



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

**Στατιστική Κατανομή της Απόσβεσης λόγω βροχής στην Αθήνα με
χρήση πραγματικών δεδομένων ρυθμού βροχόπτωσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Σωφρονά Π. Γιώργου

Επιβλέπων: Αθανάσιος Παναγόπουλος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα , Ιούνιος 2016



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

**Στατιστική Κατανομή της Απόσβεσης λόγω βροχής στην Αθήνα με
χρήση πραγματικών δεδομένων ρυθμού βροχόπτωσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Σωφρονά Π. Γιώργου

Επιβλέπων: Αθανάσιος Παναγόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10^η Ιουνίου 2016.

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος

.....
Γεώργιος Φικιώρης

.....
Παναγιώτης Κωττής

Επίκουρος Καθηγητής
ΕΜΠ

Αναπληρωτής Καθηγητής
ΕΜΠ

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2016

.....

Σωφρονάς Π. Γιώργος

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

Copyright Σωφρονάς Π. Γιώργος, 2016

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.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή, κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο, αφενός για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση του θέματος της διπλωματικής εργασίας αφετέρου για την βοήθεια και την καθοδήγηση που μου προσέφερε.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα Μηχανικό Νίκο Λύρα, για τις πολύτιμες συμβουλές του σε όλο το διάστημα εκπόνησης της εργασίας αυτής και για την άμεση βοήθεια του όποτε και αν τη χρειάστηκα

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς και τα αδέρφια μου , για την αμέριστη αγάπη που μου δείχνουν και την απεριόριστη στήριξη σε κάθε νέο βήμα στη ζωή μου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μοντελοποίηση της εξασθένησης λόγω βροχής σε δορυφορικά συστήματα που λειτουργούν σε υψηλές ραδιοσυχνότητες μετάδοσης. Ο κορεσμός των τυπικών, για δορυφορικές υπηρεσίες, χαμηλότερων ζωνών συχνοτήτων (L,S,C) σε συνδυασμό με τις διευρυνόμενες απαιτήσεις σε όγκο μεταδιδόμενης πληροφορίας καθιστούν αναγκαία τη μελέτη διάδοσης του σήματος σε υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων. Μάλιστα, σημειώνεται ότι η βροχή αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα εξασθένησης σε συχνότητες από 10 έως τα 50 GHz.

Πιο αναλυτικά, στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή στα συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών και παρουσιάζεται η βασική δομή τους. Αναφέρονται συνοπτικά, τα κυριότερα τροποσφαιρικά φαινόμενα που επηρεάζουν την απόδοση μίας ζεύξης και παρουσιάζονται, με κατηγοριοποιημένο και περιεκτικό τρόπο, οι τεχνικές άμβλυνσης των διαλείψεων του σήματος (FMT). Επιπλέον, γίνεται μία σύντομη αναφορά στα σύγχρονα υψίσυχνα ευρυζωνικά δορυφορικά δίκτυα επικοινωνιών.

Στο Κεφάλαιο 2, εξετάζονται οι σημαντικότεροι παράγοντες εξασθένησης του δορυφορικού σήματος και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην βροχή. Παρουσιάζονται, όπως προτείνονται από την ITU-R, η διαδικασία εκτίμησης τόσο της κατανομής του ρυθμού βροχόπτωσης όσο και της κατανομής απόσβεσης λόγω βροχής. Επίσης παρουσιάζονται μοντέλα κλιμάκωσης της απόσβεσης λόγω βροχής σε διαφορετικές συχνότητες (ένα θεωρητικό και ένα εμπειρικό), για μια δεδομένη τοποθεσία και δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης.

Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται διεξοδικά η τεχνική πρόβλεψης της απόσβεσης λόγω βροχής που ονομάζεται SST (Synthetic Storm Technique - Τεχνική Συνθετικής Καταιγίδας). Μετά την παράθεση αποτελεσμάτων εφαρμογής του μοντέλου, η SST συγκρίνεται με άλλα μοντέλα πρόβλεψης. Επίσης, αναφέρονται άλλες αξιόπιστες χρήσεις του μοντέλου, όπως η πρόβλεψη της διάρκειας των διαλείψεων λόγω βροχής, η εκτίμηση του διαφορικού κέρδους χρόνου σε σχήματα διαφορικής λήψης χρόνου κ.ά.

Στο Κεφάλαιο 4, χρησιμοποιούνται πειραματικές χρονοσειρές ρυθμού βροχόπτωσης προερχόμενες από βροχόμετρο, που είναι εγκατεστημένο στην περιοχή της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου ΕΜΠ. Εφαρμόζοντας την SST με μεθοδολογία, που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab, υπολογίστηκαν οι ετήσιες, εποχιακές και ημερήσιες κατανομές απόσβεσης λόγω βροχής για 3 συχνότητες λειτουργίας μίας υποθετικής ραδιοζεύξης με τον HellasSat 2. Παράλληλα, γίνεται σύγκριση των ετήσιων κατανομών απόσβεσης της τεχνικής SST και του προτεινόμενου μοντέλου της ITU-R.

Στο Κεφάλαιο 5, γίνεται παρουσίαση και ανάλυση των πιο σημαντικών αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις του Κεφαλαίου 4 και τέλος παρουσιάζονται συνοπτικά προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Λέξεις κλειδιά

Δορυφορικές Επικοινωνίες υψηλών συχνοτήτων, Απόσβεση λόγω βροχής, χρονοσειρά έντασης βροχής, Τεχνική Συνθετικής Καταιγίδας, ITU, χρονοσειρά απόσβεσης βροχής, τεχνικές αντιμετώπισης διαλείψεων

Abstract

The scope of this Diploma thesis is the study of the impact of rain attenuation in satellite communication systems operating at high frequencies. The spectral congestion of the conventional frequency bands allocated for satellite services, namely L (1/2GHz), S (2/4GHz) and C (4/6GHz) and the increasing demand for high data rates and large bandwidth have already revealed the necessity of moving the satellite communications towards higher frequency bands. However, the use of frequency bands between 10GHz and 50GHz is limited by rain attenuation, which drastically decreases the system's availability.

The 1st Chapter presents a review of the satellite communication systems characteristics. The most important tropospheric phenomena affecting satellite communication systems at frequencies above 10GHz are summarized and various FMTs are presented in a novel and compact way. Moreover, the modern high-frequency broadband satellite communication networks are briefly introduced.

In the 2nd Chapter, the main propagation loss factors of the satellite signal are examined and emphasis is given to the rain. The methods proposed by ITU-R Recommendations, to derive the rainfall rate and the rain attenuation statistics that exceeded for a given probability of the average year and a given location are analyzed. Furthermore, the frequency scaling model is discussed and two models (one theoretical and one empirical) are presented.

In the 3rd Chapter, we develop and discuss the theory and the applications of the Synthetic Storm Technique (SST), a reliable physical-mathematical propagation tool developed for terrestrial or slant paths that can be used to generate rain attenuation time series and consequently long-term rain attenuation exceedance probability. Amongst other things, the SST model is compared to nine other well-known prediction methods with remarkable conclusions. With the SST we can also predict fade durations, rates of change of fades, the time diversity gain of a time diversity scheme etc.

In the 4th Chapter, we present annual, seasonal rainfall rate statistics derived from a 25-month data bank of 1 sample/min, measured by a rain-gauge located inside the National Technical University of Athens Campus. Afterwards, we apply SST on the measured rainfall rate time series and we represent using Matlab environment the long-term simulated annual, seasonal and diurnal rain attenuation statistics, at 12, 20 and 40GHz for a hypothetical downlink from Hellas Sat 2 to Athens. Then, we test the annual results against the statistics derived by the most recent ITU-R P.618-12.

Finally, the 5th Chapter presents the most important conclusions drawn by the simulation results in previous Chapters and topics for future research and study are recommended.

Key Words

High-frequency Satellite Communications, rain attenuation, rainfall rate time series, SST, ITU, rain attenuation time series, FMTs

Περιεχόμενα

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ.....	13
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ	13
1.1 Γενικά στοιχεία για τα δορυφορικά δίκτυα	13
1.2 Δομή βασικού δορυφορικού συστήματος	13
1.3 Προσφερόμενες Δορυφορικές Υπηρεσίες	15
1.4 Το φάσμα των δορυφορικών επικοινωνιών.....	17
1.5 Σύγχρονες προκλήσεις των δορυφορικών επικοινωνιών	18
1.5.1 Ανάγκη για υψηλότερες συχνότητες.....	18
1.5.2 Προβλήματα διάδοσης	18
1.5.3 FadeMitigationTechniques(FMTs).....	20
1.6 Ευρυζωνικά δορυφορικά δίκτυα	22
1.6.1 Γενικά στοιχεία για ψίσυχνα ευρυζωνικά δορυφορικά δίκτυα	22
1.6.2 Διαθεσιμότητα και αξιοποίηση φάσματος	24
1.7 Βιβλιογραφία	24
2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ.....	26
ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΜΕ	
ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗΝ ΒΡΟΧΗ	26
2.1 Τροποσφαιρικά φαινόμενα διάδοσης	26
2.2 Απώλειες διάδοσης	26
2.3 Απώλειες λόγω αερολυμάτων	27
2.4 Απώλειες λόγω βροχοπτώσεων και σύννεφων	27
2.4.1 Κατανομή έντασης βροχοπτώσης	27
2.4.2 Πρόβλεψη της κατανομής απόσβεσης από τον ρυθμό βροχοπτώσης	29
2.4.3 Αναγωγή της απόσβεσης σε άλλη συχνότητα	35
2.4.3.1 Δεσμευμένη κατανομή της απόσβεσης της νέας συχνότητας.....	36
2.4.3.2 Αναγωγή συχνότητας της απόσβεσης λόγω βροχής.....	38
2.4.4 Χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων	38
2.4.4.1 Μεταβλητότητα στον χώρο και στον χρόνο.....	38
2.4.4.2 Διάρκεια των διαλείψεων	38
2.4.4.3 Ρυθμός διαλείψεων	39
2.4.4.4 Συσχέτιση των στιγμιαίων τιμών της απόσβεσης σε διαφορετικές συχνότητες	39
2.5 Φαινόμενα καθαρής ατμόσφαιρας	39
2.6 Τροποσφαιρικοί σπινθηρισμοί και διαλείψεις πολυόδευσης	40
2.7 Εξασθένιση από άμμο και αμμοθύελλες	41
2.8 Συνολική απόσβεση εξαιτίας πολλαπλών πηγών ατμοσφαιρικής απόσβεσης	41
2.9 Βιβλιογραφία	42
3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ	43
ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΛΟΓΩ ΒΡΟΧΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΗΣ	
ΚΑΤΑΓΙΓΔΑΣ (SST)	43
3.1 Εισαγωγή.....	43
3.2 Μεθοδολογία της SST	43
3.2.1 Γενικά στοιχεία της SST	43
3.2.2 Κάθετη δομή και ύψος της κατακρήμνισης	44
3.2.3 Εφαρμογή της SST σε επίγειους ραδιοδιαύλους	45
3.2.4 Εφαρμογή σε κεκλιμένους ραδιοδιαύλους	46
3.3 Δοκιμή και αξιολόγηση του μοντέλου SST	49
3.3.1 Δοκιμή της SST σε διάφορες περιοχές	49
3.3.2 Σύγκριση της SST με άλλα μοντέλα πρόβλεψης	51
3.4 Λοιπές Εφαρμογές της SST	52

3.4.1 Πρόβλεψη της στατιστικής των διαλείψεων	52
3.4.2 Χρήση της SST για εκτίμηση του διαφορικού κέρδους χρόνου G(dB)	55
3.4.3 Σχέση ανάμεσα σε καθυστέρηση φάσης και απόσβεση λόγω βροχής.....	57
3.4.4 Εφαρμογή της SST στην Αθήνα	61
3.5 Βιβλιογραφία	64
4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ.....	66
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ SST ΣΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ	
ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΘΗΝΑ.....	66
4.1 Εισαγωγή.....	66
4.2 Ετήσια και εποχιακή κατανομή υπέρβασης έντασης βροχόπτωσης	67
4.3 Εφαρμογή της SST (Synthetic Storm Technique)	69
4.4 Ετήσια και εποχιακή κατανομή απόσβεσης λόγω βροχής	70
4.4.1 Ετήσια κατανομή απόσβεσης λόγω βροχής	70
4.4.1.1 SST	70
4.4.1.2 ITU-RP.618-12.....	73
4.4.1.3 Σύγκριση των 2 μεθόδων	73
4.4.2 Εποχιακή κατανομή απόσβεσης λόγω βροχής	75
4.5 Ημερήσιες κατανομές απόσβεσης λόγω βροχής και λοιπά μεγέθη	77
4.5.1 Ημερήσιες κατανομές απόσβεσης λόγω βροχής	77
4.5.2 Λοιπά ημερήσια στατιστικά μεγέθη	79
4.6 Βιβλιογραφία	86
5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ	87
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ	87
5.1 Συμπεράσματα	87
5.2 Μελλοντική έρευνα	88

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Δορυφορικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα.....	14
Σχήμα 1.2 Δορυφορικό τμήμα επικοινωνιών στην συνολική υποδομή επικοινωνιών.....	14
Σχήμα 1.3 Βασικές βαθμίδες του συστήματος δορυφορικών επικοινωνιών.....	15
Σχήμα 1.4 Δορυφορική ζεύξη που υφίσταται απώλειες [Panagopoulos,2004].....	19
Σχήμα 1.5 Βρόχος ελέγχου για την πρόβλεψη των διαλείψεων [Panagopoulos,2004].....	21
Σχήμα 2.1 Ένταση βροχής R_p , υπερβαινόμενη για $p\%$ του μέσου χρόνου για τα 3 μέρη.....	29
Σχήμα 2.2 Σχηματική παράσταση μίας δορυφορικής ζεύξης με τις παραμέτρους εισόδου για την διαδικασία πρόβλεψης της απόσβεσης [ITU-RP.618-12].....	30
Σχήμα 2.3 Οι συντελεστές k, α για $\theta=40^\circ$ και $\tau=0^\circ$ συναρτήσει της συχνότητας f στο εύρος 1-1000GHz.....	34
Σχήμα 2.4 γ_R συναρτήσει του R , για τα 3 μέρη και τις συχνότητες $f_1=20$ και $f_2=40$ GHz.....	34
Σχήμα 2.5 γ_R συναρτήσει του $p\%$, για τα 3 μέρη και τις συχνότητες $f_1=20$ και $f_2=40$ GHz.....	35
Σχήμα 3.1 Κάθετη δομή της βροχής και γεωμετρικές παράμετροι [Matricciani,1996].....	44
Σχήμα 3.2 Fucino, 11.6 GHz, προβλεπόμενες με SST για $v=4\text{m/s}$ (-); $v=6\text{m/s}$ (-.); $v=10.6\text{m/s}$ (-); $v=\infty$ (++) και πειραματική (**) [Matricciani,1996].....	50
Σχήμα 3.3 T(D) για $A_\tau=2\text{dB}$ στις L2(GeraLario), S2(Spinod'Adda) και F2(Fucino) όπου οι διακεκομμένες αναπαριστούν προβλεπόμενα αποτελέσματα και συνεχείς πειραματικά. Επίσης, απεικονίζεται το S8, δηλαδή T(D) για $A_\tau=8\text{dB}$ και Spinod'Adda. [Matricciani,1997].....	53
Σχήμα 3.4 N(D) για $A_\tau=2\text{dB}$ στις L2(GeraLario), S2(Spinod'Adda) και F2(Fucino) όπου οι διακεκομμένες αναπαριστούν προβλεπόμενα αποτελέσματα και συνεχείς πειραματικά. Επίσης, απεικονίζεται το S8, δηλαδή N(D) για $A_\tau=8\text{dB}$ και Spinod'Adda [Matricciani,1997].....	53
Σχήμα 3.5 $T_p(D)/T_m(D)$ για $A_\tau=5\text{dB}$ σε L(GeraLario), F(Fucino) και S(Spinod'Adda) [Matricciani,1997].....	54
Σχήμα 3.6 T(D), $A_\tau=5$ και 10dB , Spino όπου σύμβολο +: 6m/s , ο: 10.6m/s , x: 14m/s , *: ∞ και συνεχής καμπύλη: μετρήσεις [Matricciani,1997].....	55
Σχήμα 3.7 G(T), $f=50\text{GHz}$ για 61 διαφορετικές τιμές απόσβεσης βροχής A για το ραδιοδίαυλο Spinod'Adda-Italsat(37.7°) [Matricciani,2006].....	56
Σχήμα 3.8 Πειραματικές (συνεχής μαύρη) και προβλεπόμενες (μπλε διακεκομμένη) με SST καμπύλες του G(T) για $A=5,10,15\text{dB}$, $f=18.77\text{GHz}$ και για τον ραδιοδίαυλο Spinod'Adda (37.7°) [Matricciani,2006].....	57
Σχήμα 3.9 $\tau(t)$, για $\theta=20^\circ$ στον σταθμό Fucino την $5^{\text{η}}$ Νοεμβρίου 1980 με ώρα εκκίνησης 16:17:02 UT [Matricciani,2009].....	57
Σχήμα 3.10 P(τ) για τους 3 σταθμούς σε συχνότητες $f=10,32\text{GHz}$ και $\theta=20^\circ$ [Matricciani,2009].....	58
Σχήμα 3.11 Καθυστέρηση φάσης συναρτήσει της απόσβεσης για κοινή πιθανότητα υπέρβασης, επιλεγμένες συχνότητες και $\theta=20^\circ$ [Matricciani,2009].....	59
Σχήμα 3.12 P(τ), Spino, $\theta=20^\circ$ με τους 3 τρόπους, οο: από P(R), ++: από P(A) και συνεχής: fullSST [Matricciani,2009].....	60
Σχήμα 3.13 πυκνά διακεκομμένη: 2000, συνεχής: 2000-2001, αραιά διακεκομμένη: 2001 [Kanellopoulos,2006].....	62
Σχήμα 3.14 P(A) για καλοκαίρι: πυκνά διακεκομμένη, άνοιξη (με): -.-.-, άνοιξη (χωρίς): * * *, φθινόπωρο: συνεχής και χειμώνας: αραιά διακεκομμένη [Kanellopoulos,2006].....	63
Σχήμα 3.15 οοο: 10^{-3} και $24\text{-hA}=1.11\text{dB}$, ***: 10^{-4} και $24\text{-hA}=2.97\text{dB}$ και +++: 10^{-5} και $24\text{-hA}=7.21\text{dB}$ [Kanellopoulos,2006].....	64
Σχήμα 4.1 Το βροχόμετρο των μετρήσεων μας ARG100.....	66
Σχήμα 4.2 Ετήσιες κατανομές υπέρβασης της έντασης βροχόπτωσης και ετήσια κατανομή βάσει της ITU-RP.837.....	68
Σχήμα 4.3 Εποχιακές κατανομές υπέρβασης της έντασης βροχόπτωσης για 2 έτη.....	69
Σχήμα 4.4 Ετήσιες κατανομές υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης για $f_1=12\text{GHz}$	71
Σχήμα 4.5 Ετήσιες κατανομές υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης για $f_2=20\text{GHz}$	72
Σχήμα 4.6 Ετήσιες κατανομές υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης για $f_3=40\text{GHz}$	72
Σχήμα 4.7 Ετήσιες κατανομές υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης για 12,20 και 40GHz με βάση τις ITU-RP.618 και ITU-RP.837.....	73
Σχήμα 4.8 Σύγκριση των ετήσιων κατανομών απόσβεσης για τις 3 συχνότητες 12,20 και 40 GHz μεταξύ των μεθοδολογιών SST και ITU-RP.618.....	74
Σχήμα 4.9 Εποχιακές κατανομές υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης για $f_1=12\text{GHz}$	75

Σχήμα 4.10 Εποχιακές κατανομές υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης για $f_2=20\text{GHz}$	76
Σχήμα 4.11 Εποχιακές κατανομές υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης για $f_3=40\text{GHz}$	76
Σχήμα 4.12 Ημερήσιες 2h και 24h πιθανοτικές κατανομές υπέρβασης απόσβεσης λόγω βροχής για $f_1=12\text{GHz}$	77
Σχήμα 4.13 Ημερήσιες 2h και 24h πιθανοτικές κατανομές υπέρβασης απόσβεσης λόγω βροχής για $f_2=20\text{GHz}$	78
Σχήμα 4.14 Ημερήσιες 2h και 24h πιθανοτικές κατανομές υπέρβασης απόσβεσης λόγω βροχής για $f_3=40\text{GHz}$	78
Σχήμα 4.15 Πιθανοτικός λόγος κατά την διάρκεια μιας ημέρας για αποσβέσεις υπέρβασης $A_1=3\text{dB}$ και $A_2=6\text{dB}$ και συχνότητα $f_1=12\text{GHz}$	80
Σχήμα 4.16 Πιθανοτικός λόγος κατά την διάρκεια μιας ημέρας για αποσβέσεις υπέρβασης $A_1=3\text{dB}$ και $A_2=6\text{dB}$ και συχνότητα $f_2=20\text{GHz}$	81
Σχήμα 4.17 Πιθανοτικός λόγος κατά την διάρκεια μιας ημέρας για αποσβέσεις υπέρβασης $A_1=3\text{dB}$ και $A_2=6\text{dB}$ και συχνότητα $f_3=40\text{GHz}$	81
Σχήμα 4.18 Απόσβεση λόγω βροχής κατά την διάρκεια μίας ημέρας(σε 2-ηχορικά διαστήματα) για 3 πιθανότητες διακοπής $10^{-3}, 10^{-4}$ και 10^{-5} και συχνότητα $f_1=12\text{GHz}$	83
Σχήμα 4.19 Απόσβεση λόγω βροχής κατά την διάρκεια μίας ημέρας(σε 2-ηχορικά διαστήματα) για 3 πιθανότητες διακοπής $10^{-3}, 10^{-4}$ και 10^{-5} και συχνότητα $f_2=20\text{GHz}$	84
Σχήμα 4.20 Απόσβεση λόγω βροχής κατά την διάρκεια μίας ημέρας(σε 2-h χρορικά διαστήματα) για 3 πιθανότητες διακοπής $10^{-3}, 10^{-4}$ και 10^{-5} και συχνότητα $f_3=40\text{GHz}$	85

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 Ζώνες συχνοτήτων	18
Πίνακας 2.1 Σταθερές για το k_H (Table1,ITU-RP.838-3)	32
Πίνακας 2.2 Σταθερές για το k_V (Table2,ITU-RP.838-3)	33
Πίνακας 2.3 Σταθερές για το α_H (Table3,ITU-RP.838-3)	33
Πίνακας 2.4 Σταθερές για το α_V (Table4,ITU-RP.838-3)	33
Πίνακας 3.1 Ποικίλα στοιχεία των 3 ιταλικών επίγειων διαστημικών σταθμών για το 11.6 GHz πρόγραμμα διάδοσης SIRIO (Table 1,[Matricciani,1996])	49
Πίνακας 3.2 Συνολικός χρόνος και τιμές $P_o=P(A(v)>0^+)$ για τους 3 ιταλικούς σταθμούς και για διάφορες τιμές της ταχύτητας v (Table3,[Matricciani,1996]).....	50
Πίνακας 3.3 Μέση τιμή σ , τυπική απόκλιση και rms του σφάλματος για τις 10 προβλεπτικές μεθόδους στο εύρος πιθανοτήτων 10^{-1} με $5 \times 10^{-3}\%$ (Table 12,[Matricciani,1996]).....	51
Πίνακας 4.1 Συντελεστές διάδοσης a,k κατά [D.Maggiore,1981]	70
Πίνακας 4.2 Συντελεστές διάδοσης a,k κατά [ITU-RP.838].....	70
Πίνακας 4.3 Τιμές πιθανότητας υπέρβασης για $A1=3dB$ και $A2=6dB$ και για τις 3 συχνότητες.....	79
Πίνακας 4.4 Τιμές υπερβαινώμενης απόσβεσης για τα 3 ετήσια ποσοστά υπέρβασης και τις 3 συχνότητες.	82

1^ο Κεφάλαιο

Εισαγωγή στις Δορυφορικές Επικοινωνίες

1.1 Γενικά στοιχεία για τα δορυφορικά δίκτυα

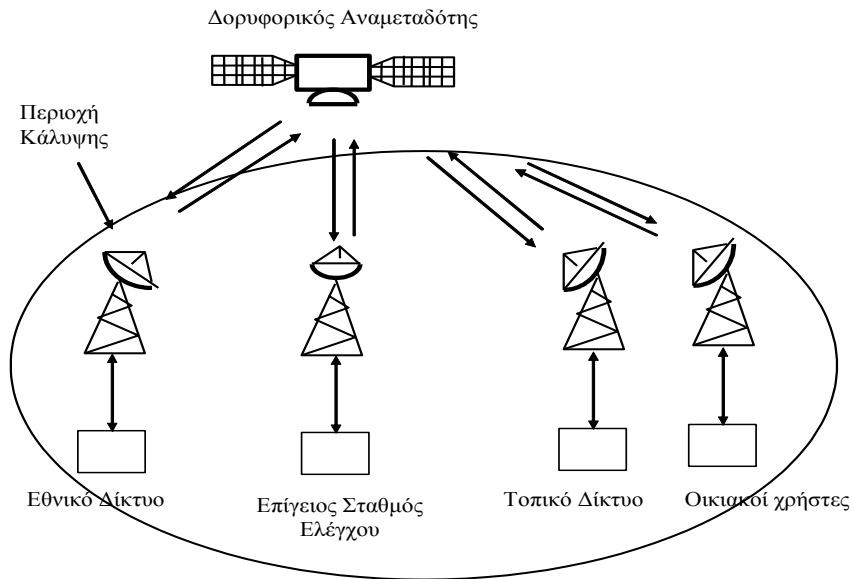
Η θέση των δορυφορικών δικτύων επικοινωνιών στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα είναι ιδιαίτερα σημαντική. Οι δορυφόροι παρέχουν την δυνατότητα κάλυψης μεγάλων γεωγραφικών περιοχών. Η δυνατότητα αυτή είναι καθοριστικής σημασίας σε εφαρμογές όπως η διασύνδεση μεγάλων τηλεπικοινωνιακών κόμβων (τηλεφωνικά κέντρα μεταγωγής) , οι κινητές τηλεπικοινωνίες, οι τηλεοπτικές ζεύξεις κτλ. Η τεχνολογία των δορυφορικών συστημάτων συνεχώς εξελίσσεται και οι δορυφορικές τηλεπικοινωνίες αναμένεται να έχουν σημαντικότατο ρόλο στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα .

Ο τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος δεν είναι ένας απλός επαναλήπτης, που συνδέει απλώς δύο επίγειους σταθμούς που δεν βρίσκονται σε οπτική επαφή, αλλά αποτελεί μέρος ενός εύκαμπτου υψηλής χωρητικότητας τηλεπικοινωνιακού δικτύου με δυνατότητες πολλαπλής εκπομπής και προσπέλασης [Καυάλης και Κωττής,2012]. Ο κάθε επίγειος σταθμός που βρίσκεται στην περιοχή κάλυψης του δορυφόρου, μπορεί να μεταδίδει ή να λαμβάνει ραδιοκύματα προς ή από άλλο επίγειο σταθμό που βρίσκεται στην περιοχή κάλυψης του δορυφορικού δικτύου.

Σε όλα τα δορυφορικά δίκτυα ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο παίζει η αρχιτεκτονική τους, που επιτρέπει τη μετάδοση -λήψη από ανεξάρτητους σταθμούς, με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των παρεμβολών μεταξύ των επιγείων σταθμών. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας, που σχετίζεται με τις αυξημένες ανάγκες τηλεπικοινωνιακής χωρητικότητας, είναι ο περιορισμένος αριθμός διαθέσιμων θέσεων στη γεωστατική τροχιά, γεγονός που δημιουργεί την ανάγκη τοποθέτησης των δορυφόρων σε μικρότερες μεταξύ τους γωνιακές αποστάσεις. Ως αποτέλεσμα, προκύπτουν προβλήματα παρεμβολών σε συστήματα που χρησιμοποιούν κοινή περιοχή φάσματος συχνοτήτων. Τα τελευταία χρόνια με την πρόοδο της τεχνολογίας, τόσο η κεραία του επίγειου σταθμού, όσο και τα άλλα τμήματα του υλικού αυτού έχουν μειωθεί σε όγκο και βάρος σε τέτοιο βαθμό ώστε να εγκαθίστανται και σε περιβάλλον μεμονωμένων χρηστών. Αυτοί οι τερματικοί σταθμοί είναι συνήθως γνωστοί ως τερματικά πολύ μικρής επιφάνειας VSAT (VerySmallApertureTerminal). Με τη διασύνδεση των VSATs είναι δυνατόν να παρακάμπτονται ολόκληρα δημόσια δίκτυα. Η διασύνδεση των VSATs αποτελείται από τον κεντρικό σταθμό (Hub Station) και το υπόλοιπο δίκτυο είναι συνδεδεμένο σε μορφή βρόχου (mesh) ή αστέρα (star).

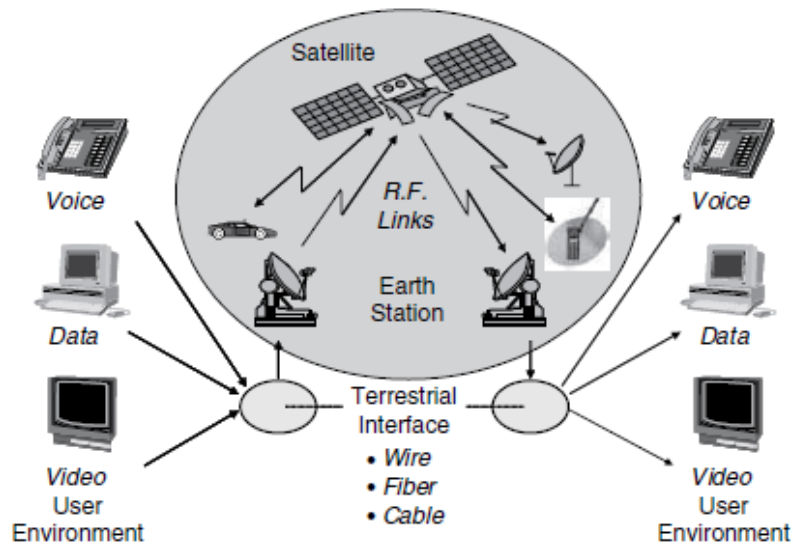
1.2 Δομή βασικού δορυφορικού συστήματος

Ένα σύστημα δορυφορικών επικοινωνιών αποτελείται από δύο τμήματα, το επίγειο και το δορυφορικό τμήμα. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα ενός δορυφορικού τηλεπικοινωνιακού συστήματος ενώ στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται η μετάδοση της πληροφορίας χρήστη σε μορφή φωνής , δεδομένων , video,εικόνας είτε μέσω του δορυφόρου είτε μέσω του επίγειου δικτύου .



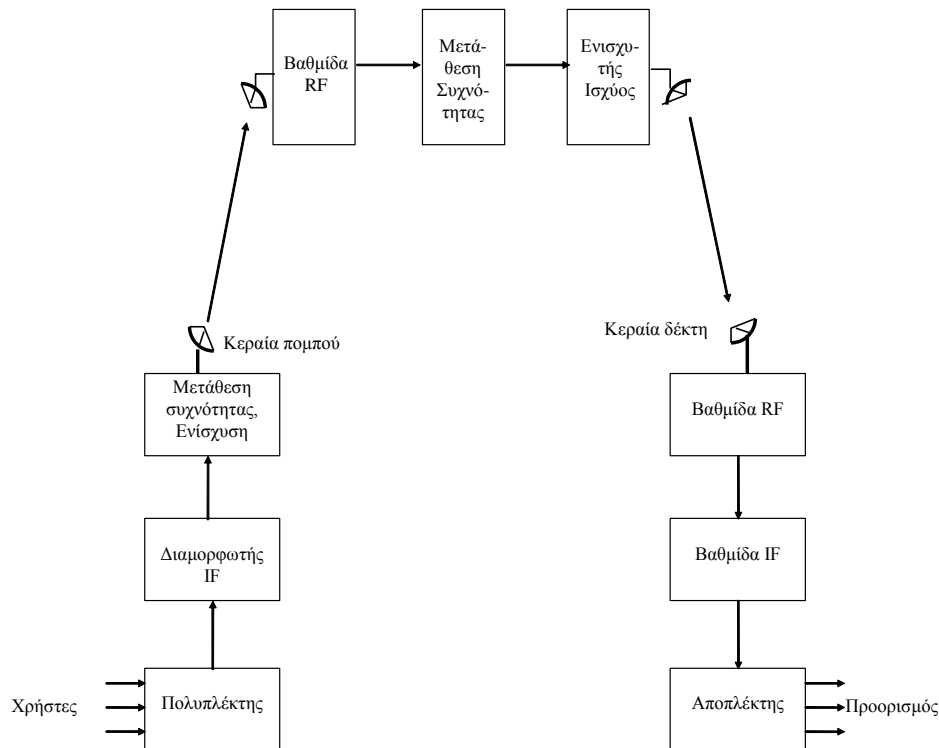
Σχήμα 1.1 Δορυφορικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα

Το δορυφορικό τμήμα του συστήματος περιλαμβάνει το δορυφορικό αναμεταδότη και τον επίγειο σταθμό ελέγχου στον οποίο πραγματοποιούνται οι διαδικασίες της τηλεμετρίας και ο έλεγχος του δορυφόρου . Η ζεύξη μεταξύ των επίγειων σταθμών ή χρηστών γίνεται μέσω του δορυφορικού αναμεταδότη [Καυάλης και Κωττής,2012]. Το σήμα που εκπέμπεται από κάθε επίγειο σταθμό μεταδίδεται μέσω της ατμόσφαιρας και υφίσταται ποικίλες αποσβέσεις μέχρι να φτάσει στην είσοδο του δορυφορικού αναμεταδότη.Στα σύγχρονα ψηφιακά συστήματα, ο δορυφορικός αναμεταδότης επεξεργάζεται το uplink σήμα , το διαμορφώνει , ενισχύει και εκπέμπει προς τον επίγειο σταθμό λήψης .



Σχήμα 1.2 Δορυφορικό τμήμα επικοινωνιών στην συνολική υποδομή επικοινωνιών

Στο ακόλουθο σχήμα 1.3 φαίνεται το απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα ενός δορυφορικού τηλεπικοινωνιακού συστήματος που περιλαμβάνει τις βασικές υπομονάδες του επίγειου σταθμού και του δορυφόρου.



Σχήμα 1.3 Βασικές βαθμίδες του συστήματος δορυφορικών επικοινωνιών

Στην είσοδο του πομπού του επίγειου σταθμού εισέρχονται τα σήματα πληροφορίας από διάφορους χρήστες (τηλεφωνικά , τηλεοπτικά , δεδομένα κτλ) είτε σε αναλογική είτε σε ψηφιακή μορφή μέσω συμβατικών ζεύξεων (ενσύρματων ή ασύρματων ζεύξεων) [Καψάλης και Κωττής,2012]. Τα σήματα πληροφορίας πολυπλέκονται και διαμορφώνονται στην ενδιάμεση συχνότητα του συστήματος . Το προς εκπομπή σήμα αλλάζει συχνότητα(αποκτά ραδιοσυχνότητα), ενισχύεται και εκπέμπεται προς τον δορυφόρο από την κεραία του επίγειου σταθμού .

Αφού το σήμα υποστεί απώλειες εξαιτίας της διάδοσής του μέσω της ατμόσφαιρας, φτάνει τελικά στον δορυφόρο. Για να αποφευχθεί η παρεμβολή του Uplink και του downlink σήματος , ο δορυφορικός αναμεταδότης , εκτός από ενίσχυση ,εκπέμπει σε διαφορετική(συνήθως μικρότερη) ραδιοσυχνότητα από αυτήν που λαμβάνει .

Τέλος το επανεκπεμπόμενο από τον δορυφορικό αναμεταδότη σήμα φθάνει στην είσοδο του επίγειου δέκτη και οδηγείται κατ' αρχήν στην RF βαθμίδα ενίσχυσης χαμηλού θορύβου. Στην συνέχεια , η φέρουσα συχνότητα του ραδιοκύματος μετατρέπεται σε ενδιάμεση και μετά από την αποπολύπλεξη τα σήματα οδηγούνται στον τελικό τους προορισμό (χρήστες) .

1.3 Προσφερόμενες Δορυφορικές Υπηρεσίες

Ο τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες που παρέχονται μέσω δορυφόρου χωρίζονται, σύμφωνα με την παράγραφο 3 του άρθρου 1 του ITURadioRegulations* [wikipedia], στις παρακάτω κατηγορίες :

1. Διαδορυφορική υπηρεσία (Intersatellite Service): υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας που εξασφαλίζει ζεύξεις μεταξύ τεχνητών δορυφόρων.
2. Κινητή υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Mobile Satellite Service): υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας μεταξύ Επίγειων Κινητών Σταθμών και ενός ή περισσότερων διαστημικών Σταθμών (δορυφόρων), ή μεταξύ

επίγειων κινητών Σταθμών μέσω ενός ή περισσότερων διαστημικών Σταθμών. Η υπηρεσία αυτή μπορεί επίσης να περιλαμβάνει ζεύξεις τροφοδότησης που είναι αναγκαίες για τη λειτουργία της.

3. *Κινητή υπηρεσία ξηράς μέσω δορυφόρου (Land Mobile Satellite Service)*: κινητή υπηρεσία μέσω δορυφόρου στην οποία οι κινητοί επίγειοι σταθμοί βρίσκονται στην ξηρά.

4. *Κινητή ναυτική υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Maritime Mobile Satellite Service)*: κινητή υπηρεσία μέσω δορυφόρου στην οποία οι επίγειοι κινητοί σταθμοί είναι εγκατεστημένοι σε πλοία. Οι Σταθμοί σκαφών διάσωσης και οι Σταθμοί θεσπιδεικτικών ραδιοφάρων έκτακτης ανάγκης μπορούν επίσης να μετέχουν στην υπηρεσία αυτή.

5. *Κινητή αεροναυτική υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Aeronautical Mobile Satellite Service)*: κινητή υπηρεσία μέσω δορυφόρου στην οποία οι επίγειοι Σταθμοί είναι εγκατεστημένοι σε αεροσκάφη.

6. *Σταθερή υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service)*: υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας μεταξύ επιγείων σταθμών σε δεδομένες θέσεις, όταν χρησιμοποιούνται ένας ή περισσότεροι δορυφόροι. Η δεδομένη θέση μπορεί να είναι ένα προσδιορισμένο σταθερό σημείο ή οποιοδήποτε σταθερό σημείο σε προσδιορισμένες περιοχές. Σε ορισμένες περιπτώσεις η υπηρεσία αυτή περιλαμβάνει ζεύξεις μεταξύ δορυφόρων, οι οποίοι μπορεί να λειτουργούν στη διαδορυφορική υπηρεσία. Η σταθερή υπηρεσία μέσω δορυφόρου μπορεί να περιλαμβάνει ζεύξεις τροφοδότησης για άλλες υπηρεσίες διαστημικής ραδιοεπικοινωνίας.

7. *Υπηρεσία εκπομπής ραδιοφωνίας ή τηλεόρασης μέσω δορυφόρου (Broadcasting Radio or TV Satellite Service)*: υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας στην οποία σήματα εκπεμπόμενα ή αναμεταβιβαζόμενα από διαστημικούς Σταθμούς προορίζονται για απευθείας λήψη από το ευρύ κοινό. Στην υπηρεσία αυτή ο όρος «απευθείας λήψη» από το ευρύ κοινό πρέπει να περιλαμβάνει και την ατομική και την συλλογική λήψη.

8. *Υπηρεσία ραδιοεπισήμανσης μέσω δορυφόρου (Radiodetermination Satellite Service)*: υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας για σκοπούς ραδιοεπισήμανσης που περιλαμβάνει τη χρήση ενός ή περισσότερων διαστημικών Σταθμών. Η υπηρεσία αυτή μπορεί επίσης να περιλαμβάνει τις ζεύξεις τροφοδότησης που είναι αναγκαίες για την εκμετάλλευσή της.

9. *Υπηρεσία ραδιοπλοήγησης μέσω δορυφόρου (Radionavigation Satellite Service)*: υπηρεσία ραδιοεπισήμανσης μέσω δορυφόρου για σκοπούς ραδιοπλοήγησης. Η υπηρεσία αυτή μπορεί επίσης να περιλαμβάνει τις ζεύξεις τροφοδότησης που είναι αναγκαίες για την εκμετάλλευσή της.

10. *Υπηρεσία ναυτικής ραδιοπλοήγησης μέσω δορυφόρου (Maritime Radionavigation Satellite Service)*: υπηρεσία ραδιοπλοήγησης μέσω δορυφόρου στην οποία οι εγκατεστημένοι Σταθμοί είναι σε πλοία.

11. *Υπηρεσία αεροναυτικής ραδιοπλοήγησης μέσω δορυφόρου (Aeronautical Radionavigation Satellite Service)*: υπηρεσία ραδιοπλοήγησης μέσω δορυφόρου στην οποία οι Σταθμοί είναι εγκατεστημένοι σε πλοία.

12. *Υπηρεσία ραδιοεντοπισμού μέσω δορυφόρου (Radiolocation Satellite Service)*: υπηρεσία ραδιοεπισήμανσης μέσω δορυφόρου χρησιμοποιούμενη για σκοπούς ραδιοεντοπισμού. Η υπηρεσία αυτή μπορεί επίσης να περιλαμβάνει τις ζεύξεις τροφοδότησης που είναι αναγκαίες για την εκμετάλλευσή της.

13. *Υπηρεσία εξερεύνησης της Γης μέσω δορυφόρου (Earth Exploration Satellite Service)*: υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας μεταξύ επιγείων Σταθμών και ενός ή περισσότερων διαστημικών Σταθμών που μπορεί να περιλαμβάνει ζεύξεις μεταξύ διαστημικών Σταθμών, στην οποία: πληροφορίες που αφορούν τα χαρακτηριστικά της Γης και των φυσικών φαινομένων της, περιλαμβανομένων των δεδομένων που σχετίζονται με την κατάσταση του περιβάλλοντος, λαμβάνονται από ενεργού παθητικούς ανιχνευτές σε δορυφόρους της Γης. Τέλος αυτή η υπηρεσία μπορεί επίσης να περιλαμβάνει τις ζεύξεις τροφοδότησης που είναι αναγκαίες για την εκμετάλλευσή της.

14. *Υπηρεσία Μετεωρολογίας μέσω δορυφόρου (Meteorological Satellite Service)*: υπηρεσία εξερεύνησης της Γης μέσω δορυφόρου για σκοπούς μετεωρολογίας.

