\right) \right] &= H_1 y^2 \left[\Gamma(2x+1) - \Gamma^2(x+1) \right] \Leftrightarrow \\ \frac{\Gamma\left(\frac{2}{m_1} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{m_1} + 1\right)}{\Gamma^2\left(\frac{1}{m_1} + 1\right)} &= \frac{H_1 \Gamma(2x+1) - H_1 \Gamma^2(x+1)}{\Gamma^2(x+1) L^2} \Leftrightarrow \\ \frac{\Gamma\left(\frac{2}{m_1} + 1\right)}{\Gamma^2\left(\frac{1}{m_1} + 1\right)} &= \frac{H_1 \Gamma(2x+1) - (H_1 - L^2) \Gamma^2(x+1)}{\Gamma^2(x+1) L^2} \end{aligned} \quad (4.58)$$

Από την αριθμητική επίλυση της υπερβατικής εξίσωσης (4.58) υπολογίζεται το m_l .

Επιπλέον

$$\begin{aligned} \Rightarrow w_1^{\frac{1}{m_1}} &= \frac{y \cdot \Gamma(x+1) L'}{\Gamma\left(\frac{1}{m_1} + 1\right)} \Rightarrow -\frac{1}{m_1} \cdot \ln w_1 = \ln \left(\frac{y \cdot \Gamma(x+1) L'}{\Gamma\left(\frac{1}{m_1} + 1\right)} \right) \Rightarrow \\ w_1 &= \exp \left\{ -m_1 \cdot \ln \left(\frac{y \cdot \Gamma(x+1) L'}{\Gamma\left(\frac{1}{m_1} + 1\right)} \right) \right\} \end{aligned} \quad (4.59)$$

Με αντικατάσταση του m_l στην σχέση (4.59) υπολογίζεται τέλος το w_l . Οι παράμετροι αυτοί είναι οι βασικού παράμετροι απόσβεσης στο μοντέλο Weibull.

Οπότε από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της R υπολογίζεται η πιθανότητα υπέρβασης μιας στάθμης r mm/hr

$$P(R \geq r) = \int_r^{\infty} f_R(x) dx = \exp(-w \cdot r^m) \quad (4.60)$$

όπου w , m είναι παράμετροι που εξαρτώνται από τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της υπό εξέταση περιοχής. Η σχέση (4.60) περιγράφει πολύ ικανοποιητικά την πιθανότητα υπέρβασης της R όπως προκύπτει από πειραματικά δεδομένα ανά τον κόσμο, τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια της παραγράφου. Επιπλέον, η πιθανότητα υπέρβασης μιας στάθμης x dB της απόσβεσης A' για την υποθετική επίγεια ζεύξη μήκους L' θα δίνεται από τη σχέση

$$P(A' \geq x) = \exp(-w_1 \cdot x^{m_1}) \quad (4.61)$$

Οι παράμετροι w_1 και m_1 υπολογίστηκαν αναλυτικά ως συνάρτηση των αντιστοιχών παραμέτρων της κατανομής της σημειακής έντασης βροχόπτωσης.

4.9 Αποπόλωση λόγω βροχής και παγοκρυστάλλων

Για πρακτικές εφαρμογές έχει προταθεί από την ITU-R ένα ημιεμπειρικό μοντέλο που συνδέει το μέγεθος XPD λόγω βροχής και παγοκρυστάλλων μιας δορυφορικής ζεύξης διπλής πόλωσης με την αντίστοιχη ομοπολική απόσβεση A_C (Co-Polar Attenuation) [ITU-R, P.618-7]^[16]. Ο ορισμός που αναφέρεται στην ίδια πιθανότητα υπέρβασης της ομοπολικής απόσβεσης είναι ο ακόλουθος

$$A_C = 20 \cdot \log \left| \frac{E_o}{E_{cc}} \right| \quad (4.62)$$

όπου $|E_o|$ το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου απουσία βροχής και $|E_{cc}|$ το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου που λαμβάνεται στην ίδια πόλωση με το μεταδιδόμενο σήμα παρουσία βροχής. Είναι φανερό ότι η ομοπολική απόσβεση A_C είναι η απόσβεση λόγω βροχής ενός συστήματος απλής πόλωσης. Σύμφωνα με το μοντέλο της ITU-R, η σχέση που συνδέει τα μεγέθη της διάκρισης διασταύρωσης πόλωσης (XPD) λόγω βροχής και παγοκρυστάλλων για την ίδια στάθμη πιθανότητας $p\%$, είναι

$$XPD(p\%) = (XPD)_{rain}(p\%) - C_{ice}(p\%) \quad (4.63)$$

όπου $(XPD)_{rain}(p\%)$ η διάκριση διασταύρωσης πόλωσης λόγω βροχής που δεν υπερβαίνεται για $p\%$ του χρόνου, και $C_{ice}(p\%)$ είναι ο αντίστοιχος παράγοντας της διάκρισης διασταύρωσης πόλωσης λόγω παγοκρυστάλλων που εκφράζεται συναρτήσει του $(XPD)_{rain}(p\%)$

$$C_{ice}(p\%) = (XPD)_{rain}(p\%) \cdot W(p\%) \quad (4.64)$$

όπου

$$W(p\%) = \frac{0.3 + 0.1 \cdot \log(p\%)}{2} \quad (4.65)$$

Επειδή το μοντέλο αυτό συσχετίζει τις τυχαίες μεταβλητές της αποπόλωσης λόγω βροχής και παγοκρυστάλλων, δεν μπορεί να έχει καλή εφαρμογή σε περιοχές με υψηλά γεωγραφικά πλάτη κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

Επιπλέον, η ημιεμπειρική σχέση που συνδέει τα μεγέθη $(XPD)_{rain}$ και A_c για την ίδια στάθμη πιθανότητας είναι [ITU-R, P. 618-7]^[16]

$$(XPD)_{rain}(p\%) = U - V(f) \cdot \log[A_c(p\%)] + C_\sigma(p\%) \quad (4.66)$$

Οι παράμετροι U , $V(f)$ και $C_\sigma(p\%)$ είναι παράγοντες που εξαρτώνται από την συχνότητα f , την γωνία ανύψωσης φ , την γωνία πόλωσης τ (μόνο για γραμμική πόλωση) ως προς τον ορίζοντα (tilt angle) καθώς και την επικλινή γωνία που πέφτει η σταγόνα κατά μήκος της ζεύξης (canting angle). Η παράμετρος U δίνεται

$$U = C_f + C_\tau + C_\varphi \quad (4.67)$$

όπου

$$C_f = 30 \cdot \log f \quad 8 \leq f \leq 35 \text{ GHz} \quad (4.68)$$

$$C_\tau = -10 \cdot \log(1 - 0.484(1 + \cos(4\tau))) \quad (4.69)$$

$$C_\varphi = -40 \cdot \log \varphi \quad \varphi \leq 60^\circ \quad (4.70)$$

Για σήματα κυκλικής πόλωσης θέτεται $\tau = 45^\circ$. Επιπλέον ο παράγοντας $V(f)$ δίνεται

$$V(f) = \begin{cases} 12.8 \cdot f^{0.9} & 8 \leq f \leq 20 \text{ GHz} \\ 22.6 & 20 < f \leq 35 \text{ GHz} \end{cases} \quad (4.71)$$

Τέλος, ο παράγοντας $C_\sigma(p\%)$ εξαρτάται κυρίως από την τυχαία κατανομή της επικλινούς γωνίας πτώσεως της σταγόνας βροχής κατά μήκος της ζεύξεως. Εξαρτάται επιπλέον και από άλλες παραμέτρους, όπως είναι το σχήμα της σταγόνας και η γωνία ανύψωσης του ραδιοβήματος. Με την υπόθεση κανονικής κατανομής για

την επικλινή γωνία της σταγόνας βροχής με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση σ , ο όρος C_σ μοντελοποιείται ως εξής [Olsen and Nowland, 1977]^[49] και [Olsen and Nowland, 1978]^[50]

$$C_\sigma(p\%) = 0.0052 \cdot \sigma^2 \quad (4.72)$$

όπου η παράμετρος σ παίρνει τις τιμές 0° , 5° , 10° και 15° , για τα αντίστοιχα ποσοστά $p\%$ 1%, 0.1%, 0.01% και 0.001%, του συνολικού χρόνου. Υλοποιώντας μια κατάλληλη γραμμική παλινδρόμηση ισχύει

$$C_\sigma(p\%) = 0.0052 \cdot \left(-2.17147 \cdot \ln(p\%) - 1.258385 \cdot 10^{-8} \right)^2 \quad (4.73)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (4.63)-(4.66) ισχύει για την διάκριση διασταύρωσης πόλωσης λόγω βροχής και παγοκρυστάλλων

$$(XPD)(p\%) = \{U - V(f) \cdot \log[A_c(p\%)] + C_\sigma(p\%)\} \cdot \{I - W(p\%)\} \quad (4.74)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η παραπάνω σχέση ισχύει όταν ο προσανατολισμός ως προς την επιθυμητή πόλωση είναι βέλτιστος ή υφίσταται μικρή απόκλιση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

5

**ΕΠΙΔΟΣΗ
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΖΕΥΞΗΣ
ΜΕ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ
ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ
ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ
ΣΗΜΑΤΟΘΟΡΥΒΙΚΟΥ
ΛΟΓΟΥ**

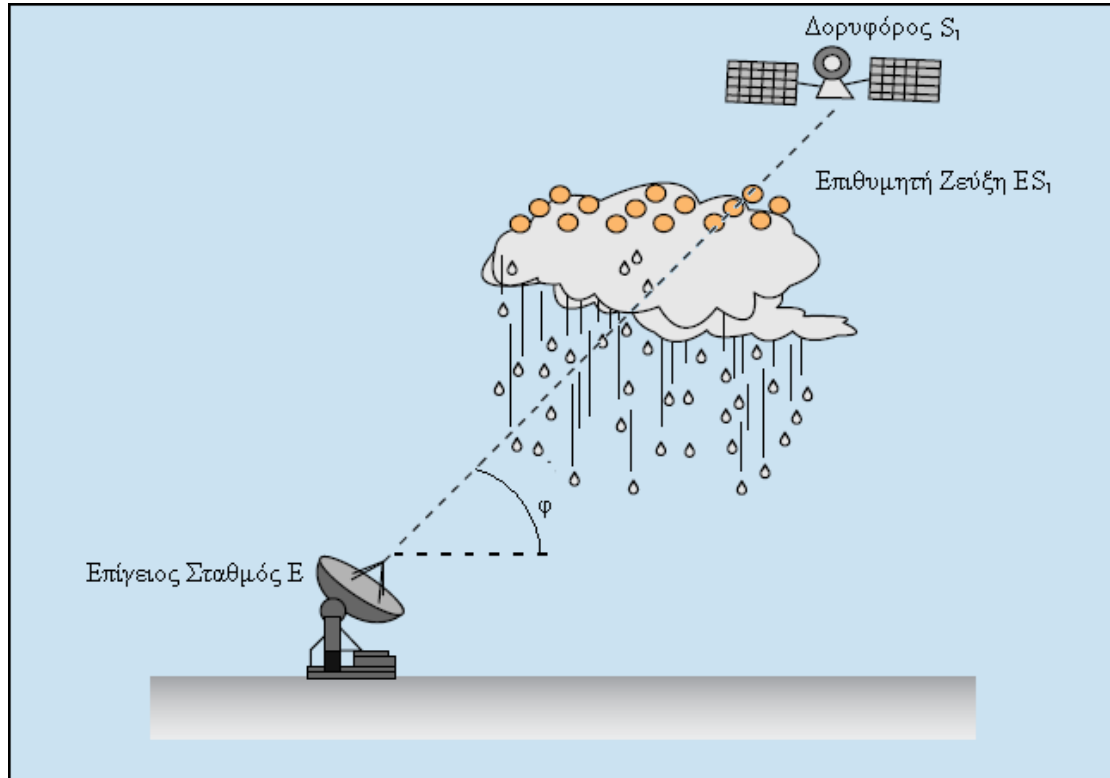
5.1 Γενικά

Για τις συχνότητες άνω των 10GHz, που είναι εξαιρετικά σημαντικές στα τρέχοντα δορυφορικά συστήματα, η εξασθένηση επιδεινώνεται κυρίως λόγω πιθανής διαφορικής εξασθένησης λόγω βροχής και παγοκρυστάλλων κατά μήκος των επιθυμητών δρόμων μετάδοσης, γεγονός το οποίο ενισχύει φαινόμενα αποπόλωσης. Οι ανησυχίες αυτές αφορούν αναλογικά δορυφορικά συστήματα που χρησιμοποιούν την τεχνική αναχρησιμοποίησης συχνότητας. Στο κεφάλαιο αυτό, προτείνεται μια μέθοδος πρόβλεψης της επιδείνωσης του σηματοθορυβικού λόγου (C/N) λαμβάνοντας κατάλληλα υπόψη τους παγοκρυστάλλους (ice crystals) και τη γωνία σταγόνων βροχής. Οι νέες υποθέσεις αφορούν την ακριβέστερη εκτίμηση της παραμέτρου διάκρισης διασταύρωσης πόλωσης (XPD ή cross-polarization discrimination) και συμβάλλουν έτσι σε πλέον αξιόπιστη πρόταση για τη σχεδίαση συστημάτων αναχρησιμοποίησης συχνότητας. Ως γενικό συμπέρασμα, ο συνυπολογισμός των παγοκρυστάλλων μαζί με τα αποτελέσματα λοξότμησης γωνίας σταγόνων βροχής μπορεί να είναι σημαντικός σε μερικές περιπτώσεις, όπως η λειτουργία με κυκλική πόλωση στη ζώνη συχνοτήτων K , και συμβάλλει στην ακριβέστερη εκτίμηση της υποβάθμισης του σηματοθορυβικού λόγου (C/N).

5.2 Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας δορυφορικού συστήματος παρουσία βροχής και παγοκρυστάλλων

5.2.1 Σύστημα απλής πόλωσης

Έστω επίγειος σταθμός E σε επικοινωνία με δορυφόρο S_1 ο οποίος έχει τεθεί σε γεωστατική τροχιά. Η γεωμετρία του προβλήματος φαίνεται στο σχήμα 5.1, όπου φ η γωνία ανύψωσης του κεκλιμένου ραδιοδρόμου. Στη συνέχεια, ακολουθεί η στατιστική θεώρηση του λόγου ισχύος φέροντος του επιθυμητού σήματος προς τη συνολική ισχύ θορύβου κατά τη διάρκεια βροχόπτωσης και η εύρεση της επίδρασης της βροχόπτωσης στον ολικό χρόνο μη λειτουργίας.



Σχήμα 5.1: Γεωμετρία δορυφορικού συστήματος.

Η σχέση που ακολουθεί δίνει το λόγο ισχύος φέροντος προς ισχύ θορύβου (Carrier-to-Noise, CNR)

$$\frac{C}{N} = CNR = 10 \cdot \log\left(\frac{C}{N}\right) \quad \text{σε dB} \quad (5.1)$$

όπου C η ισχύς του επιθυμητού σήματος και N η ισχύς του θερμικού θορύβου στην είσοδο του Επίγειου Σταθμού, παρουσία βροχής.

Για το σύστημα του σχήματος 5.1, η απόσβεση του επιθυμητού σήματος συμβολίζεται με A_C . Μέσω της χρήσης πεδιακών μεγεθών ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι δυνατή η παρουσίαση της εξάρτησης σηματοθορυβικού λόγου και απόσβεσης. Τα σήματα που εμφανίζονται στην είσοδο ενός επίγειου σταθμού E με ζεύξη απλής πόλωσης (από δορυφόρο S) είναι

$|E_C|$ πλάτος ηλεκτρικού πεδίου κυρίου σήματος απουσία βροχής.

$|E_N|$ πλάτος θορύβου.

Ο συμβολισμός $|E'_C|$ αναφέρεται στο ανωτέρω μέγεθος παρουσία βροχής.

Η απόσβεση βροχής του κυρίου σήματος είναι

$$A_C = 10 \log CPA = 10 \log \frac{|E_C|^2}{|E'_C|^2} \quad \text{σε dB} \quad (5.2)$$

Για το σηματοθορυβικό λόγο καθαρού ουρανού ισχύει

$$CNR_{nom} = 10 \cdot \log\left(\frac{C_{nom}}{N}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{|E_C|^2}{|E_N|^2}\right) \quad \text{σε dB} \quad (5.3)$$

Ο ανωτέρω όρος εκφράζεται συναρτήσει των βασικών παραμέτρων της τηλεπικοινωνιακής ανάλυσης [Ha, 1989]^[24], και αναφέρεται σε συνθήκες καθαρού ουρανού (clear sky conditions).

Για τη ζεύξη μεταξύ του δορυφόρου S και του επίγειου σταθμού E , θεωρείται ότι οι κεραιές είναι πλήρως ευθυγραμμισμένες για να επιτυγχάνεται βέλτιστη δυνατή σκόπευση και, επομένως, ελάχιστες απώλειες σκόπευσης. Με τα παραπάνω λοιπόν δεδομένα προκύπτει η ισότητα

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{C}{N}\right) &= 10 \cdot \log \left(\frac{|E' C|^2}{|E N|^2} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{|E' C|^2}{|E N|^2} \cdot \frac{|E_C|^2}{|E C|^2} \right) = \\
 &= 10 \cdot \log \left(\frac{|E_C|^2}{|E N|^2} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{|E' C|^2}{|E_C|^2} \right) \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow CNR &= (CNR)_{nom} - A_C \quad \text{σε dB} \tag{5.4}
 \end{aligned}$$

Η σχέση (5.4) σε καθαρά μεγέθη λαμβάνει τη μορφή

$$C = C_{nom} \cdot 10^{-\frac{A_C}{10}} \tag{5.5}$$

Στη συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός του ποσοστού του χρόνου όπου ο λόγος CNR του δορυφορικού συστήματος παρουσία βροχής δεν υπερβαίνει μια δεδομένη στάθμη M . Αυτός είναι ο αντίστοιχος υπολογισμός του υπολογισμού της διαθεσιμότητας του συστήματος, στον οποίο προσδιορίζεται το ποσοστό του χρόνου στη διάρκεια του οποίου το μέγεθος CNR είναι μεγαλύτερο μιας στάθμης M . Στις αναλογικές δορυφορικές επικοινωνίες, το ύψος του κατωφλίου M είναι άμεσα εξαρτώμενο από τις προδιαγραφές συγχρονισμού του δέκτη.

Η πιθανότητα του ενδεχομένου να τεθεί το σύστημα εκτός λειτουργίας εκφράζεται από τη σχέση

$$P_{out} = P \left[\frac{C}{N} \leq M \right] \quad \text{σε dB} \tag{5.7a}$$

Αντίθετα, για τον προσδιορισμό της αξιοπιστίας μιας δορυφορικής ζεύξης και τη σχεδίαση της καμπύλης επίδοσης, πρέπει να υπολογισθεί η πιθανότητα υπέρβασης μιας στάθμης κατωφλίου, δηλαδή η πιθανότητα

$$P_M = P \left[\frac{C}{N} \geq M \right] \quad \text{σε dB} \tag{5.7b}$$

Αυτή είναι η πιθανότητα ώστε ο λόγος C/N στην είσοδο του αποκωδικοποιητή λαμβάνοντας υπόψη την απόσβεση λόγω βροχής να υπερβαίνει τη στάθμη M . Κατά τη σχεδίαση των δορυφορικών συστημάτων επικοινωνιών, πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη ότι η ισχύς ενός δορυφορικού αναμεταδότη δεν

παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του αλλά μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου [Vasseur, 2000]^[57].

Για τον προσδιορισμό της πιθανότητας να τεθεί το σύστημα εκτός λειτουργίας γίνονται οι παρακάτω γενικές παραδοχές

1. Υποτίθεται ότι ο σημειακός ρυθμός βροχόπτωσης και η απόσβεση λόγω βροχής ανάλογα τη γεωγραφική περιοχή ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική, γάμμα, Weibull κατανομή χωρίς συνθήκη. Ο όρος χωρίς συνθήκη υπονοεί ότι για την υπολογισμό της κατανομής συμπεριλαμβάνονται χρονικές στιγμές που βρέχει και χρονικές στιγμές που δεν βρέχει. Επίσης, για την οριζόντια μεταβολή της χωρικής δομής του ρυθμού βροχόπτωσης εφαρμόζεται το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων με τρία διαφορετικά μοντέλα. Οι θεμελιώδεις υποθέσεις του πρώτου μοντέλου είναι η λογαριθμοκανονική κατανομή για το σημειακό ρυθμό βροχόπτωσης και την απόσβεση λόγω βροχής, η κατανομή Laws–Parsons για την κατανομή του μεγέθους της σταγόνας βροχής και το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων του Lin (βλέπε Παράρτημα Α). Οι θεμελιώδεις υποθέσεις του δευτέρου μοντέλου είναι η γάμμα κατανομή για το σημειακό ρυθμό βροχόπτωσης και την απόσβεση λόγω βροχής, η κατανομή Laws–Parsons για την κατανομή του μεγέθους της σταγόνας βροχής και το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων των Morita and Higutti (βλέπε Παράρτημα Β). Οι θεμελιώδεις υποθέσεις του τρίτου μοντέλου Γ είναι η Weibull κατανομή για το σημειακό ρυθμό βροχόπτωσης και την απόσβεση λόγω βροχής, η κατανομή Laws–Parsons για την κατανομή του μεγέθους της σταγόνας βροχής. Και στα τρία αναλυτικά μοντέλα του προηγούμενου κεφαλαίου που βασίζονται στο μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων, οι κυριότερες εισοδοί είναι οι παράμετροι της λογαριθμοκανονικής κατανομής R_m, S_r , της γάμμα κατανομής b_r, v_r και της Weibull κατανομής w, m αντίστοιχα (διαφορετικές για κάθε κλιματική ζώνη). Και στα τρία μοντέλα κοινές παράμετροι είναι η συχνότητα της ζεύξης, η γωνία πόλωσης και η γωνία ανύψωσης.
2. Για τον υπολογισμό της ειδικής απόσβεσης λόγω βροχής χρησιμοποιείται η σχέση

$$A_o (dB / km) = aR^b$$

όπου τα a και b προσδιορίζονται με εφαρμογή των τύπων (4.2a), (4.2b) και (4.3) χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα μοντέλα για την κατανομή μεγέθους σταγόνας της βροχής που αφορούν τις διάφορες περιοχές.

3. Η απλή υπόθεση του Crane [1980]^[46] περιγράφει την κατακόρυφη μεταβολή της δομής της βροχόπτωσης και επομένως χρησιμοποιούνται οι συναφείς σχέσεις για το ενεργό μήκος βροχής.

Σύμφωνα με τις προηγούμενες υποθέσεις, και κυρίως, λόγω της τελευταίας η πιθανότητα υπέρβασης, με $A \geq 0$, μπορεί να εκφρασθεί ως

$$P_{out} = Pr\left(\frac{C}{N} \leq M\right) = Pr\left(A \geq A_M\right) = Pr\left(A' \geq A_M \cdot \cos(\varphi)\right) \quad (5.8)$$

όπου

$$A_M = \begin{cases} \left(\frac{C}{N}\right)_{nom} - \left(\frac{C}{N}\right)_{thr} & \text{αν } \left(\frac{C}{N}\right)_{nom} \geq \left(\frac{C}{N}\right)_{thr} \\ 0 & \text{άλλως} \end{cases} \quad (5.9)$$

το περιθώριο διαλείψεων του συστήματος για τη συγκεκριμένη στάθμη M . Με βάση τη σχέση (5.8), η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του συστήματος προκύπτει από το ολοκλήρωμα

$$P_{out} = \int_{A_M \times \cos(\theta)}^{+\infty} f_{A'}(x) dx \quad (5.10)$$

όπου $f_{A'}(x)$ η πυκνότητα πιθανότητας της απόσβεσης λόγω βροχής κατά μήκος της προβολής της δορυφορικής διαδρομής στο οριζόντιο επίπεδο.

- Υιοθετώντας τη λογαριθμοκανονική κατανομή για τη συνάρτηση $f_{A'}(x)$, το τελικό αποτέλεσμα για την P_{out} προκύπτει

$$P_{out} = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{u_M}{\sqrt{2}}\right) \quad (5.11)$$

όπου

$$u_M = \frac{\ln(A_C \cdot \cos(\varphi)) - \ln(A_m)}{S_a} \quad (5.12)$$

και S_a , A_m στατιστικές παράμετροι που σχετίζονται με τα κλιματολογικά δεδομένα κάθε περιοχής. Αν στις (5.11) και (5.12) τεθεί $A_C = A_M$, η (5.11) δίδει την πιθανότητα διακοπής της ζεύξης, δηλαδή την πιθανότητα

$$P_{out} = Pr\left(\left(\frac{C}{N}\right) \leq \left(\frac{C}{N}\right)_{thr}\right) \quad (5.13)$$

Ο χρόνος διακοπής της ζεύξης σε min/year προκύπτει από τη σχέση

$$T_{out} = 525.600 \cdot P_{out} \quad (5.14)$$

Η προηγούμενη ανάλυση συνδέει τα χαρακτηριστικά την ποιότητα υπηρεσιών (επίδοση) και τη διαθεσιμότητα μιας δορυφορικής ζεύξης με τη διαθέσιμη ισχύ του δορυφορικού αναμεταδότη. Πράγματι, η απαίτηση

$$Pr\left(\left(\frac{C}{N}\right) \leq \left(\frac{C}{N}\right)_k\right) = P_k \quad (5.15)$$

δηλαδή, η απαίτηση μια συγκεκριμένη στάθμη να επιτυγχάνεται με συγκεκριμένη πιθανότητα υπέρβασης P_k , καθορίζει πλήρως τη βασική παράμετρο $(C/N)_{thr}$. Αυτό γίνεται θέτοντας στην (5.7a) $M = (C/N)_k$. Τότε, η αντίστοιχη πιθανότητα υπέρβασης πρέπει να είναι P_k . Πλέον, η σχέση μεταξύ οποιασδήποτε στάθμης C/N και της αντίστοιχης πιθανότητας υπέρβασης έχει καθορισθεί μονοσήμαντα. Η αντίστοιχη καμπύλη επίδοσης μπορεί να σχεδιασθεί για να διαπιστωθεί αν ικανοποιεί τη μάσκα επίδοσης που συστήνει η ITU-R για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

- Υιοθετώντας τη γάμμα κατανομή για τη συνάρτηση $f_A(x)$, το τελικό αποτέλεσμα για την P_{out} προκύπτει

$$P_{out} = 1 - \frac{\gamma(v_a, b_a \cdot A_C \cdot \cos(\varphi))}{\Gamma(v_a)} \quad (5.16)$$

όπου η συνάρτηση $\gamma(\alpha, x)$ η ατελής συνάρτηση γάμμα που δίνεται από το ολοκλήρωμα ορισμού της

$$\gamma(\alpha, x) = \int_0^x t^{\alpha-1} \cdot e^{-t} dt$$

(5.17a)

$\Gamma(x)$ είναι η γνωστή συνάρτηση γάμμα

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \cdot e^{-t} dt \quad (5.17b)$$

και b_a, ν_a στατιστικές παράμετροι που σχετίζονται με τα κλιματολογικά δεδομένα κάθε περιοχής. Αν στην (5.16) τεθεί $M = (C/N)_{thr}$, η (5.16) δίδει την πιθανότητα διακοπής της ζεύξης, δηλαδή την πιθανότητα

$$P_{out} = Pr\left(\left(\frac{C}{N}\right) \leq \left(\frac{C}{N}\right)_{thr}\right) \quad (5.18)$$

Ο χρόνος διακοπής της ζεύξης σε min/year προκύπτει από τη σχέση (5.14)

- Υιοθετώντας τη Weibull κατανομή για τη συνάρτηση $f_A(x)$, το τελικό αποτέλεσμα για την P_{out} προκύπτει

$$P_{out} = \exp\left\{-w_I \cdot \left[\left\langle (A_C) \cdot \cos(\varphi) \right\rangle^{m_I}\right]\right\} \quad (5.19)$$

και w_I, m_I στατιστικές παράμετροι που σχετίζονται με τα κλιματολογικά δεδομένα κάθε περιοχής. Αν στην (5.16) τεθεί $M = (C/N)_{thr}$, η (5.16) δίδει την πιθανότητα διακοπής της ζεύξης, δηλαδή την πιθανότητα

$$P_{out} = Pr\left(\left(\frac{C}{N}\right) \leq \left(\frac{C}{N}\right)_{thr}\right) \quad (5.20)$$

Ο χρόνος διακοπής της ζεύξης σε min/year προκύπτει από τη σχέση (5.14)

5.2.2 Σύστημα διπλής πόλωσης με βροχή και χωρίς παγοκρυστάλλους

Η γεωμετρία του προβλήματος είναι ίδια με αυτήν της απλής πόλωσης. Το κύριο δορυφορικό σύστημα θεωρείται ότι χρησιμοποιεί δυο ορθογώνιες πολώσεις. Συνεπώς, προστίθεται μια νέα πηγή παρενόχλησης που προκύπτει από την αποπόλωση του Η/Μ κύματος διπλής πόλωσης και προέρχεται από το ορθογώνιο κανάλι. Η αποπόλωση στο κανάλι διάδοσης οφείλεται στη βροχή αλλά και στους παγοκρυστάλλους. Επίσης, γίνεται η θεώρηση ότι η συγκεκριμένη παρεμβολή είναι ασυσχέτιστη προς το θερμικό θόρυβο. Εξετάζεται, λοιπόν, η στατιστική περιγραφή του λόγου ισχύος του φέροντος του επιθυμητού σήματος προς τη συνολική ισχύ θορύβου που είναι

$$\frac{C}{N} = CNDR = 10 \cdot \log\left(\frac{C}{N+D}\right) \quad \text{σε dB} \quad (5.21)$$

όπου D η ισχύς του σήματος διασταυρούμενης πόλωσης στην είσοδο του επίγειου σταθμού και οφείλεται στην παρουσία βροχής και την ύπαρξη παγοκρυστάλλων στα υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας.

Η παράμετρος XPD λόγω βροχής δίνεται από τη σχέση (βλέπε §4.9) και [ITU-R, P.530-10]^[52], [ITU-R, P.618-7]^[16], [Stutzman and Runyon, 1984]^[53]

$$(XPD)(p\%) = U - V(f) \cdot \log[A_C(p\%)] + C_\sigma(p\%) \quad (5.22)$$

Οι παράμετροι της παραπάνω εξίσωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4 με τον ίδιο ακριβώς συμβολισμό. Εφόσον έχει γίνει η υπόθεση ότι η απόσβεση λόγω βροχής του επιθυμητού σήματος A_C ακολουθεί κάποια από τις κατανομές λογαριθμοκανονική, γάμμα και Weibull ισχύει

$$p(A_C)\% = 100 \cdot P_{out} \quad (5.23)$$

Επομένως, η παράμετρος XPD λόγω βροχής μπορεί να εκφρασθεί συναρτήσει της αντίστοιχης απόσβεσης A_C για την ίδια πιθανότητα υπέρβασης από τη σχέση

$$XPD(A_C) = \{U - V \cdot \log(A_C) + C_\sigma(p(A_C)\%)\} \quad (5.24)$$

Η ονομαστική τιμή του XPD δίνεται

$$XPD_{nom} = 10 \cdot \log\left(\frac{C_{nom}}{D_{nom}}\right) \quad (5.25)$$

Το μέγεθος D_{nom} αντιστοιχεί στην ισχύ του σήματος διασταυρούμενης πόλωσης στην είσοδο του επίγειου σταθμού απουσία βροχής. Από τη σχέση (5.21) προκύπτει

$$\left(\frac{C}{N}\right) = \left(\frac{C}{N}\right)_{nom} - A_C - 10 \cdot \log\left(1 + 10^{\frac{\left(\frac{C}{N}\right)_{nom} - A_C - XPD(A_C)}{10}}\right) \quad (5.26a)$$

όπου το $XPD(A_C)$ προκύπτει από τη σχέση (5.24). Απόδειξη της σχέσης (5.26a) με πεδιακά μεγέθη δίνεται στο Παράρτημα Δ.

Η σχέση (5.26a) έχει ενσωματώσει μόνο τα αποτελέσματα αποπόλωσης βροχής και όχι ατελειών που εμπλέκουν φαινόμενα της παραμέτρου XPD των κεραιών. Αν υποθεθεί ότι η κεραία της σύνδεσης δεν είναι ιδανική δηλαδή η παράμετρος $XPD_{antenna}$ δεν έχει μεγάλες τιμές (θεωρητικά άπειρες), αλλά συγκρίσιμες με την αποπόλωση της βροχής τότε η σχέση (5.26a) μετατρέπεται στην (5.26b) η οποία αποδεικνύεται και στο Παράρτημα Ε και [Vasseur, 2000]^[51].

$$\left(\frac{C}{N}\right) = \left(\frac{C}{N}\right)_{nom} - A_C - 10 \times \log\left(1 + 10^{\frac{\left(\frac{C}{N}\right)_{nom}}{10}} \cdot \left(10^{\frac{-A_C - XPD(A_C)}{10}} - 10^{\frac{XPD_{antenna}}{10}}\right)\right) \quad (5.26b)$$

Στη συνέχεια, στόχος είναι ο υπολογισμός του ποσοστού του ολικού χρόνου λειτουργίας κατά τη διάρκεια του οποίου το μέγεθος $CNDR$ δεν υπερβαίνει τη στάθμη $CNDR_{thr}$, δηλαδή την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας (outage probability) του δορυφορικού συστήματος παρουσία βροχής. Αυτός ο υπολογισμός είναι αντίστοιχος αυτού της διαθεσιμότητας του συστήματος που προσδιορίζεται από το ποσοστό του χρόνου στη διάρκεια του οποίου το μέγεθος $CNDR$ είναι μεγαλύτερο μιας στάθμης $CNDR_{thr}$.

Η πιθανότητα του ενδεχομένου μη διαθεσιμότητας του συστήματος σε μαθηματικούς όρους εκφράζεται από τη σχέση

$$P_{out} = P\left[\left(\frac{C}{N}\right) \leq \left(\frac{C}{N}\right)_{thr}\right] =$$

$$= P \left[\left(\frac{C}{N} \right)_{nom} - A_C - 10 \log \left[1 + 10^{\frac{\left(\frac{C}{N} \right)_{nom} - XPD(A_C)}{10}} \right] \leq \left(\frac{C}{N} \right)_{thr} \right] \text{ σε dB} \quad (5.27)$$

Για να υπολογιστεί η προηγούμενη πιθανότητα γίνονται ακριβώς οι ίδιες υποθέσεις, με την περίπτωση της απλής πόλωσης, όσον αφορά την κατανομή των αποσβέσεων λόγω βροχής, τη χωρική ανομοιογένεια του ρυθμού βροχόπτωσης καθώς και την κατανομή του μεγέθους των σταγόνων βροχής. Λαμβάνοντας υπόψη την υπόθεση του Crane, η σχέση (5.27) γράφεται

$$P_{out} = P \left[\frac{A'_C}{\cos \varphi} \geq \left(\frac{C}{N} \right)_{nom} - \left(\frac{C}{N} \right)_{thr} - 10 \cdot \log \left(1 + 10^{\frac{\left(\frac{C}{N} \right)_{nom} - \frac{A'_C}{\cos \varphi} - \left(U - V \log \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) + C_\sigma \left(p \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) \% \right) \right)}{10}} \right) \right] \quad (5.28)$$

Για τον προσδιορισμό της πιθανότητας της σχέσης (5.28), χρειάζεται αρχικά ο υπολογισμός της τιμής της απόσβεσης A'_C με δεδομένη τιμή κατωφλίου $CNDR_{thr}$.

Για το λόγο αυτό επιλύεται ως προς A'_C η υπερβατική εξίσωση

$$\frac{A'_C}{\cos \varphi} = \left(\frac{C}{N} \right)_{nom} - \left(\frac{C}{N} \right)_{thr} - 10 \cdot \log \left(1 + 10^{\frac{\left(\frac{C}{N} \right)_{nom} - \frac{A'_C}{\cos \varphi} - \left(U - V \log \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) + C_\sigma \left(p \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) \% \right) \right)}{10}} \right) \quad (5.29)$$

Επιλύοντας αριθμητικά την υπερβατική αυτή εξίσωση προκύπτει η τιμή A'_C . Με την τιμή αυτή και ανάλογα με το στατιστικό μοντέλο (λογαριθμοκανονικό, γάμμα και Weibull) που ακολουθείται προκύπτουν οι πιθανότητες διακοπής δορυφορικού συστήματος από τις σχέσεις (5.11), (5.16) και (5.19) αντίστοιχα (με $A_C = \frac{A'_C}{\cos \varphi}$)

[Κανελλόπουλος και Βεντούρας, 1990]^[54].

5.2.3 Σύστημα διπλής πόλωσης με βροχή και παγοκρυστάλλους

Η γεωμετρία του προβλήματος είναι ίδια με αυτήν της απλής πόλωσης και του συστήματος διπλής πόλωσης χωρίς παγοκρυστάλλους. Η στατιστική περιγραφή του λόγου ισχύος του επιθυμητού σήματος προς τη συνολική ισχύ θορύβου (Carrier-to-noise) είναι η ίδια με τη σχέση (5.21) όπου D είναι η ισχύς του σήματος διασταυρούμενης πόλωσης στην είσοδο του επίγειου σταθμού και οφείλεται στην παρουσία βροχής και ύπαρξη παγοκρυστάλλων στα υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας.

Η παράμετρος XPD λόγω βροχής και παγοκρυστάλλων δίνεται από τη σχέση (βλέπε §4.9) και [ITU-R, P.530-10]^[52], [ITU-R, P.618-7]^[16], [Stutzman and Runyon, 1984]^[53]

$$(XPD)(p\%) = \{U - V(f) \cdot \log[A_C(p\%)] + C_\sigma(p\%)\} \cdot \left\{1 - \frac{0.3 + 0.1 \cdot \log(p\%)}{2}\right\} \quad (5.30)$$

Οι παράμετροι της παραπάνω εξίσωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4. Εφόσον έχει γίνει η υπόθεση ότι η απόσβεση λόγω βροχής του επιθυμητού σήματος A_C ακολουθεί κάποια από τις κατανομές λογαριθμοκανονική, γάμμα, Weibull, ισχύει:

$$p(A_C)\% = 100 \cdot P_{out} \quad (5.31)$$

Επομένως, η παράμετρος XPD λόγω βροχής μπορεί να εκφρασθεί συναρτήσει της αντίστοιχης απόσβεσης A_C για την ίδια πιθανότητα υπέρβασης ως εξής

$$XPD(A_C) = \{U - V \cdot \log(A_C) + C_\sigma(p(A_C)\%)\} \cdot \left\{1 - \frac{0.3 + 0.1 \cdot \log(p(A_C)\%)}{2}\right\} \quad (5.32)$$

Η ονομαστική τιμή του XPD δίνεται από τη σχέση (5.25).

Από τη σχέση (5.21) έχουμε

$$\left(\frac{C}{N}\right) = \left(\frac{C}{N}\right)_{nom} - A_C - 10 \cdot \log \left(1 + 10^{\frac{\left(\frac{C}{N}\right)_{nom} - A_C - XPD(A_C)}{10}} \right) \quad (5.33a)$$

με το $XPD(A_C)$ να δίνεται από την σχέση (5.32).

Η σχέση (5.33a) έχει ενσωματώσει μόνο τα αποτελέσματα αποπόλωσης βροχής και όχι ατελειών που εμπλέκουν φαινόμενα σταυροπόλωσης των κεραιών. Αν υποτεθεί ότι η κεραιά της σύνδεσης δεν είναι ιδανική ($XPD_{antenna}$) και δεν έχει θεωρητικά μεγάλες τιμές XPD (θεωρητικά άπειρες), αλλά συγκρίσιμες με την αποπόλωση της βροχής τότε η σχέση (5.33a) μετατρέπεται στην (5.33b).

$$\left(\frac{C}{N}\right) = \left(\frac{C}{N}\right)_{nom} - A_C - 10 \cdot \log \left(1 + 10^{\frac{\left(\frac{C}{N}\right)_{nom}}{10}} \cdot \left(10^{\frac{-A_C - XPD(A_C)}{10}} - 10^{\frac{XPD_{antenna}}{10}} \right) \right) \quad (5.33b)$$

Στη συνέχεια, στόχος είναι ο υπολογισμός του ποσοστού του ολικού χρόνου λειτουργίας κατά τη διάρκεια του οποίου το μέγεθος $CNDR$ δεν υπερβαίνει τη στάθμη $CNDR_{thr}$, δηλαδή την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας (outage probability) του δορυφορικού συστήματος παρουσία βροχής και παγοκρυστάλλων.

Η πιθανότητα του ενδεχομένου μη διαθεσιμότητας του συστήματος σε μαθηματικούς όρους εκφράζεται από τη σχέση

$$P_{out} = P \left[\left(\frac{C}{N}\right) \leq \left(\frac{C}{N}\right)_{thr} \right] = P \left[\left(\frac{C}{N}\right)_{nom} - A_C - 10 \log \left(1 + 10^{\frac{\left(\frac{C}{N}\right)_{nom} - XPD(A_C)}{10}} \right) \leq \left(\frac{C}{N}\right)_{thr} \right] \text{ σε dB} \quad (5.34)$$

Για να υπολογιστεί η προηγούμενη πιθανότητα γίνονται ακριβώς οι ίδιες υποθέσεις, με την περίπτωση της απλής πόλωσης, όσον αφορά την κατανομή των αποσβέσεων λόγω βροχής, τη χωρική ανομοιογένεια του ρυθμού βροχόπτωσης καθώς και την κατανομή του μεγέθους των σταγόνων βροχής. Λαμβάνοντας υπόψη την υπόθεση του Crane, η σχέση (5.34) γράφεται

$$P_{out} = P \left[\frac{A'_C}{\cos \varphi} \geq \left(\frac{C}{N} \right)_{nom} - \left(\frac{C}{N} \right)_{thr} + \right. \\ \left. - 10 \cdot \log \left(1 + 10^{\frac{\left(\frac{C}{N} \right)_{nom} \frac{A'_C}{\cos \varphi} \left\{ U-V \log \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) + C_\sigma \left(p \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) \% \right) \right\} \left[1 - \frac{0.3+0.1 \log \left(p \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) \% \right) \right]}{10} \right)} \right) \right] \quad (5.35)$$

Για τον προσδιορισμό της πιθανότητας της σχέσης (5.35), χρειάζεται αρχικά ο υπολογισμός της τιμής της απόσβεσης A'_C με δεδομένη τιμή κατωφλίου CNR_{thr} . Για το λόγο αυτό επιλύεται ως προς A'_C η υπερβατική εξίσωση

$$\frac{A'_C}{\cos \varphi} = \left(\frac{C}{N} \right)_{nom} - \left(\frac{C}{N} \right)_{thr} + \\ - 10 \cdot \log \left(1 + 10^{\frac{\left(\frac{C}{N} \right)_{nom} \frac{A'_C}{\cos \varphi} \left\{ U-V \log \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) + C_\sigma \left(p \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) \% \right) \right\} \left[1 - \frac{0.3+0.1 \log \left(p \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) \% \right) \right]}{10} \right)} \right) \quad (5.36)$$

Επιλύοντας αριθμητικά την υπερβατική αυτή εξίσωση προκύπτει η τιμή A'_C . Με την τιμή αυτή και ανάλογα με το στατιστικό μοντέλο (λογαριθμοκανονικό, γάμμα και Weibull) που ακολουθείται προκύπτουν οι πιθανότητες διακοπής δορυφορικού συστήματος από τις σχέσεις (5.11), (5.16) και (5.19) αντίστοιχα (με $A_C = \frac{A'_C}{\cos \varphi}$)

[Κανελλόπουλος και Βεντούρας, 1990]^[54].

5.3 Επιδείνωση Διπλής Πόλωσης (Dual Polarization Aggravation DPA)

Για να ποσοτικοποιηθεί η επιδείνωση που λαμβάνεται από τη χρήση της τεχνικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας χρησιμοποιείται το μέγεθος DPA (Dual Polarization Aggravation). Το DPA αναφέρεται στην επιδείνωση του σηματοθορυβικού λόγου όταν χρησιμοποιείται η διπλή πόλωση και δίνεται από τη

$$DPA = CNR_{thr}^S(p\%) - CNR_{thr}^D(p\%) \quad (5.37)$$

όπου $CNR_{thr}^S(p\%)$, $CNR_{thr}^D(p\%)$ είναι τα επίπεδα του CNR στους δέκτες που χρησιμοποιούν την απλή και διπλή πόλωση ($CNDR$) για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης αντίστοιχα. Το DPA ισούται με τη διαφορά μεταξύ του σηματοθορυβικού λόγου της απλής πόλωσης και της τιμής του σηματοθορυβικού λόγου της διπλής πόλωσης σε ένα περιβάλλον βροχής και παγοκρυστάλλων υπό δεδομένη πιθανότητα διακοπής λειτουργίας.

Ακόμη, το DPA (DPA_{ice}) μπορεί να περιγράψει και την επιδείνωση του σηματοθορυβικού λόγου όταν χρησιμοποιείται η διπλή πόλωση και συνυπολογίζεται η επίδραση των παγοκρυστάλλων (icecrystals) έναντι της διπλής πόλωσης χωρίς παγοκρυστάλλους. Δηλαδή το DPA_{ice} μπορεί να ποσοτικοποιήσει την επιδείνωση της απόδοσης που προκύπτει συνυπολογίζοντας τους παγοκρυστάλλους και δίνεται από τη σχέση

$$DPA_{ice} = CNR_{thr}^{D, nonicecrystals}(p\%) - CNR_{thr}^{D, icecrystals}(p\%) \quad (5.38)$$

όπου $CNR_{thr}^{D, nonicecrystals}(p\%)$, $CNR_{thr}^{D, icecrystals}(p\%)$ είναι τα επίπεδα του CNR στους δέκτες που χρησιμοποιούν τη διπλή πόλωση χωρίς τη θεώρηση των παγοκρυστάλλων και τη διπλή πόλωση με τη θεώρηση των παγοκρυστάλλων για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης αντίστοιχα. Το DPA_{ice} ισούται με τη διαφορά μεταξύ του σηματοθορυβικού λόγου της διπλής πόλωσης σε ένα περιβάλλον βροχής χωρίς παγοκρυστάλλους και της τιμής του σηματοθορυβικού λόγου της διπλής πόλωσης σε ένα περιβάλλον βροχής και παγοκρυστάλλων υπό δεδομένη πιθανότητα διακοπής λειτουργίας.

5.3.1 Σύστημα απλής πόλωσης

Για τον υπολογισμό του μεγέθους DPA , κύριο μέλημα είναι ο υπολογισμός της τιμής του σηματοθορυβικού λόγου στην απλή πόλωση για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης. Για να γίνει αυτό, ανάλογα με το μοντέλο που κάθε φορά χρησιμοποιείται, θα γίνει διάκριση τριών περιπτώσεων (λογαριθμοκανονική, γάμμα, Weibull κατανομή) υπό δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης P_k :

- Για τη λογαριθμοκανονική κατανομή από τη σχέση (5.11) υπολογίζεται η τιμή της απόσβεσης A_C από τη σχέση

$$P_{out} = P_k \Leftrightarrow \frac{I}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{u_M}{\sqrt{2}}\right) = P_k \stackrel{(5.12)}{\Leftrightarrow} A_C = \left(\frac{A_m \cdot e^{\sqrt{2} \cdot S_a \cdot \operatorname{erfc}^{-1}(2 \cdot P_k)}}{\cos(\varphi)} \right) \quad (5.39)$$

όπου $\operatorname{erfc}^{-1}(x)$ είναι η αντίστροφη συνάρτηση σφάλματος. Το κατώφλι $CNR_{thr}^S(100 \cdot P_k \%)$ (με $A_C \geq 0$) προκύπτει από τη σχέση

$$CNR_{thr}^S = CNR_{thr}^S(100 \cdot P_k \%) = CNR_{nom} - A_C \quad (5.40)$$

- Για τη γάμμα κατανομή από τη σχέση (5.16) υπολογίζεται η τιμή της απόσβεσης A_C (αφού λυθεί είτε μέσω υπολογιστή είτε μέσω πινάκων) όπως φαίνεται από τη σχέση

$$P_{out} = P_k \Leftrightarrow \frac{\gamma(va, ba \cdot A_C \cdot \cos(\varphi))}{\Gamma(va)} = 1 - P_k \quad (5.41)$$

Για να υπολογιστεί τώρα το κατώφλι $CNR_{thr}^S(100 \cdot P_k \%)$ (με $A_C \geq 0$) προκύπτει από τη σχέση (5.40).

- Για τη Weibull κατανομή από τη σχέση (5.19) υπολογίζεται η τιμή της απόσβεσης A_C όπως φαίνεται από τη σχέση

$$P_{out} = P_k \Leftrightarrow \exp\{-w_l \cdot [(A_C \cdot \cos(\varphi))^{m_l}]\} = P_k \Leftrightarrow A_C = \frac{I}{\cos(\varphi)} \cdot \left(-\frac{\ln(P_k)}{w_l} \right)^{\frac{1}{m_l}} \quad (5.42)$$

Για να υπολογιστεί τώρα το κατώφλι $CNR_{thr}^S(100 \cdot P_k \%)$ (με $A_C \geq 0$), προκύπτει από τη σχέση (5.40).

5.3.2 Σύστημα διπλής πόλωσης με βροχή και χωρίς παγοκρυστάλλους

Αφού υπολογίστηκε η τιμή κατώφλιου για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης για την απλή πόλωση, αυτό που μένει είναι να προσδιοριστεί η τιμή κατώφλιου στα συστήματα διπλής πόλωσης. Για το σύστημα διπλής πόλωσης χωρίς παγοκρυστάλλους λαμβάνονται οι παρακάτω τρεις περιπτώσεις (λογαριθμοκανονική, γάμμα, Weibull κατανομή) με δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης P_k και

$$\left(\frac{C}{N}\right) = \text{CNR}_{thr}^{D, \text{nonicecrystals}}(100 \cdot P_k \%).$$

Για τη λογαριθμοκανονική, γάμμα και Weibull κατανομή υπολογίστηκε η τιμή της απόσβεσης A_C από τις σχέσεις (5.39), (5.41) και (5.42) αντίστοιχα.

Το κατώφλι $\text{CNR}_{thr}^{D, \text{nonicecrystals}}(100 \cdot P_k \%)$ (με $A_C \geq 0$) προκύπτει από τη σχέση (5.26a) αν θεωρηθεί κεραία με $XPD \rightarrow \infty$ (ιδανική κεραία). Στην περίπτωση που η κεραία είναι μη ιδανική ($XPD \ll \infty$), το κατώφλι $\text{CNR}_{thr}^{D, \text{nonicecrystals}}(100 \cdot P_k \%)$ προκύπτει από τη σχέση (5.26b).

Το DPA στην περίπτωση συστημάτων διπλής πόλωσης με βροχή και χωρίς παγοκρυστάλλους δίνεται από τη σχέση

$$DPA = \text{CNR}_{thr}^S(100 \cdot P_k \%) - \text{CNR}_{thr}^{D, \text{nonicecrystals}}(100 \cdot P_k \%) \quad (5.43)$$

5.3.3 Σύστημα διπλής πόλωσης με βροχή και παγοκρυστάλλους

Αφού υπολογίστηκε η τιμή κατωφλίου για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης για την απλή πόλωση, αυτό που μένει είναι να προσδιοριστεί η τιμή κατωφλίου στα συστήματα διπλής πόλωσης. Για το σύστημα διπλής πόλωσης με παγοκρυστάλλους λαμβάνονται οι παρακάτω τρεις περιπτώσεις (λογαριθμοκανονική, γάμμα, Weibull κατανομή) με δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης P_k και

$$\left(\frac{C}{N}\right) = CNR_{thr}^{D, icecrystals}(100 \cdot P_k \%).$$

Για τη λογαριθμοκανονική, γάμμα και Weibull κατανομή υπολογίστηκε η τιμή της απόσβεσης A_C από τις σχέσεις (5.39), (5.41) και (5.42) αντίστοιχα.

Το κατώφλι $CNR_{thr}^{D, icecrystals}(100 \cdot P_k \%)$ (με $A_C \geq 0$) προκύπτει από τη σχέση (5.33a) αν θεωρηθεί κεραία με $XPD \rightarrow \infty$ (ιδανική κεραία). Στην περίπτωση που η κεραία είναι μη ιδανική ($XPD \ll \infty$), το κατώφλι $CNR_{thr}^{D, icecrystals}(100 \cdot P_k \%)$ προκύπτει από τη σχέση (5.33b).

Το DPA στην περίπτωση συστημάτων διπλής πόλωσης με βροχή και παγοκρυστάλλους δίνεται από τη σχέση

$$DPA_{ice} = CNR_{thr}^{D, nonicecrystals}(100 \cdot P_k \%) - CNR_{thr}^{D, icecrystals}(100 \cdot P_k \%) \quad (5.44)$$

Το DPA_{ice} στην περίπτωση συστημάτων διπλής πόλωσης δίνεται από τη σχέση

$$DPA_{ice} = CNR_{thr}^{D, nonicecrystals}(100 \cdot P_k \%) - CNR_{thr}^{D, icecrystals}(100 \cdot P_k \%) \quad (5.45)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

6

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΛΑΝΘΑΣΜΕΝΟΥ ΨΗΦΙΟΥ ΒΕΡ

6.1 Γενικά

Η ανάγκη αντικατάστασης των αναλογικών δορυφορικών συστημάτων με ψηφιακά δορυφορικά συστήματα διαφαίνεται από την ερώτηση που ακολουθεί και επεξηγείται από την απάντησή της. Ποιες είναι οι επιπτώσεις όλων των απωλειών και ειδικά εκείνων που οφείλονται σε καταιγιστικές ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις (φαινόμενο με μεγάλη τυχαιότητα εμφάνισης) για τον τελικό χρήστη των δορυφορικών υπηρεσιών; Εξετάζοντας πρώτα τα αναλογικά δορυφορικά συστήματα (όπου επιζητείται η πιστή αναπαραγωγή του σήματος), η επίπτωση είναι η μεγάλη χειροτέρευση της ποιότητας επικοινωνίας, δηλαδή η αδυναμία αξιόπιστης αναπαραγωγής του αναλογικού σήματος πληροφορίας. Τα αναλογικά συστήματα που αποτέλεσαν τη βάση των συστημάτων επικοινωνίας για πολλά έτη στο παρελθόν, τείνουν σήμερα να αντικατασταθούν πλήρως από ψηφιακά. Ο μοναδικός λόγος για τον οποίο διατηρούνται σήμερα ορισμένα αναλογικά είναι οι μεγάλες επενδύσεις στους ήδη υπάρχοντες αναλογικούς επίγειους σταθμούς [Ha, 1989]^[24]. Τα ψηφιακά συστήματα που βασίζονται στη μετάδοση ακολουθιών δυαδικών ψηφίων και παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα αναλογικά αποτελούν το αντικείμενο του παρόντος κεφαλαίου. Μεταξύ των βασικών πλεονεκτημάτων που προσφέρουν οι ψηφιακές επικοινωνίες πρέπει να αναφερθούν η προσαρμοστικότητα στην εξέλιξη της τεχνολογίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων VLSI, η ευκολία

ενσωμάτωσης νέων υπηρεσιών (λόγω της δυνατότητας αρθρωτής υλοποίησης) και η μεγαλύτερη ανοχή στην επίδραση του θορύβου.

Η διπλής πόλωσης αναχρησιμοποίηση συχνότητας είναι μια κλασσική τεχνική που επιτρέπει την αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης στις ραδιοεπικοινωνίες. Με την τεχνική αυτή επιτυγχάνεται η μετάδοση ταυτόχρονα δύο ανεξάρτητων σημάτων στην ίδια ζώνη συχνοτήτων με τη χρησιμοποίηση των ορθογώνιων πολώσεων διπλασιάζοντας το διαθέσιμο φάσμα. Χρησιμοποιείται συνήθως στις εφαρμογές απευθείας εκπομπών (Broadcasting). Θα υιοθετηθεί επίσης μελλοντικά στις ζώνες συχνοτήτων Ku και Ka στις οποίες προβλέπεται μετάδοση εφαρμογών πολυμέσων και HDTV.

Σε συχνότητες άνω των 10GHz, η ποιότητα υπηρεσιών και η διαθεσιμότητα των διπλά πολωμένων δορυφορικών συστημάτων επηρεάζεται κυρίως από δύο τροποσφαιρικά φαινόμενα διάδοσης, την απόσβεση λόγω βροχής και την αποπόλωση λόγω βροχής και παγοκρυστάλλων. Η απόσβεση λόγω βροχής υποβιβάζει και τα δύο ορθογώνια κανάλια κατά τον ίδιο τρόπο, μειώνοντας την ισχύ του επιθυμητού σήματος. Αν και η απόσβεση λόγω βροχής επηρεάζει όλα τα συστήματα ανεξαρτήτως πόλωσης, μόνο τα διπλά πολωμένα συστήματα είναι τρωτά στην αποπόλωση. Η αποπόλωση μπορεί να οριστεί ως μια αλλαγή στην κατάσταση πόλωσης του μεταδιδόμενου σήματος σύμφωνα με την οποία ένα μέρος της ισχύος που εκπέμπεται υπό μια δεδομένη πόλωση μεταπίπτει στην κάθετη πόλωση. Η μετάπτωση αυτή οφείλεται στην ανισοτροπία των τροποσφαιρικών υδρομετεωριτών και στην ύπαρξη παγοκρυστάλλων.

Το παρόν κεφάλαιο έχει στόχο να προβλέψει τη γενική απόδοση των ψηφιακών διπλά πολωμένων δορυφορικών συστημάτων που λειτουργούν στις ζώνες συχνοτήτων Ku και άνω. Η απόδοση εκφράζεται από τη σκοπιά της διαθεσιμότητας συστημάτων. Η διαθεσιμότητα αντιπροσωπεύει το ποσοστό του χρόνου (ή, ισοδύναμα, την πιθανότητα) κατά το οποίο μια δορυφορική ζεύξη λειτουργεί ικανοποιητικά.

Η προτεινόμενη μέθοδος καταλήγει στο ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο ένα διπλά πολωμένο σύστημα είναι εκτός λειτουργίας. Στους υπολογισμούς υπεισέρχονται παράμετροι, όπως η συχνότητα φέροντος, η γωνία κλίσης πόλωσης, η γωνία ανύψωσης και το σχέδιο διαμόρφωσης ενώ υπάρχει και η δυνατότητα να

προβλεφθεί επίσης και η διάκριση διασταύρωσης πόλωσης ($XPD_{antenna}$) που εισάγεται από μη ιδανικές κεραίες. Επιπλέον, με την επέκταση αυτή της μεθόδου, υπολογίζεται η πρόσθετη υποβάθμιση διαθεσιμότητας που υφίστανται τα διπλά πολωμένα κανάλια σε σύγκριση με τα συστήματα απλής πόλωσης.

6.2 Μέθοδος πρόβλεψης διαθεσιμότητας

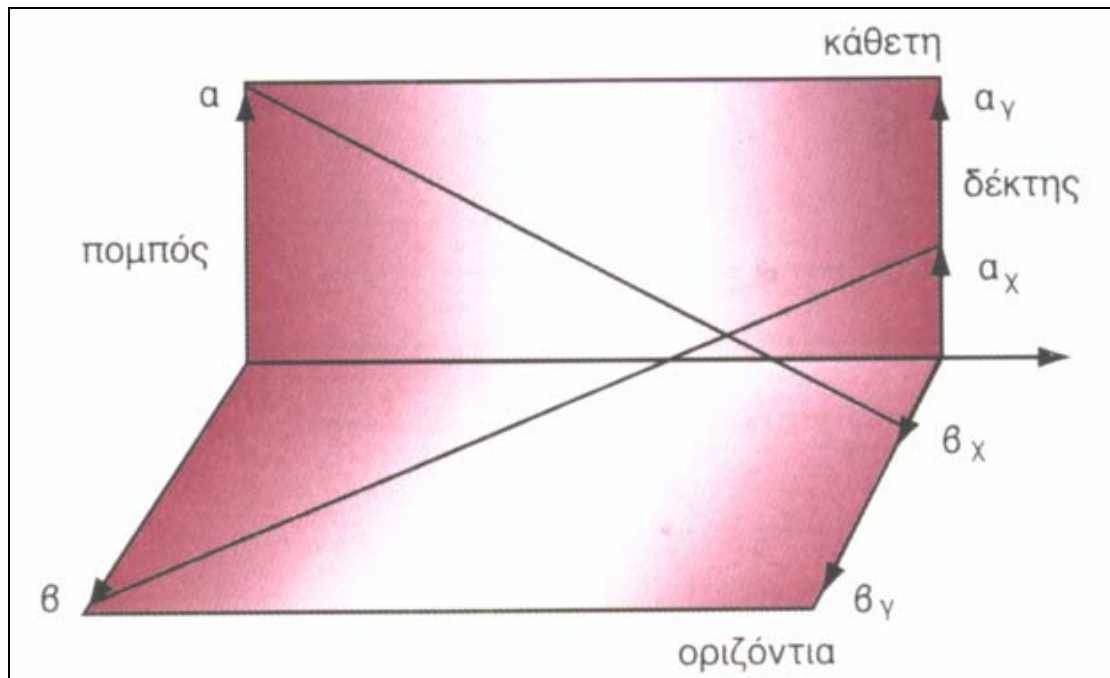
Οι παράγοντες διάδοσης που υπεισέρχονται στον προσδιορισμό της διαθεσιμότητας των διπλά πολωμένων δορυφορικών συστημάτων είναι η εξασθένηση (A_c) και η διάκριση διασταύρωσης πόλωσης (XPD).

Γενικά δύο κύματα έχουν ορθογωνικές πολώσεις αν τα ηλεκτρικά πεδία των κυμάτων διαγράφουν ταυτόσημες ελλείψεις σε αντίθετες κατευθύνσεις. Μια κεραία που είναι σχεδιασμένη να εκπέμπει ή να λαμβάνει σε μια πόλωση είναι αδύνατο να μπορεί να εκπέμπει ή να λάβει κύματα με ορθογώνια πόλωση. Η ιδιότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα αναχρησιμοποίησης συχνότητας. Στην πράξη σε τέτοια συστήματα θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η πιθανότητα αποπόλωσης του κύματος είτε λόγω ατέλειας των κεραιών, είτε λόγω χαρακτηριστικών του καναλιού μετάδοσης.

Στο σχήμα 6.1 στην πλευρά του πομπού εκπέμπονται ταυτόχρονα δύο σήματα a και β με κάθετες γραμμικές πολώσεις. Στην πλευρά του δέκτη έστω ότι τα σήματα a_γ και β_γ είναι τα σήματα που λαμβάνονται με την ίδια πόλωση (με αυτή των εκπεμπόμενων) και a_x και β_x τα σήματα που λαμβάνονται με ορθογώνια πόλωση. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να ορισθεί η διάκριση διασταύρωσης πόλωσης (XPD),

$$XPD = 20 \cdot \log \left(\frac{\alpha_\gamma}{\alpha_x} \right) \quad \text{σε dB} \quad (6.1)$$

Στην ιδανική περίπτωση στην οποία δεν εμφανίζεται αποπόλωση των σημάτων a και β η παράμετρος XPD τείνει στο άπειρο [Καψάλης, Κωττής, 2003]^[1].



Σχήμα 6.1: Λήψη ορθογωνικών πολώσεων.

Στην περίπτωση των μη ιδανικών κεραιών, στην έξοδο της κεραίας λαμβάνονται τα σήματα a_γ και β_γ είναι τα σήματα που εκπέμπονται με την ίδια πόλωση (με αυτή των λαμβανομένων στην είσοδο της κεραίας) και a_x και β_x τα σήματα που εκπέμπονται με ορθογώνια πόλωση όπως παρουσιάζονται στο σχήμα (6.1). Αυτό οφείλεται στις ατέλειες κατασκευής των κεραιών και η διάκριση διασταύρωσης πόλωσης δίνεται από τη σχέση (6.1) με $XPD = XPD_{antenna}$.

