



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

Μοντελοποίηση Καναλιού για Οπτικές Δορυφορικές Επικοινωνίες

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Νικόλαου Κ. Λύρα

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

Αθήνα, Φεβρουάριος 2015



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

Μοντελοποίηση Καναλιού για Οπτικές Δορυφορικές Επικοινωνίες

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Νικόλαου Κ. Λύρα

Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή

.....
Αθανάσιος
Παναγόπουλος
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Παναγιώτης Κωπτής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Λύρας Κ. Νικόλαος
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright Λύρας Κ. Νικόλαος, 2015

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, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση του θέματος της διπλωματικής εργασίας μου και τη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου προσέφερε. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τις ευκαιρίες που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου οι οποίες αποτελούν εφιαλτήριο για τη μετέπειτα ακαδημαϊκή μου πορεία.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα Μηχανικό Χαρίλαο Κουρόγιωργα, για τη συνεχή εποπτεία της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, για τη βοήθεια που μου προσέφερε καθώς και για την εξαιρετική συνεργασία κατά τη διάρκεια αυτής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου που με στηρίζουν σε κάθε μου προσπάθεια όλα αυτά τα χρόνια και κυρίως την οικογένειά 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 καναλιού για οπτικές δορυφορικές επικοινωνίες. Η ανάγκη για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση εύρους ζώνης καθιστούν αναγκαία τη μελέτη μετάδοσης σε υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων. Μια πιθανή λύση που ικανοποιεί τις παραπάνω προϋποθέσεις αποτελούν οι Οπτικές Ασύρματες Επικοινωνίες, οι οποίες επωφελούνται από τη χρήση μιας αχρησιμοποίητης ζώνης συχνοτήτων για τη μετάδοση οπτικού φέροντος. Λόγω της απουσίας παρεμβολών στις οπτικές συχνότητες από κοινή χρήση από άλλα δορυφορικά συστήματα και επιπλέον ότι δεν υπάρχουν ακόμα διεθνή πρότυπα στα δορυφορικά συστήματα, οι οπτικές δορυφορικές επικοινωνίες δίνουν τη δυνατότητα για πολύ μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης. Οι οπτικές δορυφορικές επικοινωνίες παρουσιάζουν ποικίλα πλεονεκτήματα, όμως η διάδοση του σήματος μέσα από την ατμόσφαιρα της Γης επιφέρει πολύ μεγάλες απώλειες, οι οποίες πρέπει να υπολογιστούν με τη χρήση κατάλληλων μοντέλων.

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται μια επισκόπηση των Οπτικών Δορυφορικών Δικτύων και των αναγκών που καθιστούν απαραίτητη τη διερεύνησή τους. Γίνεται μια πρώτη σύγκριση με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες ασύρματης μετάδοσης στις ράδιο-συχνότητες και παρουσιάζονται τα ποικίλα οφέλη από τη χρήση των Οπτικών Δορυφορικών Επικοινωνιών. Παράλληλα, γίνεται μια σύντομη αναφορά στα ατμοσφαιρικά φαινόμενα που επηρεάζουν την οπτική ζεύξη και γίνεται αντιληπτή η ανάγκη για όσο το δυνατόν πιο ακριβή μοντελοποίηση καναλιού για οπτικές δορυφορικές επικοινωνίες.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται ο προϋπολογισμός ισχύος της οπτικής ζεύξης. Η διαδικασία αυτή αποτελεί θεμέλιο λίθο στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών, καθώς μέσω αυτής υπολογίζεται ο απαραίτητος σηματοθορυβικός λόγος για τη μετάδοση πληροφορίας μέσα μέσω της οπτικής ζεύξης Γης-δορυφόρου. Θα παρουσιαστεί και θα δοθεί μια κατάλληλη μέθοδος για τον υπολογισμό του ρυθμού φωτονίων σήματος και θορύβου και της μεταξύ τους σχέσης για τον υπολογισμό του σηματοθορυβικού λόγου, τόσο για τη Διαμόρφωση Θέσης Παλμού- PPM (Pulse-Position Modulation) όσο και για DPSK (Differential Phase Shift Keying) διαμόρφωση, λαμβάνοντας υπόψιν τόσο τα μεγέθη του συστήματος όπως τα κέρδη των φακών και τις απώλειες των επιμέρους βαθμίδων, όσο και μεγέθη του περιβάλλοντος όπως η οπτική και η αστρική ακτινοβολία. Παράλληλα, θα υπολογιστεί και το περιθώριο ισχύος που χρειάζεται για κωδικοποιημένες και ακωδικοποιητές PPM και DPSK ζεύξεις, το οποίο βασίζεται σε αναλυτικά μοντέλα για τη χωρητικότητα PPM και DPSK διαύλου.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η επίδραση των νεφών στη διάδοση των δορυφορικών ζεύξεων από την μικροκυματική/χιλιοστομετρική RF ζώνη έως τη ζώνη των οπτικών συχνοτήτων. Αρχικά, θα παρουσιαστεί μια σύνοψη των μικροφυσικών ιδιοτήτων των νεφών καθώς και η απαραίτητη ηλεκτρομαγνητική θεωρία. Στη συνέχεια, θα παραθέσουμε μερικά από τα μοντέλα που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία έως σήμερα για τον υπολογισμό της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών. Τα μοντέλα αυτά αξιοποιούν τα εισερχόμενα μετεωρολογικά δεδομένα, με σκοπό την όσο το δυνατόν ακριβέστερη πρόβλεψη της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών.

Στο Κεφάλαιο 4 προτείνεται ένα νέο μοντέλο για τον υπολογισμό της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών. Το μοντέλο αυτό εκμεταλλεύεται τη χρήση των πολυδιάστατων στοχαστικών διαφορικών εξισώσεων για τη σύνθεση των χρονοσειρών δισδιάστατων τυχαίων πεδίων νεφών, χαρακτηρισμένα μέσω του μεγέθους του ολοκληρώματος της περιεκτικότητας σε υγρό νερό των νεφών (ILWC). Τα πεδία νεφών είναι συσχετισμένα τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο. Για τον υπολογισμό της απόσβεσης, χρησιμοποιείται η θεωρία για την κάθετη έκταση των νεφών που δόθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο καθώς και οι μικροφυσικές ιδιότητες των νεφών, τα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία από την ITU, καθώς και η ευρέως

γνωστή θεωρία Mie, με σκοπό τον αριθμητικό υπολογισμό της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών.

Τέλος στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα του μοντέλου που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4. Πραγματοποιήθηκαν αναλυτικές και ακριβείς προσομοιώσεις σε περιβάλλον Matlab και γίνεται παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Παρουσιάζονται γραφήματα των χρονοσειρών του ILWC και της απόσβεσης του οπτικού σήματος εξαιτίας των νεφών, τόσο για μία ζεύξη όσο και για σχήμα διαφορισμού θέσης και παρατίθενται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Λέξεις κλειδιά

Οπτικές Δορυφορικές Επικοινωνίες, Απόσβεση λόγω νεφών, χρονοσειρές πεδίων νεφών, Μοντελοποίηση Καναλιού.

Abstract

The scope of this Diploma thesis is the study of satellite communication systems operating at optical frequencies and the development of an accurate channel model. The increasing demand for high data rates and large bandwidth has already revealed the necessity of moving the Near-Earth and deep Space communications towards higher frequency bands. A prominent solution for these issues contains the employment of Optical Frequencies which benefit from the use of an unused frequency band for the transmission of optical carrier. Optical links exhibit a great variety of advantages, however, the signal propagation through the Earth's atmosphere induces attenuation which have to be quantified through appropriate models for the reliable design of them.

The 1st Chapter presents a review of the Optical Satellite Networks and the needs which lead to the investigation of these Networks. Firstly, the already used RF satellite communication systems are compared to the optical ones and great variety of benefits which can be obtained by the use of optical frequencies are presented. Moreover, the atmospheric phenomena which affect the optical link are briefly given and the necessity of channel modeling for Optical Satellite communications is revealed.

In the 2nd Chapter the optical link budget is presented. The link budget calculation is of paramount importance for the field of wireless communications, as the signal to noise ratio needed for the communication is calculated. More particularly, the signal and noise photon rates as their functional relationship is presented and calculated by a suitable method for both PPM (Pulse-Position modulation) and DPSK (Differential Phase Shift Keying) modulation, considering a number of optical system components such as the aperture gain and their losses as the sky and planetary irradiation. Moreover, the power link margin for both uncoded and coded PPM and DPSK modulation is calculated, based on analytical models of the PPM and DPSK channel capacities.

In the 3rd Chapter, the impact of clouds on microwave/millimeter wave and optical wave propagation for applications to satellite communications is reviewed. Initially, the fundamental of clouds microphysics and the required electromagnetic theory are summarized. Furthermore, the models proposed so far in the literature to estimate cloud attenuation are briefly given. These models take advantage of meteorological data in order to predict cloud attenuation.

In the 4th Chapter a new model for the prediction of clouds attenuation is proposed. A cloud attenuation synthesizer at optical frequencies. This model is based on the multidimensional stochastic differential equations for the generation of time series of cloud fields through the calculation of two-dimensional fields of integrated liquid water content (ILWC) time series. The ILWC fields are correlated on temporal and on spatial domain. Then using the expression of cloud vertical extent, presented in the previous chapter, as well as the microphysical properties of clouds, the available ITU-R global statistics and the well-known scattering Mie theory, cloud attenuation is calculated.

The 5th and final Chapter presents the numerical results from the model presented in 4th Chapter. Analytical and accurate simulations have been implemented in Matlab and the results are analyzed. Snapshots of time series of ILWC and cloud attenuation for both a single link and site diversity schemes are presented and fields for future research and study are recommended.