15. *Υπηρεσία πρότυπης συχνότητας και ωριαίων σημάτων μέσω δορυφόρου (Standard Frequency and Time Signal-Satellite Service)*: υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας που χρησιμοποιεί διαστημικούς Σταθμούς σε δορυφόρους της γης για τους ίδιους σκοπούς όπως ή υπηρεσία πρότυπης

συχνότητας και ωριαίων σημάτων. Η υπηρεσία αυτή μπορεί να περιλαμβάνει και τις ζεύξεις τροφοδότησης που είναι αναγκαίες για την εκμετάλλευση της.

16. *Υπηρεσία για Ερασιτέχνες μέσω δορυφόρου (Amateur Satellite Service)*: υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας για σκοπούς αυτό-εκπαίδευσης, επικοινωνίας και τεχνικής έρευνας που εκτελείται από ερασιτέχνες, οι οποίοι πρέπει να είναι εγκεκριμένα πρόσωπα που ενδιαφέρονται για τις ραδιοεπικοινωνίες για προσωπικούς λόγους και χωρίς ιδιοτελείς σκοπούς.

17. *Υπηρεσία έρευνας διαστήματος (Space Research Service)*: υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας που στην οποία χρησιμοποιούνται διαστημόπλοια ή άλλα αντικείμενα του διαστήματος για σκοπούς επιστημονικής ή τεχνολογικής έρευνας.

18. *Υπηρεσία Ραδιοαστρονομίας (Radioastronomy Service)*: υπηρεσία που περιλαμβάνει τη χρήση ραδιοαστρονομίας.

1.4 Το φάσμα των δορυφορικών επικοινωνιών

Σύμφωνα με το [Καψάλης και Κωττής,2012] το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων είναι φυσικός πόρος που πρέπει να κατανέμεται ορθά σε όλους τους τύπους ασύρματων υπηρεσιών, επίγειων και δορυφορικών. Η ITU εκχωρεί συχνότητες για κάθε τηλεπικοινωνιακή υπηρεσία σε τοπική και παγκόσμια βάση. Από την άλλη πλευρά, σε κάθε κράτος λειτουργεί συγκεκριμένη υπηρεσία που εκχωρεί συχνότητες για εθνική χρήση λαμβάνοντας υπόψη ότι οι ραδιοεκπομπές δεν παρενοχλούν άλλες υπάρχουσες εθνικές ή διεθνείς ραδιοεπικοινωνίες.

Γενικά, όταν πρόκειται να εγκατασταθεί μία νέα δορυφορική τηλεπικοινωνιακή υπηρεσία, πρέπει να πραγματοποιούνται οι επόμενες διαδικασίες:

- Επιλέγεται μία ζώνη συχνότητας από αυτές που έχει εκχωρήσει η ITU με βάση και οικονομικά κριτήρια
- Εξετάζονται οι πιθανές παρεμβολές σε εθνικό επίπεδο
- Ταυτόχρονα ειδοποιείται η ITU για την σχεδιαζόμενη δορυφορική υπηρεσία με στοιχεία θέσης δορυφόρου, είδος υπηρεσίας, εύρος ζώνης και ισχύς που απαιτείται. Συνήθως αυτό γίνεται εκ των προτέρων, αρκετά πριν από την εγκατάσταση της υπηρεσίας
- Η ITU επιβεβαιώνει την συμφωνία όλων των μελών της για την εισαγωγή του νέου συστήματος
- Ο προτείνων την νέα υπηρεσία συντονίζει ώστε να επιλυθούν τα ενδεχόμενα προβλήματα για άλλους χρήστες της ίδιας ζώνης συχνότητας
- Τέλος, ειδοποιείται η ITU για την επιτυχή έκβαση της συμφωνίας μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών και καταχωρεί την νέα υπηρεσία στα αρχεία υπηρεσιών της ITU

Ο πίνακας 1.1 [Panagopoulos,2004] παρουσιάζει τις ζώνες συχνοτήτων που λειτουργούν ή θα λειτουργούν τα δορυφορικά συστήματα.

Όνομαζώνης	ΕύροςΣυχνοτήτωνζώνης
L Band	1-2
S Band	2-4
C Band	4-6
Ku Band	12-14
Ka Band	20-30
V Band	40-50

Πίνακας 1.1 Ζώνες συχνοτήτων

1.5 Σύγχρονες προκλήσεις των δορυφορικών επικοινωνιών

1.5.1 Ανάγκη για υψηλότερες συχνότητες

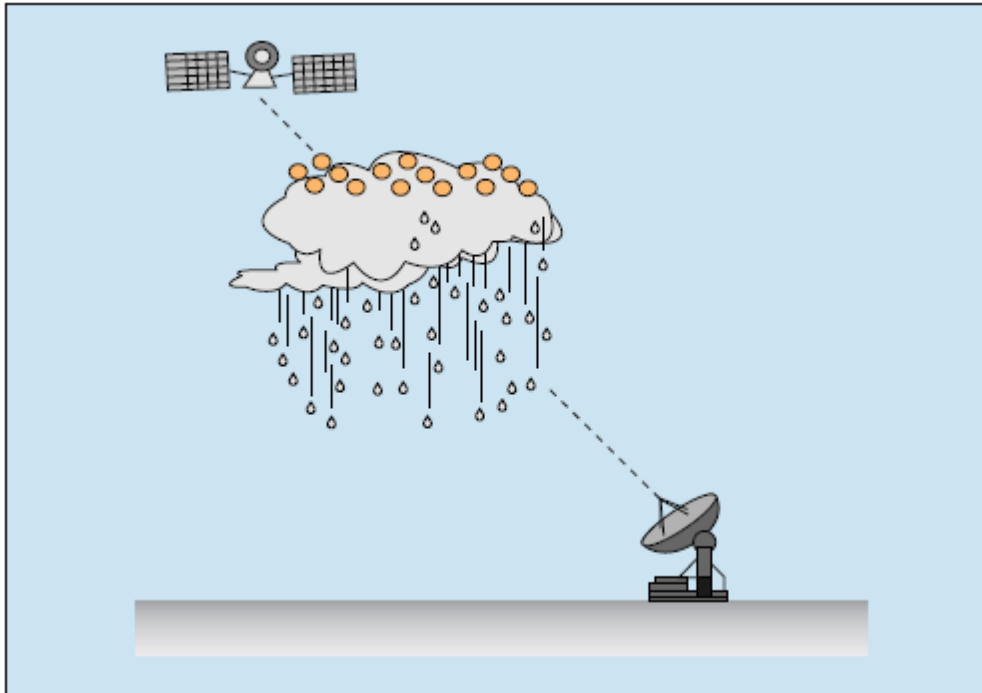
Η ποιότητα των δορυφορικών ζευξεων στα σύγχρονα ψηφιακά συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών αξιολογείται από τη διαθεσιμότητα (availability) και την αξιοπιστία (performance) που επιτυγχάνονται. Η διαθεσιμότητα εκφράζει το ποσοστό του χρόνου στη διάρκεια του οποίου το σύστημα διατηρεί το συγχρονισμό του, 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 συχνοτήτων [Ha, 1990]. 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 10 GHz, ο κυριότερος ανασταλτικός παράγοντας είναι η βροχή η οποία προκαλεί απόσβεση και αποπόλωση 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.

Οι νέες και απαιτητικές δορυφορικές εφαρμογές, προκάλεσαν την βαθμιαία φασματική συμφόρηση των τυπικών ζωνών συχνοτήτων για δορυφορικές υπηρεσίες, δηλαδή των L (1/2GHz), S(2/4GHz) και C(4/6)[Panagopoulos,2004]. Παράλληλα, η συνεχής ανάπτυξη νέων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών αύξησε τις απαιτήσεις σε όγκο της μεταδιδόμενης πληροφορίας. Ως εκ τούτου, οι 2 παραπάνω καταστάσεις οδήγησαν στην χρησιμοποίηση δορυφορικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων που λειτουργούν σε συχνότητες μεγαλύτερες από 10 GHz πχ στις ζώνες Ku (14/12 GHz),Ka(30/20 GHz), στη V(40/50 GHz) κ.ά. Η φασματική αυτή εκτροπή σε υψηλότερες συχνότητες ευνοεί τη χρήση κεραιών μεγαλύτερης κατευθυντικότητας και έχει ως αποτέλεσμα τον πολλαπλασιασμό της χωρητικότητας μετάδοσης δεδομένων του δορυφορικού συστήματος.

1.5.2 Προβλήματα διάδοσης

Το δορυφορικό σήμα υφίσταται ισχυρές διαλείψεις εξαιτίας των φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την διάδοση του διαμέσω της ατμόσφαιρας. Τα φυσικά φαινόμενα διάδοσης τα διακρίνουμε σε 2 κατηγορίες, ταινοσφαιρικά και τα τροποσφαιρικά. Επειδή όμως ενδιαφερόμαστε για συστήματα που λειτουργούν σε συχνότητες μεγαλύτερες των 10 GHz εξετάζουμε αποκλειστικά τα τροποσφαιρικά.



Σχήμα 1.4 Δορυφορική ζεύξη που υφίσταται απώλειες [Panagopoulos, 2004].

Τα τροποσφαιρικά φαινόμενα τα οποία επηρεάζουν την απόδοση της ζεύξης μπορούν να συνοψιστούν ως εξής [Panagopoulos, 2004] :

- **Εξασθένηση λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων.** Στις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις συμπεριλαμβάνονται κυρίως η βροχή, το χαλάζι και το χιόνι. Παρόλα αυτά στις συχνότητες τις οποίες μελετάμε, η βροχή αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα απόσβεσης της ισχύος του σήματος.
- **Απορρόφηση από τα αέρια της ατμόσφαιρας.** Στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα μόρια του οξυγόνου και οι υδρατμοί απορροφούν την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια με αποτέλεσμα να αποσβένει η ισχύς του σήματος.
- **Απόσβεση λόγω νεφών.** Τα σύννεφα και η ομίχλη προκαλούν απώλεια ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος λόγω των σωματιδίων του νερού που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα.
- **Σπινθηρισμοί λόγω τροποσφαιρικών στροβιλισμών.** Οι στροβιλισμοί που προκαλούνται στην ατμόσφαιρα έχουν ως αποτέλεσμα τη γρήγορη χρονική και χωρική μεταβολή του δείκτη διάθλασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον σπινθηρισμό της ισχύς του σήματος.
- **Εξασθένηση από το στρώμα τήξης του πάγου.** Ως στρώμα τήξης ορίζεται η περιοχή, η οποία βρίσκεται σε συγκεκριμένο υψόμετρο και στην οποία το χιόνι και οι παγοκρύσταλλοι μετατρέπονται σε σταγόνες βροχής. Η εξασθένηση αυτή είναι υπολογίσιμη σε περιπτώσεις όπου έχουμε ελαφρές βροχοπτώσεις και η γωνία ανύψωσης είναι μικρή.
- **Αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου.** Όλοι οι παράγοντες που προκαλούν την εξασθένηση του σήματος προκαλούν και αύξηση της ακτινοβολίας θορύβου. Επομένως όσο υψηλότερη εξασθένηση έχουμε τόσο μεγαλύτερη είναι και η ακτινοβολία θορύβου.

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

1.5.3 Fade Mitigation Techniques (FMTs)

Το περιθώριο διαλείψεων, δηλαδή το κέρδος του συστήματος για να εξασφαλίσει την αναγκαία ποιότητα υπηρεσιών (QoS) συναρτήσεται των διαφόρων μεταδόσεων και δυσμενών συνθηκών διάδοσης, πρέπει να αυξηθεί ιδιαίτερα για να αντισταθμίσει τις μεγάλες διαλείψεις σήματος που εισάγονται για συχνότητες ανώτερες των 10 GHz. Τα μεγαλύτερα περιθώρια διαλείψεων, όμως, δεν είναι εφικτά τόσο από οικονομικής όσο και τεχνικής άποψης. Γι αυτό το λόγο, προκειμένου να λειτουργήσει ένα σύγχρονο δορυφορικό σύστημα σε συχνότητες μεγαλύτερες των 10 GHz, πρέπει να υιοθετηθεί μία κατάλληλη τεχνική αντιμετώπισης των διαλείψεων (FMT), κάτι που οδηγεί σε ρεαλιστικές τιμές του περιθωρίου διαλείψεων.

Οι FMT μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις ευρείες κατηγορίες [Panagopoulos, 2004]:

- ✓ Τεχνικές Ελέγχου Ισχύος (EIRP Control Techniques)
- ✓ Τεχνικές Προσαρμοστικής Μετάδοσης (Adaptive Transmission Techniques)
- ✓ Τεχνικές Διαφορισμού (Diversity Protection Schemes)

Ανεξαρτήτως των διαφορών που εμφανίζουν, για την μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας μία δορυφορικής ζεύξης οι τεχνικές FMT πραγματοποιούν την ακόλουθη σειρά κοινών λειτουργιών [Panagopoulos, 2004]:

- παρακολούθηση της ζεύξης με συνεχείς μετρήσεις των συνθηκών μετάδοσης.
- εκτίμηση της συμπεριφοράς και της διάρκειας της επόμενης κατάστασης του δορυφορικού διαύλου.
- αλλαγή των παραμέτρων του συστήματος με βάση την προηγούμενη πρόβλεψη.

Η παρακολούθηση της ζεύξης πραγματοποιείται με μέτρηση του BER στην έξοδο του δέκτη από την οποία προσδιορίζεται ο αντίστοιχος λόγος ενέργειας ψηφίου προς πυκνότητα θορύβου Eb/No. Ο έμμεσος αυτός τρόπος διαπίστωσης της συμπεριφοράς του διαύλου απαιτεί την παρατήρηση μεγάλου πλήθους λαθών προτού καθοριστεί το μέγεθος των διαλείψεων και έχει ως συνέπεια την καθυστερημένη ενεργοποίηση του κατάλληλου FMT για την αντιμετώπισή τους. Ένα άλλο μειονέκτημα αυτής της έμμεσης μεθόδου είναι ότι το ποσοστό των λαθών αυξάνεται πολύ απότομα με την επιδείνωση των συνθηκών διάδοσης. Ως εκ τούτου η άμεση εκτίμηση των διαλείψεων με μέτρηση του CNR (Carrier to Noise ratio) είναι η ενδεδειγμένη μέθοδος.

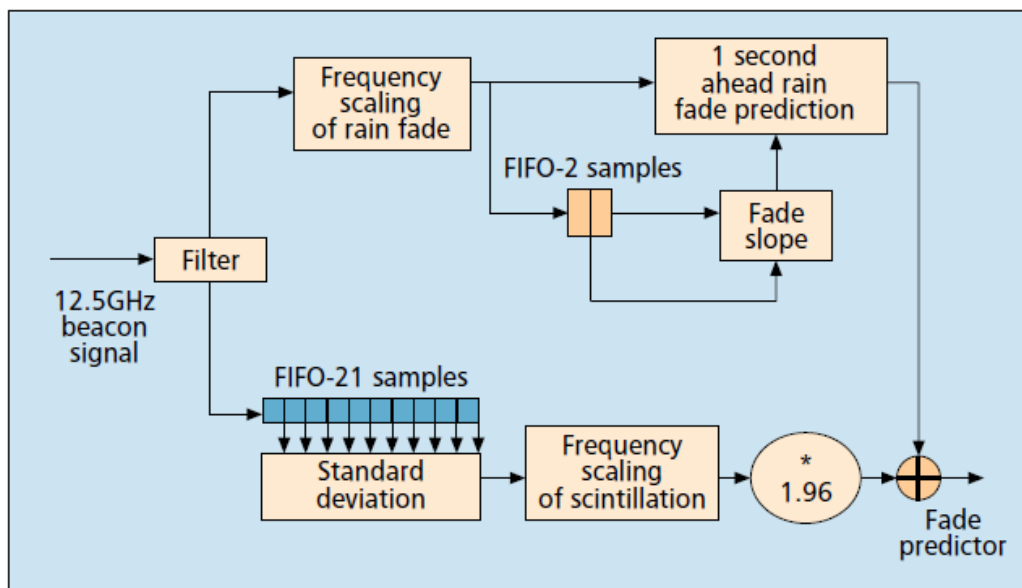
Σύμφωνα με το [Panagopoulos, 2004], όσον αφορά την εκτίμηση και πρόβλεψη της συμπεριφοράς του διαύλου, η πραγματοποίησή τους σε πραγματικό χρόνο είναι εξαιρετικά δύσκολη. Ο λόγος είναι η τυχαιότητα που χαρακτηρίζει τα διάφορα φυσικά φαινόμενα της ατμόσφαιρας και τα στατιστικά μεγέθη στα οποία βασίζονται τα μοντέλα πρόβλεψης αναφέρονται σε ετήσια βάση. Γι αυτό το λόγο, η σύγχρονη τάση στις μεθόδους πρόβλεψης είναι η αξιοποίηση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών των διαλείψεων, όπως το βάθος, η διάρκεια ή η περιβάλλουσα των διαλείψεων, ο ρυθμός επανάληψης των διαλείψεων σε συνδυασμό με κατάλληλες δειγματοληπτικές μετρήσεις του διαύλου.

Ένα άλλο κρίσιμο σημείο της εκτίμησης της απόσβεσης σε πραγματικό χρόνο, κατά τη διάρκεια της επόμενης κατάστασης, είναι η ικανότητα να διαχωρίζονται τα διαφορετικά φαινόμενα διάδοσης που προκαλούν διαλείψεις ώστε να εφαρμοσθεί το κατάλληλο FMT. Προς αυτή την κατεύθυνση μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το φασματικό διαχωρισμό των παραγόντων που επηρεάζουν τη διάδοση. Σύμφωνα λοιπόν με αυτόν το διαχωρισμό, το χαμηλόσυχο μέρος του φάσματος της απόσβεσης σχετίζεται με την

απορρόφηση από τα αέρια, το μέσο φασματικό μέρος σχετίζεται με την εξασθένηση λόγω νεφώσεων και βροχοπτώσεων και το υψηλόσυχνο μέρος σχετίζεται με τους σπινθηρισμούς. Επομένως ο αναγκαίος διαχωρισμός μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλο φιλτράρισμα [Panagopoulos,2004].

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

Στο Σχήμα 1.5 [Panagopoulos,2004] , που ακολουθεί, φαίνονται όλες οι διαδικασίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως για την εκτίμηση/πρόβλεψη των διαλείψεων ενσωματωμένες σε έναν βρόχο ελέγχου. Το σήμα-φάρος που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση/πρόβλεψη των διαλείψεων λόγω διάδοσης του δορυφορικού σήματος στην ατμόσφαιρα είναι συχνότητας 12.5 GHz. Το σήμα αρχικά φιλτράρεται, έτσι ώστε να διαχωρίσουμε τις αποσβέσεις που οφείλονται στη βροχή και αυτές που οφείλονται σε σπινθηρισμούς. Ύστερα ακολουθεί αναγωγή συχνότητας, ώστε οι μετρήσεις μας να αναχθούν στην περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας και τέλος γίνεται πρόβλεψη της διάλειψης κάθε φαινομένου.



Σχήμα 1.5 Βρόχος ελέγχου για την πρόβλεψη των διαλείψεων [Panagopoulos,2004].

Η **1^η κατηγορία** είναι οι τεχνικές ελέγχου του EIRP. Το EIRP είναι το γινόμενο της ισχύος και του κέρδους της κεραίας εκπομπής εκφρασμένο σε dB . Ο έλεγχος του EIRP συνίσταται είτε στον έλεγχο της ισχύος εκπομπής είτε στον έλεγχο του κατευθυντικού κέρδους της κεραίας ώστε να αντισταθμίσουμε τις απώλειες από τη διάδοση των κυμάτων στην ατμόσφαιρα. Ο έλεγχος της ισχύος ουσιαστικά είναι η ρύθμιση της ισχύος που εκπέμπει η κεραία και διακρίνεται σε:

- ULPC (uplinkpowercontrol) , δηλαδή έλεγχο ισχύος της άνω ζεύξης εάν ο πομπός είναι ο επίγειος σταθμός βάσης
- DLPC (downlinkpowercontrol), δηλαδή έλεγχο ισχύος της κάτω ζεύξης εάν ο πομπός είναι ο δορυφόρος και
- SBS (spotbeamshaping), τεχνική γνωστή ως διαμόρφωση λεπτής δέσμης, που συνίσταται στη ρύθμιση του προσανατολισμού και του κατευθυντικού κέρδους της κεραίας του δορυφόρου.

Η 2^η κατηγορία των FMTs είναι οι προσαρμοστικές τεχνικές μετάδοσης. Οι τεχνικές αυτές εστιάζουν στην αλλαγή του τρόπου επεξεργασίας ή μετάδοσης των σημάτων από τους κόμβους ενός δορυφορικού συστήματος επικοινωνιών όταν έχουμε διαλείψεις. Οι τεχνικές αυτές κάνουν χρήση κοινών τηλεπικοινωνιακών πόρων αφού οι διάφοροι τύποι επεξεργασίας του σήματος είναι διαθέσιμοι σε περισσότερους από έναν επίγειους σταθμούς. Όπως και οι τεχνικές ελέγχου του EIRP, έτσι και οι προσαρμοστικές τεχνικές διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, την ιεραρχική κωδικοποίηση (Hierarchical Coding) HC, την ιεραρχική διαμόρφωση (Hierarchical Modulation) HM, και την ελάττωση του ρυθμού μετάδοσης (Data Rate Reduction) DRR.

- **Ιεραρχική Κωδικοποίηση:** Υιοθετείται σχήμα κωδικοποίησης για την ανίχνευση και την διόρθωση των λανθασμένων bit, με την παρεμβολή πληροφορίας πλεονασμού. Όσο αυξάνεται η πληροφορία πλεονασμού τόσο μειώνεται η πιθανότητα λανθασμένων bit, με ταυτόχρονη αύξηση του απαιτούμενου εύρους ζώνης. Επομένως, η κωδικοποίηση για ανίχνευση/διόρθωση λαθών αποτελεί μέθοδο ανταλλαγής εύρους ζώνης και απαιτήσεων ισχύος εκπομπής για να επιτευχθεί συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσιών.

- **Ιεραρχική Διαμόρφωση:** Μειώνει το λόγο E_b/N_0 που απαιτείται για την επίτευξη μιας συγκεκριμένης στάθμης λαθών (BER), μειώνοντας τη φασματική απόδοση όταν ο λόγος ισχύος φέροντος σήματος προς θόρυβο (C/N) στην είσοδο του αποδιαμορφωτή μειώνεται εξαιτίας των δυσμενών ατμοσφαιρικών φαινομένων.

- **Μείωση Ρυθμού Μετάδοσης:** Η τεχνική αυτή συνίσταται στη μείωση του ρυθμού μετάδοσης ψηφίων πληροφορίας όταν το σύστημα παρακολούθησης του δορυφορικού διαύλου προβλέπει επιδείνωση των καιρικών συνθηκών.

Η 3^η κατηγορία των FMTs είναι οι Τεχνικές Διαφορισμού. Διακρίνονται σε τέσσερις υποκατηγορίες. Στη Διαφορική Λήψη Θέσης (Site Diversity), στη Διαφορική Λήψη Δορυφορικής Τροχιάς (Orbital Diversity), στο Διαφορισμό Συχνότητας (Frequency Diversity) και στο Διαφορισμό Χρόνου (Time Diversity).

- **Διαφορική Λήψη Δορυφορικής Τροχιάς:** Αυτό το σχήμα διαφορισμού επιτρέπει στην επίγεια δορυφορική βάση να επιλέγει μεταξύ τουλάχιστον δύο δορυφόρων. Παρουσιάζει μικρό κόστος υλοποίησης καθώς απαιτείται μόνο ένας επίγειος σταθμός ο οποίος μπορεί να επιλέγει μεταξύ σταθμών που βρίσκονται ήδη σε τροχιά.

- **Διαφορισμός Χρόνου:** Το σχήμα αυτό αφορά εφαρμογές οι οποίες έχουν ανοχή στη χρονική καθυστέρηση καθώς περιλαμβάνει την επαναλαμβανόμενη μετάδοση των δεδομένων που υφίστανται ισχυρή εξασθένηση.

- **Διαφορισμός Συχνότητας:** Αυτό το σχήμα διαφορισμού, ονομάζεται και υβριδικό. Όταν παρουσιάζεται μεγάλη εξασθένηση του σήματος εξαιτίας των ατμοσφαιρικών φαινομένων μπορούμε από την οπτική μάλιστα να μεταβούμε στην μάλιστα των RF όπου η απόσβεση που προκαλείται από τα παραπάνω ατμοσφαιρικά φαινόμενα είναι αρκετά μικρότερη.

- **Διαφορική Λήψη Θέσης:** Τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή. Επιλέγοντας σταθμούς οι οποίοι βρίσκονται σε αρκετά μεγάλη απόσταση ώστε να θεωρηθεί ότι τα μετεωρολογικά φαινόμενα που επηρεάζουν την κάθε ζεύξη είναι ασυσχέτιστα, αυξάνεται το κέρδος διαφορισμού. Δηλαδή κάποια από τις ζεύξεις δεν θα επηρεάζεται ή θα επηρεάζεται λιγότερο από τα μετεωρολογικά φαινόμενα. Όσο περισσότεροι σταθμοί χρησιμοποιούνται τόσο μεγαλύτερη είναι η διαθεσιμότητα της ζεύξης.

1.6 Ευρυζωνικά δορυφορικά δίκτυα

1.6.1 Γενικά στοιχεία για υψίσυχνα ευρυζωνικά δορυφορικά δίκτυα

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

Οι τεχνικές αυτές δημιούργησαν αρχικά προσδοκίες και υστέρησαν την αρχή για την ανάπτυξη δορυφόρων που λειτουργούν στις υψηλές ζώνες συχνοτήτων όπως η Ka. Τέτοια παραδείγματα δορυφόρων είναι ο spaceway δορυφόρος της Boeing ο οποίος εξασφαλίζει κάλυψη πολλαπλών ακτίνων (multi beam) πάνω από τις ΗΠΑ και έχει απόδοση που ξεπερνά τα 10 Gbps. Η Eutelsat σχεδιάζει δορυφόρο που θα λειτουργεί στην Ka ζώνη, θα καλύπτει την Ευρώπη με 80 ακτίνες και η απόδοσή του θα φτάνει τα 70 Gbps. Σήμερα οι δορυφόροι που χρησιμοποιούνται χαρακτηρίζονται από χωρητικότητα που φτάνει τα 10 Gb/s και το βάρος τους ανέρχεται στους 6 τόνους [Paul Thompson, 2011]. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν στις C και Ku ενώ στην Ka ζώνη, που χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο, επιστρατεύονται οι τεχνικές πολλαπλών ακτίνων (multi beam), με λιγότερο από 100 ακτίνες ανά δορυφόρο. Η επόμενη γενιά δορυφορικών συστημάτων θα χαρακτηρίζεται από δορυφόρους με χωρητικότητα που θα αγγίζει τα 100 Gb/s, το βάρος τους θα είναι περίπου το ίδιο και θα χρησιμοποιούν μεγαλύτερο αριθμό ακτίνων. Μετά από την γενιά αυτή θα ακολουθήσουν τα συστήματα χωρητικότητας της τάξης των Terabit/sec. Η προσπάθεια για μεγαλύτερες χωρητικότητες αποσκοπεί κυρίως στην εξυπηρέτηση δύο υπηρεσιών, των Broadcast Satellite Service (BSS) και της High-Density Fixed Satellite Service (HD-FSS), η οποία αφορά την αγορά της γρήγορης πρόσβασης στο διαδίκτυο από δορυφόρο [Jean-Didier Gayraud, 2009].

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

Όσον αφορά την HDFixedSatelliteService, η αύξηση της χωρητικότητας είναι αναγκαία ώστε τα δορυφορικά συστήματα τηλεπικοινωνιών να πετύχουν χαμηλό κόστος bit ανά δευτερόλεπτο και με αυτό το τρόπο να διατηρήσουν και να προσελκύσουν νέους χρήστες. Επειδή η πρόσβαση στο διαδίκτυο από δορυφόρο είναι νέα υπηρεσία, για να γίνει κερδοφόρα πρέπει ο δορυφόρος να έχει πολύ υψηλή χωρητικότητα. Πέρα τούτου όμως μπορούμε να πούμε ότι η ευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο αποτελεί υπηρεσία όπου η χρησιμοποίηση δορυφόρων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και συμφέρουσα σε αντίθεση με τα επίγεια συστήματα όπου το κόστος για την παροχή υπηρεσιών σε συγκεκριμένες περιοχές αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα. Επιπλέον οι απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης για τους χρήστες αυξάνονται με ραγδαίο τρόπο με αποτέλεσμα πρώτον τα επίγεια συστήματα να μην μπορούν, από οικονομική άποψη, να καλύψουν όλο τον πληθυσμό και δεύτερον η ευρυζωνική κάλυψη από δορυφόρο θα είναι επικρατέστερη στις μελλοντικές αρχιτεκτονικές συστημάτων διαδικτυακής πρόσβασης. Οι λύσεις και για αυτές τις δορυφορικές υπηρεσίες είναι σήματα υψηλής φασματικής απόδοσης και η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων όταν έχουμε κάλυψη από πολλαπλές ακτίνες.

Μέχρι πρόσφατα οι Fixed Satellite Service δορυφόροι έχουν σχεδιαστεί ώστε να μπορούν να εξυπηρετούν αγορές, οι απαιτήσεις των οποίων διαφέρουν μεταξύ τους. Αυτά τα συστήματα όμως δεν είναι ιδανικά για την κάλυψη ευρυζωνικών υπηρεσιών, είναι περιορισμένα από πλευρά ισχύος και τείνουν στο να έχουν

περιορισμένο εύρος ζώνης. Η σχεδίαση αυτή αποτελεί και την τροχοπέδη στην προσπάθεια των δορυφορικών συστημάτων να προσφέρουν υπηρεσίες με κόστος παρεμφερές με εκείνο των επίγειων συστημάτων. Ωστόσο καλύπτουν μεγάλες περιοχές γεγονός που υπερισχύει σε broadcast & multicast υπηρεσίες και μπορούν να

χρησιμοποιηθούν και σε περιοχές με χαμηλή πυκνότητα χρηστών, όπως οι αγροτικές περιοχές. Το κόστος ανά bit παραμένει υψηλό και είναι πιθανό οι χρήστες τέτοιων περιοχών να πληρώσουν λίγο παραπάνω. Επιπλέον υπάρχουν μελέτες που έγιναν το 2009 και έχουν σαν αντικείμενο μελέτης τη ζήτηση της αγοράς για ευρυζωνική πρόσβαση. Μία από αυτές είναι η Eutelsat [Eutelsat internal study,2009] μελέτη που εκτιμά τον αριθμό των νοικοκυριών που θα μπορούν να εξυπηρετηθούν από δορυφόρους στα 3.5 εκατομμύρια. Αν συνυπολογίσουμε και την Βόρεια Αφρική εύκολα συμπεραίνουμε ότι το κομμάτι της αγοράς που θα χρησιμοποιεί τα δορυφορικά συστήματα για πρόσβαση στο διαδίκτυο είναι αρκετά μεγάλο.

1.6.2 Διαθεσιμότητα και αξιοποίηση φάσματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στην αύξηση της χωρητικότητας των δορυφόρων, ωστόσο αμέσως προκύπτει το εξής πρόβλημα. Οι σύγχρονοι δορυφόροι λειτουργούν ως επί το πλείστον στη Ku ζώνη και το διαθέσιμο φάσμα στη ζώνη αυτή δεν είναι αρκετό για την κάλυψη των προβλεπόμενων απαιτήσεων. Επιπλέον οι δορυφόροι αυτοί έχουν κατασκευαστεί ώστε να καλύπτουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές και επομένως είναι περιορισμένοι ως προς την υποστήριξη μιας ευέλικτης κατανομής εύρους ζώνης που χρειάζεται για μια Ευρωπαϊκή ευρυζωνική εφαρμογή. Τα παραπάνω μας οδηγούν στην αξιοποίηση ζωνών όπως η Ka και πάνω όπου είναι ευκολότερο να επιτύχουμε την εκπομπή περισσότερων ακτίνων από τον δορυφόρο και με την επαναχρησιμοποίηση συχνότητας να φτάσουμε στις επιθυμητές τιμές χωρητικότητας. Σύμφωνα με το [Φάσσας,2012], στην Ka ζώνη αποκλειστικές ζώνες για τους δορυφόρους είναι 19.7-20.2 και 29.5-30 GHz . Η ζώνη 20.2- 21.2 GHz χρησιμοποιείται από τον στρατό ενώ τα υπόλοιπα κομμάτια της Ka ζώνης χρησιμοποιούνται και από άλλες υπηρεσίες και όχι αποκλειστικά από δορυφόρους και επομένως πρέπει να γίνεται συντονισμός στους επίγειους σταθμούς. Πιο συγκεκριμένα για την άνω ζεύξη οι ζώνες που χρησιμοποιούνται και από άλλες υπηρεσίες είναι οι 27.5-29.5 και 24.75-25.25 GHz , δηλαδή συνολικά 2.5 GHz είναι διαθέσιμα αλλά με περιορισμούς. Τα αντίστοιχα κομμάτια της Ka ζώνης για την κάτω ζεύξη είναι 17.3-19.7 και 21.4-22 GHz ,δηλαδή 3 GHz είναι διαθέσιμα, και πάλι όπως και πριν, με περιορισμούς. Πέρα όμως από τη Ka ζώνη μπορούμε να αξιοποιήσουμε και την Q/V ζώνη. Σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων δεν υπάρχουν ζώνες αποκλειστικά για δορυφορικές υπηρεσίες όπως προηγουμένως και συνεπώς πρέπει να υπάρχει συντονισμός μεταξύ των χρηστών. Για την άνω ζεύξη 5 GHz και για την κάτω ζεύξη 4 GHz είναι διαθέσιμα, αλλά και πάλι με περιορισμούς και με ύπαρξη συντονισμού.

1.7 Βιβλιογραφία

[Eutelsat internal study,2009] Eutelsat internal study; Broadband satellite addressable markets 2009

[Ha,1990] Ha T.T., [1990],Digital Satellite Communications, 2nd edition, McGraw Hill, New York.

[Jean-Didier Gayrard ,2009] Jean-Didier Gayrard [2009], “Terabit Satellite: Myth or Reality?”, First International Conference on Advances in Satellite and Space Communications

[Panagopoulos,2004] A. D. Panagopoulos, P.M. Arapoglou, P.G. Cottis, “Satellite Communications at Ku, Ka and V bands, Propagation Impairments and Mitigation Techniques”, IEEE Communication Surveys and Tutorials, Vol.6, No.3

[Paul Thompson,2011] Paul Thompson, Barry Evans, Michel Bousquet, Laurent Castenet, Takis Mathiopoulos [2011], “Concepts and Technologies for a Terabit/s Satellite”, SPACOMM, the Third International Conference on Advances in Satellite and Space Communications

[wikipedia] wikipedia.org/wiki/Radiocommunication_service

[Καψάλης και Κωττής,2012] Π. Γ. Κωττής, Χ. Ν. Καψάλης, «Δορυφορικές Επικοινωνίες» 3η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2012

[Φάσσας,2012] I. Φάσσας, «Χωρητικότητα και διαθεσιμότητα δορυφορικών ευρυζωνικών δικτύων νέας γενιάς», Διπλωματική Εργασία, ΗΜΜΥ ΕΜΠ, 2012

2^ο Κεφάλαιο

Απώλειες διάδοσης και μέθοδοι πρόβλεψης των απωλειών με έμφαση στην βροχή

2.1 Τροποσφαιρικά φαινόμενα διάδοσης

Κατά την σχεδίαση δορυφορικών ζεύξεων για τηλεπικοινωνιακά συστήματα πρέπει να ληφθούν υπόψη αρκετά φαινόμενα, φαινόμενα της μη-ιονισμένης ατμόσφαιρας που γίνονται κρίσιμα για συχνότητες μεγαλύτερες των 1 GHz και για μικρές γωνίες ανύψωσης . Τα φαινόμενα διάδοσης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα ιονοσφαιρικά και τα τροποσφαιρικά με τα πρώτα να καθίστανται σημαντικά για συχνότητες κάτω από το 1GHz.Επειδή ,όμως στην παρούσα εργασία μελετούμε δορυφορικά συστήματα υψηλών συχνοτήτων, μεγαλύτερων των 10 GHz, αναφερόμαστε αποκλειστικά στα τροποσφαιρικά φαινόμενα διάδοσης. Τέτοια φαινόμενα είναι [ITU-RP.618-12] :

α) απορρόφηση της ΗΜ ακτινοβολίας από αερολύματα – σκέδαση,απορρόφηση και αποπόλωση από υδρομετεωρίτες(υγρές και παγωμένες σταγόνες(βροχή , χιόνι και χαλάζι) , σύννεφα κτλ) – Εξασθένηση από το στρώμα τήξης του πάγου-εκπομπή θορύβου από τα μέσα απορρόφησης . Τα παραπάνω φαινόμενα γίνονται σημαντικά για συχνότητες μεγαλύτερες των 10 GHz.

β) απώλεια του σήματος εξαιτίας της απόκλισης της ακτίνας από την κεραία του επίγειου σταθμού , λόγω της ομαλής διάθλασης στην ατμόσφαιρα.

γ) μείωση στο ενεργό κέρδος της κεραίας , εξαιτίας της φασικής αποσυσχέτισης κατά μήκος του ανοίγματος της κεραίας , η οποία προκαλείται από ασυνέχειες του δείκτη διάθλασης.

δ) αργές σχετικά διαλείψεις εξαιτίας της καμπύλωσης της ακτίνας που οφείλεται σε αλλαγές μεγάλης κλίμακας στον δείκτη διάθλασης . Μικρές αλλαγές στον δείκτη διάθλασηςπροκαλούν ταχείες διαλείψεις (σπινθηρισμό) και μεταβολές στην γωνία άφιξης .

ε) πιθανοί περιορισμοί σε εύρος ζώνης εξαιτίας της πολλαπλής σκέδασης και του φαινομένου πολυόδευσης , ειδικά σε ψηφιακά συστήματα υψηλής χωρητικότητας .

στ) απόσβεση από το τοπικό περιβάλλον των επίγειων σταθμών (δέντρα, κτίρια κτλ)

ζ) βραχυπρόθεσμες μεταβολές του λόγου των αποσβέσεων στις συχνότητες της άνω και κάτω ζεύξης, κάτι που επιδρά αρνητικά στην ακρίβεια των προσαρμοστικών αντίμετρων των διαλείψεων (ACM).

η) για μη-γεωστατικούς δορυφόρους , το φαινόμενο της μεταβαλλόμενης γωνίας ανύψωσης προς τον δορυφόρο .

Έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για τον υπολογισμό των επιδράσεων της τροπόσφαιρας στην ισχύ του σήματος και για την πρόβλεψη των απωλειών αυτής.Παρόλα αυτά, τα περισσότερα μοντέλα δεν έχουν εξετασθεί με μετρήσεις για συχνότητες άνω των 30 GHz, που μας ενδιαφέρουν [Panagopoulos,2004].

2.2 Απώλειες διάδοσης

Στο παρόν κεφάλαιο , θα περιορίσουμε την ανάλυση μας, στις δυσμενείς για την επίδοση του δορυφορικού συστήματος , απώλειες διάδοσης του ραδιοκύματος. Οι απώλειες διάδοσης σε δορυφορικούς ραδιοδιαύλους αποτελεί άθροισμα επιμέρους απωλειών, όπως [ITU-RP.618-12] :

- α) απώλειες από αερολύματα της ατμόσφαιρας (οξυγόνο, υδρατμοί , άζωτο κτλ)
- β) απώλειες από βροχή , λοιπές κατακρημνίσεις και σύννεφα .
- γ) απώλειες από εστίαση(focusing) και αποεστίαση (defocusing) -μείωση του κέρδους της κεραίας εξαιτίας της ασυνέχειας του μετώπου του κύματος
- δ) απώλειες από σπινθηρισμούς και φαινόμενα πολυόδευσης
- ε) απώλειες από άμμο και αμμοθύελλες

Καθένα από τα παραπάνω φαινόμενα έχει τα δικά του χαρακτηριστικά σαν συνάρτηση της συχνότητας , της γεωγραφικής θέσης και της γωνίας ανύψωσης . Κατά κανόνα , για γωνίες ανύψωσης άνω των 10° , μόνο η απόσβεση αερολυμάτων , βροχής , συννέφων και πιθανόν σπινθηρισμού είναι αξιοσημείωτη.

Στην συνέχεια του κεφαλαίου θα μιλήσουμε για το κάθε φαινόμενο, που προκαλεί εξασθένηση του δορυφορικού σήματος, ξεχωριστά και θα επικεντρωθούμε στην απόσβεση λόγω βροχοπτώσεων.

2.3 Απώλειες λόγω αερολυμάτων

Συμφωνά με την ITU-RP.618-12, η απόσβεση λόγω ατμοσφαιρικών αερολυμάτων, η οποία προκαλείται εξ ολοκλήρου από την απορρόφηση , εξαρτάται από τη συχνότητα κυρίως, γωνία ανύψωσης , ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας και την πυκνότητα των υδρατμών (απόλυτη υγρασία) . Σε συχνότητες κάτω των 10 GHz , μπορεί χωρίς ιδιαίτερο σφάλμα να αγνοηθεί . Η επίδραση της αυξάνεται με την συχνότητα πάνω από 10 GHz, ειδικά για χαμηλές γωνίες ανύψωσης . Το παράρτημα 1 της σύστασης ITU-RP.676 δίνει μία ολοκληρωμένη μέθοδο για τον υπολογισμό της εξασθένησης από τα αέρια της ατμόσφαιρας ενώ το παράρτημα 2 της ίδιας σύστασης δίνει μία προσεγγιστική μέθοδο για συχνότητες μέχρι και 350GHz.

Σε μία συγκεκριμένη συχνότητα , η συμβολή του οξυγόνου στην απόσβεση των αερολυμάτων είναι σχετικά σταθερή. Παρά ταύτα , τόσο η πυκνότητα των υδρατμών όσο και το κάθετο προφίλ τους μεταβάλλονται γρήγορα .Τυπικά , η μέγιστη απόσβεση από αερολύματα της ατμόσφαιρας συμβαίνει κατά την διάρκεια της εποχής με την μέγιστη βροχόπτωση .

2.4 Απώλειες λόγω βροχοπτώσεων και σύννεφων

2.4.1 Κατανομή έντασης βροχόπτωσης

Οι απώλειες λόγω βροχοπτώσεων αποτελούν σημαντικό τμήμα των συνολικών απωλειών που υφίσταται το δορυφορικό σήμα , συνεπώς η ενδελεχής μελέτη τους κρίνεται αναγκαία για την ορθή σχεδίαση ενός σύγχρονου δορυφορικού ευρυζωνικού δικτύου. Η πρόβλεψη των απωλειών διάδοσης λόγω βροχής , με την βοήθεια ενός προγνωστικού μοντέλου , προϋποθέτει γνώση της πιθανοτικής κατανομής των βροχοπτώσεων στην εξεταζόμενη περιοχή. Αυτή η κατανομή των βροχοπτώσεων είναι και το αντικείμενο αυτής της ενότητας.