Η εξασθένιση (A_c) ευθύνεται για τη μείωση ισχύος στο ζητούμενο σήμα και οφείλεται κυρίως στη βροχή, ενώ η παράμετρος XPD αντιπροσωπεύει την αποπόλωση που εισάγεται στο σήμα από βροχή και παγοκρυστάλλους.

Στα ψηφιακά συστήματα επικοινωνιών, η πρόβλεψη της διαθεσιμότητας δορυφορικών ζεύξεων συσχετίζεται με την αξιολόγηση της ποιότητας μετάδοσης. Ο χρόνος διακοπής λειτουργίας αντιστοιχεί στη συνολική περίοδο κατά την οποία η παράμετρος του συστήματος BEP υπερβαίνει ένα καθορισμένο κατώτατο όριο. Αυτό το κατώτατο όριο προσδιορίζεται από την ελάχιστη απαραίτητη απόδοση που απαιτείται για ικανοποιητική γενική λειτουργία του συστήματος. Το κατώτατο αυτό όριο BEP κυμαίνεται από 0.001 ως 0.0001, ανάλογα με την εφαρμογή. Λόγω της απόσβεσης και της αποπόλωσης που υποβιβάζουν την BEP και επομένως μειώνουν τη διαθεσιμότητα των διπλά πολωμένων ψηφιακών συστημάτων, εμφανίζονται

επιπτώσεις στη μετάδοση σημάτων. Παρόλα αυτά, χρειάζεται να συνυπολογιστεί ένα πλήθος άλλων παραμέτρων του συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της φύσης του επιθυμητού και παρεμβάλλοντος σήματος, της συχνότητας, του είδους διαμόρφωσης, του εύρους ζώνης, των χρησιμοποιούμενων φίλτρων κλπ. Τεχνικές βασισμένες είτε στις αναλυτικές διατυπώσεις είτε στις προσομοιώσεις υπολογιστών, έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της επίπτωσης της εξασθένησης και της αποπόλωσης στην απόδοση (από την άποψη του BEP) των ψηφιακών συστημάτων επικοινωνιών. Στη συνέχεια, θεωρούμε ότι η αποπόλωση και η εξασθένηση ενεργούν ως πρόσθετος γκαουσιανός θόρυβος (gaussian noise) (η υπόθεση αυτή οδηγεί σε μια λογική προσέγγιση της πραγματικής υποβάθμισης της BEP , η οποία παρόλα αυτά σφάλει στην απαισιόδοξη περίπτωση). Με την προσέγγιση αυτή, λοιπόν, υπολογίζεται η διαθεσιμότητα από την προδιαγραφή ενός κατώτατου ορίου BEP μόνο, χωρίς να λάβει υπόψη με μεγάλη λεπτομέρεια τη φύση των πραγματικών σημάτων.

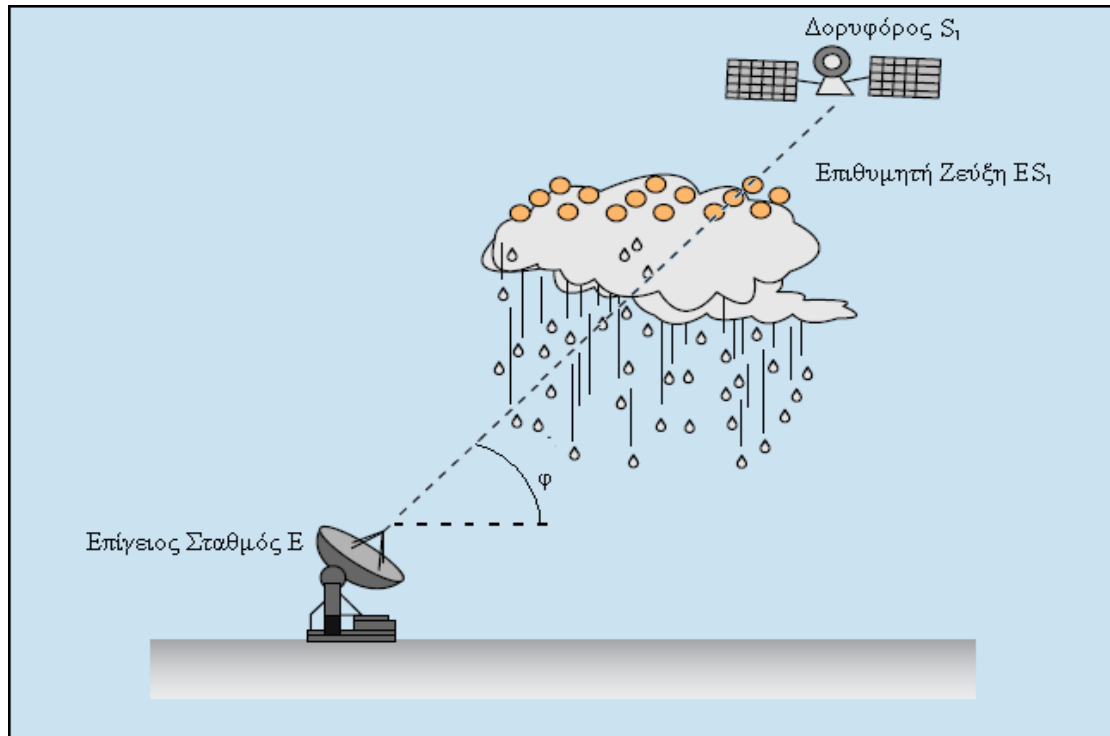
Όταν το λαμβανόμενο σήμα επιβαρύνεται μόνον από προσθετικό λευκό γκαουσιανό θόρυβο (AWGN), η σχέση μεταξύ BEP και του λόγου ενέργειας ψηφίου προς μονόπλευρη φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου (E_b / n_o) είναι γνωστή για τα χαρακτηριστικά δυαδικά σχέδια διαμόρφωσης. Χρησιμοποιείται για να προσδιορισθεί η ελάχιστη τιμή του λόγου E_b / n_o που απαιτείται για να ληφθεί το κατώτατο όριο πιθανότητας λάθους, BEP_{thr} . Έτσι, κατώφλι BEP αντιστοιχείται σε κατώφλι E_b / n_o , το οποίο καλείται ως $(E_b / n_o)_{thr}$. Η πιθανότητα διακοπής του συστήματος προκύπτει

$$Pr\{BEP \geq (BEP)_{thr}\} = Pr\{E_b / n_o \leq (E_b / n_o)_{thr}\} \quad (6.2)$$

Η γραφική παράσταση της BEP συναρτήσεως του E_b / n_o δίνει ένα σχήμα, όπου η BEP βελτιώνεται καθώς ο λόγος E_b / n_o αυξάνει.

Επιπλέον, θεωρώντας την αποπόλωση ως θόρυβο απλοποιείται ο υπολογισμός της επίδρασης της εξασθένησης και της αποπόλωσης στο λόγο E_b / n_o . Συγκεκριμένα, η εξασθένηση και η αποπόλωση μειώνουν την ενέργεια ψηφίου. Για να προκύψει η σχέση που συνδέει το λόγο E_b / n_o με την απόσβεση και την αποπόλωση αρχικά θεωρείται ένας επίγειος σταθμός E σε επικοινωνία με γεωστατικό δορυφόρο S_1 . Η γεωμετρία του προβλήματος φαίνεται στο σχήμα 6.2, όπου φ η γωνία ανύψωσης του κεκλιμένου ραδιοδρόμου. Παρακάτω ακολουθεί η στατιστική

θεώρηση του λόγου E_b/n_o κατά τη διάρκεια βροχόπτωσης και η εύρεση της επίδρασής της στο συνολικό χρόνο μη λειτουργίας αρχικά σε συστήματα απλής πόλωσης.



Σχήμα 6.2: Γεωμετρία δορυφορικού συστήματος.

Για το σύστημα του σχήματος 6.2, η απόσβεση του επιθυμητού σήματος συμβολίζεται με A_C . Μέσω της χρήσης πεδιακών μεγεθών ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι δυνατή η παρουσίαση της εξάρτησης του λόγου E_b/n_o από την απόσβεση με τη βοήθεια του σηματοθορυβικού λόγου. Τα σήματα που εμφανίζονται στην είσοδο ενός επίγειου σταθμού Ε με ζεύξη απλής πόλωσης (από δορυφόρο S) είναι

$|E_C|$ πλάτος ηλεκτρικού πεδίου κυρίου σήματος απουσία βροχής.

$|E_N|$ πλάτος θορύβου.

Ο συμβολισμός $|E'_C|$ αναφέρεται στο ανωτέρω μέγεθος παρουσία βροχής.

Η απόσβεση βροχής του κυρίου σήματος είναι

$$A_C = 10 \log CPA = 10 \log \frac{|E_C|^2}{|E'_C|^2} \quad (6.3)$$

Για το σηματοθορυβικό λόγο καθαρού ουρανού από τη σχέση (5.3) ισχύει

$$CNR_{nom} = 10 \cdot \log \left(\frac{C_{nom}}{N} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{|E_C|^2}{|E_N|^2} \right) \quad \text{σε dB}$$

Αντίστοιχο αποτέλεσμα με τη σχέση (5.3) προκύπτει για τις ψηφιακές δορυφορικές τηλεπικοινωνίες, με τη διαφορά ότι ο CNR αντικαθίσταται από τον αντίστοιχο όρο E_b/n_o , εάν ληφθούν υπόψη οι παράμετροι R και B όπως παρουσιάζεται στη σχέση

$$\begin{aligned} \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} &= 10 \cdot \log \left(\frac{E_{bnom}}{n_o} \right)_{n_o \cdot B = N}^{R \cdot E_b = C} = 10 \cdot \log \left(\frac{\frac{C_{nom}}{R}}{\frac{N}{B}} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{C_{nom} \cdot B}{N \cdot R} \right)^{\Gamma = \frac{R}{B}} \\ &= 10 \cdot \log \left(\frac{C_{nom}}{N} \right) - 10 \cdot \log(\Gamma) \stackrel{(5.3)}{=} CNR_{nom} - 10 \cdot \log(\Gamma) = \\ &= 10 \cdot \log \left(\frac{|E_C|^2}{|E_N|^2} \right) - 10 \cdot \log(\Gamma) \quad \text{σε dB} \end{aligned} \quad (6.4)$$

όπου R ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας, B το εύρος ζώνης του καναλιού και Γ η φασματική πυκνότητα $\left(\Gamma = \frac{R}{B} \right)$. Η σχέση (6.4) εκφράζεται συναρτήσει των βασικών παραμέτρων μιας τηλεπικοινωνιακής ζεύξης [Ha, 1989]^[24] και αναφέρεται σε συνθήκες καθαρού ουρανού (clear sky conditions).

Για τη ζεύξη μεταξύ του δορυφόρου S και του επίγειου σταθμού E, θεωρείται ότι οι κεραιές είναι πλήρως ευθυγραμμισμένες για να υπάρχει η βέλτιστη δυνατή σκόπευση και, επομένως, ελάχιστες απώλειες. Με το παραπάνω δεδομένο προκύπτει η σχέση

$$\left(\frac{E_b}{n_o} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{|E'_C|^2}{|E_N|^2} \right) - 10 \cdot \log(\Gamma) = 10 \cdot \log \left(\frac{|E'_C|^2}{|E_N|^2} \cdot \frac{|E_C|^2}{|E_C|^2} \right) - 10 \cdot \log(\Gamma) =$$

$$\begin{aligned}
 &= 10 \cdot \log \left(\frac{|E_C|^2}{|E_N|^2} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{|E'_C|^2}{|E_C|^2} \right) - 10 \cdot \log(\Gamma) \stackrel{(6.3)}{=} \stackrel{(6.4)}{=} \\
 &= \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} - A_C \quad \text{σε dB} \quad (6.5)
 \end{aligned}$$

Γενικά, τόσο σε συστήματα απλής πόλωσης (όπως φαίνεται από τη σχέση (6.5) αλλά και σε συστήματα διπλής πόλωσης, όπως θα φανεί και στη συνέχεια του κεφαλαίου) ένας κατάλληλος τρόπος για την παρουσίαση της μείωσης του λόγου E_b / n_o λόγω της εξασθένησης και της αποπόλωσης είναι μέσω της σχέσης

$$\frac{E_b}{n_o} = \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} - F \quad (6.6)$$

όπου $(E_b / n_o)_{nom}$ είναι ο λόγος E_b / n_o υπό συνθήκες καθαρού ουρανού (απουσία παρεμβολών). Το μέγεθος F είναι ο παράγοντας μείωσης του E_b / n_o που προκαλείται λόγω απόσβεσης και αποπόλωσης.

Στα απλής πόλωσης συστήματα, η παράμετρος F αντιστοιχεί στην εξασθένηση A_C όπως φαίνεται από τη σχέση (6.5).

Για τα συστήματα διπλής πόλωσης, η γεωμετρία του προβλήματος είναι ίδια με αυτήν της απλής πόλωσης. Το κύριο δορυφορικό σύστημα θεωρείται ότι χρησιμοποιεί δυο ορθογώνιες πολώσεις. Συνεπώς, προκύπτει μια νέα πηγή παρενόχλησης που προκύπτει από την αποπόλωση του Η/Μ κύματος διπλής πόλωσης και προέρχεται από το ορθογώνιο κανάλι. Η αποπόλωση οφείλεται στη βροχή αλλά και στους παγοκρυστάλλους. Επίσης, γίνεται η θεώρηση ότι η συγκεκριμένη παρεμβολή είναι ασυσχέτιστη προς το θερμικό θόρυβο. Εξετάζεται, λοιπόν, η στατιστική περιγραφή του λόγου E_b / n_o που είναι :

$$\frac{E_b}{n_o} = \frac{C}{N} - 10 \cdot \log(\Gamma) = CNDR - 10 \cdot \log(\Gamma) = 10 \cdot \log \left(\frac{C}{N+D} \right) - 10 \cdot \log(\Gamma) \quad \text{σε dB} \quad (6.7)$$

όπου D η ισχύς του σήματος διασταυρούμενης πόλωσης στην είσοδο του επίγειου σταθμού και οφείλεται στη βροχής και την ύπαρξη παγοκρυστάλλων στα υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας [Vasseur, 2000]^[51].

Η διάκριση διασταύρωσης πόλωσης (XPD) λόγω βροχής δίνεται από τη σχέση (βλέπε §4.9)

$$(XPD)(p\%) = U - V(f) \cdot \log[A_C(p\%)] + C_\sigma(p\%) \quad (6.8)$$

Οι παράμετροι της παραπάνω εξίσωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4 με τον ίδιο ακριβώς συμβολισμό. Εφόσον υποθεθεί ότι η απόσβεση του επιθυμητού σήματος A_C λόγω βροχής ακολουθεί κάποια από τις κατανομές λογαριθμοκανονική, γάμμα και Weibull ισχύει

$$p(A_C)\% = 100 \cdot P_{out} \quad (6.9)$$

Επομένως, η διάκριση διασταύρωσης πόλωσης λόγω βροχής μπορεί να εκφρασθεί συναρτήσει της αντίστοιχης απόσβεσης A_C για την ίδια πιθανότητα υπέρβασης από τη σχέση ([ITU-R, P.530-10]^[52], [ITU-R, P.618-7]^[16], [Stutzman and Runyon, 1984]^[53])

$$XPD(A_C) = \{U - V \cdot \log(A_C) + C_\sigma(p(A_C)\%)\} \quad (6.10)$$

Η ονομαστική τιμή του XPD που είναι

$$XPD_{nom} = 10 \cdot \log\left(\frac{C_{nom}}{D_{nom}}\right) \quad (6.11)$$

Το μέγεθος D_{nom} αντιστοιχεί στην ισχύ του σήματος διασταυρούμενης πόλωσης στην είσοδο του επίγειου σταθμού απουσία βροχής. Από τη σχέση (6.7) προκύπτει

$$\frac{E_b}{n_o} = \left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{nom} - A_C - 10 \cdot \log\left(1 + \Gamma \cdot 10^{\left(\left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{nom} - A_C - XPD(A_C)\right) / 10}\right) \quad (6.12a)$$

με το $XPD(A_C)$ να δίνεται από την σχέση (6.10). Απόδειξη της σχέσης (6.12a) με πεδιακά μεγέθη δίνεται στο Παράρτημα ΣΤ.

Η σχέση (6.12a) έχει ενσωματώσει μόνο τα αποτελέσματα αποπόλωσης βροχής και όχι ατελειών που δημιουργούν φαινόμενα διάκρισης διασταύρωσης πόλωσης των κεραιών. Αν υποθεθεί ότι η κεραία της σύνδεσης δεν είναι ιδανική, δηλαδή η παράμετρος $XPD_{antenna}$ δεν έχει μεγάλες τιμές (θεωρητικά άπειρες), αλλά

συγκρίσιμες με την αποπόλωση της βροχής τότε η σχέση (6.12a) μετατρέπεται στην (6.12b) η οποία αποδεικνύεται και στο Παράρτημα Z.

$$\frac{E_b}{n_o} = \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} - A_C +$$

$$-10 \cdot \log \left(1 + \Gamma \cdot 10^{\left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} / 10} \cdot \left(10^{\frac{-A_C - XPD(A_C)}{10}} - 10^{\frac{XPD_{antenna}}{10}} \right) \right)$$

(6.12b)

Στα συστήματα επικοινωνιών διπλής πόλωσης λοιπόν, η σχέση (6.6) με αντικατάσταση της παραμέτρου F καταλήγει

$$\frac{E_b}{n_o} = \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} - A_C +$$

$$-10 \cdot \log \left(1 + \Gamma \cdot 10^{\left(\left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} - A_C - XPD(A_C) \right) / 10} \right)$$

(6.13)

όπου:

$$F = A_C + 10 \cdot \log \left(1 + \Gamma \cdot 10^{\left(\left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} - A_C - XPD(A_C) \right) / 10} \right)$$

(6.14)

Ο όρος F αποτελείται από την εξασθένηση σε dB και από ένα λογαριθμικό όρο. Αυτός ο όρος μπορεί να θεωρηθεί ως μια επιπλέον εξασθένηση που οφείλεται στη διπλά πολωμένη ζεύξη. Ο όρος αυτός εξαρτάται από δυο συσχετισμένες με το σύστημα παραμέτρους, το λόγο $(E_b / n_o)_{nom}$ και τη φασματική πυκνότητα Γ καθώς, επίσης, και από δύο όρους που σχετίζονται με τη διάδοση, A_C , XPD .

Σύμφωνα με την (6.2), η πιθανότητα υπέρβασης είναι το ποσοστό του χρόνου στο οποίο ο λόγος E_b / n_o δεν υπερβαίνει μια τιμή κατωφλίου. Στον υπολογισμό του

λόγου E_b/n_o , κρίσιμος είναι ο υπολογισμός του παράγοντα F . Έτσι η σχέση (6.2) εξελίσσεται στην

$$Pr\{BER \geq (BER)_{thr}\} = Pr\left\{\frac{E_b}{n_o} \leq \left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{thr}\right\} = Pr\{F \geq F_o\} \quad (6.15)$$

6.3 Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας δορυφορικού συστήματος παρουσία βροχής και παγοκρυστάλλων

6.3.1 Σύστημα Απλής Πόλωσης

Έστω επίγειος σταθμό E σε επικοινωνία με δορυφόρο S_1 ο οποίος έχει τεθεί σε γεωστατική τροχιά. Η γεωμετρία του προβλήματος φαίνεται στο σχήμα 6.1, όπου φ η γωνία ανύψωσης του κεκλιμένου ραδιοδρόμου. Στη συνέχεια, ακολουθεί η στατιστική θεώρηση του λόγου E_b/n_o κατά τη διάρκεια βροχόπτωσης και η εύρεση της επίδρασης της βροχόπτωσης στον ολικό χρόνο μη λειτουργίας.

Η πιθανότητα του ενδεχομένου να τεθεί το σύστημα εκτός λειτουργίας εκφράζεται από τη σχέση

$$P_{out} = P\left[\frac{E_b}{n_o} \leq M\right] \quad \text{σε dB} \quad (6.16a)$$

Αντίθετα, για τον προσδιορισμό της ποιότητας υπηρεσιών μιας δορυφορικής ζεύξης και τη σχεδίαση της αντίστοιχης καμπύλης, πρέπει να υπολογισθεί η πιθανότητα υπέρβασης μιας στάθμης κατωφλίου, δηλαδή η πιθανότητα

$$P_M = P\left[\frac{E_b}{n_o} \geq M\right] \quad \text{σε dB} \quad (6.16b)$$

Αυτή είναι η πιθανότητα ώστε ο λόγος E_b/n_o στην είσοδο του αποκωδικοποιητή λαμβάνοντας υπόψη την απόσβεση λόγω βροχής να υπερβαίνει τη στάθμη M . Κατά τη σχεδίαση των δορυφορικών συστημάτων επικοινωνιών, πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη ότι η ισχύς ενός δορυφορικού αναμεταδότη δεν

παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του αλλά μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου.

Για τον προσδιορισμό της πιθανότητας να τεθεί το σύστημα εκτός λειτουργίας γίνονται οι γενικές παραδοχές που έγιναν στο Κεφάλαιο 5^ο (βλέπε §5.2.1).

Σύμφωνα με τις προηγούμενες υποθέσεις, και κυρίως, λόγω της τελευταίας η πιθανότητα υπέρβασης, με $A \geq 0$, μπορεί να εκφρασθεί ως

$$P_{out} = Pr\left(\left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{thr} \leq M\right) = Pr(A \geq A_M) = Pr(A' \geq A_M \cdot \cos(\varphi)) \quad (6.17)$$

όπου

$$A_M = \begin{cases} \left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{nom} - \left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{thr} & \text{αν } \left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{nom} \geq \left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{thr} \\ 0 & \text{άλλως} \end{cases} \quad (6.18)$$

το περιθώριο διαλείψεων του συστήματος για τη συγκεκριμένη στάθμη M. Με βάση τη σχέση (6.17), η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του συστήματος προκύπτει από το ολοκλήρωμα

$$P_{out} = \int_{A_M \times \cos(\theta)}^{+\infty} f_A(x) dx \quad (6.19)$$

όπου $f_A(x)$ η πυκνότητα πιθανότητας της απόσβεσης λόγω βροχής κατά μήκος της προβολής της δορυφορικής διαδρομής στο οριζόντιο επίπεδο.

- Υιοθετώντας τη λογαριθμοκανονική κατανομή για τη συνάρτηση $f_A(x)$, το τελικό αποτέλεσμα για την P_{out} προκύπτει

$$P_{out} = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{u_M}{\sqrt{2}}\right) \quad (6.20)$$

όπου

$$u_M = \frac{\ln(A_C \cdot \cos(\varphi)) - \ln(A_m)}{S_a} \quad (6.21)$$

και S_a , A_m στατιστικές παράμετροι που σχετίζονται με τα κλιματολογικά δεδομένα κάθε περιοχής. Αν στις (6.20) και (6.21) τεθεί $A_C = A_M$, η (6.20) δίνει την πιθανότητα διακοπής της ζεύξης, δηλαδή την πιθανότητα

$$P_{out} = Pr\left(\left(\frac{E_b}{n_o}\right) \leq \left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{thr}\right) \quad (6.22)$$

Ο χρόνος διακοπής της ζεύξης σε min/year προκύπτει από τη σχέση

$$T_{out} = 525.600 \cdot P_{out} \quad (6.23)$$

Η προηγούμενη ανάλυση συνδέει την ποιότητα υπηρεσιών (επίδοση) και τη διαθεσιμότητα μιας δορυφορικής ζεύξης με τη διαθέσιμη ισχύ του δορυφορικού αναμεταδότη. Πράγματι, η απαίτηση

$$Pr\left(\left(\frac{E_b}{n_o}\right) \leq \left(\frac{E_b}{n_o}\right)_k\right) = P_k \quad (6.24)$$

δηλαδή, η απαίτηση μια συγκεκριμένη στάθμη να επιτυγχάνεται με συγκεκριμένη πιθανότητα υπέρβασης, καθορίζει πλήρως τη βασική παράμετρο $(E_b / n_o)_{thr}$. Αυτό γίνεται θέτοντας στην (6.16a) $M = (E_b / n_o)_k$.

Τότε, η αντίστοιχη πιθανότητα υπέρβασης πρέπει να είναι P_k . Πλέον, η σχέση μεταξύ οποιασδήποτε στάθμης E_b / n_o και της αντίστοιχης πιθανότητας υπέρβασης έχει καθορισθεί μονοσήμαντα. Η αντίστοιχη καμπύλη επίδοσης μπορεί να σχεδιασθεί για να διαπιστωθεί αν ικανοποιεί τη μάσκα επίδοσης που συστήνει η ITU-R για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

- Υιοθετώντας τη γάμμα κατανομή για τη συνάρτηση $f_A(x)$, το τελικό αποτέλεσμα για την P_{out} προκύπτει

$$P_{out} = 1 - \frac{\gamma(v_a, b_a \cdot A_C \cdot \cos(\varphi))}{\Gamma(v_a)} \quad (6.25)$$

όπου η συνάρτηση $\gamma(\alpha, x)$ η ατελής συνάρτηση γάμμα που δίνεται από το ολοκλήρωμα ορισμού της

$$\gamma(\alpha, x) = \int_0^x t^{\alpha-1} \cdot e^{-t} dt$$

(6.26a)

$\Gamma(x)$ είναι η γνωστή συνάρτηση γάμμα

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \cdot e^{-t} dt \quad (6.26b)$$

και b_a, v_a στατιστικές παράμετροι που σχετίζονται με τα κλιματολογικά δεδομένα κάθε περιοχής. Αν στην (6.24) τεθεί $M = (E_b / n_o)_{thr}$, η (6.24) δίδει την πιθανότητα διακοπής της ζεύξης, δηλαδή την πιθανότητα

$$P_{out} = Pr \left(\left(\frac{E_b}{n_o} \right) \leq \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{thr} \right) \quad (6.27)$$

Ο χρόνος διακοπής της ζεύξης σε min/year προκύπτει από τη σχέση (6.23)

- Υιοθετώντας τη Weibull κατανομή για τη συνάρτηση $f_A(x)$, το τελικό αποτέλεσμα για την P_{out} προκύπτει

$$P_{out} = \exp \left\{ -w_I \cdot \left[\langle (A_C) \cdot \cos(\varphi) \rangle^{m_I} \right] \right\}$$

(6.28)

και w_I, m_I στατιστικές παράμετροι που σχετίζονται με τα κλιματολογικά δεδομένα κάθε περιοχής. Αν στην (6.24) τεθεί $M = (E_b / n_o)_{thr}$, η (6.24) δίδει την πιθανότητα διακοπής της ζεύξης, δηλαδή την πιθανότητα

$$P_{out} = Pr \left(\left(\frac{E_b}{n_o} \right) \leq \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{thr} \right) \quad (6.29)$$

Ο χρόνος διακοπής της ζεύξης σε min/year προκύπτει από τη σχέση (6.23)

6.3.2 Σύστημα διπλής πόλωσης με βροχή και χωρίς παγοκρυστάλλους

Η γεωμετρία του προβλήματος είναι ίδια με αυτήν της απλής πόλωσης. Το κύριο δορυφορικό σύστημα θεωρείται ότι χρησιμοποιεί δυο ορθογώνιες πολώσεις. Συνεπώς, προστίθεται μια νέα πηγή παρενόχλησης που προκύπτει από την αποπόλωση του Η/Μ κύματος διπλής πόλωσης και προέρχεται από το ορθογώνιο κανάλι. Η αποπόλωση στο κανάλι διάδοσης οφείλεται στη βροχή αλλά και στους παγοκρυστάλλους. Επίσης, γίνεται η θεώρηση ότι η συγκεκριμένη παρεμβολή είναι ασυσχέτιστη προς το θερμικό θόρυβο.

Η πιθανότητα του ενδεχομένου μη διαθεσιμότητας του συστήματος σε μαθηματικούς όρους εκφράζεται από τη σχέση

$$\begin{aligned}
 P_{out} &= P \left[\left(\frac{E_b}{n_o} \right) \leq \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{thr} \right] = \\
 &= P \left[\left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} - A_C - 10 \log \left[1 + \Gamma \cdot 10^{\frac{\left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} - XPD(A_c)}{10}} \right] \leq \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{thr} \right]
 \end{aligned} \tag{6.30}$$

Για να υπολογιστεί η προηγούμενη πιθανότητα γίνονται ακριβώς οι ίδιες υποθέσεις, με την περίπτωση της απλής πόλωσης, όσον αφορά την κατανομή των αποσβέσεων λόγω βροχής, τη χωρική ανομοιογένεια του ρυθμού βροχόπτωσης καθώς και την κατανομή του μεγέθους των σταγόνων βροχής. Λαμβάνοντας υπόψη την υπόθεση του Crane, η σχέση (6.30) γράφεται

$$P_{out} = P \left[\frac{A'_C}{\cos \varphi} \geq \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} - \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{thr} - 10 \cdot \log \left(1 + \Gamma \cdot 10^{\frac{\left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} - \frac{A'_C}{\cos \varphi} - \left(U - V \log \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) + C_\sigma \left(p \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) \% \right) \right)}{10}} \right) \right] \tag{6.31}$$

Για τον προσδιορισμό της πιθανότητας της σχέσης (6.31), χρειάζεται αρχικά ο υπολογισμός της τιμής της απόσβεσης A'_C με δεδομένη τιμή κατωφλίου $(E_b / n_o)_{thr}$.

Για το λόγο αυτό επιλύεται ως προς A'_C η υπερβατική εξίσωση

$$\frac{A'_C}{\cos \varphi} = \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} - \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{thr} - 10 \cdot \log \left(1 + \Gamma \cdot 10^{\frac{\left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} - \frac{A'_C}{\cos \varphi} - \left(U - V \log \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) + C_\sigma \left(p \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) \% \right) \right)}{10}} \right) \quad (6.32)$$

Επιλύοντας αριθμητικά την υπερβατική αυτή εξίσωση προκύπτει η τιμή A'_C . Με την τιμή αυτή και ανάλογα με το στατιστικό μοντέλο (λογαριθμοκανονικό, γάμμα και Weibull) που ακολουθείται προκύπτουν οι πιθανότητες διακοπής δορυφορικού συστήματος από τις σχέσεις (6.20), (6.25) και (6.28) αντίστοιχα (με $A_C = \frac{A'_C}{\cos \varphi}$) [Κανελλόπουλος και Βεντούρας, 1990]^[54].

6.3.3 Σύστημα διπλής πόλωσης με βροχή και παγοκρυστάλλους

Για να υπολογιστεί η πιθανότητα υπέρβασης γίνονται ακριβώς οι ίδιες υποθέσεις, με την περίπτωση της απλής πόλωσης και διπλής πόλωσης χωρίς παγοκρυστάλλους, όσον αφορά την κατανομή των αποσβέσεων λόγω βροχής, τη χωρική ανομοιογένεια του ρυθμού βροχόπτωσης καθώς και την κατανομή του μεγέθους των σταγόνων βροχής. Λαμβάνοντας υπόψη την υπόθεση του Crane, η σχέση (6.30) γράφεται

$$P_{out} = P \left[\frac{A'_C}{\cos \varphi} \geq \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} - \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{thr} + \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} - \frac{A'_C}{\cos \varphi} - \left\{ \left(U - V \log \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) + C_\sigma \left(p \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) \% \right) \right) \left\{ 1 - \frac{0.3 + 0.1 \log \left(p \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) \% \right)}{2} \right\} \right\} \right] \quad (6.33)$$

Για τον προσδιορισμό της πιθανότητας της σχέσης (6.33), χρειάζεται αρχικά ο υπολογισμός της τιμής της απόσβεσης A'_C με δεδομένη τιμή κατωφλίου $(E_b / n_o)_{thr}$. Για το λόγο αυτό επιλύεται ως προς A'_C η υπερβατική εξίσωση [Κανελλόπουλος και Βεντούρας,1990]^[54]

$$\frac{A'_C}{\cos \varphi} = \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} - \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{thr} + \left(-10 \cdot \log \left[1 + \Gamma \cdot 10^{\frac{\left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} - \frac{A'_C}{\cos \varphi} \left\{ U - V \log \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) + C_\sigma \left(p \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) \% \right) \right\} \cdot \left[1 - \frac{0.3 + 0.1 \log \left(p \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) \% \right)}{2} \right]}{10} \right]} \right) \right) \quad (6.34)$$

6.4 Επιδείνωση Διπλής Πόλωσης (Dual Polarization Aggravation DPA)

Για να ποσοτικοποιηθεί η επιδείνωση που λαμβάνεται από τη χρήση της τεχνικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας χρησιμοποιείται το μέγεθος *DPA* (Dual Polarization Aggravation). Το *DPA* αναφέρεται στην επιδείνωση του λόγου E_b / n_o όταν χρησιμοποιείται η διπλή πόλωση και δίνεται από τη

$$DPA = \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{thr}^S (p\%) - \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{thr}^D (p\%) \quad (6.35)$$

όπου $(E_b / n_o)_{thr}^S (p\%)$, $(E_b / n_o)_{thr}^D (p\%)$ είναι τα επίπεδα του λόγου E_b / n_o στους δέκτες που χρησιμοποιούν την απλή και διπλή πόλωση για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης αντίστοιχα. Το *DPA* ισούται με τη διαφορά μεταξύ του λόγου E_b / n_o της απλής πόλωσης και της τιμής του λόγου E_b / n_o της διπλής πόλωσης σε ένα περιβάλλον βροχής και παγοκρυστάλλων υπό δεδομένη πιθανότητα διακοπής λειτουργίας.

Ακόμη, το *DPA* (DPA_{ice}) μπορεί να περιγράψει και την επιδείνωση του λόγου E_b / n_o όταν χρησιμοποιείται η διπλή πόλωση και συνυπολογίζεται η επίδραση

των παγοκρυστάλλων (icecrystals) έναντι της διπλής πόλωσης χωρίς παγοκρυστάλλους. Δηλαδή το DPA_{ice} μπορεί να ποσοτικοποιήσει την επιδείνωση της απόδοσης που προκύπτει συνυπολογίζοντας τους παγοκρυστάλλους και δίνεται από τη σχέση

$$DPA_{ice} = \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{thr}^{D, nonicecrystals} (p\%) - \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{thr}^{D, icecrystals} (p\%) \quad (6.36)$$

όπου $\left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{thr}^{D, nonicecrystals} (p\%)$, $\left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{thr}^{D, icecrystals} (p\%)$ είναι τα επίπεδα του λόγου E_b / n_o στους δέκτες που χρησιμοποιούν τη διπλή πόλωση χωρίς τη θεώρηση των παγοκρυστάλλων και τη διπλή πόλωση με τη θεώρηση των παγοκρυστάλλων για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης αντίστοιχα. Το DPA_{ice} ισούται με τη διαφορά μεταξύ του λόγου E_b / n_o της διπλής πόλωσης σε ένα περιβάλλον βροχής χωρίς παγοκρυστάλλους και της τιμής του λόγου E_b / n_o της διπλής πόλωσης σε ένα περιβάλλον βροχής και παγοκρυστάλλων υπό δεδομένη πιθανότητα διακοπής λειτουργίας.

6.4.1 Σύστημα Απλής Πόλωσης

Για τον υπολογισμό του μεγέθους DPA , κύριο μέλημα είναι ο υπολογισμός της τιμής του λόγου E_b / n_o στην απλή πόλωση για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης. Για να γίνει αυτό, ανάλογα με το μοντέλο (λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull) που ακολουθείται προκύπτουν οι τιμές των απόσβεσης από τις σχέσεις (5.39), (5.41) και (5.42) αντίστοιχα υπό δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης P_k . Το κατώφλι $\left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{thr}^S (100 \cdot P_k \%)$ (με $A_c \geq 0$) προκύπτει για κάθε μοντέλο από τη σχέση

$$\left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{thr}^S = \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{thr}^S (100 \cdot P_k \%) = \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} - A_c \quad (6.37)$$

6.4.2 Σύστημα διπλής πόλωσης με βροχή και χωρίς παγοκρυστάλλους

Αφού υπολογίστηκε η τιμή κατώφλιου για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης για την απλή πόλωση, αυτό που μένει είναι να προσδιοριστεί η τιμή κατώφλιου στα συστήματα διπλής πόλωσης. Για το σύστημα διπλής πόλωσης χωρίς παγοκρυστάλλους λαμβάνονται οι παρακάτω τρεις περιπτώσεις (λογαριθμοκανονική, γάμμα, Weibull κατανομή) με δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης P_k και

$$\left(\frac{E_b}{n_o}\right) = \left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{thr}^{nonicecrystals} (100 \cdot P_k \%)^D$$

Για τη λογαριθμοκανονική, γάμμα και Weibull κατανομή υπολογίστηκε η τιμή της απόσβεσης A_C από τις σχέσεις (5.39), (5.41) και (5.42) αντίστοιχα.

Το κατώφλι $(E_b / n_o)_{thr}^{nonicecrystals} (100 \cdot P_k \%)$ (με $A_C \geq 0$) προκύπτει από τη σχέση (6.12a) με αντικατάσταση της σχέσης

$$XPD = XPD_{nonicecrystals} = \left\{ \left(U - V \log \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) + C_\sigma \left(P \left(\frac{A'_C}{\cos \varphi} \right) \% \right) \right) \right\} \quad (6.38)$$

αν θεωρηθεί κεραία με $XPD \rightarrow \infty$ (ιδανική κεραία). Στην περίπτωση που η κεραία είναι μη ιδανική ($XPD \ll \infty$), το κατώφλι $(E_b / n_o)_{thr}^{nonicecrystals} (100 \cdot P_k \%)$ προκύπτει από τη σχέση (6.12b) με αντικατάσταση της σχέσης (6.38).

Το DPA στην περίπτωση συστημάτων διπλής πόλωσης με βροχή και χωρίς παγοκρυστάλλους δίνεται από τη σχέση

$$DPA = \left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{thr}^S (100 \cdot P_k \%) - \left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{thr}^{nonicecrystals} (100 \cdot P_k \%) \quad (6.39)$$

6.4.3 Σύστημα διπλής πόλωσης με βροχή και παγοκρυστάλλους

Για το σύστημα διπλής πόλωσης με παγοκρυστάλλους λαμβάνονται οι παρακάτω τρεις περιπτώσεις (λογαριθμοκανονική, γάμα, Weibull κατανομή) με δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης P_k και

$$\left(\frac{E_b}{n_o}\right) = \left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{thr}^{icecrystals} (100 \cdot P_k \%)$$

Για τη λογαριθμοκανονική, γάμμα και Weibull κατανομή υπολογίστηκε η τιμή της απόσβεσης A_c από τις σχέσεις (5.39), (5.41) και (5.42) αντίστοιχα.

Το κατώφλι $(E_b / n_o)_{thr}^{icecrystals} (100 \cdot P_k \%)$ (με $A_c \geq 0$) προκύπτει από τη σχέση (6.12a) με αντικατάσταση της σχέσης

$$XPD = XPD_{icecrystals} = \left\{ \left[U - V \log\left(\frac{A'_c}{\cos \varphi}\right) + C_\sigma \left(p\left(\frac{A'_c}{\cos \varphi}\right) \% \right) \right] \cdot \left[1 - \frac{0.3 + 0.1 \log\left(p\left(\frac{A'_c}{\cos \varphi}\right) \%\right)}{2} \right] \right\} \quad (6.40)$$

αν θεωρηθεί κεραία με $XPD \rightarrow \infty$ (ιδανική κεραία). Στην περίπτωση που η κεραία είναι μη ιδανική ($XPD \ll \infty$), το κατώφλι $(E_b / n_o)_{thr}^{icecrystals} (100 \cdot P_k \%)$ προκύπτει από τη σχέση (6.12b) με αντικατάσταση της σχέσης (6.40).

Το DPA στην περίπτωση συστημάτων διπλής πόλωσης με βροχή και με παγοκρυστάλλους δίνεται από τη σχέση

$$DPA = \left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{thr}^S (100 \cdot P_k \%) - \left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{thr}^{D, nonicecrystals} (100 \cdot P_k \%) \quad (6.41)$$

Το DPA_{ice} στην περίπτωση συστημάτων διπλής πόλωσης δίνεται από τη σχέση

$$DPA_{ice} = \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{thr}^{nonicecrystals} (100 \cdot P_k \%) - \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{thr}^{icecrystals} (100 \cdot P_k \%) \quad (6.42)$$

6.5 Αποδοτική χρησιμοποίηση καναλιού

Για εφαρμογές VSAT σε συχνότητες άνω της Ku ζώνης, τα σταθερά περιθώρια ισχύος, για υψηλές διαθεσιμότητες, χάνουν το πλεονέκτημα χαμηλού κόστους, οπότε απαιτούνται προσαρμοστικές τεχνικές για την βελτίωση της χρησιμοποίησης του καναλιού. Στις περιπτώσεις αυτές, ο καλύτερος τρόπος για τον σχεδιασμό συστημάτων επικοινωνιών είναι η θεώρηση, πρώτα, της χωρητικότητας καναλιού και στη συνέχεια ο σχεδιασμός ενός μέσου αποδοτικής χρησιμοποίησης.

Το κανάλι εδώ αναφέρεται όχι μόνο στο φυσικό μέσο διαμέσου του οποίου λαμβάνει χώρα η διάδοση, αλλά επίσης και στα διάφορα τμήματα του πομπού και του δέκτη. Έτσι, αντικαθιστώντας ένα τμήμα του τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού με ένα άλλο, δημιουργείται ένα διαφορετικό κανάλι. Η χωρητικότητα καναλιού κατά Shannon αποτελεί προσδιοριστικό στοιχείο ενός επικοινωνιακού συστήματος, αφού δίνει τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης σημάτων στο κανάλι. Στην περίπτωση ενός καναλιού με απώλειες, η χωρητικότητα μεταβάλλεται σύμφωνα με τις μεταβολές στο μέσο διάδοσης. Είναι, κατά κάποιον τρόπο, σαν το κανάλι να «κληρονομεί» τις στατιστικές ιδιότητες της συνολικής διαδικασίας απωλειών. Το κεφάλαιο αυτό εμβαθύνει στο παραπάνω πρόβλημα, προσδιορίζοντας τη μέγιστη δυνατή χωρητικότητα και την βέλτιστη χρησιμοποίηση της, θεωρώντας μεθόδους προσαρμοστικής διαμόρφωσης (AM) και μείωσης του ρυθμού δεδομένων (DRR).

6.5.1 Η χωρητικότητα καναλιού θεωρώντας τις απώλειες διάδοσης

Για συνεχές κανάλι με προσθετικό λευκό θόρυβο Gauss (AWGN) η χωρητικότητα $C_{Shannon}$ δίνεται από το νόμο του Shannon

$$C_{Shannon} = B \log_2 \left(1 + \frac{C}{N} \right) \quad (b/s) \quad (6.43)$$

όπου B η χωρητικότητα του καναλιού σε Hz και C/N ο σηματοθορυβικός λόγος στο κανάλι. Θεωρητικά είναι εφικτή η εκπομπή σχεδόν στο ρυθμό αυτό, με τον ρυθμό των λαθών να προσεγγίζει το μηδέν όσο κοντά θέλουμε. Το πρόβλημα είναι ότι ο Shannon δεν προσδιόρισε κάποια τεχνική για την επίτευξη του στόχου αυτού. Απέδειξε μόνο ότι απαιτούνταν σύνθετες τεχνικές κωδικοποίησης και απροσδιόριστα μεγάλες καθυστερήσεις εκπομπής. Προκειμένου να γίνει η ανάλυση ανεξάρτητη του εύρους ζώνης καναλιού, ο παραπάνω τύπος μπορεί να γραφεί στην μορφή

$$\frac{C_{Shannon}}{B} = \log_2 \left(1 + \frac{C}{N} \right) \quad \left(\frac{b/s}{Hz} \right) \quad (6.44)$$

Ως χωρητικότητα καναλιού θα θεωρηθεί ο λόγος $C_{Shannon}/B$, παρόλο που στην πραγματικότητα αποτελεί τη χωρητικότητα ανά μονάδα εύρους ζώνης. Εάν, λόγω της απόσβεσης κατά τη διάδοση, ο λόγος C/N στην εξίσωση (6.44) είναι τυχαία μεταβλητή, με τυχαία αλλά γνωστή κατανομή, καθοριζόμενη από τον τύπο και τα χαρακτηριστικά της διαδικασίας απόσβεσης, τότε η χωρητικότητα καναλιού είναι επίσης τυχαία μεταβλητή. Αυτή η τυχαία μεταβλητότητα της χωρητικότητας του καναλιού είναι που προκαλεί την υποβάθμιση της επίδοσης του συστήματος, που χρησιμοποιεί το κανάλι. Είναι, λοιπόν, δυνατόν να προσδιορισθεί η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (σ.π.π.) και η συνάρτηση κατανομής (σ.κ.) της χωρητικότητας καναλιού με βάση αυτή του λόγου C/N , ή ισοδύναμα της διαδικασίας απωλειών. Έτσι θα ισχύει ότι

$$\frac{C_{Shannon}}{B} = \log_2 \left(1 + \frac{C}{N} \right) = \frac{1}{\ln 2} \cdot \ln \left(1 + \frac{C}{N} \right) \Rightarrow \quad (6.45)$$

$$\Rightarrow y = a \cdot \ln(1+x) = f(x)$$

όπου $a = 1/\ln 2$, $y = C_{Shannon}/B$ ($y > 0$) και $x = C/N$ ($x > 0$)

Από την θεωρία πιθανοτήτων είναι γνωστό ότι για τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας η λύση δίνεται από τη σχέση

$$p_Y(y) = \frac{p_X(f^{-1}(y))}{|f'(f^{-1}(y))|} \quad (6.46)$$

όπου $p_Y(y)$ η σ.π.π. της τυχαίας μεταβλητής Y και $p_X(x)$ η σ.π.π. της τυχαίας μεταβλητής X . Γνωρίζοντας ότι

$$f^{-1}(y) = \exp\left(\frac{y}{a}\right) - 1 \quad a > 0, y > 0 \quad (6.47)$$

και

$$f'(x) = \frac{a}{1+x} \quad (6.48)$$

προκύπτει εύκολα με αντικατάσταση στην (6.46) ότι

$$p_Y(y) = \frac{1}{a} \cdot \exp\left(\frac{y}{a}\right) \cdot p_X\left(\exp\left(\frac{y}{a}\right) - 1\right) \quad (6.49)$$

Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι χρήσιμη η γνώση της συνάρτησης κατανομής

$$\begin{aligned} F_Y(y) &= \Pr\{Y \leq y\} = \int_0^y p_Y(u) du \\ &= \Pr\{X \leq f^{-1}(y)\} = \int_R p_X(v) dv \end{aligned} \quad (6.50)$$

όπου η $f^{-1}(y)$ δίνεται από την (6.47), και το R δηλώνει τα όρια της $p_X(x)$, που αντιστοιχούν στις τιμές του $x \leq f^{-1}(y)$. Στην περίπτωση αυτή η (6.50) γίνεται

$$F_Y(y) = \int_0^{\exp\left(\frac{y}{a}\right) - 1} p_X(x) dx \quad (6.51)$$

Οποιαδήποτε τιμή του x στην (6.51), ορισμένου ως σηματοθορυβικός λόγος στην (6.45), δίνεται με αναφορά στον σηματοθορυβικό λόγο χωρίς απώλειες $x_0 = (C/N)_0$ και την μεταβολή του λόγω της διαδικασίας της απόσβεσης. Έτσι οι προκύπτουσες σ.π.π. και σ.κ. δίνονται ως συνάρτηση του x_0 και άλλων σημαντικών παραμέτρων της στατιστικής κατανομής των απωλειών. Σε πολλές περιπτώσεις η τυχαία μεταβλητή x μπορεί να είναι συνάρτηση μιας δεύτερης τυχαίας μεταβλητής, πράγμα που απαιτεί ένα πρόσθετο μετασχηματισμό όμοιο με αυτόν της εξίσωσης (6.46) ή (6.50).

Αν θεωρηθεί η συνολική διαδικασία απωλειών τότε ο λαμβανόμενος σηματοθορυβικός λόγος δίνεται από την

$$\frac{C}{N} = \left(\frac{C}{N}\right)_0 - A \quad (dB) \quad (6.52)$$

όπου A συμβολίζει τις συνολικές απώλειες και η συνάρτηση κατανομής της χωρητικότητας καναλιού ισούται με

$$\begin{aligned} F_{C/B}(y) &= Pr\left\{\frac{C_{Shannon}}{B} \leq y\right\} = Pr\left\{\frac{C}{N} \leq f^{-1}(y)\right\} \\ &= Pr\left\{A \geq \left(\frac{C}{N}\right)_0 - f^{-1}(y)\right\} = F_A^C\left(\left(\frac{C}{N}\right)_0 - f^{-1}(y)\right) \end{aligned} \quad (6.53)$$

όπου η $f^{-1}(y)$ δίνεται από την (6.47) (και πρέπει να εκφρασθεί εδώ σε dB) και η F_A^C είναι η συμπληρωματική σ.κ. των συνολικών απωλειών της ζεύξης, δηλαδή

$$F_A^C = Pr\{A > x\} = \int_x^{\infty} p_A(u) du \quad (6.54)$$

Σημειώνεται ότι οι μετασχηματισμοί, που περιγράφηκαν παραπάνω, ισχύουν αν και μόνο αν ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις της εξίσωσης (6.43) για την χωρητικότητα καναλιού. Αν, δηλαδή, η διαδικασία απωλειών είναι «αργή» αρκετά, ώστε σε κάθε στιγμή να ισχύει η υπόθεση για ένα κανάλι με προσθετικό λευκό γκαουσιανό θόρυβο. Όταν οι απώλειες είναι τέτοιες ώστε ο ρυθμός μεταβολής της ισχύος του σήματος προσεγγίζει αυτό του θορύβου, το συνολικό φαινόμενο μπορεί να θεωρηθεί ως περίπτωση μη γκαουσιανού θορύβου, και τότε η (6.43) δίνει το άνω όριο της χωρητικότητας καναλιού. Η περίπτωση αυτή δεν εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

6.5.2 Προσδιορισμός της επίδοσης μη κωδικοποιημένης M-PSK διαμόρφωσης

Για ένα δεδομένο M-PSK σύστημα, με το M να ακολουθεί τη σχέση $M=2^k$ $k=1,2,3,\dots$, η πιθανότητα οποιοδήποτε από τα M σύμβολα να ληφθεί με πιθανότητα λάθους P_S δίνεται από τη σχέση

$$P_S = \frac{M-1}{M} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{E_S}{N_0}} \sin \frac{\pi}{M}\right) - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{\frac{E_S}{N_0}} \sin \frac{\pi}{M}} \exp(-y^2) \operatorname{erf}\left(y \cot \frac{\pi}{M}\right) dy \quad (6.55)$$

όπου

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^x \exp(-u^2) du$$

E_S η ενέργεια ανά σύμβολο,

N_0 η μονόπλευρη φασματική πυκνότητα θορύβου, και

$\pm \frac{\pi}{M}$ ορίζει τις περιοχές απόφασης για οποιαδήποτε φάση φέροντος στον σηματοδότη αστερισμό.

Αφού κάθε μπλοκ των k bits εισόδου κωδικοποιείται σε σύμβολο, η ισοδύναμη ενέργεια ανά bit πληροφορίας δίνεται από τη σχέση

$$E_b = \frac{E_s}{k} = \frac{E_s}{\log_2 M} \quad (6.56)$$

Επιπλέον κάθε πραγματικό ψηφιακό επικοινωνιακό σύστημα χαρακτηρίζεται από τον λόγο R/B , όπου R τα μεταδιδόμενα bit/sec και B το καταλαμβανόμενο εύρος ζώνης. Ο λόγος R/B σε bit/sec/Hz ονομάζεται απόδοση εύρους ζώνης (bandwidth efficiency) και στην περίπτωση M-PSK συστήματος η μέγιστη τιμή του δίνεται από την εξίσωση

$$\left. \frac{R}{B} \right|_{\max} = \log_2 M \quad (6.57)$$

Για τον σηματοθορυβικό λόγο C/N ισχύει ότι

$$\begin{aligned} \frac{C}{N} &= \frac{R}{B} \cdot \frac{E_b}{N_0} = a \cdot \left. \frac{R}{B} \right|_{\max} \cdot \frac{E_b}{N_0} = \\ &= a \cdot \log_2 M \cdot \frac{E_b}{N_0} = a \cdot \frac{E_s}{N_0} \end{aligned} \quad (6.58)$$

όπου η μεταβλητή a συμβολίζει τον παράγοντα ελάττωσης του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων R από την μέγιστη του τιμή.

Επιπλέον, εάν τα bits δεδομένων εισόδου στον διαμορφωτή κωδικοποιούνται σύμφωνα με τον κώδικα Gray, τότε οι γειτονικές γωνίες της φάσης του φέροντος στον σηματοδότη αστερισμό διαφέρουν μόλις κατά ένα bit, οπότε μια ικανοποιητική προσέγγιση της πιθανότητας λάθους σε M-PSK συστήματα δίνεται από την

$$P_b \approx \frac{P_s}{\log_2 M} \quad (6.59)$$

Ορίζεται ως

$$P_b = f\left(\frac{C}{N}\right) \quad (6.60)$$

η σχέση μεταξύ της πιθανότητας λάθους bit (*BEP*) και του σηματοθορυβικού λόγου, η οποία μπορεί να προσδιοριστεί μέσω των (6.55), (6.57), (6.59) και (6.60) για δεδομένα a, M . Η μακροπρόθεσμη συμπληρωματική συνάρτηση κατανομής του BER παρουσία της συνολικής διαδικασίας απωλειών δίνεται από την

$$\begin{aligned} F_{BER}^C(x) &= Pr\{BER \geq x\} = Pr\left\{\frac{C}{N} \leq f^{-1}(x)\right\} = F_A^C\left(\left(\frac{C}{N}\right)_0 - f^{-1}(x)\right) \\ &= \int_{\left(\frac{C}{N}\right)_0 - f^{-1}(x)}^{\infty} p_A(u) du \end{aligned} \quad (6.61)$$

όπου $f^{-1}(x)$ η αντίστροφη συνάρτηση του BER ως προς C/N .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

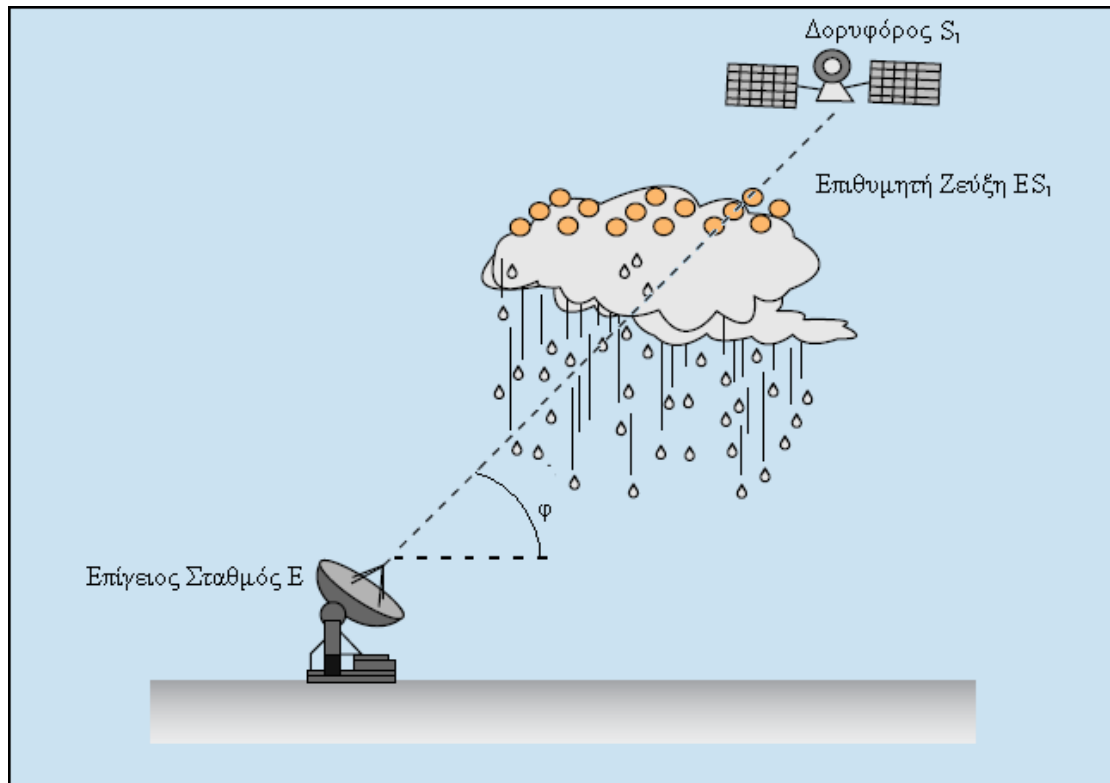
7

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Γενικά

Βάσει των θεωρητικών στοιχείων που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, υλοποιήθηκε πρόγραμμα σε MATLAB στην έκδοση 6.0 το οποίο υπολογίζει το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο ένα δορυφορικό σύστημα βρίσκεται εκτός λειτουργίας, την πιθανότητα υπέρβασης μιας δεδομένης στάθμης καθώς, επίσης, και τα μεγέθη επιδείνωσης διπλής πόλωσης (*DPA*), επιδείνωση διπλής πόλωσης από παγοκρυστάλλους (*DPA_{ice}*) και τη σχέση που συνδέει τη χωρητικότητα κατά Shannon προς εύρος ζώνης με το σηματοθορυβικό λόγο. Το πρόγραμμα δέχεται ως είσοδο το γεωγραφικό πλάτος και μήκος της περιοχής που μελετάται (Latitude, Longitude), τη γωνία ανύψωσης, τη γωνία πόλωσης καθώς και τη συχνότητα. Οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στις διάφορες περιοχές υπολογίζονται μέσω προγράμματος που υλοποιήθηκε με βάση τα κριτήρια που θέτει η ITU. Για την επίλυση των υπερβατικών εξισώσεων που προκύπτουν χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ZBRENT που παρουσιάζεται στο Παράρτημα Η.

Αξίζει να αναφερθεί στο σημείο αυτό ότι τα μεγέθη γεωγραφικό πλάτος (latitude) και γεωγραφικό μήκος (longitude) που εισάγονται στο πρόγραμμα βοηθούν στον υπολογισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της ζεύξης. Συγκεκριμένα, βοηθούν στον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ του δορυφόρου και του δέκτη. Παράλληλα, είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για την εύρεση της γωνίας ανύψωσης του δορυφόρου. Τα προηγούμενα παρουσιάζονται στο σχήμα 7.1.



Σχήμα 7.1: Γεωμετρία δορυφορικού συστήματος με γωνία ανύψωσης φ .

Με τη βοήθεια του παραπάνω σχήματος προκύπτει ότι η γωνία ανύψωσης δίδεται από την παρακάτω σχέση

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{\cos \phi' - \frac{R_E}{R_E + r_d}}{\sin \phi'} \right] \quad (7.1)$$

όπου ϕ' είναι η γωνιακή απόσταση του επιγείου σταθμού σε σχέση με το δορυφόρο με σημείο το κέντρο της γης, r_d είναι η ακτίνα της γεωστατικής τροχιάς ($r_d=42164\text{Km}$), R_E είναι η μέση ακτίνα της γης ($R_E=6378\text{Km}$), φ_e, θ_e είναι το γεωγραφικό μήκος και πλάτος του σταθμού βάσης, ενώ ϕ_s είναι το γεωγραφικό μήκος του γεωστατικού δορυφόρου. Η γωνία ϕ' καθορίζεται από τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά του σταθμού βάσης και του δορυφόρου και είναι ίση με $\phi' = \cos^{-1} [\cos(\theta_e) \cdot \cos(\theta_{es})]$ όπου $\varphi_{es} = |\varphi_s - \varphi_e|$. Η απόσταση μεταξύ δέκτη και δορυφορικού αναμεταδότη δίνεται από τη σχέση

$$d = \sqrt{(R_E \cdot \sin(\varphi))^2 + 2 \cdot R_E \cdot r_d + r_d^2} - R_E \cdot \sin(\varphi) \quad (7.2)$$

Από την άλλη μεριά τα μεγέθη που αφορούν κλιματικές συνθήκες είναι τα R_m , S_r για τη λογαριθμοκανονική κατανομή, τα ν_r , b_r για τη γάμμα κατανομή και τα w_r , m_r (w, m της κατανομής Weibull αντίστοιχα) για τη Weibull κατανομή. Αυτά κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται για των υπολογισμό των αποσβέσεων λόγω βροχόπτωσης. Οι τιμές των R_m , S_r , ν_r , b_r , w_r και m_r για ορισμένες πόλεις δίδονται στον πίνακα 7.1.

Πόλη	R_m	S_r	ν_r	b_r	w_r	m_r
Αθήνα	0,0029	2,3197	0,0011	0,0444	4,9462	0,1926
Νέα Υόρκη	0,0003	2,5819	0,0007	0,1040	6,8334	0,1773
Μονακό	0,0051	2,2385	0,0013	0,0391	4,6000	0,1986
Ντουμπάι	0,0001	2,8665	0,0007	0,0537	6,3469	0,1572
Τζακάρτα	0,6354	1,3048	0,0044	0,0222	1,9007	0,3388
Γιοχάνεσμπουργκ	0,0065	2,2772	0,0012	0,0285	4,3353	0,1933

Πίνακας 7.1: Τιμές R_m , S_r , ν_r , b_r , w , m σε διάφορες πόλεις.

7.2 Παραδείγματα δορυφορικών ζεύξεων

Στη συνέχεια παρατίθεται μια σειρά παραδειγμάτων όπου εφαρμόζεται το παραπάνω μοντέλο για διάφορες πόλεις στην περιοχή κάλυψης του δορυφόρου HELLAS Sat (βλέπε παράρτημα Θ). Αξίζει να αναφερθεί ότι σε όλες τις γραφικές παραστάσεις του κεφαλαίου αυτού χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τιμές παραμέτρων. Σε όλες τις περιπτώσεις, και χωρίς βλάβη της γενικότητας η υψομετρική απόσταση του επίγειου σταθμού από το επίπεδο της θάλασσας λαμβάνεται 200m. Η πόλωση στα συστήματα διπλής πόλωσης τα οποία παρουσιάζονται θεωρείται γραμμική με γωνία 45° , περίπτωση η οποία δίδει ίδια αποτελέσματα για την αποπόλωση με αυτά της κυκλικής πόλωσης. Η τελευταία είναι η πλέον συνήθης αλλά και η χειρότερη από πλευράς προβλημάτων διάδοσης αναφορικά με την επιβάρυνση στο λόγο σήματος προς θόρυβο.

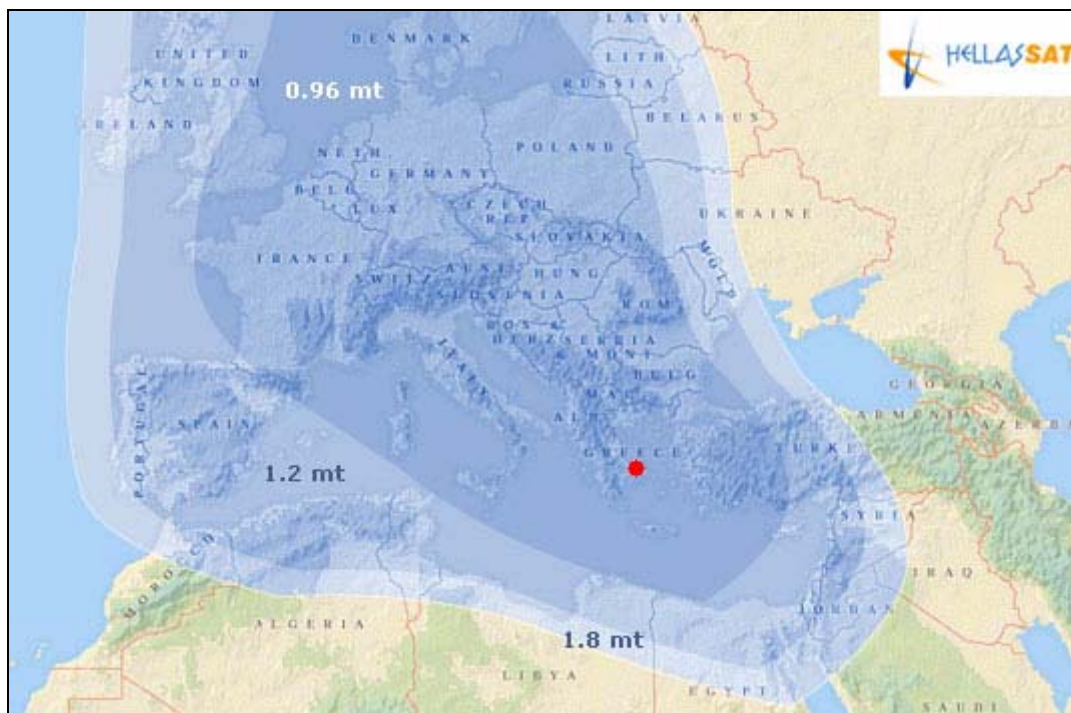
Οι τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων G (σταθερά του Lin) και D_r (μέγιστη διάσταση του βροχοκυρήνα) που χρησιμοποιούνται είναι 1,5Km και 30Km αντίστοιχα.