Keywords: Optical Satellite payload, Clouds attenuation, Time series of cloud fields, Channel Modeling.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή	18
1.1	Αναφορές.....	26
Κεφάλαιο 2	Προϋπολογισμός Ισχύος Οπτικής Ζεύξης.....	27
2.1	Εισαγωγή.....	27
2.2	EIRP	27
2.2.1	Κέρδος G_t	27
2.2.2	Σφάλμα Στόχευσης (Pointing Power Penalty).....	28
2.2.3	Μέση οπτική απόσβεση εξαιτίας του σφάλματος στόχευσης	28
2.3	Ανιχνεύσιμη Οπτική Ισχύς Στον Δέκτη (Detected Optical Signal Power at the Receiver)	29
2.3.1	Απώλειες Ελεύθερου Χώρου (Free Space Path Loss)	29
2.3.2	Κέρδος Ανοίγματος Φακού του Δέκτη (Receiver Aperture Gain)	29
2.4	Ο Μέσος Αριθμός Ανιχνεύσιμων Φωτονίων Σήματος ανα Χρονοσχιμή (Average Number of Detected Photons per Slot)	30
2.4.1	BPS για PPM	30
2.4.2	BPS για DPSK	31
2.5	Ανιχνεύσιμη Ισχύς από τη Διάσπαρτη Ακτινοβολία (Detected Power From Background Radiation)	31
2.6	Ο Μέσος Αριθμός Διάσπαρτων Φωτονίων που Ανιχνεύονται (Average Number of Detected Background Photons).....	31
2.7	Μέσος Αριθμός Φωτονίων Θορύβου ανά Χρονοσχιμή Από Τον Ανιχνευτή (Average Number of Noise Photons From The Detector).....	32
2.7.1	‘Μαυρος Θόρυβος’ (dark noise) Του Ανιχνευτή	32
2.7.2	Παράγοντας Θορύβου (Noise Figure)	32
2.8	Σηματοθορυβικός Λόγος σε Οπτική Ζεύξη (The Instantaneous Signal to Noise Ratio of Optical Channel).....	33
2.9	Πιθανότητα μη κωδικοποιητών λανθασμένων Bits(Probability of Uncoded Bit Error).....	33
2.9.1	‘Ήπιες Ατμοσφαιρικές Αναταράξεις (Weak Atmospheric Turbulence)	33
2.9.2	Ισχυρές Ατμοσφαιρικές Αναταράξεις (Strong Atmospheric Turbulence)	34
2.9.3	Διάδοση Ελευθέρου Χώρου (Free Space (No Atmosphere) Propagation)	34

2.9.4	Υπολογισμός $p_b(K_s)$ για PPM	34
2.9.5	Υπολογισμός $p_b(K_s)$ για DPSK	35
2.10	Υπολογισμός Περιθωρίου Ισχύος για Κωδικοποιημένη και Μη, Οπτική Ζεύξη (Uncoded and Coded Optical Link Power Margins).....	35
2.10.1	Η Χωρητικότητα του PPM Διαύλου και η Διαδικασία για τον Υπολογισμό της Απαιτούμενης Οπτικής Ισχύος (PPM Channel Capacity and its Application to Determine Required Optical Power)	36
2.10.2	Η Απαιτούμενη Οπτική Ισχύς για την Υποστήριξη Ενός Μη Κωδικοποιημένου PPM Ρυθμού Δεδομένων R_b (Required Optical Power to support an Uncoded PPM Data Rate R_b)	36
2.10.3	Η Απαιτούμενη Οπτική Ισχύς για την Υποστήριξη Ενός Κωδικοποιημένου PPM Ρυθμού Δεδομένων R_b (Required Optical Power to support an Coded PPM Data Rate R_b)	37
2.10.4	Η Χωρητικότητα του DPSK Διαύλου και η Διαδικασία για τον Υπολογισμό της Απαιτούμενης Οπτικής Ισχύος (DPSK Channel Capacity and its Application to Determine Required Optical Power)	37
2.10.5	Η Απαιτούμενη Οπτική Ισχύς για την Υποστήριξη Ενός Μη Κωδικοποιημένου DPSK Ρυθμού Δεδομένων R_b (Required Optical Power to support an Uncoded DPSK Data Rate R_b).....	38
2.10.6	Η Απαιτούμενη Οπτική Ισχύς για την Υποστήριξη Ενός Κωδικοποιημένου DPSK Ρυθμού Δεδομένων R_b (Required Optical Power to support an Coded DPSK Data Rate R_b)	39
2.11	Επιπρόσθετες Παράμετροι της Ζεύξης (Additional Link Parameters)	39
2.12	Υλοποίηση Κώδικα Προϋπολογισμού Ισχύος Οπτικής Ζεύξης σε Γραφικό Περιβάλλον (Gui)	40
2.13	Αναφορές	42
Κεφάλαιο 3	Επίδραση των Νεφών στη Διάδοση των Δορυφορικών Ζεύξεων από την Ka Ζώνη έως τη Ζώνη των Οπτικών Συχνοτήτων	44
3.1	Εισαγωγή	44
3.2	Φυσικό Υπόβαθρο	44
3.2.1	Εμφάνιση Νεφών	44
3.2.2	Κατηγοριοποίηση Νεφών	45
3.2.3	Μικροφυσικές (Microphysical) Ιδιότητες Νεφών.....	46
3.3	Δείκτης Διάθλασης Υγρού Νερού και Πάγου.....	50
3.4	Διάδοση Μέσα από Νέφη.....	51
3.4.1	Αλληλεπίδραση Κύματος - Σωματιδίου.....	52
3.4.2	Διάδοση μέσα από ένα Στρώμα Σωματιδίων	53
3.4.3	Απόσβεση Εξαιτίας Νεφών	58
3.5	Μοντέλα Πρόβλεψης Απόσβεσης Εξαιτίας Νεφών	60

3.5.1	Dientelmann and Ortgies Model	60
3.5.2	Altshuler and Marr Model	62
3.5.3	Salonen and Uppala Model (ITU-R P.840-6)	64
3.5.4	Συντελεστές Απορρόφησης Μάζας, mass absorption coefficients, για τον Υπολογισμό της Απόσβεσης Εξαιτίας των Νεφών.....	67
3.5.5	Dissanayake-Allnut-Haidara Model	69
3.5.6	Stochastic Model of Clouds (SMOC)	73
3.5.7	Σύγκριση Μοντέλων Απόσβεσης Εξαιτίας των Νεφών	79
3.6	Αναφορές	84
<i>Κεφάλαιο 4 Μοντέλο Υπολογισμού Απόσβεσης Νεφών με χρήση Στοχαστικών Διαφορικών Εξισώσεων</i>		<i>90</i>
4.1	Εισαγωγή	90
4.2	Χρήση Στοχαστικών Διαφορικών 1ης Τάξης για το ILWC	90
4.3	Δημιουργία Χωροχρονικά Συσχετισμένων ILWC	92
4.4	Μοντέλο	95
4.5	Αναφορές	100
Κεφάλαιο 5		102
Αριθμητικά Αποτελέσματα-Συμπεράσματα-Προτάσεις για το Μέλλον		102
5.1	Αριθμητικά Αποτελέσματα	102
5.2	Συμπεράσματα	110
5.3	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	110
5.4	Αναφορές	112

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1. Δορυφορικό σύστημα με οπτική ζεύξη τροφοδοσίας	19
Σχήμα 1.2.Ατμοσφαιρική διάδοση (μετάδοση) λόγω ατμοσφαιρικής απορρόφησης	20
Σχήμα 1.3.Αρχιτεκτονική γεωστατικού δορυφορικού συστήματος βασισμένη σε οπτικές ζεύξεις τροφοδοσίας	23
Σχήμα 1.4. 8 ενεργοί και 2 ανενεργοί (backup) ανά την Ευρώπη.....	24
Σχήμα 1.5. Αριστερά: Η λαμβανόμενη Γκαουσιανή δέσμη που είτε δεν έχει υποστεί στροβιλισμό είτε έχει διορθωθεί με τη χρήση των προσαρμοστικών οπτικών μέσων.	25
Σχήμα 2.1 Υλοποίηση διαδικασίας προϋπολογισμού ισχύος σε γραφικό περιβάλλον	40
Σχήμα 2.2 Ενδεικτικές τιμές και υλοποίηση στο γραφικό περιβάλλον (GUI).....	41
Σχήμα 3.1. Παγκόσμιος Χάρτης Κάλυψης Νεφών (ECMWF δεδομένα περιόδου 1984-2013).....	45
Σχήμα 3.2.....	51
Σχήμα 3.3Ειδική απόσβεση συναρτήσεως της συχνότητας για διάφορους τύπους νεφών.....	58
Σχήμα 3.4 Κανονικοποιημένος συντελεστής απόσβεσης σε σχέση με το μήκος κύματος για διάφορους τύπους νεφών.	59
Σχήμα 3.5 Σύστημα αναφοράς για τον υπολογισμό των στατιστικών απόσβεσης εξαιτίας νεφών σε κεκλιμένο ραδιοδρόμο χρησιμοποιώντας το μοντέλο DAH.....	71
Σχήμα 3.6 Η μείωση της συσχέτισης με την απόσταση δύο σημείων του ολοκληρώματος της περιεκτικότητας σε υγρό νερό W , όπως υπολογίστηκε από τα δεδομένα του MODIS (γκρι καμπύλη με κύκλους), και του ρυθμού βροχόπτωσης R από τα δεδομένα του NIMROD (μαύρη καμπύλη με τετράγωνα	75
Σχήμα 3.7 Παραδείγματα των κάθετων προφίλ της περιεκτικότητας σε υγρό νερό $w(h)$, όπως μετρήθηκε από το CPR που βρίσκεται επί του δορυφόρου CloudSat και με διαδικασία παλινδρόμησης με τη χρήση της έκφρασης (57).....	76
Σχήμα 3.8 Αριστερά: σχήμα αναφοράς για ζεύξεις Γης-διαστήματος που επηρεάζονται από νέφη.....	79
Σχήμα 3.9Σύγκριση μοντέλων απόσβεσης εξαιτίας των νεφών: η CCDF αναφοράς εξήχθη με χρήση των δεδομένων του RAOBS σε συνδυασμό με τη μέθοδο ανίχνευσης νεφών των Salonen και Uppala και το μοντέλο απορρόφησης μάζας του Liebe MPM93 (μαύρη καμπύλη με αστερίσκους), επιπλέον οι καμπύλες πρόβλεψης των μοντέλων των Altshuler-Marr (καμπύλη με κύκλους) και των Dintelmann-Ortgies (καμπύλη με τετράγωνα)	81