Σύμφωνα με την σύσταση ITU-RP. 837-5, υπάρχει μοντέλο που αποδίδει τον ρυθμό βροχόπτωσης R_p , που υπερβαίνεται για οποιοδήποτε δοσμένο ποσοστό του μέσου χρόνου και για οποιαδήποτε δοσμένη τοποθεσία επί της Γης. Αυτό το μοντέλο εφαρμόζεται σε δεδομένα των φακέλων ESARAIN_xxx_v5.TXT της ITU., όπου το xxx καθορίζει την εκάστοτε παράμετρο. Αυτοί οι φάκελοι δεδομένων βασίζονται σε δεδομένα 40 ετών του ευρωπαϊκού κέντρου μεσοπρόθεσμων μετεωρολογικών προβλέψεων (ECMWF). Πρόκειται για τους εξής 5 ψηφιακούς φακέλους δεδομένων :

- ESARAINLAT_v5.TXT για το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής
- ESARAINLON_v5.TXT για το γεωγραφικό μήκος της περιοχής
- ESARAIN_PR6_v5.TXT για την μεταβλητή P_{r6}

- ESARAIN_MT_v5.TXT για την μεταβλητή M_t
- ESARAIN_BETA_v5.TXT για την μεταβλητή β

Η μεταβλητή P_{r6} εκφράζει την πιθανότητα να βρέχει συνεχώς για 6 ώρες, η M_t εκφράζει το ολικό ετήσιο ύψος βροχής ενώ το β εκφράζει τον λόγο του ύψος συνεκτικών προς συνολικών πλήθος βροχοπτώσεων. Σχετικά με το μοντέλο, ακολουθείται η παρακάτω αλγοριθμική διαδικασία:

- ❖ Υπολογίζουμε τα μεγέθη P_{r6} , M_t και β για τα 4 πλησιέστερα σημεία της εξεταζόμενης περιοχής με συντεταγμένες (Lat,Lon) στο πλέγμα των σφαιρικών συντεταγμένων. Σημειώνεται ότι το γεωγραφικό πλάτος κυμαίνεται από $+90^\circ$ N μέχρι -90° S με βήμα 1.125° ενώ το γεωγραφικό μήκος κυμαίνεται από 0° μέχρι 360° με βήμα 1.125° .
- ❖ Από τις τιμές των μεγεθών P_{r6} , M_t και β στα 4 σημεία του πλέγματος, υπολογίζουμε τα $P_{r6}(Lat,Lon)$, $M_t(Lat,Lon)$ και $\beta(Lat,Lon)$ στην επιθυμητή τοποθεσία εκτελώντας διγραμμική παρεμβολή (bilinear interpolation)
- ❖ Μετασχηματίζουμε το M_t και το β σε M_c , M_s ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} M_c &= \beta M_t \\ M_s &= (1 - \beta) M_t \end{aligned} \quad (1)$$

- ❖ Βρίσκουμε την πιθανότητα να βρέξει στο συγκεκριμένο μέρος (Lat,Lon) για ένα μέσο έτος, P_o , από:

$$P_o(Lat, Lon) = P_{r6}(Lat, Lon) (1 - e^{-0.0079(M_s(Lat, Lon)/P_{r6}(Lat, Lon))}) \quad (2)$$

Εάν $P_{r6}=0$, τότε η πιθανότητα να βρέξει σε αυτήν την περιοχή, δηλαδή η P_o , είναι 0 και η ένταση βροχόπτωσης για οποιοδήποτε ποσοστό του μέσου χρόνου, δηλαδή η R_p , είναι επίσης 0. Σε αυτή την περίπτωση τα επόμενα βήματα αγνοούνται σε ένα έτος.

- ❖ Διαφορετικά, παράγουμε τον ρυθμό βροχόπτωσης, R_p , που υπερβαίνεται για ένα δεδομένο χρονικό ποσοστό $p\%$ του μέσου έτους, όπου $p \leq P_o$, από:

$$R_p(Lat, Lon) = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (3)$$

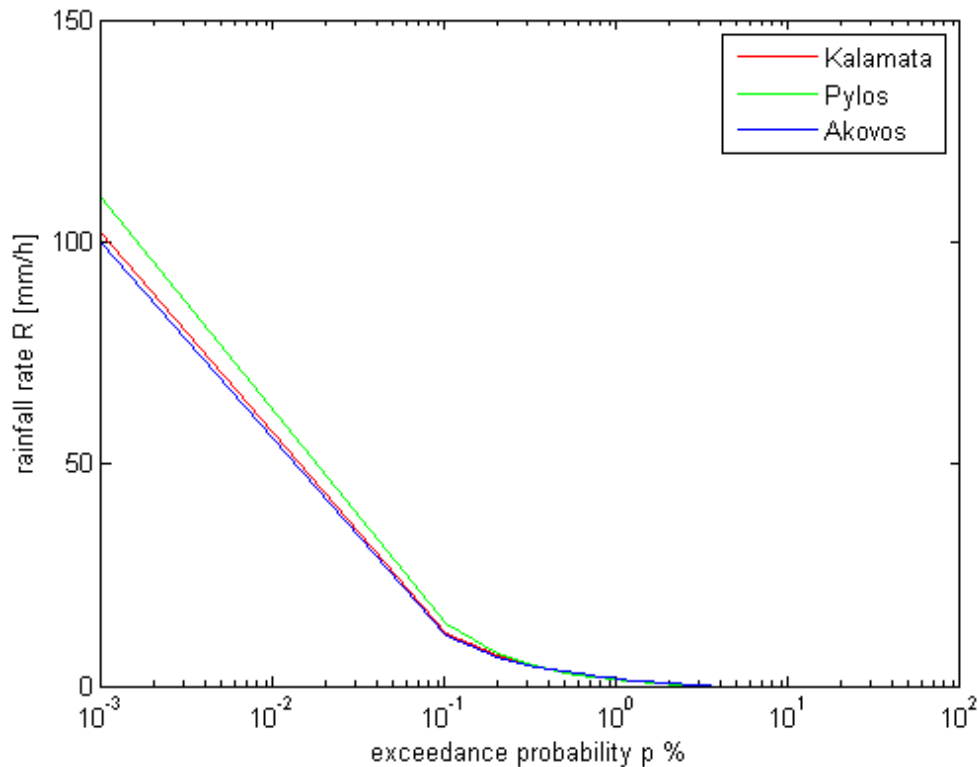
Όπου:

$$\begin{aligned} A &= ab \\ B &= a + c \ln(p / P_o(Lat, Lon)) \\ C &= \ln(p / P_o(Lat, Lon)) \\ a &= 1.09 \\ b &= \frac{(M_c(Lat, Lon) + M_s(Lat, Lon))}{21797 P_o} \\ c &= 26.02b \end{aligned} \quad (4)$$

Σημειώνουμε το R_p ικανοποιεί την πιθανοτική σχέση $P(R > R_p) = p$, όπου το R η τυχαία μεταβλητή της έντασης βροχόπτωσης και p το χρονικό ποσοστό του μέσου έτους ή η πιθανότητα να εκπληρωθεί το ενδεχόμενο $R > R_p$.

Το παραπάνω μοντέλο έχει γραφτεί σε κώδικα MATLAB. Με το πρόγραμμα `itur_p837_5.m`, βγάλαμε το Σχήμα 2.1 της έντασης βροχόπτωσης, που υπερβαίνεται για διάφορα ποσοστά του μέσου έτους για τις περιοχές: 1) Καλαμάτα (37.049° , 22.113°), 2) Πύλος (36.913° , 21.696°) και 3) Άκοβος (37.192° , 22.165°)-

ορεινό χωριό του Δήμου Μεγαλόπολης. Από το Σχήμα 2.1 παρατηρούμε ότι α) για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης $p\%$ η ένταση βροχόπτωσης, που υπερβαίνεται, ακολουθεί την φθίνουσα σειρά ως προς την τιμή της: Πύλος, Καλαμάτα και Άκοβος και β) για δεδομένη ένταση βροχόπτωσης, το χρονικό ποσοστό υπέρβασης ακολουθεί την φθίνουσα σειρά περιοχών ως προς την τιμή του: Πύλος, Καλαμάτα και Άκοβος. Ως εκ τούτου, συμπεραίνουμε ότι στην Πύλο βρέχει εντονότερα (από α) και συχνότερα (από β) από ότι στην Καλαμάτα, και στην Καλαμάτα, με την σειρά της, βρέχει περισσότερο σε σχέση με τον Άκοβο.



Σχήμα 2.1 Ένταση βροχής R_p , υπερβαινόμενη για $p\%$ του μέσου χρόνου για τα 3 μέρη

2.4.2 Πρόβλεψη της κατανομής απόσβεσης από τον ρυθμό βροχόπτωσης

Η ακόλουθη διαδικασία εκτιμά την μακροπρόθεσμη πιθανοτική κατανομή της απόσβεσης λόγω βροχής σε κεκλιμένους ραδιοδιαύλους σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία για συχνότητες λειτουργίας μέχρι τα 55 GHz. Απαιτούνται οι παρακάτω παράμετροι:

$R_{0.01}$: ρυθμός βροχόπτωσης για την τοποθεσία που υπερβαίνεται για το 0.01% ενός μέσου χρόνου (σε mm/h)

h_s : ύψος του επίγειου σταθμού πάνω από το μέσο επίπεδο της θάλασσας

θ : γωνία ανύψωσης (σε μοίρες °)

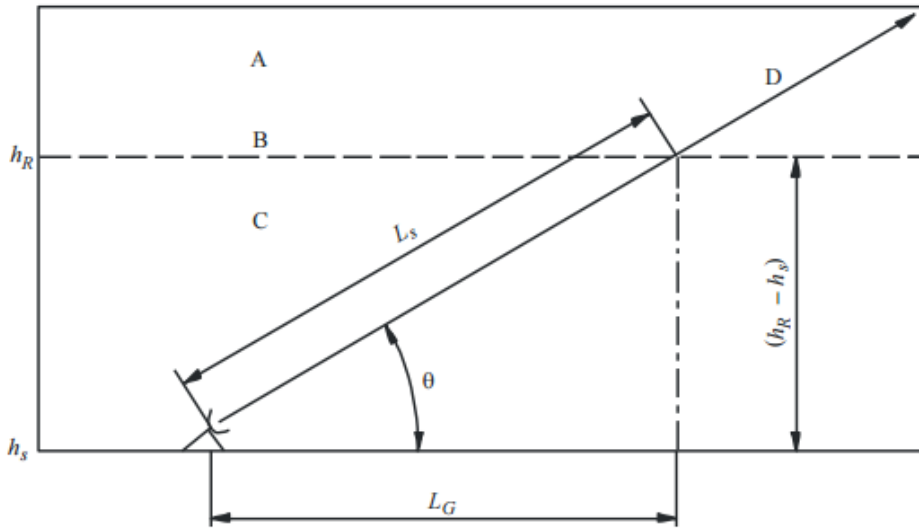
ϕ : γεωγραφικό πλάτος του επίγειου σταθμού (σε μοίρες °)

f : συχνότητα (σε GHz)

R_e : ενεργή ακτίνα της Γης (8500 km)

Εάν δεν γνωρίζουμε το υψόμετρο του επίγειου σταθμού, τότε μία εκτίμηση μπορεί να γίνει από τους χάρτες του τοπογραφικού ύψους της σύστασης ITU-R P.1511.

Στο σχήμα 2.2, αναπαρίσταται η δορυφορική ζεύξη με τα γεωμετρικά της στοιχεία :



Σχήμα 2.2 Σχηματική παράσταση μίας δορυφορικής ζεύξης με τις παραμέτρους εισόδου για την διαδικασία πρόβλεψης της απόσβεσης [ITU-RP.618-12]

Σημειώνουμε ότι τα γράμματα A, B, C, D δηλώνουν κάποια πληροφορία σχετική με την ζεύξη. Πιο συγκεκριμένα :

- A: παγωμένη κατακρήμνιση, δηλαδή οι σταγόνες βροχής είναι σε κατάσταση τήξης
- B: ύψος βροχής
- C: υγρή κατακρήμνιση, δηλαδή οι σταγόνες έχουν ρευστοποιηθεί
- D: ραδιοδιάυλος επίγειος σταθμού- δορυφόρου

- Στην συνέχεια ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία, η οποία αναλύεται με αλγοριθμικό τρόπο σε μορφή βημάτων [ITU-RP.618-12].

Βήμα 1: Καθορίζουμε το ύψος της βροχής h_R όπως δίνεται από την συσταση ITU-R P.839.

Βήμα 2 : Υπολογίζουμε το μήκος του ραδιοδιαύλου, L_s , που βρίσκεται κάτω από το υψος της βροχής από :

$$L_s = \frac{h_R - h_s}{\sin \theta} \quad \text{για } \theta \geq 5^\circ \quad (5)$$

$$L_s = \frac{2(h_R - h_s)}{\left(\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e} \right)^{1/2} + \sin \theta} \quad \text{για } \theta < 5^\circ \quad (6)$$

Εάν το $h_R - h_s \leq 0$, η προβλεπόμενη απόσβεση λόγω βροχής για οποιοδήποτε χρονικό ποσοστό είναι 0 και τα ακόλουθα βήματα παραλείπονται.

Βήμα 3: Υπολογίζουμε την οριζόντια προβολή , L_G , του μήκους του κεκλιμένου ραδιοδιαύλου από :

$$L_G = L_s \cos \theta \quad (7)$$

Βήμα 4: Εντοπίζουμε το ρυθμό βροχόπτωσης, $R_{0.01}$, που υπερβαίνεται για το 0.01% του μέσου έτους. Εάν αυτό το στατιστικό στοιχείο δεν μπορεί να ανευρεθεί από τοπικές πηγές δεδομένων, τότε εκτιμάται από τους χάρτες ρυθμού βροχόπτωσης της σύστασης ITU-R P.837. Εάν $R_{0.01} = 0$, τότε η προβλεπόμενη απόσβεση λόγω βροχής είναι 0 για κάθε χρονικό ποσοστό και τα ακόλουθα βήματα παραλείπονται.

Βήμα 5: Εξασφαλίζουμε την ειδική απόσβεση βροχής, γ_R , χρησιμοποιώντας τους εξαρτημένους από την συχνότητα συντελεστές k , a που δίνονται στην σύσταση ITU-R P.838 και τον ρυθμό βροχόπτωσης $R_{0.01}$ με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$\gamma_R = k(R_{0.01})^a \quad (8)$$

Περισσότερες πληροφορίες για τους συντελεστές k, a της παραπάνω σχέσης και γενικότερα για την σύσταση ITU-R P.838 δίνονται στο τέλος της παρούσας ενότητας 2.4.2

Βήμα 6: Υπολογίζουμε τον συντελεστή μείωσης μήκους, $r_{0.01}$, για 0.01% του χρόνου:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78\sqrt{L_G \gamma_R / f} - 0.38(1 - e^{-2L_G})} \quad (9)$$

Βήμα 7: Υπολογίζουμε τον κάθετο παράγοντα προσαρμογής, $v_{0.01}$, για το 0.01% του χρόνου

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

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

$$L_R = \frac{h_R - h_S}{\sin \theta} \text{ km για } \zeta \geq \theta$$

Εάν $|\varphi| < 36^\circ$ $\chi = 36 - |\varphi|$ μοίρες $^\circ$

Αλλιώς,

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

Βήμα 8: Το ενεργό μήκος του ραδιοδιαύλου είναι:

$$L_E = L_R v_{0.01} \text{ km} \quad (10)$$

Βήμα 9: Η προβλεπόμενη απόσβεση που υπερβαίνεται για το 0.01% ενός μέσου χρόνου βρίσκεται από:

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \text{ dB} \quad (11)$$

Βήμα 10: Η εκτιμημένη απόσβεση που υπερβαίνεται για άλλα ποσοστά ενός μέσου χρόνου, στο εύρος 0.001% έως 5%, καθορίζεται από την απόσβεση που υπερβαίνεται για 0.01% ενός μέσου χρόνου:

$$\text{Εάν } p \geq 1\% \text{ ή } |\varphi| \geq 36^\circ: \beta = 0$$

$$\text{Εάν } p < 1\% \text{ και } |\varphi| < 36^\circ \text{ και } \theta \geq 25^\circ: \beta = -0.005(|\varphi| - 36)$$

$$\text{Αλλιώς: } \beta = -0.005(|\varphi| - 36) + 1.8 - 4.25 \sin \theta$$

$$\text{Και} \quad A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-(0.655+0.033\ln(p)-0.045\ln(A_{0.01})-\beta(1-p)\sin\theta)} \quad \text{dB(12)}$$

Η παρούσα μέθοδος παρέχει μία εκτίμηση της (μακροπρόθεσμης) πιθανοτικής κατανομής της απόσβεσης λόγω βροχής P(A)(longtermrainattenuationprobabilitydistribution). Όταν συγκρίνουμε τις μετρήσεις με τις προβλέψεις της παραπάνω διαδικασίας, απαιτείται η δέουσα επιφύλαξη εξαιτίας της μεγάλης από έτος σε έτος μεταβλητότητας του ρυθμού βροχοπτώσεων .

Στην συνέχεια της παρούσας ενότητας(2.4.2), μελετούμε τον εκθετικό νόμο της ειδικής απόσβεσης λόγω βροχής και τους σχετικούς συντελεστές k,a της σύστασηςITU-RP. 838-3. Σύμφωνα με την σύσταση ITU-RP. 838-3, η ειδική απόσβεση γ_R (dB/km) υπολογίζεται συναρτήσει του ρυθμού βροχόπτωσης R, κάνοντας χρήση του εκθετικού νόμου :

$$\gamma_R = kR^a \quad (13)$$

Οι τιμές για τους συντελεστές k,a εξαρτώνται από την συχνότητα f , στο εύρος 1-1000GHz με βάση τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k \quad (14)$$

$$a = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_a \log_{10} f + c_a \quad (15)$$

Όπου

- f: Συχνότητα (GHz)
- k: είτε το k_H είτε το k_V
- a: είτε το a_H είτε το a_V

Οι παραπάνω εξισώσεις αναπτύχθηκαν από την τεχνική Curve-fitting στους εκθετικούς συντελεστές ,k, a οι οποίοι προήλθαν από υπολογισμούς σκέδασης(scatteringcalculations).

Οι τιμές για τις σταθερές των συντελεστών οριζόντιας πόλωσης, k_H και κατακόρυφης πόλωσης, k_V δίνονται στο Πίνακα 1 και 2 αντίστοιχα. Από την άλλη μεριά, ο Πίνακας 3 δίνει τις τιμές για τις σταθερές του συντελεστή οριζόντιας πόλωσης, a_H , ενώ ο Πίνακας 4 τις αντίστοιχες σταθερές του συντελεστή κατακόρυφης πόλωσης , a_V .

<i>j</i>	<i>a_j</i>	<i>b_j</i>	<i>c_j</i>	<i>m_k</i>	<i>c_k</i>
1	-5.33980	-0.10008	1.13098	-0.18961	0.71147
2	-0.35351	1.26970	0.45400		
3	-0.23789	0.86036	0.15354		
4	-0.94158	0.64552	0.16817		

Πίνακας 2.1 Σταθερές για το k_H (Table1,ITU-RP.838-3)

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3.80595	0.56934	0.81061	-0.16398	0.63297
2	-3.44965	-0.22911	0.51059		
3	-0.39902	0.73042	0.11899		
4	0.50167	1.07319	0.27195		

Πίνακας 2.2 Σταθερές για το k_v (Table2,ITU-RP.838-3)

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0.14318	1.82442	-0.55187	0.67849	-1.95537
2	0.29591	0.77564	0.19822		
3	0.32177	0.63773	0.13164		
4	-5.37610	-0.96230	1.47828		
5	16.1721	-3.29980	3.43990		

Πίνακας 2.3 Σταθερές για το α_H (Table3,ITU-RP.838-3)

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0.07771	2.33840	-0.76284	-0.053739	0.83433
2	0.56727	0.95545	0.54039		
3	-0.20238	1.14520	0.26809		
4	-48.2991	0.791669	0.116226		
5	48.5833	0.791459	0.116479		

Πίνακας 2.4 Σταθερές για το α_v (Table4,ITU-RP.838-3)

Για γραμμική και κυκλική πόλωση και για όλες τις γεωμετρίες ραδιοδιαύλου, οι συντελεστές της (13) μπορούν να υπολογιστούν από τις τιμές των (14) και (15), κάνοντας χρήση των ακόλουθων εξισώσεων:

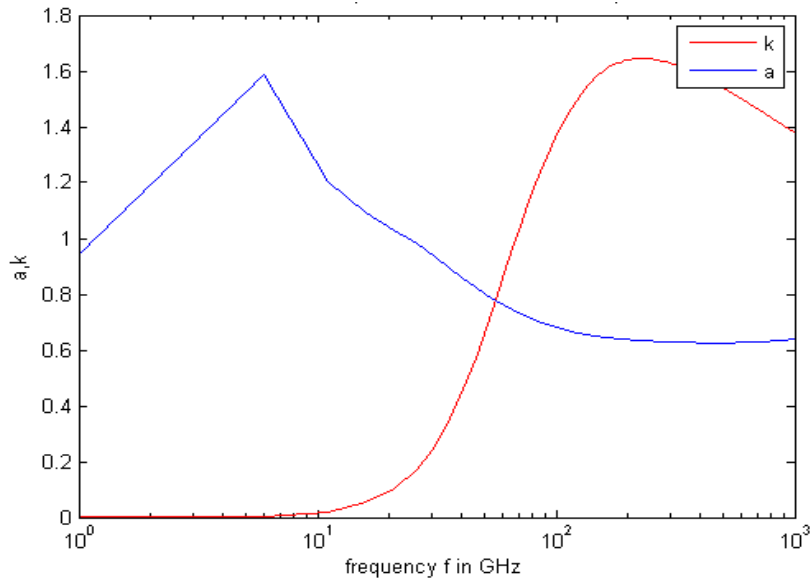
$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau] / 2 \quad (16)$$

$$a = [k_H a_H + k_V a_V + (k_H a_H - k_V a_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau] / 2k \quad (17)$$

όπου

- θ : η γωνία ανύψωσης της ζεύξης
- τ : η γωνία κλίσης πολώσεως σε σχέση με τον ορίζοντα ($\tau=45^\circ$ για κυκλική πόλωση)

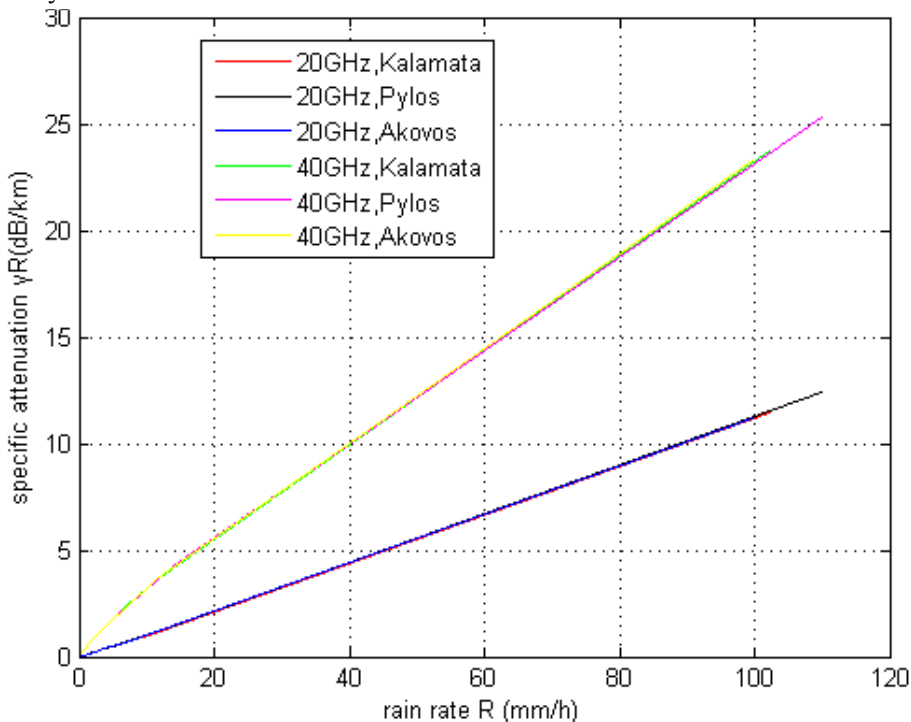
Στο σχήμα 2.3 αποτυπώνονται οι συντελεστές k και a για $\theta=40^\circ$ και $\tau=0^\circ$ (οριζόντια πόλωση) συναρτήσει της συχνότητας f στο εύρος 1-1000GHz.



Σχήμα 2.3 Οι συντελεστές k, a για $\theta=40^\circ$ και $\tau=0^\circ$ συναρτήσει της συχνότητας f στο εύρος 1-1000GHz

Στο σχήμα 2.4,

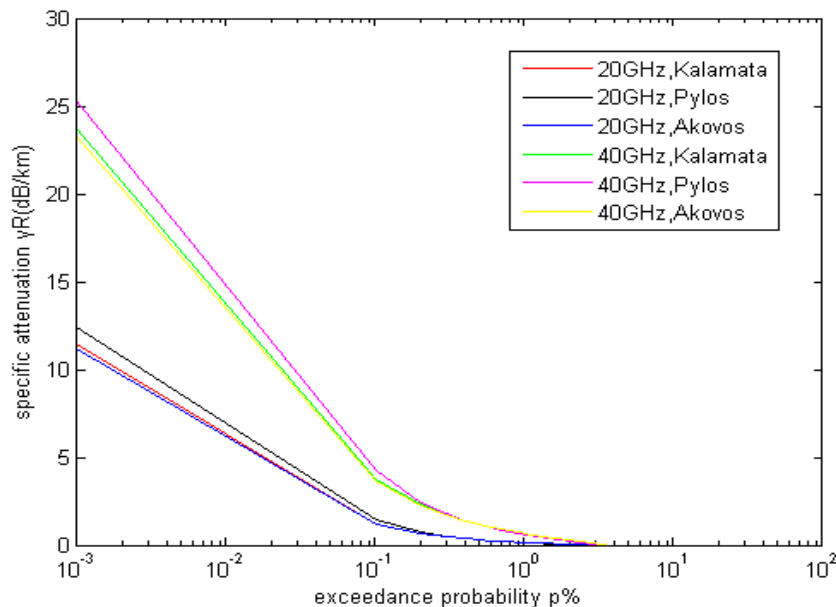
παρουσιάζεται η ειδική απόσβεση λόγω βροχής συναρτήσει του ρυθμού βροχόπτωσης για $\theta=40^\circ$, $\tau=0^\circ$ (οριζόντια πόλωση), $f_1=20\text{GHz}$ και $f_2=40\text{GHz}$ για τις 3 παραπάνω περιοχές. Παρατηρούμε ότι για δεδομένο ρυθμό βροχόπτωσης και για τα 3 μέρη η ειδική απόσβεση λόγω βροχής είναι υψηλότερη για την $f_2=40\text{GHz}$ από ότι στην $f_1=20\text{GHz}$ και ότι για την ίδια συχνότητα οι καμπύλες της ειδικής απόσβεσης συμπίπτουν για τα 3 μέρη. Το τελευταίο δεν θα έπρεπε να μας εκπλήσσει γιατί στις καμπύλες δεν υπεισέρχεται το ποσοστό $p\%$ του μέσου έτους.



Σχήμα 2.4 γ_R συναρτήσει του R , για τα 3 μέρη και τις συχνότητες $f_1=20$ και $f_2=40$ GHz

Στο επόμενο σχήμα, (Σχήμα 2.5) εμπλέκεται η πιθανότητα υπέρβασης ή το χρονικό ποσοστό ενός μέσου έτους $p\%$ με αποτέλεσμα οι καμπύλες ειδικής απόσβεσης να διαφοροποιούνται για τα 3 μέρη στην ίδια συχνότητα. Στο Σχήμα 2.5 ισχύουν οι υποθέσεις του Σχήματος 2.4 για $\theta=40^\circ$, $\tau=0^\circ$. για $\theta=40^\circ$, $\tau=0^\circ$. Παρατηρούμε ότι για σταθερό ποσοστό χρόνου $p\%$ ενός μέσου έτους η ειδική απόσβεση λόγω βροχής

ακολουθεί την φθίνουσα διάταξη : Πύλος , Καλαμάτα , Άκοβος και για τις 2 συχνότητες ή για σταθερή ειδική απόσβεση λόγω βροχής το ποσοστό χρόνου p% ενός μέσου έτους ακολουθεί την εξής φθίνουσα διάταξη : Πύλος , Καλαμάτα , Άκοβος και για τις 2 συχνότητες. Οι 2 παρατηρήσεις ήταν αναμενόμενες καθώς από το Σχήμα 2.3 προέκυψε ότι στην Πύλο βρέχει περισσότερο (σε διάρκεια και ένταση) , ακολουθεί η Καλαμάτα και συμπληρώνει ο Άκοβος.



Σχήμα 2.5 γ_R συναρτήσεως του p% , για τα 3 μέρη και τις συχνότητες $f_1=20$ και $f_2=40$ GHz

2.4.3 Αναγωγή της απόσβεσης σε άλλη συχνότητα

Η αναγωγή συχνότητας είναι μία μέθοδος πρόβλεψης ενός φαινομένου διάδοσης (εν προκειμένω της απόσβεσης λόγω βροχής) σε μία συχνότητα, γνωρίζοντας το εξεταζόμενο φαινόμενο διάδοσης σε μία άλλη συχνότητα. Συνήθως , η συχνότητα για την οποία γίνεται πρόβλεψη είναι υψηλότερη από την συχνότητα του γνωστού φαινομένου διάδοσης . Εάν υπάρχουν αξιόπιστες μετρήσεις απόσβεσης μεγάλης χρονικής διάρκειας σε μία περιοχή για συχνότητα διαφορετική από αυτή, που επιθυμούμε για πρόβλεψη , είναι συχνά προτιμότερο να αναγάγουμε αυτά τα δεδομένα στην επιθυμητή συχνότητα από ότι να χρησιμοποιήσουμε το γενικό μοντέλο της 2.4.2.

Ο λόγος των αποσβέσεων σε 2 διαφορετικές συχνότητες μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την εκάστοτε βροχόπτωση, γενικά όμως ισχύει ότι η μεταβλητότητα του λόγου αυξάνεται με την αύξηση των αποσβέσεων λόγω βροχής .

Στις επόμενες παραγράφους παρέχονται 2 προγνωστικές μέθοδοι [ITU-RP. 618-12]:

- α. Στο τμήμα 2.4.3.1 παρέχεται μία μέθοδος πρόβλεψης της στατιστικής μεταβολής της απόσβεσης λόγω βροχής στην συχνότητα f_2 δοθείσης της απόσβεσης λόγω βροχής στην συχνότητα f_1 , Αυτή η μέθοδος προϋποθέτει γνώση των κατανομών πιθανότητας των αποσβέσεων λόγω βροχής και στις 2 συχνότητες .
- β. Στο τμήμα 2.4.3.2 παρέχεται μία απλουστευμένη μέθοδος πρόβλεψης της ισοπίθανης απόσβεσης λόγω βροχής στην συχνότητα f_2 δοθείσης της απόσβεσης λόγω βροχής στην συχνότητα f_1 . Αυτή η μέθοδος δεν απαιτεί τις κατανομές πιθανότητες των αποσβέσεων λόγω βροχής σε κάθε συχνότητα.

Οι παραπάνω προβλεπτικές μέθοδοι μπορούν να τύχουν εφαρμογής στην τεχνική ελέγχου ισχύος της άνω ζεύξης(ULPC) και στην προσαρμοστική κωδικοποίηση και διαμόρφωση(ACM) [ITU-RP. 618-12], για παράδειγμα :

α) Η πρώτη μέθοδος προβλέπει την στιγμιαία απόσβεση λόγω βροχής στην άνω ζεύξη στην συχνότητα f_2 με βάση την μετρούμενη απόσβεση λόγω βροχής στην κάτω ζεύξη στην συχνότητα f_1 για ρίσκο $p\%$ η πραγματική απόσβεση λόγω βροχής στην άνω ζεύξη να υπερέρχει της προβλεπόμενης τιμής .

β) Η δεύτερη μέθοδος προβλέπει την απόσβεση λόγω βροχής στην πάνω ζεύξη στην συχνότητα f_2 γνωρίζοντας την απόσβεση λόγω βροχής στην κάτω ζεύξη στην συχνότητα f_1 για την ίδια πιθανότητα υπέρβασης .

2.4.3.1 Δεσμευμένη κατανομή της απόσβεσης της νέας συχνότητας

Αυτή η προβλεπτική μέθοδος βασίζεται στην ακόλουθη σχέση ανάμεσα στο A_2 ,δηλ. την στιγμιαία απόσβεση λόγω βροχής στην συχνότητα f_2 , και την A_1 , δηλ. την στιγμιαία απόσβεση λόγω βροχής στην συχνότητα f_1 .

$$\ln(A_2) = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \sqrt{1-\xi^2} \ln(A_1) + \left(\mu_2 - \frac{\sigma_2 \mu_1}{\sigma_1} \sqrt{1-\xi^2} \right) + \sigma_2 \xi \times n \quad (18)$$

όπου πείναι η κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση 1 . Η ακόλουθηβηματική διαδικασία προβλέπει την δεσμευμένη πιθανότητα $P(A_2 > a_2 | A_1 = a_1)$, δηλαδή την συμπληρωματική αθροιστική συνάρτηση κατανομής πιθανότητας(ccdf) της απόσβεσης λόγω βροχής στην συχνότητα f_2 δοθείσης της απόσβεσης λόγω βροχής στην συχνότητα f_1 .

Αυτή η μέθοδος υποθέτει ότι οι $P(A_1 > a_1 | A_1 > 0)$ και $P(A_2 > a_2 | A_2 > 0)$, δηλαδή οι συμπληρωματικές αθροιστικές κατανομές πιθανότητας(ccdf) της απόσβεσης λόγω βροχής στον ραδιοδιάυλο στις συχνότητες f_1 και f_2 δοθέντος του γεγονότος ότι υπάρχει απόσβεση, χαρακτηρίζονται από την λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους (μ_1, σ_1) και (μ_2, σ_2) αντίστοιχα:

$$P(A_1 > a_1 | A_1 > 0) = Q\left(\frac{\ln a_1 - \mu_1}{\sigma_1}\right) \quad (19a)$$

$$P(A_2 > a_2 | A_2 > 0) = Q\left(\frac{\ln a_2 - \mu_2}{\sigma_2}\right) \quad (19b)$$

$$\text{Όπου, } Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (20)$$

Οι παράμετροι $\mu_1, \sigma_1, \mu_2, \sigma_2$ προέρχονται από την στατιστική των αποσβέσεων στις συχνότητες f_1 και f_2 για το ίδιο μονοπάτι διάδοσης . Αυτες οι κατανομές απόσβεσης μπορούν να υπολογιστούν από τοπικές μετρήσεις ή από την μέθοδο πρόβλεψης της απόσβεσης λόγω βροχής της §2.4.2 για την συγκεκριμένη τοποθεσία και για την εξεταζόμενη γωνία ανύψωσης . Η πιθανοτική κατανομή των αποσβέσεων για τις συχνότητες f_1 και f_2 πρέπει να προέρχεται από την ίδια πηγή[ITU-RP. 618-12] .

Οι παρακάτω παράμετροι είναι απαραίτητοι για χρήση του μοντέλου:

f_1 : μικρότερη συχνότητα με γνωστή απόσβεση (GHz)

f_2 : μεγαλύτερη συχνότητα με προς πρόβλεψη απόσβεση (GHz)

P_{rain} : πιθανότητα βροχής (%)

μ_1 : μέση τιμή της λογαριθμοκανονικής κατανομής της απόσβεσης λόγω βροχής στην f_1

σ_1 : Τυπική απόκλιση της λογαριθμοκανονικής κατανομής της απόσβεσης λόγω βροχής στην f_1

μ_2 : μέση τιμή της λογαριθμοκανονικής κατανομής της απόσβεσης λόγω βροχής στην f_2

σ_2 : Τυπική απόκλιση της λογαριθμοκανονικής κατανομής της απόσβεσης λόγω βροχής στην f_2

Για καθεμία από τις συχνότητες, f_1 και f_2 , εκτελούμε μία λογαριθμοκανονική προσαρμογή στην απόσβεση λόγω βροχής συναρτήσει της πιθανότητας εμφάνισης ως ακολούθως [ITU-RP. 618-12] :

- Υπολογίζουμε το $P_{rain}(= P(R > 0))$, R: ένταση βροχόπτωσης) το χρονικό ποσοστό της βροχής στον ραδιοδίαυλο . Το P_{rain} μπορεί να προβλεφθεί από το $P_o(Lat, Lon)$ της σύστασης ITU-R P.837 για τις γεωγραφικές συντεταγμένες της εξεταζόμενης τοποθεσίας.
- Για f_i , όπου $i=1$ και 2 , κατασκευάζουμε τα ζεύγη , $[P_i, A_{i,1}]$ και $[P_i, A_{i,2}]$ όπου $P_i(\%)$ είναι το χρονικό ποσοστό που η απόσβεση λόγω βροχής υπερβαίνει το $A_{i,1}$,όπου απαιτείται ότι $P_i \leq P_{rain}$. Παρότι οι ειδικές τιμές του P_i θα πρέπει να επιλεγθούν ώστε να περιβάλλουν το ζητούμενο εύρος πιθανοτήτων ,ένα προτεινόμενο σύνολο χρονικών ποσοστών είναι το: 0.01 , 0.02 , 0.03 , 0.05 , 0.1 , 0.2 0.3, 0.5, 1, 2, 3 και 5% , με τον περιορισμό $P_i \leq P_{rain}$.
- Διαιρούμε τα χρονικά ποσοστά , P_i , με την πιθανότητα εμφάνισης βροχής , P_{rain} , για να πάρουμε τις υπό συνθήκη πιθανότητες απόσβεσης λόγω βροχής $p_i = P_i/P_{rain}$.
- Μετασχηματίζουμε τις 2 ακολουθίες ζευγών(με 2 ζεύγη έκαστη) $[p_i, A_{i,1}]$ και $[p_i, A_{i,2}]$ σε $[Q^{-1}(p_i), \ln A_{i,1}]$ και $[Q^{-1}(p_i), \ln A_{i,2}]$.
- Εκτιμούμε τις παραμέτρους $\mu_1, \sigma_1, \mu_2, \sigma_2$ εφαρμόζοντας την μέθοδο των ελαχιστων τετραγώνων στις 2 ακολουθίες $\ln A_{i,1} = \sigma_1 Q^{-1}(p_i) + \mu_1$ και $\ln A_{i,2} = \sigma_2 Q^{-1}(p_i) + \mu_2$.
- Υπολογίζουμε τον παράγοντα εξάρτησης από την συχνότητα , ξ , :

$$\xi = 0.19 \left[\frac{f_2}{f_1} - 1 \right]^{0.57} \quad (21)$$

- Υπολογίζουμε τον υπό συνθήκη μέσο , $\mu_{2/1}$, και την υπό συνθήκη τυπική απόκλιση , $\sigma_{2/1}$, ως ακολούθως:

$$\mu_{2/1} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \sqrt{1-\xi^2} \ln(a_1) + \left(\mu_2 - \frac{\sigma_2 \mu_1}{\sigma_1} \sqrt{1-\xi^2} \right) \quad (22)$$

$$\sigma_{2/1} = \sigma_2 \xi \quad (23)$$

Η $P(A_2 > a_2 | A_1 = a_1)$, συμπληρωματική αθροιστική συνάρτηση κατανομής της A_2 στην f_2 , δοθείσης της $A_1 = a_1$ στην συχνότητα f_1 , είναι [ITU-RP. 618-12]:

$$P(A_2 > a_2 | A_1 = a_1) = Q \left(\frac{\ln(a_2) - \mu_{2/1}}{\sigma_{2/1}} \right) \quad (24)$$

Όπου a_1 (dB) είναι η απόσβεση λόγω βροχής στην f_1 , και $0 \leq P \leq 1$.

$HP(A_2 > a_2 | A_1 = a_1)$, αναπαριστά την πιθανότητα η απόσβεση A_2 στην συχνότητα f_2 , να υπερέχει του a_2 (dB) δοθέντος του γεγονότος ότι $A_1 = a_1$ στην συχνότητα f_1 .

Η τιμή του a_2 (dB) μπορεί να υπολογιστεί για μία υποτιθέμενη τιμή του P ως ακολούθως:

$$\alpha_2 = \exp(\sigma_{2/1} Q^{-1}(P) + \mu_{2/1}) \quad (25)$$

Παρά το γεγονός ότι αυτή η διαδικασία δημιουργήθηκε για την απόσβεση λόγω βροχής , μπορεί να χρησιμοποιηθεί γενικότερα για να προβλέψει την κατανομή της συνολικής απόσβεσης (απορρόφηση αερίων , απόσβεση βροχής , απόσβεση σύννεφων και διαλείψεις σπινθηρισμών) . Η δε ακρίβεια της μεθόδου βρίσκεται στο στάδιο της διερεύνησης .

2.4.3.2 Αναγωγή συχνότητας της απόσβεσης λόγω βροχής

Εάν υπάρχουν αξιόπιστα μετρητικά δεδομένα απόσβεσης σε μια συχνότητα , ο ακόλουθος εμπειρικός τύπος που δίνει άμεσα τον λόγο απόσβεσης σαν συνάρτηση των 2 συχνοτήτων και της γνωστής απόσβεσης μπορεί να εφαρμοστεί για την αναγωγή συχνότητας στον ίδιο ραδιοδιάλο και στο εύρος συχνοτήτων 7 - 55 (GHz) [ITU-RP. 618-12] :

$$A_2 = A_1 (\varphi_2 / \varphi_1)^{1-H(\varphi_1, \varphi_2, A_1)} \quad (26)$$

Όπου :

$$\varphi(f) = \frac{f^2}{1 + 10^{-4} f^2} \quad (27a)$$

$$H(\varphi_1, \varphi_2, A_1) = 1.12 \times 10^{-3} (\varphi_2 / \varphi_1)^{0.5} (\varphi_1 A_1)^{0.55} \quad (27b)$$

Τα A_1 και A_2 είναι οι ισοπίθανες τιμές της απόσβεσης που υπερβαίνονται στις συχνότητες f_1 και f_2 , αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι για την αναγωγή της απόσβεσης προτιμώνται αξιόπιστες μετρήσεις απόσβεσης από ότι μετρήσεις έντασης βροχής .