Πιθανότητα υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$

Αρχικά, γίνεται αναφορά στην Αθήνα. Στο σχήμα 7.2 παρουσιάζεται η γεωγραφική τοποθεσία της Αθήνας στον παγκόσμιο χάρτη ενώ στο σχήμα 7.3 παρουσιάζεται η τοποθεσία στη γεωγραφική κάλυψη του HELLAS Sat.



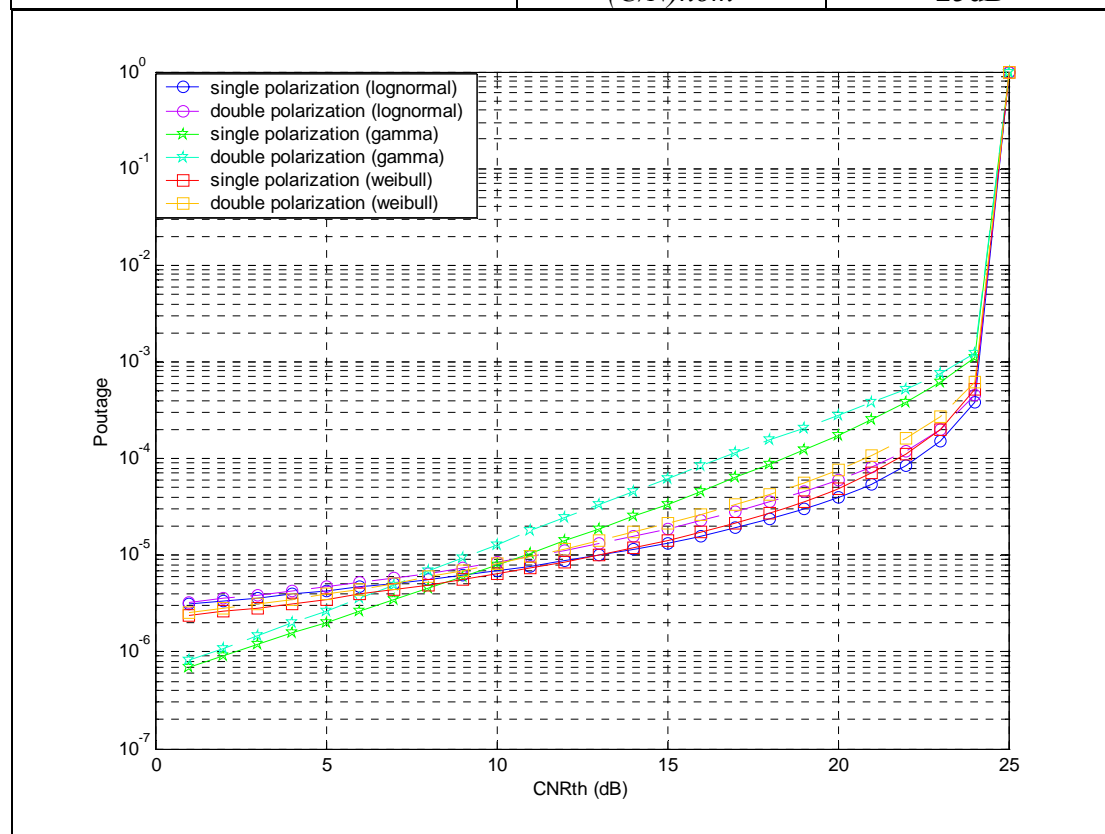
Σχήμα 7.2: Η Αθήνα στον παγκόσμιο χάρτη.



Σχήμα 7.3: Η Αθήνα στην γεωγραφική κάλυψη του HELLAS Sat.

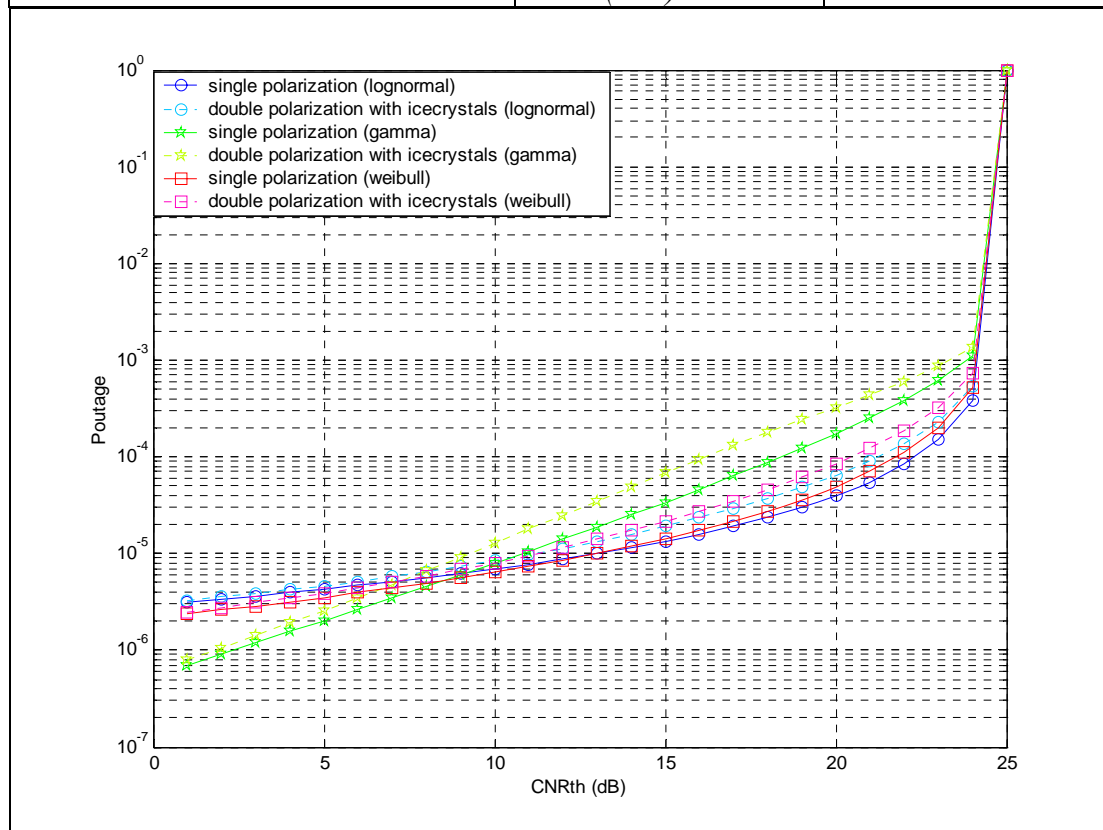
Στη συνέχεια παρουσιάζεται, η πιθανότητα υπέρβασης στην περίπτωση όπου υπάρχει επίδραση μόνο της βροχής και στην περίπτωση όπου υπάρχει συνύπαρξη μαζί με τη βροχή παγοκρυστάλλων. Χρησιμοποιούνται και τα τρία μοντέλα (λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull).

<i>Πόλη</i>	<i>Αθήνα</i>	
<i>Γεωγραφικό πλάτος</i>	37' 58''	
<i>Γεωγραφικό μήκος</i>	23' 43''	
<i>Χαρακτηριστικά βροχής</i>	$R_m=0,0029$	$S_r=2,3197$
	$v_r=0,0011$	$b_r=0,0444$
	$w_r=4,9462$	$m_r=0,1926$
<i>Συχνότητα</i>	12GHz	
<i>Δορυφόρος</i>	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	<i>(C/N)_{nom}</i>	25dB



Σχήμα 7.4: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).

Πόλη	Αθήνα	
Γεωγραφικό πλάτος	37' 58''	
Γεωγραφικό μήκος	23' 43''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,038$	$S_r=1,628$
	$v_r=0,0011$	$b_r=0,0444$
	$w_r=4,9462$	$m_r=0,1926$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	(C/N) <i>nom</i>	25dB

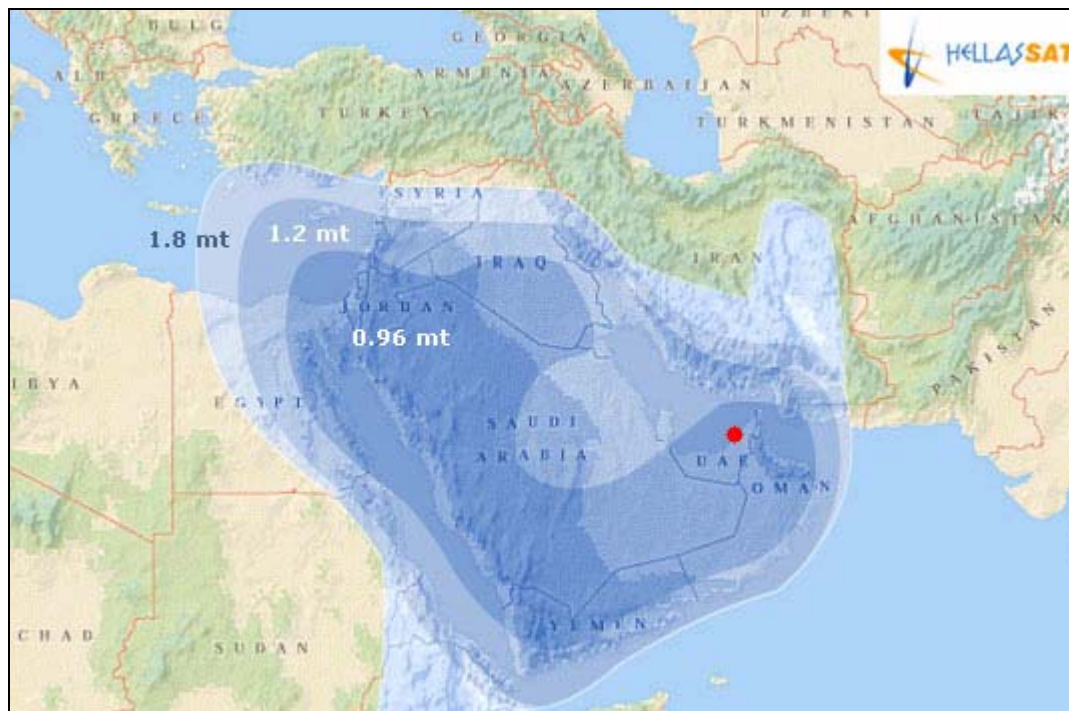


Σχήμα 7.5: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανώψωσης 46,4 °).

Μετά την Αθήνα, ακολουθεί η πόλη του Ντουμπάι. Στο σχήμα 7.6 παρουσιάζεται η γεωγραφική τοποθεσία του Ντουμπάι στον παγκόσμιο χάρτη ενώ στο σχήμα 7.7 παρουσιάζεται η τοποθεσία στη γεωγραφική κάλυψη του HELLAS Sat.



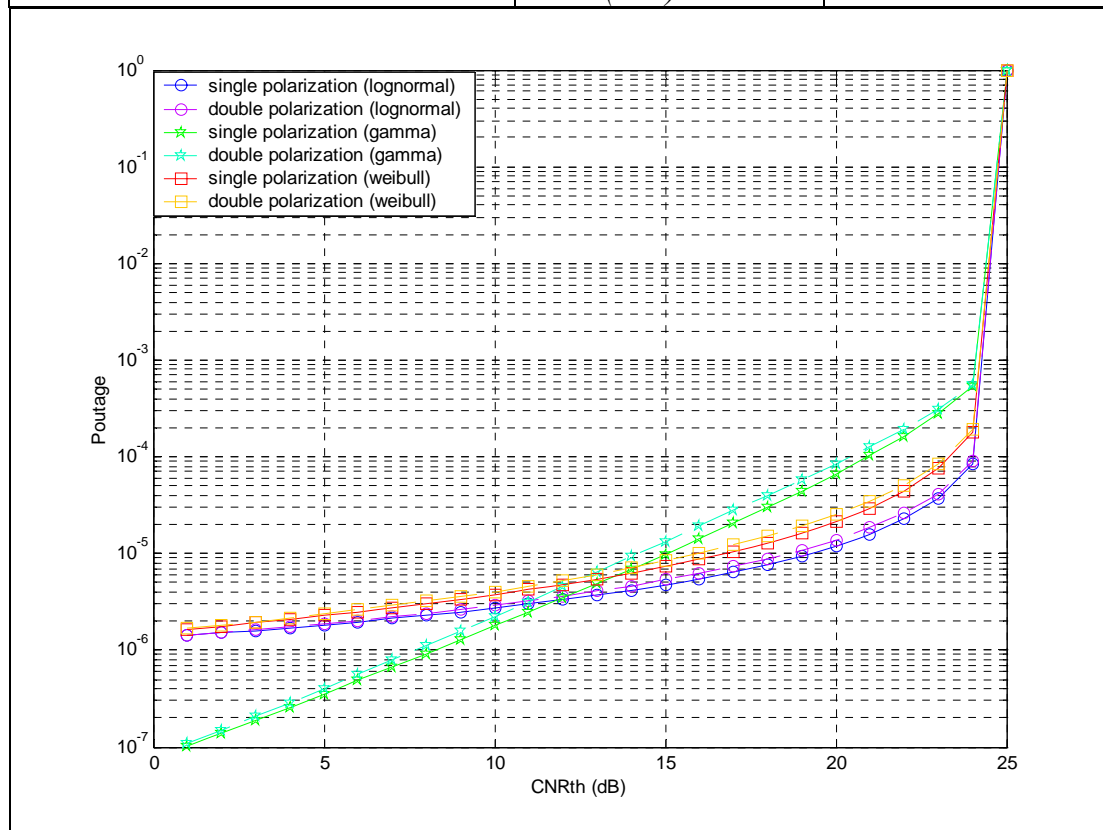
Σχήμα 7.6: Το Ντουμπαί στον παγκόσμιο χάρτη.



Σχήμα 7.7: Το Ντουμπαί στην γεωγραφική κάλυψη του HELLAS Sat.

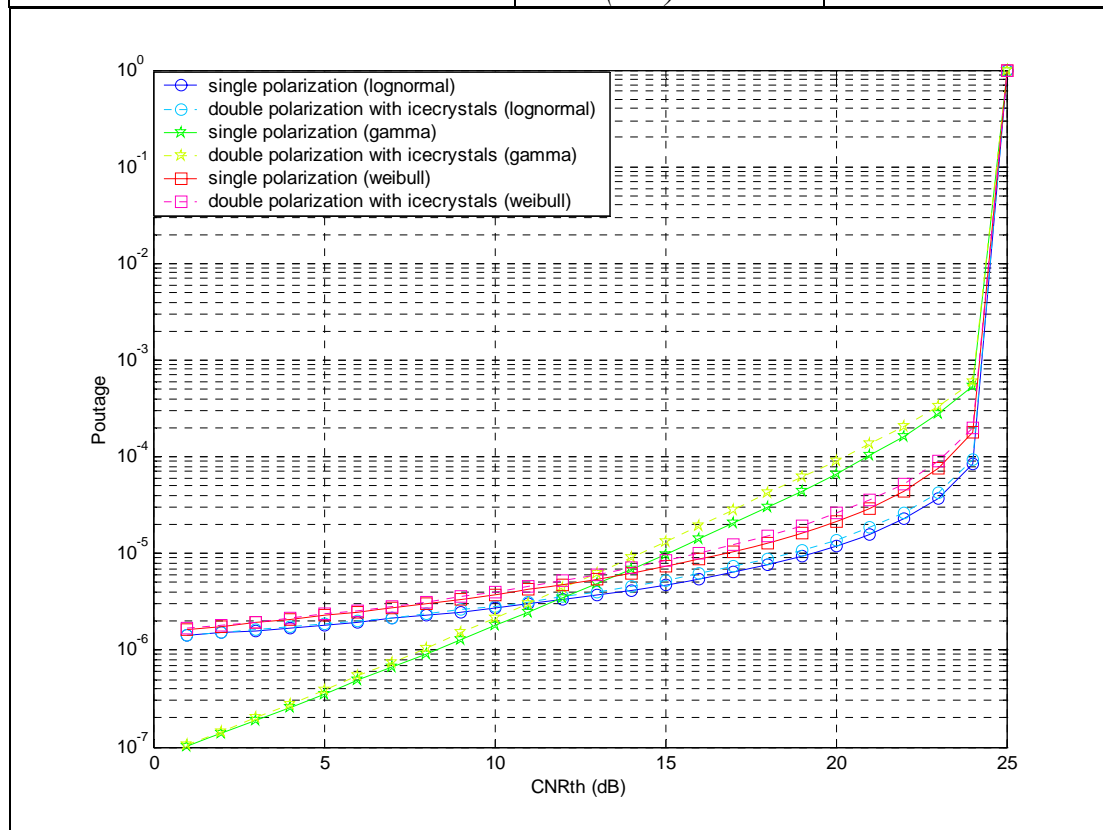
Στη συνέχεια παρουσιάζεται, η πιθανότητα υπέρβασης στην περίπτωση όπου υπάρχει επίδραση μόνο της βροχής και στην περίπτωση όπου υπάρχει συνύπαρξη μαζί με τη βροχή παγοκρυστάλλων. Χρησιμοποιούνται και τα τρία μοντέλα (λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull).

Πόλη	Ντουμπάι	
Γεωγραφικό πλάτος	25' 18''	
Γεωγραφικό μήκος	55' 18''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0001$	$S_r=2,8665$
	$v_r=0,0007$	$b_r=0,0537$
	$w_r=6,3469$	$m_r=0,1572$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(C/N)_{nom}$	25dB



Σχήμα 7.8: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 55,4 °).

Πόλη	Ντουμπάι	
Γεωγραφικό πλάτος	25' 18''	
Γεωγραφικό μήκος	55' 18''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0001$	$S_r=2,8665$
	$v_r=0,0007$	$b_r=0,0537$
	$w_r=6,3469$	$m_r=0,1572$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(C/N)_{nom}$	25dB

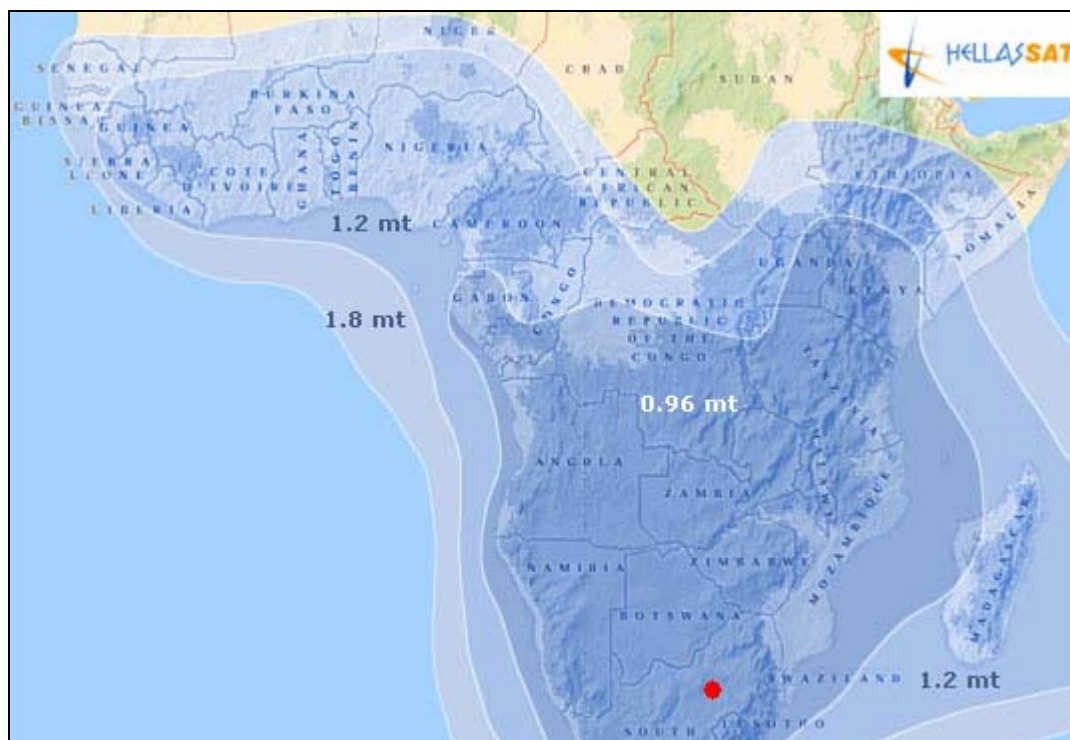


Σχήμα 7.9: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 55,4 °).

Παρουσιάζεται επιπλέον το Γιοχάνεσπουργκ. Στο σχήμα 7.10 παρουσιάζεται η γεωγραφική τοποθεσία του Γιοχάνεσπουργκ στον παγκόσμιο χάρτη ενώ στο σχήμα 7.11 παρουσιάζεται η τοποθεσία στη γεωγραφική κάλυψη του HELLAS Sat.



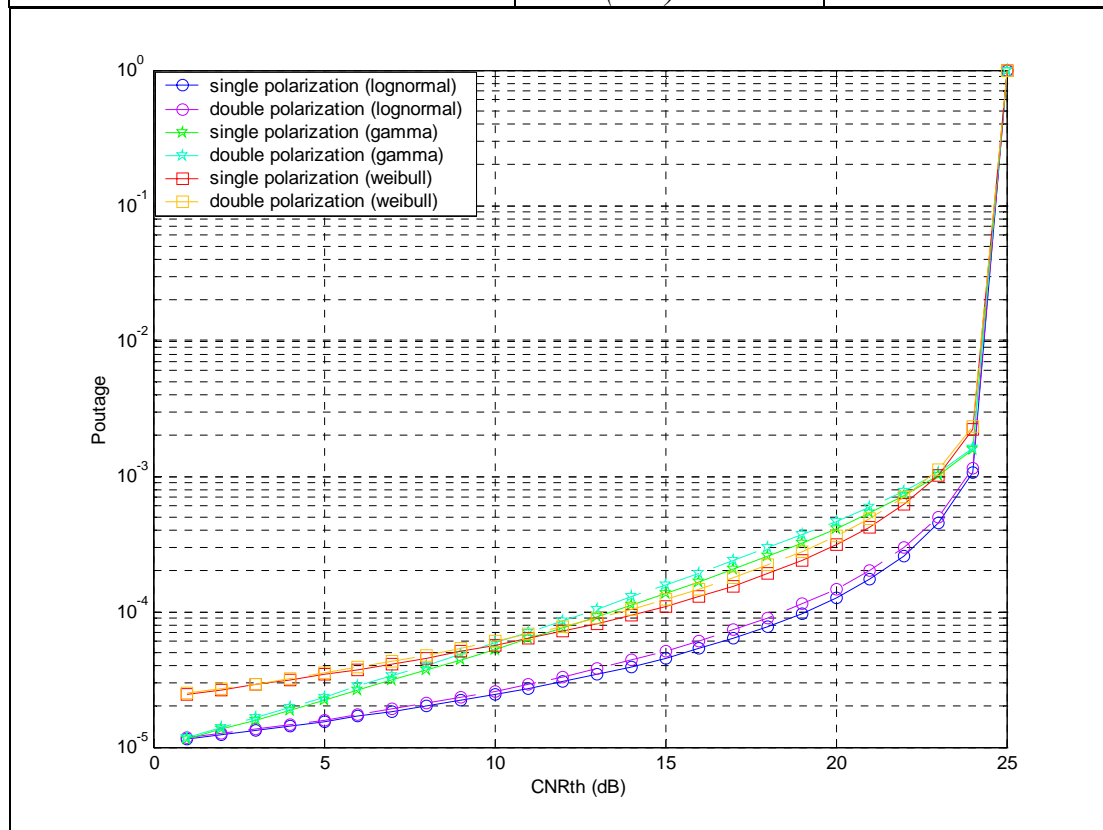
Σχήμα 7.10: Το Γιοχάνεσμπουργκ στον παγκόσμιο χάρτη.



Σχήμα 7.11: Το Γιοχάνεσμπουργκ στην γεωγραφική κάλυψη του HELLAS Sat.

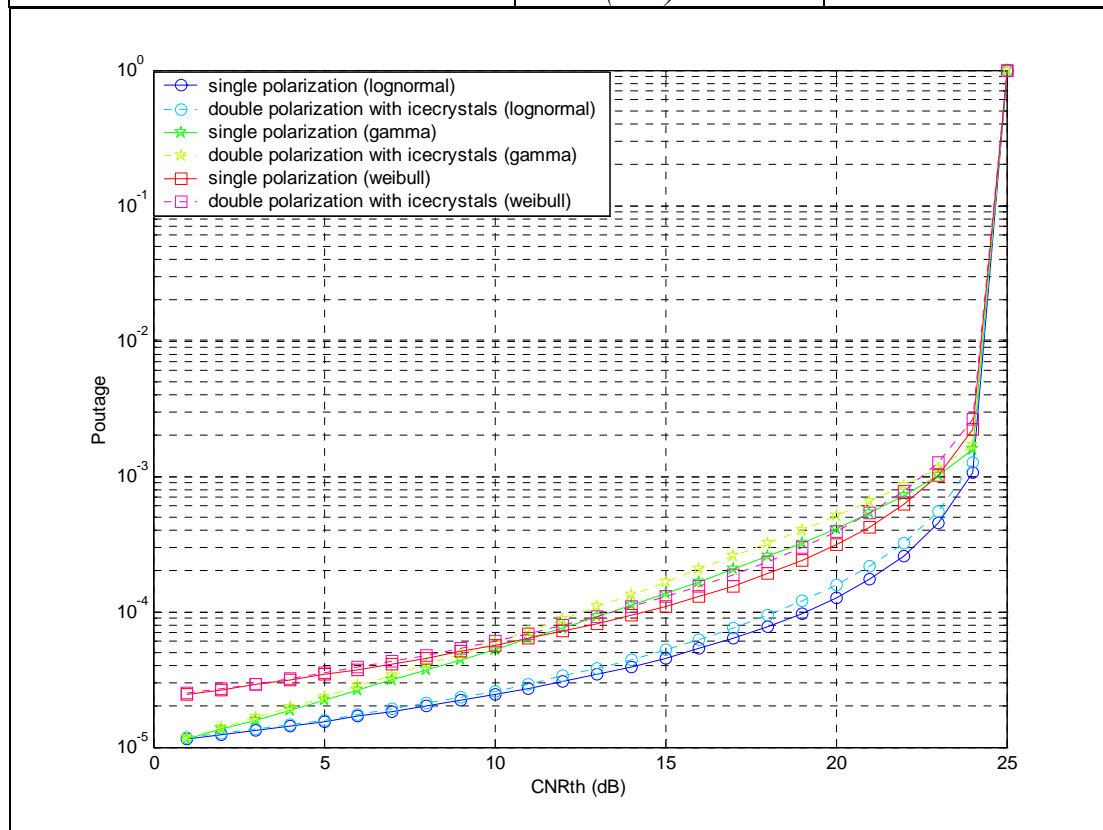
Στη συνέχεια παρουσιάζεται, η πιθανότητα υπέρβασης στην περίπτωση όπου υπάρχει επίδραση μόνο της βροχής και στην περίπτωση όπου υπάρχει συνύπαρξη μαζί με τη βροχή παγοκρυστάλλων. Χρησιμοποιούνται και τα τρία μοντέλα (λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull).

Πόλη	Γιοχάνεσμπουργκ	
Γεωγραφικό πλάτος	26' 15''S	
Γεωγραφικό μήκος	28'	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0065$	$S_r=2,2772$
	$v_r=0,0012$	$b_r=0,0285$
	$w_r=4,3353$	$m_r=0,1933$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	(C/N) <i>nom</i>	25dB



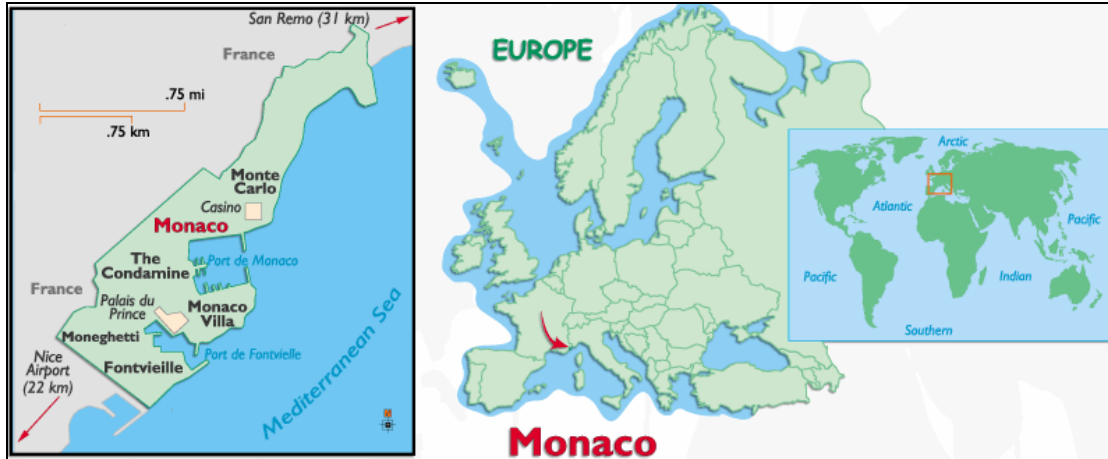
Σχήμα 7.12: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 57,1 °).

<i>Πόλη</i>	<i>Γιοχάνεσμπουργκ</i>	
<i>Γεωγραφικό πλάτος</i>	26' 15''S	
<i>Γεωγραφικό μήκος</i>	28'	
<i>Χαρακτηριστικά βροχής</i>	$R_m=0,0065$	$S_r=2,2772$
	$v_r=0,0012$	$b_r=0,0285$
	$w_r=4,3353$	$m_r=0,1933$
<i>Συχνότητα</i>	12GHz	
<i>Δορυφόρος</i>	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	<i>(C/N)_{nom}</i>	25dB

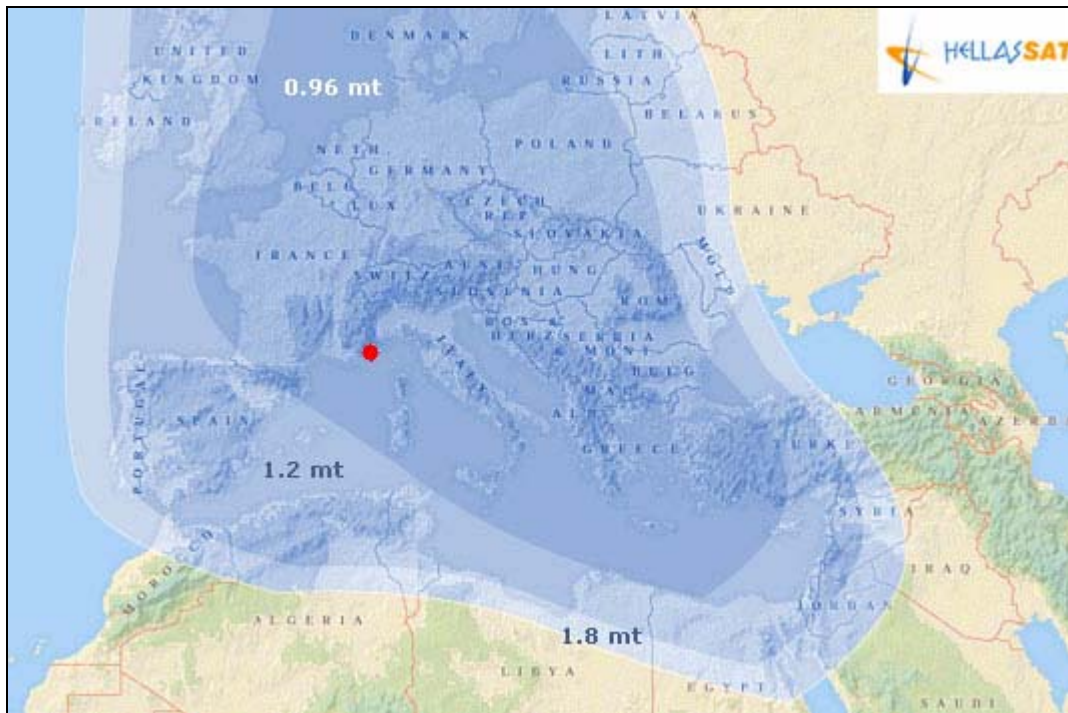


Σχήμα 7.13: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 57,1 °).

Παρουσιάζεται τέλος η πόλη του Μονακό. Στο σχήμα 7.14 παρουσιάζεται η γεωγραφική τοποθεσία του Μονακό στον παγκόσμιο χάρτη ενώ στο σχήμα 7.15 παρουσιάζεται η τοποθεσία στη γεωγραφική κάλυψη του HELLAS Sat.



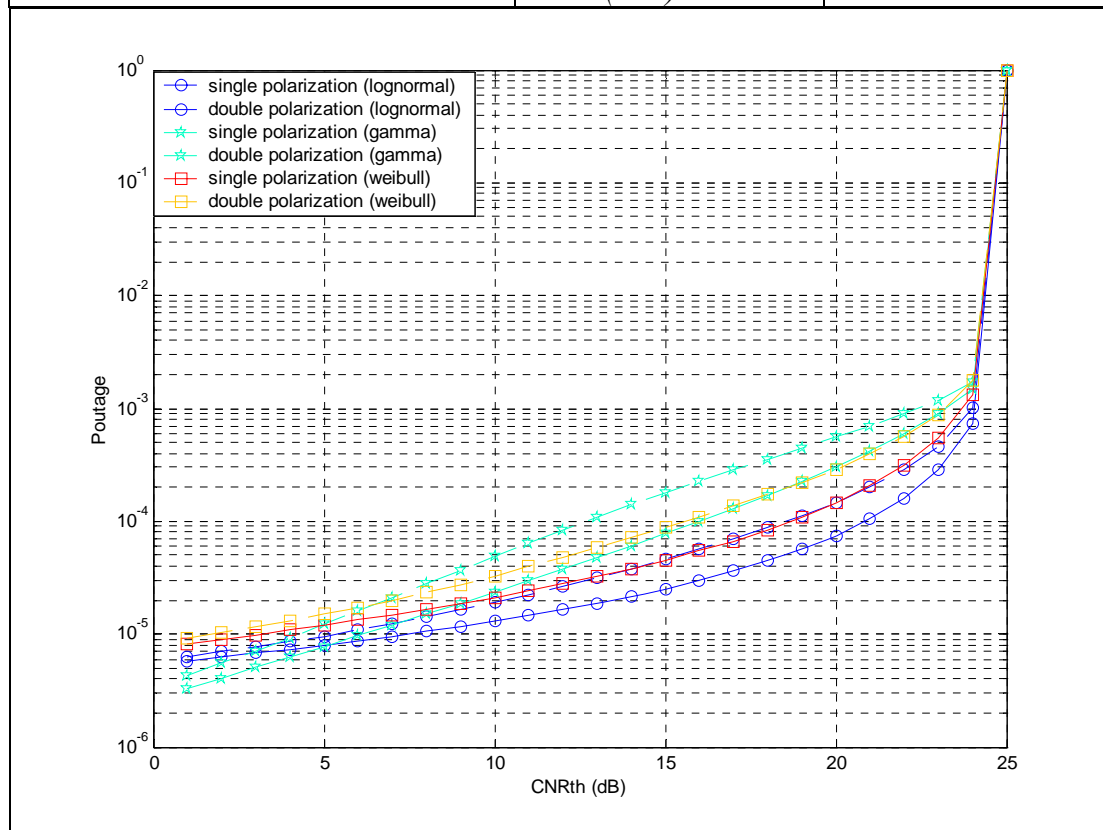
Σχήμα 7.14: Το Μονακό στον παγκόσμιο χάρτη.



Σχήμα 7.15: Το Μονακό στην γεωγραφική κάλυψη του HELLAS Sat.

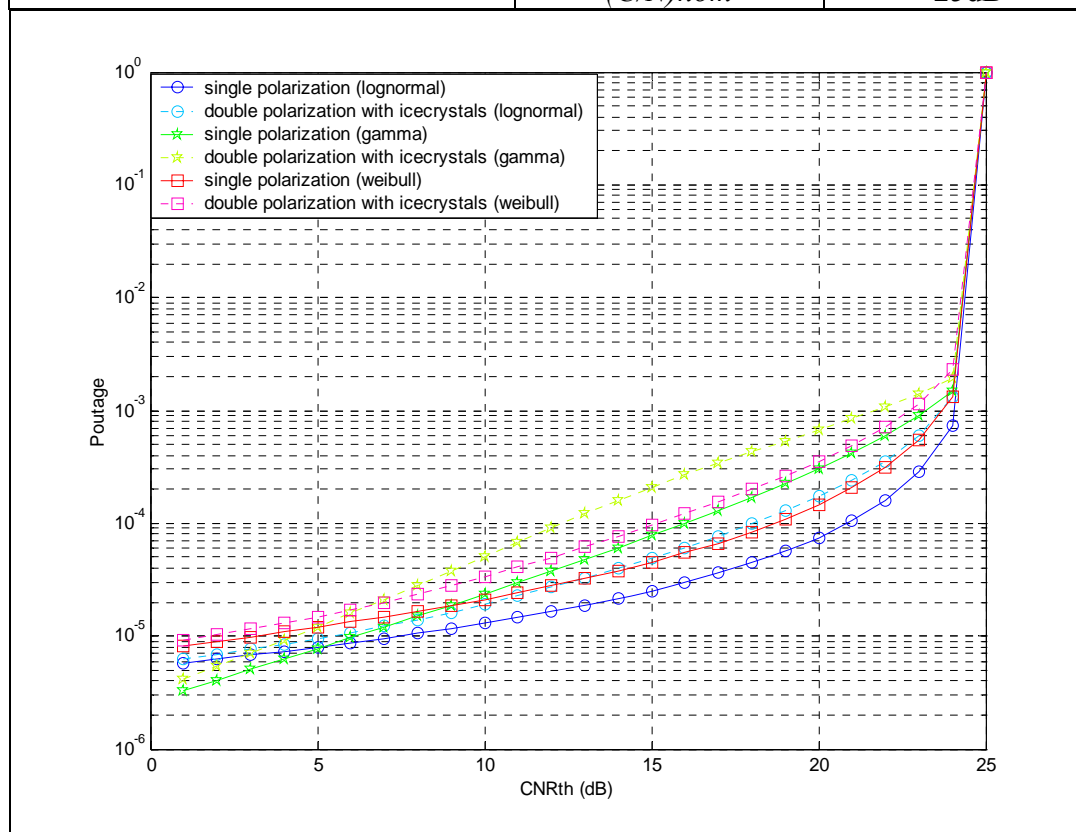
Παρουσιάζεται η πιθανότητα υπέρβασης στην περίπτωση όπου υπάρχει επίδραση μόνο της βροχής και στην περίπτωση όπου υπάρχει συνύπαρξη μαζί με τη βροχή παγοκρυστάλλων. Χρησιμοποιούνται και τα τρία μοντέλα (λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull).

Πόλη	Μονακό	
Γεωγραφικό πλάτος	43' 42''	
Γεωγραφικό μήκος	7' 23''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0051$	$S_r=2,2385$
	$v_r=0,0013$	$b_r=0,0391$
	$w_r=4,6000$	$m_r=0,1986$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(C/N)_{nom}$	25dB



Σχήμα 7.16: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης $30,7^\circ$).

Πόλη	Μονακό	
Γεωγραφικό πλάτος	43' 42''	
Γεωγραφικό μήκος	7' 23''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0051$	$S_r=2,2385$
	$v_r=0,0013$	$b_r=0,0391$
	$w_r=4,6000$	$m_r=0,1986$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(C/N)_{nom}$	25dB



Σχήμα 7.17: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανώψωσης 30,7 °).

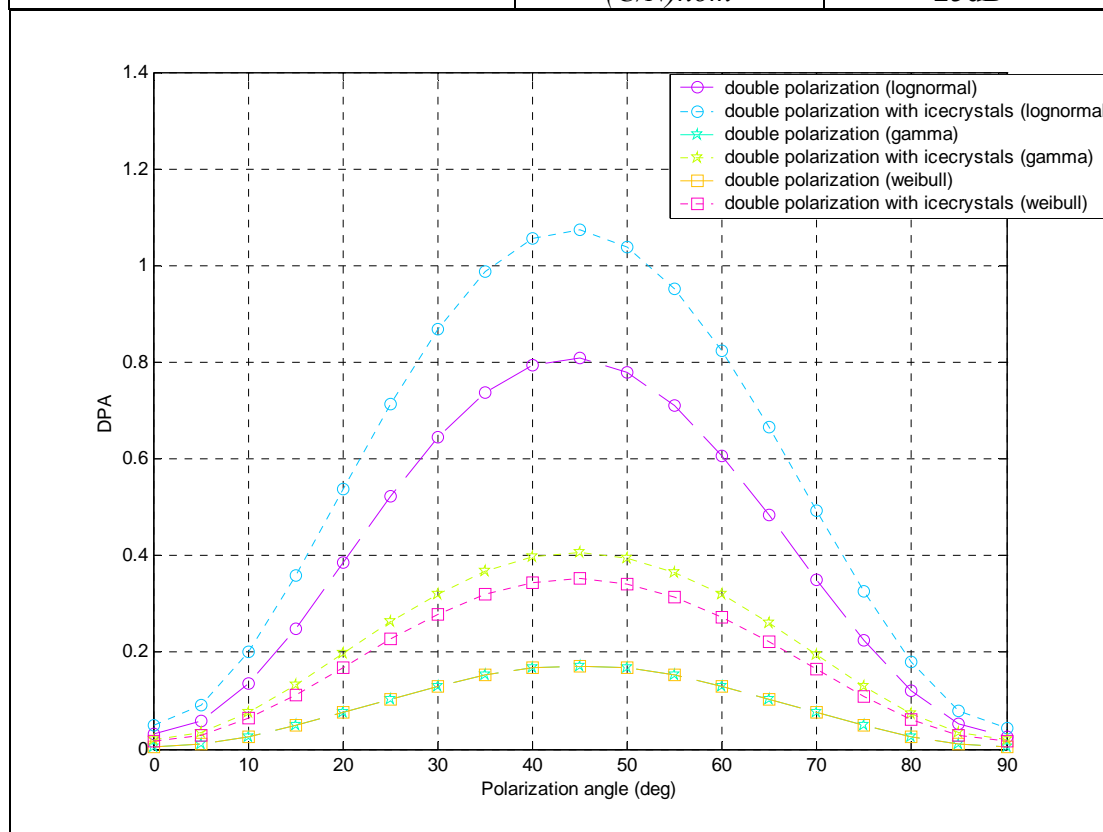
Επιδείνωση διπλής πόλωσης

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζεται για κάθε πόλη που παρουσιάστηκε η επιδείνωση από τη χρήση διπλής πόλωσης. Όπως αναλύθηκε και στο 5^ο κεφάλαιο, για να ποσοτικοποιηθεί η επιδείνωση που λαμβάνεται από τη χρήση της τεχνικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας χρησιμοποιείται το μέγεθος *DPA* (Dual Polarization Aggravation). Το *DPA* αναφέρεται στην επιδείνωση του σηματοθορυβικού λόγου όταν χρησιμοποιείται η διπλή πόλωση και δίνεται από τη σχέση (5.43) και (5.44) (χωρίς και με παγοκρυστάλλους αντίστοιχα)

$$DPA = CNR_{thr}^S(p\%) - CNR_{thr}^D(p\%)$$

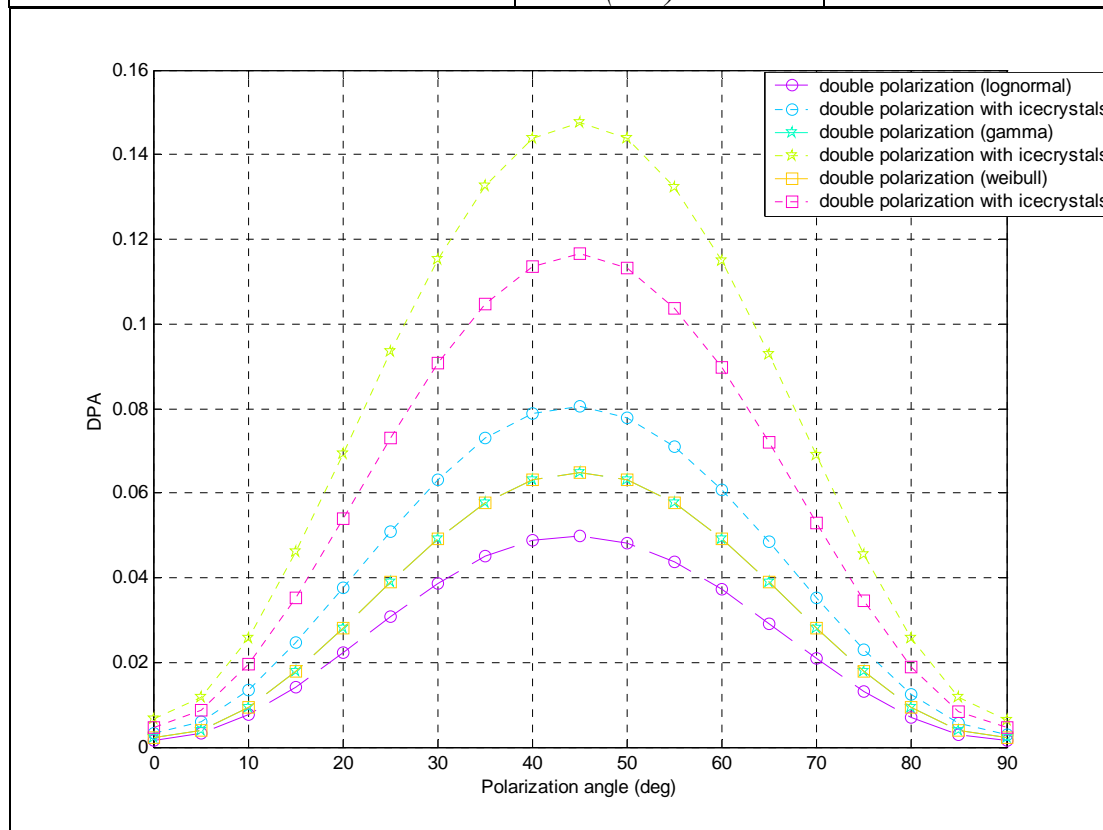
όπου $CNR_{thr}^S(p\%)$, $CNR_{thr}^D(p\%)$ είναι τα επίπεδα του *CNR* στους δέκτες που χρησιμοποιούν την απλή και διπλή πόλωση (*CNDR*) για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης αντίστοιχα. Το *DPA* ισούται με τη διαφορά μεταξύ του σηματοθορυβικού λόγου της απλής πόλωσης και της τιμής του σηματοθορυβικού λόγου της διπλής πόλωσης σε ένα περιβάλλον βροχής και παγοκρυστάλλων υπό δεδομένη πιθανότητα διακοπής λειτουργίας.

Πόλη	Αθήνα	
Γεωγραφικό πλάτος	37' 58''	
Γεωγραφικό μήκος	23' 43''	
Πιθανότητα Υπέρβασης	0,01% του συνολικού χρόνου	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0029$	$S_r=2,3197$
	$v_r=0,0011$	$b_r=0,0444$
	$w_r=4,9462$	$m_r=0,1926$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	(C/N) <i>nom</i>	25dB



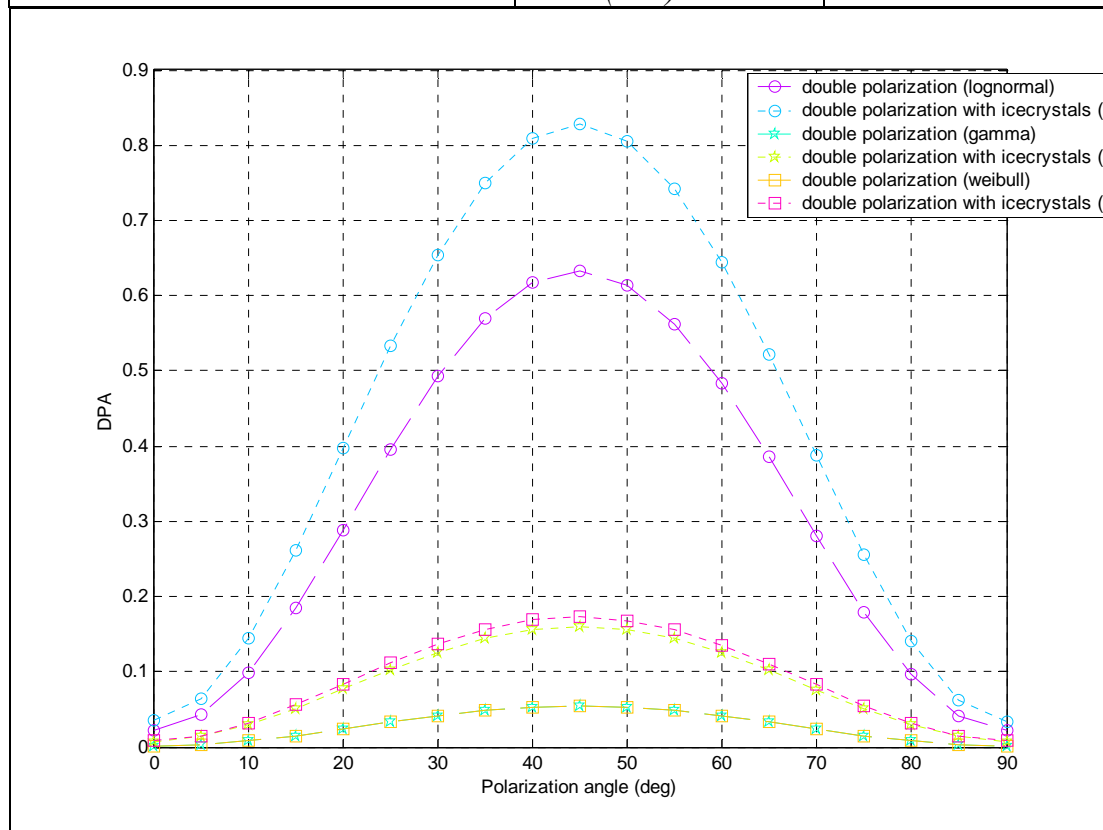
Σχήμα 7.18: Καμπύλες επιδείνωσης διπλής πόλωσης για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης (0,01% του συνολικού χρόνου) σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της γωνίας πόλωσης. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).

Πόλη	Ντουμπάι	
Γεωγραφικό πλάτος	25' 18''	
Γεωγραφικό μήκος	55' 18''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0001$	$S_r=2,8665$
	$v_r=0,0007$	$b_r=0,0537$
	$w_r=6,3469$	$m_r=0,1572$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	(C/N) <i>nom</i>	25dB



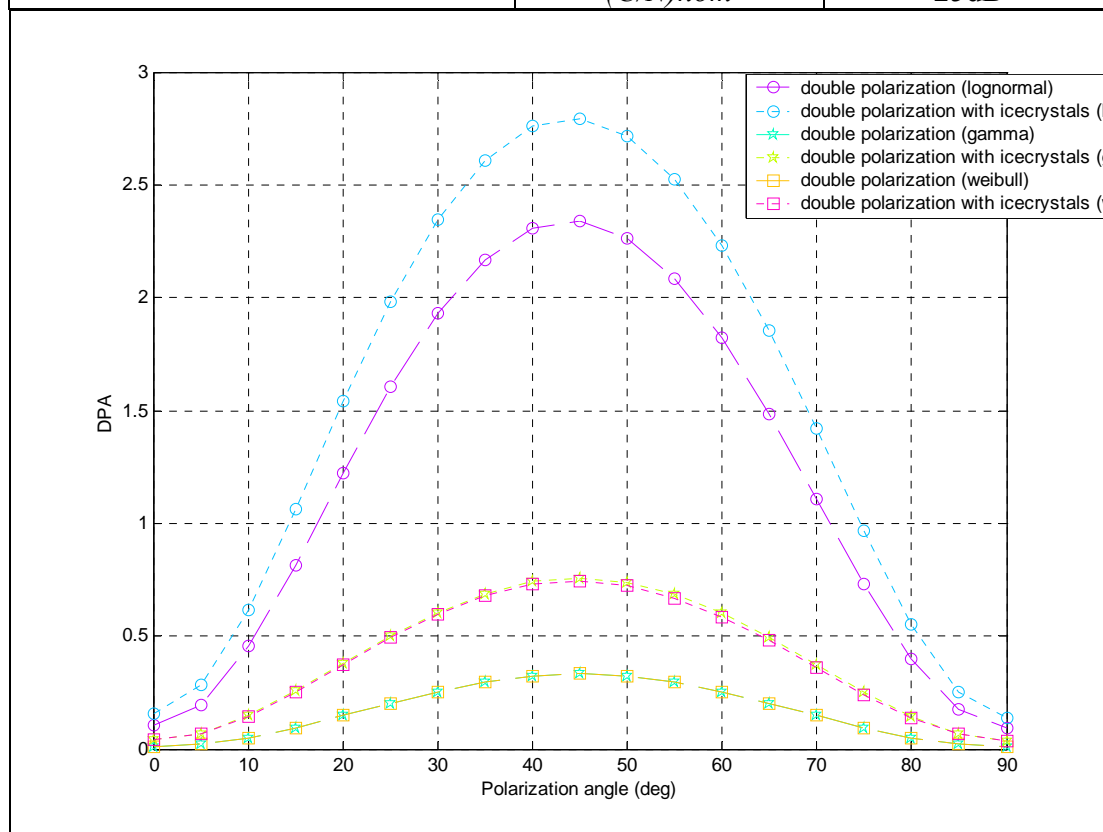
Σχήμα 7.19: Καμπύλες επιδείνωσης διπλής πόλωσης για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης (0,01% του συνολικού χρόνου) σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της γωνίας πόλωσης. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 55,4 °).

<i>Πόλη</i>	<i>Γιοχάνεσμπουργκ</i>	
<i>Γεωγραφικό πλάτος</i>	26' 15''S	
<i>Γεωγραφικό μήκος</i>	28'	
<i>Χαρακτηριστικά βροχής</i>	$R_m=0,0065$	$S_r=2,2772$
	$v_r=0,0012$	$b_r=0,0285$
	$w_r=4,3353$	$m_r=0,1933$
<i>Συχνότητα</i>	12GHz	
<i>Δορυφόρος</i>	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	<i>(C/N)_{nom}</i>	25dB



Σχήμα 7.20: Καμπύλες επιδείνωσης διπλής πόλωσης για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης (0,01% του συνολικού χρόνου) σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της γωνίας πόλωσης. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 57,1 °).

Πόλη	Μονακό	
Γεωγραφικό πλάτος	43' 42''	
Γεωγραφικό μήκος	7' 23''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0051$	$S_r=2,2385$
	$v_r=0,0013$	$b_r=0,0391$
	$w_r=4,6000$	$m_r=0,1986$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	(C/N) <i>nom</i>	25dB



Σχήμα 7.21: Καμπύλες επιδείνωσης διπλής πόλωσης για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης (0,01% του συνολικού χρόνου) σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της γωνίας πόλωσης. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 30,7 °).

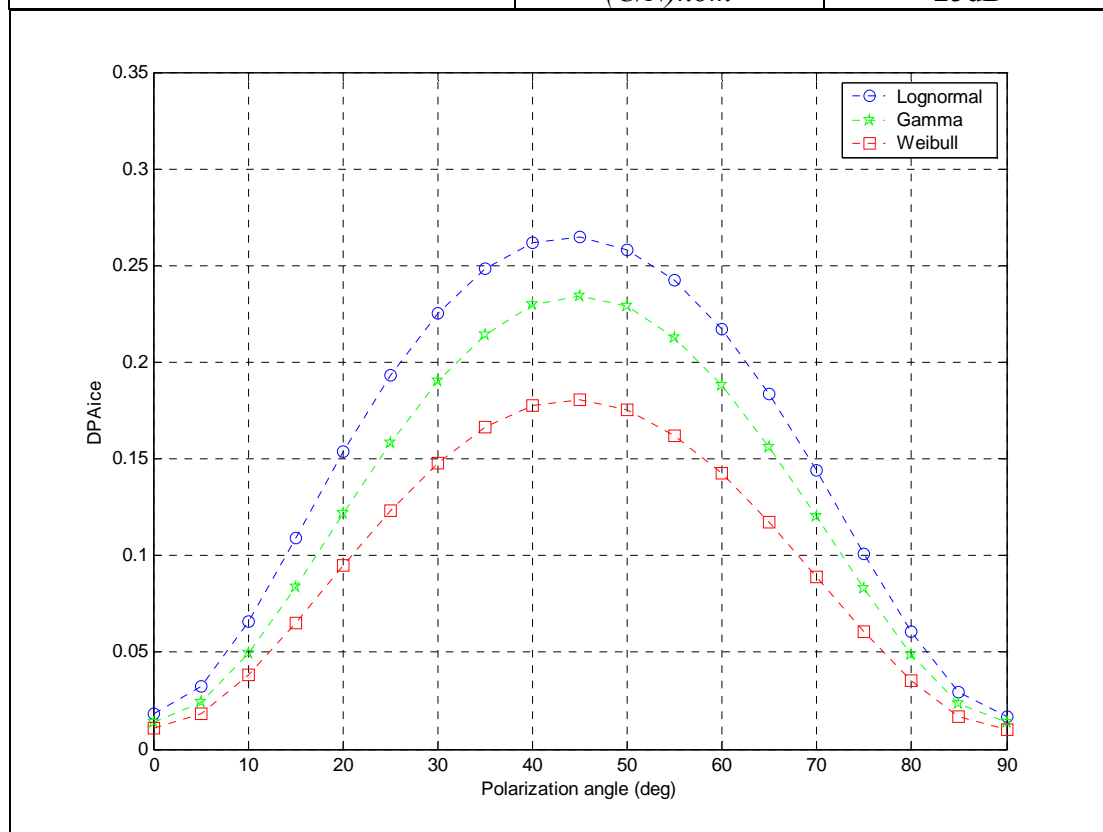
Επιδείνωση διπλής πόλωσης από τους παγοκρυστάλλους

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζεται για κάθε πόλη η επιδείνωση από τη χρήση διπλής πόλωσης. Όπως αναλύθηκε και στο 5^ο κεφάλαιο, το DPA (DPA_{ice}) μπορεί να περιγράψει και την επιδείνωση του σηματοθορυβικού λόγου όταν χρησιμοποιείται η διπλή πόλωση και συνυπολογίζεται η επίδραση των παγοκρυστάλλων (icecrystals) έναντι της διπλής πόλωσης χωρίς παγοκρυστάλλους. Δηλαδή το DPA_{ice} μπορεί να ποσοτικοποιήσει την επιδείνωση της απόδοσης που προκύπτει συνυπολογίζοντας τους παγοκρυστάλλους και δίνεται από τη σχέση (5.45)

$$DPA = CNR_{thr}^{D, nonicecrystals}(p\%) - CNR_{thr}^{D, icecrystals}(p\%)$$

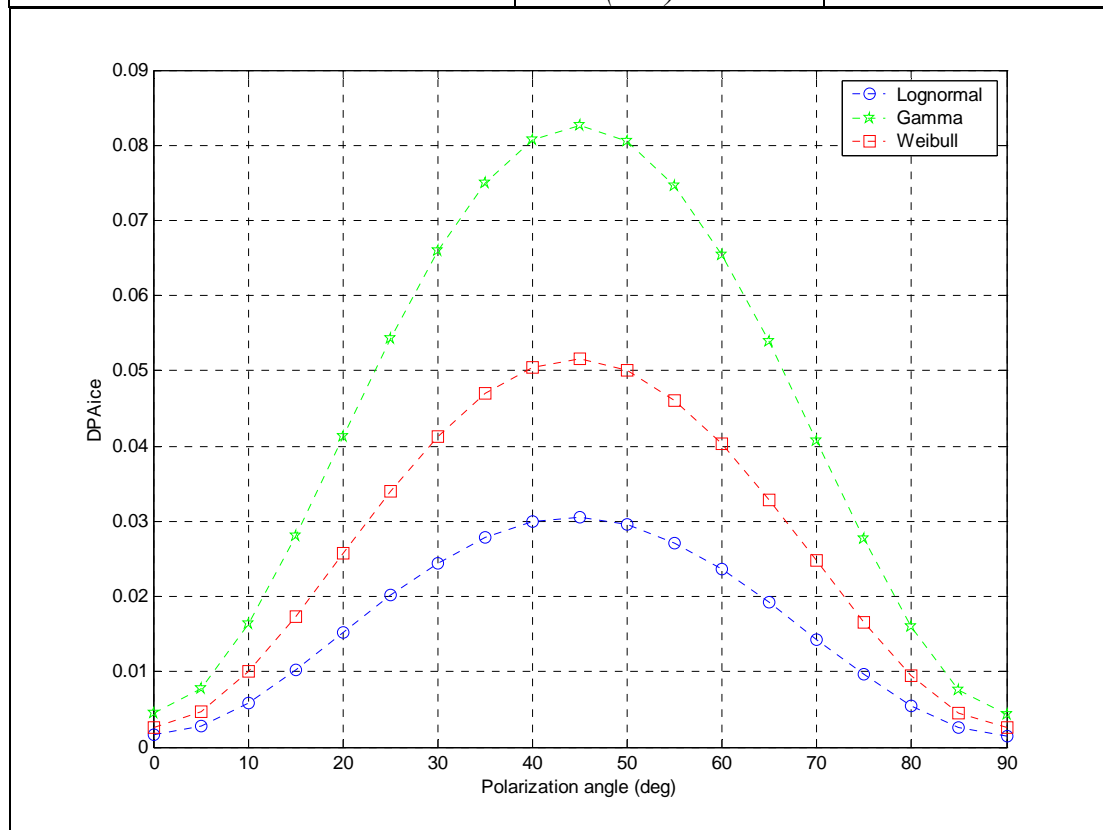
όπου $CNR_{thr}^{D, nonicecrystals}(p\%)$, $CNR_{thr}^{D, icecrystals}(p\%)$ είναι τα επίπεδα του CNR στους δέκτες που χρησιμοποιούν τη διπλή πόλωση χωρίς τη θεώρηση των παγοκρυστάλλων και τη διπλή πόλωση με τη θεώρηση των παγοκρυστάλλων για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης αντίστοιχα. Το DPA_{ice} ισούται με τη διαφορά μεταξύ του σηματοθορυβικού λόγου της διπλής πόλωσης σε ένα περιβάλλον βροχής χωρίς παγοκρυστάλλους και της τιμής του σηματοθορυβικού λόγου της διπλής πόλωσης σε ένα περιβάλλον βροχής και παγοκρυστάλλων υπό δεδομένη πιθανότητα διακοπής λειτουργίας.