Σχήμα 3.10 Σύγκριση μοντέλων απόσβεσης εξαιτίας των νεφών: η CCDF αναφοράς εξήχθη με χρήση των δεδομένων του RAOBS σε συνδυασμό με τη μέθοδο ανίχνευσης νεφών των Salonen και Uppala και το μοντέλο απορρόφησης μάζας του Liebe MPM93 (μαύρη καμπύλη με αστερίσκους), επιπλέον οι καμπύλες πρόβλεψης των μοντέλων του DAH (διακεκομμένη καμπύλη με τρίγωνα), της ITU-R P.840-6 (καμπύλη με τετράγωνα) και του SMOC (καμπύλη με κύκλους).	82
Σχήμα 4.1 Block διάγραμμα για τη σύνθεση χρονοσειρών ILWC (ITU-R P.1853-1). 90	
Σχήμα 4.2 Διάγραμμα Ροής.....	99
Σχήμα 5.1 Χωρική συσχέτιση ILWC	102
Σχήμα 5.2 Χρονοσειρές του ολοκληρώματος της περιεκτικότητας σε υγρό νερό (ILWC).....	103
Σχήμα 5.3 Χρονοσειρές απόσβεσης εξαιτίας των νεφών	103
Σχήμα 5.4 Κάθετη έκταση του $\tilde{w}(h)$ στο χρόνο	104
Σχήμα 5.5 Σύγκριση CCDF προτεινόμενου μοντέλου με την αντίστοιχη από (Carsoni, 2012).....	105
Σχήμα 5.6 Πιθανότητα Υπέρβασης για τρία διαφορετικά συνευθειακά με μεταξύ τους απόσταση 1km, 1km,2 km για την Κατάνια.....	106
Σχήμα 5.7 Πιθανότητα Υπέρβασης για τρία διαφορετικά συνευθειακά σημεία με μεταξύ τους απόσταση 1km, 1km,2 km για την Αθήνα	106
Σχήμα 5.8 Πιθανότητα Υπέρβασης για τρία διαφορετικά συνευθειακά σημεία με μεταξύ τους απόσταση 1km, 1km,2 km για το Ηράκλειο.....	107
Σχήμα 5.9 Πιθανότητα Υπέρβασης για την απόσβεση εξαιτίας των νεφών για τρεις σταθμούς βάσης και σχήμα διαφορισμού θέσης για μήκος κύματος 1064 nm	107
Σχήμα 5.10 Πιθανότητα Υπέρβασης για την απόσβεση εξαιτίας των νεφών για τρεις σταθμούς βάσης και σχήμα διαφορισμού θέσης για μήκος κύματος 1550 nm	108
Σχήμα 5.11 Κατανομή του ύψους της βάσης των νεφών (Έκφραση 33, Κεφάλαιο 4)	108
Σχήμα 5.12 Πιθανότητα Υπέρβασης για την απόσβεση εξαιτίας των νεφών για σταθμό βάσης στην Τενερίφη 1550 nm	109

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1 Κατηγοριοποίηση Νεφών και Προσέγγιση του Ύψους Βάσης (Ahrens, 2013).....	46
Πίνακας 3-2. PSD παράμετροι r_c , α , και γ και περιεκτικότητα υγρού νερού w θεωρώντας συγκέντρωση σωματιδίων $N=100 \text{ particle/cm}^3$ για διάφορες κατηγορίες νεφών . Cu =cumulus, St=Stratus, St/Sc= Stratus/Stratocumulus, As=Altostratus, Ns=Nimbostratus.....	50
Πίνακας 3-3 Παράμετροι PSD, άνω και κάτω όρια για τη συγκέντρωση των σωματιδίων και την περιεκτικότητα σε υγρό νερό και τον αντίστοιχο συντελεστή απόσβεσης στην W- μπάντα, και για τα δύο οπτικά μήκη κύματος για διάφορους τύπους νεφών. Cu =cumulus, St=Stratus, St/Sc= Stratus/Stratocumulus, As=Altostratus, Ns=Nimbostratus.....	60
Πίνακας 3-4.Είσοδοι, εξισώσεις και σταθερές για το μοντέλο των Dintelmann και Ortgies	62
Πίνακας 3-5 Είσοδοι, εξισώσεις και σταθερές για πρακτική εφαρμογή του μοντέλου των DAltshuler και Marr.....	64
Πίνακας 3-6 Είσοδοι, εξισώσεις και σταθερές για πρακτική εφαρμογή του μοντέλου των Salonen και Urrala που υιοθετήθηκε από την ITU-R P.840-6.....	67
Πίνακας 3-7 Είσοδοι, εξισώσεις και σταθερές για τον υπολογισμό της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών με χρήση του συντελεστή απορρόφησης μάζας.....	69
Πίνακας 3-8 Κύρια χαρακτηριστικά των τεσσάρων τύπων νεφών που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο DAH.....	70
Πίνακας 3-9 Είσοδοι, εξισώσεις και σταθερές για πρακτική εφαρμογή του μοντέλου DAH.	72
Πίνακας 3-10 Βήμα προς βήμα η διαδικασία για πρακτική εφαρμογή του SMOC για τον υπολογισμό των στατιστικών της πρόβλεψης της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών (CCDF).....	78
Πίνακας 4-1Κατηγοριοποίηση ανάλογα την Κάθετη Έκταση Νεφών.....	95
Πίνακας 4-2Παράμετροι a, b, γ για την τροποποιημένη Γάμμα κατανομή τεσσάρων παραμέτρων.....	96

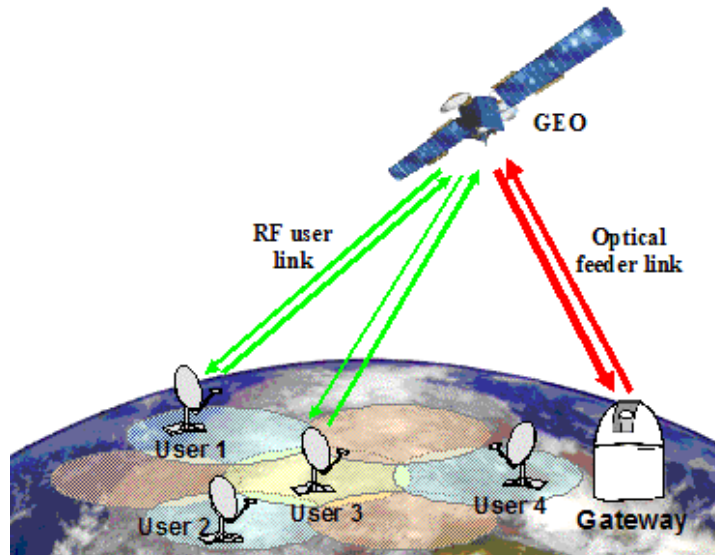
*Στη μνήμη του Πατέρα μου
Κωνσταντίνου,*

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός των ασύρματων συσκευών και η αλλαγή του προφίλ, των χρηστών που απαιτούν αποδοτικότερες και ταχύτερες υπηρεσίες, επιφέρουν τεράστια ζήτηση φάσματος. Στο εγγύς μέλλον τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών θα πρέπει να είναι σε θέση να καλύψουν τις ανάγκες των χρηστών για υψηλότερο ρυθμό δεδομένων και χωρητικότητα διαύλου ώστε να υποστηριχθούν οι νέες εφαρμογές και τάσεις της τεχνολογίας. Σύμφωνα με το (P. Thompson, 2011), η παρούσα γενιά των γεωστατικών δορυφόρων χαρακτηρίζονται από χωρητικότητα 10 Gb/s και βάρος 6 Tonnes. Παραδοσιακά λειτουργούν στην C και Ku μπάντα αλλά πλέον και στην Ka με χρήση πολλαπλών δεσμών (multi beam), με τουλάχιστον 100 δέσμες ανά δορυφόρο (beams per satellite). Είχε υπολογιστεί από τη CISCO ότι η συνολική ζήτηση του Internet στην Ευρώπη μέχρι το 2012 θα ξεπερνά τα 104 Peta bytes per second, δηλαδή 10 φορές περισσότερη από αυτή του 2007. Το 2013 εκτιμήθηκε ότι το μέσο οικιακό εύρος ζώνης ανέρχεται στα 500 GB/month, που κατα μέσο όρο σήμαινε υπέρβαση της τάξης των 30 Mb/s για τους οικιακούς χρήστες όπου και αν βρίσκονταν. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό οι RF τεχνολογίες δεν επαρκούν για μελλοντικές εφαρμογές, καθώς παρουσιάζονται περιορισμοί στο ήδη κορεσμένο φάσμα που έχει αποδοθεί σε αυτές και οι ρυθμοί δεδομένων που μπορούν να υποστηρίξουν δεν επαρκούν. Για τους λόγους αυτούς κρίνεται αναγκαία η μετακίνηση σε υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων και η χρησιμοποίηση και μελέτη άλλων τρόπων ασύρματης μετάδοσης. Μια συμφέρουσα και πολύ ελκυστική λύση αποτελούν οι Οπτικές Ασύρματες Επικοινωνίες, Free Space Optics (FSO). Οι FSO χρησιμοποιούν μια αχρησιμοποίητη ζώνη συχνοτήτων για τη μετάδοση μέσω οπτικού φέροντος και δύναται να χρησιμοποιηθούν στις ζεύξεις τροφοδοσίας, feeder links, στη θέση των RF. Η λύση αυτή παρουσιάζει αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις RF ζεύξεις (N. Perolt, 2012): (α) Η οπτική μπάντα συχνοτήτων διαθέτει 100 έως 10000 φορές περισσότερο διαθέσιμο φάσμα σε σχέση με την RF μπάντα, (β) Οι οπτικές μπάντες, δεν χρειάζονται κάποια ενιαία ρύθμιση των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για τις ποικίλες εφαρμογές, χάρη στις εξαιρετικά κατευθυντικές κεραιές που χρησιμοποιούνται, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μεγάλο παράγοντα επαναχρησιμοποίησης, (γ) Με τη μετακίνηση των ζεύξεων τροφοδοσίας, feeder links, στην οπτική μπάντα, το φάσμα το οποίο ελευθερώνεται από τις RF ζεύξεις τροφοδοσίας μπορεί