2.4.4 Χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων

2.4.4.1 Μεταβλητότητα στον χώρο και στον χρόνο

Οι κατανομές πιθανότητας της απόσβεσης διάδοσης του σήματος εν γένει (ειδικά για βροχή) που υπολογίζονται στον ίδιο ραδιοδιάλο , στην ίδια συχνότητα, πόλωση και γωνία ανύψωσης μπορεί να επιδεικνύουν αξιοσημείωτες ετήσιες μεταβολές [ITU-RP. 618-12]. Στο εύρος των 0.001% μέχρι 0.1% ενός χρόνου , οι τιμές απόσβεσης σε ένα σταθερό επίπεδο πιθανότητας παρατηρείται να μεταβάλλονται περισσότερο από 20% κατά rms τιμή. Όταν τα μοντέλα, που μελετήσαμε για πρόβλεψη απόσβεσης ή αναγωγής συχνότητας, χρησιμοποιούνται για να αναγάγουμε μετρήσεις σε μία τοποθεσία προκειμένου να εκτιμήσουμε τα χαρακτηριστικά ενός άλλου ραδιοδιαύλου στην ίδια τοποθεσία , οι μεταβολές αυξάνονται περισσότερο από 25% κατά rms τιμή .

2.4.4.2 Διάρκεια των διαλείψεων

Η διάρκεια των διαλείψεων λόγω βροχής, οι οποίες ξεπερνούν ένα καθορισμένο επίπεδο απόσβεσης, είναι κατά προσέγγιση λογαριθμικανονικά κατανομημένη. Η μέση διάρκεια τέτοιων διαλείψεων είναι της τάξης των μερικών λεπτών. Δεν φαίνεται καμία σημαντική εξάρτηση αυτών των κατανομών από το βάθος των διαλείψεων στις περισσότερες μετρήσεις για διαλείψεις μικρότερες από 20 dB, γεγονός που συνεπάγεται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της διάρκειας των διαλείψεων, που συμβαίνουν σε χαμηλότερα επίπεδα ή σε υψηλότερες συχνότητες, συντίθεται από ένα μεγαλύτερο αριθμό μεμονωμένων διαλείψεων, με περίπου ίδια κατανομή διάρκειας. Διαλείψεις σε ένα καθορισμένο επίπεδο τείνουν να αυξάνονται με μείωση της γωνίας ανύψωσης.

Σύμφωνα με το ITU-RP. 618-12, για τον σχεδιασμό ολοκληρωμένων ψηφιακών δορυφορικών υπηρεσιών, απαιτούνται δεδομένα για την κατανομή της απόσβεσης με διάρκεια μικρότερη από τα 10 sec. Αυτές οι πληροφορίες είναι ιδιαίτερα σημαντικές για το αντίστοιχο κατάφλι διακοπής (συγκεκριμένο επίπεδο απόσβεσης), όπου γεγονότα με διάρκεια μεγαλύτερη των 10 sec συνεισφέρουν στην μη διαθεσιμότητα του συστήματος, ενώ γεγονότα με μικρότερη διάρκεια επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος κατά την φάση λειτουργίας του. Τα υπάρχοντα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι στην πλειονότητα των περιπτώσεων, ο χρόνος υπέρβασης κατά την λειτουργία του συστήματος είναι το 2% με 10% του καθαρού χρόνου υπέρβασης. Παρά ταύτα, σε χαμηλές γωνίες ανύψωσης όπου οι βραχείες διακυμάνσεις του σήματος εξαιτίας του τροποσφαιρικού σπινθηρισμού γίνονται στατιστικά σημαντικές, υπάρχουν κάποιες περιπτώσεις για τις οποίες ο χρόνος υπέρβασης κατά την λειτουργία του συστήματος είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από την περίπτωση υψηλότερων γωνιών ανύψωσης σε δορυφορικούς ραδιοδιαύλους.

2.4.4.3 Ρυθμός διαλείψεων

Υπάρχει ευρεία συναίνεση στο γεγονός ότι οι κατανομές των θετικών και αρνητικών ρυθμών διαλείψεων είναι λογαριθμικανονικά κατανομημένες και πολύ παρόμοιες μεταξύ τους. Η δε εξάρτηση του ρυθμού διαλείψεων από το βάθος διαλείψεων δεν έχει ακόμη αποδειχθεί [ITU-RP. 618-12].

2.4.4.4 Συσχέτιση των στιγμιαίων τιμών της απόσβεσης σε διαφορετικές συχνότητες

Τα δεδομένα του στιγμιαίου λόγου των τιμών απόσβεσης λόγω βροχής σε διαφορετικές συχνότητες παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για μια ποικιλία προσαρμοστικών τεχνικών αντιμετώπισης των διαλείψεων. Ο λόγος αναγωγής συχνότητας έχει βρεθεί και χαρακτηρίζεται από λογαριθμικανονική κατανομή, ενώ επηρεάζεται τόσο από τον τύπο όσο και από την θερμοκρασία της βροχής [ITU-RP. 618-12]. Επίσης, οι μετρήσεις αποκαλύπτουν ότι οι σύντομες μεταβολές στο λόγο απόσβεσης μπορεί να είναι εξαιρετικά σημαντικές και αναμένεται να αυξάνονται με μείωση της γωνίας ανύψωσης.

2.5 Φαινόμενα καθαρής ατμόσφαιρας

Εκτός από την ατμοσφαιρική απορρόφηση, τα φαινόμενα καθαρής ατμόσφαιρας απουσία των κατακρημνίσεων (βροχοπτώσεων, χιονοπτώσεων, χαλαζοπτώσεων) είναι απίθανο να προκαλέσουν έντονες διαλείψεις σε δορυφορικά συστήματα τηλεπικοινωνιών που λειτουργούν σε συχνότητες κάτω από τους 10GHz και σε γωνίες ανύψωσης πάνω από 10°. Για χαμηλές γωνίες ανύψωσης ($\leq 10^\circ$) και για συχνότητες πάνω από 10GHz, παρόλα αυτά, οι τροποσφαιρικοί σπινθηρισμοί μπορούν περιστασιακά να προκαλέσουν σοβαρή υποβάθμιση της επίδοσης του συστήματος. Για πολύ χαμηλές γωνίες ανύψωσης ($\leq 4^\circ$ σε νησιά και

$\leq 5^\circ$ σε παράκτιες ή πάνω από θάλασσες, λίμνες ή ποτάμια) , οι διαλείψεις λόγω πολυόδευσης μπορεί να γίνουν ιδιαίτερα ισχυρές [ITU-R P. 618-12].

Τα κύρια φαινόμενα καθαρής ατμόσφαιρας είναι [ITU-R P. 618-12]:

- α) η μείωση του κέρδους κεραίας εξαιτίας της ασυνέχειας του μετώπου του προσπίπτοντος κύματος
- β) οι απώλειες λόγω εξάπλωσης της ακτίνας.

Σχετικά με το πρώτο , το φαινόμενο αυτό αυξάνεται με αύξηση της συχνότητας λειτουργίας και μείωση της γωνίας ανύψωσης και αποτελεί συνάρτηση της διαμέτρου της κεραίας . Παρά ταύτα , το φαινόμενο αυτό αγνοείται επειδή δεν προκαλεί συγκριτικά ιδιαίτερο πρόβλημα . Όσον αφορά το δεύτερο φαινόμενο, η συνεχής μείωση του δείκτη διάθλασης με το ύψος προκαλεί κάμψη της ακτίνας με αποτέλεσμα να εμφανίζεται το φαινόμενο της απο-εστίασης (defocusing) και των συνοδευόμενων απωλειών σε χαμηλές γωνίες ανύψωσης. Το μέγεθος των απωλειών της απο-εστίασης της ακτίνας της κεραίας είναι ανεξάρτητο της συχνότητας , για το εύρος 1-100GHz.

2.6 Τροποσφαιρικοί σπινθηρισμοί και διαλείψεις πολυόδευσης

Οι σπινθηρισμοί προκαλούν διακυμάνσεις του πλάτους και της φάσης του σήματος και οφείλονται στις μεταβολές του δείκτη διάθλασης της τροποσφαιρας κατά μήκος του ραδιοδιαύλου. Ο δείκτης διάθλασης σε κάθε περιοχή εξαρτάται από τη μέση θερμοκρασία, τη μέση υγρασία και τη πίεση των υδρατμών στη συγκεκριμένη περιοχή. Οι σπινθηρισμοί πλάτους αυξάνονται με την συχνότητα και με το μήκος του ραδιοδιαύλου και μειώνονται καθώς μειώνεται το εύρος δέσμης της κεραίας εξαιτίας της μεσοστάθμισης του ανοίγματος της . Μετρήσεις δείχνουν ότι οι μηνιαία ενεργές μέσες τιμές των διακυμάνσεων (rms) είναι καλά συσχετισμένες με την υγρασία της ραδιο-διαθλαστικότητας N_{wet} , η οποία εξαρτάται από το περιεχόμενο της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς [ITU-RP. 618-12] .

Υπάρχουν 3 τμήματα της μεθόδου πρόβλεψης των διαλείψεων εξαιτίας του σπινθηρισμού πλάτους :

- 1) Πρόγνωση των διαλείψεων των σπινθηρισμών πλάτους για γωνίες ανύψωσης $\geq 5^\circ$
- 2) Πρόγνωση των διαλείψεων των σπινθηρισμών πλάτους με βάθος ≥ 25 dB
- 3) Πρόγνωση των διαλείψεων των σπινθηρισμών πλάτους στην μεταβατική περιοχή ανάμεσα στις 2 κατανομές

Όπως σημειώνεται στην σύσταση ITU-RP.834, ένα διαδιδόμενο ραδιοκύμα ανάμεσα σε έναν επίγειο σταθμό και έναν δορυφορικό σταθμό κάμπτεται εξαιτίας του φαινομένου της ατμοσφαιρικής διάθλασης, με αποτέλεσμα η πραγματική γωνία ανύψωσης να είναι μεγαλύτερη από την γωνία ανύψωσης ελεύθερου χώρου. Εάν η γωνία ανύψωσης ελεύθερου χώρου είναι μεγαλύτερη ή ίση των 5° , η διαφορά ανάμεσα σε πραγματική και ελεύθερου χώρου γωνία ανύψωσης είναι αμελητέα, και τότε χρησιμοποιείται η αντίστοιχη προγνωστική μέθοδος 1. Σημειώνεται ότι η προγνωστική μέθοδος στην περιοχή μετάβασης είναι η κλίση της κατανομής που περιγράφεται από την 1 για γωνία ανύψωσης των 5° και κλίση της κατανομής όπως περιγράφεται στην 2 για βάθος διαλείψεων σπινθηρισμών 25 dB.

Για πολύ μικρά χρονικά ποσοστά και για υψηλά βάθη διαλείψεων (μεγαλύτερα των 10dB) οι διαλείψεις σπινθηρισμών σε πολύ μικρές γωνίες ανύψωσης μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικές . Οι παρούσες διαλείψεις παρατηρείται να έχουν χαρακτήρα όμοιο με τις διαλείψεις πολυόδευσης των επίγειων ασύρματων ζεύξεων . Όμοια με τις επίγειες ζεύξεις , η κατανομή του βάθους διαλείψεων για πολύ μικρές γωνίες

ανύψωσης παρουσιάζει συσχέτιση με την κλίση της διαθλαστικότητας . Η ολική κατανομή διαλείψεων παρουσιάζει μία σταδιακή μετάβαση (με κλίση 10 dB/δεκάδα) σε μικρά χρονικά ποσοστά. Οι προγνωστικές μέθοδοι 2 και 3 για βαθιές και επιφανειακές διαλείψεις της ολικής κατανομής , αντίστοιχα , χρησιμοποιούν την κλίση της διαθλαστικότητας , p_L , για να περιγράψουν τις κλιματικές εναλλαγές στην κατανομή . Η καθαρή κατανομή διαλείψεων εξαιτίας των τροποσφαιρικών διαθλαστικών φαινομένων , $A(p)$, είναι ο συνδυασμός της εξάπλωσης της ακτίνας , του σπινθηρισμού και της πολυόδευσης [ITU-RP. 618-12].

2.7 Εξασθένιση από άμμο και αμμοθύελλες

Πολύ λίγα είναι γνωστά για τις επιδράσεις της άμμου και της αμμοθύελλας σε ραδιοσήματα σε κεκλιμένους ραδιοδιαύλους . Διαθέσιμα δεδομένα υποδεικνύουν ότι σε συχνότητες κάτω των 30GHz , υψηλές σωματιδιακές συγκεντρώσεις και/ή υψηλή υγρασία απαιτούνται για να προκαλέσουν αξιοσημείωτα εμπόδια στην διάδοση του σήματος [ITU-RP. 618-12]. .

2.8 Συνολική απόσβεση εξαιτίας πολλαπλών πηγών ατμοσφαιρικής απόσβεσης

Μέχρι αυτό το σημείο, θεωρήσαμε ότι στη δορυφορική ζεύξη επικρατεί ένα μόνο φαινόμενο διάδοσης και αναλόγως με το ποιο ήταν, υπολογίζαμε την απόσβεση που προκαλεί. Στην πραγματικότητα τα φαινόμενα διάδοσης που έχουν αναφερθεί συνυπάρχουν και γι αυτό τίθεται το ερώτημα πόσο ανεξάρτητα είναι μεταξύ τους. Η μέθοδος με την οποία υπολογίζουμε την συνολική απόσβεση του σήματος στη ζεύξη θεωρεί κάποια φαινόμενα μερικώς εξαρτημένα και κάποια άλλα τελείως ανεξάρτητα. Επίσης, η συνολική απόσβεση αναπαριστά το συνδυαστικό αποτέλεσμα των εξασθενήσεων της βροχής (ή άλλων κατακρημνίσεων), των αερίων , των νεφώσεων και του σπινθηρισμού. Τελικώς η σχέση που δίνει τη συνολική απόσβεση είναι η ακόλουθη [ITU-RP. 618-12] :

$$A_t(p) = A_G(p) + \sqrt{(A_R(p) + A_C(p))^2 + A_S^2(p)} \quad (\text{dB}) \quad (28)$$

Όπου :

p : πιθανότητα υπέρβασης της απόσβεσης, που κυμαίνεται από 0.001% έως 50%

$A_G(p)$: Απόσβεση από τα αέρια της ατμόσφαιρας (υδρατμοί και οξυγόνο) (dB) [ITU-R P.676]

$A_R(p)$: Απόσβεση λόγω βροχόπτωσης (dB) , όπως υπολογίζεται από την (12)

$A_C(p)$: Απόσβεση λόγω νεφώσεων (dB) [ITU-R P.840]

$A_S(p)$: Απόσβεση λόγω τροποσφαιρικών σπινθηρισμών (dB), όπως υπολογίζεται από [ITU-RP. 618-12]

Από τη σχέση (28) βλέπουμε ότι η μέθοδος θεωρεί την απόσβεση λόγω βροχής και την απόσβεση λόγω νεφώσεων ασυσχέτιστες μεταξύ τους. Θεωρεί την απόσβεση που εισάγουν τα δύο αυτά φαινόμενα μερικώς συσχετισμένη με την απόσβεση που οφείλεται σε τροποσφαιρικούς σπινθηρισμούς. Και τέλος θεωρεί την απόσβεση που προκαλούν η βροχή, τα σύννεφα και οι σπινθηρισμοί ασυσχέτιστη με την απόσβεση λόγω απορρόφησης της ισχύος του σήματος από αέρια της ατμόσφαιρας [Φάσσας, 2012].

Επίσης, επειδή για πιθανότητες μικρότερες από 1.0% η απόσβεση λόγω βροχής υπολογίζει μεγάλο μέρος της απόσβεσης που προκαλούν τα σύννεφα και τα αέρια στην ατμόσφαιρα θεωρούμε το εξής [ITU-RP. 618-12]:

$$A_C(p) = A_C(1\%) \quad \text{για } p < 1.0\%(29)$$

$$A_G(p) = A_G(1\%) \quad \text{για } p < 1.0\%(30)$$

Πρέπει να αναφέρουμε ότι η βροχή είναι ο καθοριστικός παράγοντας εξασθένησης σε συχνότητες από 10 έως τα 50 GHz. Για μεγαλύτερες συχνότητες η εξασθένηση που οφείλεται στην απορρόφηση από τα αέρια της ατμόσφαιρας γίνεται ολοένα και πιο έντονη και μάλιστα αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής εξασθένησης στα 60 GHz [Φάσσας,2012].

2.9 Βιβλιογραφία

[ITU-R P.618-12] ITU-R Propagation Series, P.618-12, “Propagation data and prediction methods required for the Design of Earth-space telecommunication systems”, 2015

[ITU-R P.837-5] ITU-R Propagation Series, P.837-5, “Characteristics of Precipitation for Propagation Modelling”, 2007

[ITU-R P.838-3] ITU-R Propagation Series, P.838-3, “Specific attenuation model for rain for use in prediction Methods”, 2005

[Φάσσας,2012] Ι. Φάσσας, «Χωρητικότητα και διαθεσιμότητα δορυφορικών ευρυζωνικών δικτύων νέας γενιάς», Διπλωματική Εργασία, ΗΜΜΥ ΕΜΠ, 2012

[Panagopoulos, 2004] A. D. Panagopoulos, P.M. Arapoglou, P.G. Cottis [2004], “Satellite Communications at Ku, Ka and V bands, Propagation Impairments and Mitigation Techniques”, IEEE Communication Surveys and Tutorials, Vol.6, No.3

3^ο Κεφάλαιο

Πρόβλεψη Απόσβεσης λόγω Βροχής με την Τεχνική Συνθετικής Καταιγίδας (SST)

3.1 Εισαγωγή

Η σχεδίαση δορυφορικών συστημάτων σε συχνότητες υψηλότερες των 10 GHz απαιτεί την όσο τον δυνατόν ακριβέστερη γνώση του περιθωρίου ισχύος, σαν συνάρτηση της πιθανότητας διακοπής του συστήματος, προκειμένου να υπερνικήσει τις απώλειες διάδοσης λόγω βροχής. Παρά το γεγονός ότι έχουν προταθεί αρκετά προβλεπτικά μοντέλα, το παρόν πρόβλημα δεν έχει επιλυθεί ικανοποιητικά με αποτέλεσμα να αναζητούνται πιο ακριβείς μέθοδοι. Αυτός ήταν ο λόγος για τον οποίο αναπτύχθηκε από τον Ιταλό ερευνητή Matricciani η τεχνική SST, μία τεχνική που θα αναλύσουμε στο παρόν κεφάλαιο.

Σύμφωνα με το [Matricciani,1996], η τεχνική SST αποτελεί ένα φυσικό-μαθηματικό μοντέλο της δυναμικής εξέλιξης της απόσβεσης διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων λόγω βροχής που βασίζεται στην χρονοσειρά του ρυθμού βροχόπτωσης (ή έντασης βροχόπτωσης-οι 2 όροι ένταση και ρυθμός είναι ταυτόσημοι και μπορούν να χρησιμοποιούνται χωρίς καμία διαφορά) στην εξεταζόμενη περιοχή. Αρχικά, γίνεται καταγραφή της χρονοσειράς του ρυθμού βροχόπτωσης σε δεδομένη ζεύξη (δεδομένα τα μεγέθη της συχνότητας, της πόλωσης του κύματος και της γωνίας ανύψωσης του ραδιοδιαύλου) στην υποκείμενη περιοχή (γνωστές οι γεωγραφικές συντεταγμένες και το υψόμετρο της περιοχής).

Έπειτα, θεωρώντας την υπόθεση του Taylor για παγωμένη ροή (frozenflow), η μετρούμενη από κάποιο βροχόμετρο (rain gauge) χρονοσειρά του ρυθμού βροχόπτωσης, μετατρέπεται σε χωρική σειρά ρυθμού βροχόπτωσης κατά μήκος του οριζόντιου (για επίγειες ζεύξεις) ή του κεκλιμένου (για δορυφορικές ζεύξεις) ραδιοδιαύλου χρησιμοποιώντας μία εκτίμηση της ταχύτητας της καταιγίδας κατά μήκος του ραδιοδιαύλου v . Η παρούσα μέθοδος μετατροπής του χρόνου σε απόσταση καλείται Synthetic Storm Technique (SST) και εφαρμόστηκε αρχικά επιτυχώς σε επίγειες ραδιοζεύξεις.

Το μοντέλο SST ελέγχθηκε ως προς τις κατανομές πιθανότητας της απόσβεσης λόγω βροχής σε 3 διαφορετικές περιοχές της Ιταλίας α) Fucino, β) Gera Lario and γ) Spinod'Adda στην συχνότητα των 11,6 GHz στο πλαίσιο το προγράμματος διάδοσης SIRIO, στο οποίο καταγράφονταν ταυτόχρονα για 13 χρόνια, χρονοσειρές έντασης βροχής για τις παραπάνω περιοχές.

3.2 Μεθοδολογία της SST

3.2.1 Γενικά στοιχεία της SST

Καθώς η βροχή μετακινείται πάνω από το βροχόμετρο, ο μετρούμενος ρυθμός βροχόπτωσης μεταβάλλεται με τον χρόνο εξαιτίας 2 φαινομένων: α) της οριζόντιας μεταφοράς της χωρικής κατανομής της βροχής και β) των συμβαινόμενων χρονικών αλλαγών που αποτυπώνονται στο βροχόμετρο. Τα 2 παραπάνω φαινόμενα εμφανίζονται μαζί και δεν διαχωρίζονται εύκολα στις καταγραφές του βροχόμετρου. Εάν μετατρέψουμε μία χρονοσειρά έντασης σε μία χωρική σειρά έντασης βροχοπτώσεων, χρησιμοποιώντας μια εκτίμηση της

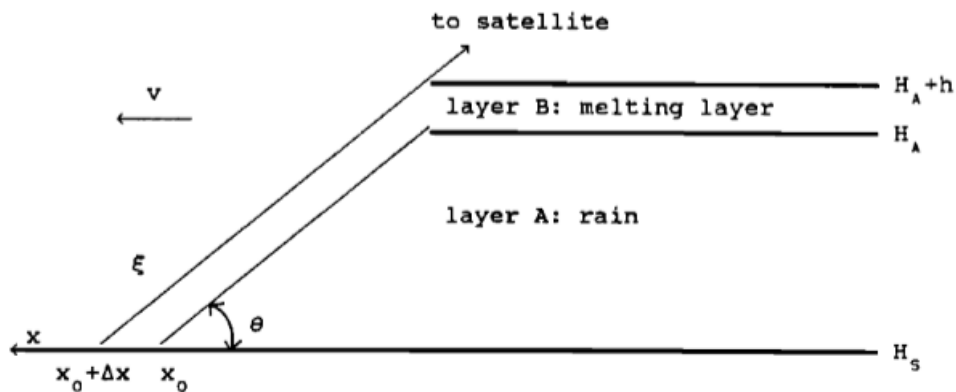
ταχύτητας της καταιγίδας v κατά μήκος του ραδιοδιαύλου, τότε έχουμε δημιουργήσει μία ‘συνθετική καταιγίδα’ (‘synthetic storm’). Είναι αλήθεια ότι οι στατιστικές ιδιότητες της έντασης της βροχής ενός μεγάλου αριθμού ‘συνθετικών καταιγίδων’ προσεγγίζουν εκείνες των πραγματικών καταιγίδων.

Σύμφωνα με τον [Matricciani,1996] υπάρχει μία αξιοσημείωτη ισοτροπία, που σημαίνει ότι οι στατιστικές ιδιότητες κατά την διεύθυνση της κίνησης της καταιγίδας μπορούν να επεκταθούν σε ολόκληρη την κατανομή της βροχής, παρά το γεγονός ότι στην SST η βασική συνιστώσα της ταχύτητας της καταιγίδας είναι παράλληλη προς τον ραδιοδιάυλο. Κατά συνέπεια, στα ακόλουθα δεν θεωρείται ότι υπάρχει διαφορά ανάμεσα σε διεύθυνση της κίνησης της καταιγίδας και της διεύθυνσης του ραδιοδιαύλου.

Η SST έχει επιτυχώς εφαρμοστεί ([Matricciani,1996]) για την πρόβλεψη της απόσβεσης λόγω βροχής σε επίγειες οπτικής επαφής ραδιοζεύξεις ή σε δορυφορικές ζεύξεις, παρά το γεγονός ότι στην τελευταία περίπτωση η κάθετη δομή της κατακρήμνισης προσαρμόστηκε στα πειραματικά δεδομένα για να ελαχιστοποιήσει τα λάθη πρόβλεψης. Πρόσφατα, η SST χρησιμοποιήθηκε για να μετασχηματίσει τη στατιστική της απόσβεσης λόγω βροχής (μετρούμενη ή προβλεπόμενη) των σταθερών τερματικών στην αντίστοιχη στατιστική των κινητών τερματικών σε δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών.

3.2.2 Κάθετη δομή και ύψος της κατακρήμνισης

Η βροχή μοντελοποιείται σε 2 επίπεδα κατακρήμνισης με διαφορετικό ύψος (δες Σχήμα 3.1). Εκκινώντας από το έδαφος, στο στρώμα A οι υδρομετεωρίτες έχουν την μορφή σταγόνων ενώ στο στρώμα B συναντούμε τηκόμενους υδρομετεωρίτες με την ακόλουθη διάταξη: στην κορυφή του B είναι παγωμένοι ενώ στο τέρμα του B- αρχή του A οι υδρομετεωρίτες έχουν λιώσει τελείως και είναι κανονικές σταγόνες βροχής όπως στο στρώμα A. Ο κάθετος ρυθμός βροχόπτωσης R (mm/hr) στο στρώμα A υποτίθεται ενιαίος και δίνεται από τον μετρούμενο ρυθμό βροχόπτωσης στο έδαφος μέσω του οργάνου του βροχόμετρου.



Σχήμα 3.1 Κάθετη δομή της βροχής και γεωμετρικές παράμετροι [Matricciani,1996]

Οι ακόλουθες απλές φυσικές υποθέσεις έχουν γίνει για να χαρακτηρίσουμε τον ρυθμό στο στρώμα B:

- 1) η μάζα του υδρομετεωρίτη διατηρείται σταθερή κατά την διάρκεια της τήξης,
- 2) υπάρχει αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία ανάμεσα στις σταγόνες του A και στους τηκόμενους υδρομετεωρίτες του B,
- 3) η ροή των υδρομετεωριτών είναι η ίδια στα 2 στρώματα και
- 4) η ειδική απόσβεση του στρώματος B υπολογίζεται σαν να έχει παραχθεί από σταγόνες με όγκο ίδιο με αυτό των τηκόμενων υδρομετεωριτών.

Από αυτές τις υποθέσεις , οι υπολογισμοί δείχνουν ότι ο κάθετος ρυθμός κατακρήμνισης στο τηκόμενο στρώμα B, φερόνυμος ως διαφανής ρυθμός βροχόπτωσης(“apparent rain rate”) , μπορεί να υποτεθεί ενιαίος και να υπολογιστεί από την σχέση $R_B = 3.134R$.

Παρά το γεγονός ότι αυτό το απλό μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί σε στρωσιγενείς βροχοπτώσεις (ρυθμός βροχόπτωσης μικρότερος από περίπου 25 mm/h) , είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί και στην συνεκτική βροχόπτωση , γιατί η σχέση $R_B = 3.134R$ είναι ισοδύναμη με τη θεώρηση ενιαίου ρυθμού βροχόπτωσης τιμής R σε ένα κάθετο ραδιοδιάυλο σημαντικά μεγαλύτερο από αυτόν της σχέσης (1) παρακάτω. Αυτός είναι λόγος για τον οποίο η πρόβλεψη μεγάλων αποσβέσεων βελτιώνεται , ακόμη κι αν αυτές οι αποσβέσεις παράγονται από συνεκτική βροχόπτωση στην οποία δεν υπάρχει τηκόμενο στρώμα και το ύψος της βροχής μπορεί να είναι μεγαλύτερο από αυτό της σχέσης (1) παρακάτω. Προσδοκούμε ότι αυτή η βελτίωση εξασφαλίζεται με την τεχνική SST.

Το ύψος της βροχής πάνω από το επίπεδο της θάλασσας ($H_A + h$) σε μία περιοχή με γεωγραφικό πλάτος φ° υποτίθεται ότι είναι, με βάση την σύσταση της ITU-RP.839-0, το ύψος της ισόθερμης 0°C πάνω από το επίπεδο της θάλασσας , δηλαδή για την περίπτωση βορείων γεωγραφικών πλατών :

$$\begin{aligned} H_B &= 5 & \varphi < 23^\circ \\ H_B &= 5 - 0.075(\varphi - 23) & \varphi \geq 23^\circ \quad (1) \end{aligned}$$

σε χιλιόμετρα. Το βάθος h του τηκόμενου στρώματος B υποτίθεται ίσο με 400 m ανεξάρτητα από το γεωγραφικό πλάτος. Γι αυτό το λόγο , το ενεργό ύψος της βροχής δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$H_A(\varphi) = H_B(\varphi) - h(2)$$

,όπου $h=0,4\text{km}$ και H_B από την σχέση (1) . Αξίζει, στο παρόν σημείο, να διευκρινιστεί ότι παρότι η σύσταση ITU-RP.839-0 του 1992 έχει ανανεωθεί στην έκδοση ITU-RP.839-4 του 2013, δεν χρησιμοποιούμε την τελευταία διότι οι μικρές αλλαγές του H_R , που συνεπάγεται η χρήση της ITU-R P.839-4 , επηρεάζουν ελάχιστα την εξεταζόμενη απόσβεση του σήματος εξαιτίας της βροχής.

Στη συνέχεια της ανάλυσης μας, για απλότητα , θα θεωρήσουμε ότι η θερμοκρασία των σταγόνων βροχής του στρώματος A είναι 20°C ενώ η θερμοκρασία των τηκόμενων υδρομετεωριτών στρώματος B ίση με 0°C . Οι σχέσεις(1) και (2), από κοινού ,με βάση το [Matricciani,1996], μπορούν να περιγράψουν κατά μέσο όρο και αποτελεσματικά κάθε βροχόπτωση , που συντίθεται από τους 2 βασικούς τύπους βροχοπτώσεων, δηλαδή την στρωσιγενή και τη συνεκτική βροχόπτωση . Επίσης ,οι (1) και (2) είναι αρκετά απλές για να χρησιμοποιηθούν σε προγνωστικά μοντέλα απόσβεσης διάδοσης και σε κάθε περίπτωση τα 2 στρώματα θεωρούνται ενεργά τμήματα της κατακρήμνισης, με την έννοια ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν κατανομές πιθανότητας για ένα εκτενές χρονικό διάστημα , και όχι για ένα μεμονωμένο γεγονός βροχόπτωσης .Στην επόμενη ενότητα ακολουθεί η μαθηματική θεωρία, που συνοδεύει την SST, με ένα σύντομο και περιεκτικό τρόπο.Η ίδια περιγραφή χρησιμοποιήθηκε για να προβλέψουμε το φάσμα ισχύος της απόσβεσης λόγω βροχής(rainattenuation powerspectra).

3.2.3 Εφαρμογή της SST σε επίγειους ραδιοδιαύλους

Με την βοήθεια του [Matricciani,1996],σε ένα σημείο κατά μήκος του άξονα x , έστω R ο ρυθμός βροχόπτωσης και Y η ειδική απόσβεση (dB / km) . Τα 2 μεγέθη συνδέονται μέσω του πασίγνωστου νόμου

$$Y(x) = kR^a(x) \quad (3)$$

και θα υποθέσουμε ότι τόσο το k όσο και το a δεν εξαρτώνται από τον χώρο και τον χρόνο,δηλαδή είναι σταθερές . Ωστόσο, οι παρούσες σταθερές εξαρτώνται από την θερμοκρασία.

Η απόσβεση σε ένα επίγειο ραδιοδιάυλο μήκους L (km) κατά μήκος του άξονα χδίνεται από την σχέση :

$$A(x_o) = k \int_{x_o-L/2}^{x_o+L/2} R^a(x) dx \quad (4)$$

Τώρα , σύμφωνα με την υπόθεση του Taylor για την ισοτροπία , η μεταβολή της απόσβεσης με τον χρόνο μπορεί να προσομοιωθεί μεταβάλλοντας το x_0 με ρυθμό ίσο με την ταχύτητα της κίνησης της καταγίδας v , δηλαδή

$$x_0 = vt \quad (5)$$

Η παραπάνω διαδικασία μπορεί μαθηματικά να περιγραφεί σαν η συνέλιξη ανάμεσα στην μοναδιαία ορθογώνια συνάρτηση πλάτους L με κέντρο την αρχή των αξόνων O , $rect(x/L)$, και $Y(x)$, δηλαδή:

$$A(x_0) = k \int_{-\infty}^{+\infty} R^a(x_0 + x) rect(x/L) dx$$

$$A(x_0) = k \int_{-\infty}^{+\infty} R^a(x) rect[(x_0 - x)/L] dx \quad (6)$$

Από την (6), μπορούμε να πάρουμε τον μετασχηματισμό Fourier της $A(x_0)$ στο πεδίο της χωρικής συχνότητας $f_s = 1/x(km^{-1})$:

$$S_A(f_s) = S_Y(f_s) L \sin c(f_s L) \quad (7)$$

όπου

$$S_A(f_s) = \mathfrak{F}\{A(x_0)\}$$

$$S_Y(f_s) = \mathfrak{F}\{kR^a(x)\} \quad (8)$$

είναι οι μετασχηματισμοί Fourier των $A(x_0)$ και $Y(x)$ αντίστοιχα , και

$$\sin c(f_s L) = \sin(\pi f_s L) / \pi f_s L \quad (9)$$

Χρησιμοποιώντας την ορολογία της θεωρίας συστημάτων , αναφερόμαστε στην $S_Y(f_s)$ ως φάσμα εισόδου και στην $L \sin c(f_s L)$ ως συνάρτηση μεταφοράς του ραδιοδιαύλου . Σε αυτό το σημείο , θα μετατρέψουμε

τον χώρο σε χρόνο , δηλαδή το χωρικό φάσμα $S_A(f_s)$ σε χρονικό φάσμα $\overset{\vee}{S}_A(f)$:

$$\overset{\vee}{S}_A(f) = \overset{\vee}{S}_Y(f) L \sin c(fL/v) \quad (10)$$

$$f = vf_s \quad (11)$$

$$\overset{\vee}{S}_Y(f) = \mathfrak{F}\{Y(t)\} = \mathfrak{F}\left\{Y\left(\frac{x}{v}\right)\right\} = vS_Y(vf_s) \quad (12)$$

Από την (10) παίρνουμε τελικά:

$$A(t) = \mathfrak{F}^{-1}\{\overset{\vee}{S}_A(f)\} \quad (13)$$

Οι εξισώσεις (10) και (13) αναπαριστούν ένα συμπαγή τρόπο μοντελοποίησης της χρονικής εξέλιξης της απόσβεσης λόγω βροχής με την βοήθεια της SST.

3.2.4 Εφαρμογή σε κεκλιμένους ραδιοδιαύλους

Πριν προχωρήσουμε στην εφαρμογή της SST σε πραγματικούς δορυφορικούς κεκλιμένους ραδιοδιαύλους, θα παρουσιάσουμε, σύμφωνα με το [Matriccioni,1996] κάποιες χρήσιμες σχέσεις, από τις οποίες θα προκύψουν σημαντικά συμπεράσματα.

Εάν υπολογίσουμε την (10) για $f=0$, τότε :

$$\overset{\cup}{S}_A(0) = L \overset{\cup}{S}_V(0) = L \int_0^{T_R} kR^a(t) dt \quad (14)$$

,όπου T_R είναι η διάρκεια της βροχόπτωσης όπως αυτή μετρήθηκε από το βροχόμετρο . Η εξίσωση (14) δηλώνει ότι το $\overset{\cup}{S}_A(0)$ είναι ανεξάρτητο του v και για μία δεδομένη βροχόπτωση είναι σταθερό . Αυτή η ιδιότητα αποτελεί συνέπεια της αρχής της διατήρησης της ποσότητας του νερού που συλλέγεται από το βροχόμετρο κατά την διάρκεια της δεδομένης βροχόπτωσης, Q (mm):

$$Q = \int_0^{T_R} R(t) dt \quad (15)$$

Τώρα το $\overset{\cup}{S}_A(0)$, από τον μετασχηματισμό Fourier και την (14) , δίνεται επίσης από:

$$\overset{\cup}{S}_A(0) = \int_0^{T_A} A(t) dt = \text{const} \quad (16)$$

Στην (16) , το T_A είναι η διάρκεια του γεγονότος της απόσβεσης λόγω βροχής. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτός ο νόμος διατήρησης ισχύει στο πεδίο του χρόνου αλλά όχι στο πεδίο του χώρου , επειδή στην δεύτερη περίπτωση η γραμμική επέκταση της $R(x)$ εξαρτάται από το v .

Ας υπολογίσουμε τώρα το T_A . Εάν

$$D_R = vT_R \quad (17)$$

είναι η γραμμική έκταση μίας περιοχής με βροχή κατά μήκος του οριζόντιου ραδιοδιαύλου (και της κινούμενης καταγίδας , εξαιτίας της υποτιθέμενης στατιστικής ισοτροπίας) , τότε το T_A πρέπει να δίνεται από :

$$T_A = \frac{D_R + L_R}{v} = T_R + \frac{L_R}{v} \quad (18)$$

όπου το $\frac{L_R}{v}$, είναι ο χρόνος κατά τον οποίο ο ραδιοδιάυλος βρίσκεται μερικώς υπό βροχή ενώ το βροχόμετρο όχι .

Παρατηρούμε ότι $T_A > T_R$ και όταν $v \rightarrow \infty$, η διάρκεια απόσβεσης συμπίπτει με την διάρκεια της βροχόπτωσης. Η σχέση $T_A > T_R$ εξηγεί το γεγονός ότι η πιθανότητα να βρέξει σε μία περιοχή (συχνά αναφέρεται ως P_0) είναι μικρότερη από την αντίστοιχη πιθανότητα P_0 να υπάρξει απόσβεση του σήματος ενώ οι 2 παραπάνω πιθανότητες γίνονται κατά προσέγγιση ίσες μόνο για εξαιρετικά υψηλές τιμές ταχύτητας καταγίδας (ιδανικά $v \rightarrow \infty$).

Τώρα από την (18) , καταλαβαίνουμε ότι εάν η ταχύτητα της καταγίδας αυξηθεί για δεδομένη βροχόπτωση , τότε η διάρκεια της απόσβεσης λόγω βροχής θα μειωθεί και αντίστροφα . Και στις 2 περιπτώσεις το ολοκλήρωμα της σχέσης (16) διατηρείται σταθερό ανεξάρτητα από το v με συνέπεια εάν η διάρκεια της απόσβεσης αυξηθεί, τότε η απόσβεση κατά μέσο όρο πρέπει να μειωθεί προκειμένου να διατηρηθεί σταθερό το ολοκλήρωμα της $A(t)$ και αντίστροφα. Ως εκ τούτου μια συγκεκριμένη βροχόπτωση μπορεί να δώσει 2 διαφορετικές διάρκειες απόσβεσης και συναρτήσεις απόσβεσης , και τα 2 μεγέθη σαν συναρτήσεις της ταχύτητας της καταγίδας v . Είναι ενδιαφέρον , παρότι όχι φυσικά αισθητό , να βρούμε το όριο της $A(t)$ καθώς το v συγκλίνει σε πολύ μεγάλες τιμές , ιδανικά στο άπειρο . Από (10) και (13) παίρνουμε:

$$\lim_{v \rightarrow \infty} A(t) = kR^a(t)L \quad (19)$$

που σημαίνει βροχή με σταθερό ρυθμό κατά μήκος του ραδιοδιαύλου αφού η συνάρτηση μεταφοράς γίνεται σταθερή και ίση με το L , δηλαδή συμπεριφέρεται σαν μία ολοπερατή ιδανική συνάρτηση μεταφοράς . Σημειώνεται ότι η εξίσωση (19) , ικανοποιεί τον νόμο διατήρησης της (16). Στην συνέχεια της παρούσας ενότητας γίνεται η εφαρμογή της τεχνικής SST σε κεκλιμένους ραδιοδιαύλους (slantpath).

Τώρα,σε σχέση με την εφαρμογή της SST σε κεκλιμένο ραδιοδιάλυο([Matricciani,1996]),έστω θ η γωνία ανύψωσης της ζεύξης και ξ η συντεταγμένη μήκους πάνω στην διαδρομή της ζεύξης (δεξ Σχήμα 3.1). Τότε σύμφωνα με την διμερή κάθετη δομή της κατακρήμνισης , η (4) γίνεται:

$$A(x_o) = k_A \int_0^{L_A} R^{a_A}(x_o + \Delta x_o, \xi) d\xi + \kappa_B r^{a_B} \int_{L_A}^{L_B} R^{a_B}(x_o, \xi) d\xi \quad (20)$$

όπου οι υπό βροχή ραδιοδιάλυοι δίνονται από την σχέση :

$$L = \frac{H - H_s}{\sin(\theta)} \quad (21)$$

Η (21) αποφέρει L_A όταν $H=H_A$ (2) και $L=L_B$ όταν $H=H_B$ (1). Το H_s είναι το υψόμετρο του επίγειου σταθμού πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, $r=3.134$ και

$$\Delta x_o = \Delta L \cos(\theta) = h / \tan(\theta) \quad (22)$$

$$\Delta L = L_B - L_A = h / \sin(\theta) \quad (23)$$

Στον πρώτο όρο του δεξιού μέλους της (20) πρέπει να εισαγάγουμε την ολίσθηση Δx_o , γιατί το μονοπάτι διάδοσης των κυμάτων διασχίζει το στρώμα Α στην θέση $x_o + \Delta x_o$ (Σχήμα 3.1) . Ακολουθώντας την συλλογιστική του τμήματος 3.2.3 , από την (20), παίρνουμε :

$$S_A(f_s) = S_{Y,A}(f_s) L_A \sin c(f_s L_A) \exp(-j2\pi f_s \Delta x_o) + r^{a_B} S_{Y,B}(f_s) \Delta L \sin c(f_s \Delta L) \quad (24)$$

Όπου:

$$S_{Y,A}(f_s) = \mathfrak{F} \{ k_A R^{a_A}(x) \} \quad (25)$$

$$S_{Y,B}(f_s) = \mathfrak{F} \{ k_B R^{a_B}(x) \}$$

Επειδή η ταχύτητα της καταγιγίδας κατά μήκος του κεκλιμένου ραδιοδιαύλου δίνεται από την:

$$v(\theta) = v / \cos(\theta) \quad (26) \Rightarrow$$

$$f = v f_s / \cos(\theta) \quad (27)$$

Και το χωρικό φάσμα μετασχηματίζεται στο σύνηθες χρονικό φάσμα:

$$\overset{\cup}{S}_A(f) = \overset{\cup}{S}_{Y,A}(f) L_A \sin c(f L_A / v(\theta)) \exp[-j2\pi f_s \Delta x_o / v(\theta)] + r^{a_B} \overset{\cup}{S}_{Y,B}(f) \Delta L \sin c[f \Delta L / v(\theta)] \quad (28)$$

Τελικά, το $A(t)$ δίνεται από την (13) . Η εξίσωση (28) ικανοποιεί , φυσικά , τον νόμο διατήρησης της εξίσωσης (16), ενώ η (18) διατηρείται και για κεκλιμένους ραδιοδιαύλους (σε αυτήν την περίπτωση το L αναπαριστά την προβολή του μήκους του ραδιοδιαύλου πάνω στο έδαφος) .