Πόλη	Αθήνα	
Γεωγραφικό πλάτος	37' 58''	
Γεωγραφικό μήκος	23' 43''	
Πιθανότητα Υπέρβασης	0,01% του συνολικού χρόνου	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0029$	$S_r=2,3197$
	$v_r=0,0011$	$b_r=0,0444$
	$w_r=4,9462$	$m_r=0,1926$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	(C/N) <i>nom</i>	25dB



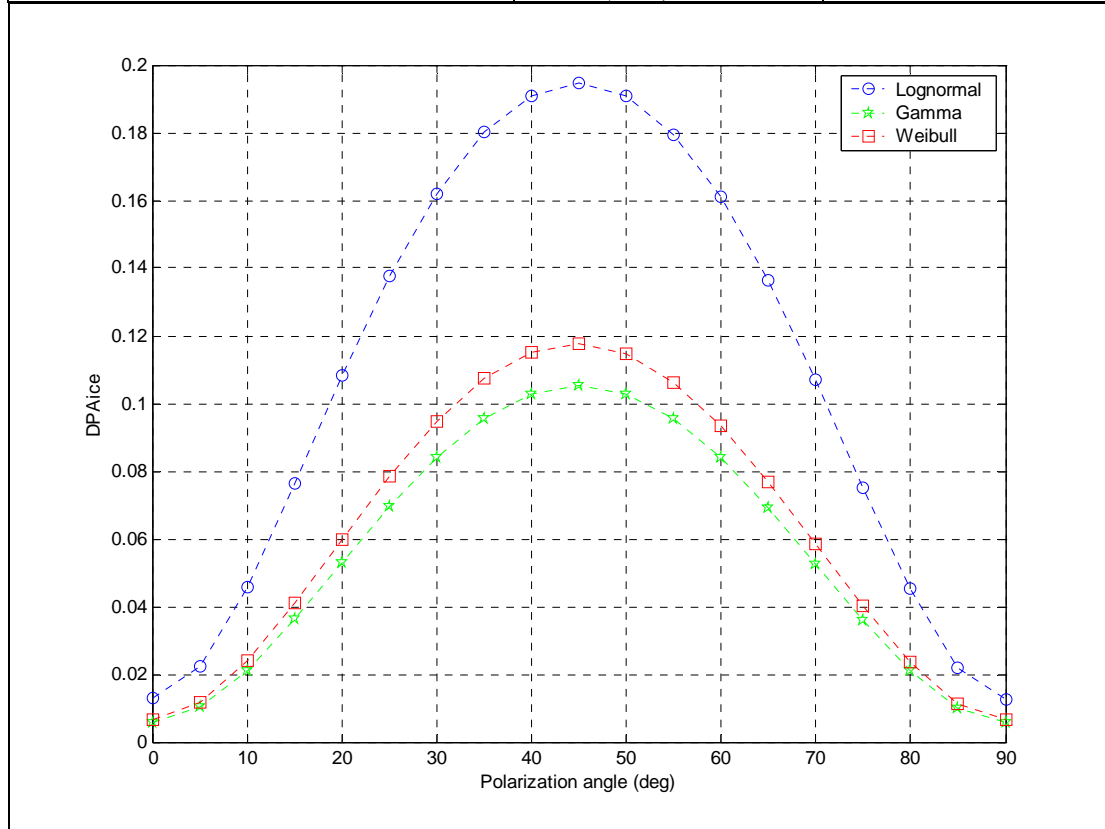
Σχήμα 7.22: Καμπύλες επιδείνωσης διπλής πόλωσης από παγοκρυστάλλους για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης (0,01% του συνολικού χρόνου) σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της γωνίας πόλωσης. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).

Πόλη	Ντουμπάι	
Γεωγραφικό πλάτος	25' 18''	
Γεωγραφικό μήκος	55' 18''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0001$	$S_r=2,8665$
	$v_r=0,0007$	$b_r=0,0537$
	$w_r=6,3469$	$m_r=0,1572$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	(C/N) <i>nom</i>	25dB



Σχήμα 7.23: Καμπύλες επιδείνωσης διπλής πόλωσης από παγοκρυστάλλους για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης (0,01% του συνολικού χρόνου) σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της γωνίας πόλωσης. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 55,4 °).

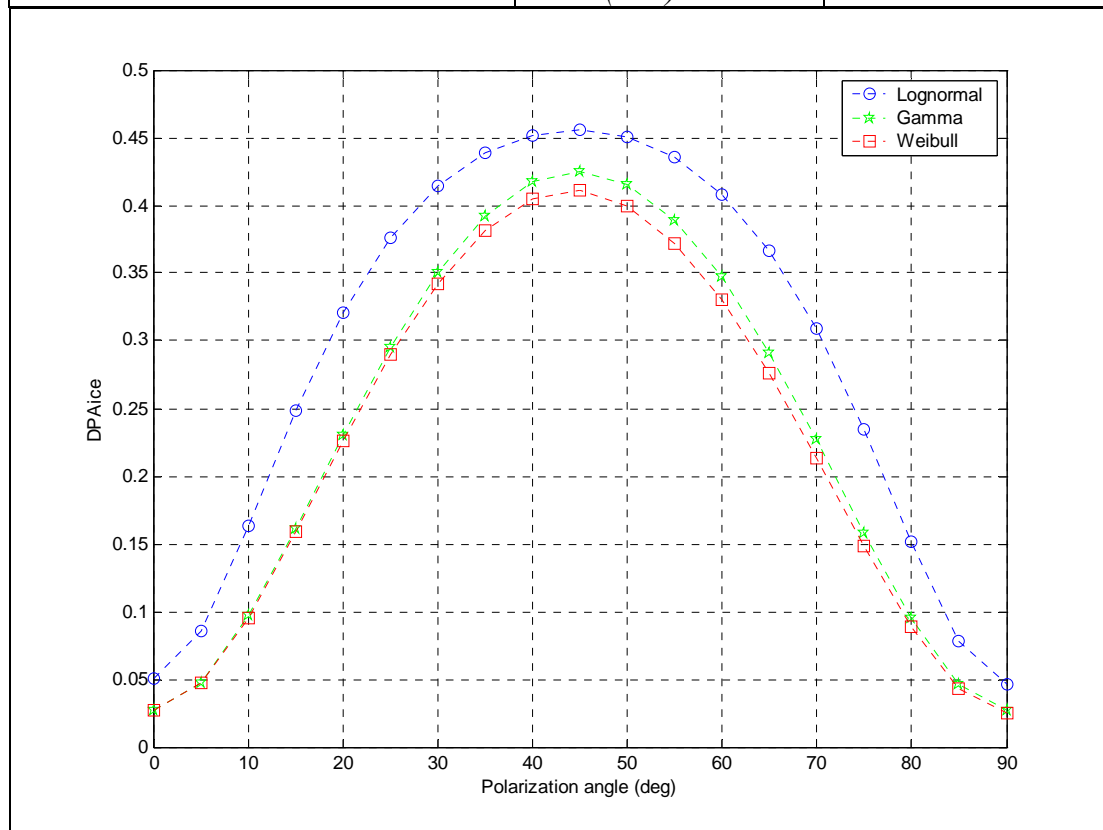
Πόλη	Γιοχάνεσμπουργκ	
Γεωγραφικό πλάτος	26' 15'' S	
Γεωγραφικό μήκος	28'	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0065$	$S_r=2,2772$
	$v_r=0,0012$	$b_r=0,0285$
	$w_r=4,3353$	$m_r=0,1933$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	(C/N) <i>nom</i>	25dB



Σχήμα 7.24: Καμπύλες επιδείνωσης διπλής πόλωσης από παγοκρυστάλλους για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης (0,01% του συνολικού χρόνου) σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της γωνίας πόλωσης.

(Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 57,1 °).

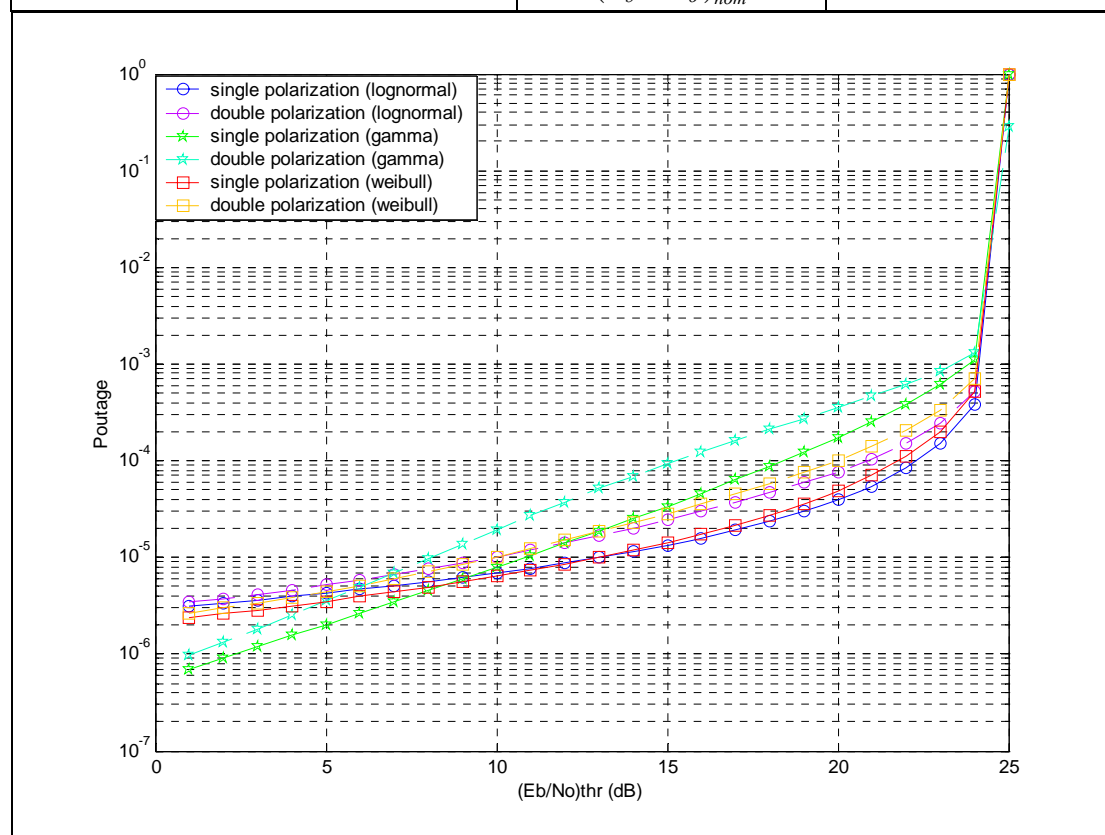
<i>Πόλη</i>	<i>Μονακό</i>	
<i>Γεωγραφικό πλάτος</i>	43' 42''	
<i>Γεωγραφικό μήκος</i>	7' 23''	
<i>Χαρακτηριστικά βροχής</i>	$R_m=0,0051$	$S_r=2,2385$
	$v_r=0,0013$	$b_r=0,0391$
	$w_r=4,6000$	$m_r=0,1986$
<i>Συχνότητα</i>	12GHz	
<i>Δορυφόρος</i>	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	<i>(C/N)_{nom}</i>	25dB



Σχήμα 7.25: Καμπύλες επιδείνωσης διπλής πόλωσης από παγοκρυστάλλους για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης (0,01% του συνολικού χρόνου) σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της γωνίας πόλωσης. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 30,7 °).

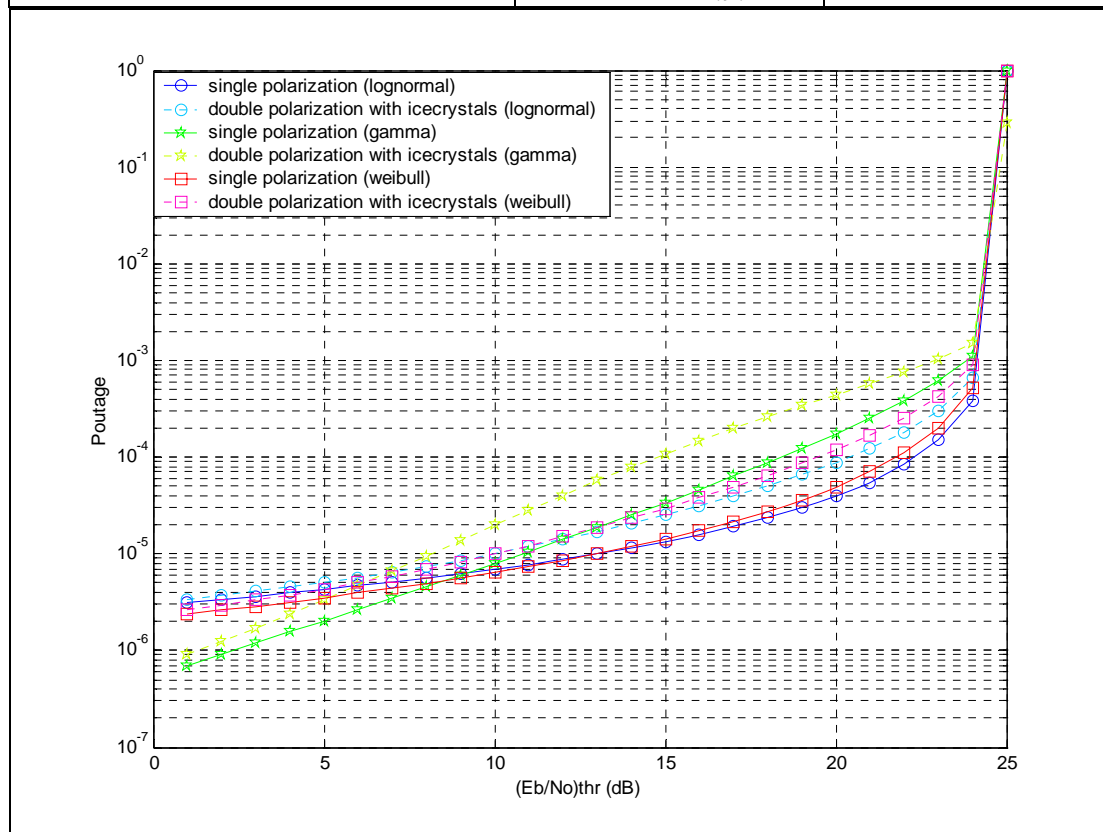
Πιθανότητα υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(E_b/N_o)_{thr}$

<i>Πόλη</i>	<i>Αθήνα</i>	
<i>Γεωγραφικό πλάτος</i>	37' 58''	
<i>Γεωγραφικό μήκος</i>	23' 43''	
<i>Χαρακτηριστικά βροχής</i>	$R_m=0,0029$	$S_r=2,3197$
	$v_r=0,0011$	$b_r=0,0444$
	$w_r=4,9462$	$m_r=0,1926$
<i>Συχνότητα</i>	12GHz	
<i>Φασματική Πυκνότητα</i>	2 bit/s Hz	
<i>Δορυφόρος</i>	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(E_b / N_o)_{nom}$	25dB



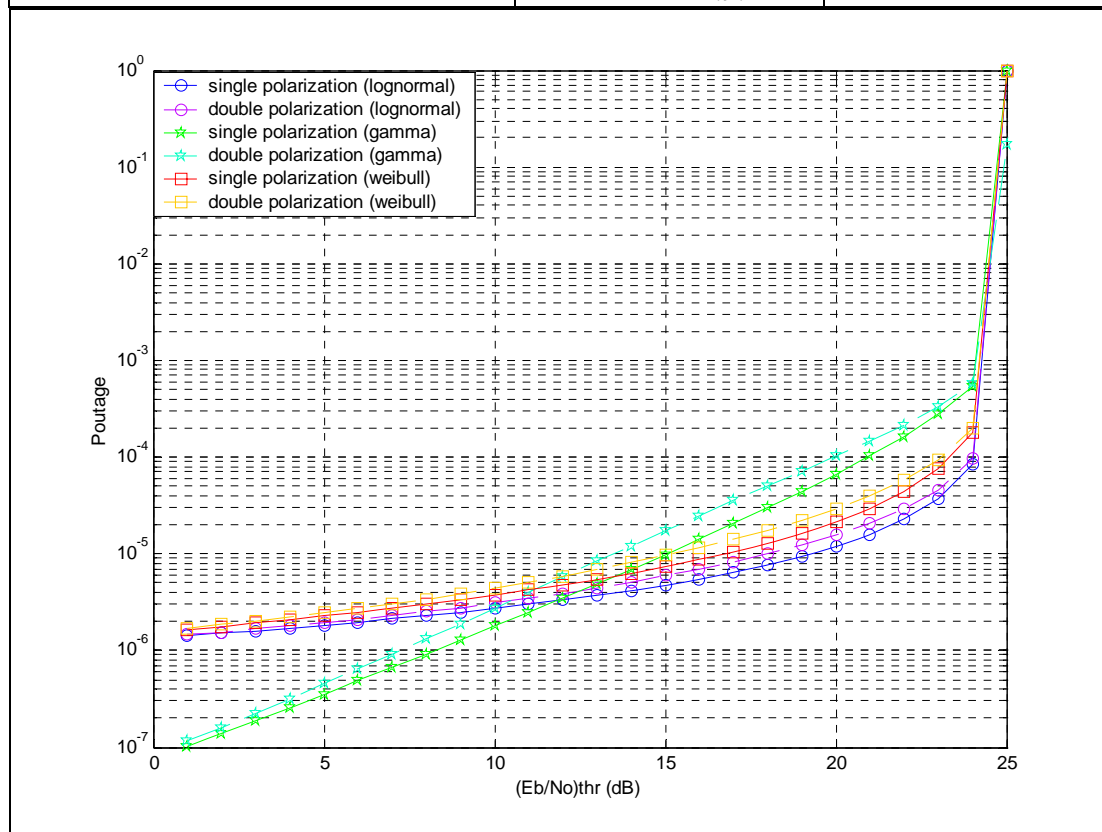
Σχήμα 7.26: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(E_b / N_o)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).

Πόλη	Αθήνα	
Γεωγραφικό πλάτος	37' 58''	
Γεωγραφικό μήκος	23' 43''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0029$	$S_r=2,3197$
	$v_r=0,0011$	$b_r=0,0444$
	$w_r=4,9462$	$m_r=0,1926$
Συχνότητα	12GHz	
Φασματική Πυκνότητα	2 bit/s Hz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(E_b / N_o)_{nom}$	25dB



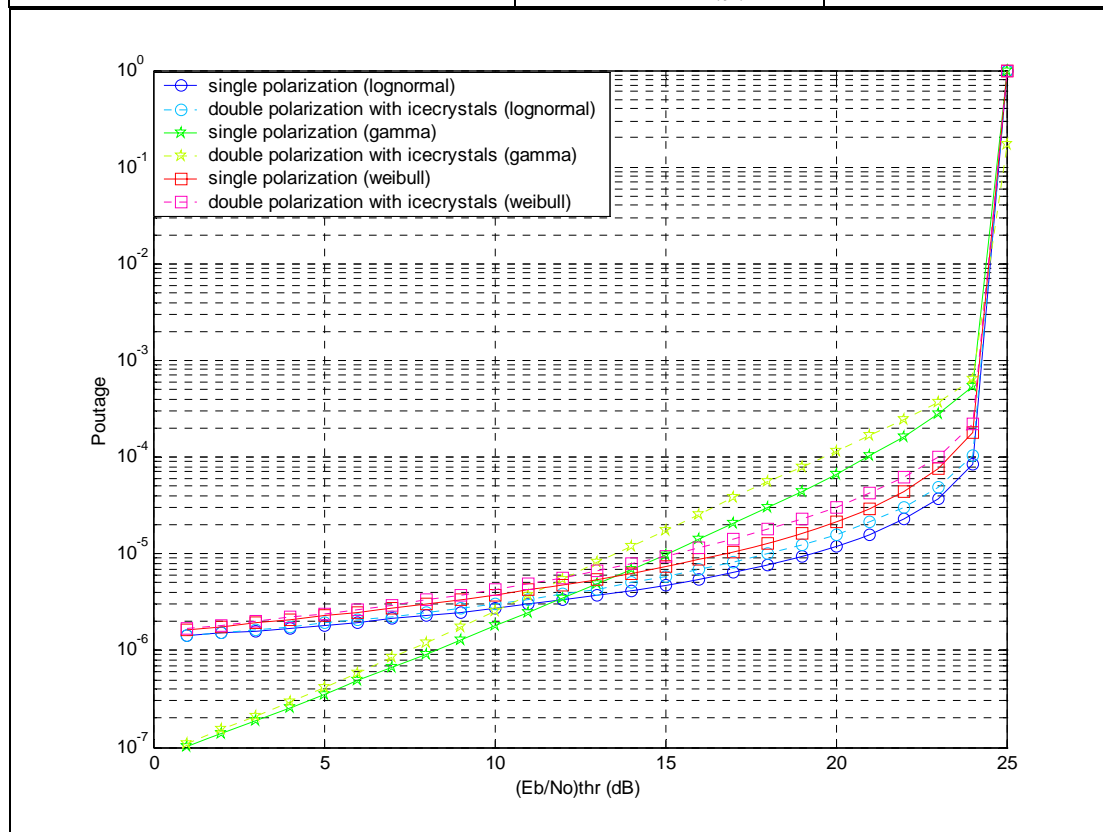
Σχήμα 7.27: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(E_b / N_o)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).

Πόλη	Ντουμπάι	
Γεωγραφικό πλάτος	25' 18''	
Γεωγραφικό μήκος	55' 18''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0001$	$S_r=2,8665$
	$v_r=0,0007$	$b_r=0,0537$
	$w_r=6,3469$	$m_r=0,1572$
Συχνότητα	12GHz	
Φασματική Πυκνότητα	2 bit/s Hz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(E_b / N_o)_{nom}$	25dB



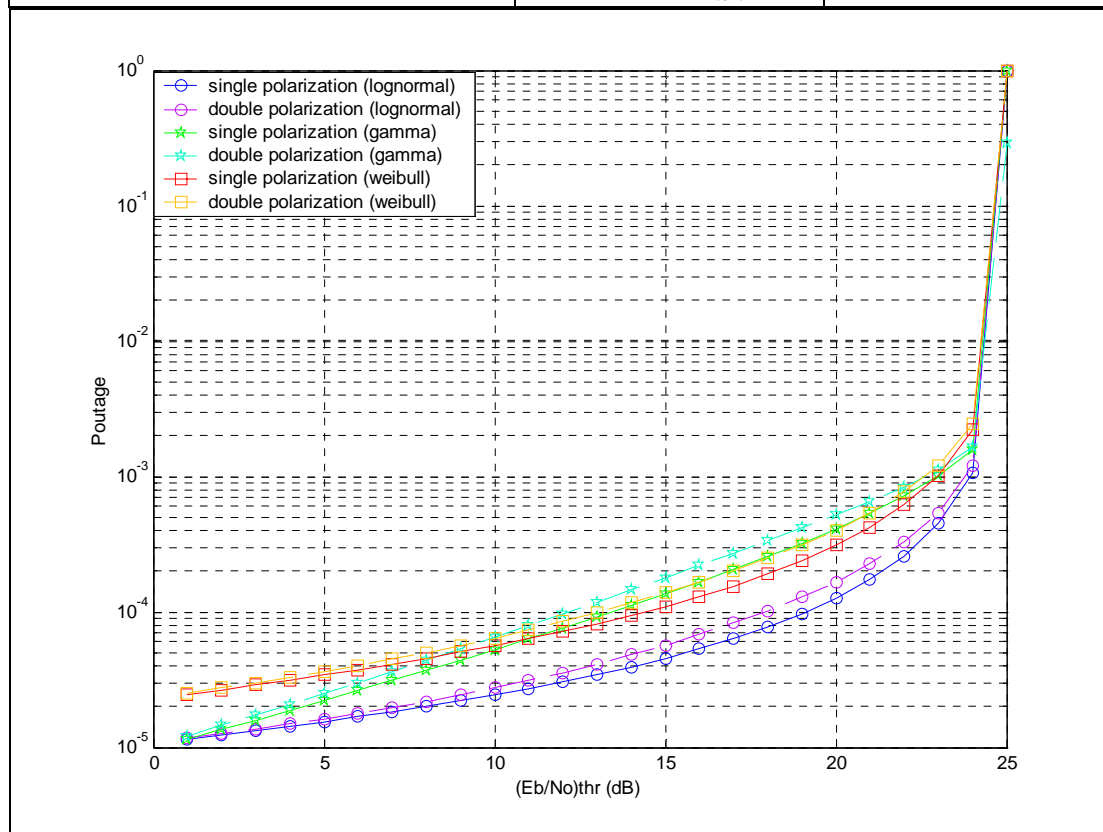
Σχήμα 7.28: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(E_b / N_o)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 55,4 °).

Πόλη	Ντουμπάι	
Γεωγραφικό πλάτος	25' 18''	
Γεωγραφικό μήκος	55' 18''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0001$	$S_r=2,8665$
	$v_r=0,0007$	$b_r=0,0537$
	$w_r=6,3469$	$m_r=0,1572$
Συχνότητα	12GHz	
Φασματική Πυκνότητα	2 bit/s Hz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(E_b / N_o)_{nom}$	25dB



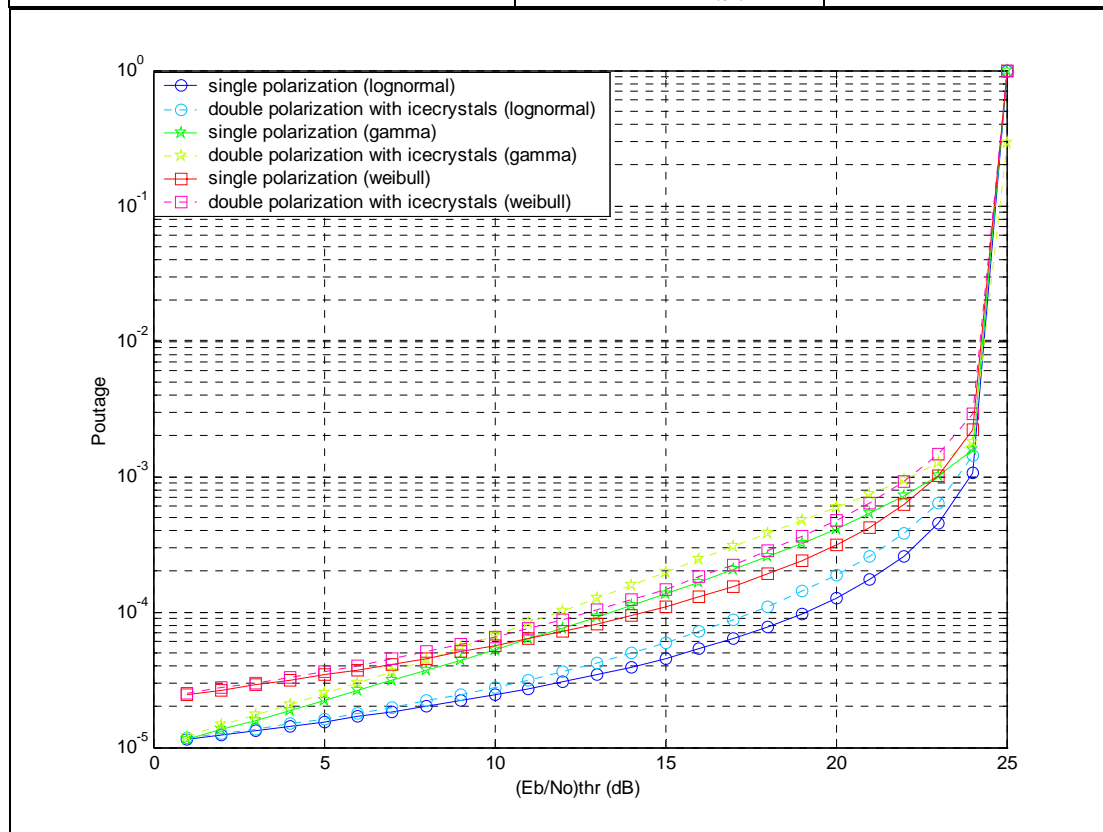
Σχήμα 7.29: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(E_b / N_o)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανώψωσης 55,4 °).

Πόλη	Γιοχάνεσμπουργκ	
Γεωγραφικό πλάτος	26' 15''S	
Γεωγραφικό μήκος	28'	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0065$	$S_r=2,2772$
	$v_r=0,0012$	$b_r=0,0285$
	$w_r=4,3353$	$m_r=0,1933$
Συχνότητα	12GHz	
Φασματική Πυκνότητα	2 bit/s Hz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(E_b / N_o)_{nom}$	25dB



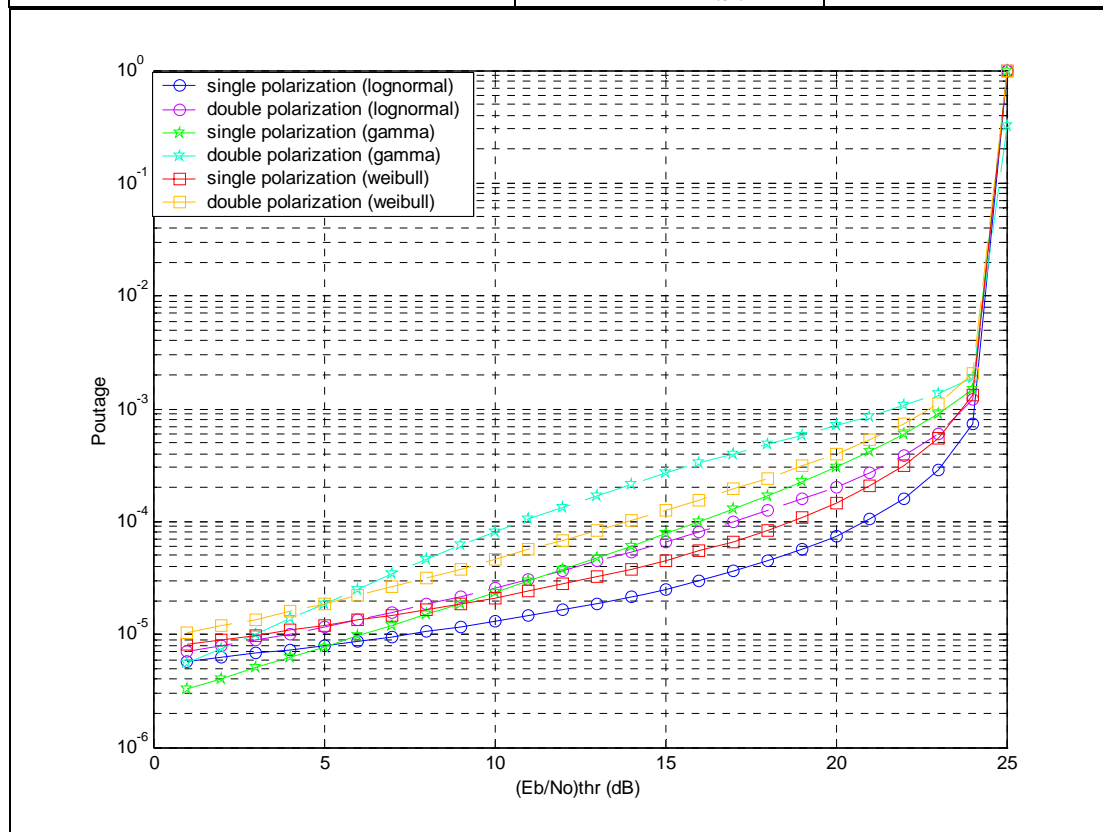
Σχήμα 7.30: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(E_b / N_o)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 57,1 °).

Πόλη	Γιοχάνεσμπουργκ	
Γεωγραφικό πλάτος	26' 15''S	
Γεωγραφικό μήκος	28'	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0065$	$S_r=2,2772$
	$v_r=0,0012$	$b_r=0,0285$
	$w_r=4,3353$	$m_r=0,1933$
Συχνότητα	12GHz	
Φασματική Πυκνότητα	2 bit/s Hz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(E_b / N_o)_{nom}$	25dB



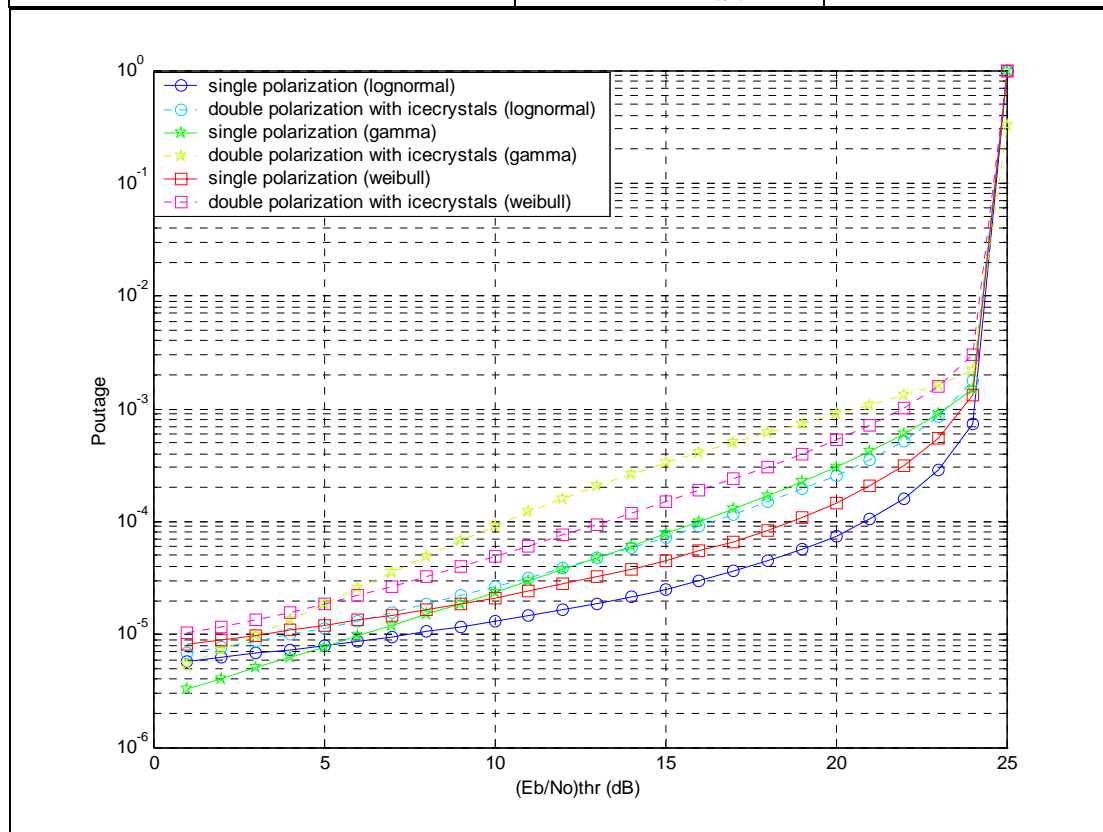
Σχήμα 7.31: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(E_b / N_o)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 57,1 °).

Πόλη	Μονακό	
Γεωγραφικό πλάτος	43' 42''	
Γεωγραφικό μήκος	7' 23''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0051$	$S_r=2,2385$
	$v_r=0,0013$	$b_r=0,0391$
	$w_r=4,6000$	$m_r=0,1986$
Συχνότητα	12GHz	
Φασματική Πυκνότητα	2 bit/s Hz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(E_b / N_o)_{nom}$	25dB



Σχήμα 7.32: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(E_b / N_o)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 30,7 °).

Πόλη	Μονακό	
Γεωγραφικό πλάτος	43' 42''	
Γεωγραφικό μήκος	7' 23''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0051$	$S_r=2,2385$
	$v_r=0,0013$	$b_r=0,0391$
	$w_r=4,6000$	$m_r=0,1986$
Συχνότητα	12GHz	
Φασματική Πυκνότητα	2 bit/s Hz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(E_b / N_o)_{nom}$	25dB



Σχήμα 7.33: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(E_b / N_o)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 30,7 °).

Η χωρητικότητα καναλιού

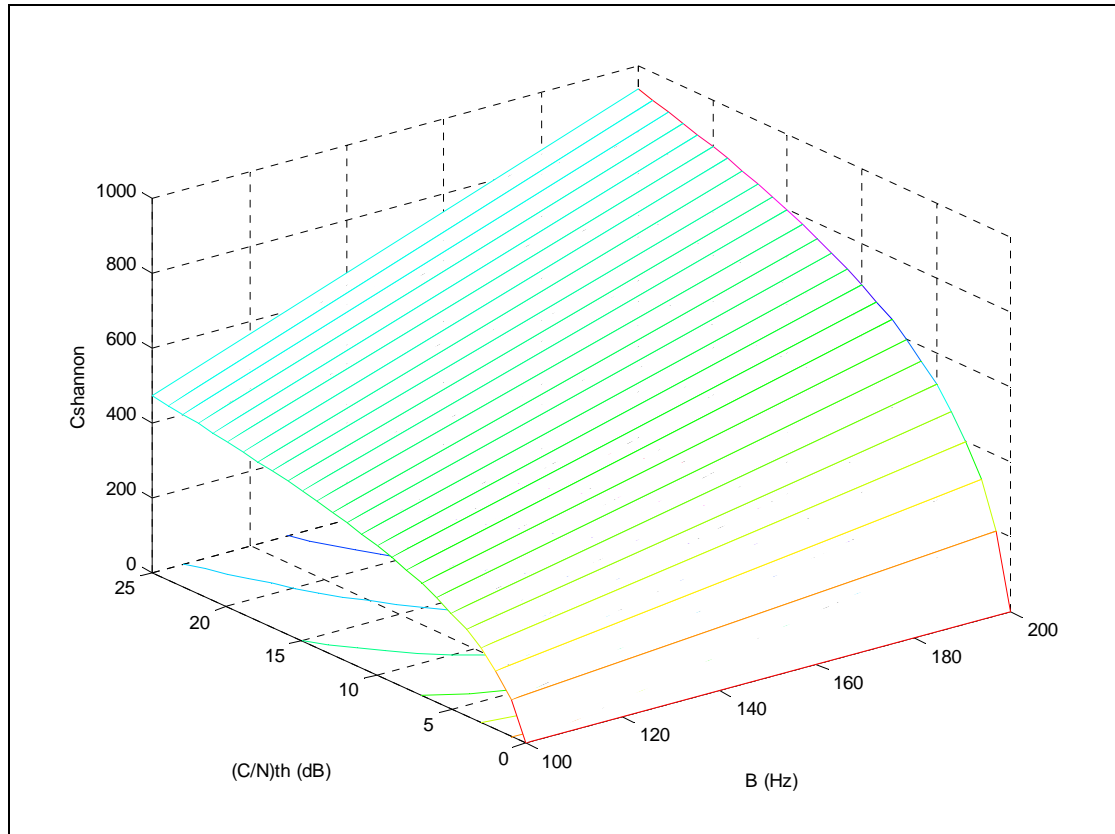
Για συνεχές κανάλι με προσθετικό λευκό θόρυβο Gauss (AWGN), όπως αναφέρθηκε και στο 6^ο κεφάλαιο, η χωρητικότητα $C_{Shannon}$ (σχήμα 7.34) δίνεται από το νόμο του Shannon

$$C_{Shannon} = B \log_2 \left(1 + \frac{C}{N} \right) \quad (b/s)$$

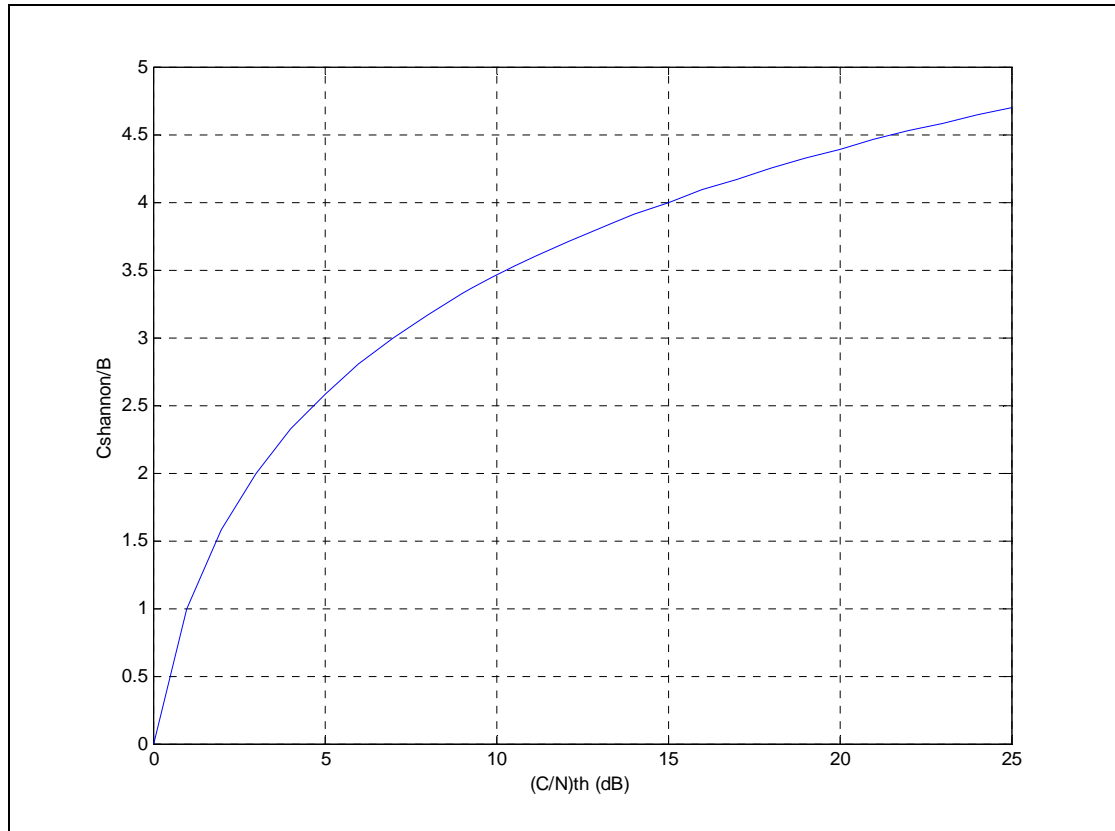
όπου B η χωρητικότητα του καναλιού σε Hz και C/N ο σηματοθορυβικός λόγος στο κανάλι. Θεωρητικά είναι εφικτή η εκπομπή σχεδόν στο ρυθμό αυτό. Το πρόβλημα είναι ότι ο Shannon δεν προσδιόρισε κάποια τεχνική για την επίτευξη του στόχου αυτού. Απέδειξε μόνο ότι απαιτούνταν σύνθετες τεχνικές κωδικοποίησης και απροσδιόριστα μεγάλες καθυστερήσεις εκπομπής. Προκειμένου να γίνει η ανάλυση ανεξάρτητη του εύρους ζώνης καναλιού, ο παραπάνω τύπος μπορεί να γραφεί στην μορφή

$$\frac{C_{Shannon}}{B} = \log_2 \left(1 + \frac{C}{N} \right) \quad \left(\frac{b/s}{Hz} \right)$$

Ως χωρητικότητα καναλιού θα θεωρηθεί ο λόγος $C_{Shannon}/B$, (σχήμα 7.35) παρόλο που στην πραγματικότητα αποτελεί τη χωρητικότητα ανά μονάδα εύρους ζώνης.



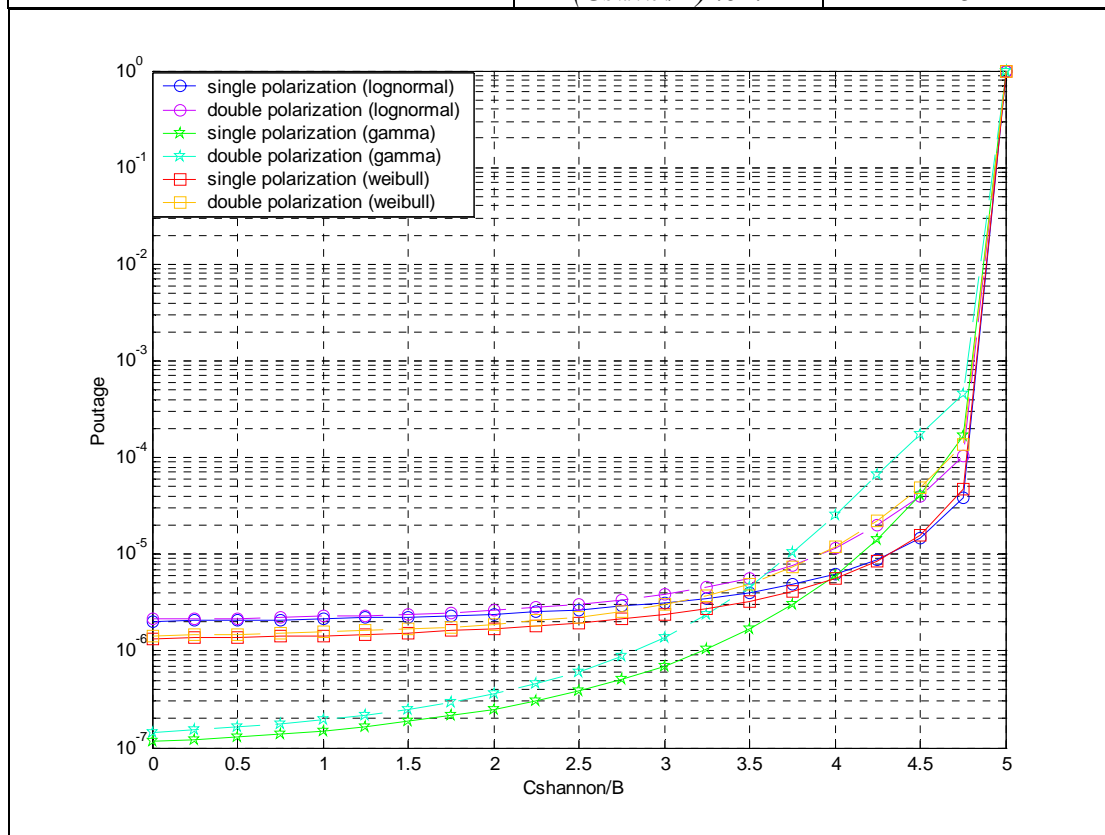
Σχήμα 7.34: Καμπύλη χωρητικότητας καναλιού $C_{shannon}$ σε συνάρτηση του σηματοθορυβικού λόγου και του εύρους ζώνης.



Σχήμα 7.35: Καμπύλη χωρητικότητας καναλιού $C_{shannon}$ προς το εύρος ζώνης σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο.

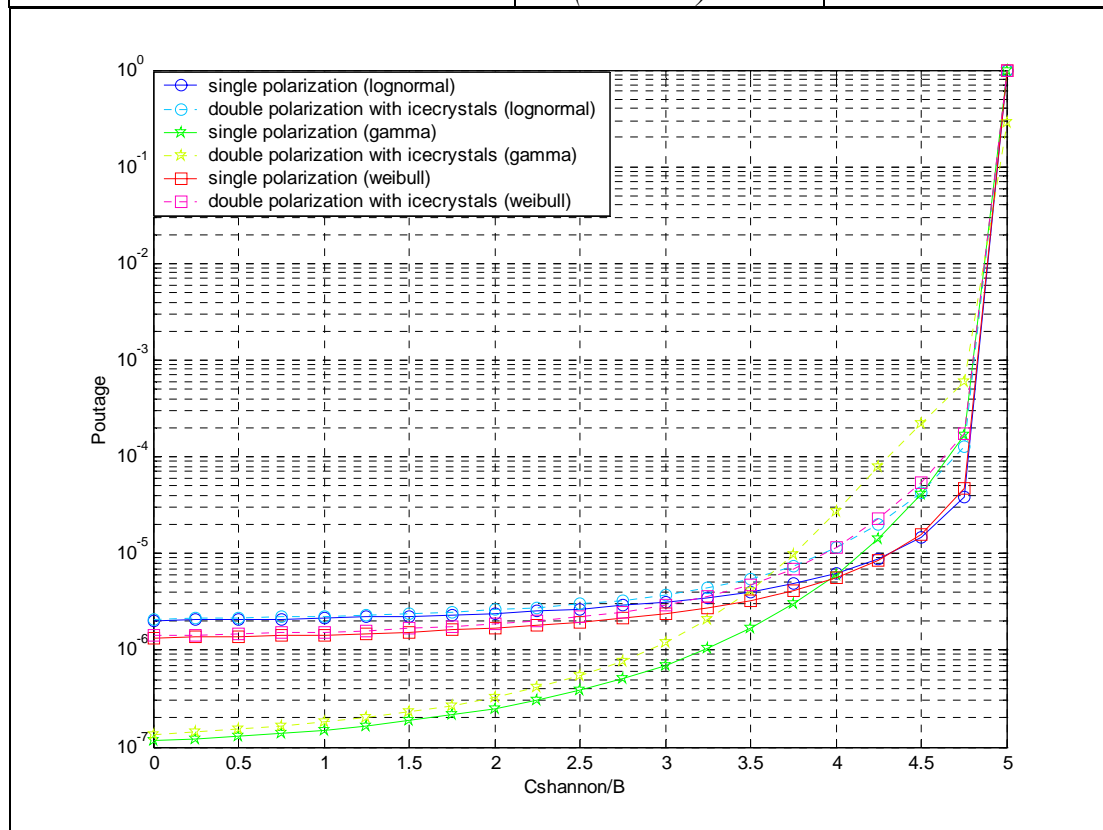
Πιθανότητα υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C_{Shannon}/B)_{thr}$

Πόλη	Αθήνα	
Γεωγραφικό πλάτος	37' 58''	
Γεωγραφικό μήκος	23' 43''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0029$	$S_r=2,3197$
	$v_r=0,0011$	$b_r=0,0444$
	$w_r=4,9462$	$m_r=0,1926$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(C_{Shannon}/B)_{nom}$	5



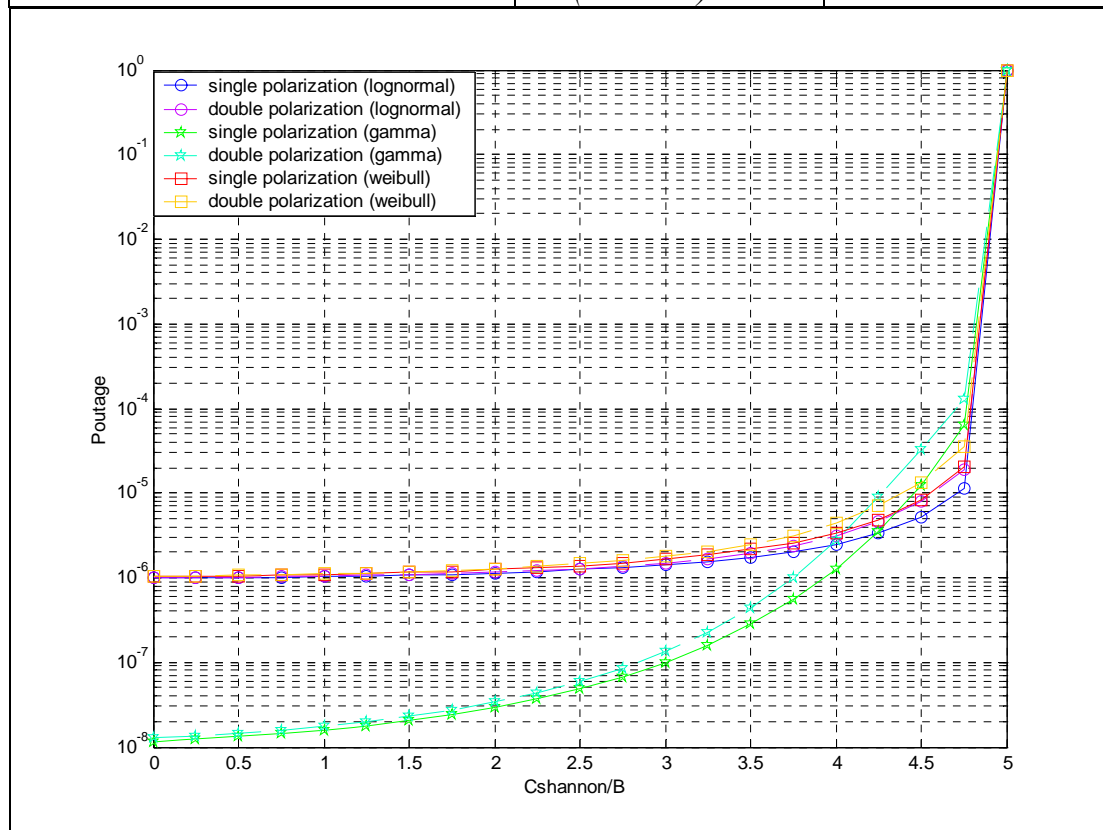
Σχήμα 7.36: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C_{Shannon} / B)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).

Πόλη	Αθήνα	
Γεωγραφικό πλάτος	37' 58''	
Γεωγραφικό μήκος	23' 43''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,038$	$S_r=1,628$
	$v_r=0,0011$	$b_r=0,0444$
	$w_r=4,9462$	$m_r=0,1926$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(C_{Shannon}/B)_{nom}$	5



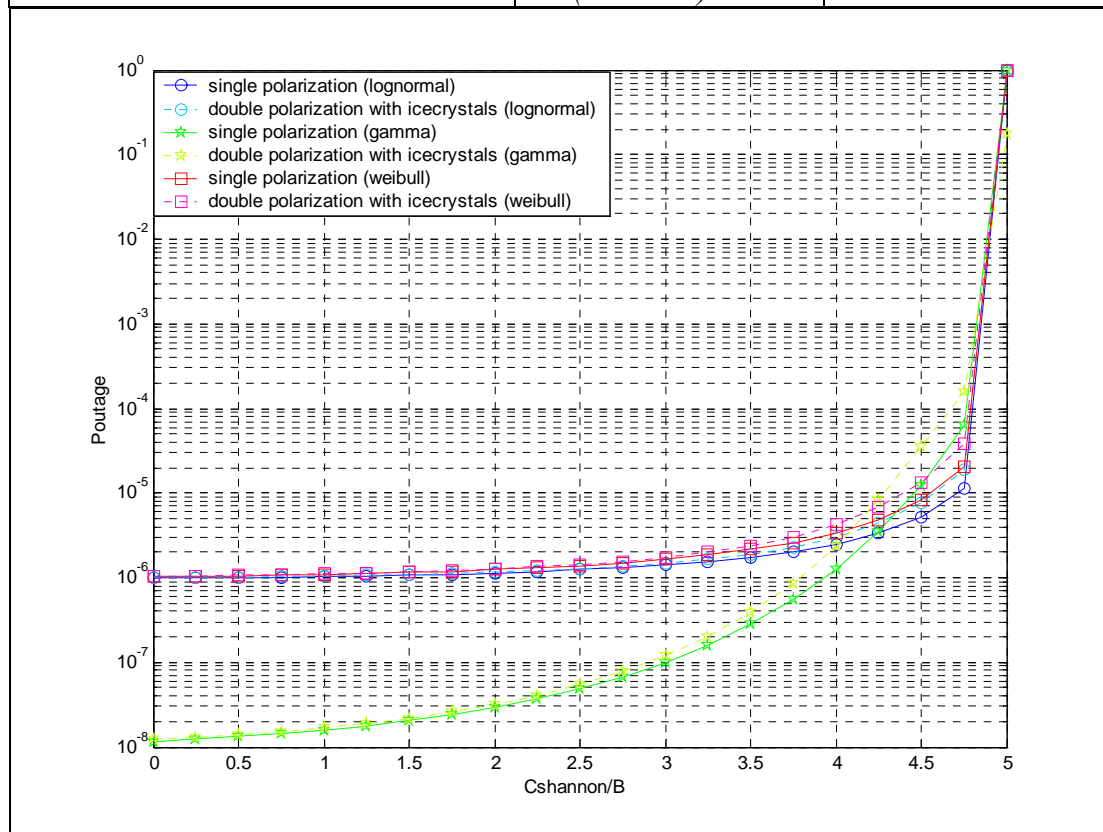
Σχήμα 7.37: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C_{Shannon} / B)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανώψωσης 46,4 °).

Πόλη	Ντουμπάι	
Γεωγραφικό πλάτος	25' 18''	
Γεωγραφικό μήκος	55' 18''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0001$	$S_r=2,8665$
	$v_r=0,0007$	$b_r=0,0537$
	$w_r=6,3469$	$m_r=0,1572$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(C_{Shannon}/B)_{nom}$	5



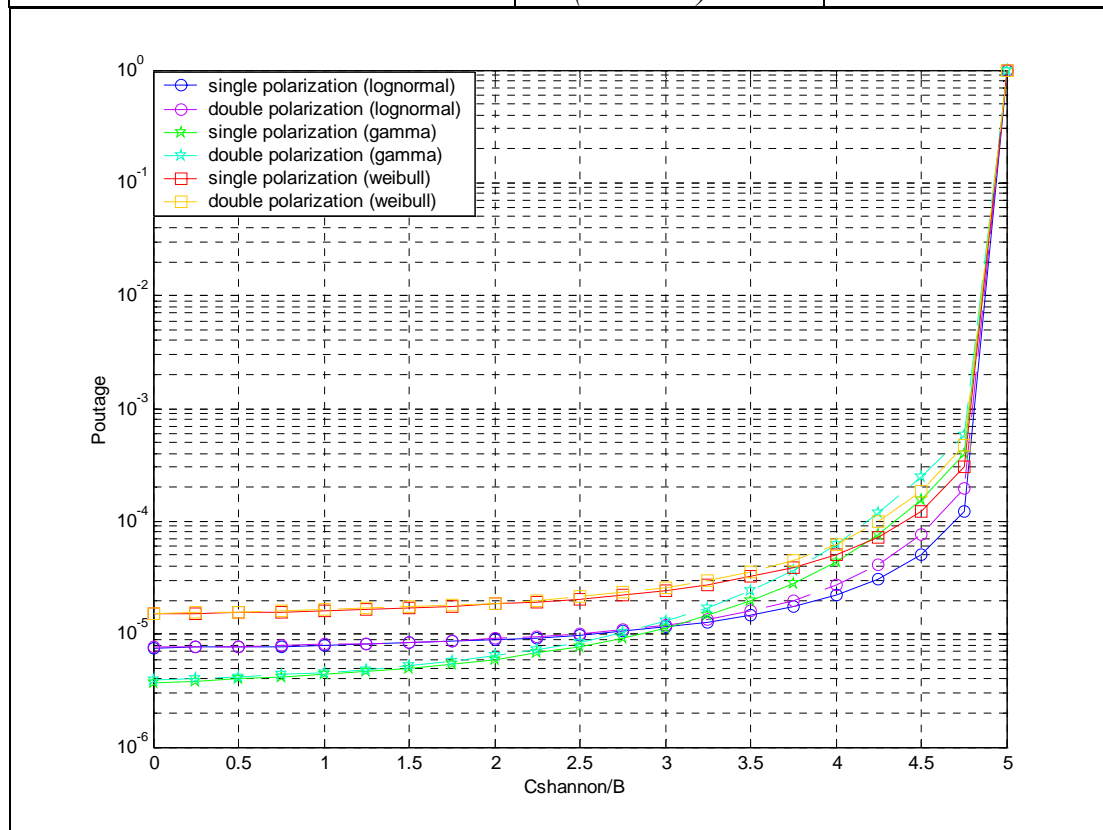
Σχήμα 7.38: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C_{Shannon} / B)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 55,4 °).

Πόλη	Ντουμπάι	
Γεωγραφικό πλάτος	25' 18''	
Γεωγραφικό μήκος	55' 18''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0001$	$S_r=2,8665$
	$v_r=0,0007$	$b_r=0,0537$
	$w_r=6,3469$	$m_r=0,1572$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(C_{Shannon}/B)_{nom}$	5



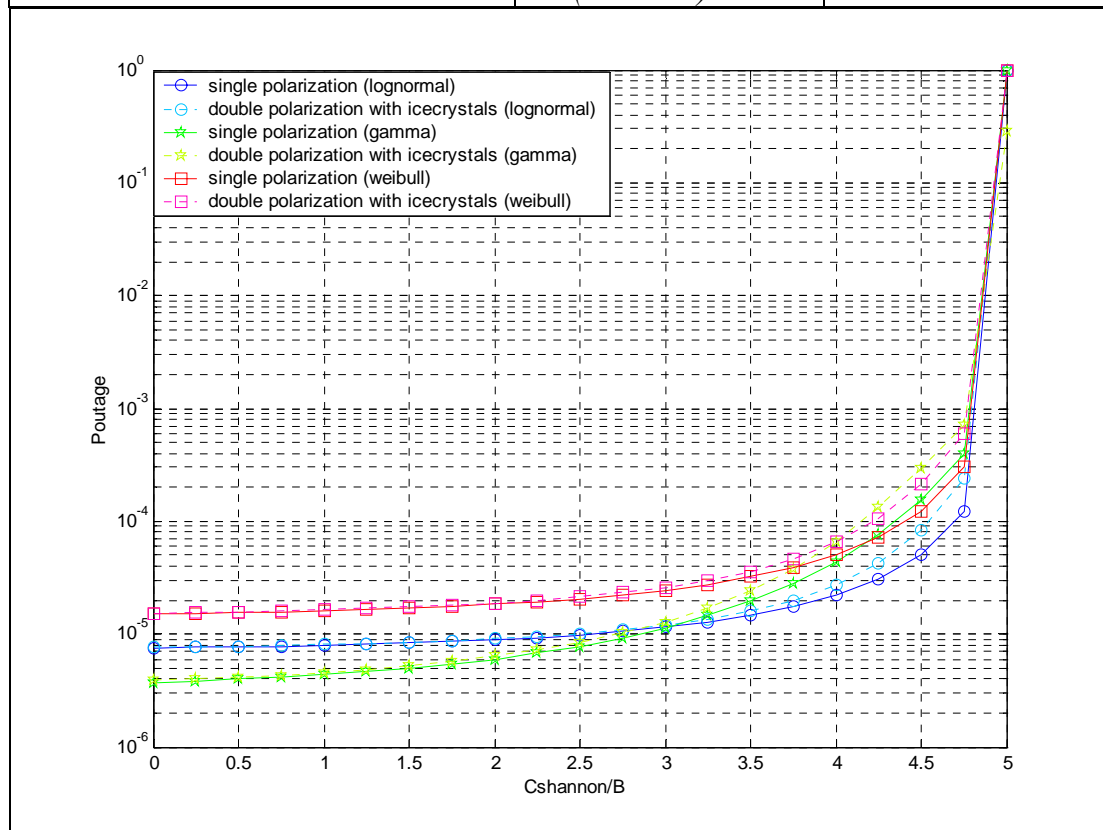
Σχήμα 7.39: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C_{Shannon} / B)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 55,4 °).

Πόλη	Γιοχάνεσμπουργκ	
Γεωγραφικό πλάτος	26' 15'' S	
Γεωγραφικό μήκος	28'	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0065$	$S_r=2,2772$
	$v_r=0,0012$	$b_r=0,0285$
	$w_r=4,3353$	$m_r=0,1933$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(C_{Shannon}/B)_{nom}$	5



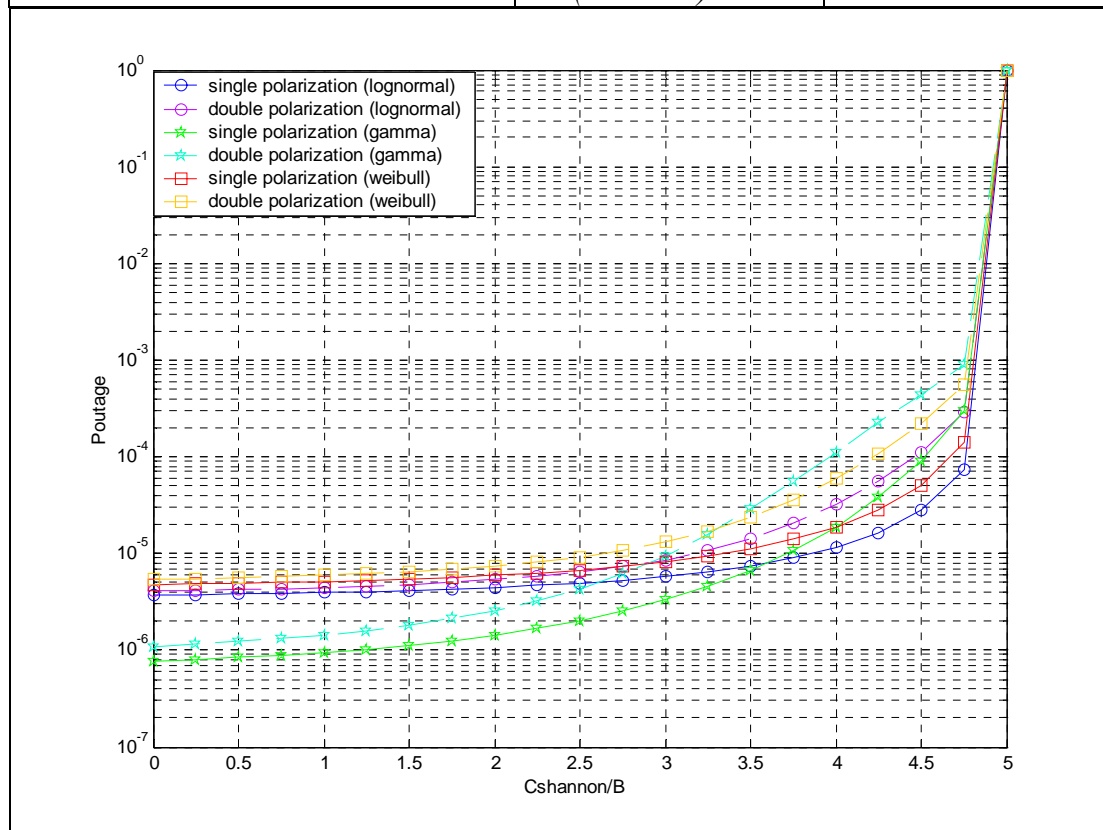
Σχήμα 7.40: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C_{Shannon} / B)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 57,1 °).