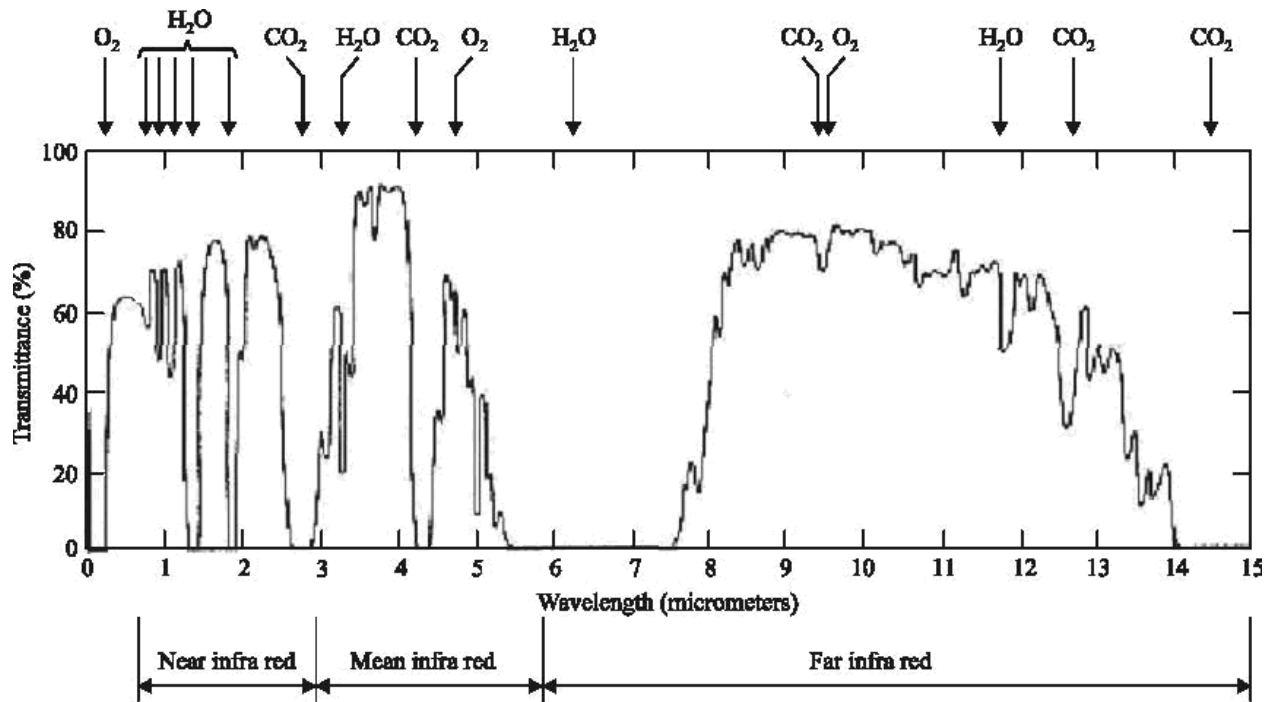
να αποδοθεί στις ζεύξεις των χρηστών, οι οποίες μπορούν να διατηρηθούν στην RF μπάντα καθώς χρειάζονται σχετικά μικρότερους ρυθμούς δεδομένων, και εξοπλισμό χαμηλότερου κόστους. Ως εκ τούτου, το κόστος των οπτικών ζεύξεων τροφοδοσίας αναμένεται να είναι αμελητέο σε σχέση με τα έσοδα που θα προκύψουν από τις περαιτέρω RF ζεύξεις χρηστών, (δ) Η ακτίνα φωτός, light beam, είναι πολύ στενή με αποτέλεσμα να μην παρεμβάλλουν και να παρουσιάζουν μεγάλη βελτίωση στον τομέα της ασφάλειας.



Σχήμα 1.1. Δορυφορικό σύστημα με οπτική ζεύξη τροφοδοσίας

Σε τέτοια συστήματα, η διάδοση του σήματος μέσα από την ατμόσφαιρα της Γης επιφέρει πολύ μεγάλες απώλειες, οι οποίες πρέπει να υπολογιστούν με τη χρήση κατάλληλων μοντέλων. Οι κύριοι παράγοντες που επιφέρουν τις ατμοσφαιρικές απώλειες είναι (ITU-R P.1817-1):

1. Μοριακή Απορρόφηση : Οφείλεται στην αλληλεπίδραση της οπτικής ακτινοβολίας με τα σωματίδια της ατμόσφαιρας. Για το λόγο αυτό επιλέγονται τα παρακάτω διαυγή παράθυρα του οπτικού φάσματος Τα διαυγή παράθυρα στο οπτικό φάσμα είναι:
 - Ορατό και πολύ κοντινό υπέρυθρο: από 0.4 σε 1.4 μm
 - Κοντινό υπέρυθρο ή υπέρυθρο: από 1.4 έως 1.9 μm και 1.9 έως 2.7 μm
 - Μέσο υπέρυθρο ή υπέρυθρο II: από 2.7 έως 4.3 μm και 4.5 έως 5.2 μm
 - Μακρινό υπέρυθρο ή υπέρυθρο III: από 8 έως 14 μm
 - Ακραίο υπέρυθρο ή υπέρυθρο IV: από 16 έως 28 μm .



Σχήμα 1.2.Ατμοσφαιρική διάδοση (μετάδοση) λόγω ατμοσφαιρικής απορρόφησης

2. Μοριακή Σκέδαση : Οφείλεται στην αλληλεπίδραση της οπτικής ακτινοβολίας με τα σωματίδια της ατμόσφαιρας, των οποίων το μέγεθος είναι μικρότερο από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.
3. Απορρόφηση Αερολυμάτων : Τα αερολύματα είναι εξαιρετικά μικρά στερεά ή υγρά σωματίδια που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα και πέφτουν με πολύ μικρή ταχύτητα (πάγος, σκόνη, καπνός κτλ.).Το μέγεθός τους κινείται ανάμεσα στα 10^{-2} και $100\mu\text{m}$. Τα αερολύματα επηρεάζουν τις συνθήκες της ατμοσφαιρικής απόσβεσης λόγω της χημικής του φύσης, του μεγέθους τους και της συγκέντρωσής τους.
4. Σκέδαση Αερολυμάτων : Η σκέδαση αερολυμάτων (σκέδαση Mie) συμβαίνει όταν το μέγεθος του σωματιδίου είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός. Η απόσβεση είναι συνάρτηση της συχνότητας και της ορατότητας και η ορατότητα σχετίζεται με την κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων. Αυτό το φαινόμενο αποτελεί τον πλέον περιοριστικό παράγοντα για ανάπτυξη των οπτικών συστημάτων ελευθέρου χώρου σε μεγάλες αποστάσεις.
5. Σπινθηρισμοί :Τυχαίες κατανεμημένες κυψέλες ή κελιά (cells ή rockets) διαφορετικού δείκτη διάθλασης μπορούν να σχηματιστούν εντός του μέσου διάδοσης κάτω από την επίδραση στροβιλισμών. Αυτά τα κελιά προκαλούν σκέδαση, πολυόδευση και μεταβολές στη γωνία άφιξης, προκαλώντας διακυμάνσεις στη στάθμη του λαμβανόμενου κύματος με συχνότητες από 0.01 έως 200 Hz. Οι μεταβολές του μετώπου του κύματος προκαλούν όμοια, χρονομεταβλητή εστίαση και απόκλιση της φωτεινής δέσμης. Αυτές οι διακυμάνσεις του σήματος ονομάζονται σπινθηρισμοί.
6. Γεωμετρική Απόσβεση : Ακόμα και σε συνθήκες καθαρού ουρανού η δέσμη αποκλίνει και σαν αποτέλεσμα αυτού, ο δέκτης λαμβάνει μικρότερη ισχύ σήματος.

Η απόσβεση λόγω της διασποράς της δέσμης με την αύξηση του μήκους της ζεύξης καλείται γεωμετρική απόσβεση.

7. Απόσβεση εξαιτίας της ομίχλης
8. Απόσβεση εξαιτίας της βροχής
9. Απόσβεση εξαιτίας του χιονιού
10. Επιπτώσεις περιβάλλοντος φωτός

Τα παραπάνω ατμοσφαιρικά φαινόμενα παρουσιάζουν στοχαστική συμπεριφορά τόσο στο χρόνο όσο και στο χώρο, και ως εκ τούτου, διαφέρουν από τους άλλους ντετερμινιστικούς παράγοντες που επηρεάζουν την οπτική ζεύξη σε συνθήκες καθαρού ουρανού (π.χ. απώλειες ελευθέρου χώρου).

Λοιπόν σύμφωνα με την (ITU-R P.1814) Το περιθώριο διαλείψεων της ζεύξης, M_{link} (dB), το οποίο είναι η διαθέσιμη ισχύς πάνω από την ευαισθησία του δέκτη, μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$M_{link} = P_e - S_r - A_{geo} - A_{atmo} - A_{scintillation} - A_{system} \quad (1)$$

όπου:

P_e (dBm): η συνολική ισχύς του πομπού

S_r (dBm): ευαισθησία του δέκτη η οποία επίσης εξαρτάται από το εύρος ζώνης (ρυθμός μετάδοσης)

A_{geo} (dB): η γεωμετρική απόσβεση της ζεύξης που οφείλεται στη διεύρυνση της δέσμης με την αύξηση της απόστασης.

A_{atmo} (dB): ατμοσφαιρική απόσβεση λόγω απορρόφησης και σκέδασης

$A_{scintillation}$ (dB): απόσβεση που οφείλεται στους σπινθηρισμούς

A_{system} (dB): αντιπροσωπεύει όλες τις απώλειες που εξαρτώνται από το σύστημα, συμπεριλαμβανομένης της κακής ευθυγράμμισης της δέσμης, τις οπτικές απώλειες του δέκτη, τις απώλειες λόγω εκτροπής της δέσμης, τη μείωση της ευαισθησίας του δέκτη λόγω του περιβάλλοντος φωτός (ηλιακή ακτινοβολία) κτλ.

Ωστόσο τα παραπάνω φαινόμενα επιφέρουν εξαιρετικά μεγάλη απόσβεση με αποτέλεσμα το περιθώριο διαλείψεων που απαιτείται να είναι εξαιρετικά μεγάλο, και να κρίνεται αναγκαία η χρησιμοποίηση τεχνικών FMT (Fade Mitigation Techniques), ευρέως γνωστών, ήδη από την ανάλυση για τις RF ζεύξεις.

Οι FMT μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις ευρείς κατηγορίες (Panagopoulos, 2004) :

- Τεχνικές Ελέγχου Ισχύος (EIRP Control Techniques)
- Τεχνικές Προσαρμοστικής Διαμόρφωσης/Κωδικοποίησης (Adaptive Transmission Techniques)

- Τεχνικές Διαφορισμού (Diversity Protection Schemes)

Οι Τεχνικές Ελέγχου Ισχύος αφορούν την αυξομείωση είτε της εκπεμπόμενης οπτικής ισχύς είτε του κέρδους ανοίγματος του φακού.