Παρατηρούμε ότι για $\theta = 90^\circ$ (κάθετο μονοπάτι) , τότε από την (26) , $v(\theta) = \infty$ και από (28), (23) και (13) , $A(t)$ δίνεται από:

$$A(t) = k_A R^{a_A}(t)(H_A - H_s) + r^{a_B} k_B R^{a_B}(t)h \quad (29)$$

Για $\theta \neq 90^\circ$ και $v \rightarrow \infty$, από (28) και (13) παίρνουμε :

$$\lim_{v \rightarrow \infty} A(t) = k_A R^{a_A}(t) L_A + r^{a_B} k_B R^{a_B}(t) (L_B - L_A) \quad (30)$$

Και προκύπτει ξανά το ολοπερατό μοντέλο της (19). Παρατηρούμε από την (30), ότι μπορούμε να πάρουμε την κατανομή πιθανότητας για την απόσβεση λόγω βροχής, απλά εισάγοντας τις τιμές του ρυθμού βροχόπτωσης που υπερβαίνεται για μία συγκεκριμένη πιθανότητα.

Σαν τελική παρατήρηση, σημειώνουμε ότι το ακόλουθο πηλίκο :

$$R_a = \frac{r^{a_B} k_B R^{a_B} - k_A R^{a_A}}{k_A R^{a_A}} \quad (31)$$

είναι μία φθίνουσα συνάρτηση της συχνότητας για ένα δοσμένο R στο εύρος συχνοτήτων 10 -50 GHz.

3.3 Δοκιμή και αξιολόγηση του μοντέλου SST

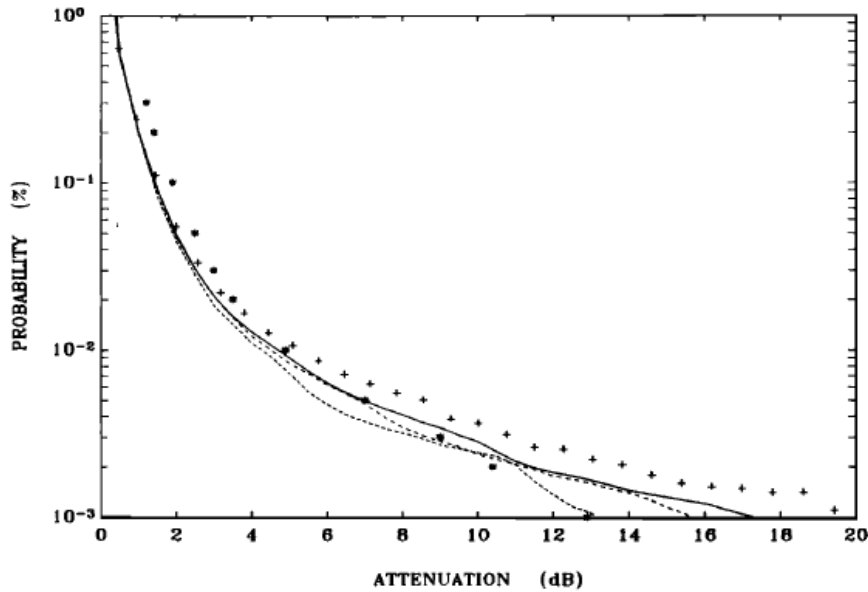
3.3.1 Δοκιμή της SST σε διάφορες περιοχές

Σύμφωνα με το [Matricciani,1996] το μοντέλο SST ελέγχθηκε ως προς τις πιθανοτικές κατανομές της απόσβεσης λόγω βροχής στους 11,6 GHz σε 3 ιταλικούς σταθμούς : Fucino, GeraLario και Spino d' Adda, κατά την διάρκεια του προγράμματος διάδοσης H/M κυμάτων SIRIO για το οποίο συλλέγονταν ταυτόχρονα χρονοσειρές έντασης βροχής(μεσοσταθμισμένες σε 1 λεπτό) για διάστημα 13 χρόνων περίπου. Παρακάτω δίνεται ο πίνακας 3.1(Table1,[Matricciani,1996]) με τα διάφορα στοιχεία(γεωγραφικά στοιχεία , διάρκεια πειράματος , πλήθος βροχοπτώσεων κά) για τις εξεταζόμενες περιοχές .Η διάρκεια του πειράματος είναι εκτενής και γι αυτό μας επιτρέπει να αξιολογήσουμε με αξιόπιστο τρόπο τις στατιστικές ιδιότητες του μοντέλου SST, ειδικά ως ένα μοντέλο πρόβλεψης της απόσβεσης λόγω βροχής , τουλάχιστον για αυτές τις περιοχές.

	Fucino	Gera Lario	Spino d'Adda
Latitude, °N	42.0	46.2	45.4
Longitude, °E	13.6	9.4	9.5
Altitude above sea level, m	680	210	84
Path elevation angle, deg	33.0	32.0	32.4
Average rainy path L_R , km	5.3	5.8	6.0
Wave polarization	circular	circular	linear
Experiment duration	1978-1982	1978-1982	1980-1982
Number of rain events ^a	562	587	294

Πίνακας 3.1 Ποικίλα στοιχεία των 3 ιταλικών επίγειων διαστημικών σταθμών για το 11.6 GHz πρόγραμμα διάδοσης SIRIO (Table 1,[Matricciani,1996])

Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζονται η πειραματική και οι προβλεπόμενες με το μοντέλο SST μακροπρόθεσμες κατανομές απόσβεσης λόγω βροχής για διάφορες τιμές της ταχύτητας του ανέμου της βροχής v , για συχνότητα 11.6 GHz για τον ιταλικό σταθμό Fucino.Στις τιμές της ταχύτητας v συμπεριλαμβάνονται η μέση ταχύτητα $v=10.6$ m/sec, όπως μετρήθηκε με ραντάρ στην κοιλάδα του ποταμού Πο στην Β. Ιταλία, καθώς και η ακραία περίπτωση $v=\infty$, για την οποία χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (30) .Αντίστοιχα διαγράμματα προκύπτουν και για τις άλλες 2 ιταλικές περιοχές GeraLario και Spino d' Adda, τα οποία παραλείψουμε καθώς παρουσιάζουν κοινά χαρακτηριστικά με το Σχήμα 3.2 .



Σχήμα 3.2 Fucino,11.6 GHz, προβλεπόμενες με SSTγια $v=4\text{m/s}$ (---); $v=6\text{m/s}$ (-.-.); $v=10.6\text{m/s}$ (-); $v=\infty$ (++) και πειραματική(**)[Matricciani,1996]

Οι προβλέψεις του SST μοντέλου για ταχύτητες ανέμου $v \geq 6\text{m/s}$ είναι αρκετά καλές και παρουσιάζουν χαμηλή ευαισθησία ως προς την τιμή της ταχύτητας v , πράγμα που μας απελευθερώνει στην επιλογή της ταχύτητας του ανέμου της καταιγίδας v . Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με τον νόμο διατήρησης (16), οποιαδήποτε επιλογή της ταχύτητας v διατηρεί το νερό που πραγματικά συλλέγεται σταθερό.

Είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι για $v=\infty$, στις υψηλές τιμές απόσβεσης (μικρές πιθανότητες υπέρβασης) το μοντέλο τείνει να υπερτιμά την απόσβεση λόγω βροχής ενώ στον αντίποδα στις χαμηλές αποσβέσεις (μεγάλες πιθανότητες υπέρβασης) φαίνεται να υποτιμά την σχετική απόσβεση. Το τελευταίο εξηγείται με την βοήθεια του Πίνακα 3.2(Table 3, [Matricciani,1996]).Σύμφωνα με τον πίνακα, αύξηση του v συνεπάγεται μείωση του συνολικού χρόνου για τον οποίο $A(v)>0^+$, με αποτέλεσμα μείωση του P_0 και για τις 3 περιοχές. Επίσης, παρά το γεγονός ότι η μέγιστη ποσοστιαία απόκλιση για το $P_0(v)$ είναι 16% για την περίπτωση του Spino d'Adda ανάμεσα στις ακραίες τιμές ταχύτητας 4m/s και $\infty\text{m/s}$ αντίστοιχα, το σφάλμα μπορεί να αυξηθεί έντονα σε εφαρμογές μεθόδων που προσπαθούν να προβλέψουν την κατανομή της απόσβεσης λόγω βροχής απευθείας από την κατανομή της έντασης λόγω βροχής.

v , m/s	Fucino ^a		Gera Lario ^a		Spino d'Adda ^b	
	Time min	P_0 %	Time min	P_0 %	Time min	P_0 %
4	129,419	4.92	178,925	6.81	48,697	3.09
6	124,782	4.75	174,009	6.62	46,161	2.93
8	123,558	4.70	172,761	6.57	45,426	2.88
10.6	122,394	4.66	171,514	6.53	44,838	2.84
14	121,340	4.62	170,413	6.48	44,238	2.81
∞	117,617	4.48	167,038	6.36	42,155	2.67

Πίνακας 3.2 Συνολικός χρόνος και τιμές $P_0=P(A(v)>0^+)$ για τους 3 ιταλικούς σταθμούς και για διάφορες τιμές της ταχύτητας v (Table3,[Matricciani,1996])

Όταν το μοντέλο SST εφαρμόζεται σε κατανομές 1 έτους, οι προβλέψεις του είναι καλές αλλά όχι τόσο ακριβείς όσο οι μακροπρόθεσμες. Επίσης, οι προσομοιώσεις έγιναν θέτοντας το $r=1$, που σημαίνει ότι δεν λάβαμε υπόψη το τηκόμενο στρώμα, γεγονός που καθιστά τις προβλεπόμενες τιμές της απόσβεσης αρκετά μικρότερες της πραγματικής τους τιμής. Μπορεί τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το μοντέλο SST για τις 3 παραπάνω ιταλικές περιοχές να ήταν ικανοποιητικά, αυτό δεν μας επιτρέπει να κάνουμε ευρεία χρήση του μοντέλου σε κάθε περιοχή. Γι αυτό το λόγο, απαιτείται εξέταση της SST σε περιοχές με διαφορετικό γεωγραφικό πλάτος, κλίμα, γωνία ανύψωσης (ειδικά για κάτω από 20°) και συχνότητα. Μάλιστα, εάν μακροχρόνιες χρονοσειρές έντασης βροχής διατίθενται για κάποια συγκεκριμένη περιοχή, μπορούμε να προβλέψουμε προσεγγιστικά την κατανομή της απόσβεσης λόγω βροχής με χρήση της (30) ($v=\infty$), αναγνωρίζοντας ότι συγκριτικά με πεπερασμένη ταχύτητα ανέμου βροχής υποτιμά την απόσβεση για μεγάλες πιθανότητες και υπερτιμά την απόσβεση για μικρές πιθανότητες.

Επιπλέον, στο [Matricciani, 1996] μελετώνται ως προς την SST οι ακόλουθες περιοχές 1) Alberslund στην Δανία, 2) Dubna στην Ρωσία, 3) Blacksburg στην Virginia των ΗΠΑ και 4) Sodankyla στην Φινλανδία για τις οποίες υπήρχαν μακροχρόνια δεδομένα για ραδιοδιαύλους με μικρές γωνίες ανύψωσης (όλες κάτω από 20°) και μήκη πολύ μεγαλύτερα των 3 παραπάνω ιταλικών σταθμών. Σε σχέση με την SST, ο συγγραφέας θεώρησε ότι $v=\infty$, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιήσει την εξίσωση (30). Τα αποτελέσματα επαλήθευσαν τον παραπάνω κανόνα ενώ παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερο ήταν το μήκος του ραδιοδιαύλου τόσο μεγαλύτερο ήταν το σφάλμα εκτίμησης της απόσβεσης. Η δε εξίσωση (30) εφαρμόστηκε με μεγαλύτερη επιτυχία και σε άλλες περιοχές με γωνία ανύψωσης περίπου 30° ή ψηλότερα μέχρι και τους 28.6 GHz.

3.3.2 Σύγκριση της SST με άλλα μοντέλα πρόβλεψης

Το μοντέλο SST δεν είναι το μοναδικό μοντέλο για την πρόβλεψη των απωλειών διάδοσης λόγω βροχής, άλλα ένα από τα πολλά προτεινόμενα. Συγκρίθηκε το SST με 9 άλλες μεθόδους πρόβλεψης, μεταξύ αυτών τα M1: Leitao and Watson [1986], M2: Stutzman and Yon [1986], M3: Crane [1980], M4: Lin et al. [1980], M5: Misme and Waldteufel [1980], M6: Capsoni et al. [1987], M7: ITU-R [1992a], M8: Matricciani [1991], M9: Garcia-Lopez et al. [1988] και προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα.

Δοθέντος ότι το σφάλμα ορίζεται ως :

$$\varepsilon = \frac{A_p - A_m}{A_m} \quad (32)$$

όπου A_p , A_m η προβλεπόμενη και πειραματική απόσβεση λόγω βροχής αντίστοιχα, στο εύρος πιθανοτήτων 10^{-1} με $5 \times 10^{-3}\%$ (για το οποίο υπάρχουν πειραματικά δεδομένα και για τις 3 περιοχές) υπολογίζεται στο [Matricciani, 1996] το μέσο σφάλμα $\langle \varepsilon \rangle$, η τυπική απόκλιση σ και η rms τιμή του σφάλματος $rms = \sqrt{\langle \varepsilon \rangle^2 + \sigma^2}$ και για τις 10 προβλεπτικές μεθόδους (περιλαμβάνεται και η SST). Τα αποτελέσματα της σύγκρισης φαίνονται στον Πίνακα 3.3 (Table 12, [Matricciani, 1996]).

	Models									
	SS	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
$\langle \varepsilon \rangle$	-10.6	-36.6	-29.6	-18.8	-25.3	-15.6	-20.6	-17.0	-14.2	-37.0
σ	7.6	8.3	9.0	14.2	10.2	7.3	7.6	17.1	6.9	8.0
rms	13.0	37.5	30.9	23.6	27.3	17.2	23.2	24.1	15.8	37.9

Πίνακας 3.3 Μέση τιμή, τυπική απόκλιση και rms του σφάλματος για τις 10 προβλεπτικές μεθόδους στο εύρος πιθανοτήτων 10^{-1} με $5 \times 10^{-3}\%$ (Table 12, [Matricciani, 1996])

Από την παραπάνω σύγκριση, προκύπτει ότι τα μεγέθη $\langle \epsilon \rangle$, σ παρουσιάζουν την μικρότερη τιμή για το μοντέλο SST, γεγονός που μας επιτρέπει να θεωρήσουμε το SST ως το πλέον αξιόπιστο εργαλείο πρόβλεψης απωλειών διάδοσης λόγω βροχής για τους 3 ιταλικούς σταθμούς, στην συγκεκριμένη συχνότητα και για το παραπάνω πιθανοτικό εύρος. Η επέκταση χρήσης του μοντέλου σε άλλες περιοχές, συχνότητες γωνίες ανύψωσης και μήκη ραδιοδιαύλων απαιτεί περαιτέρω έρευνα.

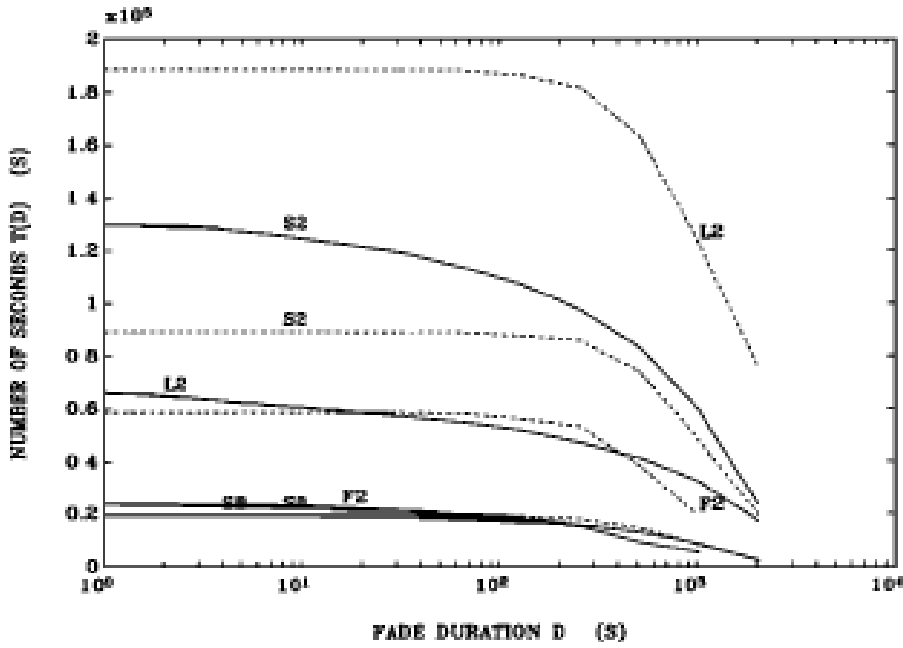
3.4 Λοιπές Εφαρμογές της SST

3.4.1 Πρόβλεψη της στατιστικής των διαλείψεων

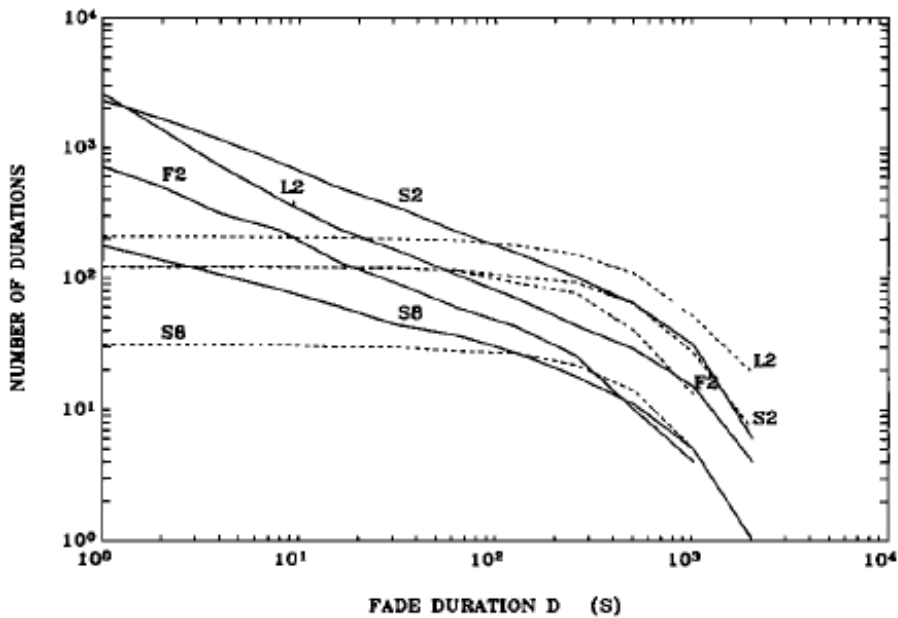
Η μακροπρόθεσμη στατιστική της διάρκειας των διαλείψεων είναι αναγκαία για να σχεδιάσουμε αντίμετρα έναντι των διαλείψεων ή να υπολογίσουμε τις μη-διαθέσιμες περιόδους. Γι αυτό το λόγο, διαφαίνεται η ανάγκη να προβλέψουμε μια μακροπρόθεσμη αξιόπιστη στατιστική διαλείψεων για διαφορετικές περιοχές, φέρουσες συχνότητες και γωνίες ανύψωσης. Αυτή η ανάγκη μπορεί να ικανοποιηθεί μόνο από προσομοιώσεις που βασίζονται στην φυσική ποσότητα με την οποία συνδέεται άμεσα η εξέλιξη της απόσβεσης λόγω βροχής, δηλαδή την χρονοσειρά έντασης βροχόπτωσης. Σημειώνεται, επίσης, ότι δεν υπάρχει αποδεκτό μοντέλο που να μετατρέπει την διάρκεια βροχόπτωσης στην αντίστοιχη διάρκεια διαλείψεων για κεκλιμένους ραδιοδιαύλους. Συνεπώς, η χρονοσειρά έντασης βροχής οφείλει να μετασχηματιστεί με την βοήθεια ενός φερέγγυου προγνωστικού μοντέλου απόσβεσης βροχής (πχ το SST) σε μία αξιόπιστη χρονοσειρά απόσβεσης λόγω βροχής από την οποία τελικώς, θα υπολογιστούν απευθείας οι διάρκειες των διαλείψεων.

Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε στους 3 ιταλικούς σταθμούς: Fucino, GeraLario και Spinod'Adda κατά την διάρκεια του προγράμματος διάδοσης των H/M κυμάτων, SIRIO, και ακολούθησε η σύγκριση μεταξύ πειραματικών και προβλεπόμενων τιμών για την διάρκεια των διαλείψεων λόγω βροχής. Μάλιστα, επειδή στο [Matricciani,1996] αποδείχθηκε ότι για τις 3 παραπάνω ιταλικές περιοχές οι προβλεπόμενες κατανομές πιθανότητας της απόσβεσης λόγω βροχής (με SST) παρουσιάζουν χαμηλή ευαισθησία στην ταχύτητα της καταιγίδας, αναμένουμε κάτι ανάλογο να συμβαίνει και με τις αντίστοιχες κατανομές των διαλείψεων λόγω βροχής

Σύμφωνα με το [Matricciani,1997], για ένα δεδομένο κατώφλι απόσβεσης λόγω βροχής A_t , μπορούμε να θεωρήσουμε 2 τύπους στατιστικής διαλείψεων. Στον πρώτο τύπο, υπολογίζουμε τον αθροιστικό χρόνο $T(D)$ (seconds) που έχει ξεπεραστεί το κατώφλι A_t , ένας χρόνος που προκύπτει από διαλείψεις με διάρκεια μεγαλύτερη του D (seconds). Αυτή η στατιστική είναι χρήσιμη για να υπολογίσουμε μη διαθέσιμες περιόδους. Ο δεύτερος τύπος στατιστικής ορίζεται ως εξής: Για συγκεκριμένη τιμή του A_t , υπολογίζουμε τον αθροιστικό αριθμό $N(D)$ των συμβάντων διαλείψεων με διάρκεια υψηλότερη του D (s). Αυτή η στατιστική είναι χρήσιμη για να σχεδιάσουμε αντίμετρα κατά των διαλείψεων. Τα Σχήματα 3.3, $T(D)$ και 3.4, $N(D)$ παρουσιάζουν κάποια παραδείγματα των πειραματικών και προβλεπόμενων με SST κατανομών διαλείψεων, υποθέτοντας σταθερή τιμή ταχύτητας ανέμου βροχής ίση με 10.6m.s.



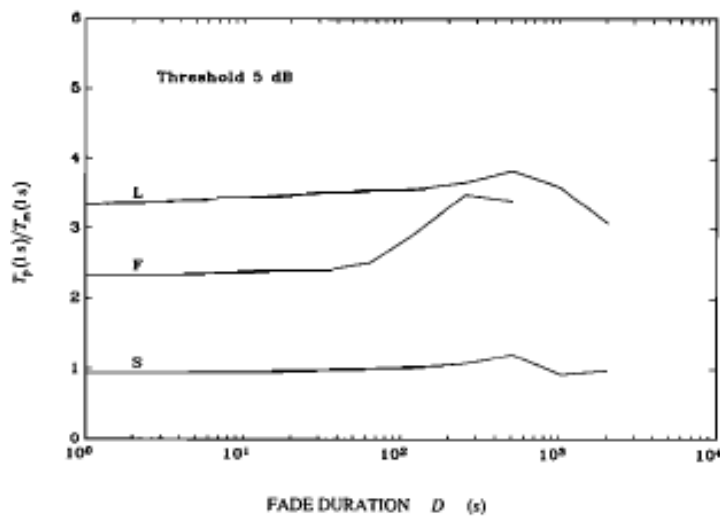
Σχήμα 3.3 T(D) για $A\tau=2\text{dB}$ στις L2(GeraLario), S2(Spinod'Adda) και F2(Fucino) όπου οι διακεκομμένες αναπαριστούν προβλεπόμενα αποτελέσματα και συνεχείς πειραματικά . Επίσης, απεικονίζεται το S8 , δηλαδή T(D) για $A\tau=8\text{dB}$ και Spinod'Adda. [Matricciani,1997]



Σχήμα 3.4 N(D) για $A\tau=2\text{dB}$ στις L2(GeraLario), S2(Spinod'Adda) και F2(Fucino) όπου οι διακεκομμένες αναπαριστούν προβλεπόμενα αποτελέσματα και συνεχείς πειραματικά . Επίσης, απεικονίζεται το S8 , δηλαδή N(D) για $A\tau=8\text{dB}$ και Spinod'Adda[Matricciani,1997]

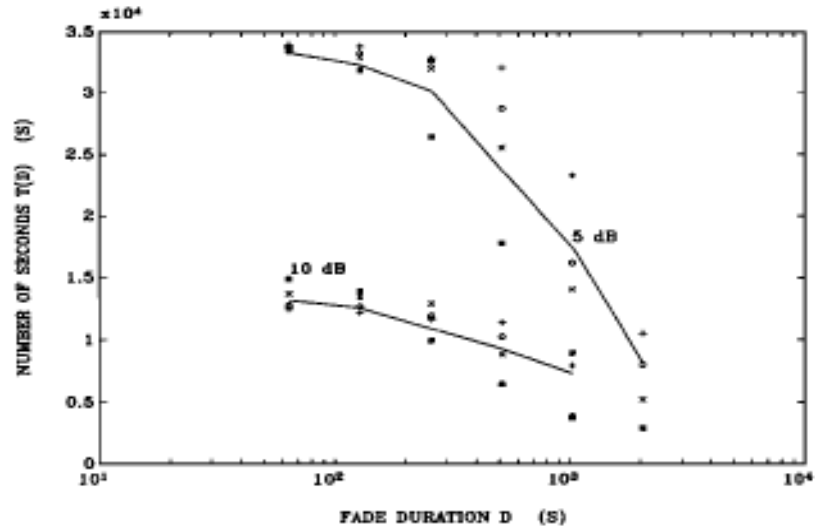
Από τα παραπάνω Σχήματα , παρατηρείται ότι η κλίμακα της διάρκειας των διαλείψεων είναι λογαριθμική επειδή οι διαλείψεις με διάρκεια μεγαλύτερη των 60 s συχνά μοντελοποιούνται ικανοποιητικά με την λογαριθμοκανονική κατανομή.

Από την εργασία [Matricciani,1997] προέκυψε ότι η προβλεπόμενη με SST και μετρούμενη στατιστική διάρκεια διαλείψεων μπορούν αξιόπιστα να συγκριθούν μόνο όταν το μέγεθος του δείγματος για πειραματικά και προβλεπόμενα δεδομένα διαλείψεων είναι περίπου το ίδιο, διαφορετικά η σύγκριση είναι ανακριβής και ενδέχεται να παραπλανήσει για την απόδοση της SST. Αυτό διαπιστώνεται χαρακτηριστικά από το Σχήμα 3.5, στο οποίο, για $A\tau=5\text{dB}$, ο λόγος προβλεπόμενης $T_p(D)$ και πειραματικής $T_m(D)$ διάρκειας διαλείψεων(που υπερβαίνουν το κατώφλι D) είναι ίσος περίπου με 1 μόνο για τον σταθμό Spinod'Adda καθώς μόνο σε αυτόν τηρείται η παραπάνω συνθήκη για τα μεγέθη των δειγμάτων. Γι αυτό το λόγο , καταλήγουμε ότι η SST μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σαν εργαλείο πρόβλεψης της στατιστικής της διάρκειας των διαλείψεων εφόσον τηρείται η παραπάνω προϋπόθεση.



Σχήμα 3.5 $T_p(D)/T_m(D)$ για $A\tau=5\text{dB}$ σε L(GeraLario) , F(Fucino) και S(Spinod'Adda) [Matricciani,1997]

Σχετικά με την ευαισθησία της διάρκειας των διαλείψεων λόγω βροχής, παρουσιάζουμε το Σχήμα 3.6, που απεικονίζει το μέγεθος $T(D)$ τόσο πειραματικά όσο και με την SST, για $A\tau=5\text{dB}$ και $A\tau=10\text{dB}$, στον σταθμό Spinod'Adda για διαφορετικές τιμές ταχύτητας ανέμου βροχής v . Υπενθυμίζεται ότι αναφερόμαστε αποκλειστικά στον επίγειο σταθμό Spinod'Adda γιατί μόνο σε αυτόν οι προβλέψεις και οι μετρήσεις διαλείψεων προέρχονται από δείγμα περίπου ίδιου μεγέθους. Από το Σχήμα 3.6, αποδεικνύεται ότι η προβλεπόμενη μακροπρόθεσμη διάρκεια διαλείψεων δεν εξαρτάται από την ταχύτητα της καταιγίδας v , όπως και στην περίπτωση των μακροπρόθεσμων αθροιστικών πιθανοτικών κατανομών της απόσβεσης λόγω βροχής.



Σχήμα 3.6 T(D), Aτ=5και 10dB, Spino όπου σύμβολο +:6m/s, o:10.6m/s, x:14m/s, *:∞ και συνεχής καμπύλη: μετρήσεις[Matricciani,1997]

Ωστόσο ,πάντα σύμφωνα με την εργασία [Matricciani,1997],υπάρχει ένα θεμελιώδες κάτω όριο για την πρόβλεψη της διάρκειας των διαλείψεων. Οι μικρότερες διάρκειες διαλείψεων (κάτω από τα 64-128sec) δεν προβλέπονται σωστά γιατί προέρχονται κυρίως από διαφορετικά φυσικά φαινόμενα , όπως τροποσφαιρικοί σπινθηρισμοί που υπερτίθενται στην καθαρή απόσβεση λόγω βροχής . Γι' αυτό το λόγο , μόνο οι μακρύτερες χρονικά διαλείψεις μπορούν να αναπαραχθούν γιατί αυτές προέρχονται από τη χωροχρονική δομή της καλά προσομοιωμένης με την SST βροχής.

3.4.2 Χρήση της SST για εκτίμηση του διαφορικού κέρδους χρόνου G(dB)

Στο [Matricciani,2006] αναφέρεται ο διαφορισμός χρόνου(TD) ως τεχνική αντιμετώπισης των διαλείψεων (FMT) για δορυφορικές επικοινωνίες στο εύρος συχνοτήτων 10-100GHz. Μετά από την προσομοίωση της μεγάλης βάσης δεδομένων της χρονοσειράς έντασης βροχόπτωσης (1994-2000) του διαστημικού ιταλικού σταθμού Spino d' Adda με την τεχνική SST και την επεξεργασία της παραγόμενης χρονοσειράς της απόσβεσης λόγω βροχής, προτάσσεται ένας εμπειρικός τύπος για τον υπολογισμό του διαφορικού κέρδους χρόνου(timediversitygain) G για γωνία ανύψωσης, αυτήν ανάμεσα στο Spino d' Adda και τον ιταλικό δορυφόρο Italsat, δηλαδή 37,7°. Ο τύπος είναι ο ακόλουθος :

$$G = (0.65e^{-0.036f} + 0.38)(1 - e^{-0.09T(1 - e^{-0.44A})})A \quad (33)$$

Όπου f η συχνότητα (GHz) στο εύρος 10-100 GHz , A(dB) η απόσβεση λόγω βροχής στο εύρος 0-30dB και T(min) η χρονική καθυστέρηση στο εύρος 1-60min. Ο παραπάνω τύπος προέκυψε μετά 1) από την θεώρηση ότι το G ακολουθεί την σχέση του Hodge για το διαφορικό κέρδος θέσης :

$$G = G_o(1 - e^{-BT}) \quad (34)$$

και 2) από κατάλληλη μοντελοποίηση και προσαρμογή των παραμέτρων G_o και B στα προβλεπόμενα δεδομένα. Τα μεγέθη G_o , B υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις :

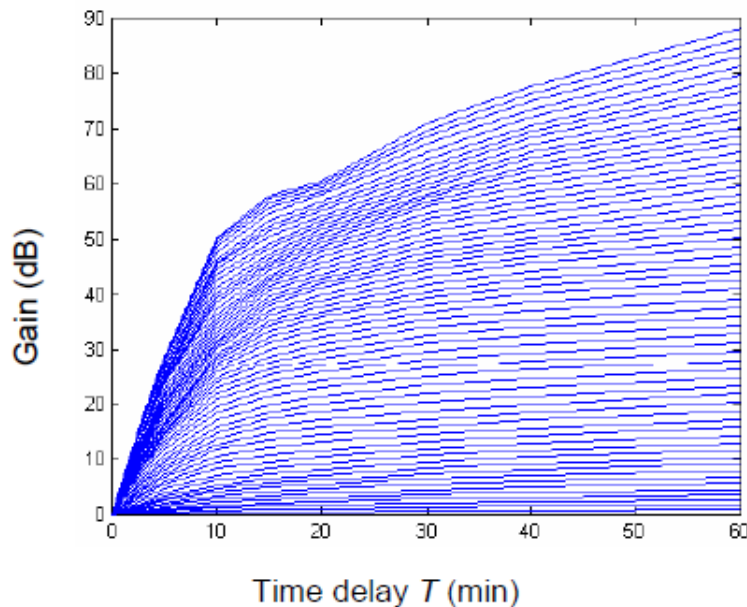
$$G_o = m(f)A \quad (35)$$

$$m(f) = 0.65e^{-0.036f} + 0.38 \quad (36)$$

$$B = 0.09T(1 - e^{-0.44A}) \quad (37)$$

,όπου τα μεγέθη A, f, T κυμαίνονται στα παραπάνω όρια.

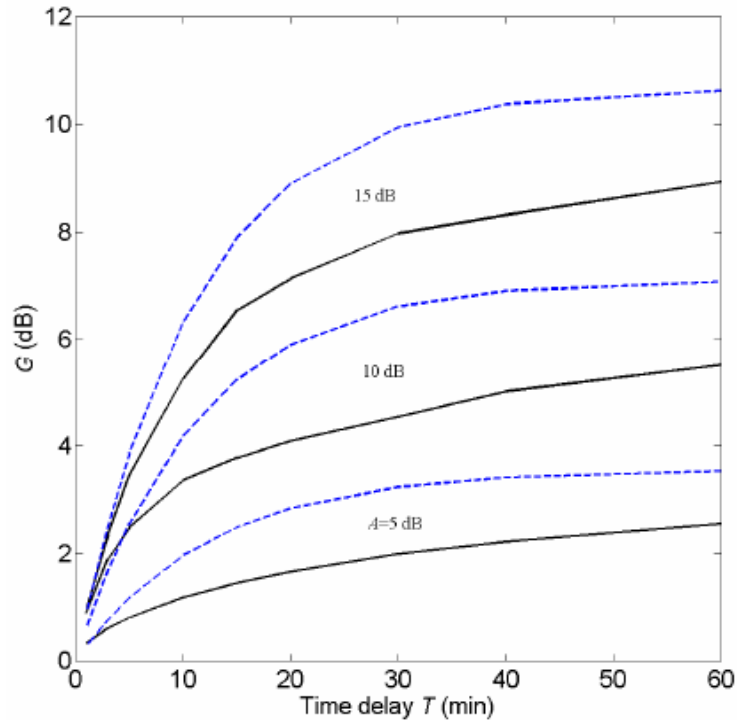
Στο Σχήμα 3.7 φαίνεται το διαφορικό κέρδος χρόνου για σταθερή συχνότητα $f=50\text{GHz}$ σαν συνάρτηση της χρονικής καθυστέρησης T , για 61 διαφορετικές τιμές απόσβεσης A στο εύρος $0-120\text{dB}$ στο δορυφορικό ραδιοδίαυλο Spinod'Adda-Italsat (37.7°). Αξίζει να καταγραφεί ότι η υψηλότερη καμπύλη αντιστοιχεί στην μέγιστη απόσβεση ενώ η καμπύλη που κείται στον οριζόντιο άξονα αντιστοιχεί στην μικρότερη απόσβεση λόγω βροχής A .



Σχήμα 3.7 $G(T)$, $f=50\text{GHz}$ για 61 διαφορετικές τιμές απόσβεσης βροχής A για το ραδιοδίαυλο Spinod'Adda-Italsat(37.7°) [Matricciani,2006]

Σημειώνεται ότι ο τύπος (33) μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την σχεδίαση μελλοντικών, πραγματικού χρόνου ή ευρείας μετάδοσης, συστημάτων δορυφορικών επικοινωνιών με γωνία ανύψωσης $37,7^\circ$.

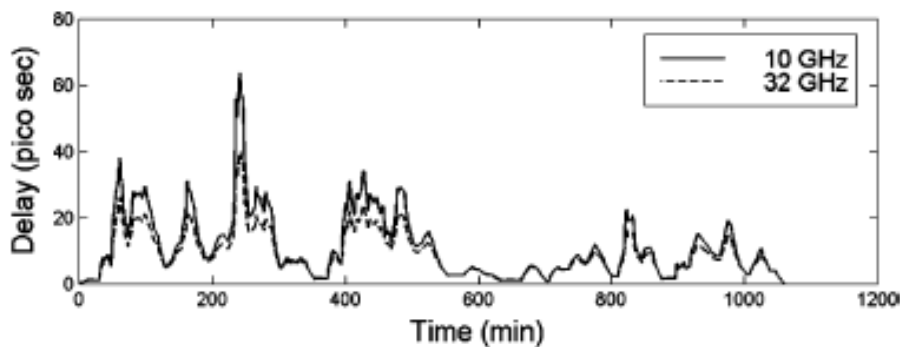
Επίσης, στην ίδια εργασία του Matricciani, έγινε σύγκριση του διαφορικού κέρδους χρόνου G , όπως προκύπτει από τον (33) με βάση τις SST προβλέψεις για το A και του G , όπως προκύπτει από την (34) με βάση τις μετρήσεις για το A , για συχνότητα $18,77\text{GHz}$ και γωνία ανύψωσης $37,7^\circ$ πάντα ως προς την δορυφορική ζεύξη Spinod'Adda-Italsat. Από το Σχήμα 3.8(Figure11[Matricciani,2006]) παρατηρείται ότι το διαφορικό κέρδος χρόνου G της SST είναι μεγαλύτερο από το διαφορικό κέρδος χρόνου G των πειραματικών μετρήσεων, που σημαίνει ότι γίνεται μία υπερεκτίμηση του G με την τεχνική SST.



Σχήμα 3.8 Πειραματικές(συνεχής μύρη) και προβλεπόμενες(μπλε διακεκομμένη) με SST καμπύλες του $G(T)$ για $A=5,10,15\text{dB}$, $f=18.77\text{GHz}$ και για τον ραδιοδιάλο Spinod'Adda (37.7°) [Matricciani,2006]

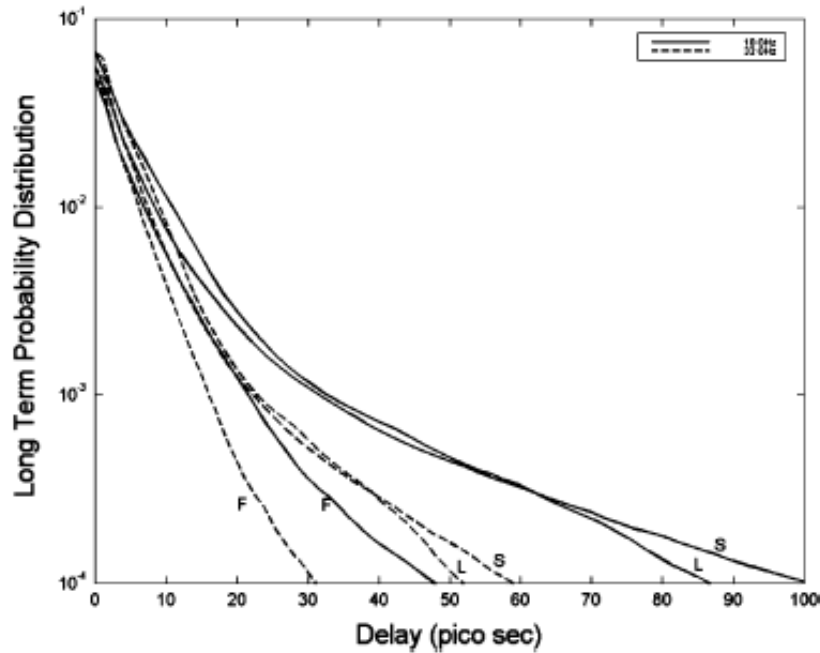
3.4.3 Σχέση ανάμεσα σε καθυστέρηση φάσης και απόσβεση λόγω βροχής

Στο [Matricciani, 2009] ο συγγραφέας εφάρμοσε την τεχνική SST σε μία μεγάλη βάση δεδομένων έντασης βροχόπτωσης για τους 3 γνωστούς ιταλικούς σταθμούς: Fucino , GeraLario και Spinod' Adda και κατέληξε σε 2 χρήσιμα αποτελέσματα, όσον αφορά την σχέση ανάμεσα στα μεγέθη της καθυστέρησης φάσης (Phasedelay) και της απόσβεσης λόγω βροχής(rainattenuation). Πριν παρουσιάσουμε τα 2 αποτελέσματα της εργασίας, θα επισημάνουμε ότι με την τεχνική SST, γνωρίζοντας την χρονοσειρά έντασης βροχόπτωσης μίας περιοχής, μπορούμε να γεννήσουμε όχι μόνο την χρονοσειρά απόσβεσης βροχής αλλά και την χρονοσειρά καθυστέρησης φάσης, από την οποία τελικά παράγουμε την αντίστοιχη cdf,P(τ). Στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζεται 1 τμήμα χρονοσειράς καθυστέρησης φάσης για 2 διαφορετικές συχνότητες, 10 και 32GHz, για $\theta=20^\circ$ στον σταθμό Fucino .



Σχήμα 3.9 $\tau(t)$, για $\theta=20^\circ$ στον σταθμό Fucino την 5^η Νοεμβρίου 1980 με ώρα εκκίνησης 16:17:02 UT [Matricciani,2009]

Ενώ στο σχήμα 3.10 απεικονίζεται η $P(\tau)$, για τους 3 σταθμούς σε 2 συχνότητες $f=10,32\text{GHz}$, $\theta=20^\circ$.