Πόλη	Γιοχάνεσμπουργκ	
Γεωγραφικό πλάτος	26' 15''S	
Γεωγραφικό μήκος	28'	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0065$	$S_r=2,2772$
	$v_r=0,0012$	$b_r=0,0285$
	$w_r=4,3353$	$m_r=0,1933$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(C_{Shannon}/B)_{nom}$	5



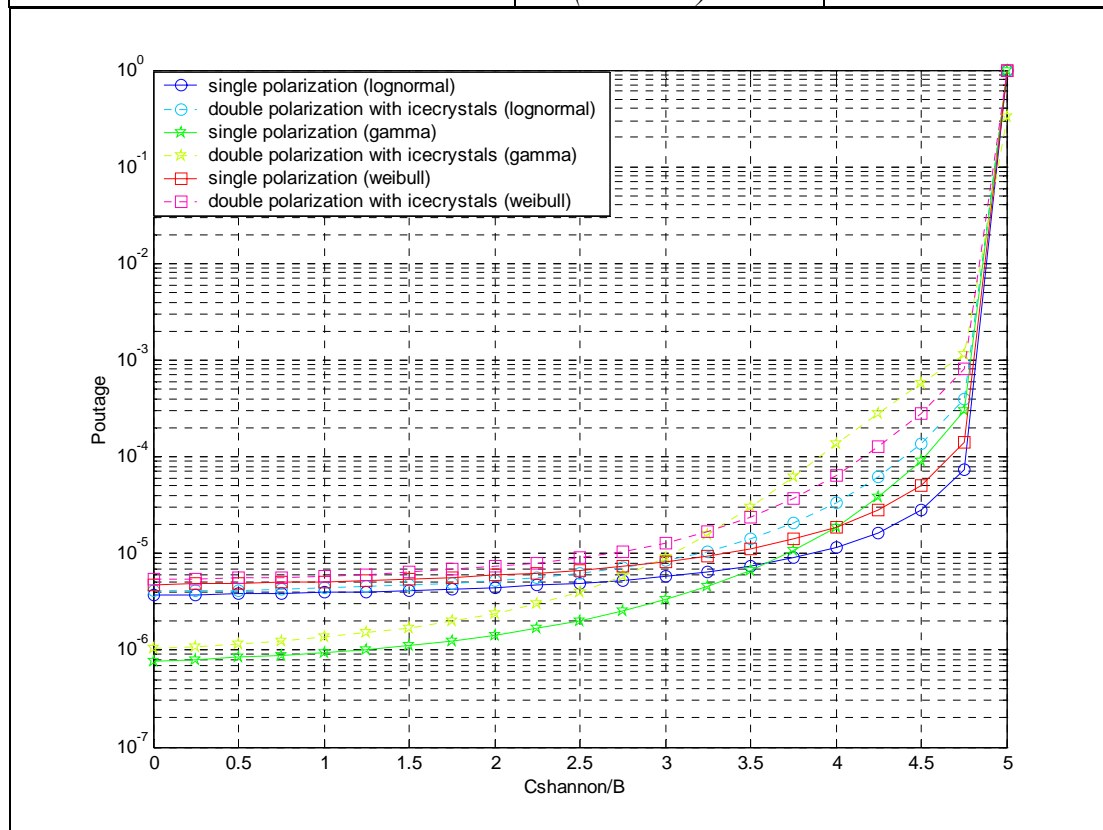
Σχήμα 7.41: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C_{Shannon} / B)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 57,1 °).

Πόλη	Μονακό	
Γεωγραφικό πλάτος	43' 42''	
Γεωγραφικό μήκος	7' 23''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0051$	$S_r=2,2385$
	$v_r=0,0013$	$b_r=0,0391$
	$w_r=4,6000$	$m_r=0,1986$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(C_{Shannon}/B)_{nom}$	5



Σχήμα 7.42: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C_{Shannon} / B)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 30,7 °).

<i>Πόλη</i>	<i>Μονακό</i>	
<i>Γεωγραφικό πλάτος</i>	43' 42''	
<i>Γεωγραφικό μήκος</i>	7' 23''	
<i>Χαρακτηριστικά βροχής</i>	$R_m=0,0051$	$S_r=2,2385$
	$v_r=0,0013$	$b_r=0,0391$
	$w_r=4,6000$	$m_r=0,1986$
<i>Συχνότητα</i>	12GHz	
<i>Δορυφόρος</i>	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(C_{Shannon}/B)_{nom}$	5



Σχήμα 7.43: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C_{Shannon} / B)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανώψωσης 30,7 °).

Πιθανότητα Λάθους ενός bit (BEP)

Από το παράρτημα Ι διαπιστώνει κανείς ότι η σχέση για το σχήμα DPSK είναι

$$P_b = \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}}\right) - \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc}^2\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}}\right). \text{ Η προηγούμενη εξίσωση καθώς και κάθε}$$

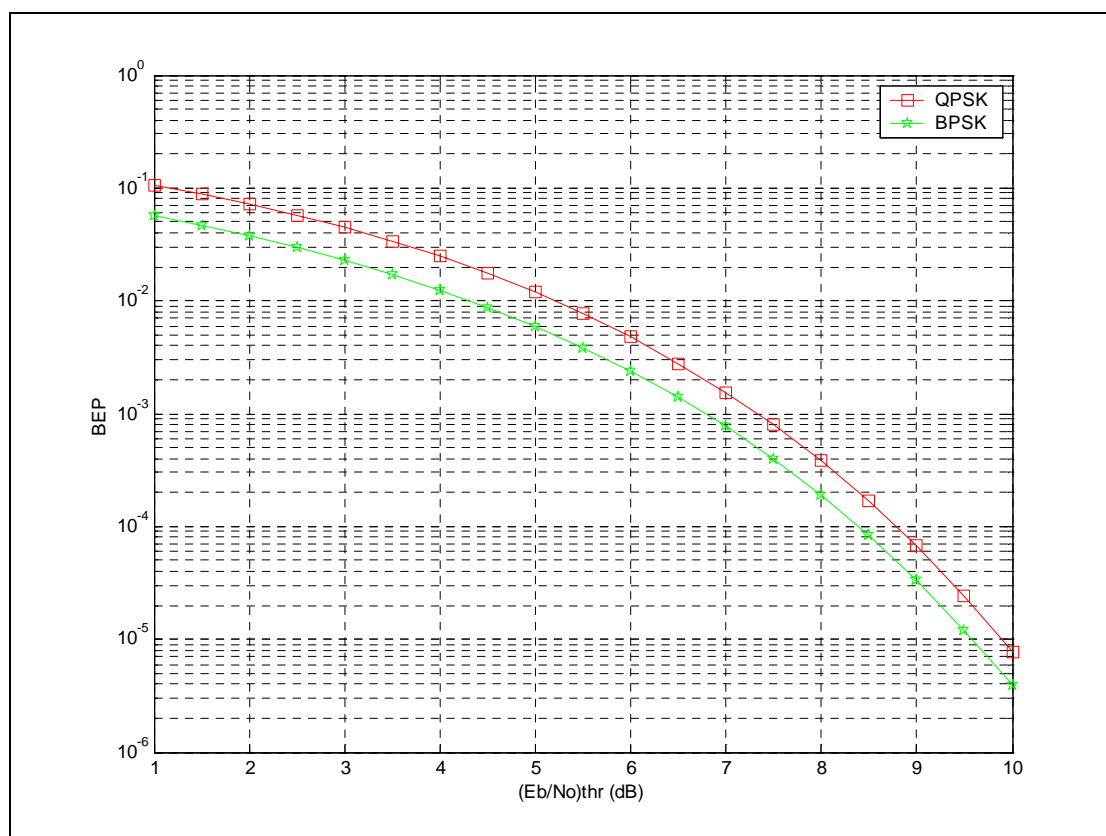
εξίσωση ψηφιακής διαμόρφωσης μπορεί να λυθεί αριθμητικά ως προς $\frac{E_b}{N_o}$ για τις

τιμές της BEP και αντίστροφα. Έτσι, προκύπτουν οι τιμές της BEP για διάφορες τιμές

$\frac{E_b}{N_o}$, ενώ μετατρέποντας τις τιμές του λόγου $\frac{E_b}{N_o}$ σε dB προκύπτουν οι αντίστοιχες

τιμές σε dB. Στο σχήμα 7.44 παρουσιάζονται οι τιμές του BEP ως προς το λόγο $\frac{E_b}{N_o}$

σε dB για τις ψηφιακές διαμορφώσεις QPSK, BPSK, ψηφιακά σχήματα τα οποία είναι τα πιο συχνά εμφανιζόμενα στις δορυφορικές επικοινωνίες.



Σχήμα 7.44: Ψηφιακές κωδικοποιήσεις.

Καμπύλες επίδοσης συστημάτων

Έχοντας υπολογίσει το ρυθμό με τον οποίο μεταδίδει δεδομένα κάθε φέρον της ζεύξης, καθορίζεται το απαιτούμενο εύρος ζώνης. Ανάλογα με το σχήμα ψηφιακής διαμόρφωσης και τον κώδικα διόρθωσης λαθών που χρησιμοποιούνται, το ζητούμενο εύρος ζώνης προκύπτει από τη σχέση

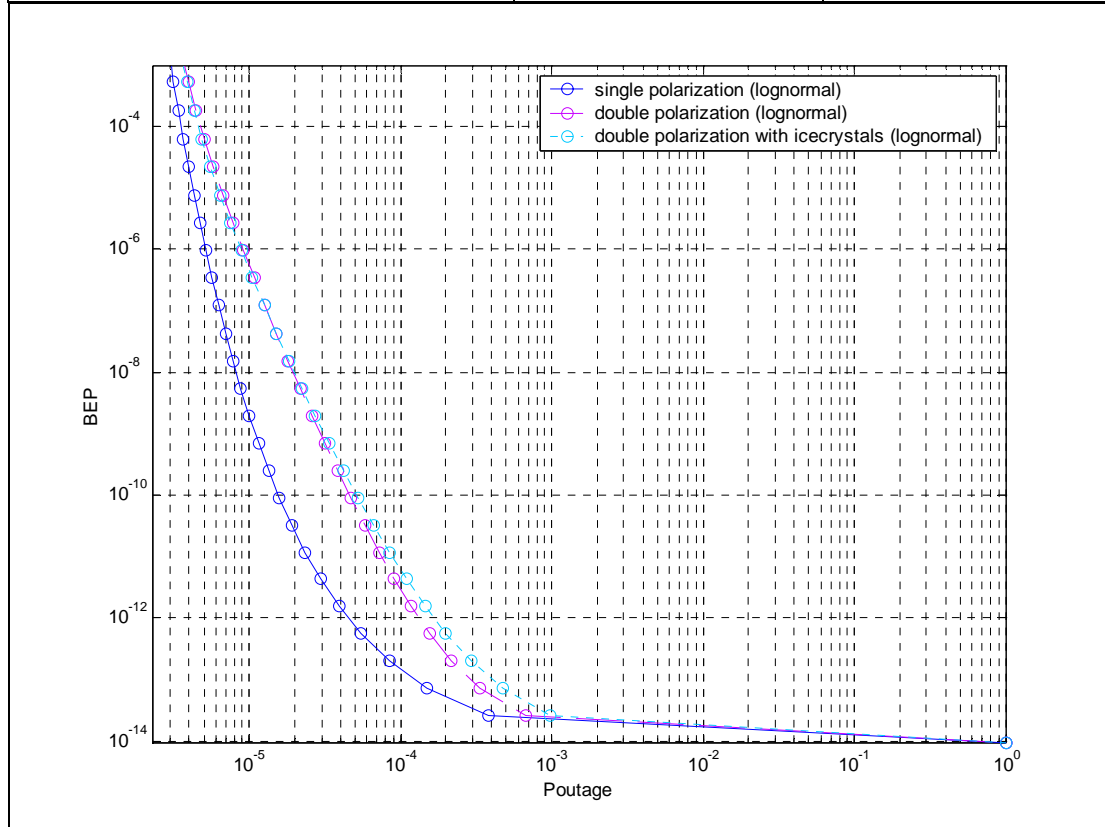
$$B = \frac{R}{\Gamma \cdot \rho}$$

όπου R ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, Γ η φασματική απόδοση του σχήματος διαμόρφωσης και ρ ο ρυθμός διόρθωσης λαθών του σχήματος κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται.

Στις δορυφορικές επικοινωνίες χρησιμοποιείται διαμόρφωση BPSK και QPSK. Η φασματική απόδοση είναι $\Gamma = 0,7$ bits/Hz για την BPSK και $\Gamma = 1,5$ bits/Hz για την QPSK. Οι κώδικες διόρθωσης λαθών που χρησιμοποιούνται έχουν συνήθως ρυθμούς διόρθωσης $1/2$, $3/4$ και $7/8$ (στην περίπτωση που εξετάζεται δε χρησιμοποιούνται κώδικες διόρθωσης λαθών).

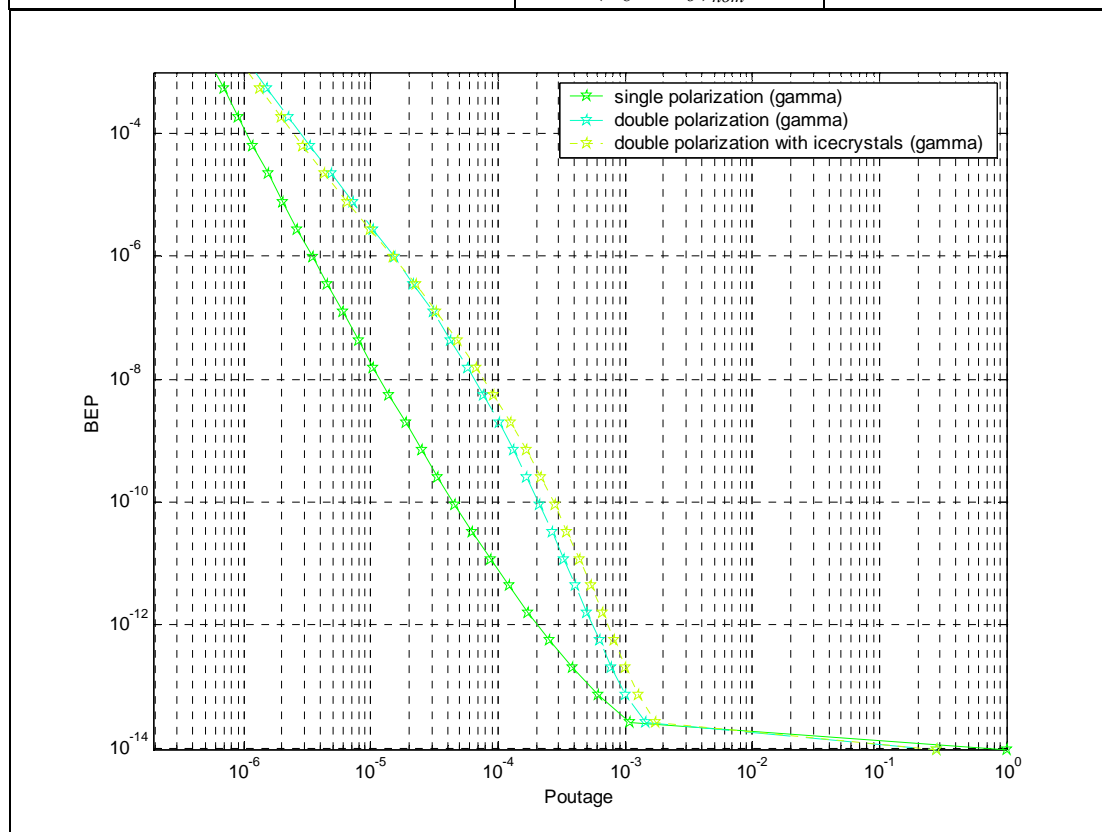
Στην περίπτωση που εξετάζεται γίνεται αναφορά στην Αθήνα για την οποία θα εξεταστούν και τα δύο σχήματα κωδικοποίησης (BPSK με $\Gamma = 0,7$ bits/Hz και QPSK με $\Gamma = 1,5$ bits/Hz).

Πόλη	Αθήνα	
Γεωγραφικό πλάτος	37' 58''	
Γεωγραφικό μήκος	23' 43''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0029$	$S_r=2,3197$
Συχνότητα	12GHz	
Ψηφιακή Διαμόρφωση	QPSK	
Φασματική Πυκνότητα	1,5 bit/s Hz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(E_b / N_o)_{nom}$	15dB



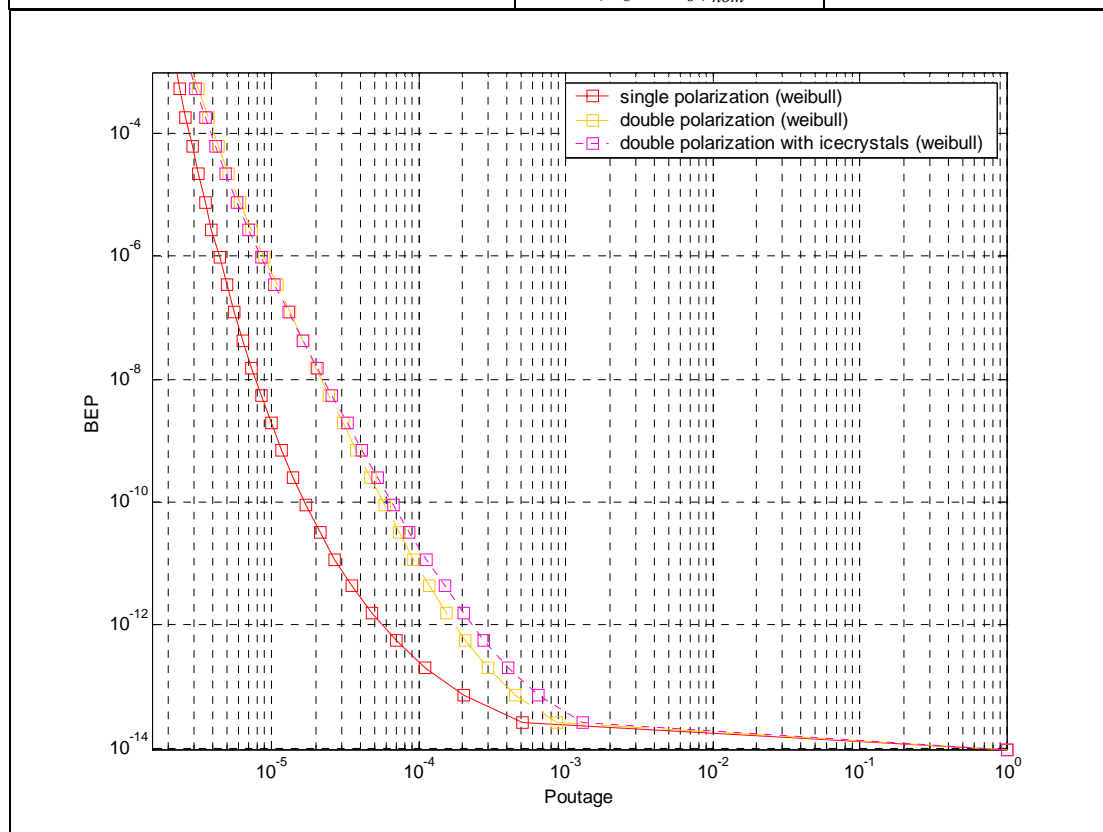
Σχήμα 7.45: Καμπύλες επίδοσης για συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών σε συστήματα απλής, διπλής πόλωσης χωρίς παγοκρυστάλλους και διπλής πόλωσης με παγοκρυστάλλους για το λογαριθμοκανονικό μοντέλο. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).

Πόλη	Αθήνα	
Γεωγραφικό πλάτος	37' 58''	
Γεωγραφικό μήκος	23' 43''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$v_r=0,0011$	$b_r=0,0444$
Συχνότητα	12GHz	
Ψηφιακή Διαμόρφωση	QPSK	
Φασματική Πυκνότητα	1,5 bit/s Hz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(E_b / N_o)_{nom}$	15dB



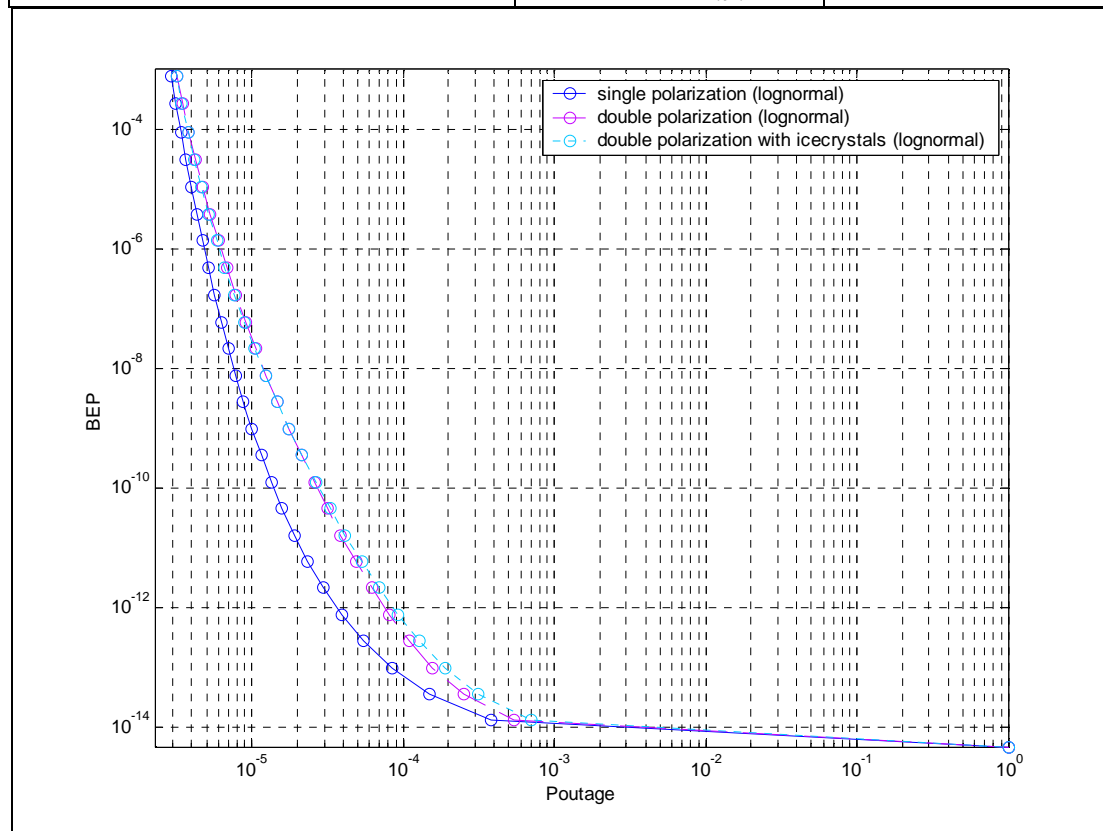
Σχήμα 7.46: Καμπύλες επίδοσης για συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών σε συστήματα απλής, διπλής πόλωσης χωρίς παγοκρυστάλλους και διπλής πόλωσης με παγοκρυστάλλους για το μοντέλο γάμμα. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).

Πόλη	Αθήνα	
Γεωγραφικό πλάτος	37' 58''	
Γεωγραφικό μήκος	23' 43''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$w_r=4,9462$	$m=0,1926$
Συχνότητα	12GHz	
Ψηφιακή Διαμόρφωση	QPSK	
Φασματική Πυκνότητα	1,5 bit/s Hz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(E_b / N_o)_{nom}$	15dB



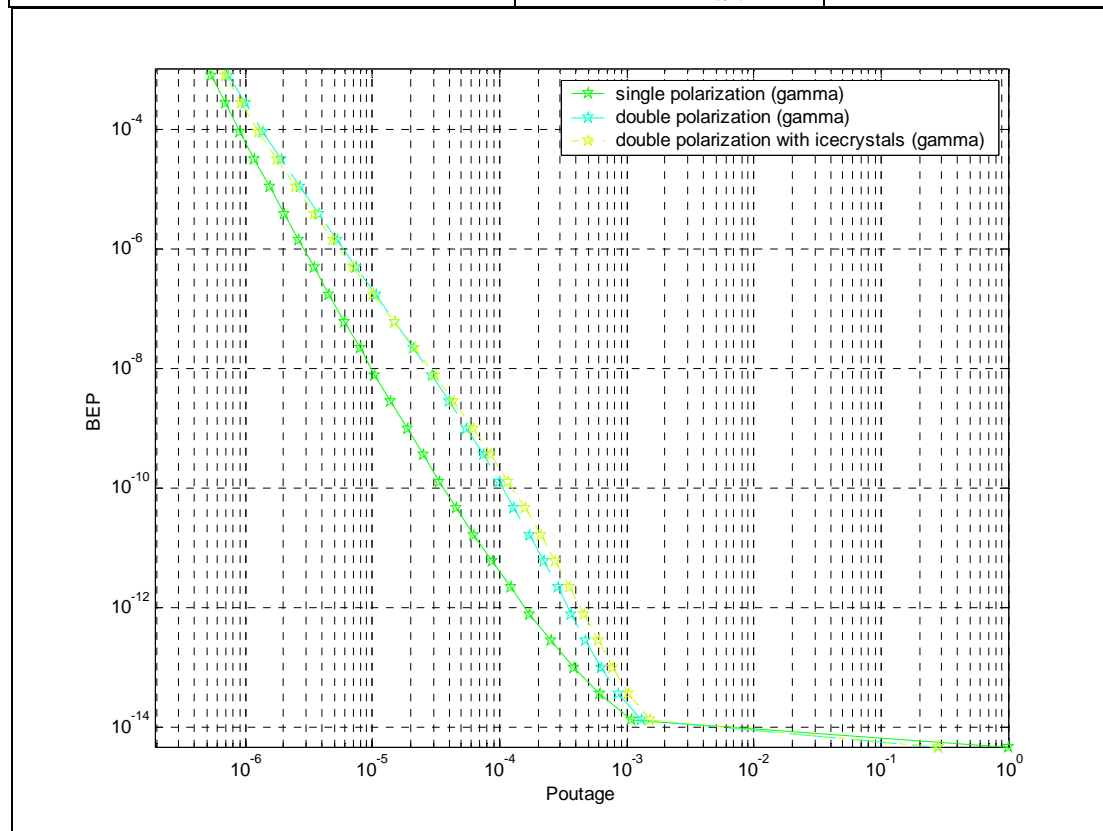
Σχήμα 7.47: Καμπύλες επίδοσης για συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών σε συστήματα απλής, διπλής πόλωσης χωρίς παγοκρυστάλλους και διπλής πόλωσης με παγοκρυστάλλους για το μοντέλο Weibull. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).

Πόλη	Αθήνα	
Γεωγραφικό πλάτος	37' 58''	
Γεωγραφικό μήκος	23' 43''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0029$	$S_r=2,3197$
	$v_r=0,0011$	$b_r=0,0444$
	$w_r=4,9462$	$m_r=0,1926$
Συχνότητα	12GHz	
Ψηφιακή Διαμόρφωσης	BPSK	
Φασματική Πυκνότητα	0,7 bit/s Hz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(E_b / N_o)_{nom}$	15dB



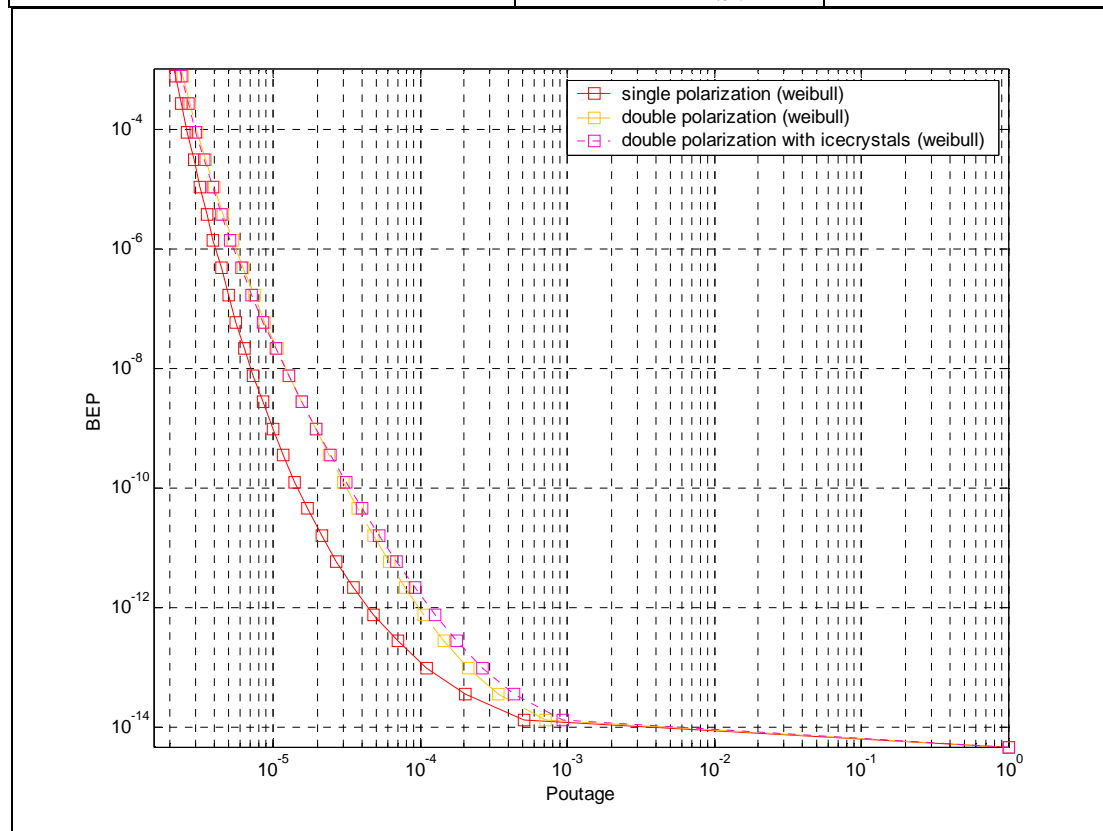
Σχήμα 7.48: Καμπύλες επίδοσης για συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών σε συστήματα απλής, διπλής πόλωσης χωρίς παγοκρυστάλλους και διπλής πόλωσης με παγοκρυστάλλους για το λογαριθμοκανονικό μοντέλο. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).

Πόλη	Αθήνα	
Γεωγραφικό πλάτος	37' 58''	
Γεωγραφικό μήκος	23' 43''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0029$	$S_r=2,3197$
	$v_r=0,0011$	$b_r=0,0444$
	$w_r=4,9462$	$m_r=0,1926$
Συχνότητα	12GHz	
Ψηφιακή Διαμόρφωσης	BPSK	
Φασματική Πυκνότητα	0,7 bit/s Hz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(E_b / N_o)_{nom}$	15dB



Σχήμα 7.49: Καμπύλες επίδοσης για συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών σε συστήματα απλής, διπλής πόλωσης χωρίς παγοκρυστάλλους και διπλής πόλωσης με παγοκρυστάλλους για το μοντέλο γάμμα. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανόψωσης 46,4 °).

Πόλη	Αθήνα	
Γεωγραφικό πλάτος	37' 58''	
Γεωγραφικό μήκος	23' 43''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0029$	$S_r=2,3197$
	$v_r=0,0011$	$b_r=0,0444$
	$w_r=4,9462$	$m_r=0,1926$
Συχνότητα	12GHz	
Ψηφιακή Διαμόρφωσης	BPSK	
Φασματική Πυκνότητα	0,7 bit/s Hz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(E_b / N_o)_{nom}$	15dB

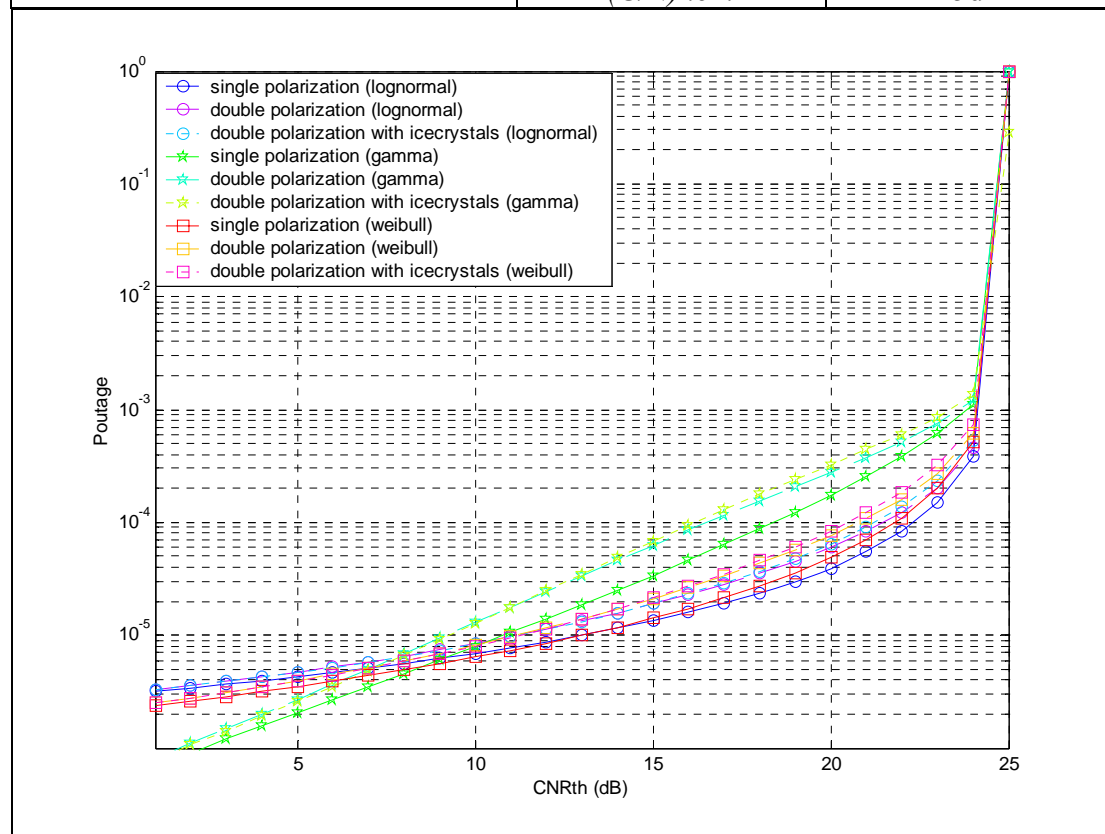


Σχήμα 7.50: Καμπύλες επίδοσης για συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών σε συστήματα απλής, διπλής πόλωσης χωρίς παγοκρυστάλλους και διπλής πόλωσης με παγοκρυστάλλους για το μοντέλο Weibull. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).

Πιθανότητα υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ σε συνάρτηση με τη συχνότητα

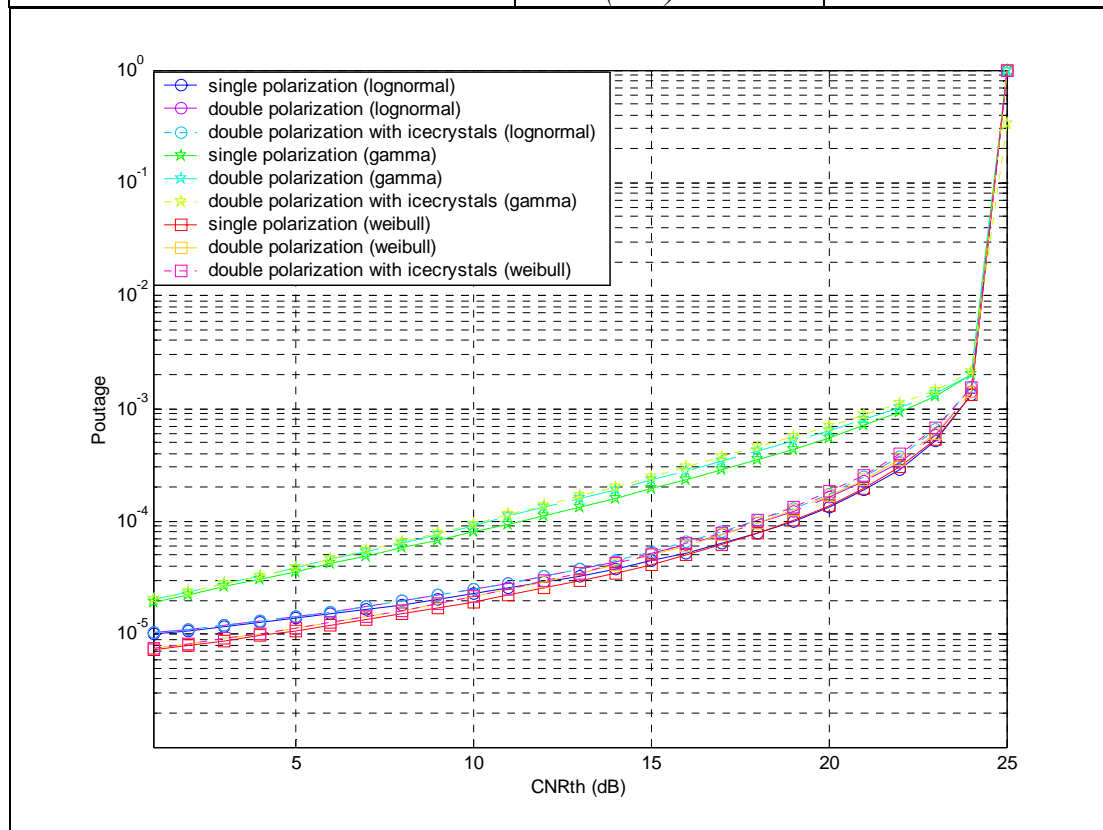
Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η επίδραση της συχνότητας στην πιθανότητα υπέρβασης σηματοθορυβικού λόγου ενός συστήματος απλής και διπλής πόλωσης. Η ανάλυση θα γίνει για την Αθήνα.

<i>Πόλη</i>	<i>Αθήνα</i>	
<i>Γεωγραφικό πλάτος</i>	37' 58''	
<i>Γεωγραφικό μήκος</i>	23' 43''	
<i>Χαρακτηριστικά βροχής</i>	$R_m=0,0029$	$S_r=2,3197$
	$v_r=0,0011$	$b_r=0,0444$
	$w_r=4,9462$	$m_r=0,1926$
<i>Συχνότητα</i>	12GHz	
<i>Δορυφόρος</i>	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(C/N)_{nom}$	25dB



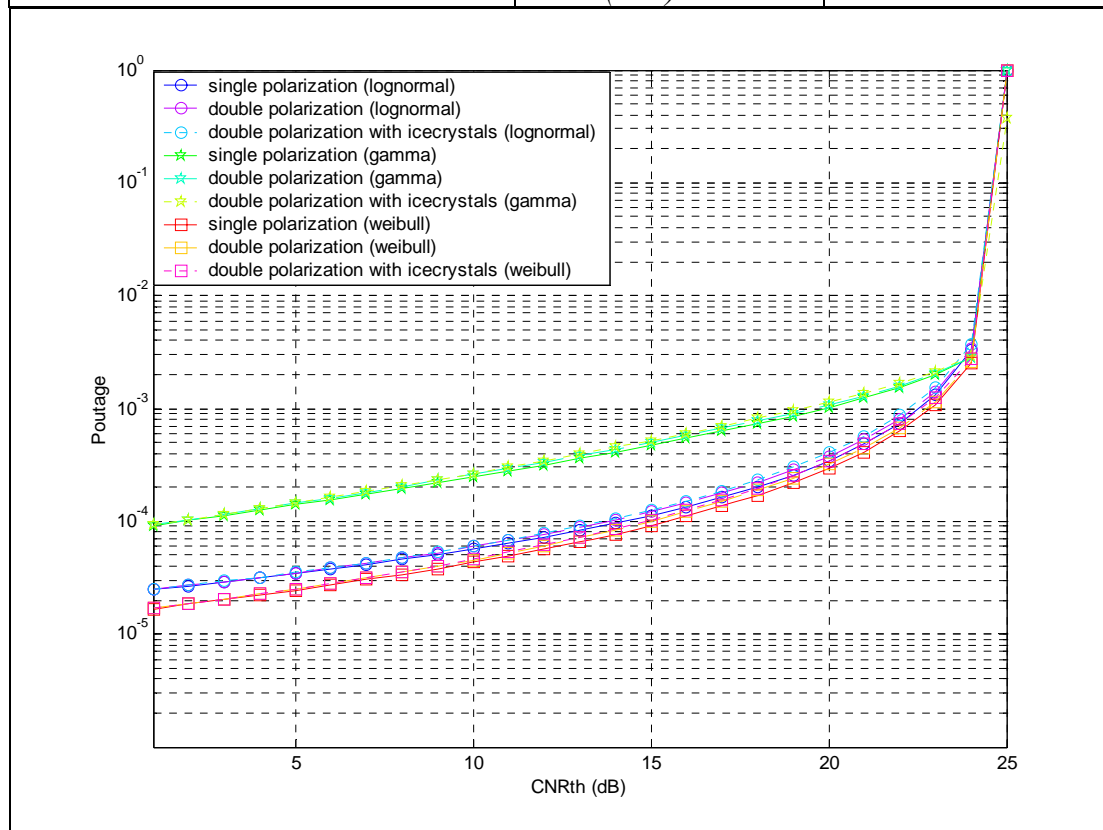
Σχήμα 7.51: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).

Πόλη	Αθήνα	
Γεωγραφικό πλάτος	37' 58''	
Γεωγραφικό μήκος	23' 43''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0029$	$S_r=2,3197$
	$v_r=0,0011$	$b_r=0,0444$
	$w_r=4,9462$	$m_r=0,1926$
Συχνότητα	18GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(C/N)_{nom}$	25dB



Σχήμα 7.52: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 18GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).

Πόλη	Αθήνα	
Γεωγραφικό πλάτος	37' 58''	
Γεωγραφικό μήκος	23' 43''	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0029$	$S_r=2,3197$
	$v_r=0,0011$	$b_r=0,0444$
	$w_r=4,9462$	$m_r=0,1926$
Συχνότητα	24GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	$(C/N)_{nom}$	25dB

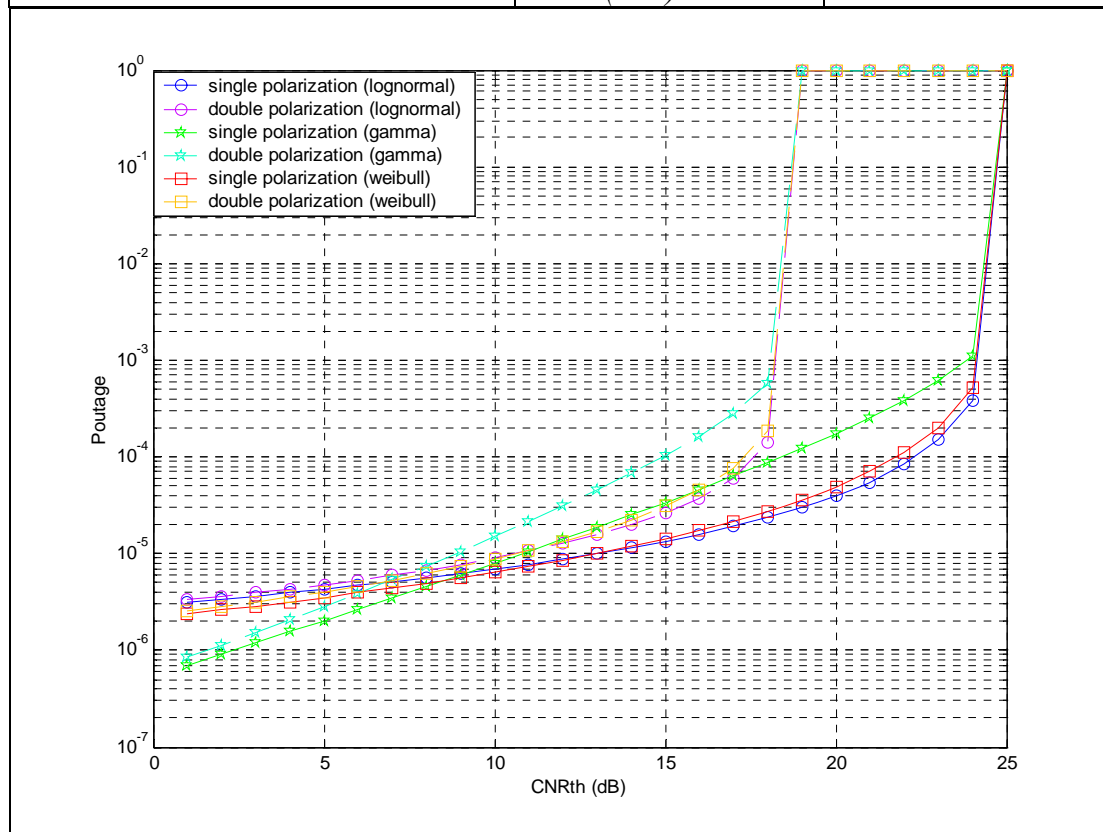


Σχήμα 7.53: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων. (Συχνότητα 24GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).

Πιθανότητα υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ με μη ιδανική κεραία

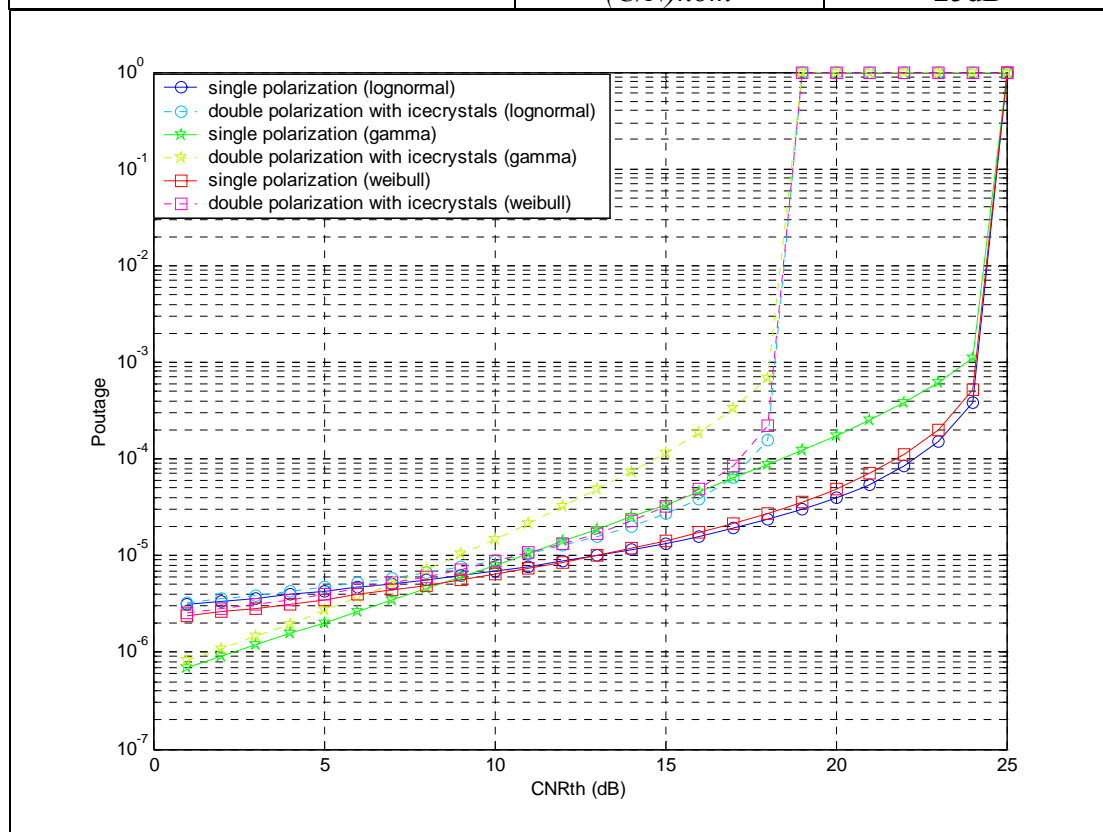
Μέχρι τώρα έχουν ενσωματωθεί μόνο τα αποτελέσματα αποπόλωσης βροχής και όχι ατελειών που εμπλέκουν φαινόμενα αποπόλωσης που προέρχονται από τις κεραίες. Αν υποθεθεί ότι η κεραία της σύνδεσης δεν είναι ιδανική ($XPD_{antenna}$) και δεν έχει θεωρητικά άπειρες τιμές, αλλά συγκρίσιμες με την αποπόλωση της βροχής τότε προκύπτουν για τις διάφορες πόλεις τα παρακάτω σχήματα.

Πόλη	Αθήνα	
Γεωγραφικό πλάτος	37' 58''	
Γεωγραφικό μήκος	23' 43''	
XPD κεραίας	20dB	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0029$	$S_r=2,3197$
	$v_r=0,0011$	$b_r=0,0444$
	$w_r=4,9462$	$m_r=0,1926$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	(C/N) _{nom}	25dB



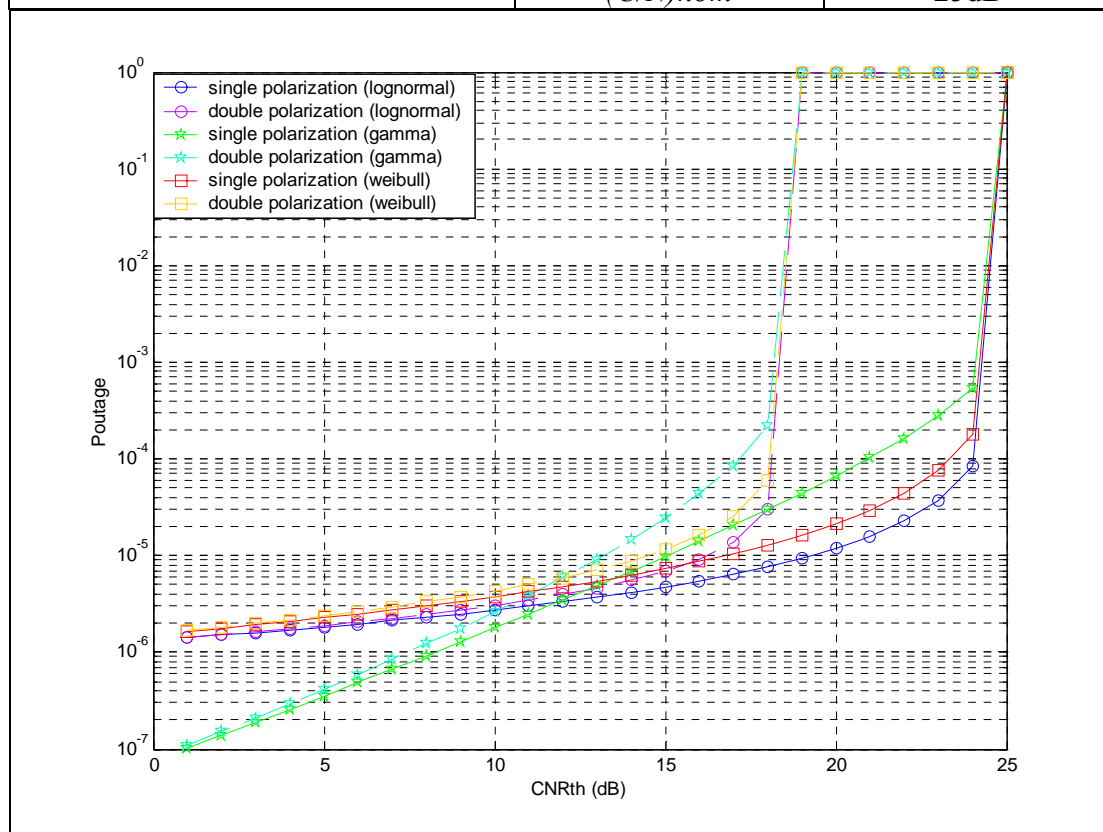
Σχήμα 7.54: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων με τη χρήση μη ιδανικής κεραίας. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).

Πόλη	Αθήνα	
Γεωγραφικό πλάτος	37' 58''	
Γεωγραφικό μήκος	23' 43''	
XPD κεραίας	20dB	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,038$	$S_r=1,628$
	$v_r=0,0011$	$b_r=0,0444$
	$w_r=4,9462$	$m_r=0,1926$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	(C/N) _{nom}	25dB



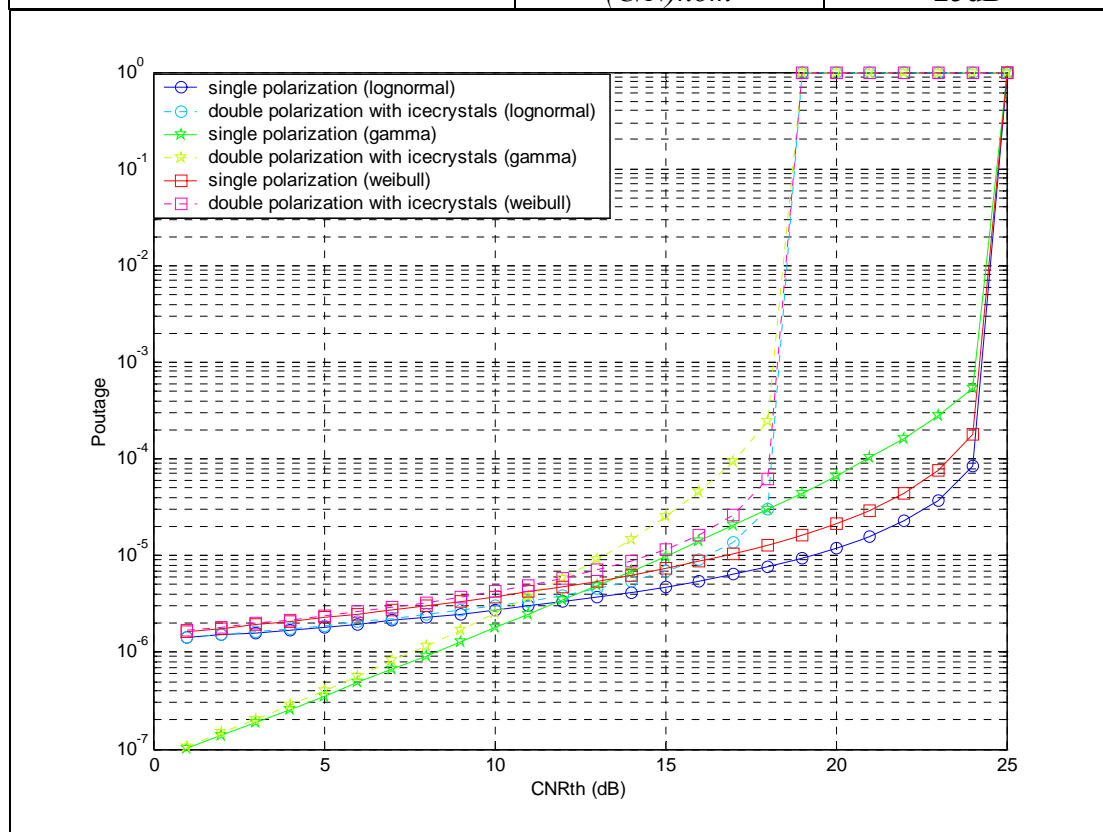
Σχήμα 7.55: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων με τη χρήση μη ιδανικής κεραίας. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 46,4 °).

Πόλη	Ντουμπάι	
Γεωγραφικό πλάτος	25' 18''	
Γεωγραφικό μήκος	55' 18''	
XPD κεραίας	20dB	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0001$	$S_r=2,8665$
	$v_r=0,0007$	$b_r=0,0537$
	$w_r=6,3469$	$m_r=0,1572$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	(C/N) <i>nom</i>	25dB



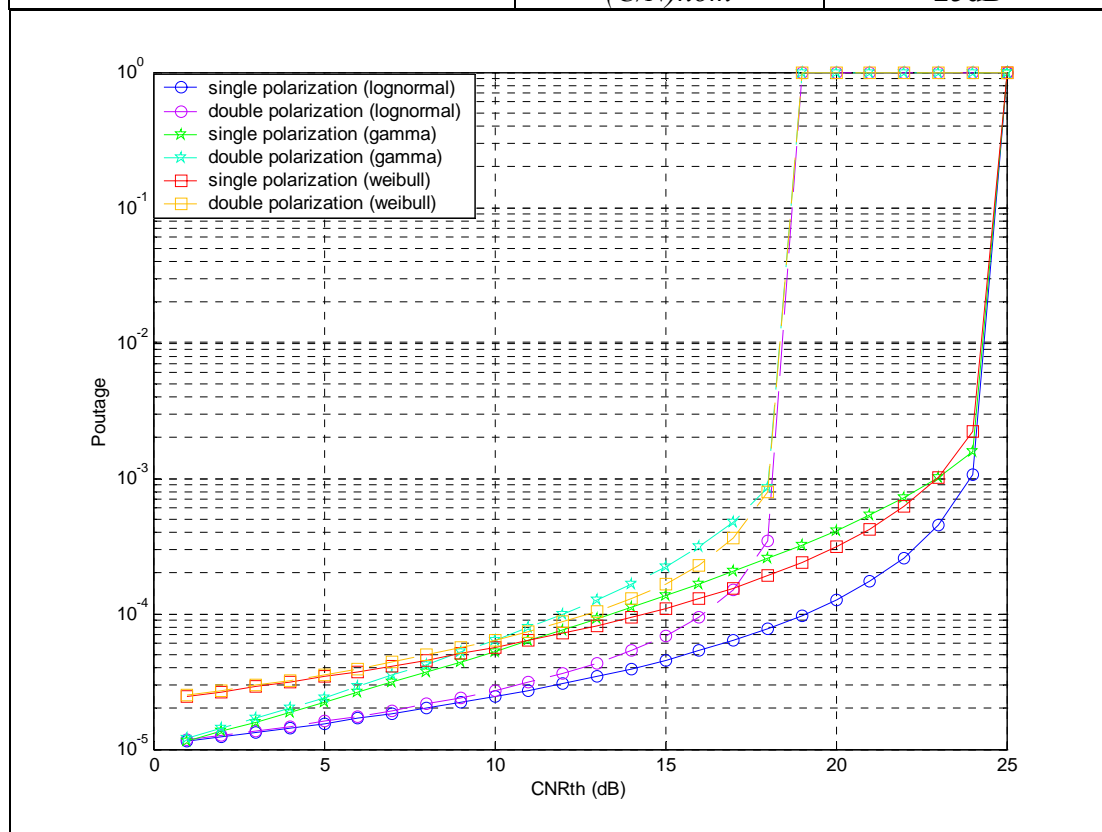
Σχήμα 7.56: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων με τη χρήση μη ιδανικής κεραίας. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 55,4 °).

Πόλη	Ντουμπάι	
Γεωγραφικό πλάτος	25' 18''	
Γεωγραφικό μήκος	55' 18''	
XPD κεραίας	20dB	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0001$	$S_r=2,8665$
	$v_r=0,0007$	$b_r=0,0537$
	$w_r=6,3469$	$m_r=0,1572$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	(C/N) _{nom}	25dB



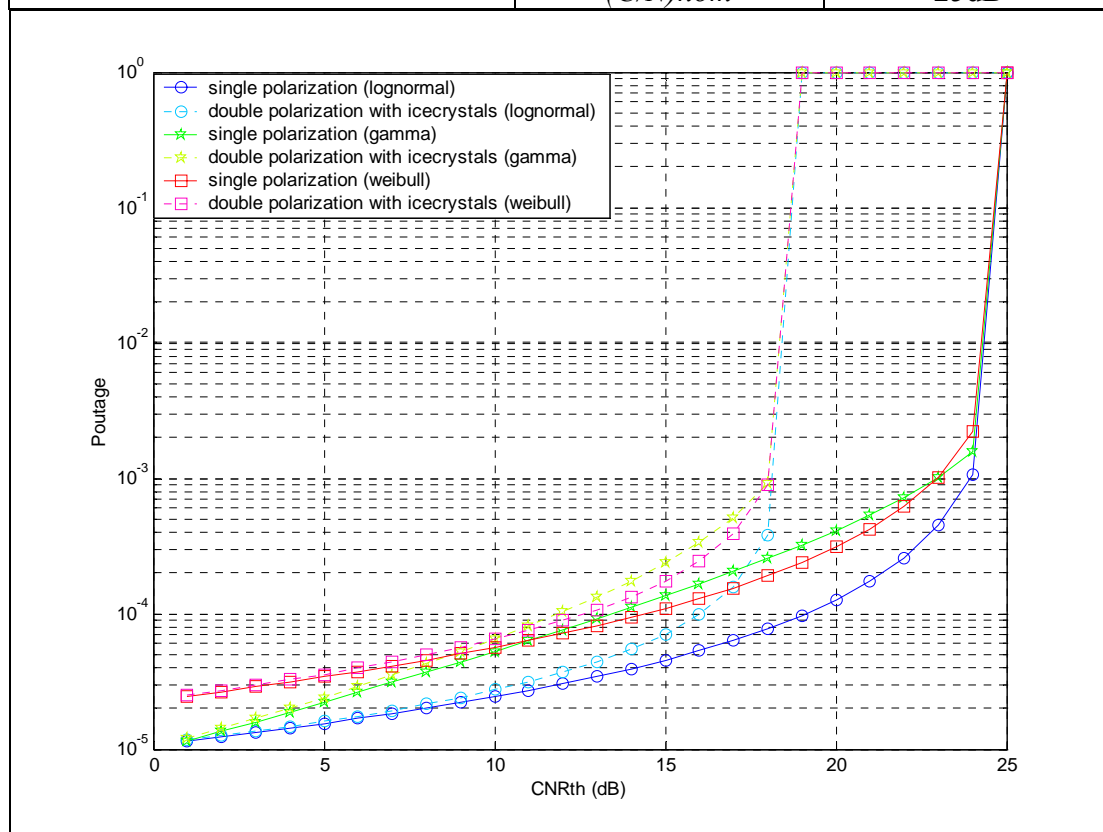
Σχήμα 7.57: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων με τη χρήση μη ιδανικής κεραίας. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 55,4 °).