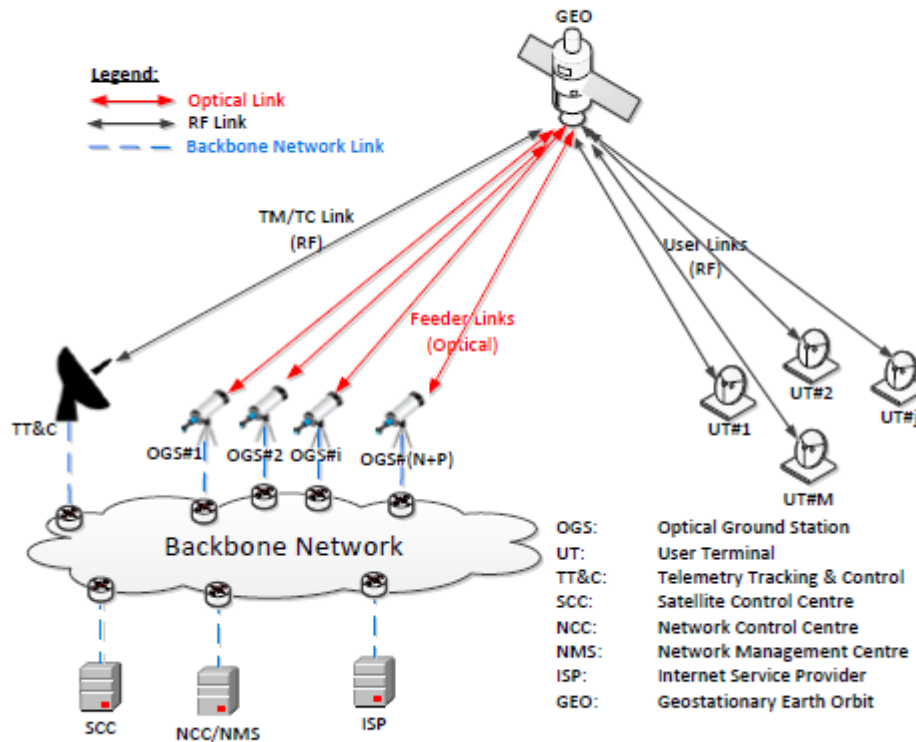
Οι Τεχνικές Προσαρμοστικής Διαμόρφωσης/Κωδικοποίησης, διακρίνονται στην Ιεραρχική Κωδικοποίηση (Hierarchical Coding), στην Ιεραρχική Διαμόρφωση (Hierarchical Modulation) και στη Μείωση του Ρυθμού Μετάδοσης (Data Rate Reduction) που χρησιμοποιείται.

- Ιεραρχική Κωδικοποίηση: Υιοθετείται σχήμα κωδικοποίησης για την ανίχνευση και την διόρθωση των λανθασμένων bit, με την παρεμβολή πληροφορίας πλεονασμού. Όσο αυξάνεται η πληροφορία πλεονασμού μειώνεται πιθανότητα λανθασμένων bit αλλά αυξάνεται το εύρος ζώνης (γεγονός που στα οπτικά δεν μας περιορίζει).
- 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 ισχύς φέροντος σήματος προς θόρυβο (C/N) στην είσοδο του αποδιαμορφωτή μειώνεται εξαιτίας των ατμοσφαιρικών φαινομένων.
- Μείωση Ρυθμού Μετάδοσης: Η τεχνική αυτή αποτελείται από τη μείωση του ρυθμού πληροφορίας όταν ανιχνεύεται εξασθένηση στο σήμα εξαιτίας κάποιου ατμοσφαιρικού φαινομένου.

Οι Τεχνικές Διαφορισμού: Διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες. 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 μπάντα να μεταβούμε στην μπάντα 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 και τόσο μεγαλύτερη είναι η διαθεσιμότητα της ζεύξης. Ένα σενάριο το οποίο χρησιμοποιείται, είναι να θεωρήσουμε ένα οπτικό επίγειο δίκτυο (Optical Ground Station Network) το οποίο θα αποτελείται από N ενεργούς σταθμούς που ο καθένας θα είναι υπεύθυνος για ένα ποσοστό της συνολικής τηλεπικοινωνιακής κίνησης (για τη ζεύξη τροφοδοσίας) και P αδρανείς σταθμούς οι οποίοι θα λειτουργούν μόνο όταν κάποιος από τους N

δεν μπορεί να εκπέμψει εξαιτίας των ατμοσφαιρικών φαινομένων με σκοπό να διατηρηθεί η υψηλή διαθεσιμότητα.



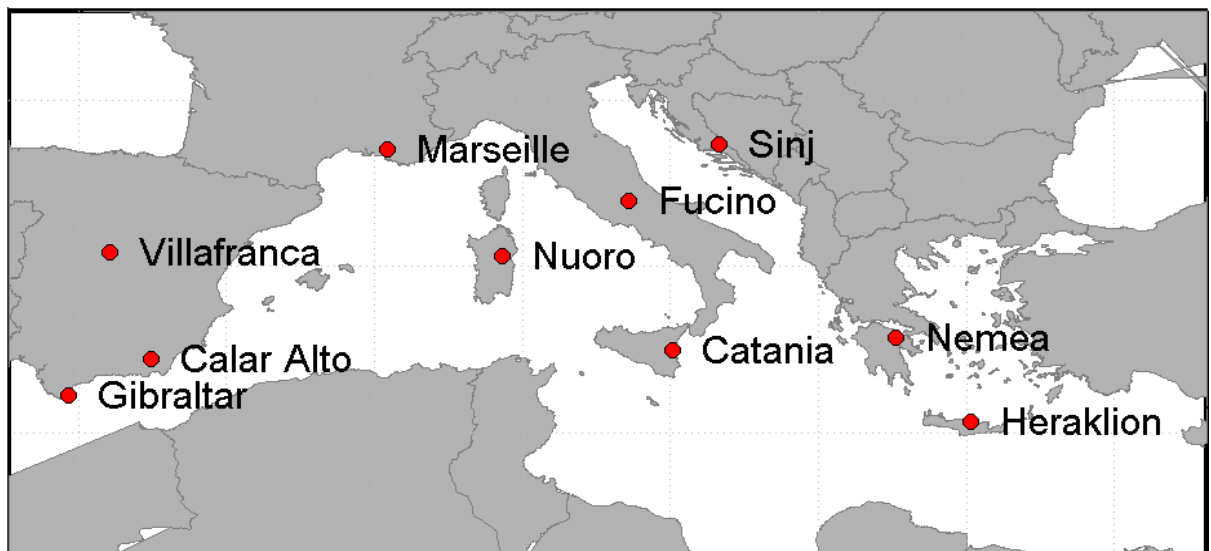
Σχήμα 1.3. Αρχιτεκτονική γεωστατικού δορυφορικού συστήματος βασισμένη σε οπτικές ζεύξεις τροφοδοσίας

Η αρχιτεκτονική του δικτύου του παραπάνω σεναρίου αποτελείται από :

- Διαστημικό Μέρος: Αποτελείται από έναν ή περισσότερους Γεωστατικούς Δορυφόρους (geostationary). Ο Γεωστατικός Δορυφόρος (GEO) επιτρέπει την επικοινωνία των Οπτικών Επίγειων Σταθμών (OGSs) με τα τερματικά των χρηστών μέσα από ζεύξεις τροφοδοσίας και χρηστών.
- Επίγειο Μέρος: Περιλαμβάνει:
 - Το Κέντρο Ελέγχου Δικτύου (Network Control Center, NCC), που είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο και το συγχρονισμό του συνολικού δικτύου.
 - Το κεντρικό Σύστημα Διαχείρισης του Δικτύου (Network Management System, NMS) που διαχειρίζεται τους πόρους τους δικτύου.
 - Το Κέντρο Ελέγχου του Δορυφόρου (Satellite Control Center, SCC), που είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο και την παρακολούθηση του διαστημικού μέρους.
 - Το σταθμό Τηλεμετρίας και Ελέγχου (Telemetry Tracking and Control, TT&C) που μεταφέρει /λαμβάνει δεδομένα τηλεχειρισμών/τηλεμετρίας προς και από τον δορυφόρο μέσα από μια RF ζεύξη.

- Ένα δίκτυο Οπτικών Επίγειων Σταθμών (Optical Ground Station, OGS), που είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά και τη λήψη δεδομένων, ελέγχει και διαχειρίζεται την κίνηση προς και από τα Τερματικά των Χρηστών (User Terminals, UTs). Εφαρμόζεται Διαφορική Λήψη Θέσης (Site diversity), και συγκεκριμένα με N ενεργούς Οπτικούς Σταθμούς Βάσης και P ανενεργούς για διαφορισμό. Οι N+P Οπτικοί Σταθμοί Βάσης στο Κέντρο Ελέγχου Δικτύου (NCC). Η μετάβαση από κάποιον από τους N σταθμούς σε κάποιον από τους P γίνεται με διακόπτη on/off (on/off switch).
- Μέρος Χρήστη: Αποτελείται από ένα σετ Τερματικά Χρηστών (User Terminals, UTs), που λειτουργούν στην RF μπάνα συχνότητας, δηλαδή Ka, Ku μπάνα κλπ.

Παρακάτω παρουσιάζεται μια τοπολογία από 8 ενεργούς και 2 ανενεργούς σταθμούς βάσης ανά την Ευρώπη.