Σχήμα 3.10 $P(\tau)$ για τους 3 σταθμούς σε συχνότητες $f=10,32\text{GHz}$ και $\theta=20^\circ$ [Matricciani,2009]

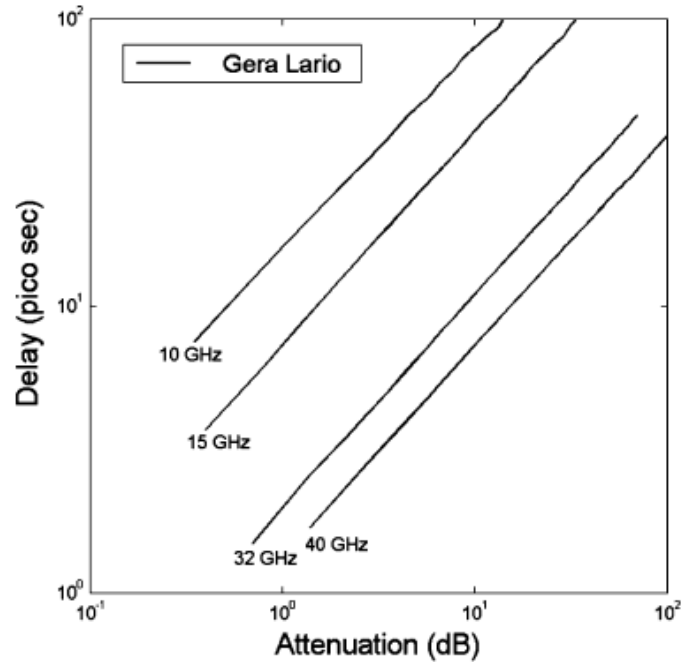
Με τα σχήματα 3.9 και 3.10 δείχνουμε ότι η καθυστέρηση φάσης τ είναι ένα άλλο μέγεθος που απορρέει από την SST, ιδιαίτερα χρήσιμο σε ειδικές εφαρμογές υψηλής ακρίβειας (όπως ανίχνευση διαστημικών οχημάτων βαθέως διαστήματος)

Σχετικά με τα κύρια αποτελέσματα του [Matricciani,2009], το πρώτο από αυτά αναφέρεται σε ένα γενικό τύπο που αποδίδει την επιπλέον καθυστέρηση φάσης του σήματος λόγω βροχής τ (picoseconds) σαν συνάρτηση της απόσβεσης A (dB), της συχνότητας f (GHz) και της γωνίας ανύψωσης θ ($^\circ$) και δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$\tau = (860.4 - 4.82\theta) f^{-1.71} A^{0.73} \text{ για } 20^\circ \leq \theta < 44^\circ$$

$$\tau = (860.4 - 4.82\theta) f^{-1.71} A^{0.73} \text{ για } 44^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \quad (38)$$

Το παραπάνω μοντέλο είναι έγκυρο για συχνότητες f προσεγγιστικά στο εύρος 10-40 GHz, για $\theta \geq 20^\circ$ και για οποιοδήποτε A . Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζουμε το λογαριθμικό διάγραμμα της καθυστέρησης φάσης (τ) συναρτήσει της απόσβεσης λόγω βροχής (A) για τον σταθμό GeraLario, για γωνία ανύψωσης $\theta=20^\circ$, κυκλική πόλωση, συχνότητες $f=10,15,32$ και 40GHz και θεωρώντας ότι το (τ, A) αντιστοιχίζεται στην ίδια πιθανότητα υπέρβασης.



Σχήμα 3.11 Καθυστέρηση φάσης συναρτήσει της απόσβεσης για κοινή πιθανότητα υπέρβασης,επιλεγμένες συχνότητες και $\theta=20^\circ$ [Matricciani,2009]

Το δεύτερο αποτέλεσμα αφορά μία μέθοδο με την οποία μπορούμε να προβλέψουμε την καθυστέρηση φάσης του σήματος από την πιθανότητα κατανομής της έντασης βροχόπτωσης(SSTprobabilitymodel) . Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα εκφράζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης :

$$\tau = \frac{1000}{360f} (C_o h_A R^{\beta_A} + (1 - C_o) h_B r^{\beta_B} R^{\beta_B}) L^m \text{ (picoseconds)} \quad (39)$$

Όπου:

$$C_o = 1 - \frac{0.4}{H_R - H_S} \quad (40)$$

- f η συχνότητα σε GHz
- $h_A, h_B, \beta_A, \beta_B$ οι παράμετροι φάσης των στρωμάτων A και B της βροχόπτωσης
- R η ένταση βροχής , $r=3.134$
- L μήκος ραδιοδιαύλου
- H_R το ύψος της κατακρήμνισης, H_S το υψόμετρο του επίγειου σταθμού
- $m=m(\theta,f)$.

Η συνάρτηση m αποτελεί συνάρτηση της συχνότητας f και της γωνίας ανύψωσης θ και μοντελοποιείται μεσοσταθμικά για τους 3 ιταλικούς σταθμούς από την ακόλουθη σχέση:

$$m(\theta, f) = a(\theta)f + b(\theta) \text{ όπου } f : 10-40\text{GHz} , \theta \geq 20^\circ \quad (41)$$

Σε σχέση με τους όρους a(θ) και b(θ) έχουμε :

$$a(\theta) = 1.05 \times 10^{-3} - 2.11 \times 10^{-5} \theta + 1.05 \times 10^{-7} \theta^2 \quad (42)$$

$$b(\theta) = 1 - 0.01 \times \theta + 0.155 \cos[2\pi(\frac{\theta}{20}) + 0.233] + 0.247 \cos[2\pi(\frac{\theta}{40}) + 1.295] \quad 20^\circ \leq \theta < 38^\circ \quad (43a)$$

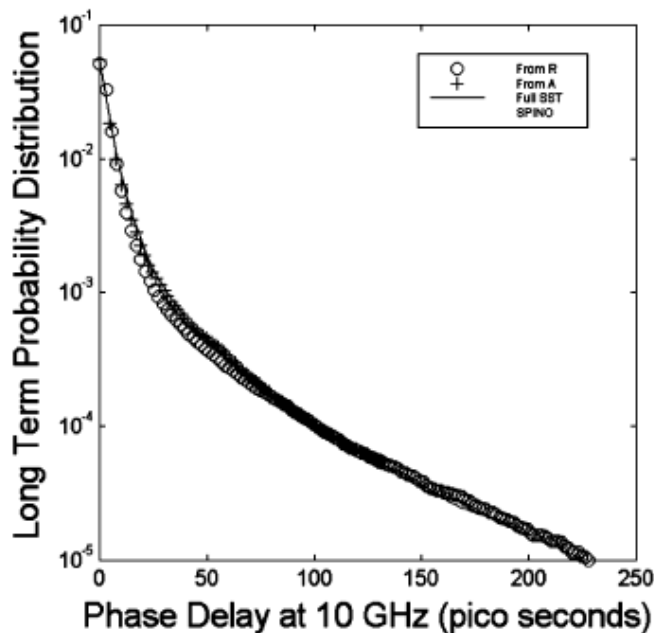
$$b(\theta) = 0.858 - 0.054 \cos\left[2\pi\left(\frac{\theta}{30}\right) - 1.039\right] \quad 38^\circ \leq \theta < 65 \quad (43b)$$

$$b(\theta) = 0.318 \times \theta^{0.253} + 0.01 \cos\left[2\pi\left(\frac{\theta}{30}\right) + 0.671\right] \quad 65^\circ \leq \theta \leq 90 \quad (43c)$$

Από την (39) μπορούμε να υπολογίσουμε το $P(\tau)$ μέσω του $P(R)$. Κατά συνέπεια, συμπεραίνουμε ότι μπορούμε να υπολογίσουμε την (μακροπρόθεσμη) κατανομή πιθανότητας της καθυστέρησης φάσης $P(\tau)$ με 3 διαφορετικούς τρόπους :

- 1) Με την full SST (phase time series)
- 2) Μέσω της A, από (38)
- 3) Μέσω της R, από (39)-(43). Το παρόν μοντέλο καλείται SSTprobabilitymodel

Στο σχήμα 3.12 παρουσιάζεται η κατανομή πιθανότητας της καθυστέρησης φάσης, $P(\tau)$, για τον σταθμό SpinoD'Adda σε συχνότητα $f=10\text{GHz}$, $\theta=20^\circ$, κυκλική πόλωση με τους 3 παραπάνω τρόπους.



Σχήμα 3.12 $P(\tau)$, Spino, $\theta=20^\circ$ με τους 3 τρόπους, oo: από $P(R)$, ++: από $P(A)$ και συνεχής:

Από το σχήμα 3.12, βλέπουμε ότι οι 3 τρόποι υπολογισμού του $P(\tau)$ συμφωνούν αρκετά καλά. Ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν για διαφορετική γωνία ανύψωσης και για τους άλλους 2 σταθμούς (GeraLario, Fucino)

Τα 2 παραπάνω συμπεράσματα σημαίνουν ότι μπορούμε να υπολογίσουμε τις κατανομές πιθανότητας της καθυστέρησης φάσης λόγω βροχής με 2 ανεξάρτητες μεθόδους – σειρές μετρήσεων, είτε με την (38) γνωρίζοντας την πιθανότητα κατανομής της απόσβεσης λόγω βροχής (από πειραματικές μετρήσεις ή προβλέψεις με την SST) είτε με την (39) γνωρίζοντας μόνο την πιθανότητα κατανομής της έντασης βροχόπτωσης (SSTprobabilitymodel).

Πιο συγκεκριμένα, η σχέση (38) επιτρέπει την εκτίμηση της καθυστέρησης φάσης με ολικό μέσο σχετικό σφάλμα -3%, τυπική απόκλιση 11.1% και rms τιμή 11.5% για $\theta=20^\circ$. Οι προηγούμενες τιμές προκύπτουν εάν λάβουμε υπόψη τα δεδομένα και των 3 περιοχών, το συνολικό εύρος συχνοτήτων και την συνολική διάρκεια του πειράματος.

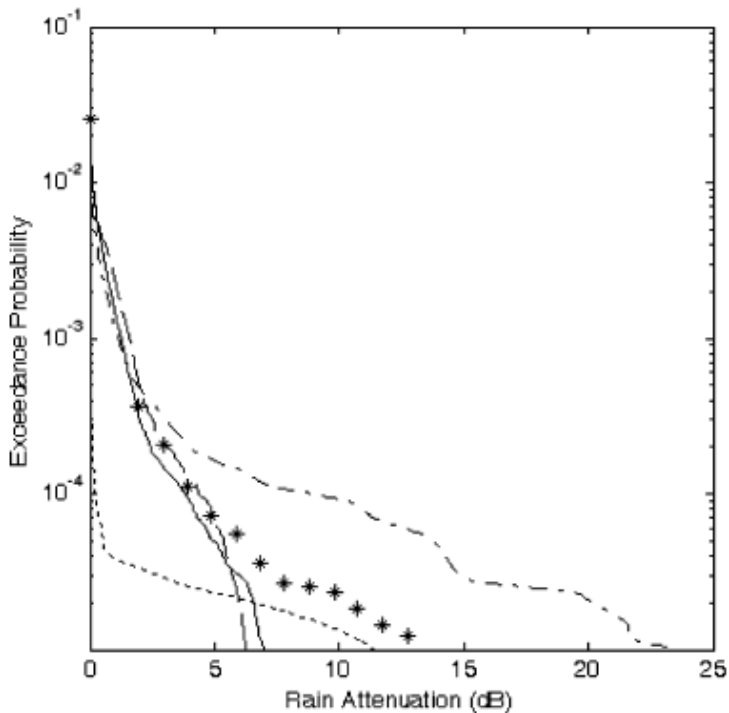
Ως προς την δεύτερη μέθοδο, σημειώνεται στο [Matricciani, 2009] ότι είναι αρκετά χρήσιμη και ισχυρή αφού το μόνο που χρειάζεται είναι η πιθανότητα κατανομής έντασης βροχής για μία περιοχή . Σε περίπτωση έλλειψης διαθέσιμων μετρητικών δεδομένων έντασης βροχής, χρησιμοποιείται ο παγκόσμιος χάρτης της έντασης βροχόπτωσης της ITU-R .

Σύμφωνα, πάντοτε, με το [Matricciani, 2009],η (38) θα μπορούσε, θεωρητικά , να χρησιμοποιηθεί για εκτίμηση πραγματικού χρόνου καθυστέρησης φάσης . Παρά ταύτα , η κατανομή μεγέθους των σταγόνων της βροχής μπορεί να αλλάξει και μάλιστα σημαντικά από περιοχή σε περιοχή , από βροχή σε βροχή στην ίδια περιοχή , ακόμη και κατά την διάρκεια μίας συγκεκριμένης βροχής σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Επειδή η (38) υποθέτει κατανομή Laws-Parsons για το μέγεθος των βροχοσταγόνων , πεπλατυσμένες σφαιροειδείς σταγόνες , θερμοκρασία νερού σταγόνας 0° και 20° και Gunn-Kinzer συσκευή για ταχύτητα σταγόνας -υποθέσεις που σε ικανοποιητικό βαθμό παρέχουν αξιόπιστα μακροπρόθεσμα αποτελέσματα -η εφαρμογή της (38) σε εκτίμηση πραγματικού χρόνου της καθυστέρησης φάσης είναι αμφίβολη και ως τέτοια θα έπρεπε να επαληθευτεί με μετρήσεις . Παρόλα αυτά, θα μπορούσε να φανεί χρήσιμη εάν οι προβλέψεις πραγματικού χρόνου μεσοσταθμιστούν(averaged) για ένα επαρκές χρονικά διάστημα (αρκετά λεπτά) . Σε μία τέτοια περίπτωση , το εύρος του χρονικού διαστήματος ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή , για παράδειγμα ανίχνευση γεωστατικών δορυφόρων μπορεί να γίνει σχεδόν σε πραγματικό χρόνο ενώ ανίχνευση διαστημοπλοίων βαθέως διαστήματος απαιτεί περισσότερο χρόνο για μεσοστάθμιση εξαιτίας της μεγάλης καθυστέρησης φάσης .

Μάλιστα, ακόμη κι αν η επαγόμενη από τους υδρομετεωρίτες καθυστέρηση φάσης είναι της τάξης των λίγων μέχρι μερικών δεκάδων picoseconds , η επίδραση της σε ανίχνευση υψηλής ακρίβειας δορυφόρων και διαστημοπλοίων βαθέως διαστήματος δεν μπορεί να αγνοηθεί .

3.4.4 Εφαρμογή της SST στην Αθήνα

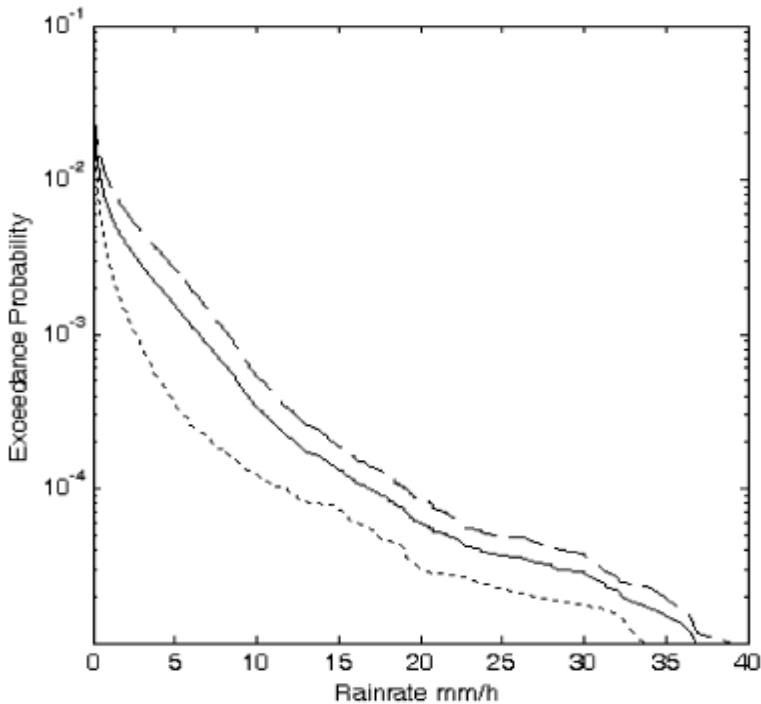
Στο [Kanelloroulos,2006] παρουσιάζεται η εφαρμογή της SST σε χρονοσειρά έντασης βροχής διάρκειας 29 μηνών (1/1/2000-31/5/2002) στην περιοχή της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου στην Αθήνα για συχνότητα 12GHz, κάθετη πόλωση , για ποικίλες ταχύτητες ανέμου καταιγίδας (12, 14.25 και 16.5 m/sec) με γωνία ανύψωσης αυτήν που αντιστοιχεί στην κάτω δορυφορική ζεύξη (downlink) HellasSat 2-Athens(43.46°).Στο σχήμα 3.13 φαίνεται η ετήσια πιθανοτική κατανομή υπέρβασης του ρυθμού βροχόπτωσης για τα έτη 2000,2001 και την διετία 2000-2001. Από αυτό , προκύπτει ότι το έτος 2000 έβρεξε λιγότερο σε σχέση με το έτος 2001.Παρατηρείστε ότι η παρούσα κατανομή ρυθμού βροχόπτωσης γίνεται για διάστημα N ετών , N=1,2,3,... γιατί αναφερόμαστε σε ετήσια κατανομή .



Σχήμα 3.13 πυκνά διακεκομμένη: 2000 , συνεχής: 2000-2001, αραιά διακεκομμένη: 2001 [Kanellopoulos,2006]

Από τα στατιστικά στοιχεία της SST πρόβλεψης εξάγονται οι μακροπρόθεσμες ετήσιες-εποχιακές – ημερήσιες ανά 2h προβλεπόμενες πιθανοτικές κατανομές απόσβεσης λόγω βροχής. Τα παραπάνω προβλεπόμενα στατιστικά στοιχεία είναι ιδιαίτερα σημαντικά γιατί είναι τα πρώτα διαθέσιμα δεδομένα που αφορούν την σχεδίαση δορυφορικών ζεύξεων για την περιοχή των Αθηνών.

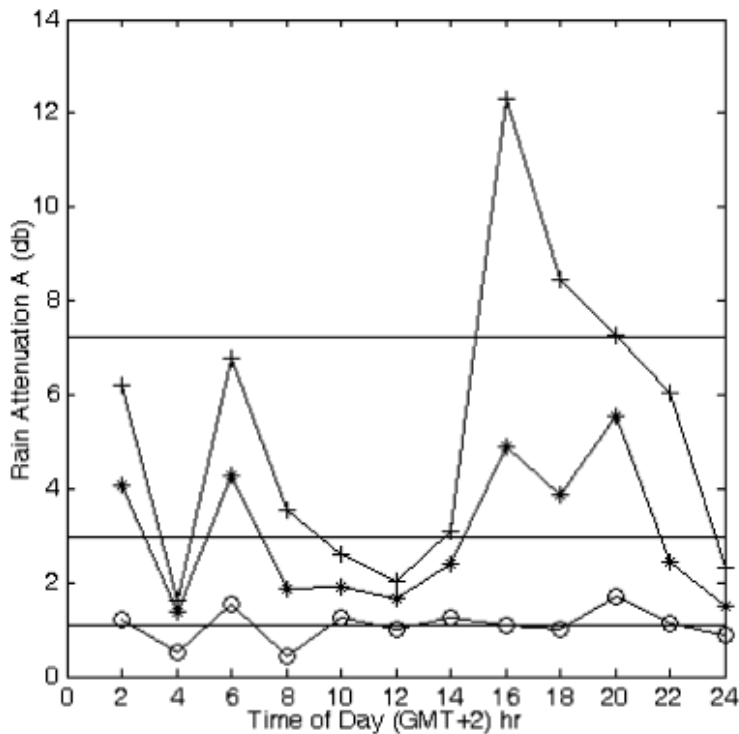
Παραθέτουμε το Σχήμα 3.14, στο οποίο αναπαρίσταται η εποχιακή πιθανοτική κατανομή υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχής για τις 4 εποχές του χρόνου λαμβάνοντας για την περίπτωση της άνοιξης 2 περιπτώσεις , α) αυτή που περιλαμβάνει ένα ακραίο καιρικό φαινόμενο της 21/5/2002 με μικρή συχνότητα επανάληψης και β) αυτή που αποκλείει την παρούσα ακραία βροχόπτωση . Αποσαφηνίζεται ότι 1) για τις εποχές καλοκαίρι και άνοιξη η ταχύτητα ανέμου καταιγίδας ελήφθη ίση με 16.5m/s για τις SST προσομοιώσεις , 2) για τις εποχές φθινόπωρο και χειμώνα η ταχύτητα η ταχύτητα ανέμου καταιγίδας ελήφθη ίση με 12m/s για τις SST προσομοιώσεις, 3) για την σχεδίαση των εποχιακών κατανομών απόσβεσης θεωρήσαμε την άνοιξη των ετών 2000,2001,2002 , το καλοκαίρι των ετών 2000-2001, το φθινόπωρο των ετών 2000,2001 και τον χειμώνα των ετών 2000(πλην του μήνα Δεκεμβρίου 1999), 2001 και 2002.



Σχήμα 3.14 P(A) για καλοκαίρι :πυκνά διακεκομμένη, άνοιξη(με): -.-.-, άνοιξη(χωρίς) :* * *,φθινόπωρο: συνεχής και χειμώνας: αραιά διακεκομμένη

Από το Σχήμα 3.14 συμπεραίνουμε ότι οι εποχές του χρόνου ακολουθούν διαφορετική συμπεριφορά ως προς την ένταση βροχής, άρα και ως προς την απόσβεση λόγω βροχής και ότι εάν δεν παραλείψουμε τις εξαιρετικά έντονες βροχοπτώσεις τότε υπάρχει κίνδυνος να υπερεκτιμήσουμε την συνάρτηση υπέρβασης τόσο της έντασης βροχής όσο και της απόσβεσης βροχής .

Επίσης, στο Σχήμα 3.15 αναπαρίσταται η απόσβεση βροχής για 3 δυνατές τιμές πιθανότητας υπέρβασης 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} κατά την διάρκεια των 2-h διαστημάτων μίας ημέρας πάντοτε για την κάτω ζεύξη HellasSat2-Αθήνα($f=12\text{GHz}$, verticalpolarization) . Οι αντίστοιχες (προς τις παραπάνω πιθανότητες υπέρβασης) τιμές απόσβεσης λόγω βροχής για μία 24-h μέρα σχεδιάζονται ως οριζόντιες συνεχείς καμπύλες. Από το σχήμα 3.15 παρατηρούμε ότι για διαθεσιμότητα 99,999% (ή πιθανότητα υπέρβασης 10^{-5}) η περίοδος υψηλού ρίσκου είναι 14-18h ενώ για διαθεσιμότητα 99,99% τα ριψοκίνδυνα χρονικά διαστήματα είναι 0-2h, 4-6h και 14-20h.



Σχήμα 3.15 $0.001 \cdot 10^{-3}$ και $24\text{-hA}=1.11\text{dB}$, $0.0001 \cdot 10^{-4}$ και $24\text{-hA}=2.97\text{dB}$ και $0.00001 \cdot 10^{-5}$ και $24\text{-hA}=7.21\text{dB}$ [Kanellopoulos,2006]

Γενικά , με την βοήθεια και του Σχήματος 3.15, καταλήγουμε ότι η δορυφορική ζεύξη HellasSat 2-Athens υπόκειται σε ισχυρότερες διαλείψεις κατά την διάρκεια του απογεύματος και των πρώτων βραδινών ωρών συγκριτικά με τις άλλες 2-h χρονικές περιόδους της ημέρας.Γι’ αυτό το λόγο , η συμπεριφορά της παρούσας δορυφορικής ζεύξης ως προς την εξασθένηση λόγω βροχής ,κατά την διάρκεια της ημέρας και ιδίως στα παραπάνω δυσμενή χρονικά διαστήματα, λαμβάνεται σοβαρά υπόψη προκειμένου να αξιοποιήσουμε την κατάλληλη τεχνική αντιμετώπισης των διαλείψεων(λόγω βροχής) του σήματος (πχ powercontrol, ACM κá) με απώτερο στόχο να διατηρηθεί η προσυμφωνημένη ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών (QoS) σε ανεκτά επίπεδα.

3.5 Βιβλιογραφία

[Matricciani,1996] E. Matricciani, “Physical-mathematical model of the dynamics of rain attenuation based on rain rate time series and two layer vertical structure of precipitation,” Radio Sci., vol. 31, pp. 281–295, 1996.

[Matricciani,1997] E. Matricciani, “Prediction of fade duration due to rain in satellite communication systems,” Radio Sci., vol. 22, pp. 935–941, 1997.

[Matricciani,2006] E. Matricciani, Time diversity as a rain attenuation countermeasure in satellite links in the 10-100 GHz frequency bands, EuCAP 2006, Nice, 6-10 November, 2006

[Matricciani,2009] E. Matricciani, A Relationship Between Phase Delay and Attenuation Due to Rain and Its Applications to Satellite and Deep-Space Tracking, IEEE Trans. On Antennas and Propagation 2009, 57, 3602-3611.

[Kanellopoulos,2006]S.A. Kanellopoulos, A.D. Panagoupoulos, E. Matricciani, J.D. Kanellopoulos, Annual and diurnal slant path rain attenuation statistics in Athens obtained with the synthetic storm technique, IEEE Trans. OnAntennasandPropagation 2006, 54, 2357-2364.

4^ο Κεφάλαιο

Εφαρμογή της τεχνικής SST σε δεδομένα του ρυθμού βροχόπτωσης στην Αθήνα

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα εφαρμόσουμε την τεχνική SST σε πραγματικά δεδομένα έντασης βροχόπτωσης για την Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου του ΕΜΠ, Αθήνα (37.59° N, 23.46° E). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το βροχόμετρο ARG100 στο διάστημα 8/6/2010 16:46:41 – 19/7/2012 13:52:16, δηλαδή διήρκεσαν περίπου 25 μήνες και 10 ημέρες, με συχνότητα δειγματοληψίας 1 δείγμα /λεπτό. Το αεροδυναμικό βροχόμετρο (rain gauge) ARG100 (Σχήμα 4.1) , κατασκευασμένο από την εταιρία EML, εφαρμόζει την μετρητική αρχή του ‘tipping bucket’ μηχανισμού, ο οποίος αποτελεί το βιομηχανικό και επιστημονικό πρότυπο για την μέτρηση έντασης βροχόπτωσης [eml,rain-gauge].



Σχήμα 4.1 Το βροχόμετρο των μετρήσεων μας ARG100

Αντίθετα με ένα συνηθισμένο βροχόμετρο, που η ροή του αέρα παρεμβάλλει περί το στόμιο της συσκευής μειώνοντας την συλλεχθείσα ποσότητα νερού , το παρόν βροχόμετρο σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε επιστημονικά για να περιορίσει αυτό το δυσμενές, για την ακρίβεια των μετρήσεων, φαινόμενο. Επίσης, η ανθεκτική πλαστική δομή του σε υπεριώδης ακτινοβολία παρέχει στο ARG100 την απαιτούμενη ευρωστία και μετρητική ακρίβεια .Μάλιστα , η διακριτική του ικανότητα , δηλαδή το διάστημα μεταξύ 2 διαδοχικών tip, είναι 0.2mm/h(αν και υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης σε 0.25mm) [eml,rain-gauge]. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι για την προεγκατεστημένη διακριτική ικανότητα των 0.2mm/hr, εάν το χρονικό διάστημα μεταξύ 2 διαδοχικών μη μηδενικών μετρήσεων είναι μεγαλύτερο της 1 ώρας, τότε προκύπτουν 2 διαφορετικά συμβάντα βροχής. Αναφορικά με την διαθεσιμότητα του βροχόμετρου , ενημερώνουμε ότι δεν υπήρξε καμία διακοπή λειτουργίας.

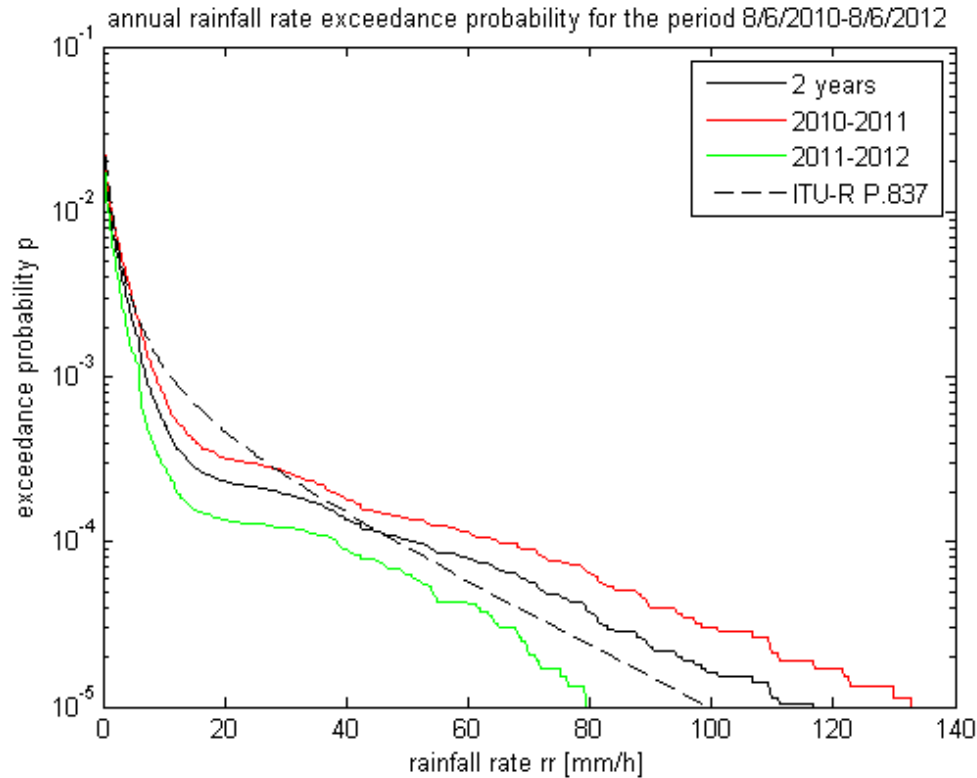
Τουψόμετρο του βροχόμετρου υπολογίστηκε με την συνάρτηση(κώδικας Matlab) `read_height` και τους φακέλους δεδομένων ESALON,ESALAT,TOPO_IDOT5_REV1 που περιέχουν το γεωγραφικό μήκος, γεωγραφικό πλάτος και υψόμετρο στο καθορισμένο σημείο(από τις γεωγραφικές συντεταγμένες) της Γης[ITU-RP1511-1]. Μετά από το τρέξιμο του κώδικα , το ύψος του βροχόμετρου πάνω από το μέσο επίπεδο της θάλασσας βρέθηκε ίσο με 406m.

4.2 Ετήσια και εποχιακή κατανομή υπέρβασης έντασης βροχόπτωσης

Η χρονοσειρά έντασης βροχόπτωσης ,R, προέκυψε από την σύντηξη δυο χρονοσειρών έντασης βροχής , της R1 για το διάστημα 8/6/2010 16:46:41- 26/9/2011 15:44:08 και της R2 για το διάστημα 7/10/2011 17:33:00-19/7/2012 13:52:16 γνωρίζοντας ότι στο μεσοδιάστημα των παραπάνω 2 περιόδων καταγραφής δεν υπήρξε κάποια βροχόπτωση.Από το διάλυμα της έντασης βροχόπτωσης ή ,εναλλακτικά, την χρονοσειρά έντασης βροχόπτωσης, R, θα σχεδιάσουμε την ετήσια και την εποχιακή πιθανοτική κατανομή υπέρβασης της έντασης βροχόπτωσης.

Σχετικά με την ετήσια θα θεωρήσουμε 4 διαφορετικές περιπτώσεις: α) για το διάστημα 8/6/2010-8/6/2011(1^ο έτος) β) για το διάστημα 8/6/2011-8/6/2012(2^ο έτος) γ) για τα 2 παραπάνω χρόνια, δηλ. 8/6/2010-8/6/2012 και δ) την καμπύλη που βασίζεται στην σύσταση ITU-RP.837 . Η ετήσια κατανομή για τις 4 παραπάνω περιπτώσεις απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2. Ως προς την εποχιακή κατανομή θα σχεδιάσουμε τις καμπύλες των 4 εποχών για τα 2 έτη (Σχήμα 4.3). Πιο αναλυτικά, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο εκτείνονται στα έτη 2010-2011, ο χειμώνας αναφέρεται στις χειμερινές περιόδους 1/12/2010-28/2/2011 και 1/12/2011-29/2/2012 ενώ η άνοιξη καταλαμβάνει το διάστημα της στα έτη 2011-2012, δηλαδή η κάθε εποχιακή κατανομή αποτελείται από 2 χρονικά εποχές.

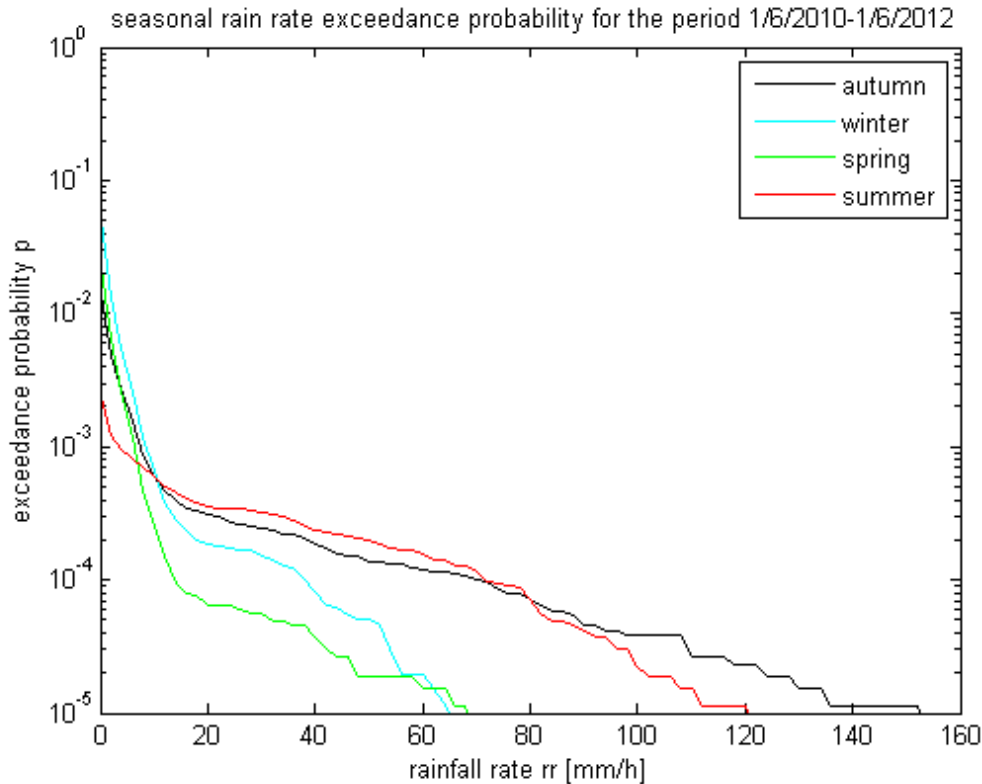
Σημειώνουμε ότι για το διάστημα από 1/6/2010 μέχρι την χρονική στιγμή έναρξης των μετρήσεων δεν υπήρξαν βροχοπτώσεις, με αποτέλεσμα να μπορούμε να θεωρήσουμε το παραπάνω διάστημα τμήμα του καλοκαιριού του 2010 στην σχετική μελέτη της εποχιακής κατανομής της έντασης της βροχής. Επίσης , παρατηρούμε ότι το έτος 2012 ήταν δίσεκτο(ο Φεβρουάριος είχε 29 αντί για 28 μέρες, δηλαδή το έτος 2012 είχε 366 αντί για 365 μέρες) .Τονίζουμε ότι τόσο στις ετήσιες όσο και στις εποχιακές πιθανοτικές καμπύλες δεν αποκλείσαμε βροχοπτώσεις με ιδιαίτερα υψηλές τιμές έντασης, με αποτέλεσμα το δείγμα μας, σε συνδυασμό με την χρονική διάρκεια των μετρήσεων, να μην είναι και το πλέον αντιπροσωπευτικό της μακροπρόθεσμης ετήσιας και εποχιακής κατανομής της έντασης της βροχής για την περιοχή της Αθήνας . Επίσης , τα παρόντα διαγράμματα είναι ανεξάρτητα της συχνότητας f , καθώς εκτίθεται μόνο το φυσικό μέγεθος της βροχής.



Σχήμα 4.2 Ετήσιες κατανομές υπέρβασης της έντασης βροχόπτωσης και ετήσια κατανομή βάσει της ITU-RP.837

Από το Σχήμα 4.2 παρατηρούμε ότι τον 1^ο χρόνο των μετρήσεων (8/6/2010-8/6/2011) έβρεξε περισσότερο από τον 2^ο χρόνο (8/6/2011-8/6/2012) ενώ η καμπύλη των 2 ετών, όπως αναμένεται, τοποθετείται στο ενδιάμεσο των 2 παραπάνω ‘ακραίων’ πιθανοτικών καμπυλών υπέρβασης. Η καμπύλη της ITU-RP.837 προσεγγίζει ικανοποιητικά την διετή πειραματική καμπύλη. Μεταξύ των 2 τελευταίων καμπυλών, περισσότερο αξιόπιστη θεωρείται η πειραματική, παρά την 40ετία μετρήσεων της ECMWF, εξαιτίας της ‘αναξιόπιστης’ διγραμμικής παρεμβολής που εφαρμόζεται στην εκτίμηση της έντασης βροχής για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης.

Αναφορικά με την καμπύλη του καλοκαιριού του Σχήματος 4.3, παρατηρούμε ότι ενώ η πιθανότητα βροχής είναι μικρή, ισχυρές βροχοπτώσεις με μικρή πιθανότητα εμφάνισης ($\sim 10^{-4}$ - 10^{-5} , δηλαδή με διάρκεια γύρω στα 1-12 Minutes/το έτος) εκτείνουν την καμπύλη σε εξαιρετικά υψηλές τιμές έντασης. Παρόμοια χαρακτηριστικά με την καμπύλη του καλοκαιριού παρουσιάζει και η εποχιακή καμπύλη του φθινόπωρου. Από την άλλη πλευρά, οι εποχές της άνοιξης και του χειμώνα χαρακτηρίζονται από μία πιο ομαλή συμπεριφορά, με τον χειμώνα να βρέχει συχνότερα και εντονότερα από ότι την άνοιξη. Επίσης, στις εποχές καλοκαίρι και φθινόπωρο βρέχει συχνότερα και περισσότερο, για εντάσεις βροχόπτωσης μεγαλύτερες των 10mm/h και για πιθανότητες υπέρβασης μικρότερες των 5×10^{-3} σε σχέση με το δίδυμο χειμώνα και άνοιξης.



Σχήμα 4.3 Εποχιακές κατανομές υπέρβασης της έντασης βροχόπτωσης για 2 έτη

4.3 Εφαρμογή της SST (Synthetic Storm Technique)

Η SST, ως εργαλείο πρόβλεψης της απόσβεσης λόγω βροχής, θα λάβει ως είσοδο την χρονοσειρά έντασης βροχόπτωσης και θα την μετασχηματίσει σε μία χρονοσειρά απόσβεσης λόγω βροχής [E. Matricciani, 1996]. Η τεχνική SST έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον Matlab (συνάρτηση SyntStormCR_htest), με το οποίο θα προσομοιάσουμε την ετήσια, εποχιακή και ημερήσια πιθανοτική κατανομή υπέρβασης απόσβεσης λόγω βροχής καθώς και άλλα χρήσιμα μεγέθη για την αξιολόγηση της επίδρασης της βροχής στο δορυφορικό σύστημα επικοινωνιών με επίγειο σταθμό τοποθετημένο στην θέση του βροχόμετρου και δορυφόρο τον HellasSat 2 [Kanellouropoulos, 2006], [ESA, "HellasSat 2 Handbook"].