<i>Πόλη</i>	<i>Γιοχάνεσμπουργκ</i>	
<i>Γεωγραφικό πλάτος</i>	26' 15''S	
<i>Γεωγραφικό μήκος</i>	28'	
<i>XPD κεραίας</i>	20dB	
<i>Χαρακτηριστικά βροχής</i>	$R_m=0,0065$	$S_r=2,2772$
	$v_r=0,0012$	$b_r=0,0285$
	$w_r=4,3353$	$m_r=0,1933$
<i>Συχνότητα</i>	12GHz	
<i>Δορυφόρος</i>	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	<i>(C/N)nom</i>	25dB



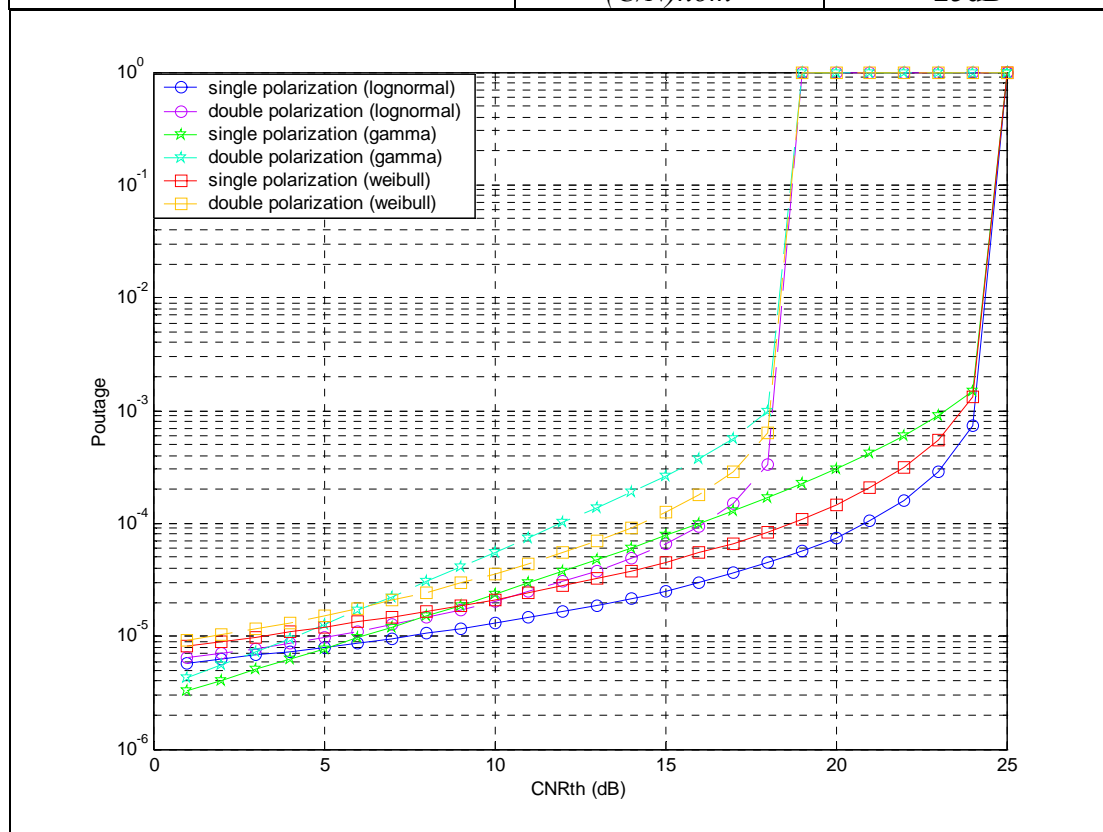
Σχήμα 7.58: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων με τη χρήση μη ιδανικής κεραίας. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 57,1 °).

<i>Πόλη</i>	<i>Γιοχάνεσμπουργκ</i>	
<i>Γεωγραφικό πλάτος</i>	26' 15''S	
<i>Γεωγραφικό μήκος</i>	28'	
<i>XPD κεραίας</i>	20dB	
<i>Χαρακτηριστικά βροχής</i>	$R_m=0,0065$	$S_r=2,2772$
	$v_r=0,0012$	$b_r=0,0285$
	$w_r=4,3353$	$m_r=0,1933$
<i>Συχνότητα</i>	12GHz	
<i>Δορυφόρος</i>	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	<i>(C/N)nom</i>	25dB



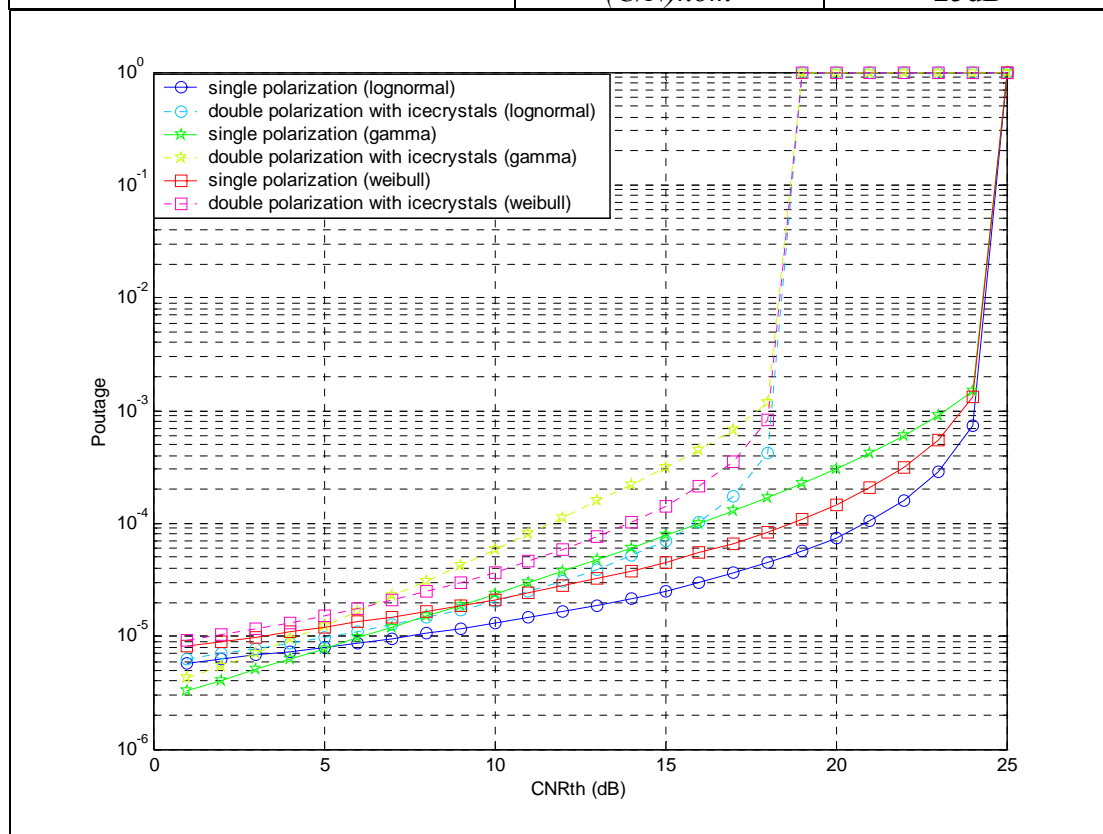
Σχήμα 7.59: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων με τη χρήση μη ιδανικής κεραίας. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 57,1 °).

Πόλη	Μονακό	
Γεωγραφικό πλάτος	43' 42''	
Γεωγραφικό μήκος	7' 23''	
XPD κεραίας	20dB	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0051$	$S_r=2,2385$
	$v_r=0,0013$	$b_r=0,0391$
	$w_r=4,6000$	$m_r=0,1986$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	(C/N) _{nom}	25dB



Σχήμα 7.60: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη χωρίς την παρουσία παγοκρυστάλλων με τη χρήση μη ιδανικής κεραίας. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 30,7 °).

Πόλη	Μονακό	
Γεωγραφικό πλάτος	43' 42''	
Γεωγραφικό μήκος	7' 23''	
XPD κεραίας	20dB	
Χαρακτηριστικά βροχής	$R_m=0,0051$	$S_r=2,2385$
	$v_r=0,0013$	$b_r=0,0391$
	$w_r=4,6000$	$m_r=0,1986$
Συχνότητα	12GHz	
Δορυφόρος	Hellas Sat 2 (Longitude =39,0°E)	
	(C/N) <i>nom</i>	25dB



Σχήμα 7.61: Καμπύλες πιθανότητας υπέρβασης σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(C/N)_{thr}$ του επίγειου δέκτη με την παρουσία παγοκρυστάλλων με τη χρήση μη ιδανικής κεραίας. (Συχνότητα 12GHz, γωνία ανύψωσης 30,7 °).

Συμπεράσματα

Αρχικά, παρατηρώντας τα παραπάνω σχήματα διακρίνει κανείς ότι με την αύξηση της συχνότητας, η πιθανότητα ένα σύστημα δορυφορικών επικοινωνιών να τεθεί εκτός λειτουργίας αυξάνει. Συγκρίνοντας τα σχήματα 7.51 , 7.52 και 7.53 διαπιστώνεται ότι οι καμπύλες μετακινούνται προς τα άνω με αποτέλεσμα η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του συστήματος P_{out} να αυξάνει. Στο ίδιο αποτέλεσμα, στην αύξηση της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας, καταλήγει το σύστημα όταν η κεραία δεν είναι ιδανική (Το $XPD_{antenna}$ δεν είναι άπειρο).

Ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά τις δορυφορικές επικοινωνίες είναι οι κλιματικές συνθήκες. Οι δυσμενείς επιδράσεις των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων παρουσιάζονται εντονότερες στο Γιοχάνεσμπουργκ και είναι λιγότερο εμφανείς σε περιοχές όπως το Ντουμπάι. Το συμπέρασμα αυτό είναι έκδηλο αν γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για το Γιοχάνεσμπουργκ και το Ντουμπάι (εξετάζοντας τα σχήματα 7.4, 7.5 με τα σχήματα 7.12, 7.13 αντίστοιχα που αποτελούν και τις ακραίες περιπτώσεις). Αντίστοιχα αποτελέσματα ισχύουν και για την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας δορυφορικών επικοινωνιών διπλής πόλωσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $(E_b/N_o)_{thr}$.

Σύμφωνα με το μοντέλο των Morita και Higuti [1976]^[48], οι κατανομές της σημειακής έντασης βροχόπτωσης (βλέπε Παράρτημα Κ) καθώς και της απόσβεσης A προσεγγίζονται με ικανοποιητική ακρίβεια από τη γάμμα κατανομή για υποτροπικές και τροπικές περιοχές (Γιοχάνεσμπουργκ). Για τις υπόλοιπες περιοχές κρίνεται ικανοποιητικότερο το λογαριθμοκανονικό και Weibull μοντέλο (Αθήνα, Ντουμπάι, Μονακό).

Στις τροπικές και υποτροπικές περιοχές, εμφανίζονται εξαιρετικά μεγάλες αποσβέσεις του επιθυμητού σήματος. Εξαιτίας των μεγάλων αυτών αποσβέσεων που εισάγονται στο σήμα, η συνολική πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του συστήματος επηρεάζεται ελάχιστα από την αποπόλωση και αυτό φαίνεται καλύτερα στο σχήμα 7.12 για την πόλη του Γιοχάνεσμπουργκ. Αντίθετα, για την Αθήνα και το Μονακό η πιθανότητα το σύστημα να τεθεί εκτός λειτουργίας επηρεάζεται σημαντικά από την ύπαρξη παγοκρυστάλλων. Με βάση αυτές τις καμπύλες μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι η χρήση της διπλής πόλωσης σε ένα δορυφορικό σύστημα που λειτουργεί σε τροπική ή υποτροπική περιοχή μειώνει ελάχιστα τον συνολικό χρόνο διαθεσιμότητας,

παρότι υπάρχει η επιπλέον πηγή παρεμβολής που οφείλεται στην αποπόλωση της ορθογώνιας συνιστώσας. Συνεπώς σε αυτή την περίπτωση η χρήση της διπλής πόλωσης είναι επιβεβλημένη .

Στα σχήματα 7.36 έως 7.43 σχεδιάζονται οι καμπύλες της πιθανότητας υπέρβασης για διαφορετικές στάθμες της χωρητικότητας καναλιού για σύστημα που χρησιμοποιεί την τεχνική αναχρησιμοποίησης συχνότητας. Στα ίδια διαγράμματα σχεδιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες των συστημάτων απλής πόλωσης. Η μείωση στη μέγιστη επιτρεπτή χωρητικότητα καναλιού στο σύστημα διπλής πόλωσης ανά μονάδα εύρους ζώνης για την ίδια πιθανότητα διακοπής του συστήματος είναι προφανής και οφείλεται τόσο στη βροχή όσο και στους παγοκρυστάλλους.

Στα σχήματα 7.18 έως 7.21 και στα σχήματα 7.22 έως 7.25 παρουσιάζονται τα μεγέθη DPA και DPA_{ice} αντίστοιχα. Σημαντική παρατήρηση στα διαγράμματα αυτά είναι η συμμετρία των καμπυλών. Οι καμπύλες αυτές παρουσιάζουν άξονα συμμετρίας τη γωνία των 45° . Η γωνία των 45° (κυκλική πόλωση) είναι η πλέον συνήθης γωνία πόλωσης που χρησιμοποιείται στα δορυφορικά συστήματα διπλής πόλωσης αλλά και η χειρότερη όπως παρουσιάζεται και από τα διαγράμματα από πλευράς προβλημάτων διάδοσης αναφορικά με την επιβάρυνση στο λόγο σήματος προς θόρυβο. Ακόμη, το σήμα υφίσταται την ίδια απόσβεση είτε βρίσκεται σε οριζόντια είτε σε κάθετη πόλωση γεγονός που παρουσιάζει και τη φύση της απόσβεσης για τη γραμμική πόλωση είτε αυτή είναι 0° είτε είναι 90° .

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



**ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΚΑΝΟΝΙΚΗ
ΚΑΤΑΝΟΜΗ**

A.1 Μονοδιάστατη

Έστω η μεταβλητή X ακολουθεί την λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους m_x και S_x (μέση τιμή και τυπική απόκλιση της κανονικής τυχαίας μεταβλητής $\ln X$). Η συνάρτηση πυκνότητας της πιθανότητας δίνεται από τον τύπο [Papoulis, 1991]^[55]

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot S_x \cdot x} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln x - m_x)^2}{2 \cdot S_x^2}\right) \quad (\text{A.1})$$

Η μέση τιμή της τυχαίας μεταβλητής X^k όπου k πραγματικός αριθμός είναι [Koukoulas, 1987]^[56]

$$E(X^k) = \exp\left\{k \cdot m_x + \frac{k^2 \cdot S_x^2}{2}\right\} \quad (\text{A.2})$$

Οι παράμετροι m_x και S_x μπορεί να εκφραστούν συναρτήσει της μέσης τιμής μ_x και της τυπικής απόκλισης σ_x της τυχαίας μεταβλητής X βάσει των παρακάτω τύπων [Koukoulas, 1987]^[56]

$$m_x = \ln \left(\frac{\mu_x}{\left(1 + \left(\frac{\sigma_x}{\mu_x}\right)^2\right)^{1/2}} \right) \quad (\text{A.3})$$

$$S_x^2 = \ln \left(1 + \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2} \right) \quad (\text{A.4})$$

Για την πιθανότητα υπέρβασης της τιμής x , ισχύει από τον τύπο (A.1) ολοκληρώνοντας και σύμφωνα με τον ορισμό της συμπληρωματικής συνάρτησης σφάλματος (error function complementary- $\text{erfc}[\dots]$) [Abramovitz and Stegun, 1965]^[57]

$$P(X \geq x) = \frac{1}{2} \cdot \text{erfc} \left(\frac{\ln x - m_x}{\sqrt{2} \cdot S_x} \right) \quad (\text{A.5})$$

Οι τιμές της συμπληρωματικής συνάρτησης σφάλματος $\text{erfc}[\dots]$ όσο και της αντίστροφης της $\text{erfc}^{-1}[\dots]$ υπολογίζονται αριθμητικά ακολουθώντας τους αλγορίθμους που προτείνονται [Abramovitz και Stegun, 1965]^[57]. Για την πληρότητα του κειμένου θα παρουσιαστούν συνοπτικά τους ορισμούς της συνάρτησης σφάλματος ($\text{erf}[\dots]$) και της συμπληρωματικής της, καθώς και κάποιες ιδιότητες αυτών

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^x e^{-z^2} dz \quad (\text{A.6})$$

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_x^\infty e^{-z^2} dz \quad (\text{A.7})$$

$$\text{erf}(-x) = -\text{erf}(x) \quad (\text{A.8})$$

$$\text{erf}(x \rightarrow \infty) = 1 \quad (\text{A.9})$$

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) \quad (\text{A.10})$$

$$\text{erfc}(-x) = 2 - \text{erfc}(x) \quad (\text{A.11})$$

A.2 Λογαριθμικός συντελεστής συσχέτισης

Έστω ότι υπάρχουν δυο τυχαίες μεταβλητές A_1, A_2 που ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους m_1 (μέση τιμή) και σ_1 (τυπική απόκλιση) και αντίστοιχα m_2, σ_2 . Επιπλέον ρ είναι ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των δύο μεταβλητών. Προφανώς οι μεταβλητές $N_1 = \ln(A_1)$ και $N_2 = \ln(A_2)$ ακολουθούν την κανονική κατανομή με παραμέτρους n_1, S_1 και n_2, S_2 αντίστοιχα και συντελεστή συσχέτισης ρ_n , ο οποίος ονομάζεται λογαριθμικός συντελεστής συσχέτισης. Χρησιμοποιώντας τους ορισμούς των ροπών της παραγράφου A.1 ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις

$$m_i = \exp\left(n_i + \frac{S_i^2}{2}\right) \quad (i=1,2) \quad (\text{A.12})$$

$$\sigma_i^2 = \exp(2 \cdot n_i + S_i^2) \cdot [\exp(S_i^2) - 1]$$

Ο συντελεστής συσχέτισης ορίζεται ως [Papoulis, 1991]^[55]

$$\rho = \frac{E\{A_1 \cdot A_2\} - m_1 \cdot m_2}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} \quad (\text{A.13})$$

Η προσδοκητή τιμή του γινομένου δύο τυχαίων μεταβλητών $E\{A_1 \cdot A_2\}$ μπορεί να υπολογιστεί

$$E\{A_1 \cdot A_2\} = E\{e^{N_1+N_2}\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{x_1+x_2} \cdot f_{N_1, N_2}(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (\text{A.14})$$

όπου $f_{N_1, N_2}(x_1, x_2)$ είναι η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που εκφράζεται συναρτήσει των παραμέτρων n_1, S_1, n_2, S_2 και ρ . Μετά από απλές αλγεβρικές σχέσεις προκύπτει

$$E\{A_1 \cdot A_2\} = \exp\left(n_1 + n_2 + \frac{S_1^2}{2} + \frac{S_2^2}{2} + \rho_n \cdot S_1 \cdot S_2\right) \quad (\text{A.15})$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (A.15) και (A.12) στην (A.13) ισχύει

$$\rho = \frac{\exp(\rho_n \cdot S_1 \cdot S_2) - 1}{\sqrt{(\exp(S_1^2) - 1) \cdot (\exp(S_2^2) - 1)}} \quad (\text{A.16})$$

Τέλος λύνοντας ως προς ρ_n παρουσιάζεται η τελική σχέση για τον λογαριθμικό συντελεστή συσχέτισης

$$\rho_n = \frac{1}{S_1 \cdot S_2} \cdot \ln\left(1 + \rho \cdot \left(\sqrt{(\exp S_1^2 - 1) \cdot (\exp S_2^2 - 1)}\right)\right) \quad (\text{A.17})$$

A.3 Υπολογισμός παραμέτρων λογαριθμοκανονικής κατανομής από πειραματικά δεδομένα

Τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για τις κατανομές των στοχαστικών μεγεθών R (ρυθμός βροχόπτωσης) ή A (απόσβεση λόγω βροχής ενός συστήματος απλής λήψης) βρίσκονται υπό μορφή αντιστοιχών ζευγών x_i, P_i ($i = 1, 2, \dots, n$), όπου x_i η τιμή του μεγέθους και P_i η πιθανότητα υπέρβασης της τιμής αυτής. Στην περίπτωση του ρυθμού βροχόπτωσης, με την βοήθεια των χαρτών βροχής ισχύει για κάθε πιθανότητα υπέρβασης μια στάθμη ρυθμού βροχόπτωσης, για μία συγκεκριμένη περιοχή. Αυτό το γεγονός υποκαθιστά την ανάγκη τοπικών πειραματικών δεδομένων, σε περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμα.

Για κάθε τιμή της πιθανότητας P_i υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή u_i της ανηγμένης κανονικής μεταβλητής U από την σχέση

$$u_i = \sqrt{2} \cdot \operatorname{erfc}^{-1}(2 \cdot P_i) \quad (\text{A.18})$$

Ισχύει όμως

$$u_i = \frac{\ln(x_i) - \ln(X_m)}{S_X} \quad (\text{A.19})$$

ή

$$u_i = A \cdot z_i + B \quad (\text{A.20})$$

όπου

$$z_i = \ln x_i \tag{A.21}$$

$$A = 1/S_X \tag{A.22}$$

$$B = -\ln X_m / S_X \tag{A.23}$$

δηλαδή τα u_i και z_i συνδέονται με γραμμική σχέση. Επομένως με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προσδιορίζονται εύκολα οι συντελεστές γραμμικής παλινδρόμησης A και B και από αυτούς κατόπιν οι παράμετροι S_X και X_m .

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

B

**ΓΑΜΜΑ
ΚΑΤΑΝΟΜΗ**

B.1 Μονοδιάστατη

Η μεταβλητή X ακολουθεί την γάμμα κατανομή με παραμέτρους ν και β . Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας δίνεται από τον τύπο [Paroulis, 1991]^[55]

$$f_X(x) = \frac{\beta^\nu}{\Gamma(\nu)} \cdot x^{\nu-1} \cdot e^{-\beta \cdot x} \quad (\text{B.1})$$

όπου $\Gamma(\nu)$ η συνάρτηση γάμμα που ορίζεται από την σχέση [Abramovitz and Stegun, 1965]^[57]

$$\Gamma(\nu) = \int_0^\infty t^{\nu-1} \cdot e^{-t} dt \quad (\text{B.2})$$

Η μέση τιμή της μεταβλητής X^k όπου k θετικός πραγματικός αριθμός είναι [Koukoulas, 1987]^[56]

$$E[X^k] = \frac{\Gamma(\nu + k)}{\beta^k \cdot \Gamma(\nu)} \quad (\text{B.3})$$

Οι παράμετροι ν και β μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει της μέσης τιμής (μ_x) και της τυπικής απόκλισης (σ_x) της X βάσει των παρακάτω τύπων [Koukoulas, 1987]^[56]

$$v = \left(\frac{\mu_x}{\sigma_x} \right)^2 \quad (\text{B.4})$$

$$\beta = \frac{\mu_x}{\sigma_x^2} \quad (\text{B.5})$$

Για την πιθανότητα υπέρβασης της τιμής x ισχύει

$$P(X \geq x) = 1 - P(X \leq x) \quad (\text{B.6})$$

οπότε από τον τύπο (B.1) ολοκληρώνοντας σύμφωνα με τον ορισμό της ατελούς συνάρτησης $\gamma(\dots)$ [Abramovitz and Stegun, 1965]^[57], ισχύει τελικά

$$P(X \geq x) = 1 - \frac{\gamma(v, \beta x)}{\Gamma(v)} \quad (\text{B.7})$$

Η τιμή των ειδικών συναρτήσεων $\Gamma(\dots)$ και $\gamma(\dots)$ υπολογίζονται με κατάλληλους αποτελεσματικούς αριθμητικούς αλγορίθμους [Press, 1990]^[58].

Επίσης, η ροπογεννήτρια συνάρτηση μιας τυχαίας μεταβλητής X που ακολουθεί γάμμα κατανομή είναι [Papoulis, 1991]^[55]

$$M_x(t) = E(e^{tx}) = \left(1 - \frac{t}{\beta} \right)^v \quad (\text{B.8})$$

Τέλος παρατίθενται κάποιες χρήσιμες σχέσεις που αναφέρονται στην γάμμα κατανομή

$$P[a \leq X \leq b] = \frac{\gamma(v, \beta b)}{\Gamma(v)} - \frac{\gamma(v, \beta a)}{\Gamma(v)} \quad (\text{B.9})$$

$$P(a, x) = \frac{1}{\Gamma(a)} \cdot \int_0^x e^{-t} \cdot t^{a-1} dt = \frac{\gamma(a, x)}{\Gamma(a)} \quad (\text{B.10})$$

$$\Gamma(a, x) = \Gamma(a) - \gamma(a, x) = \int_x^\infty e^{-t} t^{a-1} dt \quad (\text{B.11})$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Γ

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ
ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΟΥ
ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΗ
ΧΩΡΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ
ΜΕΣΟΥ
ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ**

Γ.1 Υπολογισμός του H_1

Η παράμετρος H_1 προσδιορίζεται με διπλή ολοκλήρωση του σημειακού συντελεστή συσχέτισης ρ κατά μήκος της διαδρομής, που αφορά την προβολή του κεκλιμένου ραδιοβήματος, μήκους L , δηλαδή

$$H_1 = \int_0^L \int_0^L \rho(l_1, l'_1) dl_1 dl'_1 \quad (\Gamma.1)$$

Εξάλλου, θεωρώντας τη βροχή χωρικά στάσιμη στοχαστική διαδικασία, ο συντελεστής ρ εξαρτάται αποκλειστικά από την απόσταση

$$d = |l_1 - l'_1| \quad (\Gamma.2)$$

και επομένως

$$\rho(l_1, l'_1) = \rho(l'_1, l_1) \quad (\Gamma.3)$$

Από τις (Γ.1) και (Γ.3) προκύπτει

$$H_1 = 2 \cdot \int_0^L \int_0^{l_1} \rho dl_1 dl'_1 \quad (\Gamma.4)$$

Αν τεθεί

$$x = l_1 - l_1' \quad (\Gamma.5)$$

$$y = l_1' \quad (\Gamma.6)$$

με αλλαγή μεταβλητών η (Γ.4) γράφεται

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

που δίνει

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

Γ.2 Μοντέλο Lin

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό [Lin, 1975]^[47], ο συντελεστής ρ εκφράζεται από τη μεταβλητή x με βάση τις παρακάτω σχέσεις

$$\rho(x) = \frac{G}{\sqrt{G^2 + x^2}} \quad \text{όταν } x \leq D_r \quad (\Gamma.9)$$

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

Για μήκη μεγαλύτερα της μέγιστης διάστασης του βροχοπυρήνα ισχύει η ακόλουθη σχέση

$$\rho(x) = \frac{G}{\sqrt{G^2 + D_r^2}} \quad \text{όταν } x > D_r \quad (\Gamma.10)$$

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

$$H_1 = 2 \cdot \int_0^L \frac{G \cdot (L-x)}{\sqrt{G^2 + x^2}} dx \quad (\Gamma.11)$$

ή

$$H_1 = 2LG \cdot \int_0^{L/G} \frac{dz}{\sqrt{1+z^2}} - 2G^2 \cdot \int_0^{L/G} \frac{z dz}{\sqrt{1+z^2}} \quad (\Gamma.12)$$

Αποδεικνύεται ότι [Abramovitz and Stegun, 1965]^[57]

$$\int \frac{dz}{\sqrt{1+z^2}} = \sinh^{-1}(z) + C \quad (\Gamma.13)$$

$$\int \frac{zdz}{\sqrt{1+z^2}} = \sqrt{1+z^2} + C \quad (\Gamma.14)$$

όποτε η (Γ.12) καταλήγει στην

$$H_1 = 2 \cdot L \cdot G \cdot \sinh^{-1}\left(\frac{L}{G}\right) + 2 \cdot G^2 \cdot \left(1 - \sqrt{\left(\frac{L}{G}\right)^2 + 1}\right) \quad (\Gamma.15)$$

Επίσης αποδεικνύεται ότι

$$H_1 = 2 \cdot L \cdot G \cdot \sinh^{-1}\left(\frac{D_r}{G}\right) + 2 \cdot G^2 \cdot \left(1 - \sqrt{\left(\frac{D_r}{G}\right)^2 + 1}\right) + \frac{G \cdot (L - D_r)^2}{\sqrt{G^2 + D_r^2}} \quad (\Gamma.16)$$

για $x > D_r$.

Γ.3 Μοντέλο Morita-Higuti

Στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής ρ εκφράζεται από την μεταβλητή x σύμφωνα με τη σχέση [Morita and Higuti, 1976]^[48]

$$\rho(x) = \exp\left(-a_s \cdot \sqrt{|x|}\right) \text{ όταν } x \leq D_r \quad (\Gamma.17)$$

και

$$\rho(x) = \exp\left(-a_s \cdot \sqrt{D_r}\right) \text{ όταν } x > D_r \quad (\Gamma.18)$$

Συνεπώς η (Γ.8) για $x \leq D_r$ γίνεται

$$H_1 = 2 \cdot \int_0^L (L-x) \cdot \exp\left(-a_s \sqrt{x}\right) dx \quad (\Gamma.19)$$

ή

$$H_1 = \frac{4L}{a_s^2} \cdot \int_0^{a_s \cdot \sqrt{L}} z \cdot \exp(-z) dz - \frac{4}{a_s^4} \cdot \int_0^{a_s \cdot \sqrt{L}} z^3 \cdot \exp(-z) dz \quad (\Gamma.20)$$

Εύκολα αποδεικνύονται οι σχέσεις [Abramovitz and Stegun, 1965]^[57]

$$\int z \cdot \exp(-z) \cdot dz = -\exp(-z) \cdot (z + 1) + C \quad (\Gamma.21)$$

$$\int z^3 \cdot \exp(-z) \cdot dz = -\exp(-z) \cdot (z^3 + 3z^2 + 6z + 6) + C \quad (\Gamma.22)$$

Οπότε από την (Γ.20) ισχύει

$$H_1 = 4 \cdot \frac{(\alpha_s^2 \cdot L - 6 + 2 \cdot (3 + 3 \cdot \alpha_s \cdot \sqrt{L} + \alpha_s^2 \cdot L) \cdot \exp(-\alpha_s \cdot \sqrt{L}))}{\alpha_s^4} \quad (\Gamma.23)$$

Με το ίδιο ακριβώς τρόπο ισχύει η

$$H_1 = 4 \cdot \frac{(\alpha_s^2 \cdot L - 6 + (a_s^3 \cdot (D_r - L) \cdot \sqrt{D_r} + \alpha_s^2 \cdot (3 \cdot D_r - L) + 6 + 6 \cdot a_s \cdot \sqrt{D}) \cdot \exp(-\alpha_s \cdot \sqrt{L}))}{\alpha_s^4} + \frac{\exp(-a_s \cdot \sqrt{D_r}) + (L - D_r)^2}{\alpha_s^4} \quad (\Gamma.24)$$

για $x > D_r$.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



**Ο
ΣΗΜΑΤΟΘΟΡΥΒΙΚΟΣ
ΛΟΓΟΣ**

Δ.1 Απόδειξη της σχέσης σε συστήματα διπλής πόλωσης

$$\begin{aligned} \left(\frac{C}{N}\right)_R &= \frac{E_c'^2}{E_N^2 + E_x'^2} = \frac{E_c'^2}{E_N^2 \cdot \left(1 + \frac{E_x'^2}{E_N^2}\right)} = \frac{E_c'^2}{E_N^2 \cdot \left(1 + \frac{E_c^2 \cdot E_c'^2 \cdot E_x'^2}{E_c^2 \cdot E_c'^2 \cdot E_N^2}\right)} = \\ &= \frac{E_c^2 \cdot E_c'^2}{E_c^2 \cdot E_N^2 \cdot \left(1 + \frac{E_c^2 \cdot E_c'^2 \cdot E_x'^2}{E_c^2 \cdot E_c'^2 \cdot E_N^2}\right)} \end{aligned} \quad (\Delta.1)$$

Στη συνέχεια, η σχέση (Δ.1) συνεπάγεται τη σχέση (Δ.2) προχωρώντας σε μετατροπή των μεγεθών σε dB

$$\left(\frac{C}{N}\right)_R = 10 \cdot \log\left(\frac{E_c^2}{E_N^2}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{E_c^2}{E_c'^2}\right) - 10 \cdot \log\left(1 + \frac{E_c^2 \cdot E_c'^2 \cdot E_x'^2}{E_c^2 \cdot E_c'^2 \cdot E_N^2}\right) =$$

$$\begin{aligned}
 &= 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_N^2} \right) - 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E'_c{}^2} \right) - 10 \cdot \log \left(1 + 10 \frac{10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2 \cdot E'_c{}^2 \cdot E_x'^2}{E_c^2 \cdot E'_c{}^2 \cdot E_N^2} \right)}{10} \right) = \\
 &= 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_N^2} \right) - 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E'_c{}^2} \right) - 10 \cdot \log \left(1 + 10 \frac{10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_N^2} \right) - 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E'_c{}^2} \right) - 10 \cdot \log \left(\frac{E'_c{}^2}{E_x'^2} \right)}{10} \right)
 \end{aligned} \tag{\Delta.2}$$

Αν στη σχέση (Δ.2) γίνουν οι αντικαταστάσεις των μεγεθών

$$\left(\frac{C}{N} \right)_{nom} = 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_N^2} \right), \quad Ac = 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E'_c{}^2} \right) \quad \text{και} \quad XPD(Ac) = 10 \cdot \log \left(\frac{E'_c{}^2}{E_x'^2} \right) \quad \theta\alpha$$

προκύψει η σχέση (Δ.3) που είναι και η απόδειξη της σχέσης. Όλα τα μεγέθη της εξίσωσης (Δ.3) είναι εκφρασμένα σε dB.

$$\left(\frac{C}{N} \right)_R = \left(\frac{C}{N} \right)_{nom} - Ac - 10 \cdot \log \left(1 + 10 \frac{\left(\frac{C}{N} \right)_{nom} - Ac - XPD(Ac)}{10} \right) \tag{\Delta.3}$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ε

**Ο
ΣΗΜΑΤΟΘΟΡΥΒΙΚΟΣ
ΛΟΓΟΣ ΜΕ ΤΟ XPD
ΚΕΡΑΙΑΣ**

E.1 Απόδειξη της σχέσης σε συστήματα διπλής πόλωσης

Αρχικά, για την απόδειξη της σχέσης που συνδέει το σηματοθορυβικό λόγο με τη διάκριση διασταύρωσης πόλωσης (XPD) θα οριστεί ο σηματοθορυβικός λόγος υπό συνθήκες καθαρού ουρανού που αφορά τη διπλή πόλωση με μη ιδανική κεραία

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{nom}^D = \frac{E_c^2}{E_N^2 + E_x^2} \quad (E.1)$$

Αν στη σχέση (E.1) γίνει η αντικατάσταση των σχέσεων

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{nom}^S = 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_N^2} \right) \text{ και } XPD_{antenna} = 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_x^2} \right) \text{ προκύπτει η σχέση (E.2)}$$

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{nom}^D = \left(\frac{1}{XPD_{antenna}} + \frac{1}{CNR_{s,nom}} \right)^{-1} \quad (E.2)$$

Με δεδομένη τη σχέση (E.2), παρουσιάζεται η σχέση που συνδέει το σηματοθορυβικό λόγο με απόσβεση, διάκριση διασταύρωσης πόλωσης για μη ιδανική κεραία

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{C}{N}\right)_R &= \frac{E_c'^2}{E_N^2 + E_x'^2} = \frac{E_c'^2}{E_N^2 + E_x^2 - E_x^2 + E_x'^2} = \frac{E_c'^2}{(E_N^2 + E_x^2) + E_c^2 \cdot \left(\frac{E_x'^2}{E_c^2} - \frac{E_x^2}{E_c^2}\right)} = \\
 &= \frac{E_c'^2}{(E_N^2 + E_x^2) + E_c^2 \cdot \left(\frac{E_x'^2 \cdot E_c'^2}{E_c^2 \cdot E_c'^2} - \frac{E_x^2}{E_c^2}\right)} = \\
 &= \frac{E_c^2 \cdot E_c'^2}{(E_N^2 + E_x^2) \cdot E_c^2 \cdot \left[1 + \frac{E_c^2}{(E_N^2 + E_x^2)} \times 10^{-\log \left\{ \frac{E_c^2 \cdot E_c'^2}{E_x'^2 \cdot E_c'^2} - \frac{E_x^2}{E_c^2} \right\}} \right]} \quad (E.3)
 \end{aligned}$$

Από τη σχέση (E.3) συνεπάγεται η σχέση (E.4) προχωρώντας σε μετατροπή των μεγεθών σε dB

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{C}{N}\right)_{RdB} &= 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_N^2 + E_x^2} \right) - 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_c'^2} \right) + \\
 &= -10 \cdot \log \left(1 + 10^{\left(\frac{10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_N^2 + E_x^2} \right)}{10} \right)} \times 10^{\left(\frac{-10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_c'^2} \right) - 10 \cdot \log \left(\frac{E_c'^2}{E_x'^2} \right) - 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_x^2} \right)}{10} \right)} \right) \quad (E.4)
 \end{aligned}$$

Η σχέση (E.4) καταλήγει στην τελική σχέση (E.5) με αντικατάσταση των μεγεθών

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{nom}^D = 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_N^2 + E_x^2} \right), \quad Ac = 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_c'^2} \right),$$

$$XPD(Ac) = 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_x^2} \right) \text{ και } XPD_{antenna} = 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_x^2} \right). \text{ Όλα τα μεγέθη της}$$

σχέσης (E.5) είναι εκφρασμένα σε dB.

$$\left(\frac{C}{N} \right)_R = \left(\frac{C}{N} \right)_{nom}^D - Ac - 10 \cdot \log \left(1 + 10 \frac{\left(\frac{C}{N} \right)_{nom}^D}{10} \cdot \left(10 \frac{-Ac - XPD(Ac)}{10} - 10 \frac{XPD_{antenna}}{10} \right) \right) \quad (E.5)$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΣΤ

Ο ΛΟΓΟΣ E_b/n_o

ΣΤ.1 Απόδειξη της σχέσης σε συστήματα διπλής πόλωσης

$$\begin{aligned} \left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{n_o B = N} &= \frac{RE = C}{N} = \left(\frac{B}{R}\right) \cdot \left(\frac{C}{N}\right)_R = \left(\frac{B}{R}\right) \cdot \frac{E_c'^2}{E_N^2 + E_x'^2} = \left(\frac{B}{R}\right) \cdot \frac{E_c'^2}{E_N^2 \times \left(1 + \frac{E_x'^2}{E_N^2}\right)} = \\ &= \left(\frac{B}{R}\right) \cdot \frac{E_c'^2}{E_N^2 \times \left(1 + \frac{E_c^2 \times E_c'^2 \times E_x'^2}{E_c^2 \times E_c'^2 \times E_N^2}\right)} = \left(\frac{B}{R}\right) \cdot \frac{E_c^2 \times E_c'^2}{E_c^2 \times E_N^2 \times \left(1 + \frac{E_c^2 \times E_c'^2 \times E_x'^2}{E_c^2 \times E_c'^2 \times E_N^2}\right)} \quad (\Sigma\Gamma.1) \end{aligned}$$

Στη συνέχεια, η σχέση (ΣΤ.1) συνεπάγεται τη σχέση (ΣΤ.2) προχωρώντας σε μετατροπή των μεγεθών σε dB με αντικατάσταση της φασματικής πυκνότητας

$$\Gamma = \frac{R}{B}$$

$$\left(\frac{E_b}{n_o}\right)_R = -10 \cdot \log(\Gamma) + 10 \cdot \log\left(\frac{E_c^2}{E_N^2}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{E_c^2}{E_c'^2}\right) - 10 \cdot \log\left(1 + \frac{E_c^2 \cdot E_c'^2 \cdot E_x'^2}{E_c^2 \cdot E_c'^2 \cdot E_N^2}\right) =$$

$$= -10 \cdot \log(\Gamma) + 10 \cdot \log\left(\frac{E_c^2}{E_N^2}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{E_c^2}{E_c'^2}\right) - 10 \cdot \log\left(1 + 10 \frac{10 \cdot \log\left(\frac{E_c^2 \cdot E_c'^2 \cdot E_x'^2}{E_c^2 \cdot E_c'^2 \cdot E_N^2}\right)}{10}\right)$$

$$= -10 \cdot \log(\Gamma) + 10 \cdot \log\left(\frac{E_c^2}{E_N^2}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{E_c^2}{E_c'^2}\right) +$$

$$- 10 \cdot \log\left(1 + 10 \frac{10 \cdot \log\left(\frac{E_c^2}{E_N^2}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{E_c^2}{E_c'^2}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{E_c'^2}{E_x'^2}\right)}{10}\right) =$$

$$= 10 \cdot \log\left(\frac{E_c^2}{E_N^2}\right) - 10 \cdot \log(\Gamma) + -10 \cdot \log\left(\frac{E_c^2}{E_c'^2}\right) +$$

$$- 10 \cdot \log\left(1 + 10 \frac{10 \cdot \log\left(\frac{E_c^2}{E_N^2}\right) - 10 \cdot \log(\Gamma) + 10 \cdot \log(\Gamma) - 10 \cdot \log\left(\frac{E_c^2}{E_c'^2}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{E_c'^2}{E_x'^2}\right)}{10}\right) =$$

$$\begin{aligned}
 &= 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_N^2} \right) - 10 \cdot \log(\Gamma) + -10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_c'^2} \right) + \\
 &- 10 \times \log \left(1 + \Gamma \cdot 10 \frac{10 \times \log \left(\frac{E_c^2}{E_N^2} \right) - 10 \cdot \log(\Gamma) - 10 \times \log \left(\frac{E_c^2}{E_c'^2} \right) - 10 \times \log \left(\frac{E_c'^2}{E_x'^2} \right)}{10} \right)
 \end{aligned}
 \tag{ΣΤ.2}$$

Η σχέση (ΣΤ.2) καταλήγει στην τελική σχέση (ΣΤ.3) με αντικατάσταση των

$$\text{μεγεθών} \quad \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} = -10 \cdot \log(\Gamma) + 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_N^2} \right), \quad Ac = 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_c'^2} \right),$$

$$XPD(Ac) = 10 \cdot \log \left(\frac{E_c'^2}{E_x'^2} \right) \text{ και } XPD_{antenna} = 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_x^2} \right). \text{ Όλα τα μεγέθη της}$$

σχέσης (ΣΤ.3) είναι εκφρασμένα σε dB.

$$\left(\frac{E_b}{n_o} \right)_R = \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} - Ac - 10 \cdot \log \left(1 + \Gamma \cdot 10 \frac{\left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom} - Ac - XPD(Ac)}{10} \right)
 \tag{ΣΤ.3}$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Z

**Ο ΛΟΓΟΣ E_b/n_o ΜΕ ΤΟ
XPD ΚΕΡΑΙΑΣ**

Z.1 Απόδειξη της σχέσης σε συστήματα διπλής πόλωσης

Αρχικά, για την απόδειξη της σχέσης που συνδέει το λόγο (E_b/n_o) με τη διάκριση διασταύρωσης πόλωσης (XPD) θα οριστεί ο λόγος (E_b/n_o) υπό συνθήκες καθαρού ουρανού που αφορά τη διπλή πόλωση με μη ιδανική κεραία

$$\left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{nom}^D \stackrel{RE=C}{=} \stackrel{n_o B=N}{\left(\frac{B}{R}\right)} \cdot \left(\frac{C}{N}\right)_{d,nom} = \left(\frac{B}{R}\right) \cdot \frac{E_c^2}{E_N^2 + E_x^2} \quad (Z.1)$$

Αν στη σχέση (Z.1) αντικατασταθούν οι σχέσεις

$$\left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{nom}^S = -10 \cdot \log\left(\frac{R}{B}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{E_c^2}{E_N^2}\right), \quad \Gamma = \frac{R}{B} \quad \text{και} \quad XPD_{antenna} = 10 \cdot \log\left(\frac{E_c^2}{E_x^2}\right)$$

προκύπτει η σχέση (Z.2)

$$\left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{nom}^D = \left(\frac{\Gamma}{\Gamma \cdot XPD_{antenna}} + \frac{\Gamma}{\left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{nom}^S} \right)^{-1} \quad (Z.2)$$

Με δεδομένη τη σχέση (Z.2), παρουσιάζεται η σχέση που συνδέει το σηματοθορυβικό λόγο με απόσβεση, διάκριση διασταύρωσης πόλωσης για μη ιδανική κεραία

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{E_b}{n_o}\right)_R &= \left(\frac{B}{R}\right) \cdot \frac{E_c'^2}{E_N^2 + E_x'^2} = \Gamma^{-1} \cdot \frac{E_c'^2}{E_N^2 + E_x^2 - E_x^2 + E_x'^2} = \\
 &= \Gamma^{-1} \cdot \frac{E_c'^2}{\left(E_N^2 + E_x^2\right) + E_c^2 \cdot \left(\frac{E_x'^2}{E_C^2} - \frac{E_x^2}{E_C^2}\right)} = \\
 &= \Gamma^{-1} \cdot \frac{E_c'^2}{\left(E_N^2 + E_x^2\right) + E_c^2 \cdot \left(\frac{E_x'^2 \cdot E_c'^2}{E_C^2 \cdot E_c'^2} - \frac{E_x^2}{E_C^2}\right)} = \\
 &= \Gamma^{-1} \cdot \frac{E_c^2 \cdot E_c'^2}{\left(E_N^2 + E_x^2\right) \cdot E_c^2 \cdot \left[1 + \frac{E_c^2}{\left(E_N^2 + E_x^2\right)} \cdot 10^{-\log\left(\frac{E_C^2 \cdot E_c'^2}{E_x'^2 \cdot E_c'^2}\right) - \frac{E_x^2}{E_C^2}}\right]}
 \end{aligned}
 \tag{Z.3}$$

Από τη σχέση (Z.3) συνεπάγεται η σχέση (Z.4) προχωρώντας σε μετατροπή των μεγεθών σε dB

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_R &= -10 \cdot \log(\Gamma) + 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_N^2 + E_x^2} \right) - 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E'_c{}^2} \right) + \\
 &- 10 \cdot \log \left(1 + 10 \frac{-10 \cdot \log(\Gamma) + 10 \cdot \log(\Gamma) + 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_N^2 + E_x^2} \right)}{10} \cdot \left(10 \frac{-10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E'_c{}^2} \right) - 10 \cdot \log \left(\frac{E'_c{}^2}{E'_x{}^2} \right)}{10} - 10 \frac{-10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E'_c{}^2} \right)}{10} \right) \right)
 \end{aligned} \tag{Z.4}$$

Η σχέση (Z.4) καταλήγει στην τελική σχέση (Z.5) με αντικατάσταση των μεγεθών

$$\left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom}^D = -10 \cdot \log(\Gamma) + 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_N^2 + E_x^2} \right), \quad Ac = 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E'_c{}^2} \right),$$

$$XPD(Ac) = 10 \cdot \log \left(\frac{E'_c{}^2}{E'_x{}^2} \right) \quad \text{και} \quad XPD_{antenna} = 10 \cdot \log \left(\frac{E_c^2}{E_x^2} \right).$$

Όλα τα μεγέθη της σχέσης (Z.5) είναι εκφρασμένα σε dB.

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_R &= \left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom}^D - Ac + \\
 &- 10 \cdot \log \left(1 + \Gamma \cdot 10 \frac{\left(\frac{E_b}{n_o} \right)_{nom}^D}{10} \cdot \left(10 \frac{-Ac - XPD(Ac)}{10} - 10 \frac{XPD_{antenna}}{10} \right) \right)
 \end{aligned} \tag{Z.5}$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

H

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ZBRENT ΣΤΟ MATLAB

H.1 Γενικά

Στο παράρτημα H παρουσιάζεται το πρόγραμμα ZBRENT που χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα MATLAB για την επίλυση των υπερβατικών εξισώσεων που προέκυψαν σε όλη τη διάρκεια υλοποίησης των απαιτούμενων προγραμμάτων. Η υλοποίηση του προγράμματος αυτού στηρίχτηκε στη χρησιμοποίηση του βασικού θεωρήματος του Bolzano με παράλληλη χρήση τεχνικών από την αριθμητική ανάλυση όπως του θεωρήματος Newton-Raphson για την όσο το δυνατόν βέλτιστο χρόνο εντοπισμό ριζών. Στο πρόγραμμα που ακολουθεί έχουν προστεθεί και σχόλια για την καλύτερη κατανόηση.

```
function zbrentAi_limit = ZBRENT(CNRnom,CNRthr,Am,Sa,fi,ft,deiktis,ba,va,XPDnomka,GAMA)
%Ορίστηκε η συνάρτηση με τα ορίσματα της. Εξαιτίας του πλήθους των μεταβλητών εισόδου με τη μέθοδο αυτή
%βρίσκεται η λύση σε όλα τα προβλήματα υπερβατικών εξισώσεων που χρειάστηκε κάθε φορά με τις κατάλληλες
%τροποποιήσεις. Αξιοσημείωτη είναι επίσης η δυνατότητα της επέκτασης έτσι ώστε το πρόβλημα να μπορεί να
%δώσει λύσεις και σε πολυπαραγοντικές υπερβατικές εξισώσεις.
```

```
%Ορίζεται η ακρίβεια στην εύρεση της ρίζας
```

```
eps=1.0e-10;
```

```
%a=x1;
```

```
%b=x2;
```

```
%Ορίζονται οι αρχικές τιμές του διαστήματος στο οποίο θα αναζητηθεί η ρίζα
```

a=1.0e-150;

b=1000;

%Ορίζονται οι αρχικές τιμές που λαμβάνει η υπερβατική εξίσωση για τις αρχικές τιμές του διαστήματος που
%ορίστηκαν παραπάνω

fa=synartisigiaypervatiki (a,CNRnom,CNRthr,Am,Sa,fi,f,t,deiktis,ba,va,XPDnomka,GAMA);

fb= synartisigiaypervatiki (b,CNRnom,CNRthr,Am,Sa,fi,f,t,deiktis,ba,va,XPDnomka,GAMA);

tol=eps;

%Γίνεται έλεγχος έτσι ώστε οι τιμές της υπερβατικής συνάρτησης για τα άκρα του διαστήματος να λαμβάνουν
%ετερόσημες τιμές έτσι ώστε να μπορέσει να εντοπιστεί η ρίζα. Αλλιώς το πρόγραμμα τερματίζεται χωρίς αυτό
%όμως να σημαίνει απόλυτα ότι δεν υπάρχει ρίζα. Καλός θα είναι και κάποιος σχετικός πειραματισμός με τις
%τιμές του διαστήματος όπου πιστεύουμε ότι βρίσκεται η ρίζα.

if fb*fa>0

 disp('pause in routine ZBRENT_Ai_limit');

 disp('root must be bracketed');

end

%Στην περίπτωση λοιπόν που πράγματι οι τιμές της υπερβατικής εξίσωσης λαμβάνουν ετερόσημες τιμές στα άκρα
%ο αλγόριθμος προχωρά σε νέα ανάθεση τιμών

c=a;

fc=fa;

d=b-a;

e=d;

if abs(fc)<abs(fb)

 a=b;

 b=c;

 c=a;

 fa=fb;

 fb=fc;

 fc=fa;

end

tol1=2*eps*abs(b)+0.5*tol;

xm=0.5*(c-b);

%Ο αλγόριθμος ελέγχει συνεχώς τα άκρα του διαστήματος και με δεδομένο το ετερόσημο της τιμής της
%υπερβατικής συνάρτησης στα άκρα προχωράει σε ανάθεση νέου διαστήματος προς αναζήτηση εκτός και
%αν βρεθεί η ρίζα. Ο αλγόριθμος και στη συνέχεια λειτουργεί στα συμπληρωματικά διαστήματα που
%δημιουργούνται με γνώμονα πάντα τη σωστή επιλογή του σημείου στο διάστημα προς διχοτόμηση,
%σημείο στο οποίο απαιτήθηκε η σύμπτυξη της αριθμητικής ανάλυσης.

while (abs(xm)>tol1)&(fb~=0)

```

if (abs(e)>=tol1)&(abs(fa)>abs(fb))
    s=fb/fa;
    if a==c
        p=2.0*xm*s;
        q=1-s;
    else
        q=fa/fc;
        r=fb/fc;
        p=s*((2*xm*q*(q-r))-((b-a)*(r-1)));
        q=(q-1)*(r-1)*(s-1);
    end
    if p>0
        q=-q;
    end

    p=abs(p);
    min1=(3*xm*q)-(abs(tol1*q));
    min2=abs(e*q);

    if min1<min2
        min=min1;
    else min=min2;
    end
    if 2*p<min
        e=d;
        d=p/q;
    else
        d=xm;
        e=d;
    end
end
else
    d=xm;
    e=d;
end

a=b;
fa=fb;
if abs(d)>tol1
    b=b+d;
else
    if xm>=0
        b=b+abs(tol1);
    end
end

```

```

else
    b=b-abs(tol1);
end
end
fb= synartisigiaypervatiki (b,CNRnom,CNRthr,Am,Sa,fi,f,t,deiktis,ba,va,XPDnomka,GAMA);
if fb*fc>0
    c=a;
    fc=fa;
    d=b-a;
    e=d;
end
if abs(fc)<abs(fb)
    a=b;
    b=c;
    c=a;
    fa=fb;
    fb=fc;
    fc=fa;
end
tol1=2*eps*abs(b)+0.5*tol;
xm=0.5*(c-b);
b;
end