Σχήμα 1.4. 8 ενεργοί και 2 ανενεργοί (backup) ανά την Ευρώπη

Επιπλέον επειδή οι Οπτικές Ασύρματες Επικοινωνίες υφίστανται μεγάλη απόσβεση εξαιτίας των ατμοσφαιρικών στροβιλισμών, που δημιουργούν παραμόρφωση του μετώπου του κύματος και σπινθηρισμούς, ακολουθούνται συγκεκριμένες τεχνικές για τον περιορισμό του φαινομένου αυτού τόσο για την άνω όσο και την κάτω ζεύξη στο σταθμό βάσης (Perlot, 2012):

- Για τη ζεύξη ανόδου χρησιμοποιούνται περισσότεροι από ένας πομποί, οι οποίοι τοποθετούνται σε μεταξύ τους απόσταση μεγαλύτερη από το εγκάρσιο μήκος συνοχής της ατμόσφαιρας(δηλαδή την παράμετρο Fried). Μια τυπική απόσταση είναι τα 0.5 m. Οι πολλαπλές δέσμες μεταφέρουν την ίδια πληροφορία αλλά υφίστανται διαφορετική παραμόρφωση καθώς ο στροβιλισμός που δέχονται είναι διαφορετικός. Σε αυτό το MISO (Multiple Input- Single Outpout) σχήμα που χρησιμοποιείται οι χωρικά διαφορισμένες ακτίνες που συνυπολογίζονται στον δέκτη και συμβάλουν στη μείωση της πιθανότητας απόσβεσης του σήματος. Παράλληλα η χρησιμοποίηση περισσότερων laser αυξάνει τη μέση εκπεμπόμενη ισχύ. Οι πολλαπλοί εκπομποί πρέπει να είναι μεταξύ τους ανεξάρτητοι για να περιοριστούν τα φαινόμενα παρεμβολής μεταξύ των δεσμών στο δέκτη του δορυφόρου. Το γεγονός αυτό απαιτεί επιπλέον οπτικό φάσμα.

- Για τη ζεύξη καθόδου, προσαρμοστικά οπτικά μέσα (adaptive optics) διορθώνουν την παραμόρφωση του μετώπου του κύματος. Επιπλέον το μεγάλο άνοιγμα του φακού του δέκτη παρέχει ομαλοποίηση του φαινομένου των σπινθηρισμών.



Σχήμα 1.5. Αριστερά: Η λαμβανόμενη Γκαουσιανή δέσμη που είτε δεν έχει υποστεί στροβιλισμό είτε έχει διορθωθεί με τη χρήση των προσαρμοστικών οπτικών μέσων.

Δεξιά: Η λαμβανόμενη οπτική δέσμη

(Perlot, 2012)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 2 η μέθοδος με την οποία γίνεται ο υπολογισμός του Optical Link Budget, ωφέλιμου φορτίου για μια οπτική ζεύξη, μια απολύτως σημαντική διαδικασία στον τομέα των Δορυφορικών Επικοινωνιών. Στη συνέχεια στο Κεφάλαιο 3 θα παρουσιαστούν οι μικροφυσικές ιδιότητες των νεφών, και θα γίνει μια εκτενής ανάλυση του τρόπου με τον οποίο τα νέφη επιφέρουν απόσβεση του διαδιδόμενου σήματος, τόσο για την Ka ζώνη συχνοτήτων, όσο και για τις οπτικές συχνότητες. Παράλληλα θα παρουσιάσουμε διάφορα μοντέλα από τη βιβλιογραφία που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών. Στο Κεφάλαιο 4 αναδεικνύεται ένα νέο, καθολικό μοντέλο υπολογισμού της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών που επωφελείται από τη χρήση των στοχαστικών διαφορικών εξισώσεων 1^{ης} τάξης. Τέλος στο Κεφάλαιο 5 θα παρουσιαστούν προσομοιώσεις του μοντέλου που παρουσιάστηκε.

1.1 Αναφορές

(ITU-R P.1814) ITU-R Recommendation P.1814-1, “Prediction methods required for the design of terrestrial free-space optical links”, Geneva 2007.

(ITU-R P.1817-1) ITU-R Recommendation P.1817-1, “Propagation data required for the design of terrestrial free-space optical links”, Geneva 2007.

(Panagopoulos, 2004) A. Panagopoulos, P.-D. Arapoglou, P. Cottis, “SATELLITE COMMUNICATIONS AT KU, KA, AND V BANDS: PROPAGATION IMPAIRMENTS AND MITIGATION TECHNIQUES”, Third Quarter 2004, Volume 6, NO. 3

(N. Perolt, 2012) N. Perlot, T. Dreischer, C.-M. Weinert, and J. Perdigues, “Optical GEO feeder link design,” in Future Network Mobile Summit (FutureNetw), Berlin, Germany 4-6 July 2012.

(P. Thompson, 2011) P. Thompson, M. Bousquet, L. Castenet, T. Mathiopoulos, “Concepts and Technologies for a Terabit/s Satellite, Supporting future broadband services via satellite”, SPACOMM 2011, The Third International Conference on Advances in Satellite and Space Communications, 2011.

Κεφάλαιο 2

Προϋπολογισμός Ισχύος Οπτικής Ζεύξης

2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί αναλυτικά ένας τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται ο προϋπολογισμός ισχύος της οπτικής ζεύξης Link Budget, (ωφέλιμου οπτικού φορτίου). Τα μεγέθη τα οποία είναι τα όμοια και ήδη γνωστά από την ευρέως γνωστή ανάλυση για τις ζεύξεις RF θα παρουσιαστούν απλά χωρίς να γίνει περαιτέρω ανάλυση. Στα υπόλοιπα θα δοθεί μεγαλύτερη έμφαση. Στη μελέτη αυτή θα δώσουμε και θα υπολογίσουμε τα απαραίτητα δεδομένα για τον υπολογισμό του του ρυθμού των φωτονίων σήματος (signal photon rate) και θορύβου (noise photon rate) και τη μεταξύ τους σχέση, με σκοπό να υπολογιστεί ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR) τόσο για PPM (Pulse-Position modulation) όσο και για DPSK (Differential Phase Shift Keying) ζεύξεις. Παράλληλα θα υπολογιστεί και το περιθώριο ισχύος που χρειάζεται για κωδικοποιημένες και ακωδικοποίητες PPM και DPSK ζεύξεις, το οποίο βασίζεται σε αναλυτικά μοντέλα για τη χωρητικότητα PPM και DPSK διαύλου.

2.2 EIRP

Το EIRP του οπτικού πομπού σε (Watts) δίνεται από την παρακάτω έκφραση:

$$EIRP = P_t G_t L_{pp} \tau_p \tau_T \quad (1)$$

Όπου:

P_t : είναι η ισχύς εξόδου (Watts) της πηγής laser (Δεδομένο).

G_t : είναι το κέρδος ανοίγματος της κεραίας του πομπού (Υπολογίζεται).

L_{pp} : είναι σφάλμα στόχευσης από την ευαισθησία κίνησης του πομπού (Υπολογίζεται).

τ_p : είναι η μέση οπτική απόσβεση εξαιτίας του σφάλματος στόχευσης (Υπολογίζεται).

τ_T : είναι οι συνολικές οπτικές απώλειες ισχύος εξαιτίας των οπτικών ινών κλπ που υλοποιούν τη σύζευξη εξόδου του laser με το άνοιγμα εξόδου (Δεδομένο).

2.2.1 Κέρδος G_t

Το κέρδος ανοίγματος του πομπού δίνεται από το (M. Toyoshima, 2002):

$$G_t = \frac{8}{w_0^2} \quad (2)$$

Η απόκλιση γωνίας της μεταφερόμενης δέσμης w_0 (rad) δίνεται από την παρακάτω έκφραση:

$$w_0 = \sqrt{8} \frac{\lambda}{\pi D_T} \quad (3)$$

Όπου:

λ : το μήκος κύματος (m) του laser του πομπού (Δεδομένο)

D_T : η διάμετρος του ανοίγματος της κεραίας του πομπού (Δεδομένο)

2.2.2 Σφάλμα Στόχευσης (Pointing Power Penalty)

Αντίθετα με την περίπτωση των RF όπου το εύρος των μεταφερόμενων δεσμών είναι της τάξης των milliradians, το εύρος της εκπεμπόμενης οπτικής δέσμης είναι της τάξης των microradians για τις δορυφορικές επικοινωνίες. Αυτές οι τόσο στενές δέσμες επιφέρουν πολλές δυσκολίες ώστε να διατηρηθεί η στόχευση με τον δέκτη, πράγμα που έχει σοβαρό αντίκτυπο στην λειτουργία των οπτικών επικοινωνιών (J. D. Barry, 1985) (J. D. Barry, 1986) (P. W. Scott, 1986) (G. A. Koepf, 1986) (C-C Chen, 1989). Συγκεκριμένα οι μικρές κινήσεις-κραδασμοί του πομπού έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία γωνιακής αστάθειας (jitter) της δέσμης του πομπού και ως εκ τούτου αρκετά μεγάλο σφάλμα στόχευσης. Ειδικά στις περιπτώσεις όπου καταλήγουν ελάχιστα φωτόνια στο δέκτη αυξάνεται πολύ η πιθανότητα συνεχόμενων λαθών. Μια τέτοια αύξηση στην PPM πιθανότητα λανθασμένου bit (bit error probability), αντιστοιχεί σε φαινόμενη ή ενεργή απόσβεση οπτικής ισχύος (apparent or effective attenuation) εξαιτίας του σφάλματος στόχευσης. Ως εκ τούτου μπορεί να οριστεί η ενεργός αυτή απόσβεση ως το σφάλμα στόχευσης L_{pp} η οποία είναι μια συνάρτηση του σφάλματος της στόχευσης της δέσμης (beam pointing error) και της γωνιακής απόκλισης της μεταφερομένης δέσμης w_0 . Το σφάλμα στόχευσης εξαιτίας της γωνιακής αστάθειας της οπτικής δέσμης συνήθως εκφράζεται με τη τυπική απόκλιση σ_p της γωνιακής μετατόπισης της δέσμης από την line of sight μεταξύ πομπού και δέκτη. Το β είναι ο λόγος απόκλισης προς αστάθεια:

$$\beta = \frac{w_0^2}{4\sigma_p} \quad (4)$$

που αποτελεί ένα σημαντικό μέγεθος για τις οπτικές επικοινωνίες. Όπου σ_p , η γωνιακή αστάθεια της δέσμης (rad) (Δεδομένο)

και έχουμε:

$$L_{pp} = \frac{\Pi^\beta \exp(-\Pi)}{\beta [\Gamma(\beta) - \Gamma(\beta, \Pi)]} \quad \Pi = -\ln(2P_{B,Max}) \quad (5)$$

Όπου $\Gamma(\dots)$ η συνάρτηση Γάμμα (Gamma), και $\Gamma(\dots, \dots)$ η ατελής (incomplete) συνάρτηση Gamma και $P_{B,Max}$: το μέγιστο αποδεκτό ποσοστό λανθασμένων bit (bit error rate).