Βέβαια, εκτός από την χρονοσειρά βροχής, η SST απαιτεί και τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Γεωγραφικό πλάτος του βροχόμετρου $lat(latititude)$ (σε $^{\circ}$)
- Ύψόμετρο του βροχόμετρου $H_s(km)$
- Συχνότητα δειγματοληψίας του βροχόμετρου (μετρήσεις/min)
- Συχνότητα λειτουργίας f (GHz)
- Γωνία Ανύψωσης θ (σε $^{\circ}$)
- Γωνία πόλωσης τ (σε $^{\circ}$)
- Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου βροχής v (σε m/sec)
- Ύψος βροχόπτωσης H_r , βάσει της σύστασης ITU-RP.839-4

,όπου για τις ανάγκες της δικής μας προσομοίωσης έχουμε : $lat=37.59^\circ N$, $H_s=0.406km$, συχνότητα δειγματοληψίας 1 μέτρηση /min, συχνότητα λειτουργίας $f=12,20,40 GHz$, γωνία ανύψωσης $\theta=43.21^\circ$, $\tau=0^\circ$ (οριζόντια πόλωση) ,μέση ταχύτητα ανέμου βροχής $v=14m/sec$ και $H_r=2.494 km$ το ύψος της βροχόπτωσης πάνω από το μέσο επίπεδο της θάλασσας. Επισημαίνουμε ότι η παραπάνω γωνία ανύψωσης αντιστοιχεί στην δορυφορική ζεύξη Αθήνα- HellasSat 2 ενώ η ταχύτητα του ανέμου προέκυψε από μετεωρολογικές μετρήσεις [V. Kotronietc, 1997],[K. Lagouvardosetc, 1996]. Η συχνότητα δειγματοληψίας της χρονοσειράς απόσβεσης λόγω βροχής , με βάση τον κώδικα SyntStormCR_htest, είναι 22 δείγματα/min, δηλαδή 22 φορές μεγαλύτερη της συχνότητας δειγματοληψίας για την ένταση βροχής .Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συντελεστές διάδοσης k, a των στρωμάτων A(20°) και B(0°) για τις 3 παραπάνω συχνότητες λειτουργίας της υποτιθέμενης downlink δορυφορικής ζεύξης υπολογίστηκαν με βάση το [D.Maggiore,1981] και παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.1), ενώ συγκριτικά παρατίθεται και ο Πίνακας 4.2 με τους συντελεστές διάδοσης a, k κατά την [ITU-RP.838].

	k(20°C)	a(20°C)	k(0°C)	a(0°C)
f1=12GHz	0.0183	1,2133	0,0191	1,1674
f2=20GHz	0.0737	1,0915	0,0661	1,1114
f3=40GHz	0.3402	0,9369	0,3427	0,9442

Πίνακας 4.1 Συντελεστές διάδοσης a, k κατά [D.Maggiore,1981]

	k	a
f1=12GHz	1,1537	0,0242
f2=20GHz	1,0221	0,0937
f3=40GHz	0,8557	0,4357

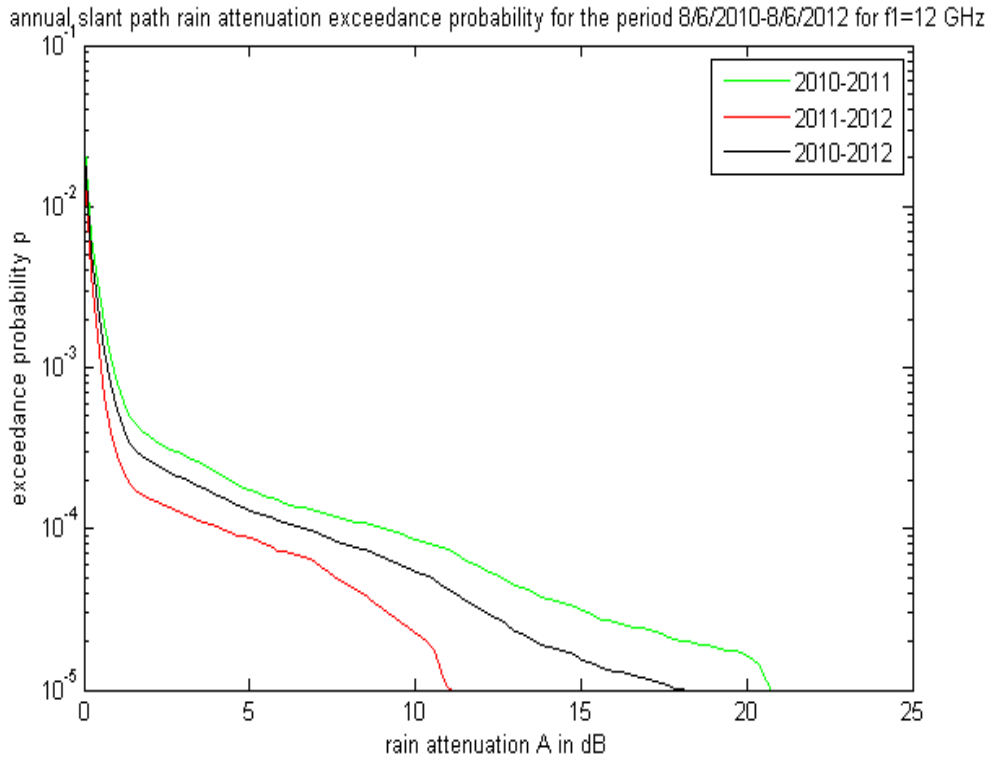
Πίνακας 4.2 Συντελεστές διάδοσης a, k κατά [ITU-RP.838]

4.4 Ετήσια και εποχιακή κατανομή απόσβεσης λόγω βροχής

4.4.1 Ετήσια κατανομή απόσβεσης λόγω βροχής

4.4.1.1 SST

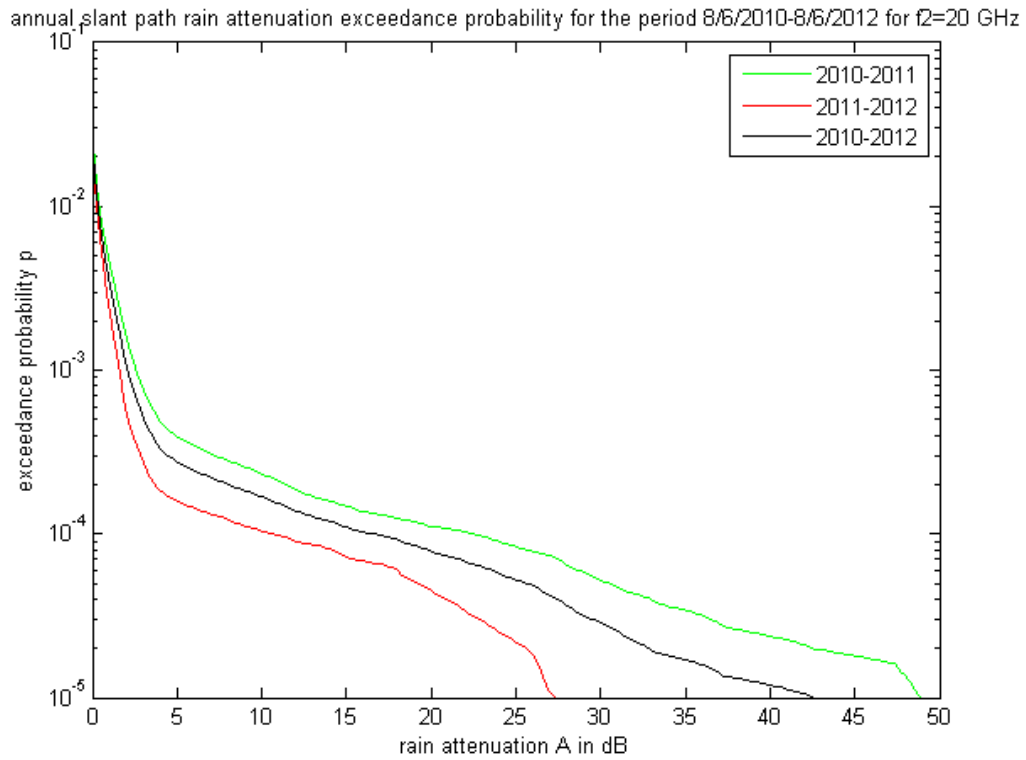
Στο Σχήμα 4.4 απεικονίζεται η προβλεπόμενη, με την SST, ετήσια πιθανοτική κατανομή υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχής σε 3 χρονικά διαστήματα (εντελώς ανάλογα με το Σχήμα 4.2): 1) για το διάστημα 8/6/2010-8/6/2011, 2) για το διάστημα 8/6/2012-8/6/2012 και 3) για την διετία 8/6/2010-8/6/2012 . Στο Σχήμα 4.3, σημειώνεται ότι η συχνότητα λειτουργίας του υποτιθέμενου downlink δορυφορικού ραδιοδιαύλου είναι 12 GHz.



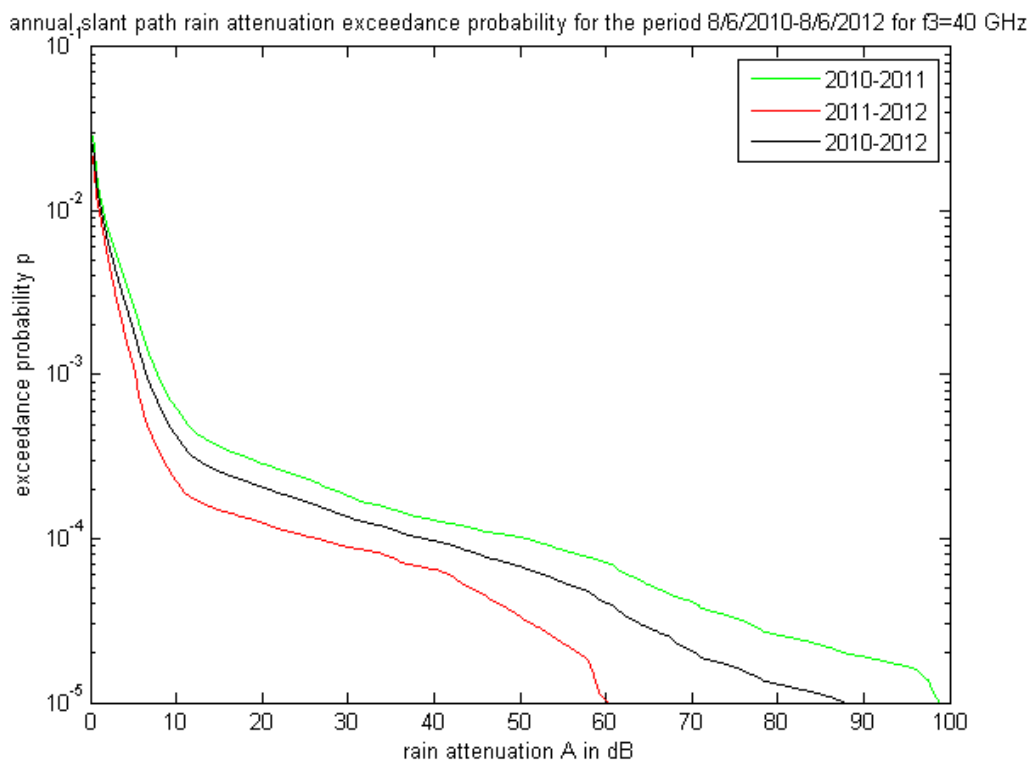
Σχήμα 4.4 Ετήσιες κατανομές υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης για $f_1=12$ GHz

Στο Σχήμα 4.4, παρατηρούμε ότι το 2^ο έτος (2011-2012) παρουσιάζει μικρότερη απόσβεση λόγω βροχής σε σχέση με το 1^ο έτος (2010-2011), γεγονός που οφείλεται στο Σχήμα 4.2, δηλαδή στο ότι οι βροχές το 1^ο έτος είναι συχνότερες και εντονότερες σε σχέση με το 2^ο έτος. Η καμπύλη της απόσβεσης για την διετία βρίσκεται στο μεσαίο χώρο των 2 παραπάνω καμπυλών, εντελώς ανάλογα με την δίχρονη καμπύλη της έντασης λόγω βροχής.

Στα επόμενα Σχήματα 4.5, 4.6 παρουσιάζονται οι ετήσιες πιθανοτικές καμπύλες υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχής, με βάση την τεχνική της SST για τις συχνότητες των 20 και 40 GHz. Οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα του Σχήματος 4.4 επεκτείνονται για τα Σχήματα 4.4 και 4.5 με την επισήμανση ότι οι αντίστοιχες καμπύλες για τις 3 συχνότητες είναι παρόμοιες μεταξύ τους, με κυρίαρχη διαφορά τις αριθμητικές τιμές των απεικονιζόμενων μεγεθών.



Σχήμα 4.5 Ετήσιες κατανομές υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης για $f_2=20$ GHz

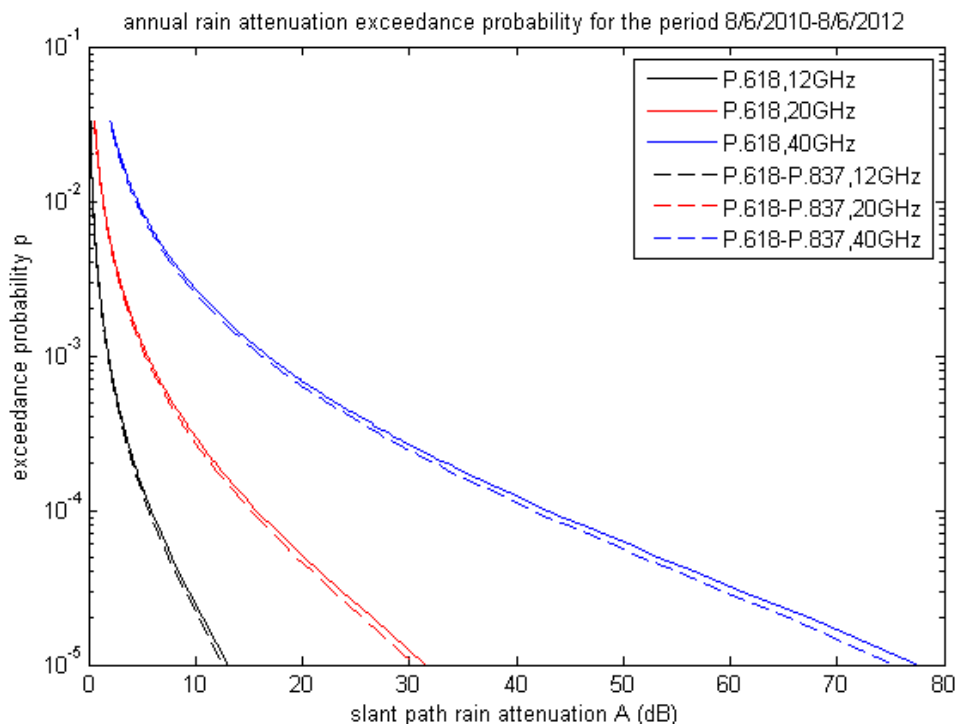


Σχήμα 4.6 Ετήσιες κατανομές υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης για $f_3=40$ GHz

4.4.1.2 ITU-RP.618-12

Στο Σχήμα 4.7 απεικονίζεται η προβλεπόμενη κατανομή απόσβεσης λόγω βροχής με βάση την σύσταση ITU-RP.618-12 για την παραπάνω διετία και για τις 3 συχνότητες λειτουργίας της ζεύξης $f_1=12\text{GHz}$, $f_2=20\text{GHz}$ και $f_3=40\text{GHz}$ με 2 τρόπους υπολογισμού της υπερβαινόμενης έντασης βροχόπτωσης για το 0.01% ενός μέσου έτους, R_{001} , με:

- τα πειραματικά δεδομένα της χρονοσειράς έντασης βροχής και
- την βοήθεια της σύστασης ITU-RP.837-5.



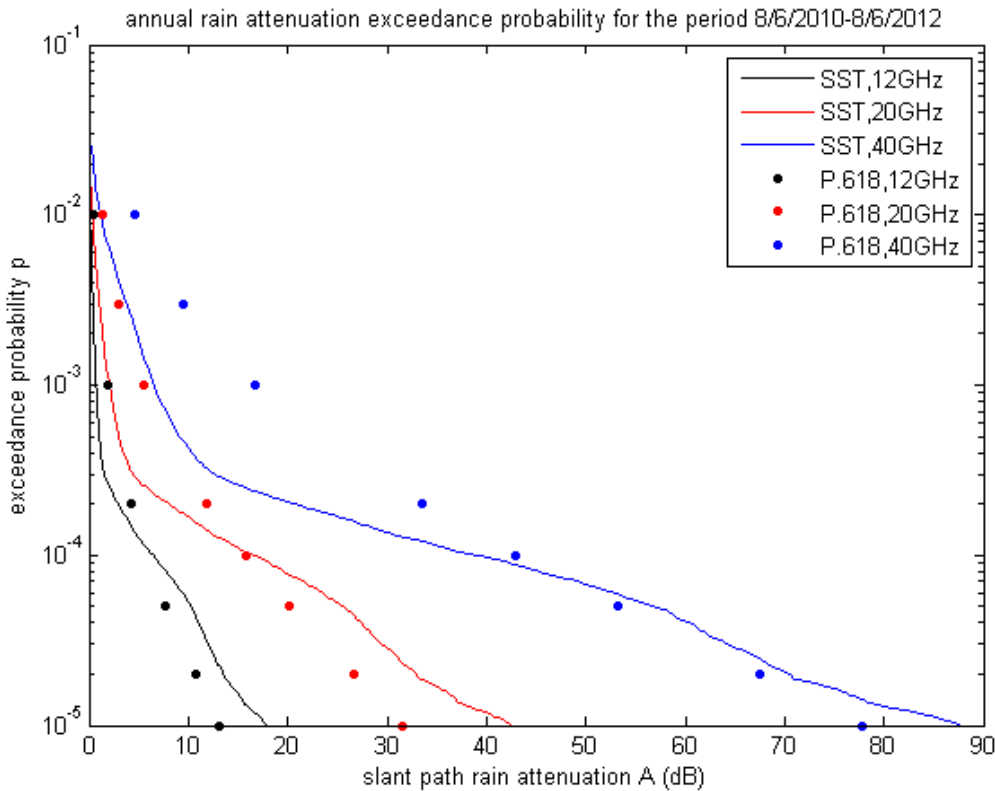
Σχήμα 4.7 Ετήσιες κατανομές υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης για 12, 20 και 40GHz με βάση τις ITU-RP.618 και ITU-RP.837

Αναφορικά με τις καμπύλες της απόσβεσης της ITU-RP.618, παρατηρούμε ότι η καμπύλη ITU-RP.618 υπερέρχει ελάχιστα της καμπύλης ITU-RP.618-P.837 για μία δεδομένη συχνότητα, γεγονός που οφείλεται στο ότι το R_{001} των πειραματικών μετρήσεων είναι ελαφρώς μεγαλύτερο του R_{001} με βάση τους παγκόσμιους ψηφιακούς χάρτες της ITU-R., Σύμφωνα με την σχετική προσομοίωση στο Matlab, το $R_{001}=50.91\text{mm/hr}$ κατά τις μετρήσεις και $R_{001}=48.23\text{mm/hr}$ κατά την ITU-R.

4.4.1.3 Σύγκριση των 2 μεθόδων

Στο ακόλουθο σχήμα, στο Σχήμα 4.8, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά και αντιπαραθετικά οι διετείς αθροιστικές συμπληρωματικές καμπύλες της κατανομής της απόσβεσης λόγω βροχής, για το διάστημα 8/6/2010-8/6/2012, των μεθοδολογιών της SST και της σύστασης ITU-RP.618-12, για τις 3 συχνότητες λειτουργίας της υποτιθέμενης downlink δορυφορικής ραδιοζεύξης, $f_1=12\text{GHz}$, $f_2=20\text{GHz}$ και $f_3=40\text{GHz}$.

Σημειώνουμε ότι, στο Σχήμα 4.8, οι καμπύλες της ITU-Rείναι οι ITU-RP.618 και όχι οι ITU-RP.618-P.837, για λόγους αντικειμενικής σύγκρισης(τόσο το SST όσο και τοITU-RP.618 προέκυψαν από μετρήσεις στο βροχόμετρο).



Σχήμα 4.8 Σύγκριση των ετήσιων κατανομών απόσβεσης για τις 3 συχνότητες 12,20 και 40 GHzμεταξύ των μεθοδολογιών SSTκαι ITU-RP.618

Στο

Σχήμα 4.8, παρατηρούμε ,σχετικά με τις καμπύλες της SST,ότι αυξανόμενης της συχνότητας λειτουργίας της δορυφορικής ζεύξης και διατηρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους εισόδου της συνάρτησης SyntStormCR_hstest σταθερές, οι απώλειες λόγω βροχών γίνονται εντονότερες για την ίδια πιθανότητα υπέρβασης και συχνότερες για την ίδια τιμή απωλειών διάδοσης λόγω βροχής, δηλαδή οι συνθήκες διάδοσης του downlinkσήματος καθίστανται δυσχερέστερες. Το ίδιο συμβαίνει και με τις καμπύλες της ITU-RP.618-12 , τις οποίες έχουμε σχεδιάσει με markersμε χρώμα ανάλογο του χρώματος της αντίστοιχης, ως προς την συχνότητα, καμπύλης της SST.

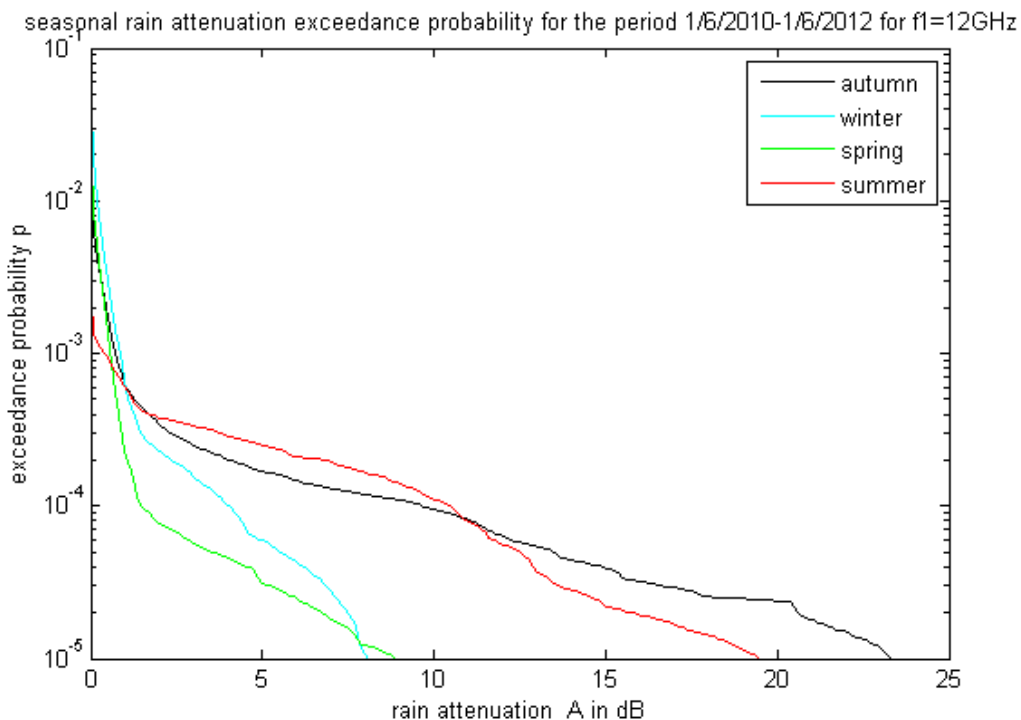
Ως προς τις διαφορές των καμπυλών ITU-RP.618 και SST ίδιας συχνότητας , παρατηρούμε ότι για πιθανότητα υπέρβασης υψηλότερη περίπου του 0.01% (πιο συγκεκριμένα 1.1×10^{-4} για 12GHz, 1.2×10^{-4} για 20GHzκαι 8×10^{-5} για 40 GHz) η καμπύλη ITU-RP.618-12 εκτιμά μεγαλύτερες απώλειες ενώ για πιθανότητα υπέρβασης μικρότερη περίπου του 0.01%, η καμπύλη ITU-RP.618-12 εκτιμά μικρότερες απώλειες από την αντίστοιχη SST. Εναλλακτικά , για πιθανότητα υπέρβασης υψηλότερη περίπου του 0.01% η ITU-Rπροβλέπει συχνότερα απώλειες λόγω βροχής που υπερβαίνουν το θεωρούμενο, κάθε φορά , κατώφλι σταθερής εξασθένησης (δηλαδή μεγαλύτερο ετήσιο ποσοστό υπέρβασης εξασθένησης) ενώ για πιθανότητα υπέρβασης μικρότερη περίπου του 0.01% η SSTείναι αυτή που προβλέπει συχνότερα υπερβάσεις της θεωρούμενης ,κάθε φορά ,σταθερής εξασθένησης.

4.4.2 Εποχιακή κατανομή απόσβεσης λόγω βροχής

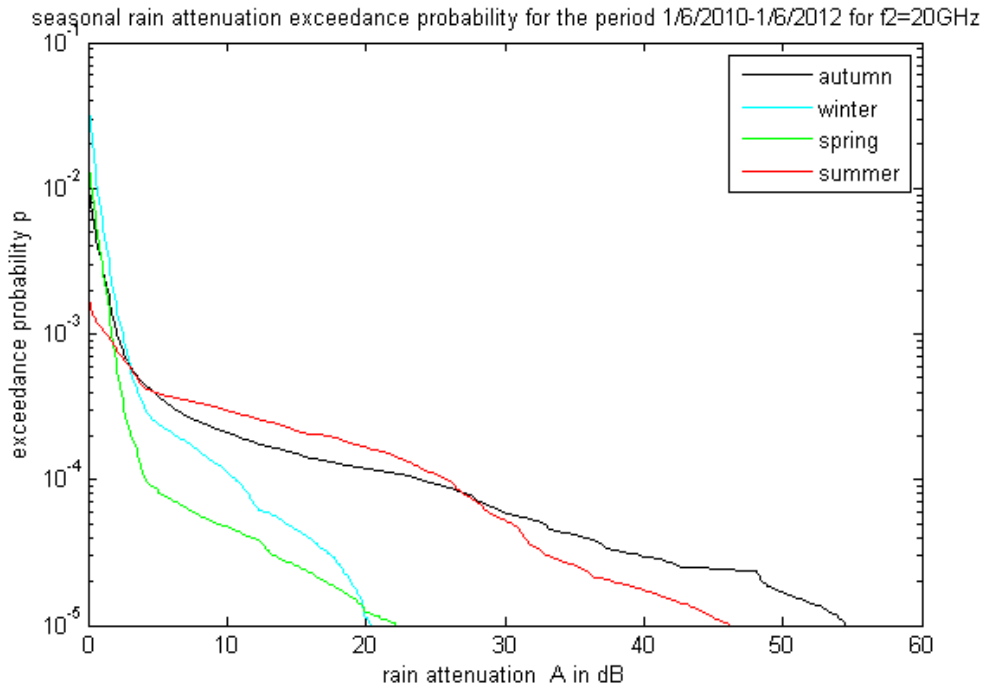
Όπως ακριβώς αξιοποιήσαμε την χρονοσειρά έντασης βροχής για να σχεδιάσουμε τις (διετείς) εποχιακές καμπύλες υπέρβασης της έντασης βροχής, ανάλογα θα αξιοποιήσουμε την παραγόμενη από την SST, χρονοσειρά απόσβεσης λόγω βροχής για να σχεδιάσουμε τις (διετείς) εποχιακές καμπύλες υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχής. Στα επόμενα Σχήματα(4.9, 4.10 και 4.11) παρουσιάζονται οι εποχιακές κατανομές απόσβεσης λόγω βροχής για τις συχνότητες 12, 20 και 40 GHz αντίστοιχα.

Παρατηρούμε ότι το δίδυμο φθινοπώρου-καλοκαιριού παρουσιάζει τις μεγαλύτερες και συχνότερες απώλειες λόγω βροχής σε σχέση με το δίδυμο του χειμώνα-άνοιξης. Τον χειμώνα, σχεδόν σε όλο το πιθανοτικό εύρος, οι απώλειες λόγω βροχής είναι μεγαλύτερες από ό,τι την άνοιξη ενώ το καλοκαίρι παρά την εξαιρετικά μικρή πιθανότητα εμφάνισης απωλειών ($P_{\text{sum}}(A>0) \sim 0.3\%$) εκτείνεται αρκετά και μάλιστα (κατά προσέγγιση) στο πιθανοτικό διάστημα 10^{-4} με $5 \cdot 10^{-4}$ οι απώλειες του καλοκαιριού είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες απώλειες του φθινοπώρου. Τα παραπάνω σχόλια ισχύουν για όλες τις συχνότητες του συστήματος.

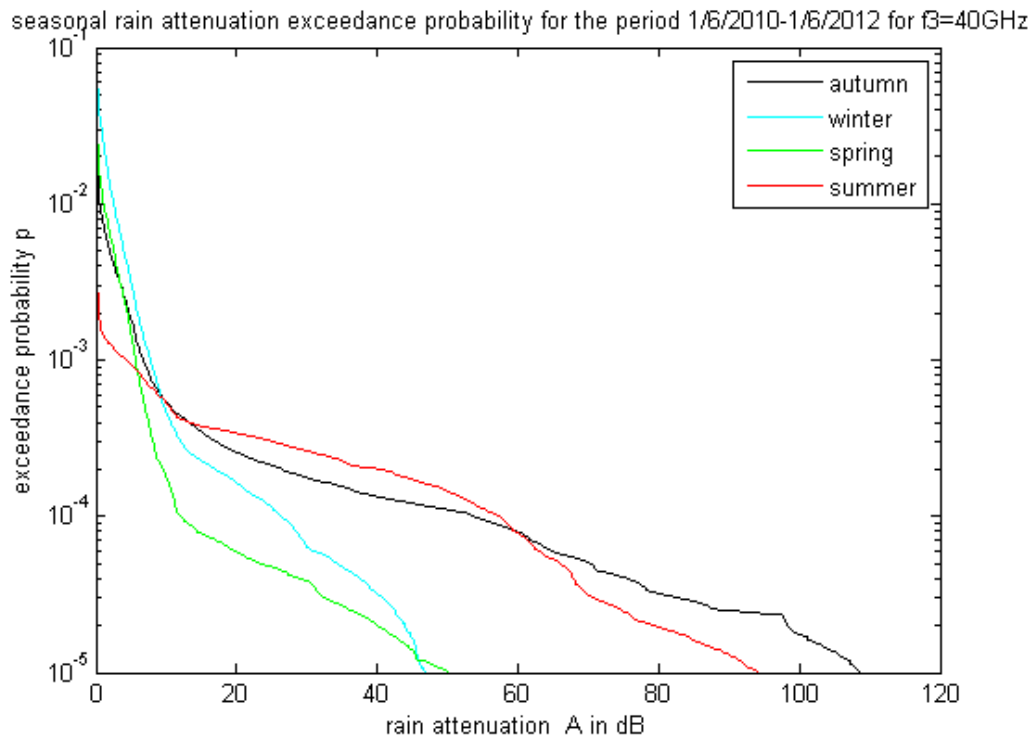
Επίσης, είναι αξιοπρόσεκτο το γεγονός ότι τα 3 παρακάτω Σχήματα παρουσιάζουν μία βασική ομοιότητα και μία βασική διαφορά. Η ομοιότητα έγκειται στο ότι η καμπύλη μίας εποχής σε μία συχνότητα είναι όμοια με τις αντίστοιχες εποχιακές καμπύλες των άλλων 2 συχνοτήτων ενώ η διαφορά σηματοδοτείται από την απόκλιση των αριθμητικών τιμών των μεγεθών (μεγαλύτερη συχνότητα συνεπάγεται και μεγαλύτερες απώλειες για μία εποχή). Μάλιστα, οι εποχιακές καμπύλες της απόσβεσης για κάθε συχνότητα μοιάζουν αρκετά με τις εποχιακές καμπύλες της έντασης της βροχής, συμπέρασμα που δεν περιορίζεται μόνο στις εποχιακές κατανομές αλλά επεκτείνεται και στις ετήσιες πιθανοτικές κατανομές.



Σχήμα 4.9 Εποχιακές κατανομές υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης για f1=12GHz



Σχήμα 4.10 Εποχιακές κατανομές υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης για $f_2=20\text{GHz}$



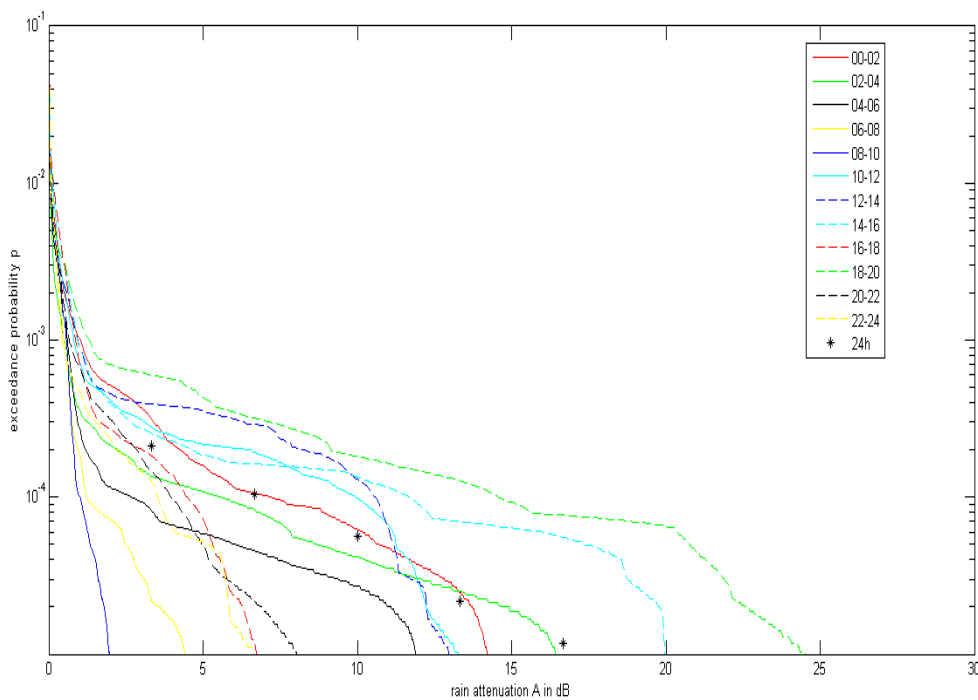
Σχήμα 4.11 Εποχιακές κατανομές υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης για $f_3=40\text{GHz}$

4.5 Ημερήσιες κατανομές απόσβεσης λόγω βροχής και λοιπά μεγέθη

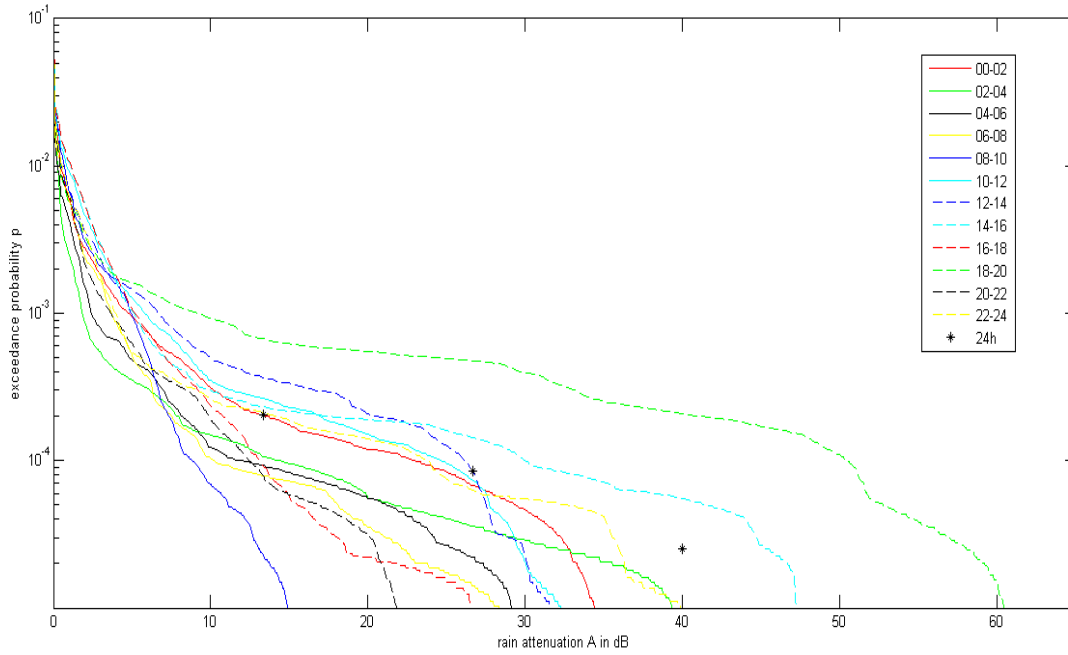
4.5.1 Ημερήσιες κατανομές απόσβεσης λόγω βροχής

Μετά την μελέτη των προσομοιωμένων, με την τεχνική SST, ετήσιων και εποχιακών πιθανοτικών κατανομών υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχής, θα ασχοληθούμε με την αντίστοιχη ημερήσια ανά 2h κατανομή και για τις 3 συχνότητες, $f_1=12\text{GHz}$, $f_2=20\text{GHz}$, $f_3=40\text{GHz}$. Βέβαια πριν προχωρήσουμε στην προσομοίωση της πρόγνωσης της απόσβεσης λόγω βροχής για τα 2-ηδιαστήματα της ημέρας, σε ετήσια βάση (2 έτη από 8/6/2010 μέχρι 8/6/2012), θα εκτιμήσουμε την 24-η κατανομή υπέρβασης απόσβεσης (σε διετή βάση). Ως προς την 24-η κατανομή, αναφέρουμε ότι είναι ταυτόσημη με την ετήσια κατανομή (διετή) κι αυτό οφείλεται στο ότι προσομοιώνουμε τις ίδιες μετρήσεις με διαφορετικό βήμα, δηλαδή στις ετήσιες το βήμα είναι το έτος ενώ στις ημερήσιες 24-η το βήμα είναι η μέρα.

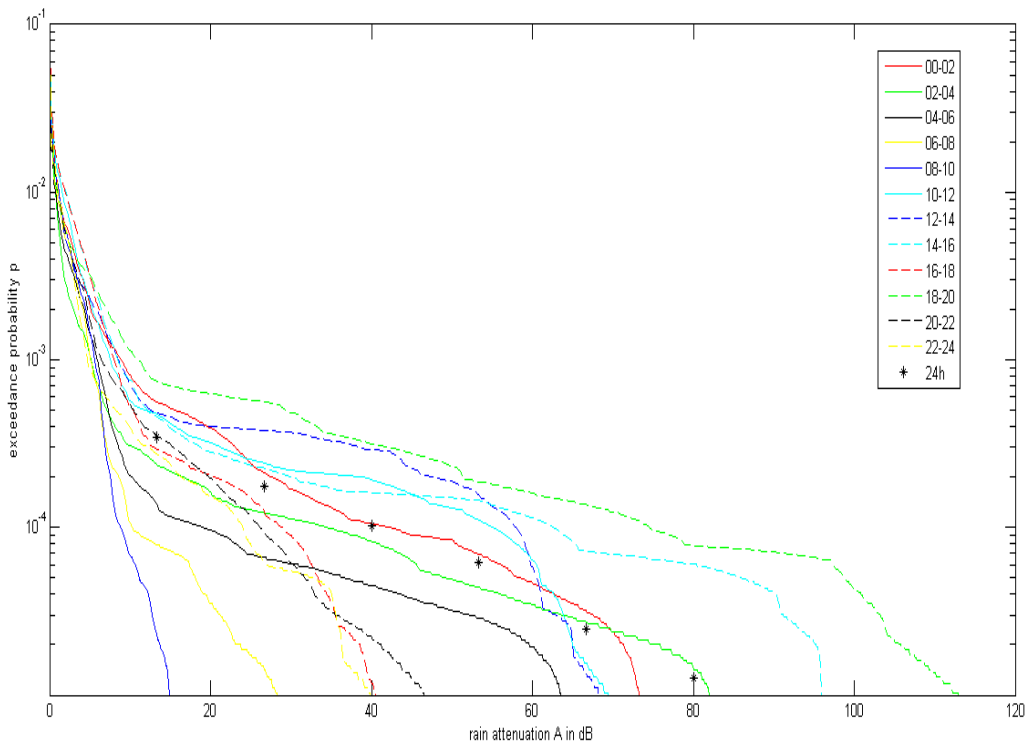
Ως προς τις 2-η κατανομές απόσβεσης στην διάρκεια της ημέρας και για τις 3 συχνότητες παραθέτουμε τα Σχήματα 4.12, 4.13 και 4.14, που απεικονίζουν τόσο την 24-η όσο και τις 2-η κατανομές απόσβεσης.



Σχήμα 4.12 Ημερήσιες 2h και 24h πιθανοτικές κατανομές υπέρβασης απόσβεσης λόγω βροχής για $f_1=12\text{GHz}$



Σχήμα 4.13 Ημερήσιες 2h και 24h πιθανοτικές κατανομές υπέρβασης απόσβεσης λόγω βροχής για $f_2=20\text{GHz}$



Σχήμα 4.14 Ημερήσιες 2h και 24h πιθανοτικές κατανομές υπέρβασης απόσβεσης λόγω βροχής για $f_3=40\text{GHz}$

Από τα παραπάνω Σχήματα , παρατηρούμε ότι το 2-h18:00-20:00 εκθέτει τις μεγαλύτερες απώλειες διάδοσης λόγω βροχής υπό σταθερό ετήσιο ποσοστό υπέρβασης ή το μεγαλύτερο ετήσιο ποσοστό απωλειών με σταθερή απόσβεση υπέρβασης , με αποτέλεσμα να επηρεάζει με τον δυσμενέστερο τρόπο τον

ραδιοδιάυλο . Στον αντίποδα, το08:00-10:00 εκθέτει την μικρότερη πιθανότητα υπέρβασης και γι αυτό αποτελεί το ευνοϊκότερο διάωρο για τον ραδιοδιάυλο, από άποψη απωλειών διάδοσης λόγω βροχής . Σημειώνουμε ότι τα παραπάνω συμπεράσματα αφορούν και τις 3 συχνότητες λειτουργίας.

Η 24-ηκαμπύλη αποτελεί τον μέσο όρο των 12 2-ηκαμπυλών και εκφράζει την μέση τυπική μέρα στην Αθήνα για την διετία (8/6/2010-8/6/2012). Όποια 2-η καμπύλη υπέρβασης απόσβεσης υπερέρχει της 24-η, απαιτεί να αυξηθεί το περιθώριο ισχύος της ζεύξης για να παραμείνει σταθερός ο δείκτης QoS ενώ όποια 2-η καμπύλη υπέρβασης απόσβεσης μειονεκτεί της μέσης 24-η τότε μπορούμε να μειώσουμε το περιθώριο ισχύος για εξοικονόμηση πόρων χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών (QoS).

4.5.2 Λοιπά ημερήσια στατιστικά μεγέθη

Ένα άλλο σύνολο καμπυλών , συνεπές με το σύνολο των 2-ηπιθανοτικών καμπυλών απόσβεσης λόγω βροχής , δίνεται στα Σχήματα 4.15, 4.16 και 4.17. Σε αυτά τα σχήματα , προβάλλεται ο λόγος της 2-ηπιθανότητας υπέρβασης προς την 24-ηπιθανότητα υπέρβασης , υπολογισμένος για απόσβεση βροχής των 3 και 6 dB, κατά την διάρκεια μία τυπικής μέρας για τις 3 συχνότητες της downlink δορυφορικής ζεύξης. Παράλληλα, έχει σχεδιαστεί και ο μοναδιαίος λόγος που αντιστοιχεί στην 24-η ημερήσια κατανομή και στα 3 σχήματα του πιθανοτικού λόγου

Στην ανάλυση μας ενδιαφερόμαστε για εκείνα τα 2-η των οποίων η πιθανότητα υπέρβασης, είτε για τα 3 είτε για τα 6dB απόσβεσης λόγω βροχής, είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη πιθανότητα υπέρβασης των 24-η, ισοδύναμα για εκείνα τα δίωρα των οποίων ο πιθανοτικός λόγος υπερβαίνει την μονάδα . Κι αυτό γιατί στα συγκεκριμένα διαστήματα είναι πιθανότερο να βρέξει υπερβαίνοντας τις παραπάνω αποσβέσεις, με αποτέλεσμα να απαιτείται λήψη αντίμετρων έναντι των παραγόμενων διαλείψεων(FMT) προς αποκατάσταση του QoS. Μάλιστα όσο περισσότερο υπερβαίνει ο πιθανοτικός λόγος ενός 2-η διαστήματος την μονάδα τόσο πιο πιθανό είναι η ζεύξη μας να υποφέρει από διαλείψεις. Υπενθυμίζουμε ότι , εξαιτίας του ανώτατου ορίου(10) και του κατώτατου ορίου(0.1) στον κάθετο λογαριθμικό άξονα του πιθανοτικού λόγου , είναι πιθανό να υπάρξουν πιθανοτικοί λόγοι 2-ηδιαστημάτων που να μην απεικονίζονται στα σχήματα. Αυτό σημαίνει ότι, πιθανοτικοί λόγοι περισσότερο από δέκα φορές μεγαλύτεροι της μονάδας ή πιθανοτικοί λόγοι μικρότεροι κατά δέκα φορές της μονάδας δεν δύνανται να παρουσιαστούν στα εν λόγω Σχήματα .