```

%Αφού η τιμή βρεθεί γίνεται ανάθεση της τιμής σε μια βοηθητική εξωτερική μεταβλητή η οποία θα επιστραφεί
 %στην έξοδο του προγράμματος από το οποίο κλήθηκε η συνάρτηση ZBRENT

```

    zbrentAi_limit=b;
num=zbrentAi_limit;

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥ HELLAS SAT

Θ.1 Γενικά

Στο παράρτημα αυτό παρατίθενται αναλυτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου Hellas Sat καθώς και ορισμένα στοιχεία για το ιδιοκτησιακό καθεστώς, και την εμπορική εκμετάλλευση.

Ο Hellas Sat κατασκευάστηκε από την γαλλο-βρετανική εταιρεία Astrium, ενώ την εκτόξευσή του πραγματοποίησε η αμερικανική International Launch Services (ILS), την Τετάρτη 14 Μαΐου 2003. Το όχημα που μετέφερε τον δορυφόρο ήταν ο πύραυλος Atlas V 401 (κατασκευαστής Lockheed Martin με μηχανή Pratt & Whitney) και εκτοξεύθηκε από την βάση του ακρωτηρίου Κανάβεραλ (εξέδρα του συγκροτήματος C-41) της Φλόριντα (ΗΠΑ). Ο δορυφόρος είναι τύπου EUROSTAR E2000+ και η ιδιοκτησία καθώς και η εμπορική αξιοποίηση ανήκει στους Hellas-Sat Consortium Ltd. και Hellas-Sat SA. Μέλη της κοινοπραξίας του Hellas-Sat είναι ο Ο.Τ.Ε (83,34%), η Ελληνική Αεροναυτική Βιομηχανία – ΕΑΒ (3,93%), η Κυπριακή Τράπεζα Ανάπτυξης (3,84%), η AvacomNet Services (8,50%) και η канаδική Telesat (0,39%). Το δημόσιο διαθέτει δύο αναμεταδότες ως αντάλλαγμα για την άδεια που έδωσε (παραχώρηση δικαιωμάτων). Η εκτόξευση ήταν απολύτως επιτυχημένη, με μεγάλο βαθμό ακρίβειας (η απόσταση από το θεωρητικό σημείο που έπρεπε να φτάσει ήταν μόλις 40 μέτρα) ώστε ο δορυφόρος να μην χρειαστεί να χρησιμοποιήσει καθόλου από τα δικά του καύσιμα (απαραίτητα στο μέλλον για διορθωτικές κινήσεις

θέσης) επιτυγχάνοντας έτσι - κατά μέγιστο - αύξηση της διάρκειας ζωής του κατά δύο χρόνια. Το συνολικό κόστος του προγράμματος ανέρχεται κοντά στα 170 εκατομμύρια ευρώ, συμπεριλαμβανομένου τον δορυφόρο, τον Atlas V και την ασφάλεια εκτόξευσης και λειτουργίας.

Η Lockheed και το Κανάβεραλ είχαν την ευθύνη και την υποχρέωση να παραδώσουν το δορυφόρο σε τροχιά. Αμέσως μετά, ο έλεγχος πέρασε στην κατασκευάστρια εταιρία Astrium, για τις πρώτες μέρες, ενώ στη συνέχεια και βάσει συμβολαίου διαχείρισης διάρκειας ενός χρόνου ο έλεγχος περνάει στην Astra TechCom, σε συνεργασία πάντα με την Astrium. Στην Ελλάδα κατασκευάστηκε ο κύριος σταθμός ελέγχου, αξιοποιώντας την υπάρχουσα υποδομή στο δορυφορικό σταθμό των Θερμοπυλών, ενώ θα κατασκευασθεί και ένας εφεδρικός σταθμός στην Κύπρο[Καπλάνης, Καρβέλης, Πένταρη και Πρεβεζάς, 2003]^[59].



Σχήμα Θ.1: Η εκτόξευση του Hellas Sat.

Ο Hellas Sat μπορεί να παρέχει μια ποικιλία υπηρεσιών σε δημόσιους και ιδιωτικούς φορείς εντός της περιοχής κάλυψης, μερικές εκ των οποίων είναι:

Υπηρεσίες video και ήχου

Μετάδοση κινούμενης εικόνας και ήχου

Καλωδιακή τηλεόραση

Εκπομπή ραδιοτηλεοπτικών

προγραμμάτων προς το κοινό

Υπηρεσίες δεδομένων

Δίκτυα VSAT

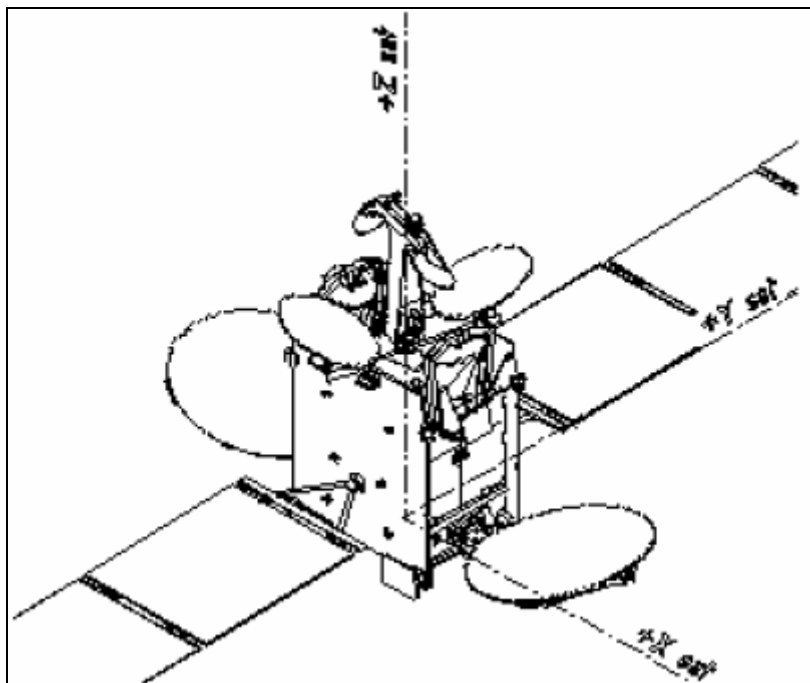
Διασύνδεση IP backbone
Απευθείας πρόσβαση στο διαδίκτυο

**Υπηρεσίες προστιθέμενης
αξίας**

Κλειστά δίκτυα διανομής
Επιχειρησιακή τηλεόραση
Συνδρομητική διανομή ειδήσεων
Τηλεκπαίδευση
Τηλεϊατρική

Τηλεφωνία

Διεθνής τηλεφωνική σύνδεση
Τοπική τηλεφωνική σύνδεση



Σχήμα Θ.2: Σχέδιο του δορυφορικού αναμεταδότη.



Σχήμα Θ.3: Ο δορυφορικός αναμεταδότης.

Τα πλήρη τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου έχουν καταγραφεί στον πίνακα Θ.1 [Ταουσάνης,2004]^[60].

Περιγραφή	Γεωστατικό δορυφορικό σύστημα πολλαπλών καλύψεων
Τροχιακή θέση	39° Ανατολικά
Τηλεπικοινωνιακό φορτίο	30 αναμεταδότες των 36 MHz (συν 8 εφεδρικοί). Εξ αυτών έως 12 στη σταθερή δέσμη F1, έως 6 στη σταθερή δέσμη F2, έως 12 στην κινητή δέσμη S1 και έως 6 στην κινητή δέσμη S2.
Κάλυψη	Πανευρωπαϊκή για τις σταθερές δέσμες F1 και F2. Οι κινητές δέσμες μπορούν να καλύπτουν δυο από τις εξής περιοχές: Νότιος Αφρική, Μέση Ανατολή,

	Νοτιοανατολική Ασία, μέρος της Ινδίας, μέρος της Αυστραλίας.
EIRP καθοδικής ζεύξης	53dBW στο κέντρο της δέσμης για τις σταθερές δέσμες 51dBW στο κέντρο της δέσμης για τις κινητές δέσμες
G/T ανοδικής ζεύξης	+ 6dB/K στο κέντρο της δέσμης για τις σταθερές δέσμες + 4dB/K στο κέντρο της δέσμης για τις κινητές δέσμες
Συχνότητες	Ku-band Καθοδική ζεύξη 10,95-11,2/ 11,45-11,70/12,50-12,75 GHz Ανοδική ζεύξη 13,75-14,5 GHz Beacon 11,4515 GHz (Κάθετη)
Πόλωση	Κάθετη/Οριζόντια
SFD σε 0dB εξασθένιση, G/T = 0	- 92 dBW/m ²
Περιοχή εξασθένισης καναλιού	18 dB
Τρόποι λειτουργίας αναμεταδότη	Fixed Gain Model (FGM)/ Automatic Level Control (ALC)
Διατήρηση θέσως	0.03°
Χρόνος ζωής	15 έτη
Κατασκευαστής	ASTRIUM
Όχημα εκτόξευσης	Atlas V 401
Μάζα κατά την εκτόξευση	4150 kg
Μάζα χωρίς καύσιμο	1729 kg
Εκπέτασμα	2 x 9,72m ηλιακοί συλλέκτες
Ηλεκτρική ισχύς	5,6 kW
Πομποί	100 W TWTA
Εφεδρεία πομπών	38 : 30
Εφεδρεία δεκτών	3:2 για την F1 2:1 για την F2 2:1 για την S1

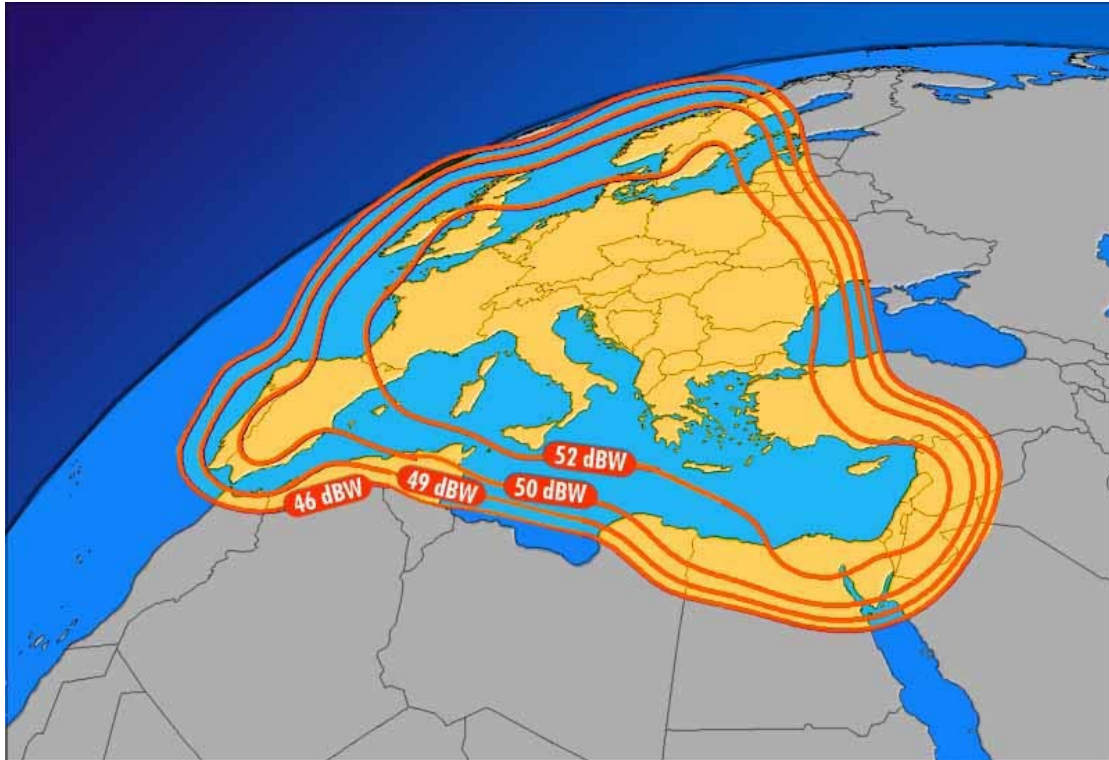
3:2 για τηνS2

Πίνακας Θ.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του Hellas Sat.

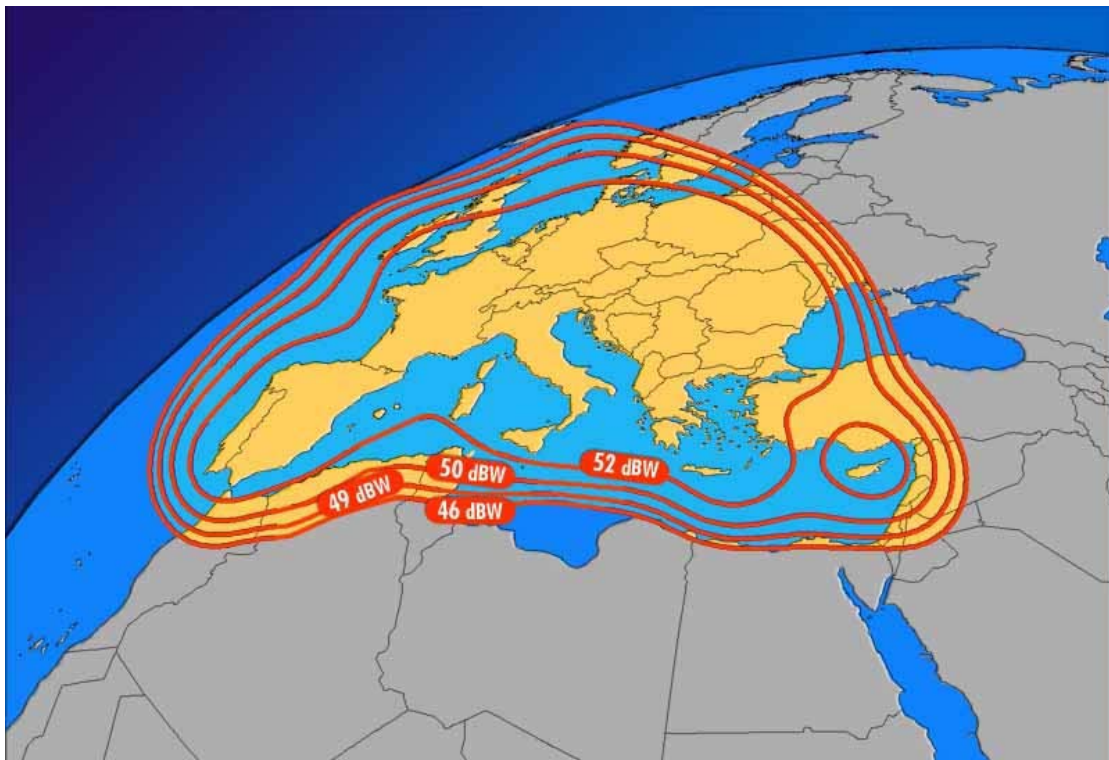
Στη συνέχεια, ακολουθεί φωτογραφία του Hellas Sat καθώς και οι χάρτες με τις περιοχές κάλυψης από κάθε δέσμη.



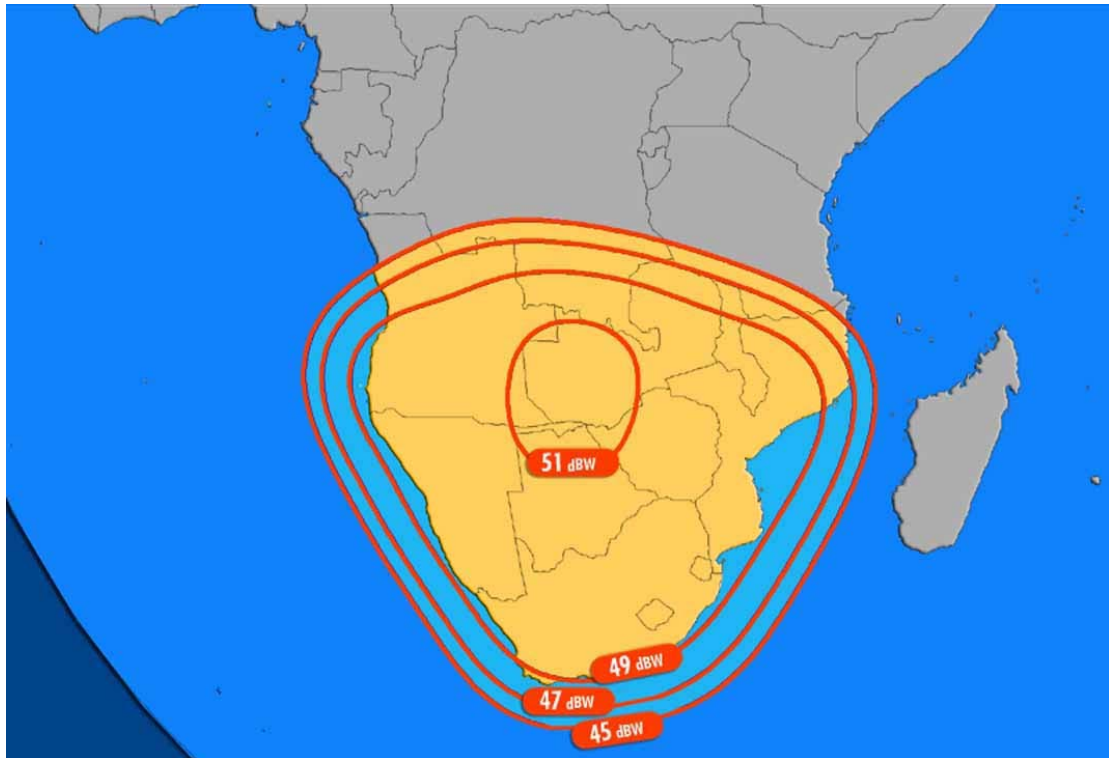
Σχήμα Θ.4: Hellas Sat.



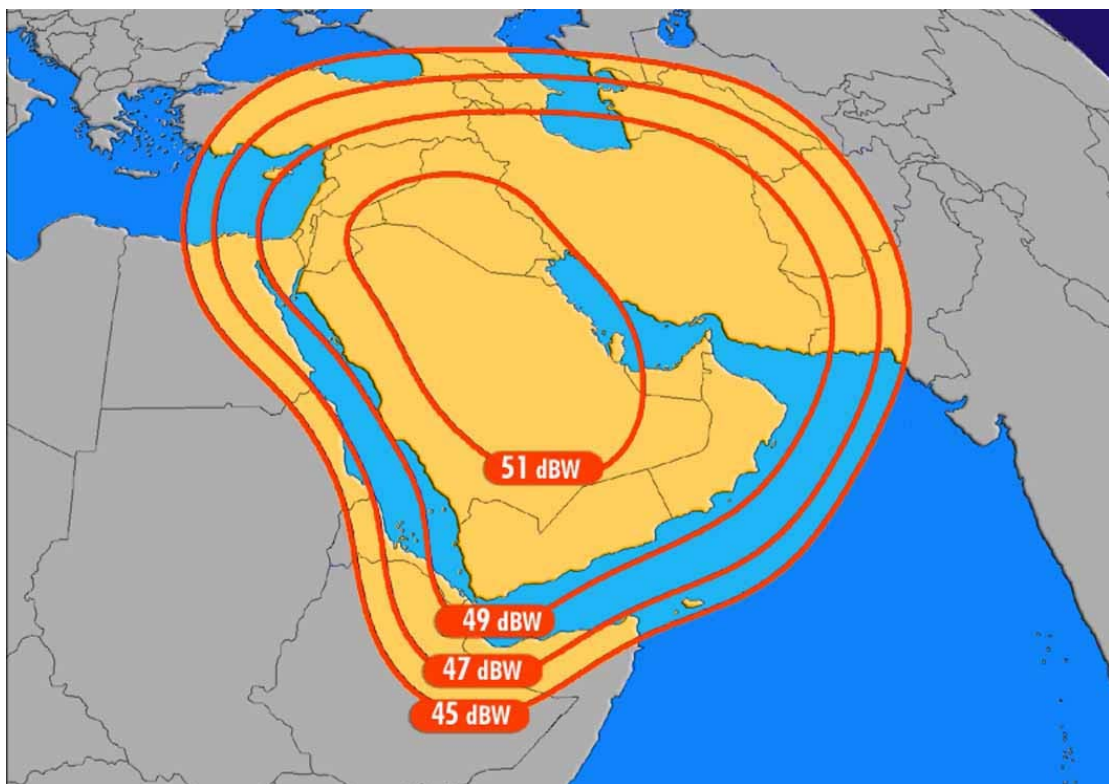
Σχήμα Θ.5: Κάλυψη σταθερής δέσμης F1.



Σχήμα Θ.6: Κάλυψη σταθερής δέσμης F2.



Σχήμα Θ.7: Κάλυψη σταθερής δέσμης S1.



Σχήμα Θ.8: Κάλυψη κινητής δέσμης S2.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

I

***ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ
ΛΑΘΟΥΣ PSK
ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ***

I.1 Γενικά

Παρατίθενται οι εκφράσεις για την πιθανότητα λάθους ψηφίου P_b διαφόρων συστημάτων ψηφιακής διαμόρφωσης στον πίνακα I.1 [Κωττής, 2003]^[61].

<i>Είδος ψηφιακής διαμόρφωσης</i>	<i>Μαθηματικός τύπος</i>
Ομόδυνη BPSK	$P_b = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \right)$
Ομόδυνη DPSK	$P_b = \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \right) - \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc}^2 \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \right)$
Ομόδυνη FSK	$P_b = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{2 \cdot \frac{E_b}{N_o}} \right)$
Ομόδυνη QPSK και MSK	$P_b = \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \right) - \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc}^2 \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \right)$
Ετερόδυνη DPSK	$P_b = \frac{1}{2} \cdot \exp \left(-\frac{E_b}{N_o} \right)$
Ετερόδυνη FSK	$P_b = \frac{1}{2} \cdot \exp \left(-\frac{E_b}{2 \cdot N_o} \right)$
Ετερόδυνη PSK	$P_b = \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{2 \cdot E_b}{N_o}} \right)$

Πίνακας I.1 Εκφράσεις P_b για διάφορα συστήματα ψηφιακής διαμόρφωσης.

Στα δορυφορικά δίκτυα τα σχήματα ψηφιακής διαμόρφωσης που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι τα BPSK και QPSK και κωδικοποίησης με ρυθμούς 1/2, 3/4 και 7/8. Στα συστήματα που λειτουργούν με διαμόρφωση BPSK χρησιμοποιείται σχεδόν διπλάσιο φάσμα σε σχέση με τα αντίστοιχα που λειτουργούν με QPSK, με το πλεονέκτημα όμως των χαμηλότερων απαιτήσεων σε ισχύ για τους επίγειους σταθμούς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεσμεύεται ένα μεγάλο μέρος της ισχύος του αναμεταδότη (αφού πρέπει να είναι ίσο με το αντίστοιχο ποσοστό φάσματος), η αξιοποίηση του οποίου οδηγεί σε μείωση της ισχύος εκπομπής των VSAT. Στην περίπτωση 1/2 BPSK, όπου το ποσοστό των πόρων του δορυφόρου που δεσμεύονται είναι πάρα πολύ μεγάλο, η συγκεκριμένη επιλογή καθίσταται οικονομικά ασύμφορη. Ωστόσο, προκύπτουν περιπτώσεις, όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα λογικό ποσοστό του φάσματος συγκριτικά μεγαλύτερο σε σχέση με τη διαμόρφωση QPSK,

αλλά επιτυγχάνεται χαμηλό κόστος εξοπλισμού. Στα συστήματα με διαμόρφωση QPSK παρατηρείται σημαντική εξοικονόμηση του χρησιμοποιούμενου φάσματος, που όμως σε μία περίπτωση είχε ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Στην περίπτωση 7/8 QPSK δεν κατέστη δυνατή η μείωση του ποσοστού ισχύος του αναμεταδότη που δεσμεύεται, ώστε να φτάσει στα ίδια επίπεδα με το ποσοστό φάσματος, ακόμα και με τον ακριβότερο εξοπλισμό (μεγάλες κεραιές και ενισχυτές μεγάλης ισχύος εξόδου).

Προκύπτουν αρκετοί συνδυασμοί κεραιών, ισχύος εκπομπής, LNAs και σχημάτων ψηφιακής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης διόρθωσης λαθών που επιτυγχάνουν την επιθυμητή εξισορρόπηση των πόρων φάσματος και ισχύος του δορυφόρου. Οι συνδυασμοί που επιλέγονται τελικά από το σχεδιαστή είναι εκείνοι που ελαχιστοποιούν το συνολικό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του δικτύου VSAT σε σχέση με τη διάρκεια ζωής του. Σε περιπτώσεις που το δίκτυο VSAT προορίζεται για τη μόνιμη τηλεφωνική κάλυψη μιας περιοχής είναι προτιμότερη η επιλογή συστημάτων που δεσμεύουν κατά το δυνατό το μικρότερο ποσοστό των πόρων του δορυφόρου, έστω κι αν ο εξοπλισμός των επίγειων είναι ακριβός.

Για παράδειγμα, οι σταθμοί VSAT και Hub πρέπει να διαθέτουν κεραιές μεγάλης διαμέτρου, που κοστίζουν ακριβά, προκειμένου να υποστηρίξουν σχήματα ψηφιακής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που ελαχιστοποιούν το χρησιμοποιούμενο φάσμα. Με τη δαπάνη, λοιπόν, ενός μεγάλου αρχικού κεφαλαίου για την εγκατάσταση επίγειων σταθμών με ακριβό εξοπλισμό επιτυγχάνεται μικρότερο κόστος λειτουργίας του δικτύου, αφού μειώνεται το ποσό που καταβάλλεται στην εταιρία που έχει τα δικαιώματα της εμπορικής εκμετάλλευσης του δορυφόρου. Από την άλλη πλευρά, σε δίκτυα VSAT, για τα οποία προβλέπεται περιορισμένη διάρκεια λειτουργίας, προτιμούνται συνδυασμοί με χαμηλό κόστος εξοπλισμού των επίγειων σταθμών που χρησιμοποιούν σχετικά μεγάλα ποσοστά των πόρων του δορυφόρου.

Το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του δικτύου VSAT εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον εξοπλισμό των επίγειων σταθμών και το ποσοστό των πόρων του δορυφόρου, που δεσμεύονται, αντίστοιχα. Κατά περίπτωση, λοιπόν, επιλέγεται ο συνδυασμός εκείνος των παραμέτρων που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος σε σχέση με το χρόνο ζωής και το σκοπό που εξυπηρετεί στην περιοχή το δίκτυο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

K

**ΑΝΑΛΥΣΗ
ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ
ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ
ΕΝΤΑΣΗΣ
ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ**

K.1 Ανάλυση Κατανομής

Η ένταση βροχόπτωσης (rainfall rate) καθορίζει το ύψος του νερού που φθάνει στη γη ανά μονάδα χρόνου. Όπως είναι προφανές, η ένταση βροχόπτωσης εξαρτάται από τον αριθμό των βροχοσταγόνων ανά μονάδα όγκου του ατμοσφαιρικού αέρα, καθώς επίσης και από τη στατιστική κατανομή των μεγεθών των σταγόνων. Για μια δεδομένη κατανομή μεγεθών σταγόνων, η ένταση βροχόπτωσης μπορεί να καθορισθεί από τη σχέση

$$R = 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot \int D^3 \cdot V(D) \cdot n(D) \cdot dD \quad (mm / hr) \quad (K.1)$$

όπου $V(D)$ (m/s) είναι η τελική ταχύτητα πτώσεως σταγόνων διαμέτρου D , ενώ η ολοκλήρωση εκτελείται σε όλα τα μεγέθη των σταγόνων. Σημειώνεται ότι το D αναφέρεται στη διάμετρο της ισόογκης σφαιρικής σταγόνας.

Κατά τη διάρκεια βροχόπτωσης, η ένταση R είναι μία τυχαία διαδικασία του χρόνου και του χώρου. Τα διαθέσιμα δεδομένα για την ένταση βροχόπτωσης δείχνουν επιπλέον ότι οι κατανομές του R που αναφέρονται σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, διαφέρουν για την ίδια τοποθεσία από μετρητή σε μετρητή. Αυτό βέβαια δε σχετίζεται με τη χωρική ανομοιογένεια της βροχής, αλλά επιβάλλει ωστόσο τη γνώση της στατιστικής συμπεριφοράς μακρού χρονικού διαστήματος της σημειακής έντασης βροχόπτωσης. Πράγματι, επιβεβαιώνεται πειραματικά ότι οι κατανομές

μακρού χρονικού διαστήματος του R για διάφορα σημεία στην ίδια τοποθεσία συγκλίνουν σε μία ενιαία τιμή.

Ο καθορισμός της στατιστικής κατανομής της έντασης βροχόπτωσης, για κάθε περιοχή, είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για τον υπολογισμό της κατανομής της απόσβεσης που εισάγεται στο σήμα από τη βροχή. Ως εκ τούτου, η γνώση της κατανομής του R σε κάθε περιοχή θεωρείται απαραίτητη για τη σχεδίαση μιας ραδιοζεύξης, που λειτουργεί σε συχνότητες πάνω από 10GHz. Εάν δεν υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για μία συγκεκριμένη περιοχή, ο Διεθνής Τηλεπικοινωνιακός Οργανισμός μέσω των συστάσεων του (ITU-R) προτείνει τη χρήση ειδικού προγράμματος τιμών που αναφέρεται στα χαρακτηριστικά βροχόπτωσης των διαφόρων περιοχών της γήινης επιφάνειας.

Σε αρκετές περιπτώσεις είναι σημαντικό να προσεγγίσουμε μία δεδομένη κατανομή έντασης βροχόπτωσης με κάποια συγκεκριμένη μαθηματική μορφή. Για τις περισσότερες περιοχές έχει βρεθεί ότι η λογαριθμοκανονική κατανομή έχει πολύ καλή εφαρμογή, ενώ η γάμμα μορφή είναι καλύτερη για περιοχές που χαρακτηρίζονται από μεγάλες εντάσεις βροχόπτωσης.

Στην περίπτωση της λογαριθμοκανονικής κατανομής η έκφραση που δίνει την αθροιστική κατανομή υπέρβασης της σημειακής έντασης βροχόπτωσης, δίνεται από τη σχέση

$$P(R \geq r) = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln(r) - \ln(R_m)}{\sqrt{2} \cdot S_r} \right) \quad (\text{K.2})$$

Στην παραπάνω σχέση, δύο είναι οι παράμετροι της μαθηματικής κατανομής, η μεσαία τιμή R_m και η σταθερή απόκλιση S_r της $\ln(R)$. Πρέπει να αναφερθεί εδώ, ότι η κατανομή αυτή ισχύει από μία ελάχιστη τιμή της μεταβλητής R και άνω ($R \geq 5\text{mm/hr}$ συνήθως), ενώ για μικρές τιμές οδηγεί σε υπερεκτίμηση της πιθανότητας υπέρβασης. Το γεγονός αυτό δεν αποτελεί όμως ουσιαστικό μειονέκτημα στην εφαρμογή του συγκεκριμένου μοντέλου, καθώς στον υπολογισμό πιθανοτήτων υπέρβασης ενδιαφέρον παρουσιάζουν μόνο οι σχετικά μεγάλες τιμές του R . Οι παράμετροι R_m και S_r της λογαριθμοκανονικής κατανομής του R προσδιορίζονται, κάνοντας συνήθως χρήση διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων της αθροιστικής καμπύλης υπέρβασης της σημειακής έντασης βροχόπτωσης.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, για περιοχές της Ιαπωνίας και άλλων περιοχών (κυρίως τροπικών), το μοντέλο που προτάθηκε από του Morita-Higutti

προσεγγίζει καλύτερα την κατανομή της σημειακής έντασης βροχόπτωσης. Συγκεκριμένα έχουμε

$$P(R \geq r) = 1 - \frac{\gamma(v_r, b_r \cdot r)}{\Gamma(v_r)} \quad (\text{K.3})$$

όπου η συνάρτηση $\gamma(\alpha, x)$ είναι η ατελής συνάρτηση γάμμα που δίνεται από το ολοκλήρωμα ορισμού της

$$\gamma(\alpha, x) = \int_0^x t^{\alpha-1} \cdot e^{-t} dt \quad (\text{K.4})$$

και $\Gamma(x)$ είναι η γνωστή συνάρτηση γάμμα

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \cdot e^{-t} dt \quad (\text{K.5})$$

Σημειώνεται ότι και στην περίπτωση αυτή, η κατανομή που προκύπτει από τη σχέση (K.3), ισχύει και πάλι για τιμές του r πάνω από ένα ελάχιστο κατώφλι. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων v_r και b_r της κατανομής γάμμα, που αφορά τη μεταβλητή R γίνεται επίσης χρησιμοποιώντας διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα της αθροιστικής καμπύλης υπέρβασης του μεγέθους R . Λόγω μαθηματικής πολυπλοκότητας, ο προσδιορισμός αυτός γίνεται συνήθως προσεγγιστικά, χρησιμοποιώντας κατάλληλες γραφικές μεθόδους.

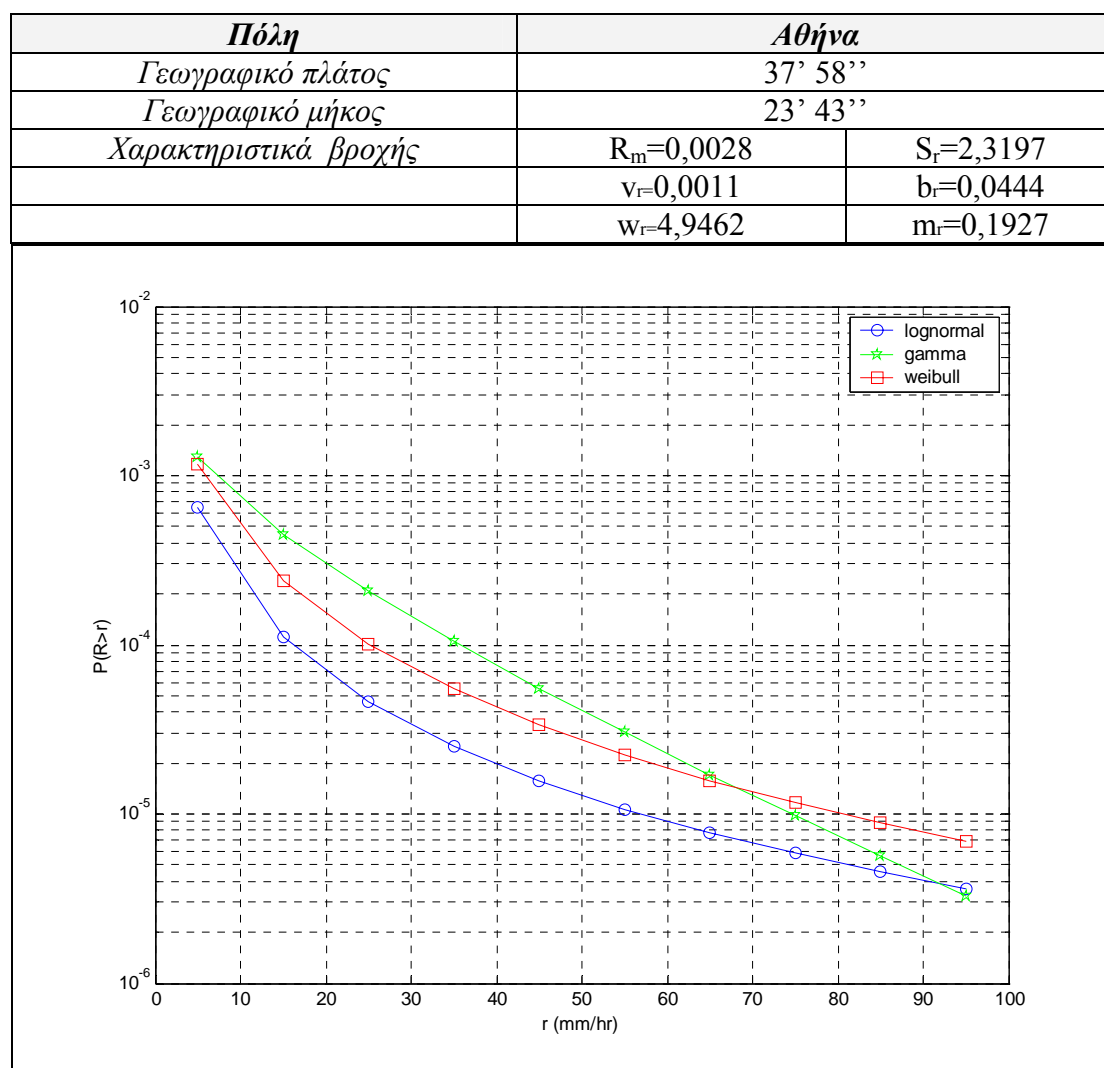
Στην περίπτωση της κατανομής Weibull η έκφραση που δίνει την αθροιστική κατανομή υπέρβασης της σημειακής έντασης βροχόπτωσης, δίνεται από τη σχέση

$$P(R \geq r) = \exp\left\{-w_r \times \left[\langle r \rangle^{m_r}\right]\right\} \quad (\text{K.6})$$

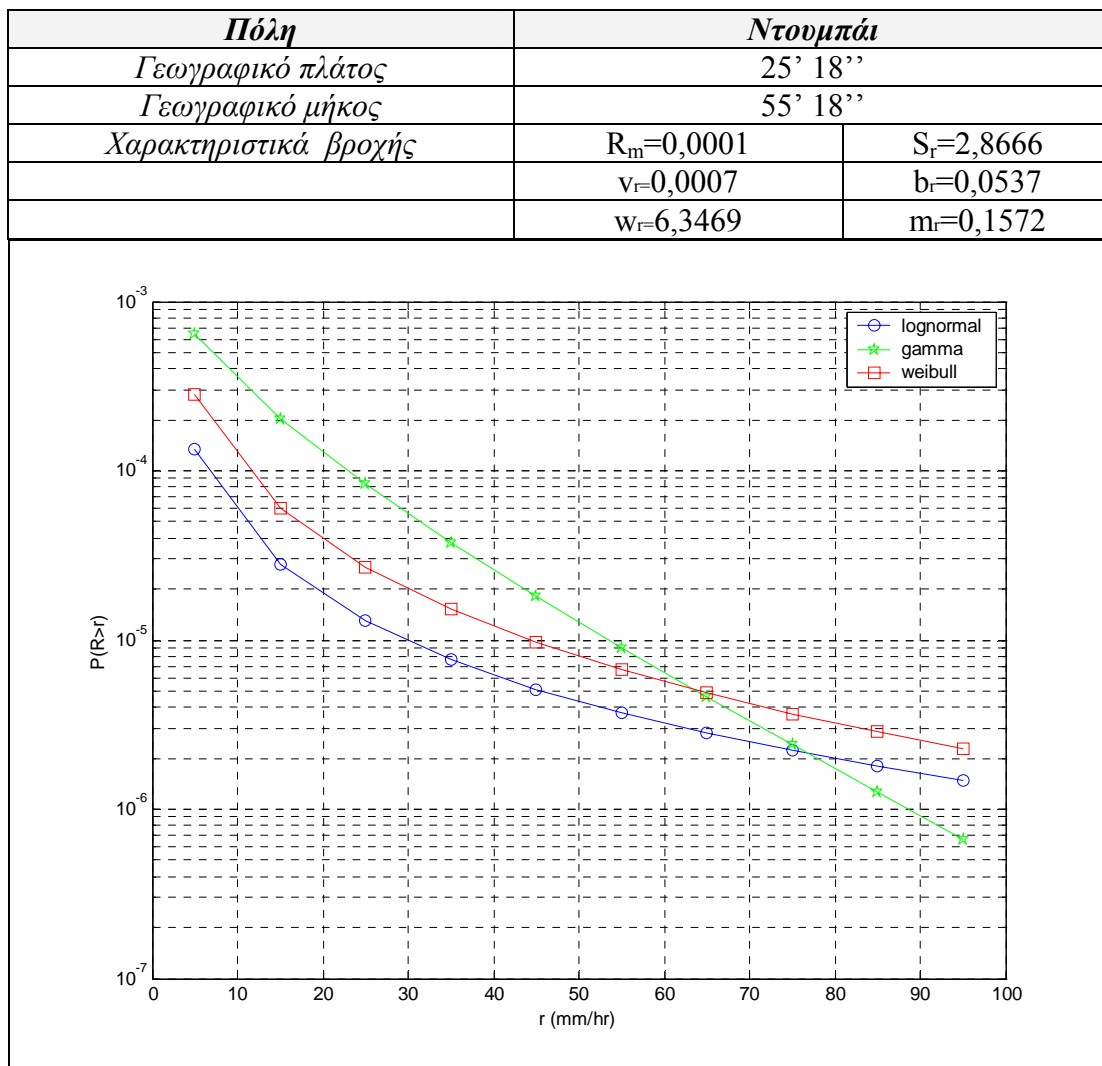
Σημειώνεται ότι και στην περίπτωση αυτή, η κατανομή που προκύπτει από τη σχέση (K.6), ισχύει και πάλι για τιμές του r πάνω από ένα ελάχιστο κατώφλι. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων w_r και m_r της κατανομής Weibull, που αφορά τη μεταβλητή R γίνεται επίσης χρησιμοποιώντας διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα της αθροιστικής καμπύλης υπέρβασης του μεγέθους R .

Κλείνοντας το θέμα της περιγραφής του μέσου βροχής, θα θέλαμε να τονίσουμε ότι σημαντικό ρόλο για τον προσδιορισμό της απόσβεσης του σήματος, που εισάγει η βροχή σε μια ραδιοζεύξη, παίζει και η μακροσκοπική δομή της. Σχετικά με το θέμα αυτό, μελέτες διαφόρων ερευνητών, για διάφορες περιπτώσεις θυελλωδών βροχοπτώσεων, καταλήγουν στο λεγόμενο μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων. Σύμφωνα με αυτό, η βροχή αποτελείται από μεμονωμένους βροχοπυρήνες, μέσα

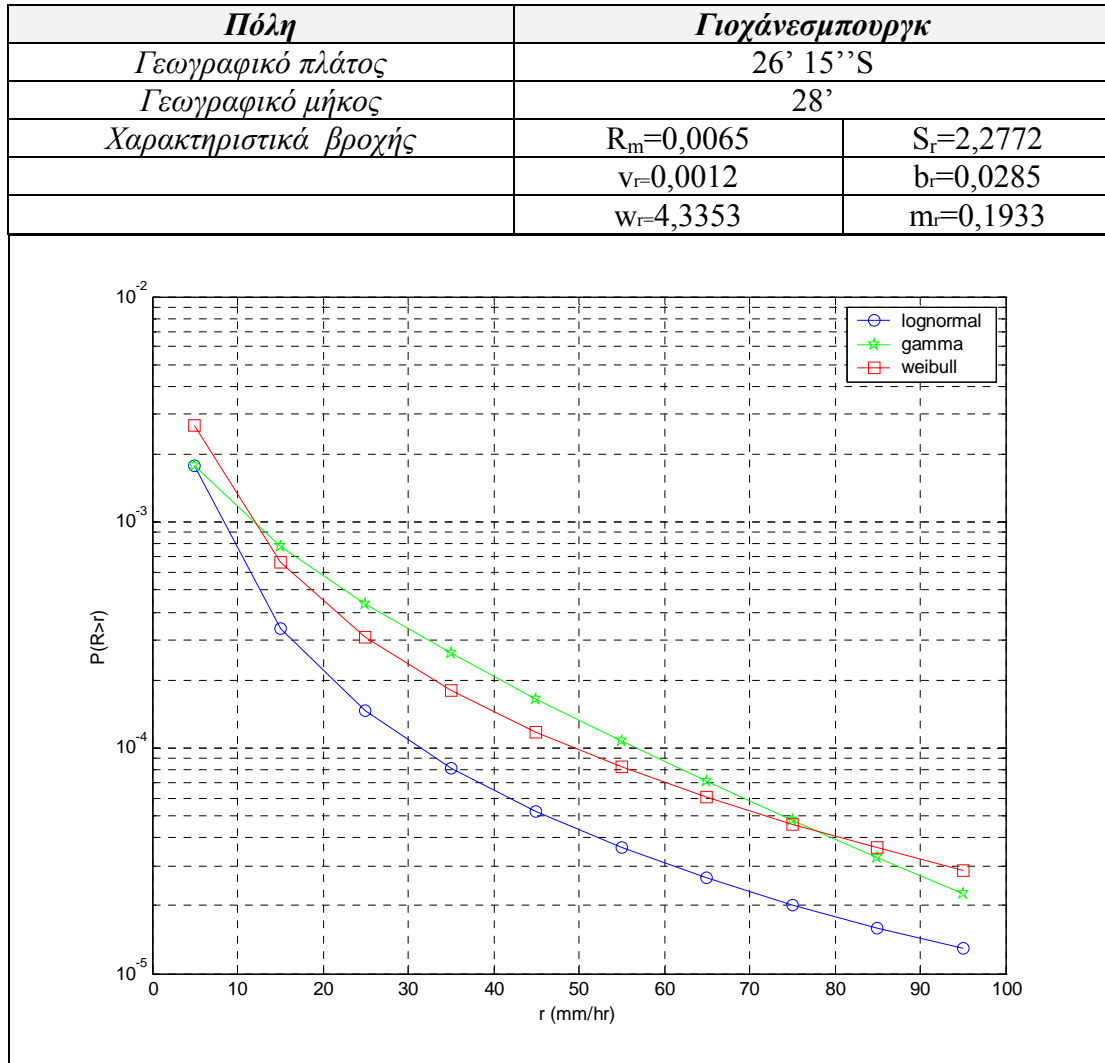
στους οποίους το στοχαστικό μέγεθος της σημειακής έντασης βροχόπτωσης εμφανίζει έντονη αυτοσυσχέτιση. Τους πυρήνες αυτούς περιβάλλουν περιοχές στρωσιγενούς βροχής, όπου η ένταση R παραμένει σταθερή. Η έκταση των βροχοπυρήνων εξαρτάται από την περιοχή που σχηματίζονται, και φθάνει μέχρι μερικές δεκάδες χιλιόμετρα. Από την άλλη μεριά, για ασθενείς βροχοπτώσεις ($R < 10\text{mm/hr}$), η βροχή εμφανίζεται χωρικά ομογενής σε μεγάλη έκταση. Περισσότερες λεπτομέρειες για το θέμα αυτό, καθώς και παρουσίαση των κυριότερων μοντέλων που έχουν προταθεί έχουν αναφερθεί στο 4^ο Κεφάλαιο.



Σχήμα Κ.1: Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα και Weibull μοντέλο για την Αθήνα.

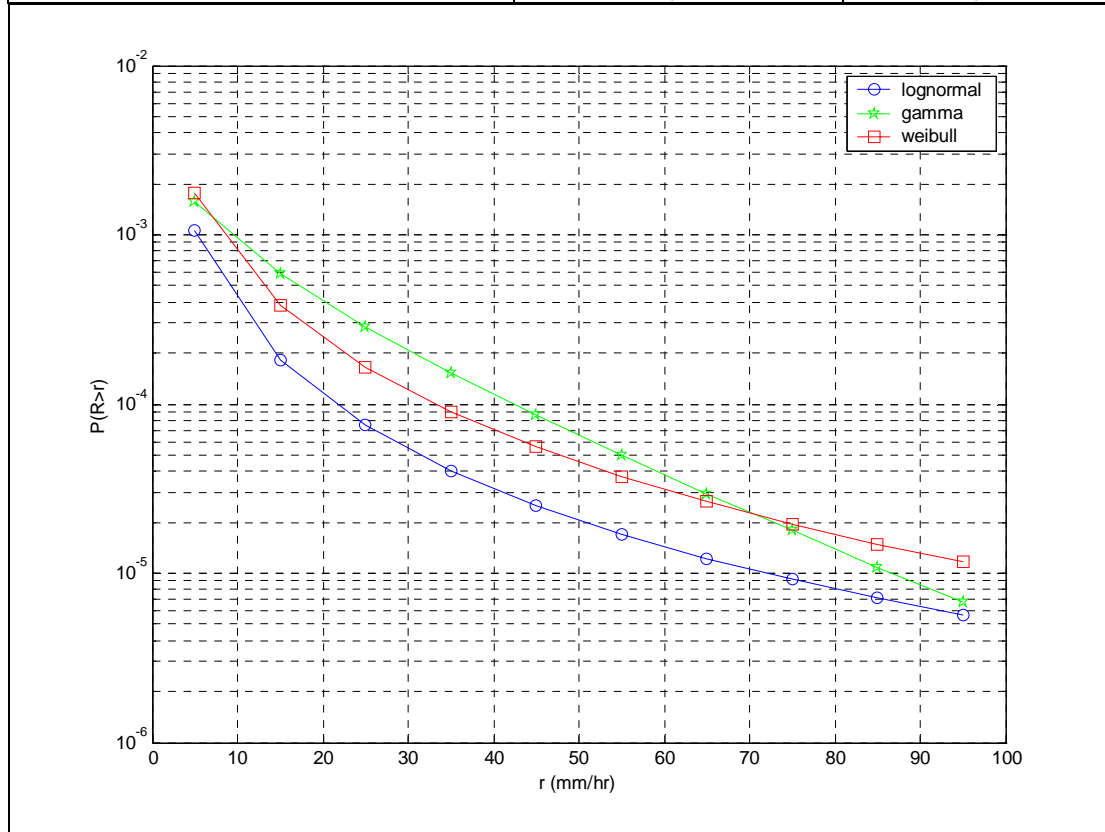


Σχήμα Κ.2: Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα και Weibull μοντέλο για το Ντουμπάι.

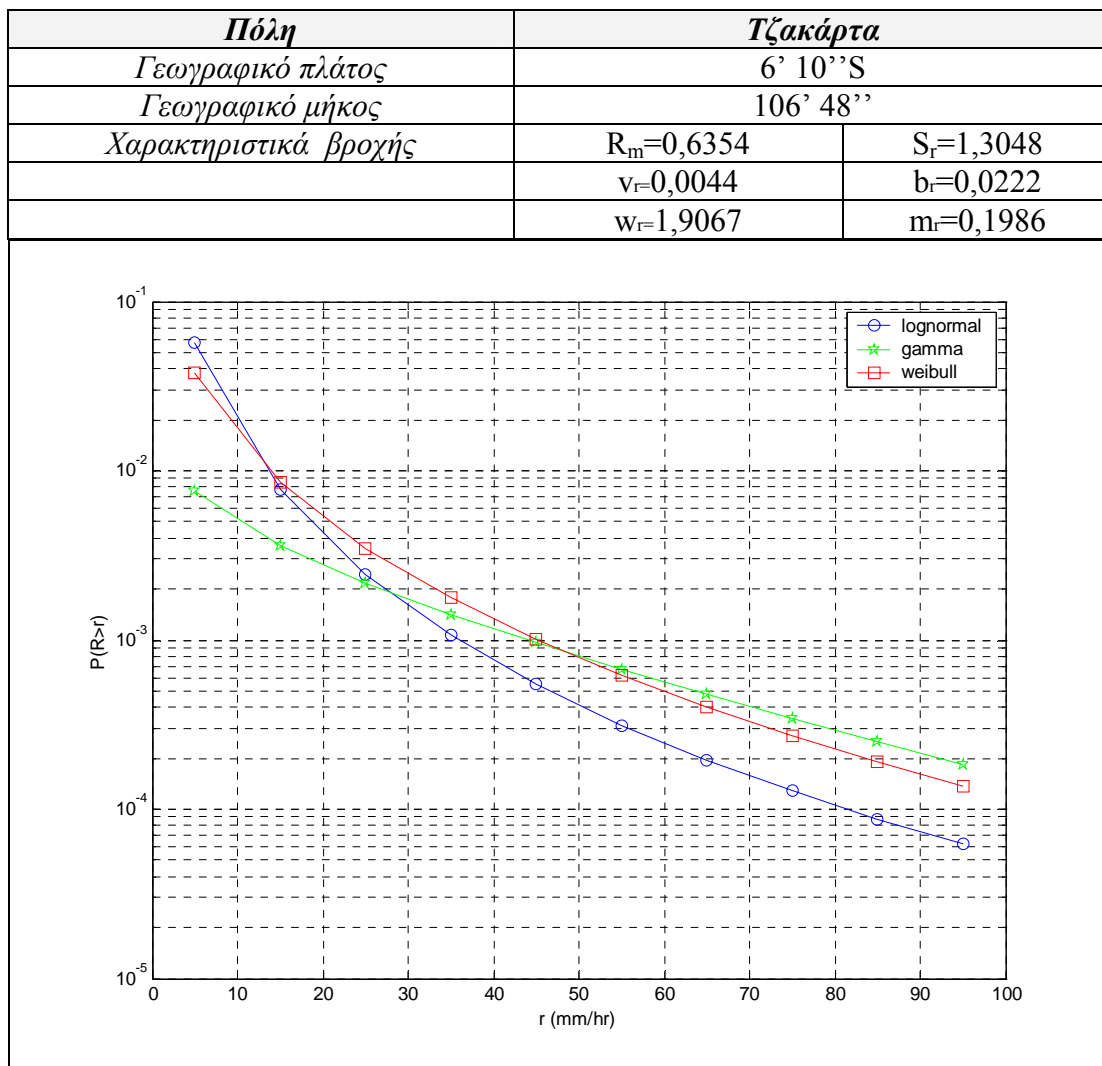


Σχήμα Κ.3: Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα και Weibull μοντέλο για το Γιοχάνεσμπουργκ.

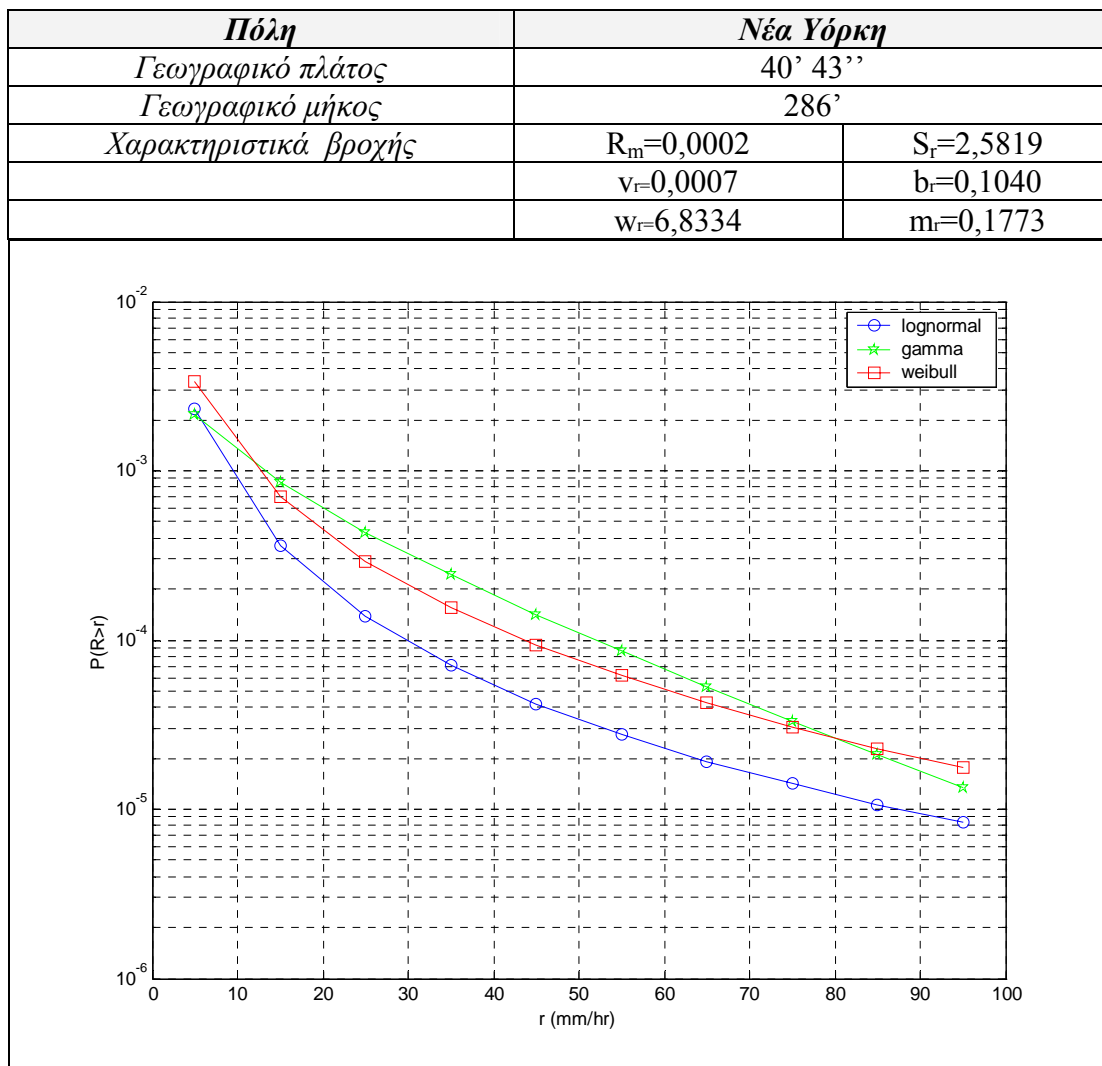
<i>Πόλη</i>	<i>Μονακό</i>	
<i>Γεωγραφικό πλάτος</i>	43' 42''	
<i>Γεωγραφικό μήκος</i>	7' 23''	
<i>Χαρακτηριστικά βροχής</i>	$R_m=0,0051$	$S_r=2,2385$
	$v_r=0,0013$	$b_r=0,0391$
	$w_r=4,6000$	$m_r=0,1986$



Σχήμα Κ.4: Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα και Weibull μοντέλο για το Μονακό.



Σχήμα Κ.5: Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα και Weibull μοντέλο για τη Τζακάρτα.



Σχήμα Κ.6: Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα και Weibull μοντέλο για τη Νέα Υόρκη.

K.2 Βελτιωμένο Μοντέλο Μουρφουμα

Μια συμβιβαστική λύση για την περιγραφή της πιθανότητας υπέρβασης μιας στάθμης r mm/hr της τ.μ. R σε πολλές περιοχές είναι το βελτιωμένο μοντέλο Μουρφουμα. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η πιθανότητα υπέρβασης μιας στάθμης r mm/hr της τ.μ. R δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$P(R \geq r) = a_r \cdot \frac{e^{-u_r r}}{r^{b_r}}, \text{ για } r \geq \varepsilon_r \quad (\text{K.7})$$

όπου a_r , b_r , u_r είναι παράμετροι που εξαρτώνται από τον χρόνο ολοκλήρωσης των χρησιμοποιούμενων βροχομετρητών και την γεωγραφική περιοχή. Πρακτικά το κάτω όριο ε_r λαμβάνεται ίσο με 2 mm/hr. Επιπλέον ο Μουρφουμα υπολόγισε ότι οι παράμετροι a_r και b_r , εκφράζονται ως συνάρτηση της τιμής της έντασης βροχόπτωσης $R_{0.01}$ (mm/hr) που παρατηρείται για 0.01% του χρόνου με βάση τις σχέσεις

$$b_r = 8.22 \cdot R_{0.01}^{-0.584} \quad (\text{K.8})$$

$$a_r = 10^{-4} \cdot R_{0.01}^{b_r} \cdot \exp(u_r \cdot R_{0.01}) \quad (\text{K.9})$$

Η τιμή της παραμέτρου u_r προκύπτει ως

$$u_r = 2.5 \cdot 10^{-2} \quad (\text{K.10})$$

Η ακόλουθη σχέση συνδέει τις ανωτέρω παραμέτρους μεταξύ τους

$$P(R \geq \varepsilon_r) = 1 \Leftrightarrow a_r = e^{u_r \varepsilon_r} \cdot \varepsilon_r^{b_r} \quad (\text{K.11})$$

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η πιθανότητα υπέρβασης μιας στάθμης y dB της τ.μ. A' (της απόσβεσης λόγω βροχής για την υποθετική επίγεια ζεύξη μήκους L') θα δίνεται από τη σχέση

$$P(A' \geq y) = a_A \cdot \frac{e^{-u_A y}}{y^{b_A}}, \text{ για } y \geq \varepsilon_A \quad (\text{K.12})$$

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονίσουμε ότι το ε_A στην ανωτέρω σχέση παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 1 dB διότι οι μικρότερες τιμές είναι αρκετά ασθενείς για να μετρηθούν και άλλωστε δεν έχουν πρακτικό ενδιαφέρον. Σκοπός είναι να υπολογίσουμε τις παραμέτρους a_A , b_A , και u_A ως συνάρτηση των αντιστοίχων παραμέτρων της κατανομής της σημειακής έντασης βροχόπτωσης και άλλων που

αφορούν τα γεωμετρικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της ζεύξης. Προφανώς θα ισχύει η σχέση

$$P(A' \geq \varepsilon_A) = 1 \Leftrightarrow a_A = e^{u_A \varepsilon_A} \cdot \varepsilon_A^{b_A} \quad (\text{K.13})$$

Οι εκφράσεις για τη μέση τιμή μ_α και την τυπική απόκλιση σ_α της τ.μ. A'

$$\mu_\alpha = E[A'] = a \cdot E[R^b] \cdot L' \quad (\text{K.14})$$

$$\sigma_\alpha^2 = a^2 \cdot \left\{ E\left[(R^b)^2 \right] - \left(E(R^b) \right)^2 \right\} \cdot H_1 \quad (\text{K.15})$$

όπου το H_1 ορίζεται με την (3.17) και υπολογίζεται στο Παράρτημα Γ.

Με τη βοήθεια των σχέσεων (K.14), (K.15) ισχύει

$$\mu_\alpha = ab a_r L' u_r^{b_r - b} \cdot \Gamma(b - b_r, u_r \varepsilon_r) \quad (\text{K.16})$$

$$\sigma_\alpha^2 = a^2 H_1 \cdot \left[2ba_r u_r^{b_r - 2b} \cdot \Gamma(2b - b_r, u_r \varepsilon_r) - b^2 a_r^2 u_r^{2b_r - 2b} \cdot \Gamma^2(b - b_r, u_r \varepsilon_r) \right] \quad (\text{K.17})$$

Επίσης θα είναι

$$\mu_\alpha = E\{A'\} = a_A u_A^{b_A - 1} \cdot \Gamma(1 - b_A, u_A \varepsilon_A) \quad (\text{K.18})$$

$$\sigma_\alpha^2 = 2a_A u_A^{b_A - 2} \cdot \Gamma(2 - b_A, u_A \varepsilon_A) - a_A^2 u_A^{2b_A - 2} \cdot \Gamma^2(1 - b_A, u_A \varepsilon_A) \quad (\text{K.19})$$

Από τις σχέσεις (K.18), (K.19) προκύπτει ο ακόλουθος μετασχηματισμός

$$u_A = \frac{2(1 - b_A) \cdot E[A']}{V(A') + E^2[A']} \quad (\text{K.20})$$

οπότε με την εισαγωγή των (K.16) και (K.17) το u_A εκφράζεται ως συνάρτηση του b_A και γνωστών παραμέτρων.

Για το ε_A χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση

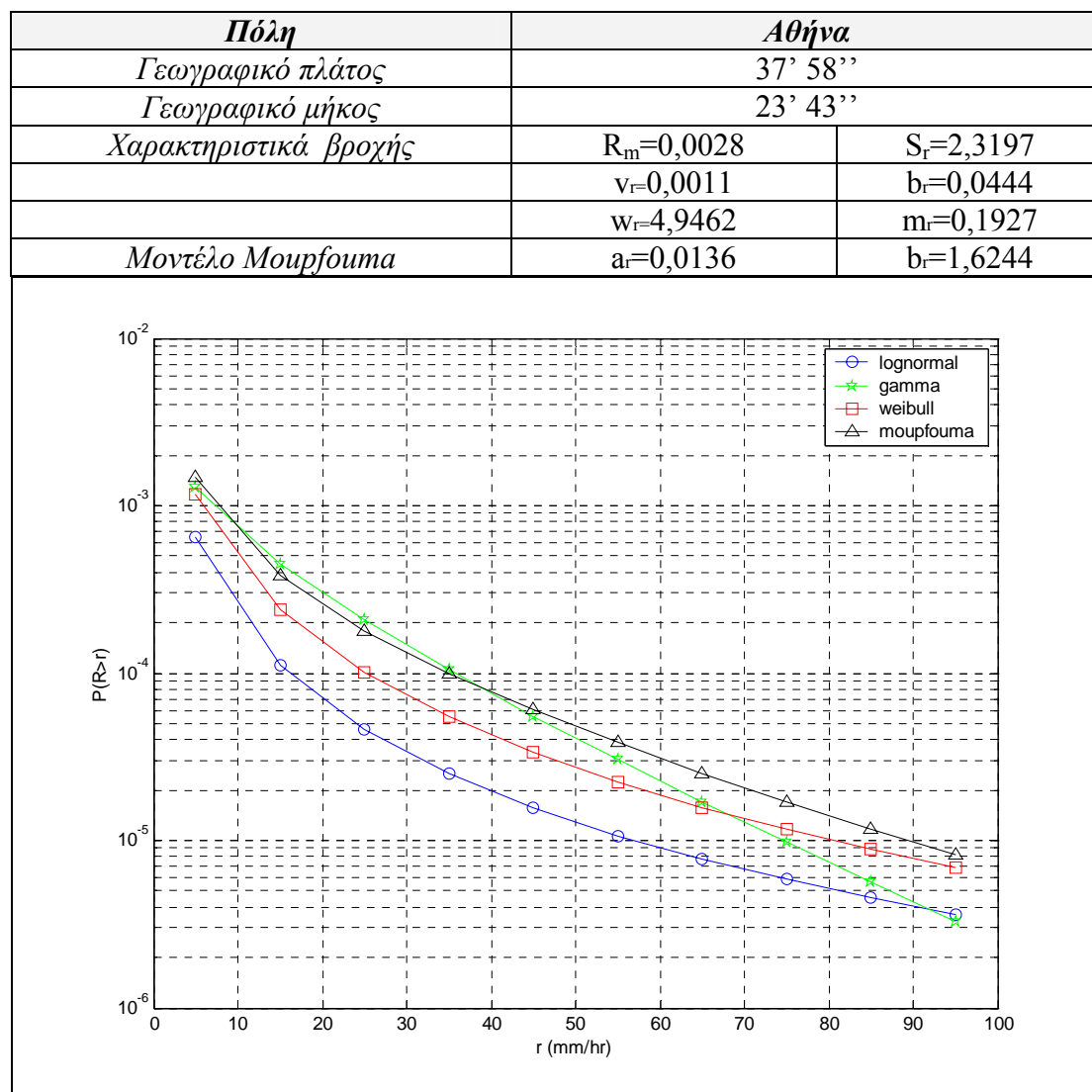
$$\varepsilon_A = \begin{cases} a \varepsilon_r^b L', & \varphi > 20^\circ \\ \frac{a \varepsilon_r^b L'}{500}, & \varphi \leq 20^\circ \end{cases} \quad (\text{K.21})$$

όπου φ είναι η γωνία ανύψωσης του ραδιοδρόμου.

Στη συνέχεια εξισώνοντας τα δεύτερα μέλη των σχέσεων (K.16), (K.18) και εισάγοντας οι σχέσεις (K.13), (K.20) οπότε προκύπτει μία υπερβατική εξίσωση ως

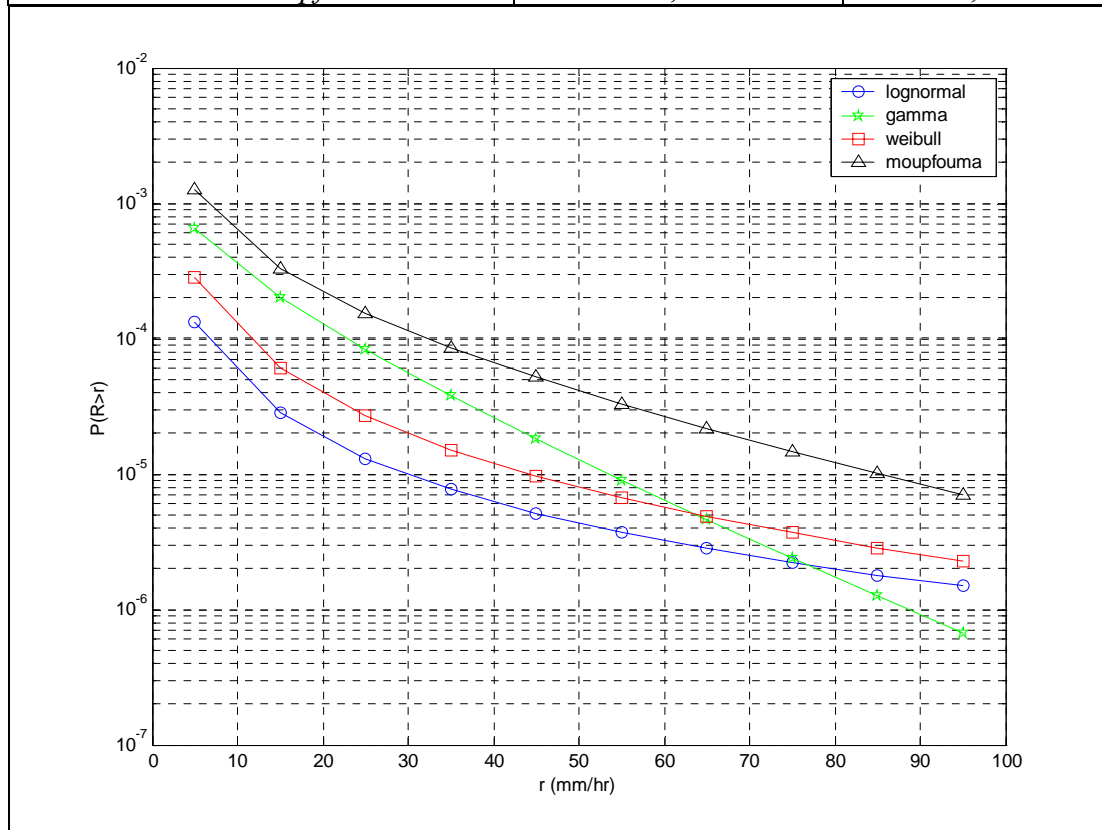
προς b_A η οποία επιλύεται αριθμητικά με κατάλληλους αλγορίθμους. Ως τελευταίο βήμα υπολογίζουμε το u_A από την (Κ.20) και το a_A από την (Κ.13).

Με βάση την παραπάνω ανάλυση για τη βροχόπτωση, παρουσιάζονται όπως προκύπτουν τα παρακάτω σχήματα

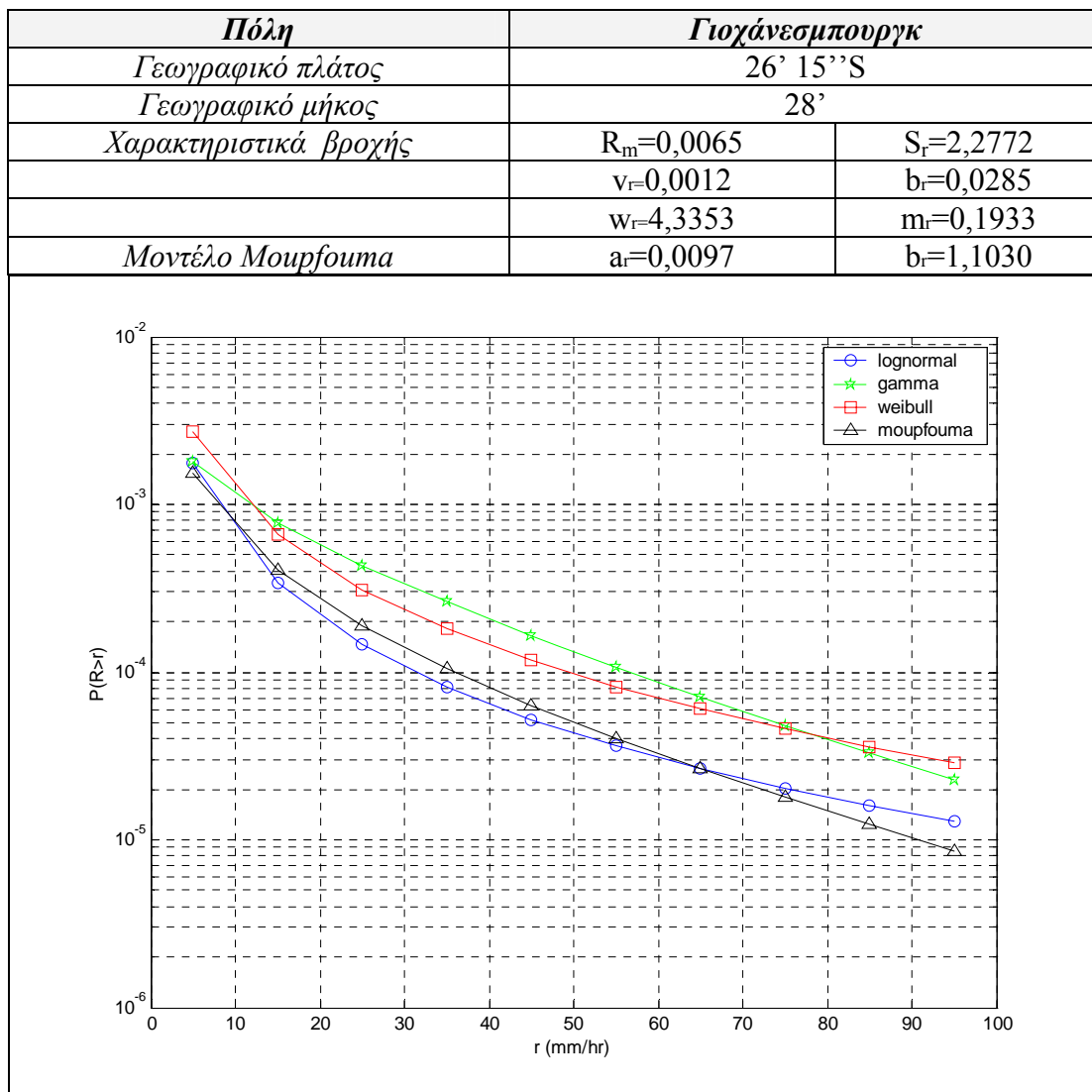


Σχήμα Κ.7: Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Μουρφουμα μοντέλο για την Αθήνα.

<i>Πόλη</i>	<i>Ντουμπάι</i>	
<i>Γεωγραφικό πλάτος</i>	25' 18''	
<i>Γεωγραφικό μήκος</i>	55' 18''	
<i>Χαρακτηριστικά βροχής</i>	$R_m=0,0001$	$S_r=2,8666$
	$v_r=0,0007$	$b_r=0,0537$
	$w_r=6,3469$	$m_r=0,1572$
<i>Μοντέλο Μουρφουμα</i>	$a_r=0,0205$	$b_r=2,8373$

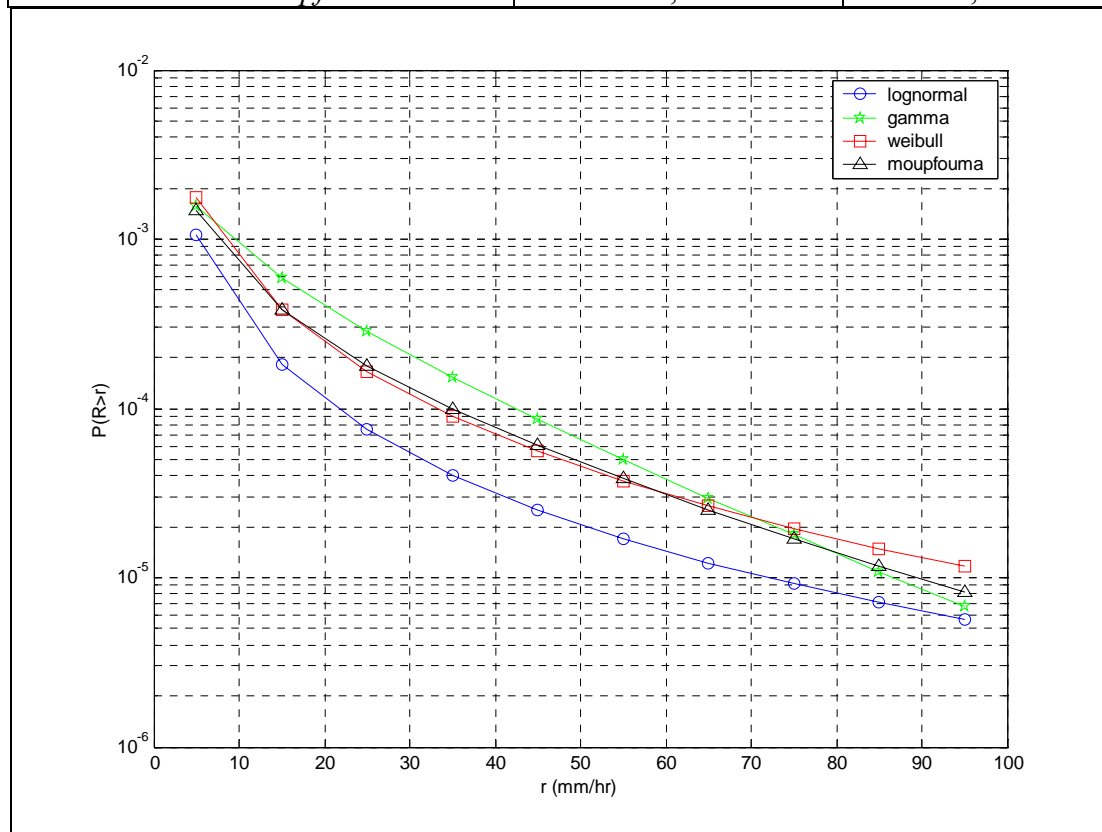


Σχήμα Κ.8: Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Μουρφουμα μοντέλο για το Ντουμπάι.



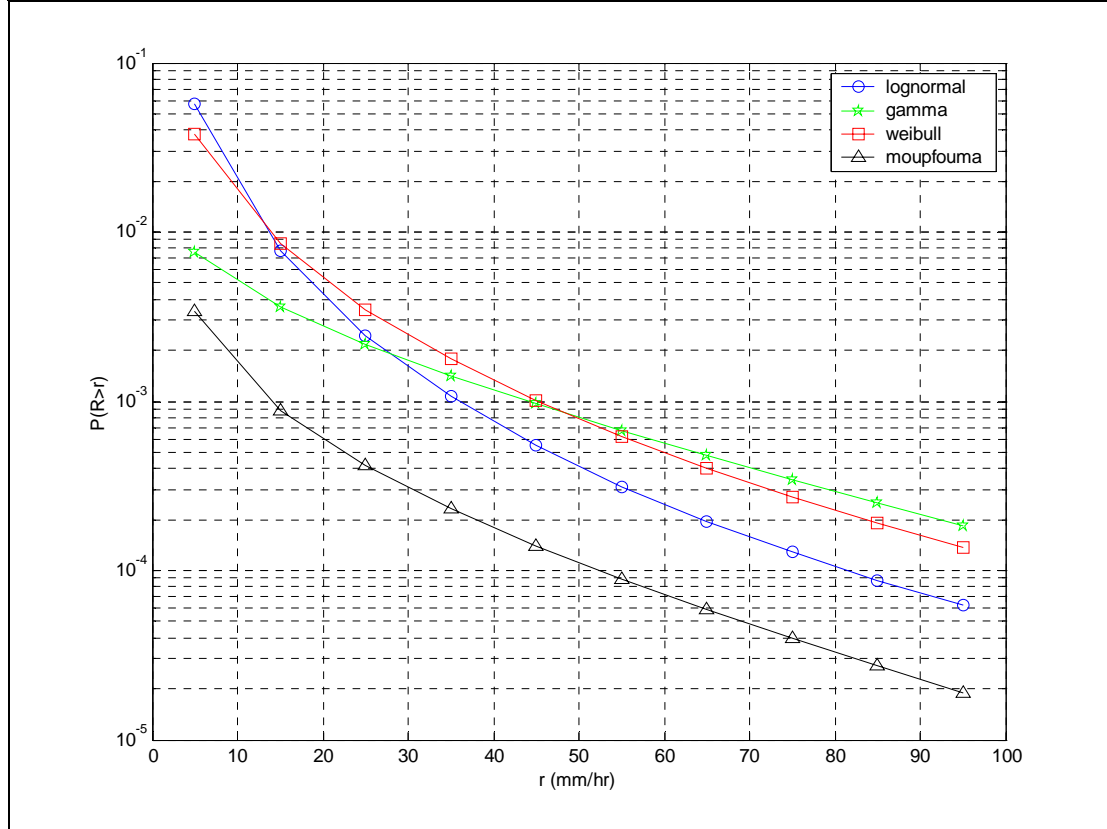
Σχήμα Κ.9: Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Μουρφουμα μοντέλο για το Γιοχάνεσμπουργκ.

<i>Πόλη</i>	<i>Μονακό</i>	
<i>Γεωγραφικό πλάτος</i>	43' 42''	
<i>Γεωγραφικό μήκος</i>	7' 23''	
<i>Χαρακτηριστικά βροχής</i>	$R_m=0,0051$	$S_r=2,2385$
	$v_r=0,0012$	$b_r=0,0391$
	$w_r=4,6000$	$m_r=0,1986$
<i>Μοντέλο Μουρφουμα</i>	$a_r=0,0115$	$b_r=1,3804$



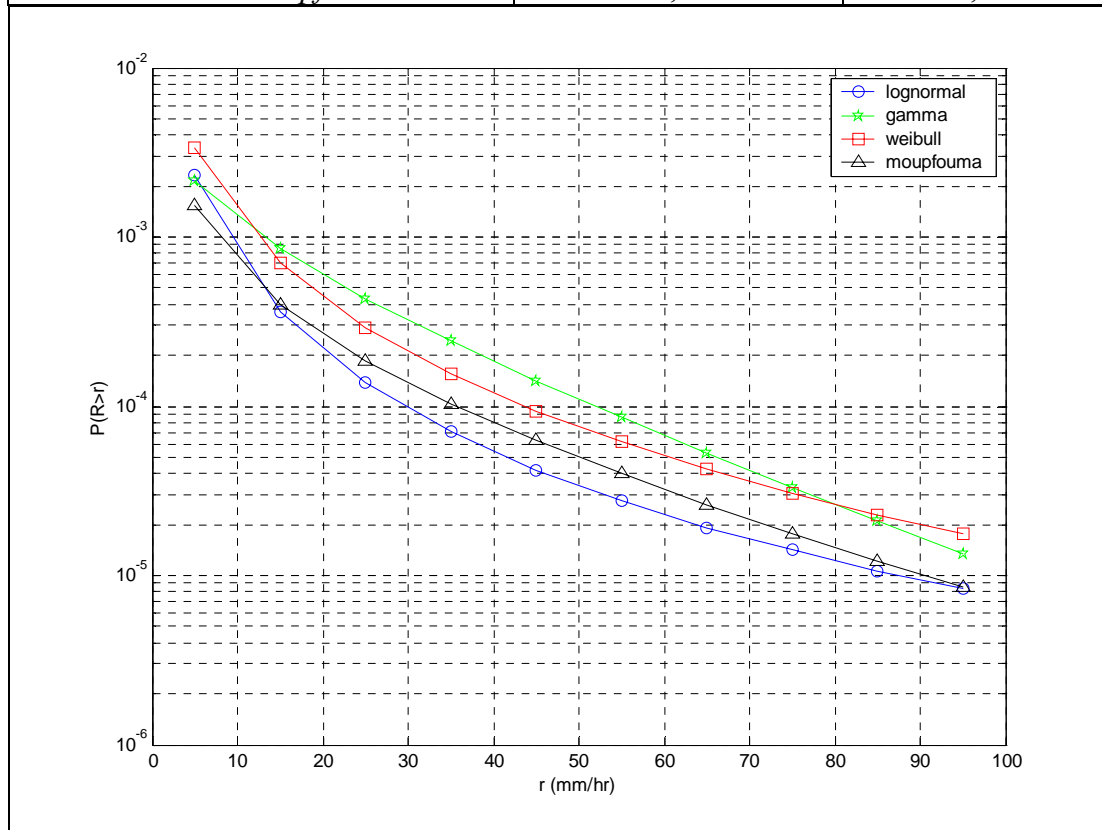
Σχήμα Κ.10: Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Μουρφουμα μοντέλο για το Μονακό.

<i>Πόλη</i>	<i>Τζακάρτα</i>	
<i>Γεωγραφικό πλάτος</i>	6' 10'' S	
<i>Γεωγραφικό μήκος</i>	106' 48''	
<i>Χαρακτηριστικά βροχής</i>	$R_m=0,6354$	$S_r=1,3048$
	$v_r=0,0044$	$b_r=0,0222$
	$w_r=1,9067$	$m_r=0,1986$
<i>Μοντέλο Μουρφουμα</i>	$a_r=0,0122$	$b_r=0,6298$



Σχήμα Κ.11: Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Μουρφουμα μοντέλο για τη Τζακάρτα.

<i>Πόλη</i>	<i>Νέα Υόρκη</i>	
<i>Γεωγραφικό πλάτος</i>	40° 43''	
<i>Γεωγραφικό μήκος</i>	286'	
<i>Χαρακτηριστικά βροχής</i>	$R_m=0,0002$	$S_r=2,5819$
	$v_r=0,0007$	$b_r=0,1040$
	$w_r=6,8334$	$m_r=0,1773$
<i>Μοντέλο Μουρφουμα</i>	$a_r=0,0099$	$b_r=1,1407$



Σχήμα Κ.12: Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Μουρφουμα μοντέλο για τη Νέα Υόρκη.

K.3 Παλαιότερο Μοντέλο Κλιματικών Ζωνών