2.2.3 Μέση οπτική απόσβεση εξαιτίας του σφάλματος στόχευσης

Σε συνδυασμό με το ενεργό σφάλμα στόχευσης που παρουσιάσαμε παραπάνω έχουμε και τη μέση απόσβεση εξαιτίας του σφάλματος στόχευσης:

$$\tau_p = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (6)$$

2.3 Ανιχνεύσιμη Οπτική Ισχύς Στον Δέκτη (Detected Optical Signal Power at the Receiver)

Η οπτική ισχύς (Watts) που λαμβάνεται από τη διατομή του φακού (aperture) του δέκτη δίνεται από την έκφραση:

$$P_{Wr_R} = EIRPL_{FS} \tau_{Atm} G_R \tau_R \tau_{FP} \quad (7)$$

και επομένως η ισχύς του σήματος που ανιχνεύεται στον οπτικό δέκτη είναι:

$$P_{Wr_S} = n_{Det} P_{Wr_R} \quad (8)$$

Όπου:

L_{FS} : είναι οι απώλειες ελευθέρου χώρου (Υπολογίζεται).

τ_{Atm} : είναι οι απώλειες εξαιτίας της ατμοσφαιρικής απορρόφησης και σκέδασης (Δεδομένο).

G_R : είναι το κέρδος του ανοίγματος του φακού (Υπολογίζεται).

τ_R : είναι η συνολική απόσβεση που εισάγει ο δέκτης (Δεδομένο).

τ_{FP} : οι απώλειες οπτικής ισχύος (coupling) στο εστιακό επίπεδο του δέκτη (Δεδομένο).

n_{Det} : η κβαντική απόδοση (quantum efficiency) του ανιχνευτή.

2.3.1 Απώλειες Ελευθέρου Χώρου (Free Space Path Loss)

Οι απώλειες ελευθέρου χώρου δίνονται σύμφωνα με τα (M. Toyoshima, 2002) (B. J. Klein, 1974):

$$L_{FS} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R_{ng}} \right)^2 \quad (9)$$

Όπου R_{ng} είναι η απόσταση (meters) μεταξύ του πομπού και του δέκτη (Δεδομένο).

2.3.2 Κέρδος Ανοίγματος Φακού του Δέκτη (Receiver Aperture Gain)

Το κέρδος ανοίγματος του φακού δίνεται σύμφωνα με τα (M. Toyoshima, 2002) (B. J. Klein, 1974):

$$G_R = \left(\frac{\pi D_R}{\lambda} \right)^2 (1 - \gamma^2) \quad (10)$$

Όπου το γ (obscuration ratio) δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma = \frac{b}{D_R} \quad (11)$$

Όπου:

D_R : είναι η διάμετρος (meters) της διατομής του φακού του δέκτη (Δεδομένο).

b : είναι η διάμετρος σκίασης (obscuration) του ανοίγματος του φακού του δέκτη (Δεδομένο).

2.4 Ο Μέσος Αριθμός Ανιχνεύσιμων Φωτονίων Σήματος ανα Χρονοσχισμή (Average Number of Detected Photons per Slot)

Η οπτική ισχύς σήματος που δίνεται από την σχέση (8) σχετίζεται με το ισοδύναμο ποσοστό φωτονίων που ουσιαστικά έχει ολοκληρωθεί στο διάστημα ενός συμβόλου ή μιας χρονοσχισμής που περιέχει ψηφιακή πληροφορία ανάλογα με το σχήμα οπτικής διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται (R. M. Gagliardi, 1995). Ο μέσος αριθμός φωτονίων του σήματος K_s (photons per slot) που αντιστοιχεί στην ισχύ που έχει ανιχνευτεί στη διάρκεια του συμβόλου T_s (seconds) δίνεται από την παρακάτω έκφραση:

$$K_s = \frac{\lambda P_w r_s T_s}{hc} \quad (12)$$

Όπου:

$$T_s = \frac{(1 - P_{Sym}) r_{FEC} BPS}{R_b} \quad (13)$$

$h = 6.626 * 10^{-34}$ Joule-seconds σταθερά Planck (Δεδομένο).

$c = 2.99 * 10^8$ meters/sec η ταχύτητα του φωτός (Δεδομένο).

P_{Sym} : είναι ο ρυθμός εισαγωγής συμβόλων (Symbol insertion rate) (<1) για μερικές ψηφιακές κωδικοποιήσεις (Δεδομένο).

r_{FEC} : είναι ο ρυθμός κωδικοποίησης FEC (<1) (Δεδομένο).

R_b : είναι ο ρυθμός δεδομένων για την οπτική ζεύξη (Δεδομένο).

BPS : είναι ο αριθμός των bits ανά PPM χρονοσχισμή για την περίπτωση της PPM διαμόρφωσης ή ο αριθμός των bits ανά σύμβολο στην περίπτωση της DPSK διαμόρφωσης.

2.4.1 BPS για PPM

Ο αριθμός των bits ανά PPM χρονοσχισμή

$$BPS = \frac{\log_2(M)}{M} \quad (14)$$

Όπου

M : είναι δείκτης για την PPM (slots/symbol) που ισούται με το 2^m όπου $m=1,2,3...$ (Δεδομένο).

2.4.2 BPS για DPSK

Σε αυτήν την περίπτωση,

$$\text{BPS}=\text{N} \quad (15)$$

Όπου:

N=1 είναι ο αριθμός των bits ανα DPSK χρονοσχισμός (Δεδομένο).

2.5 Ανιχνεύσιμη Ισχύς από τη Διάσπαρτη Ακτινοβολία (Detected Power From Background Radiation)

Μαζί με τα φωτόνια K_s που αποτελούν τα χρήσιμα σήμα όπως είδαμε παραπάνω, υπάρχουν και άλλα φωτόνια που υπεισέρχονται στον ανιχνευτή και είναι ανεπιθύμητα, δηλαδή φωτόνια που σχετίζονται με το διάσπαρτο φως που υπάρχει στο περιβάλλον, όπως αυτό που βρίσκεται στον ουρανό που προέρχεται από τη σκέδαση των ακτίνων του ηλίου ή η πλανητική ανάκλαση φωτός (planetary light reflection) αν αναφερόμαστε για δορυφόρο που βρίσκεται σε τροχιά γύρω από άλλο πλανήτη. Αυτό το διάσπαρτο φως (background light) αναπαριστάται ως ουράνια ακτινοβολία (sky irradiance) I_{sky} , και ως πλανητική ακτινοβολία (planet irradiance) I_{planet} . Επειδή αυτές οι ακτινοβολίες παρουσιάζονται σε ένα ευρύ φάσμα σχετικό με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας του μεταφερόμενου σήματος, τοποθετείται ένα φίλτρο στο δέκτη συγκεκριμένου εύρους B_F . Τελικά το σύνολο της διάσπαρτης ακτινοβολίας που υπεισέρχεται στο δέκτη αποτελεί συνάρτηση του πεδίου ορατότητας, field of view, του ανοίγματος του φακού. Όλα τα παραπάνω χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ισχύος από την διάσπαρτη ακτινοβολία (background radiation) σε Watts:

$$Pwr_b = n_{Det} (I_{sky} + I_{planet}) B_F \Omega_{FOV} \left(\frac{\pi(10^2 D_R)^2}{4} \right) \quad (16)$$

Όπου:

I_{sky} : είναι η ουράνια ακτινοβολία (sky irradiance) (Watts/cm²/steradian/μm) (Δεδομένο).

I_{planet} : είναι η πλανητική ακτινοβολία (planet irradiance) (Watts/cm²/steradian/μm)

(Δεδομένο).

B_F : είναι το εύρος ζώνης του φίλτρου (μm) (Δεδομένο).

Ω_{FOV} : είναι το πεδίο ορατότητας του ανοίγματος του φακού του δέκτη (steradians)

(Υπολογίζεται).

$$\Omega_{FOV} = \pi \left(2 \frac{2.44\lambda}{D_R} \right)^2 \quad (17)$$

2.6 Ο Μέσος Αριθμός Διάσπαρτων Φωτονίων που Ανιχνεύονται (Average Number of Detected Background Photons)

Ο μέσος αριθμός διάσπαρτων φωτονίων που ανιχνεύονται K_b (photons per slot) που είναι ισοδύναμος με την διάσπαρτη οπτική ισχύ που λαμβάνεται στη διάρκεια ενός συμβόλου T_s και δίνεται από την έκφραση:

$$K_b = \frac{\lambda P_w r_b T_s}{hc} \quad (18)$$

2.7 Μέσος Αριθμός Φωτονίων Θορύβου ανά Χρονοσχισμή Από Τον Ανιχνευτή (Average Number of Noise Photons From The Detector)

Τα διάσπαρτα φωτόνια K_b θεωρούνται ως πηγή θορύβου σε σχέση με τα χρήσιμα φωτόνια που ανιχνεύονται από την ισχύ του σήματος. Ο οπτικός ανιχνευτής από μόνος του αποτελεί πηγή θορύβου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της ανίχνευσης (R. M. Gagliardi, 1995). Ο θόρυβος αυτός υφίσταται και όταν κανένα οπτικό ωφέλιμο σήμα δεν εισέρχεται στον ανιχνευτή και ως εκ τούτου αποκαλείται 'μαυρος θόρυβος', dark noise, Φ και μετριέται σε μονάδες (στην περίπτωση μας ηλεκτρόνια) ανά δευτερόλεπτο, (counts per second). Οι ανιχνευτές συνήθως χαρακτηρίζονται από ένα παράγοντα θορύβου (noise figure) F . Ο 'μαυρος θόρυβος' (dark noise) και ο παράγοντας θορύβου (noise figure) εξαρτώνται από το είδος του ανιχνευτή δηλαδή είτε δίοδος PIN είτε APD είτε nanowire. Τόσο ο διάσπαρτος θόρυβος όσο και οι πηγές θορύβου του ανιχνευτή συντίθενται για τον υπολογισμό του μέσου αριθμού K_n των ηλεκτρονίων θορύβου ανά χρονοσχισμή (noise electrons per slot) δηλαδή:

$$K_n = \Phi T_s + 2FK_b \quad (19)$$

Όπου:

Φ : είναι ο 'μαυρος θόρυβος' (dark noise) του ανιχνευτή (counts/sec) (Υπολογίζεται για PIN και APD ή Δεδομένο για nanowire).