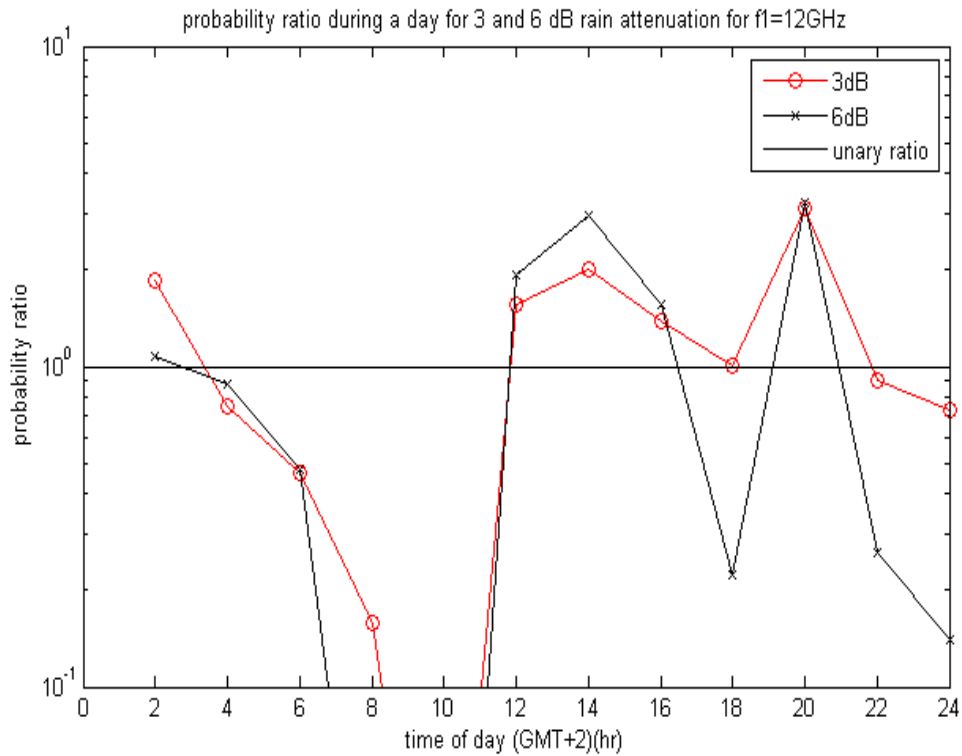
Οι 24-ηπιθανότητες υπέρβασης για τις 2 τιμές απόσβεσης και για τις 3 συχνότητες δίνονται στον Πίνακα 4.3. Ως προς τον Πίνακα 4.3, δεν θα πρέπει να μας εκπλήσσει το γεγονός ότι για σταθερή τιμή απόσβεσης (3 ή 6dB) η πιθανότητα υπέρβασης αυξάνεται όσο αυξάνεται και η συχνότητα καθώς γνωρίζουμε ότι οι απώλειες αυξάνονται με αύξηση της συχνότητας του δορυφορικού συστήματος επικοινωνιών. Παράλληλα, για δεδομένη συχνότητα η πιθανότητα υπέρβασης αυξάνεται με μείωση της απόσβεσης βροχής(επειδή ($A > 6dB \subseteq (A > 3dB) \Rightarrow P(A > 6dB) \leq P(A > 3dB)$)

	f1=12GHz	f2=20GHz	f3=40GHz
A1=3dB	1.992x10 ⁻⁴	5.093x10 ⁻⁴	0.0041
A2=6dB	1.064x10 ⁻⁴	2.429x10 ⁻⁴	0.0012

Πίνακας 4.3 Τιμές πιθανότητας υπέρβασης για A1=3dB και A2=6dB και για τις 3 συχνότητες

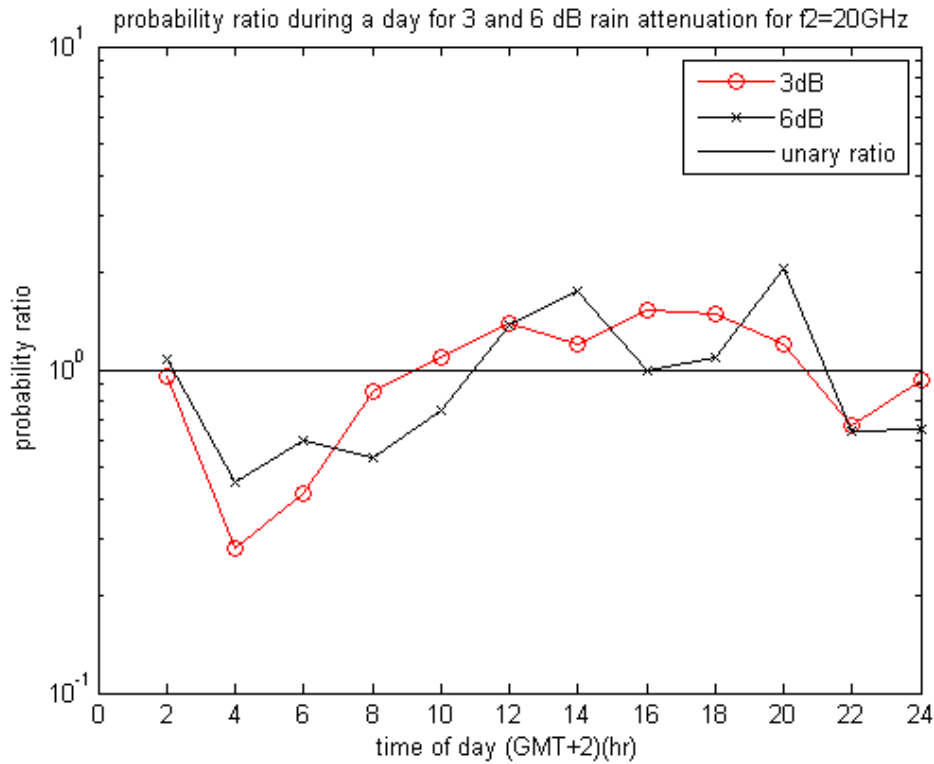
Αναφορικά με τα σχήματα , στο Σχήμα 4.15 παρατηρούμε ότι, για A1= 3dB, τα 2-ηδιαστήματα των χρονικών περιόδων 10:00-16:00,18:00-20:00 και 00:00-02:00 παρουσιάζουν υψηλότερη πιθανότητα υπέρβασης έναντι της τυπικής 24-ηπιθανότητας υπέρβασης , με το διάστημα 18:00-20:00 να ξεχωρίζει για την υψηλή τιμή πιθανότητας υπέρβασης .Ως προς το A2= 6dB, παρατηρούμε, όπως και πριν, ότι η χρονική

περίοδος 10:00-16:00 και το 2-h 18:00-20:00 είναι κρίσιμα για την ορθή λειτουργία του δορυφορικού συστήματος επικοινωνιών, με το 2-h 18:00-20:00 να υπερέχει των υπολοίπων επίμαχων 2-ηδιαστημάτων.

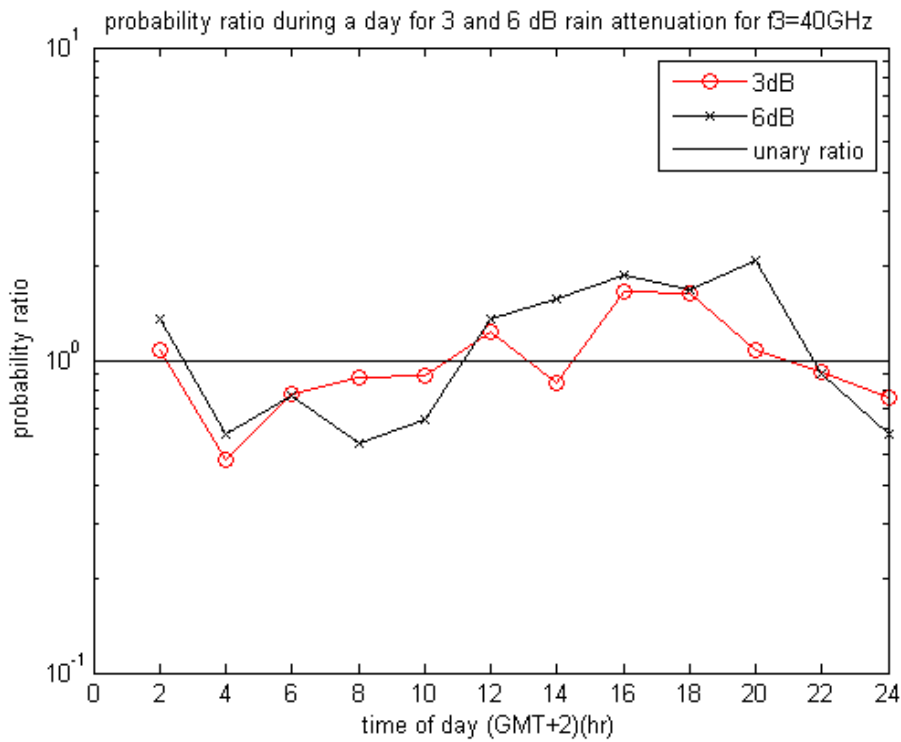


Σχήμα 4.15 Πιθανοτικός λόγος κατά την διάρκεια μιας ημέρας για αποσβέσεις υπέρβασης $A_1=3\text{dB}$ και $A_2=6\text{dB}$ και συχνότητα $f_1=12\text{GHz}$.

Στο Σχήμα 4.16, με συχνότητα λειτουργίας τα 20GHz, τόσο η καμπύλη των 3dB όσο και η καμπύλη των 6dB βρίσκονται μέσα στο 'παράθυρο' του πιθανοτικού λόγου (0.1, 10). Ως προς την καμπύλη των 3dB, το επίμαχο χρονικό διάστημα είναι το 10:00-20:00, με τα 2-h 14:00-18:00 να παρουσιάζουν μεγάλες τιμές. Αναφορικά με την καμπύλη των 6dB, τα 2-h 00:00-14:00 και 18:00-20:00 ξεχωρίζουν για τις υψηλότερες τιμές έναντι των υπολοίπων.



Σχήμα 4.16 Πιθανοτικός λόγος κατά την διάρκεια μιας ημέρας για αποσβέσεις υπέρβασης $A_1=3\text{dB}$ και $A_2=6\text{dB}$ και συχνότητα $f_2=20\text{GHz}$.



Σχήμα 4.17 Πιθανοτικός λόγος κατά την διάρκεια μιας ημέρας για αποσβέσεις υπέρβασης $A_1=3\text{dB}$ και $A_2=6\text{dB}$ και συχνότητα $f_3=40\text{GHz}$.

Τέλος, στο Σχήμα 4.17 , για την συχνότητα των 40GHz, διακρίνουμε ως επίφοβα τα χρονικά διαστήματα 10:00-12:00,14:00-18:00 για την περίπτωση της απόσβεσης των 3dB και τα χρονικά διαστήματα 00:00-02:00 και 10:00-20:00 για την περίπτωση της απόσβεσης των 6dB. Από τα παραπάνω διαστήματα , τα 2-h 14:00-18:00,για την καμπύλη των 3dB ,ενώ το 2-h 18:00-20:00, για την καμπύλη των 6dB, συγκεντρώνουν την μεγαλύτερη πιθανότητα .

Η ενδελεχής ανάλυση των παραπάνω 3 Σχημάτων μας επιτρέπει να συμπεράνουμε ότι για την συχνότητα των 12GHz , τα 2-h 12:00-14:00και 18:00-20:00 είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα για εμφάνιση βροχών με απόσβεση υψηλότερη των 3και 6dB, για την συχνότητα των 20GHz τα 2-h 14:00-16:00, για την καμπύλη των 3dB, και 18:00-20:00, για την καμπύλη των 6dB, εκτιμάται ότι θα προκαλέσουν το μεγαλύτερο πρόβλημα στην εύρυθμη λειτουργία του δορυφορικού ραδιοδιαύλου λόγω βροχοπτώσεων. Τέλος, για την συχνότητα των 40GHzτο δίωρα 14:00-18:00,για την καμπύλη των 3dB, και 18:00-20:00, για την καμπύλη των 6dB, παρουσιάζουν την μεγαλύτερη επικινδυνότητα. Οι παρούσες παρατηρήσεις συμφωνούν σε ικανοποιητικό βαθμό με τις ημερήσιες 2-ηπιθανοτικές καμπύλες υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχής (δες Σχήματα 4.12, 4.13 και 4.14) . Στην συνέχεια της παρούσας ενότητας θα εξετάσουμε ένα άλλο ημερήσιο μέγεθος με σπουδαία συνεισφορά στην τεχνική σχεδίασης του δορυφορικού δικτύου .

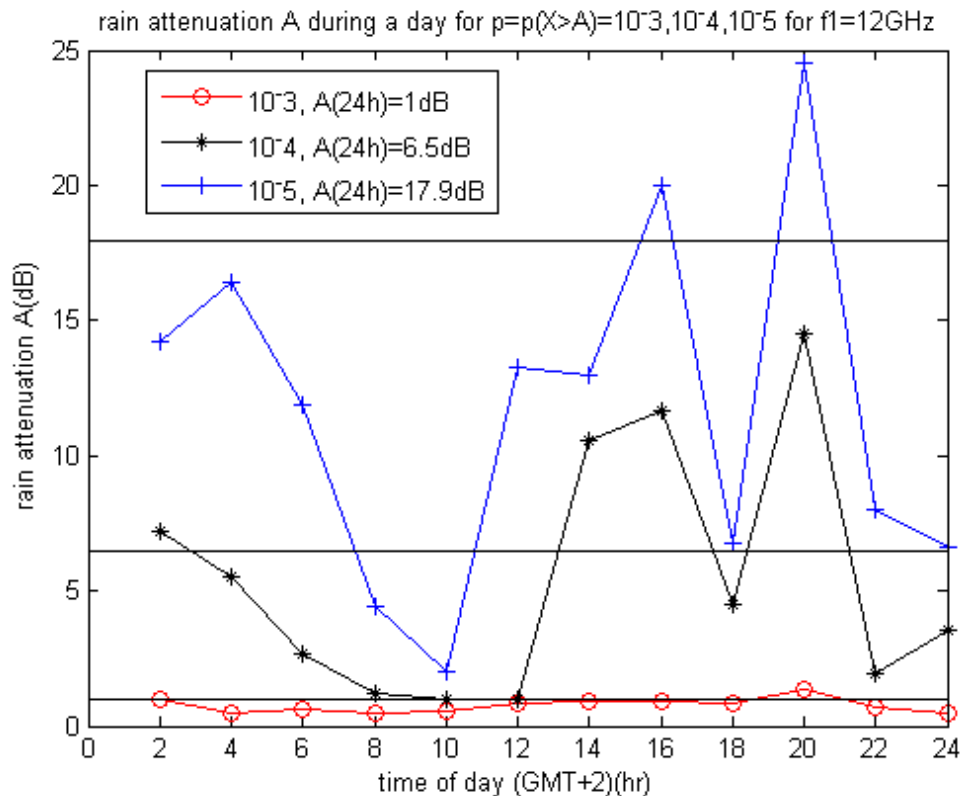
Το δεύτερο μέγεθος, που θα μελετήσουμε, είναι το αντίστροφο του πιθανοτικού λόγου, με την έννοια ότι τώρα θα παρουσιάσουμε την χρονική εξέλιξη της απόσβεσης λόγω βροχής στην διάρκεια μίας μέρας (πάντοτε χωρισμένης σε 2-ηχρονικά διαστήματα) για σταθερές πιθανότητες υπέρβασης. Οι (σταθερές) πιθανότητες υπέρβασης μπορούν να χαρακτηριστούν ισοδύναμα πιθανότητες διακοπής ή πιθανότητες μη διαθεσιμότητας του συστήματος, εφόσον το σύστημα σχεδιαστεί με περιθώριο διαλείψεων αυτό της απόσβεσης της 24-ηκατανομής για κάθε πιθανότητα υπέρβασης και κάθε συχνότητα λειτουργίας. Αναλυτικότερα, θα σχεδιάσουμε τις σχετικές καμπύλες της απόσβεσης και για τις 3 συχνότητες: $f_1=12\text{GHz}$, $f_2=20\text{GHz}$ και $f_3=40\text{GHz}$ και για πιθανότητες υπέρβασης : 10^{-3} , 10^{-4} και 10^{-5} . Στα ίδια Σχήματα αναπαριστούμε την 24-ηαπόσβεση, σαν οριζόντια καμπύλη στην διάρκεια της μέρας , και για τις 3 πιθανότητες διακοπής.

Στον Πίνακα 4.4, δίνονται οι τιμές της 24-ηεξασθένησης (dB) για τις 3 συχνότητες και τις 3 πιθανότητες διακοπής .

	f1=12GHz	f2=20GHz	f3=40GHz
p1=10⁻³	1	2	6.6
p2=10⁻⁴	6.5	16.5	38.8
p3=10⁻⁵	17.9	42.7	87.9

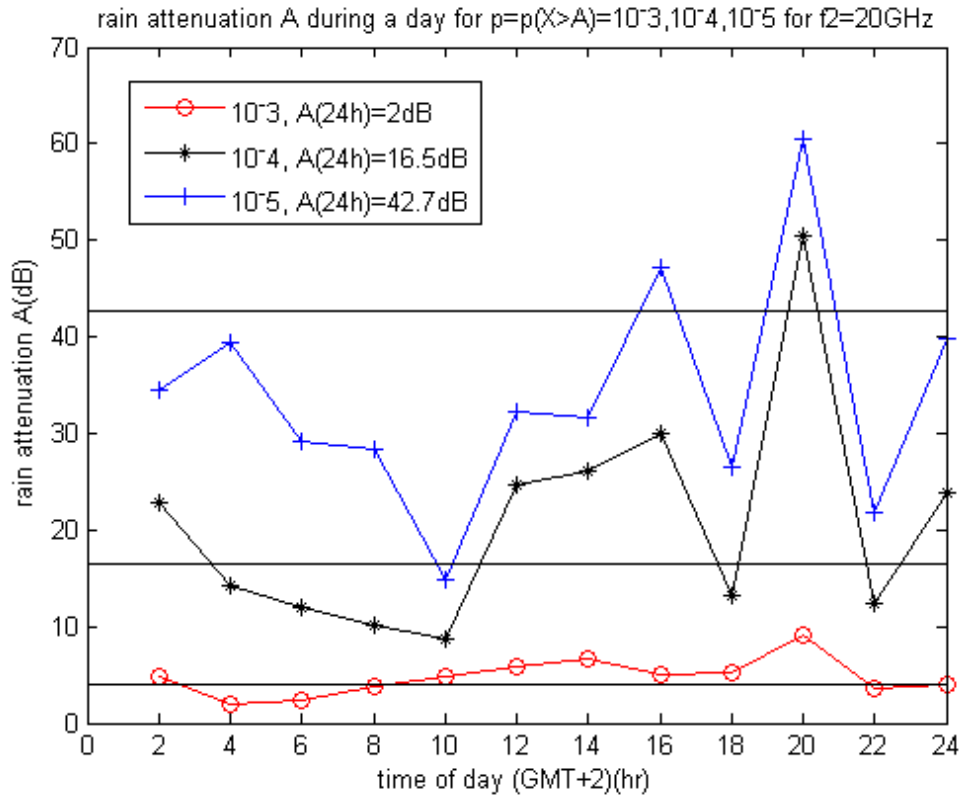
Πίνακας 4.4 Τιμές υπερβαινόμενης απόσβεσης για τα 3 ετήσια ποσοστά υπέρβασης και τις 3 συχνότητες.

Στον Πίνακα 4.4, παρατηρούμε ότι για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης , η τιμή της απόσβεσης αυξάνεται αυξανόμενη της συχνότητας της downlinkδορυφορικής ζεύξης, γεγονός που οφείλεται στις εντονότερες απώλειες σε μεγαλύτερες συχνότητες. Στην συνέχεια , προβάλλουμε τα Σχήματα 4.18, 4.19 και 4.20 για τις 3 συχνότητες. Σε αυτά τα σχήματα , εστιάζουμε την προσοχή μας στα 2-ηχρονικά διαστήματα με απόσβεση υψηλότερη της 24-η απόσβεσης για κάθε πιθανότητα διακοπής και κάθε συχνότητα λειτουργίας. Τονίζουμε ότι και τα υπόλοιπα 2-η διαστήματα είναι δυνατό να αναπτύξουν δυσβάστακτες για το σύστημα απώλειες(υπεράνω του καθορισμένου περιθωρίου διαλείψεων) και να το οδηγήσουν στην διακοπή , αλλά η πιθανότητα ενός τέτοιου ενδεχομένου είναι κατά πολύ μικρότερη των προηγούμενων 2-ηχρονικών διαστημάτων.



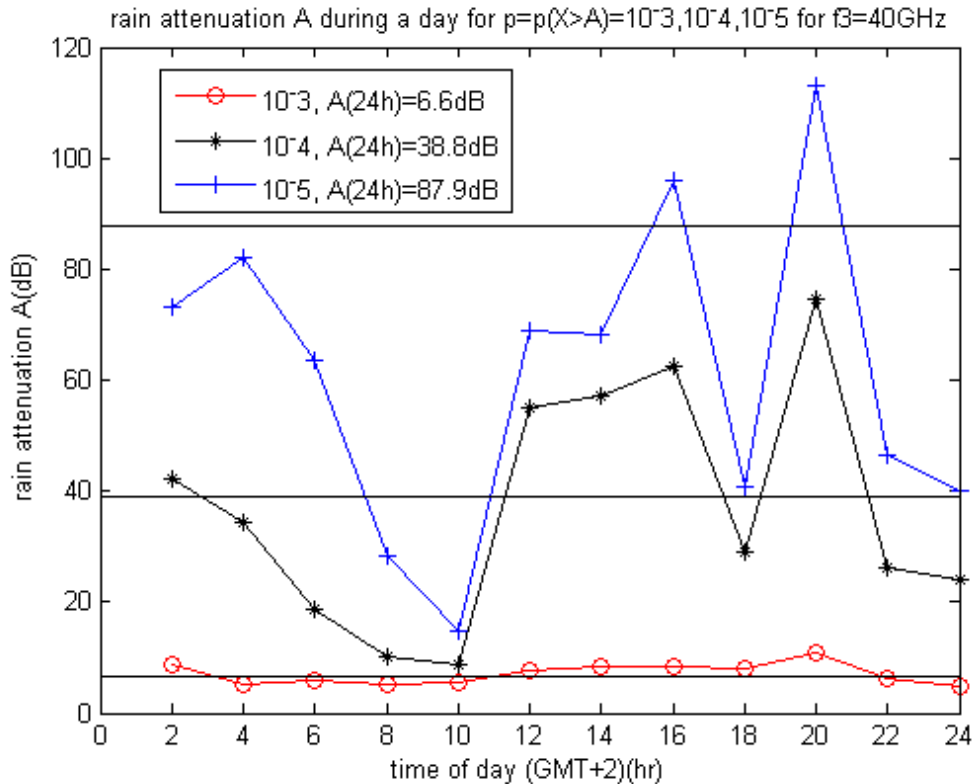
Σχήμα 4.18 Απόσβεση λόγω βροχής κατά την διάρκεια μίας ημέρας(σε 2-ηχρονικά διαστήματα) για 3 πιθανότητες διακοπής $10^{-3}, 10^{-4}$ και 10^{-5} και συχνότητα $f_1=12\text{GHz}$

Στο Σχήμα 4.18, για την $f_1=12\text{GHz}$, όσον αφορά την καμπύλη της πιθανότητας υπέρβασης 10^{-3} το 2-ηδιάστημα 18:00-20:00 ξεπερνά το ημερήσιο 24-h κατώφλι. Για την πιθανότητα υπέρβασης 10^{-4} , τα 2-ηδιάστημα της περιόδου 12:00-16:00 και 18:00-20:00, εκ των οποίων περισσότερο το διάστημα 18:00-20:00, προκαλούν πρόβλημα ενώ για πιθανότητα διακοπής 10^{-5} τα 2-ηχρονικά διαστήματα 14:00-16:00 και 16:00-18:00 δυσχεραίνουν την λειτουργία της δορυφορικής ζεύξης. Συνοπτικά για το Σχήμα 4.18, θα συμπεράνουμε ότι στα 2-h 14:00-16:00 και 18:00-20:00 είναι αρκετά πιθανό να σημειωθεί βροχόπτωση με απώλειες κατά πολύ υψηλότερες από την μέση προβλεπόμενη απόσβεση για την συνολική διάρκεια μίας ημέρας (24-h).



Σχήμα 4.19 Απόσβεση λόγω βροχής κατά την διάρκεια μίας ημέρας(σε 2-ηχρονικά διαστήματα) για 3 πιθανότητες διακοπής $10^{-3}, 10^{-4}$ και 10^{-5} και συχνότητα $f_2=20\text{GHz}$

Στο Σχήμα 4.19 – για την 2^η συχνότητα $f_2=20\text{GHz}$ - αναφορικά με την καμπύλη της πιθανότητας υπέρβασης 10^{-3} τα 2-ηπου ανήκουν στο χρονικό διάστημα 10:00-20:00 είναι ριζοκίνδυνα για εμφάνιση απόσβεσης μεγαλύτερης της προβλεπόμενης ημερήσιας, με το 18:00-20:00, να ταλαιπωρεί ιδιαίτερα τον σχεδιαστή λόγω της μεγάλης διαφοράς από το ημερήσιο κατώφλι. Για πιθανότητα υπέρβασης 10^{-4} ή ισοδύναμα για διαθεσιμότητα 99.99% τα 2-η 00:00-02:00, 10:00-16:00, 18:00-20:00 και 22:00-24:00, φέρουν υψηλή πιθανότητα να προκαλέσουν πρόβλημα κατά την λειτουργία της ζεύξης. Για την ίδια περίπτωση διαθεσιμότητας, από τα παραπάνω 2-η διαστήματα, τα 14:00-16:00 και 18:00-20:00 εμφανίζουν την μεγαλύτερη επικινδυνότητα για αποσυγχρονισμό του συστήματος. Τέλος, για την διαθεσιμότητα 99.999% (δηλαδή πιθανότητα υπέρβασης 10^{-5}) τα 2-η 14:00-16:00 και 18:00-20:00 απαιτούν την προσοχή του σχεδιαστή. Συμπερασματικά, τα 2-η 14:00-16:00 και 18:00-20:00 ξεπερνούν περισσότερο από τα υπόλοιπα δώρα το ημερήσιο 24-ηκατώφλι απόσβεσης, για τις διαθεσιμότητες 99.99% και 99.999%, με αποτέλεσμα να χρίζουν ειδικής αντιμετώπισης από τον σχεδιαστή της downlink δορυφορικής ζεύξης.



Σχήμα 4.20 Απόσβεση λόγω βροχής κατά την διάρκεια μίας ημέρας (σε 2-h χρονικά διαστήματα) για 3 πιθανότητες διακοπής $10^{-3}, 10^{-4}$ και 10^{-5} και συχνότητα $f_3=40\text{GHz}$

Ολοκληρώνουμε την ανάλυση μας με το Σχήμα 4.20, που αφορά την 3^η συχνότητα των 40GHz. Όσον αφορά την καμπύλη της πιθανότητας υπέρβασης 10^{-3} τα 2-h διαστήματα της χρονικής περιόδου 10:00-20:00 και το 2-h 00:00-02:00 ξεπερνούν την ημερήσια προβλεπόμενη 24-h απόσβεση (περισσότερο το 18:00-20:00). Για πιθανότητα διακοπής 10^{-4} , τα 2-h διαστήματα της περιόδου 10:00-16:00 και 18:00-20:00 προκαλούν πρόβλημα ενώ για πιθανότητα διακοπής 10^{-5} τα 2-h 14:00-16:00 και 18:00-20:00 δυσχεραίνουν την λειτουργία της δορυφορικής ζεύξης. Ομοίως, με τα προηγούμενα 2 Σχήματα, 4.18 και 4.19, τα δίωρα 14:00-16:00 και 18:00-20:00 χρειάζονται περισσότερη προσοχή προκειμένου να λειτουργήσει το σύστημα σύμφωνα με τις προδιαγραφές της λειτουργίας του.

Παρατηρούμε, μετά από προσεκτική επισκόπηση των Σχημάτων 4.18, 4.19 και 4.20, ότι εάν η δορυφορική μας ζεύξη σχεδιαστεί με βάση το 24-h περιθώριο διαλείψεων προς αντιστάθμιση των απωλειών διάδοσης εξαιτίας βροχοπτώσεων, τότε αυτό δεν αρκεί σε συγκεκριμένα 2-h χρονικά διαστήματα της ημέρας προκειμένου να διατηρήσουμε την ποιότητα των παρεχόμενων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών (QoS). Από αυτά τα 2-h διαστήματα, διακρίνουμε τα 2-h 14:00-16:00 και 18:00-20:00, να υπερέρχουν, με την μεγαλύτερη τιμή, του ημερήσιου κάθε φορά κατωφλίου απόσβεσης και για τις 3 συχνότητες.

Το παρόν συμπέρασμα από την τελευταία τριάδα Σχημάτων συμφωνεί ικανοποιητικά με τα συμπεράσματα των Σχημάτων για τις ημερήσιες πιθανοτικές κατανομές υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχής και με την τριάδα Σχημάτων για την χρονική εξέλιξη στην διάρκεια μίας ημέρας του πιθανοτικού λόγου υπό σταθερή εξασθένηση. Δηλαδή, τα 2 πιο έντονα, από άποψη απόσβεσης λόγω βροχής, βάση των ημερήσιων πιθανοτικών κατανομών απόσβεσης, 14:00-16:00 και 18:00-20:00 εμφανίζονται απειλητικά για την ορθή λειτουργία του συστήματος τόσο στα Σχήματα με σταθερή πιθανότητα διακοπής (υπερέχει το 18:00-20:00) όσο και στα Σχήματα με σταθερή εξασθένηση (υπερέχει το 18:00-20:00). Άρα, για ένα υποθετικό δορυφορικό σύστημα μεταξύ Αθηνών και του ελληνικού γεωστατικού δορυφόρου HellasSat 2, προβλέπουμε ότι η downlink ζεύξη υποφέρει από συχνότερες και εντονότερες διαλείψεις λόγω βροχής στα 2-h 14:00-16:00

και 18:00-20:00 συγκριτικά με τα μέσα 24-ωστατιστικά αποτελέσματα , και γι αυτό απαιτείται αύξηση του περιθωρίου διαλείψεων στα παρόντα χρονικά διαστήματα με χρήση διαφόρων FMTs[Panagopoulos,2004] με σκοπό την διατήρηση του QoSεντός συνόλου επιτρεπτών τιμών .Συνεπώς, ο σχεδιαστής του δορυφορικού δικτύου θα πρέπει να λάβει υπόψη του αυτά τα προσομοιωμένα ημερήσια στατιστικά μεγέθη , προκειμένου να χρησιμοποιήσει μία αποδοτική στην αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων, χρονικά στοχευμένη και συνδυαστική στρατηγική αντιμετώπισης των διαλείψεων λόγω βροχής στα διάφορα χρονικά τμήματα της ημέρας.

4.6 Βιβλιογραφία

- [Kanellopoulos,2006]S.A. Kanellopoulos, A.D. Panagopoulos, E. Matricciani, J.D. Kanellopoulos, Annual and diurnal slant path rain attenuation statistics in Athens obtained with the synthetic storm technique, IEEE Trans. On Antennas and Propagation 2006, 54, 2357-2364.
- [E. Matricciani, 1996], “Physical-mathematical model of the dynamics of rain attenuation based on rain rate time series and two-layer vertical structure of precipitation,” *Radio Sci.*, vol. 31, no. 2, pp. 281–295.
- [D. Maggiori, 1981] “Computed transmission through rain in the 1–400 GHz frequency range for spherical and elliptical drops and any polarization,”*Alta Freq.*, vol. 50, pp. 262–273.
- [ITU-R P. 618-12] ITU-R Propagation Series, P.618-12, “Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Earth-Space Telecommunication Systems”, 2015
- [ITU-R P.837-5] ITU-R Propagation Series, P.837-5, “Characteristics of Precipitation for Propagation Modelling”, 2007
- [ITU-R P.838-3] ITU-R Propagation Series, P.838-3, “Specific attenuation model for rain for use in prediction Methods”, 2005
- [ITU-R P.839-4] ITU-R Propagation Series, P.839-4 “Rain height model for prediction methods” , 2003.
- [ITU-RP1511-1]ITU-R Propagation Series, P.1511-1, “Topography for Earth-to-space propagation modelling”, 2015
- [ESA, “HellasSat 2 Handbook”]“Hellas-Sat 2 Handbook” ,ESA, Mar. 2004, p. 87.
- [V. Kotroni etc, 1997] V. Kotroni, G. Kallos, and K. Lagouvardos, “Convergence zones over the Greek Peninsula and associated thunderstorm activity”,*Q. J. R. Met.Society*, vol. 123, pp. 1961–1984
- [K. Lagouvardos etc, 1996] K. Lagouvardos, V. Kotroni, S. Dobricic, S. Nickovic, and G. Kallos, “The storm of October 21–22 1994 over Greece: observations and model results,” *J. Geoph. Res.*, vol. 101, no. D21, pp. 26217–26226
- [Panagopoulos,2004] A. D. Panagopoulos, P.M. Arapoglou, P.G. Cottis, “Satellite Communications at Ku, Ka and V bands, Propagation Impairments and Mitigation Techniques”, IEEE Communication Surveys and Tutorials, Vol.6, No.3
- [eml,rain-gauge] <http://www.emltd.net/products/precipitation/arg100-rain-gauge>

5^ο Κεφάλαιο

Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

5.1 Συμπεράσματα

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα της εργασίας μας είναι :

Γενικά στοιχεία

- Η SST τεχνική αποτελεί σήμερα το πιο αξιόπιστο μοντέλο εκτίμησης των απωλειών διάδοσης λόγω βροχής για τις εύκρατες ζώνες της Γης. Έντονη έρευνα, σήμερα, διεξάγεται για επέκταση της χρήσης του μοντέλου σε μη-εύκρατες περιοχές, όπως τροπικές, υποτροπικές κ.ά.

Χρονοσειρά έντασης βροχής

- Τον 1^ο χρόνο των μετρήσεων μας (8/6/2010-8/6/2011) έβρεξε περισσότερο από τον 2^ο χρόνο (8/6/2011-8/6/2012).
- Στις εποχές καλοκαίρι και φθινόπωρο βρέχει συχνότερα και περισσότερο, για βροχοπτώσεις έντασης μεγαλύτερης των 10mm/hr σε σχέση με το δίδυμο χειμώνα και άνοιξης.

Χρονοσειρά απόσβεσης λόγω βροχής

- Αυξανόμενη της συχνότητας λειτουργίας της δορυφορικής ζεύξης, αυξάνονται και οι απώλειες διάδοσης λόγω βροχής για δεδομένη χρονοσειρά έντασης βροχής. Ο κορεσμός, όμως, των τυπικών για δορυφορικές υπηρεσίες χαμηλότερων ζωνών συχνότητων(L,S,C) σε συνδυασμό με τις διευρυνόμενες απαιτήσεις σε όγκο μεταδιδόμενης πληροφορίας προκάλεσε την φασματική εκτροπή σε υψηλότερες συχνότητες με κόστος την εντονότερη εξασθένηση του δορυφορικού σήματος. Το τελευταίο σημαίνει ότι απαιτούνται περισσότεροι πόροι από το σύστημα για την επίτευξη του αναγκαίου περιθωρίου διαλείψεων προκειμένου να αντισταθμίσουμε τις έντονες απώλειες διάδοσης και να διατηρήσουμε αμείωτο το QoS.
- Μικρότερες τιμές έντασης βροχής προκαλούν μικρότερη απόσβεση έναντι των εντονότερων βροχοπτώσεων για σταθερή συχνότητα λειτουργίας του συστήματος, κάτι που αποδίδεται στην σχέση $\gamma_R = kR^a$
- Οι εποχιακές καμπύλες της απόσβεσης για κάθε συχνότητα μοιάζουν αρκετά με τις εποχιακές καμπύλες της έντασης της βροχής, συμπέρασμα που δεν περιορίζεται μόνο στις εποχιακές κατανομές αλλά επεκτείνεται και στις ετήσιες πιθανοτικές κατανομές. Αυτό μας επιτρέπει ποιοτικά συμπεράσματα που εξήχθησαν από την μελέτη των κατανομών βροχής(ετήσιων ή εποχιακών) να τα επεκτείνουμε αντίστοιχα στις κατανομές απόσβεσης λόγω βροχής(ετήσιες ή εποχιακές). Ως προς τις ετήσιες καμπύλες απόσβεσης, ITU-RP.618 και SST, παρατηρούμε ότι για πιθανότητα υπέρβασης υψηλότερη περίπου του 0.01% (πιο συγκεκριμένα 1.1×10^{-4} για 12GHz, 1.2×10^{-4} για 20GHz και 8×10^{-5} για 40 GHz) η καμπύλη ITU-RP.618-12 εκτιμά μεγαλύτερες απώλειες ενώ για πιθανότητα υπέρβασης μικρότερη περίπου του 0.01%, η καμπύλη ITU-RP.618-12 εκτιμά μικρότερες απώλειες από την αντίστοιχη SST. Αναφορικά με τις εποχιακές καμπύλες απόσβεσης, το δίδυμο φθινοπώρου-

καλοκαιριού παρουσιάζει τις μεγαλύτερες και συχνότερες απώλειες λόγω βροχής σε σχέση με το δίδυμο του χειμώνα-άνοιξης .

- Τα 2-h14:00-16:00 και 18:00-20:00 εκθέτουν τις μεγαλύτερες απώλειες διάδοσης λόγω βροχής υπό σταθερό ετήσιο ποσοστό υπέρβασης ή το μεγαλύτερο ετήσιο ποσοστό απωλειών με σταθερή απόσβεση υπέρβασης (υψηλή συχνότητα), με αποτέλεσμα να επηρεάζουν με τον δυσμενέστερο τρόπο τον ραδιοδιάλυο.
- Συνεπώς, στα 2-h14:00-16:00 και 18:00-20:00 ,κατά το καλοκαίρι ή τον χειμώνα, είναι πολύ πιθανότερο να προκληθεί έντονη εξασθένηση σε σχέση με άλλο χρονικό διάστημα ή εποχή ,στην υποθετική downlink ζεύξη μεταξύ Αθήνας και HellasSat 2.Αυτό σημαίνει ότι εάν το σύστημα σχεδιαστεί με περιθώριο διαλείψεων αντίστοιχο της 24-ημερήσιας στατιστικής κατανομής απόσβεσης τότε είναι πολύ πιθανό να προκληθεί διακοπή λειτουργίας στα χρονικά διαστήματα14:00-16:00 και 18:00-20:00. Γι αυτό το λόγο, αυξάνουμε το περιθώριο διαλείψεων εφαρμόζοντας ένα αποτελεσματικό σχήμα FMTs(έλεγχος ισχύος, προσαρμοστική μετάδοση, διαφορική προστασία),με σκοπό την εκπλήρωση των προκαθορισμένων προδιαγραφών διαθεσιμότητας(availability) και ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών του δορυφορικού συστήματος (QoS).

5.2 Μελλοντική έρευνα

Η χρονοσειρά έντασης βροχής για την περιοχή της Αθήνας, λήφθηκε για χρονική διάρκεια 2 περίπου ετών με χρήση ενός βροχόμετρου τοποθετημένου στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου του ΕΜΠ. Η διάρκεια του πειράματος, η χρήση ενός μόνο βροχόμετρου και η μη απομάκρυνση ακραίων βροχοπτώσεων με μεγάλη περίοδο επανάληψης, περιορίζουν την αξιοπιστία των μετρήσεων. Μάλιστα, δεδομένης της μεγάλης γεωγραφικής έκτασης της Αθήνας και της προαστιακής θέσης της Πολυτεχνειούπολης, η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων υποβαθμίζεται σε λοιπές περιοχές εντός της Αθήνας, και μάλιστα σε εκείνες που απέχουν μεγάλη απόσταση από το σημείο των πειραμάτων (πχ Περιστερί , Άγιοι Ανάργυροι κτλ). Συνεπώς, σε μία τρέχουσα ή μελλοντική μελέτη της απόσβεσης του δορυφορικού σήματος για την περιοχή της Αθήνας οι παραπάνω παράμετροι πρέπει να ληφθούν υπόψη προς όφελος της στατιστικής αξιοπιστίας των μετρήσεων και ακολούθως των σχετικών αποτελεσμάτων.

Στην παρούσα εργασία έγινε εκτίμηση με χρήση της SST των πιθανοτικών καμπυλών απόσβεσης βροχής για τις διάφορες εποχές του έτους και για τα 2-h χρονικά διαστήματα της ημέρας. Από αυτά τα στατιστικά στοιχεία προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για την κατάσταση των απωλειών λόγω βροχής στην ζεύξη μας σε διάφορες χρονικές περιόδους , με αποτέλεσμα να επιστρατεύεται, κατά περίπτωση, το εκάστοτε σχήμα FMT. Η δυνατότητα χρήσης των FMT με βάση εποχιακά και 2-h ημερήσια στατιστικά αποτελέσματα καθιστά το δορυφορικό σύστημα περισσότερο εύρωστο σε φαινόμενα διαλείψεων λόγω βροχής. Άρα, ακριβέστερες μετρήσεις σημαίνει ακριβέστερες προσομοιώσεις, γεγονός που συνεπάγεται ορθότερη χρήση των FMT προς ικανοποίηση των προδιαγραφών της ζεύξης μας. Σημειώνεται, επίσης, ότι στο μέλλον μπορεί εξεταστεί η εξασθένηση λόγω βροχής σε άλλες συχνότητες , είτε με προσομοιώσεις της διατιθέμενης χρονοσειράς έντασης βροχής είτε με μοντέλα αναγωγής συχνότητας, και να συγκριθούν οι 2 αυτές μέθοδοι . Επιπλέον , είναι εφικτή η προέκταση των 2-h ημερήσιων χρονικών διαστημάτων σε 2N-h ημερήσια διαστήματα.

Επιπλέον, μπορεί να γίνει στατιστική επεξεργασία των ημερήσιων και εποχιακών καμπυλών έντασης και απόσβεσης βροχής, προκειμένου να προκύψουν θεωρητικές ημερήσιες και εποχιακές κατανομές, όπως ακριβώς συμβαίνει με την ετήσια κατανομή έντασης της ITU-RP.837 και την ετήσια κατανομή απόσβεσης της ITU-RP.618. Θα ήταν παράλειψη να μην αναφέρουμε ότι απαιτείται περαιτέρω έρευνα και τεχνολογική πρόοδος στις ολοένα και πιο χρησιμοποιούμενες υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων, τόσο στον τομέα των προγνωστικών μεθόδων των απωλειών λόγω βροχής, με σκοπό την σύγκλιση προβλεπόμενων και

πραγματικών αποτελεσμάτων, όσο και στον τομέα των FMT , προκειμένου να αντιμετωπίζονται όσον το δυνατόν πιο αποτελεσματικά οι ανεπιθύμητες διαλείψεις του δορυφορικού σήματος.

Κάτι που θα έκανε πιο πλήρη τη μελέτη της επίδρασης του περιβάλλοντος θα ήταν να εξάγουμε μοντέλα που θα εισαγάγουν πέρα από τη βροχή, τα σύννεφα, την ομίχλη, τη συχνοεπιλεκτική απορρόφηση, τους στροβιλισμούς στην ατμόσφαιρα, τα αερολύματα ή και πιο ειδικά αερολύματα, σε μεγάλες συγκεντρώσεις, που υπάρχουν σε αστικά κέντρα κτλ. Τέτοια αναλυτικά μοντέλα θα μπορούσαν να ξεκινήσουν από τη Mie theory και από τη μικροφυσική των υγρών σταγονιδίων και αερολυμάτων, που παρεμβάλλονται στο μονοπάτι διάδοσης του σήματος.