Για την σχεδίαση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz, η σημειακή ένταση βροχόπτωσης αποτελεί το πιο σημαντικό μετρήσιμο μέγεθος. Όπως αναπτύχθηκε και στο δεύτερο κεφάλαιο, θεωρητικές και πειραματικές εργασίες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ειδική απόσβεση (απόσβεση ανά μονάδα μήκους) εξαρτάται από την σημειακή ένταση βροχόπτωσης, από τη δομή του μέσου βροχής, καθώς και από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (πόλωση και συχνότητα) του μεταδιδόμενου σήματος. Για πρακτικές εφαρμογές όλα αυτά συνοψίζονται σε μια απλή εκθετική σχέση, υποθέτοντας σιωπηρά ότι η δομή του μέσου βροχής είναι ανεξάρτητη από την γεωγραφική περιοχή. Η γνώση της κατανομής του σχήματος των σταγόνων, που αναφέρεται σε μια συγκεκριμένη ένταση βροχόπτωσης, έχει πολύ μεγάλη σημασία στον υπολογισμό της απόσβεσης και αποπόλωσης ενός μικροκυματικού σήματος. Αυτή η κατανομή μεταβάλλεται σύμφωνα με την θερμοκρασία του ανέμου, τον δείκτη διάθλασης, την οριακή ταχύτητα πτώσεως της σταγόνας καθώς και από άλλες φυσικές παραμέτρους.

Η σημειακή ένταση βροχόπτωσης αποτελεί ένα μέγεθος το οποίο μεταβάλλεται τόσο χρονικά όσο και χωρικά. Λόγω της χρονικής μεταβολής η οποία συνεπάγεται και την χρονική μεταβολή της απόσβεσης η μοντελοποίηση των προβλημάτων της βροχής βασίζεται στην θεωρία στοχαστικών ανελιξέων. Σημαντική παράμετρος στην πρόβλεψη της πιθανότητας υπέρβασης της απόσβεσης αποτελεί η στατιστική κατανομή μακράς διάρκειας (long term statistics) της σημειακής έντασης βροχόπτωσης καθώς και οι δυναμικές ιδιότητες αυτής (dynamic properties). Έχουν γίνει και εξακολουθούν να γίνονται μεγάλα πειράματα διάδοσης σε δορυφορικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα που λειτουργούν σε συχνότητες πάνω από 10GHz σε Ευρώπη, Αμερική και Ιαπωνία με σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό των ιδιοτήτων της απόσβεσης που εισάγεται λόγω βροχής από δεδομένα του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης.

Για τον ακριβή προσδιορισμό της συγκεκριμένης κατανομής απαιτούνται μετρήσεις μεγάλου χρονικού διαστήματος. Σε περιπτώσεις που δεν υπάρχουν επαρκή πειραματικά δεδομένα, ο διεθνής τηλεπικοινωνιακός οργανισμός ITU-R, έχει προτείνει 14 διαφορετικές κλιματικές ζώνες ανά τον κόσμο, όπου σε κάθε μια

παρουσιάζεται η αθροιστική κατανομή υπέρβασης της σημειακής έντασης βροχόπτωσης για διάφορα ποσοστά του χρόνου. Πρόσφατα, η ITU-R, με μια καινούρια σύσταση πρότεινε τους χάρτες βροχής (rainmaps), στους οποίους έχει χωριστεί η Γη σε τετραγωνάκια με εμβαδόν $1.5^\circ \times 1.5^\circ$. Για κάθε ένα από αυτά τα σημεία έχουμε τιμές για κάποιες παραμέτρους της κατανομής βροχόπτωσης οι οποίες υπάρχουν παραχθεί από 15 χρόνια δεδομένων του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μέσης Κλίμακας Πρόγνωσης Καιρικών Συνθηκών (European Center of Medium-range Weather Forecast, ECMWF).

Σύμφωνα λοιπόν με αυτήν την πρόσφατη εξέλιξη στο θέμα του προσδιορισμού της τιμής έντασης βροχόπτωσης R_p , δοθείσας της πιθανότητας υπέρβασής της p , μέσω της έκδοσης της σύστασης P.837-3 από πλευράς ITU-R, η ITU-R αναβάθμισε τα δεδομένα που προσφέρει για τη σημειακή ένταση βροχόπτωσης προσαρμόζοντάς τα στον έντονα τοπικό χαρακτήρα που εμφανίζει το μέγεθος αυτό. Της κίνησης αυτής είχε προηγηθεί η διαπίστωση ότι ακόμα και σε περιοχές στο εσωτερικό της ίδιας κλιματικής ζώνης η βροχόπτωση παρουσιάζει συχνά μεγάλες διαφορές και ότι μία εμπλουτισμένη τράπεζα δεδομένων ήταν πλέον απαραίτητη. Έτσι, σύμφωνα με τη σύσταση P.837-3 προτείνεται η χρήση από τους σχεδιαστές μηχανικούς των χαρτών βροχής (rainmaps), στους οποίους τα στατιστικά δεδομένα εξειδικεύονται ανάλογα με το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της περιοχής σε βήματα των 1.5° . Καλύπτονται περιοχές με γεωγραφικό πλάτος (latitude) από $+90^\circ$ Βόρεια έως -90° Νότια και γεωγραφικό μήκος (longitude) από 0° μέχρι 360° , δηλαδή καλύπτεται η γήινη επιφάνεια στο σύνολό της. Σε όλη την έκταση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ακολουθείται αποκλειστικά η σύσταση P.837-3 για την ένταση βροχόπτωσης R . Παρόλα αυτά για ιστορικούς λόγους, για λόγους πληρότητας της διπλωματικής αλλά και ως γενικότερο μέτρο σύγκρισης (figure of merit), στη συνέχεια θα γίνει αναφορά και στο μοντέλο των κλιματικών ζωνών που χρησιμοποιούνταν έως τώρα.

Ακολουθεί στη συνέχεια με συνοπτικό τρόπο η παράθεση των απαραίτητων βημάτων για την εύρεση της R_p

- Σε πρώτη φάση, ανασύρονται από τα αρχεία δεδομένων ESARAINPR6.TXT, ESARAIIN_MC.TXT και ESARAIN_MS.TXT η πιθανότητα υπέρβασης εξάωρων βρόχινων περιόδων $P_{r6}(\%)$, το ετήσιο ποσό βροχόπτωσης τύπου συνεκτικών βροχοπυρήνων $M_C(mm)$ και το ετήσιο ποσό βροχόπτωσης

στρωσιγενούς τύπου $M_S(mm)$ αντίστοιχα, για τα τέσσερα κοντινότερα σημεία της υπόψη τοποθεσίας για τα οποία υφίστανται δεδομένα. Τα προαναφερθέντα αρχεία διατίθενται από την Ευρωπαϊκή Διαστημική Ένωση (European Space Agency, ESA).

- Από τα τέσσερα αυτά σημεία, πραγματοποιώντας διγραμμική παρεμβολή, φθάνει κανείς στις ακριβείς τιμές των $P_{r_0}(Lat, Lon)$, $M_C(Lat, Lon)$, $M_S(Lat, Lon)$ για τη συγκεκριμένη τοποθεσία.

- Στη συνέχεια εξαγάγεται η πιθανότητα βροχής από τη σχέση

$$P_o(Lat, Lon) = P_{r_0}(Lat, Lon) \cdot [1 - \exp(-0,0117(M_S(Lat, Lon)/P_{r_0}(Lat, Lon)))] \quad (K.22)$$

Εφόσον το αποτέλεσμα της (K.22) δεν είναι προσδιορισμένο, η πιθανότητα P_o ισοδυναμεί με το μηδέν και η διαδικασία ολοκληρώνεται.

- Στο τελευταίο βήμα του αλγορίθμου υπολογίζεται ο ρυθμός βροχόπτωσης R_p που υπερβαίνεται για ποσοστό $p\%$, μέσω του επόμενου τύπου

$$R_p(Lat, Lon) = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (K.23)$$

όπου

$$A = a \cdot b \quad (K.24)$$

$$B = a + c \cdot \ln(p / P_o(Lat, Lon)) \quad (K.25)$$

$$C = \ln(p / P_o(Lat, Lon)) \quad (K.26)$$

και

$$a = 1,11 \quad (K.27)$$

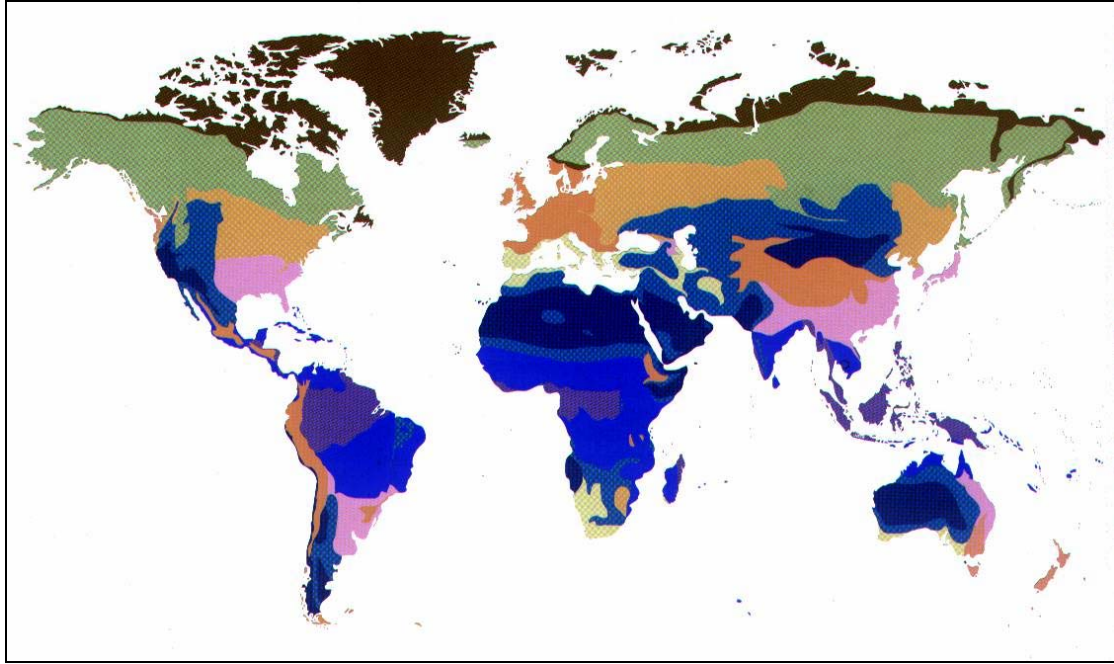
$$b = \frac{(M_C(Lat, Lon) + M_S(Lat, Lon))}{22932 \cdot P_o} \quad (K.28)$$

$$c = 31,5 \cdot b \quad (K.29)$$

Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι γνωρίζοντας μόνο το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της τοποθεσίας μπορεί κανείς να υπολογίσει με απλό τρόπο το ρυθμό βροχόπτωσης R_p για οποιοδήποτε ποσοστό του χρόνου p .

Πριν τους χάρτες βροχής πως γίνονταν η εγκατάσταση δορυφορικών δικτύων; Πριν την έκδοση της σύστασης P.837-3 από πλευράς ITU-R, η ITU-R δεν είχε στη διάθεση της μια τράπεζα δεδομένων που να μπορεί να προσφέρει τη σημειακή ένταση βροχόπτωσης προσαρμόζοντάς τη στον έντονα τοπικό χαρακτήρα που εμφανίζει το μέγεθος αυτό. Έτσι λοιπόν τα περασμένα χρόνια, η ανάγκη για ταχεία εγκατάσταση

δορυφορικών δικτύων δεν έδινε στο σχεδιαστή την πολυτέλεια να πραγματοποιήσει μία χρονοβόρα διαδικασία μετρήσεων. Ένας ακόμη περιοριστικός παράγοντας για τη διεξαγωγή πειραμάτων ήταν το οικονομικό κόστος που συνόδευε την κίνηση αυτή. Προς τούτο, ο διεθνής τηλεπικοινωνιακός οργανισμός CCIR (International Radio Consultative Committee), που υπάγεται στην ITU-R, είχε προτείνει τη μέθοδο των κλιματικών ζωνών. Με βάση τις κλιματικές ζώνες, η υφήλιος χωρίζεται σε 15 περιοχές (A, B, C, D, E, F, G, H, J, K, L, M, N, P, Q) μεγάλης έκτασης εντός των οποίων η βροχόπτωση εμφανίζει όμοια στατιστική συμπεριφορά. Οι κλιματικές ζώνες, ως μέθοδος υπολογισμού των στατιστικών μέσων όρων της έντασης βροχόπτωσης, θεωρούνται λιγότερο αξιόπιστες από τους χάρτες βροχής, καθώς δεν λαμβάνουν υπόψη τον τοπικό χαρακτήρα του μεγέθους καθώς και τις μεταβολές στο κλίμα που έχουν συντελεστεί τα τελευταία χρόνια. Χωρίζοντας την υφήλιο σε 15 διαφορετικές κλιματικές ζώνες (A, B, C, D, E, F, G, H, J, K, L, M, N, P, Q), έκανε διαθέσιμη για καθεμία από τις ζώνες αυτές την (αθροιστική) κατανομή υπέρβασης $P(R \geq r)$ μίας στάθμης r έντασης βροχόπτωσης για διάφορα ποσοστά του χρόνου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι με βάση το χωρισμό αυτό οι μεσογειακές περιοχές ανήκουν στις K, L κλιματικές ζώνες, η Βόρεια Ευρώπη στις F, H ζώνες, η Ιαπωνία στη M ζώνη, οι υποτροπικές περιοχές στις M και N ζώνες, ενώ οι τροπικές περιοχές της Κεντρικής Αφρικής και Νότιας Αμερικής στις P, Q ζώνες (σχήμα K.13).



Σχήμα Κ.13: Γεωγραφική κατανομή των διαφόρων κλιματικών ζωνών.

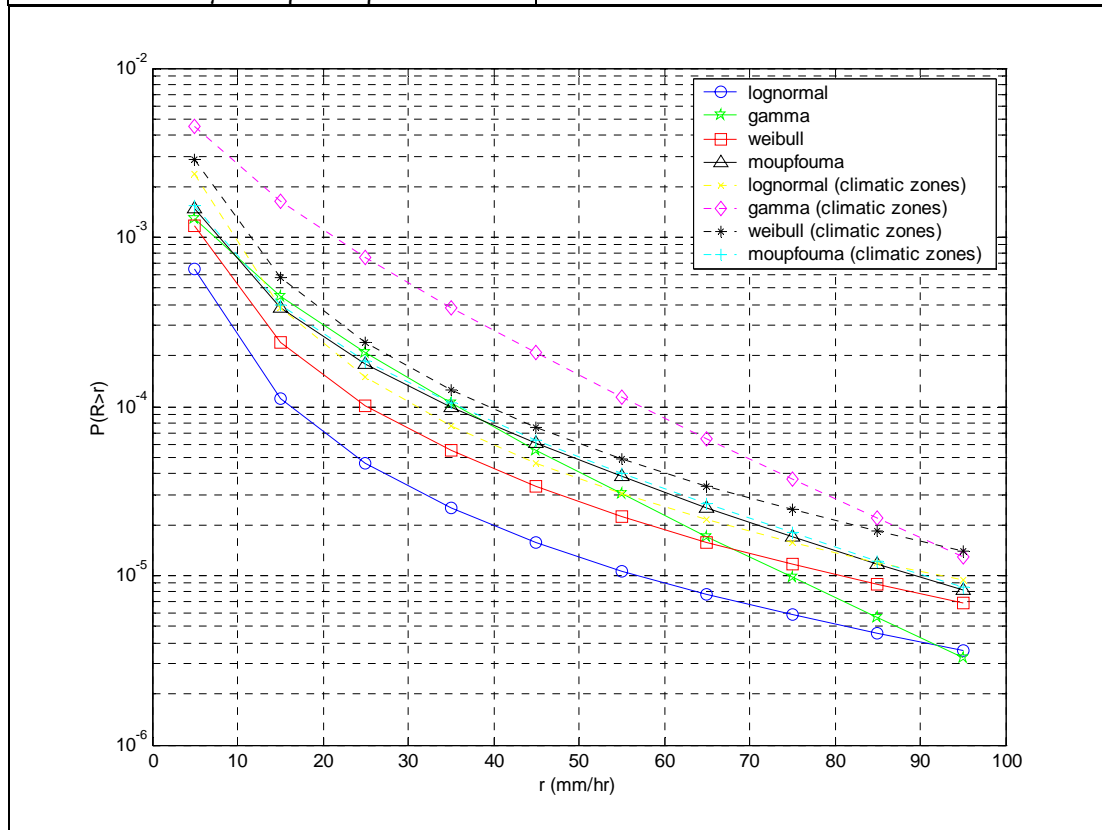
Αν και οι κλιματικές ζώνες θεωρούνται λιγότερο αξιόπιστες από τους χάρτες βροχής, εντούτοις, χρησιμοποιούνται ακόμα σε διάφορες υλοποιήσεις μοντέλων πρόβλεψης ως γενικότερο μέτρο σύγκρισης (figure of merit). Ακολουθεί ο πίνακας Κ.1 που περιέχει τις στατιστικές παραμέτρους της λογαριθμοκανονικής, της γάμμα και Weibull κατανομής της έντασης R που τις χαρακτηρίζουν. (Για το βελτιωμένο Μουρφουμα ο υπολογισμός των παραμέτρων βροχόπτωσης προκύπτει εύκολα με βάση τις παραμέτρους της λογαριθμοκανονικής κατανομής).

Κλιματική Ζώνη	R_m	S_r	ν_r	b_r	w_r	m_r
A	2,1830E-03	2,096000	2,7000E-03	0,183000	6,313513	0,189189
B	1,5650E-02	1,694000	4,1490E-03	0,137000	5,282945	0,224703
C	2,0460E-02	1,712000	4,5000E-03	0,105900	4,779630	0,237038
D	6,9270E-02	1,467000	8,7000E-03	0,119700	3,673779	0,307864
E	8,4000E-03	2,040000	3,1000E-03	0,059170	4,937243	0,199702
F	2,7200E-02	1,810000	4,6000E-03	0,057300	4,201613	0,231756
G	6,8400E-02	1,596000	8,3000E-03	0,076700	3,264800	0,303240
H	2,8490E-02	1,825000	5,6000E-03	0,053122	4,051890	0,236485
K	1,6740E-02	2,020000	3,9500E-03	0,043460	4,113048	0,219654
L	1,7630E-02	2,113500	3,8000E-03	0,028760	3,844756	0,215730
M	4,9650E-02	1,867755	6,6000E-03	0,039900	2,974024	0,277189
N	4,3900E-02	2,018000	5,9000E-03	0,026060	2,748910	0,269432
P	8,1330E-02	2,000500	9,2000E-03	0,020315	1,831243	0,328027
Q	1,3415E-01	1,856800	3,7400E-02	0,037387	1,131486	0,439870

Πίνακας Κ.1: Ο κατά ITU-R διαχωρισμός της γης σε κλιματικές ζώνες, καθώς και οι αντίστοιχοι παράμετροι της λογαριθμοκανονικής, γάμμα και Weibull κατανομής της έντασης R που τις χαρακτηρίζουν.

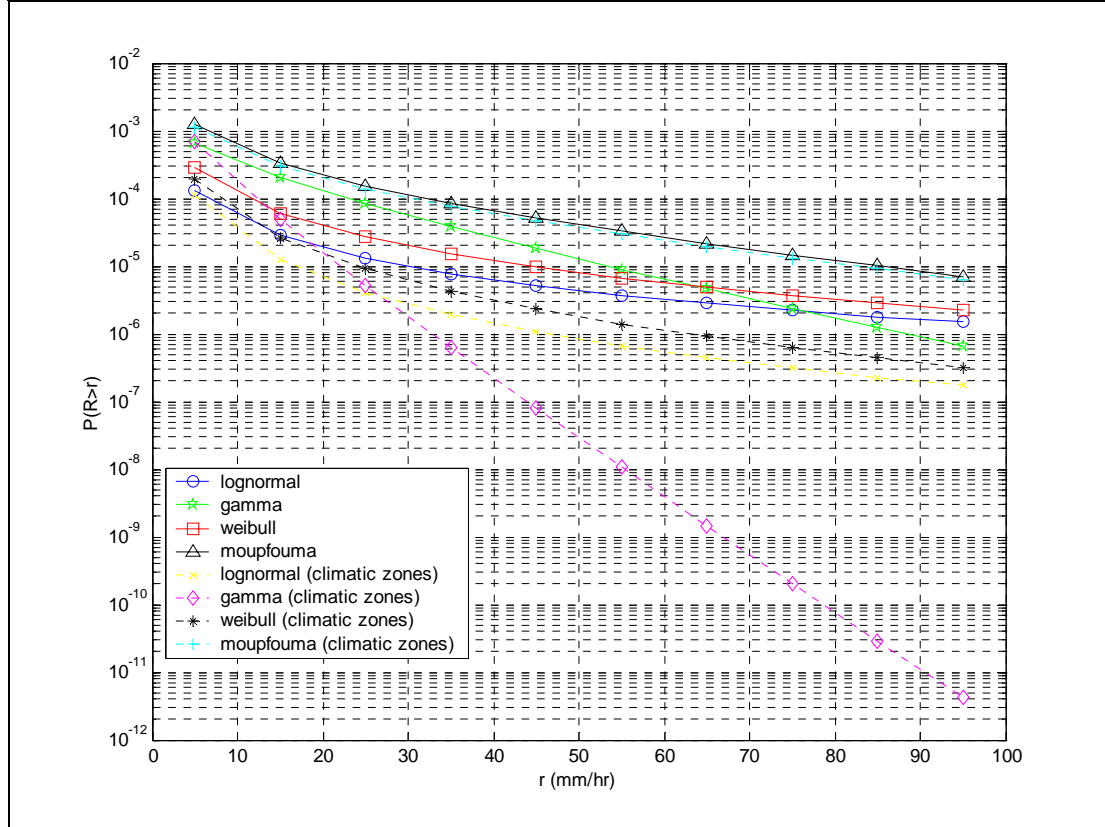
Με βάση την ανάλυση τόσο των κλιματικών ζωνών όσο και των χαρτών βροχής, για τη μελέτη των βροχοπτώσεων, παρουσιάζονται όπως προκύπτουν τα παρακάτω σχήματα

<i>Πόλη</i>	<i>Αθήνα</i>	
<i>Γεωγραφικό πλάτος</i>	37' 58''	
<i>Γεωγραφικό μήκος</i>	23' 43''	
<i>Χαρακτηριστικά βροχής (Rainmaps)</i>	$R_m=0,0028$	$S_r=2,3197$
	$v_r=0,0011$	$b_r=0,0444$
	$w_r=4,9462$	$m_r=0,1927$
<i>Μοντέλο Μουρφουμα</i>	$a_r=0,0136$	$b_r=1,6244$
<i>Κλιματική Ζώνη</i>	Κ	



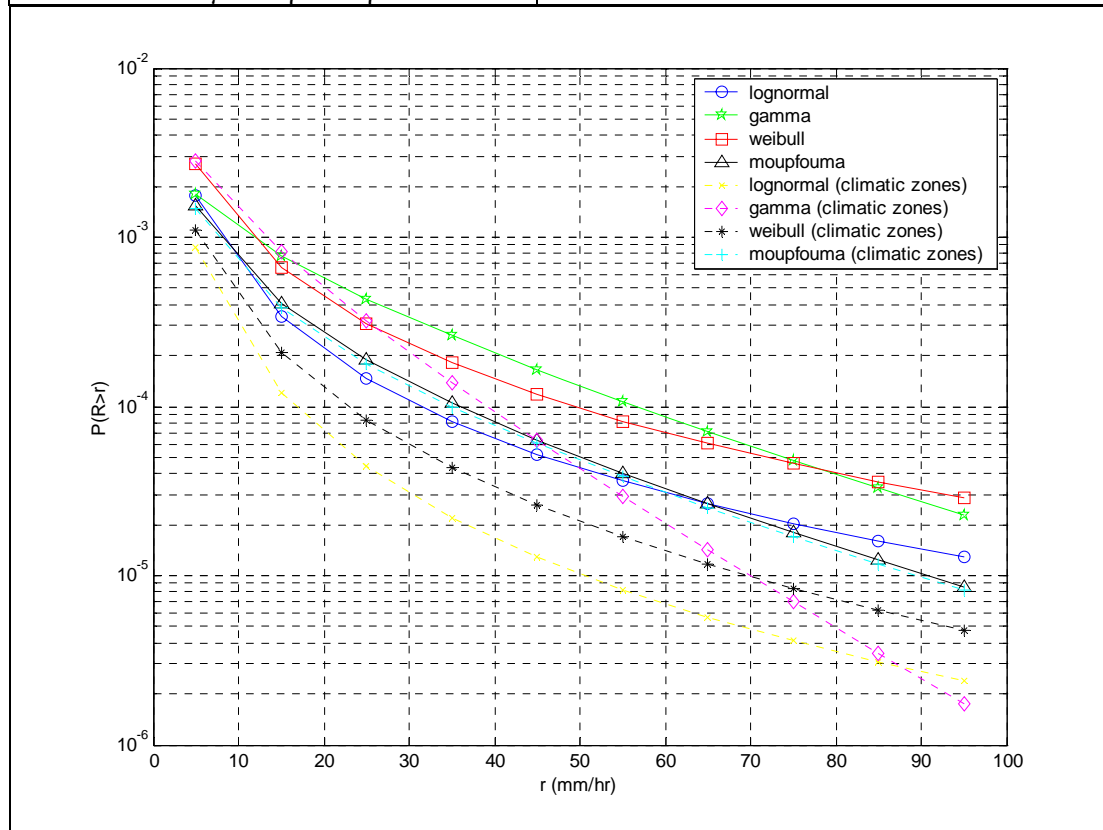
Σχήμα Κ.14: Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R (mm/hr) για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Μουρφουμα μοντέλο με χάρτες βροχής και κλιματικές ζώνες για την Αθήνα.

Πόλη	Ντουμπάι	
Γεωγραφικό πλάτος	25' 18''	
Γεωγραφικό μήκος	55' 18''	
Χαρακτηριστικά βροχής (Rainmaps)	$R_m=0,0001$	$S_r=2,8666$
	$v_r=0,0007$	$b_r=0,0537$
	$w_r=6,3469$	$m_r=0,1572$
Μοντέλο Moupfouma	$a_r=0,0205$	$b_r=2,8373$
Κλιματική Ζώνη	Α	



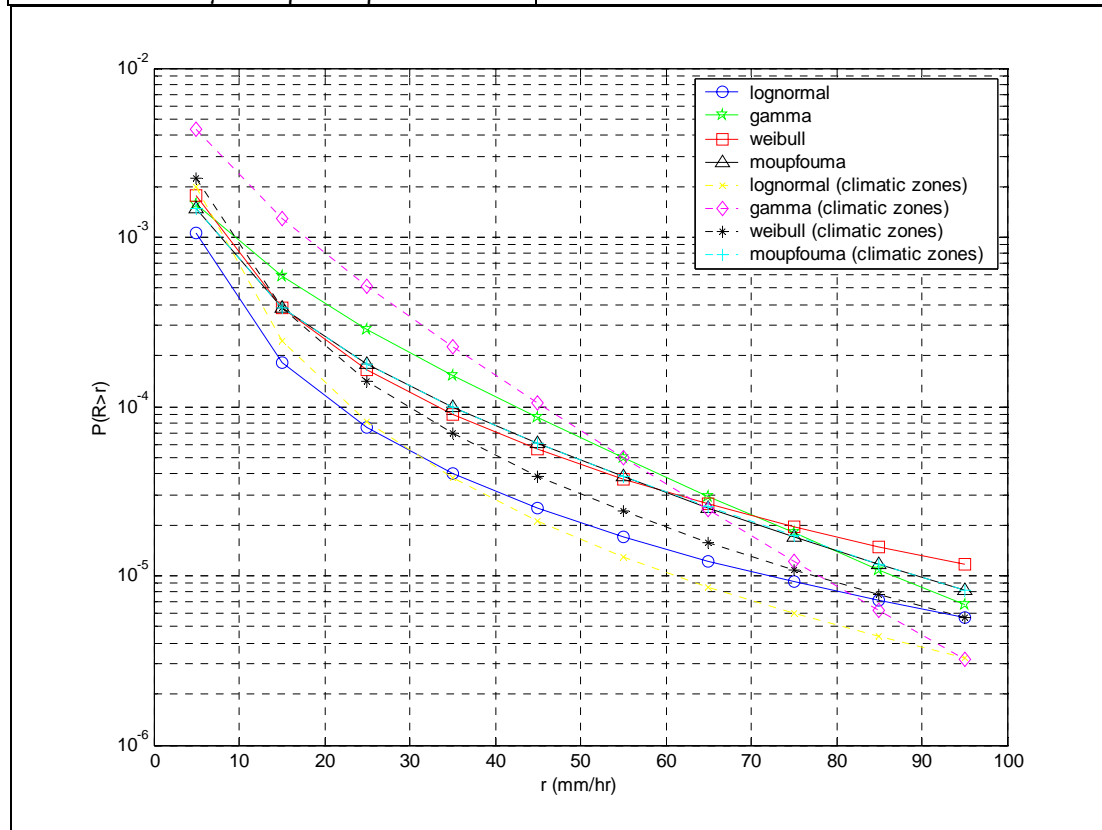
Σχήμα Κ.15: Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R (mm/hr) για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Moupfouma μοντέλο με χάρτες βροχής και κλιματικές ζώνες για το Ντουμπάι.

Πόλη	Γιοχάνεσμπουργκ	
Γεωγραφικό πλάτος	26° 15'' S	
Γεωγραφικό μήκος	28'	
Χαρακτηριστικά βροχής (Rainmaps)	$R_m=0,0065$	$S_r=2,2772$
	$v_r=0,0012$	$b_r=0,0285$
	$w_r=4,3353$	$m_r=0,1933$
Μοντέλο Mourofouma	$a_r=0,0097$	$b_r=1,1030$
Κλιματική Ζώνη	E	

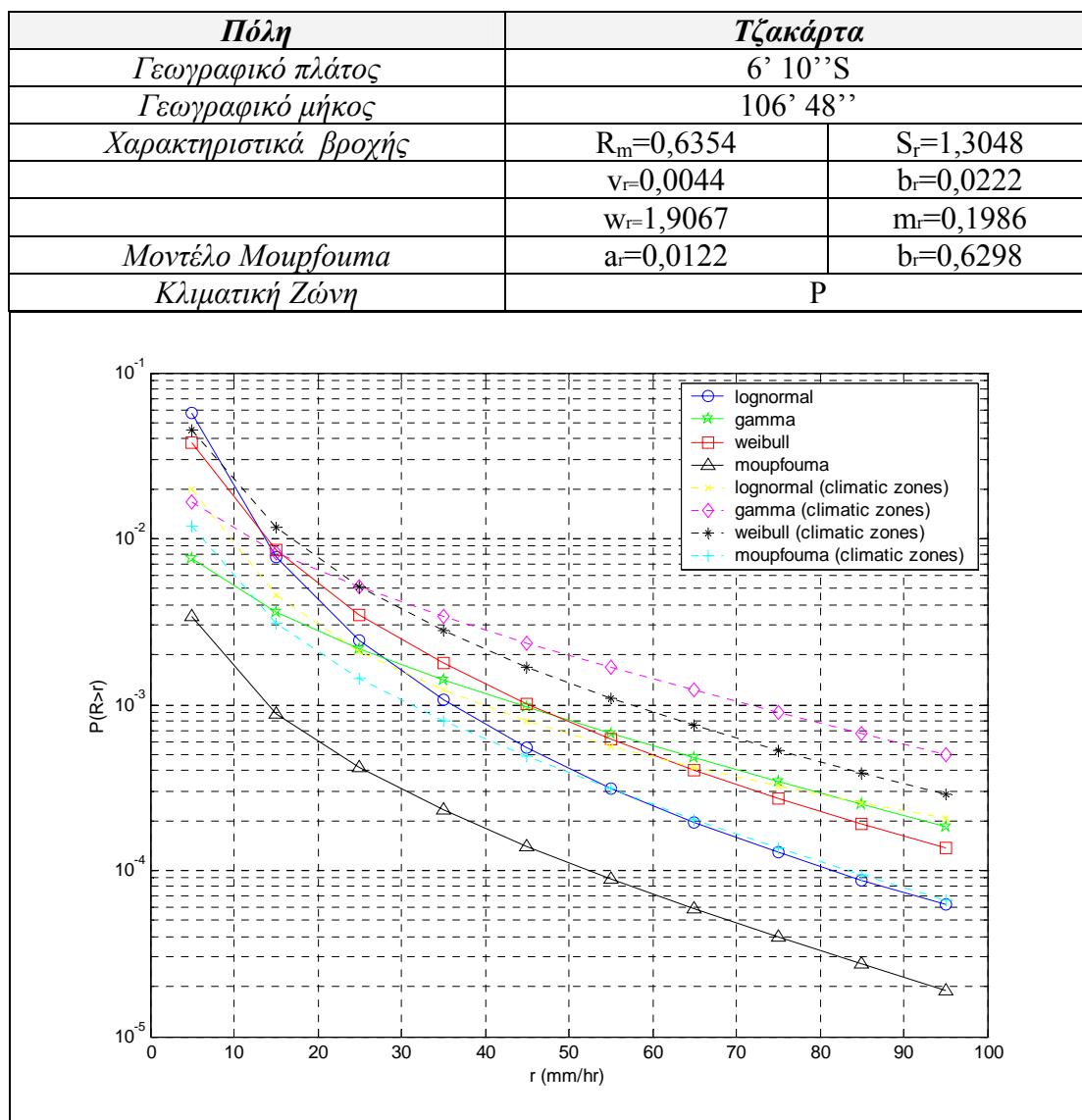


Σχήμα Κ.16: Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R (mm/hr) για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Mourofouma μοντέλο με χάρτες βροχής και κλιματικές ζώνες για το Γιοχάνεσμπουργκ.

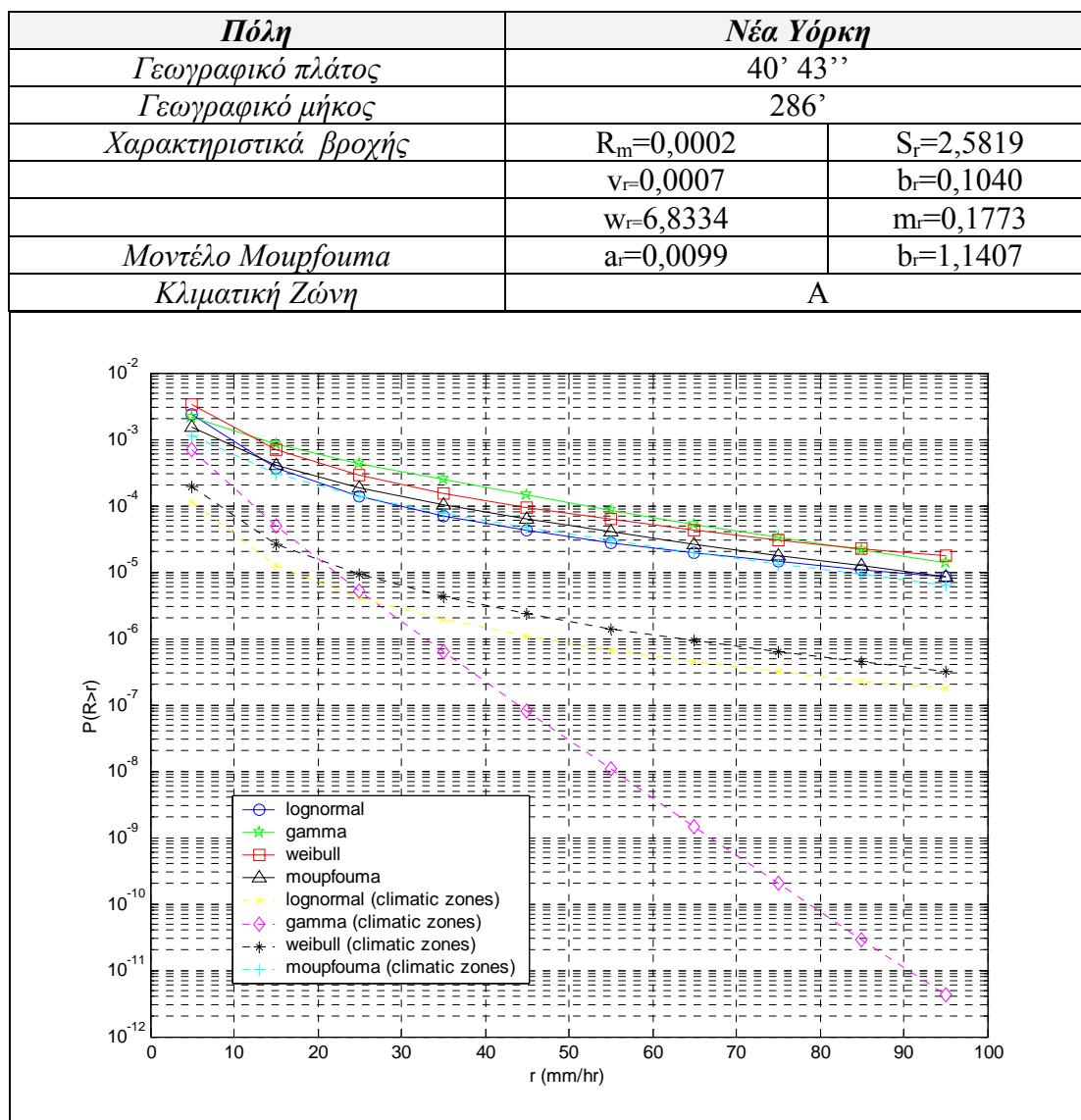
<i>Πόλη</i>	<i>Μονακό</i>	
<i>Γεωγραφικό πλάτος</i>	43' 42''	
<i>Γεωγραφικό μήκος</i>	7' 23''	
<i>Χαρακτηριστικά βροχής (Rainmaps)</i>	$R_m=0,0051$	$S_r=2,2385$
	$v_r=0,0013$	$b_r=0,0391$
	$w_r=4,6000$	$m_r=0,1986$
<i>Μοντέλο Mourofouma</i>	$a_r=0,0012$	$b_r=1,3804$
<i>Κλιματική Ζώνη</i>	F	



Σχήμα Κ.17: Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R (mm/hr) για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Mourofouma μοντέλο με χάρτες βροχής και κλιματικές ζώνες για το Μονακό.



Σχήμα Κ.18: Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Μουρφουμα μοντέλο με χάρτες βροχής και κλιματικές ζώνες για τη Τζακάρτα.



Σχήμα Κ.19: Καμπύλες κατανομής υπέρβασης του R για το λογαριθμοκανονικό, γάμμα, Weibull και Μουρφουμα μοντέλο με χάρτες βροχής και κλιματικές ζώνες για τη Νέα Υόρκη.

Σε καθέναν από τους ανωτέρω τρόπους απόκτησης δεδομένων βροχόπτωσης (μέθοδος μετρήσεων, μέθοδος κλιματικών ζωνών και μέθοδος χαρτών βροχής), αριθμητικές τιμές της έντασης βροχόπτωσης αντιστοιχίζονται σε ποσοστά χρόνου υπέρβασης της τιμής αυτής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ωστόσο, εξυπηρετεί η κατανομή υπέρβασης της έντασης βροχόπτωσης να λαμβάνει συγκεκριμένη μαθηματική μορφή. Έχει παρατηρηθεί ότι για τα κλιματικά χαρακτηριστικά της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής η λογαριθμοκανονική κατανομή είναι εκείνη που προσεγγίζει με μεγαλύτερη επιτυχία τα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ σε περιοχές

υποτροπικών και τροπικών κλιμάτων (Νότια Αμερική, Ιαπωνία, Αφρική) ενδείκνυται η κατανομή γάμμα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



**ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ
ΣΤΟΙΧΕΙΑ**

Λ.1 Γενικά

Παρακάτω παρατίθενται συνοπτικά οι βασικές συναρτήσεις που επιτρέπουν τον υπολογισμό της παρούσας τιμής (P) μιας επένδυσης, της μελλοντικής τιμής (F) μετά από n περιόδους με συγκεκριμένο επιτόκιο αγοράς (i) καθώς και την αξία της πληρωμής (σειρά πληρωμών) (R) σε κάθε περίοδο προκειμένου να γίνει απόσβεση μέσα σε n περιόδους. Ένας από τους πιο απλούς τρόπους για να υπολογίσει κάποιος την αξία μιας επένδυσης τη διάρκεια κάποιου χρονικού διαστήματος είναι να καθορίσει τα αρχικά και τα αναμενόμενα κόστη καθώς και τα κέρδη για κάποιο χρονικό διάστημα στο μέλλον και να υπολογίσει με τις παρακάτω σχέσεις την παρούσα αξία των ποσών αυτών με δεδομένο το επιτόκιο. Στον πίνακα Λ.1 εμφανίζονται οι απαραίτητες οικονομικές συναρτήσεις.

Τελική αξία αρχικού κεφαλαίου	Δεδομένο P υπολογίζεται F	$F = P(1 + i)^n$
Παρούσα αξία κεφαλαίου	Δεδομένο F υπολογίζεται P	$P = F \left[\frac{1}{(1 + i)^n} \right]$
Τελική αξία σειράς πληρωμών	Δεδομένο A υπολογίζεται F	$F = A \left[\frac{(1 + i)^n - 1}{i} \right]$
Αξία πληρωμής	Δεδομένο F υπολογίζεται A	$A = F \left[\frac{i}{(1 + i)^n - 1} \right]$
Παρούσα αξία σειράς πληρωμών	Δεδομένο A υπολογίζεται P	$P = A \left[\frac{(1 + i)^n - 1}{i(1 + i)^n} \right]$
Αξία πληρωμής ανάκτησης κεφαλαίου	Δεδομένο P υπολογίζεται A	$A = P \left[\frac{i(1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \right]$

Πίνακας Α.1: Οι οικονομικές συναρτήσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ΚΩΤΤΗΣ Π. και ΚΑΨΑΛΗΣ Χ., [2003], “Δορυφορικές Επικοινωνίες”, Εκδόσεις Τζιόλα.
- [2] ELBERT B.R., [1997], “*The Satellite Communication Applications Handbook*”, Artech House, Boston.
- [3] ELBERT B.R., [1987], “*Introduction to Satellite Communications*”, Artech House, Norwood.
- [4] RICHHARIA M., [1999], “*Satellite Communication Systems*”, 2nd edition, Macmillan Press LTD
- [5] MARCARIO R.C.V., [1991], “*Personal and Mobile Radio Systems*”, Peter Perigrims, London.
- [6] ELBERT B.R., [1992], “*Networking Strategies for Information Technology*”, Artech House, Norwood.
- [7] ELBERT B.R. and B. MARTYNA, [1994], “*Client/Server Computing-Architecture, Applications, and Distributed Systems Management*”, Artech House, Norwood.
- [8] ΑΡΑΠΟΓΛΟΥ Π.Μ., [2003], “Σύγκριση Τεχνικών Διαφορικής Λήψης για την Άμβλυνση των Διαλείψεων λόγω Βροχής στις Δορυφορικές Τηλεπικοινωνίες”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, Αθήνα.
- [9] ΑΝΑΣΤΑΣΟΠΟΥΛΟΣ Μ., [2004], “Επίδοση δορυφορικής ζεύξης σε περιβάλλον παρεμβολών γειτονικών δορυφόρων”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, Αθήνα.
- [10] ΚΑΝΕΛΛΟΠΟΥΛΟΣ Ι.Δ., [2001], “Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων σε Γήινο Περιβάλλον”, Εκδόσεις Τζιόλα.
- [11] HALL M.P.M., [1979], *Effects of the Troposphere on Radio Communication*, IEEE Electromagnetic Waves Series 8, London and New York.
- [12] ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ Α.Δ. και ΑΡΑΠΟΓΛΟΥ Π.Μ., [2004], “*Satellite communications at Ku, Ka and V bands: Propagation impairments and mitigation techniques*”, Proc. IEEE.
- [13] CRANE R.K., [1996], “*Electromagnetic Wave Propagation through Rain*”, J.Wiley & Sons, INC, p. 265.

- [14] STUTZMAN W.L., [1993], “*The special section on Propagation Effects on Satellite Communication Links*”, IEEE Proc. Vol. 81, No. 6, p. 850-855.
- [15] GOLDHIRSH J., [1997], “*Rain-Rate Duration Statistics over a Five Year Period: A Tool for assessing slant path fade duration*”, IEEE Trans. Antennas and Propag., Vol. AP-43, No. 5, 435-439.
- [16] ITU-R, PROPAGATION - SERIES, P. 618-7 RECOMMENDATION [2001], “*Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems*”.
- [17] ITU-R, PROPAGATION - SERIES, P. 618-8 RECOMMENDATION [2003], “*Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems*”.
- [18] PAPATSORIS A.D., [1997], “*Effect of ice clouds on millimetre wave aeronautical and satellite communications*” *Electronics Letters*, Volume: 33 Issue: 21, pp.1766-1768.
- [19] ARBESSER-RASTBURG B.R. and PARABONI A., [1997], “*European research on Ka-band slant path propagation*”, Proceed. of the IEEE, Vol.85, No.6, p.843-852
- [20] PARABONI A. and C. RIVA, [1994], “*A new method for the prediction of fade duration statistics in satellite links above 10GHz*”, Int. Jour. Satell. Commun., Vol. 12, p. 387-394.
- [21] ΚΑΤΣΑΜΠΙΑΣ Β.Κ., [2003], “*Επίδοση δορυφορικής ζεύξης σε περιβάλλον παρεμβολών γειτονικών δορυφόρων*”, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, Αθήνα.
- [22] OGUCHI, T. [1977], “*Scattering properties of Pruppacher-Pitter form raindrops and cross-polarization due to rain. Calculation as 11, 13, 19.3, 34.8GHz.*”, Radio Scie., Vol. 12, No. 1, p. 41-51.
- [23] BOSTIAN C.W. and J.E. ALLNUTT, [1979], “*Ice-crystal depolarization on satellite microwave radio paths*”, Proc. IEE, Vol. 126, 951-960.
- [24] HA T.T., [1989], “*Digital Satellite Communications*”, 2nd edition, McGraw Hill, New York.
- [25] LIVIERATOS S.N. and COTTIS P.G., [2001], “*Availability and performance of single/multiple site diversity satellite systems under rain*”. Telecommun. Transm., Vol.12, No.1, p.55-65

- [26] ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ Α.Δ., [2002], “Στοχαστικά Μοντέλα Διάδοσης Η/Μ κυμάτων σε συχνότητες άνω των 10GHz με εφαρμογή στη σχεδίαση δορυφορικών συστημάτων επικοινωνίας”, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ.
- [27] MATRICCIANI E., [1987], “Orbital diversity in resource Satellite Communications Systems above 10GHz”, IEEE Jour. On Selected Areas in Commun., Vol.5, No.4, p.714-723
- [28] HODGE D. B., [1975], “An Empirical Relationship for Path Diversity Gain”, IEEE Trans. Antennas and Propag., p.250-251
- [29] HODGE D. B., [1982], “An improved model for diversity gain on earth-space propagation paths”, Radio Sci., p.1393-1399
- [30] PANAGOPOULOS A.D., P.M. ARAPOGLOU and P.G. COTTIS, [2004], “Site Versus Orbital Diversity: Performance Comparison Based on Propagation Characteristics at the Ku Band and Above” , submitted to IEEE Transactions on Antennas and Propagation.
- [31] PANAGOPOULOS A.D., J.D. KANELLOPOULOS, P.M. ARAPOGLOU and P.G. COTTIS, “Long Term Rain Attenuation Probability and Site Diversity Gain Prediction Formulas”, submitted to IEEE Transactions on Antennas and Propagation.
- [32] PANAGOPOULOS A.D. and J.D. KANELLOPOULOS, [2001b], “A Simple Model for Orbital Diversity Gain on Earth-Space Propagation Paths”, submitted to IEEE Transactions on Antennas and Propagation.
- [33] PRUPPACHER H. R. and R. L. PITTER, [1971], “A semi-empirical determination of the shape of cloud and raindrops”, Journ. Atmos. Sci., Vol . 28, p. 86-94.
- [34] PRUPPACHER H. R. and K. BEARD, [1970], “A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops semi-empirical determination of the shape of cloud and raindrops”, Journ. Atmos. Sci., Vol . 28, p. 86-94.
- [35] GUNN R., and G. D. KINZER, [1949], “The terminal velocity of fall water droplets in stagnant air”, Jour. Meteor., Vol. 6, No. 4, p. 243-248.
- [36] LAWS J.O. and D.A. PARSONS, [1943], “The relation of raindrop-size intensity”, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol.24, p. 452-460.

- [37] **MARSHAL J.S. and W.McK. PALMER [1948]**, “*The distribution of raindrops with size*”, Jour. Meteorol., Vol.5, p. 165-166.
- [38] **ULBRICH C.W., [1983]**, “*Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution*”, Jour. Climate Appl. Meteor, Vol. 22, p.1764-1775.
- [39] **AJAYI G.O. and OLSEN R.L., [1985]**, “*Modelling of raindrop size distribution for microwave and millimetre wave applications*”, Radio Sci., Vol. 20, Mar./Apr., p. 193-202.
- [40] **OLSEN R.L., D.V. ROGERS and D.B. HODGE, [1978]**, “*The aR^b relation in the calculation of rain attenuation*”, IEEE Trans. on Ant. and Prop., AP-26 (2), p.318- 329.
- [41] **UPTON S.A.J., B. G EVANS and A. R. HOLT, [1980]**, “*Variations with model parameters of earth/space attenuation derived from radiometer and radar measurements*”, paper presented at URSI Commission F Open Symposium on Effects of the Lower Atmosphere on Radio Frequencies above 10GHz, Lennoxville, Que.
- [42] **THOMPSON P. T., A. W. DISSANAYAKE and P. A. WATSON, [1980]**, “*The frequency dependence of microwave propagation through rainfall*”, AGARD Conf. Proc., 284, p. 5.1-5.9.
- [43] **STUTZMAN W.L. and W.K. DISHMAN, [1982]**, “*A simple model for the estimation of rain-induced attenuation along earth-space paths at millimeter wavelengths*”, Radio Sci., 17(6), 1465-1476.
- [44] **SWEENEY D.G. and C.W. BOSTIAN, [1992]**, “*The Dynamics of Rain-Induced Fades*”, IEEE Trans. Antennas and Propag., Vol. Ap-40, No. 3, p. 275-278.
- [45] **ITU-R, PROPAGATION - SERIES, P. 839-3 RECOMMENDATION [2001]**, “*Rain height model for prediction methods*”.
- [46] **CRANE R.K., [1980]**, “*Prediction of attenuation by rain*”, IEEE Trans. Commun., COM-28(9), p. 1717-1733.
- [47] **LIN S.H., [1975]**, “*A method for calculating rain attenuation distribution on microwave paths*”, Bell Syst. Tech. Jour. 54(6), p. 1051-1083.
- [48] **MORITA K. and I. HIGUTTI [1976]**, “*Prediction methods of rain attenuation distributions of micro and millimeter waves*”, Rev. of ECL, 24 (7-8), p. 651-668.

- [49] **NOWLAND W.L. R.L. OLSEN, and I. P. SHKAROFSKY, [1977]**, “*Theoretical Relationship between rain depolarization and attenuation*”, Electron. Letters, 13, p. 676.
- [50] **OLSEN R. L. and W. L. NOWLAND, [1978]**, “*Semi empirical relations of rain depolarization statistics: Their theoretical and experimental basis*”, paper presented at International Symposium on Antennas and Propagation, IEEE, Sendai, Japan.
- [51] **VASSEUR H., [2000]**, “*Degradation of Availability Performance in Dual-Polarized Satellite Communications Systems*”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 48 No. 3, p. 465-472.
- [52] **ITU-R, PROPAGATION - SERIES, P. 530-10 RECOMMENDATION [2003]**, “*Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*”.
- [53] **STUTZMAN W.L. and D.L. RUNYON., [1984]**, “*The Relationship of Rain-Induced Cross-Polarization Discrimination to Attenuation for 10 to 30GHz Earth-Space Radio Links*”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 32 No. 7, p. 705-710.
- [54] **KANELLOPOULOS J. and S. VENTOURAS, [1990]**, “*A unified analysis for the Multiple-Site Diversity Outage Performance of single/Dual-Polarized Communication Systems*”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 1 No. 7, P. 25-32.
- [55] **PAPOULIS A., [1991]**, “*Probability, Random Variables and Stochastic Processes*”, McGRAW HILL Inter. Edn.
- [56] **KANELLOPOULOS J.D. and S.G. KOUKOULAS, [1987]**, “*Analysis of the rain outage performance on route diversity systems*”, Radio Sci., 22, p. 549-565.
- [57] **ABRAMOVITZ M. and I. STEGUN, [1965]**, “*Handbook of Mathematical Functions*”, Dover Publications, New York.
- [58] **PRESS W.H., FLANNERY B.P., TEUKOLSKY S.A. and VETTERLING W.T., [1990]**, “*Numerical Recipes in Pascal. The Art of Scientific Computing*”, Cambridge University Press.
- [59] **ΚΑΠΛΑΝΗΣ Ν., ΚΑΡΒΕΛΗΣ Κ., ΠΕΝΤΑΡΗ Π, και ΠΡΕΒΕΖΑΣ Β., [2003]**, “*Δορυφορικά Δίκτυα VSAT για Αγροτική Τηλεφωνία*”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, Αθήνα.

[60] **ΤΑΟΥΣΑΝΗΣ Μ., [2004]**, “*Διαστασιοποίηση Δικτύου VSAT για Μεταφορά Δεδομένων στη νησιωτική περιοχή της Ελλάδας*”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, Αθήνα.

[61] **ΚΩΤΤΗΣ Π., [2003]**, “*Διαμόρφωση και Μετάδοση Σημάτων*”, Εκδόσεις Τζιόλα.