F : είναι ο παράγοντας θορύβου (noise figure) του ανιχνευτή (Υπολογίζεται για APD και nanowire ή Δεδομένο για PIN).

2.7.1 'Μαυρος θόρυβος' (dark noise) Του Ανιχνευτή

Ο 'μαυρος θόρυβος' (dark noise) του ανιχνευτή για PIN και APD δίνεται από

$$\Phi = \frac{4k_B T_a}{R_L (qE)^2} \quad (20)$$

Όπου

k_B : $1.38 \cdot 10^{-23}$ Joules/K σταθερά Boltzmann (Δεδομένο).

T_a : είναι ο θόρυβος περιβάλλοντος του ανιχνευτή (K) (Δεδομένο).

R_L : είναι η αντίσταση φορτίου (Ohms) (Δεδομένο).

q : $1.6 \cdot 10^{-19}$ coulombs είναι το στοιχειώδες φορτίο (Δεδομένο).

E είναι το κέρδος του APD ή του PIN (Δεδομένο για APD, $E=1$ για PIN).

2.7.2 Παράγοντας Θορύβου (Noise Figure)

Για το APD ο παράγοντας θορύβου δίνεται από:

$$F = 2 + \zeta E \quad (\text{APD}) \quad (21)$$

Όπου:

ζ είναι ο παράγοντας ιονισμού του δέκτη (Δεδομένο για APD).

Στην περίπτωση του PIN:

$$F=1 \quad (\text{PIN}) \quad (22)$$

Στην περίπτωση του nanowire:

$$F=4.8 \quad (\text{nanowire}) \quad (23)$$

2.8 Σηματοθρομβικός Λόγος σε Οπτική Ζεύξη (The Instantaneous Signal to Noise Ratio of Optical Channel)

Πλέον μπορεί να υπολογιστεί ο σηματοθρομβικός λόγος (SNR) της οπτικής ζεύξης, το οποίο θα χρειαστεί και αργότερα για τον υπολογισμό του ρυθμού λανθασμένων bit, bit error rate, (BER). Θα γίνει η υπόθεση ότι δε χρησιμοποιείται κωδικοποίηση Manchester, που αποτελεί το χειρότερο σενάριο. Σε αυτή την περίπτωση το SNR είναι ελαφρώς τροποποιημένο σε σχέση με αυτό που υπάρχει στη βιβλιογραφία (R. M. Gagliardi, 1995). Εδώ το SNR δίνεται από:

$$\Gamma(K_s) = \left(\frac{K_s}{\sqrt{FK_s + K_n} + \sqrt{K_n}} \right)^2 \quad (24)$$

2.9 Πιθανότητα μη κωδικοποιήτων λανθασμένων Bits (Probability of Uncoded Bit Error)

Ο αριθμός των φωτονίων σήματος και θορύβου που χαρακτηρίζει τη διαδικασία της ανίχνευσης συνδυάζονται ώστε να υπολογιστεί το συνολικό μη κωδικοποιημένο BER που εμφανίζεται στην οπτική ζεύξη. Για κάθε σχήμα διαμόρφωσης, το μη κωδικοποιημένο BER υπολογίζεται για 1) περίπτωση ελευθέρου χώρου και για ζεύξεις που διασχίζουν την ατμόσφαιρα της Γης, 2) περίπτωση ήπιων αναταράξεων (στροβιλισμών) (weak turbulence) και 3) περίπτωση ισχυρών αναταράξεων (strong turbulence). Σε κάθε περίπτωση, παίρνουμε τη μέση τιμή της υπό συνθήκη BER (όπως θα δειχθεί παρακάτω) για συγκεκριμένη κατανομή της διακύμανσης των στροβιλισμών του δρόμου διάδοσης.

2.9.1 Ήπιες Ατμοσφαιρικές Αναταράξεις (Weak Atmospheric Turbulence)

Για ήπιες αναταράξεις η PDF είναι λογαριθμοκανονική (log-normal) (V. W. S. Chan ,1982) και δίνεται από:

$$p_w(K'_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_k^2 K'_s}} \exp \left[-\frac{(\ln(K'_s) - m_k)^2}{2\sigma_k^2} \right] \quad (25)$$

Όπου:

m_k : είναι ο λογάριθμος της μέσης τιμής των φωτονίων που φτάνουν (Υπολογίζεται)

σ_k^2 : είναι η διακύμανση (Υπολογίζεται)

Η λογαριθμοκανονική διακύμανση σ_k^2 σχετίζεται με τον δείκτη σπινθηρισμών που χαρακτηρίζει τη δύναμη των ήπιων αναταράξεων:

$$\sigma_k^2 = \ln(\sigma_s^2 + 1) \quad (27)$$

Όπου:

σ_s^2 είναι ο δείκτης σπινθηρισμών που κυμαίνεται $0 < \sigma_s^2 < 0.75$ (Δεδομένο)

Η λογαριθμοκανονική μέση τιμή σχετίζεται με τον αριθμό των φωτονίων του σήματος που εμφανίζονται και με την τυπική απόκλιση και δίνεται από

$$m_k = \ln(MK_s) - \frac{1}{2}\sigma_k^2 \quad (27)$$

Όπου για DPSK $M=N$.

2.9.2 Ισχυρές Ατμοσφαιρικές Αναταράξεις (Strong Atmospheric Turbulence)

Όμοια για ισχυρές αναταράξεις η PDF δίνεται από την αρνητική εκθετική κατανομή (negative exponential distribution) σύμφωνα με (K. Kiasaleh, 2005):

$$p_s(K'_s) = \frac{1}{MK_s} \exp\left[-\frac{K'_s}{MK_s}\right] \quad (28)$$

2.9.3 Διάδοση Ελευθέρου Χώρου (Free Space (No Atmosphere) Propagation)

Τελικά στην περίπτωση της διάδοσης ελευθέρου χώρου, η PDF προκύπτει αν θέσουμε το όριο $\sigma_k^2 \rightarrow 0$ στην (25). Ακολουθώντας αυτή τη διαδικασία καταλήγουμε σε μια μορφή με τη δ συνάρτηση , δηλαδή η PDF ελευθέρου χώρου δίνεται από :

$$p_f(K'_s) = \lim_{x \rightarrow 0} p_w(K'_s) = \frac{\sqrt{2}}{MK'_s} \delta\left(\sqrt{2}\left(\ln(MK'_s) - \ln(MK_s)\right)\right) \quad (29)$$

Όταν υπολογιστούν οι υπο συνθήκη BER PDFs $p_b(K_s)$, διαφορετικές για κάθε διαμόρφωση όπως φαίνεται παρακάτω, οι PDFs των αναταράξεων,(PDF's of turbulent fluctuations) χρησιμοποιούνται προκειμένου να υπολογιστεί το συνολικό (averaged) ακωδικοποίητο BER της οπτικής ζεύξης.

$$P_{b_{w,s,f}} = \int_0^{\infty} p_b(K'_s) p_{w,s,f}(K'_s) dK'_s \quad (30)$$

2.9.4 Υπολογισμός $p_b(K_s)$ για PPM

Για την περίπτωση PPM η υπο συνθήκη BER δίνεται από

$$p_{b,PPM}(K'_s) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left[\frac{1}{4}\sqrt{M \log_2(M)\Gamma(K'_s)}\right] \quad (31)$$

Βασισμένο στην θεώρηση για την ελάχιστη Ευκλείδεια απόσταση in signal space (E.A. Lee, 1994).

2.9.5 Υπολογισμός $p_b(K_S)$ για DPSK

Για την περίπτωση DPSK η υπό συνθήκη BER δίνεται από (J.G Proakis, 1995):

$$P_{d,DPSK}(K'_S) = \frac{1}{2} \exp[-\Gamma(K'_S)] \quad (32)$$

Ως εκ τούτου, οι υπολογισμοί για την πιθανότητα του μεσου όρου των ακωδικοποίητων εσφαλμένων bit βασίζεται στη σχέση (30), με τις σχέσεις (25), (28), και (29) να αναπαριστούν τις απώλειες στη ζεύξη και οι (31) και (32) τη διαμόρφωση. Στην περίπτωση της διάδοσης ελεύθερου χώρου με τη χρήση της (29) δίνονται τα παρακάτω αναλυτικά αποτελέσματα :

PPM για ελεύθερο χώρο :

$$P_{b_f,PPM} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left[\frac{1}{4} \sqrt{M \log_2(M) \Gamma(M K_S)}\right] \quad (33)$$

DPSK για ελεύθερο χώρο :

$$P_{b_f,DPSK} = \frac{1}{2} \exp[-\Gamma(K_S)] \quad (34)$$

2.10 Υπολογισμός Περιθωρίου Ισχύος για Κωδικοποιημένη και Μη, Οπτική Ζεύξη (Uncoded and Coded Optical Link Power Margins)

Παράλληλα μαζί με το μη κωδικοποιημένο BER της οπτικής ζεύξης που παρουσιάζεται παραπάνω, όλες οι άλλες σχετικές παράμετροι επίδοσης της συγκεκριμένης ζεύξης μπορούν να εξαχθούν υπό τη θεώρηση ότι η χωρητικότητα του διαύλου δηλαδή ο μέγιστος επιτεύξιμος ρυθμός δεδομένων στην οπτική ζεύξη επικοινωνιών, ακολουθεί κατανομή Poisson.

Καθώς ο οπτικός ανιχνευτής αντιλαμβάνεται τις ροές φωτονίων, σήματος και θορύβου, ως στατιστικές σημειακές ανελίξεις, η ροή ισχύος που επίσης περιγράφεται με τέτοιες Poisson ανελίξεις μπορεί, ουσιαστικά, να συμπεριληφθεί στη χωρητικότητα του διαύλου.

Το πρόβλημα μπορεί να αντιστραφεί, δοθέντος ενός επιθυμητού ρυθμού δεδομένων για τη ζεύξη, να υπολογιστεί η ισχύς που χρειάζεται για να επιτευχθεί και να διατηρηθεί ο δεδομένος ρυθμός. Η διαφορά της συγκεκριμένης υπολογισθείσας ισχύος με αυτή που προκύπτει από τη διαδικασία του link budget, αποτελεί το λεγόμενο περιθώριο ισχύος (power margin). Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι η τρέχουσα μεθοδολογία ψηφιακής κωδικοποίησης μπορεί να επιτύχει περιθώριο ισχύος 1 dB για ένα δίαυλο χωρίς θόρυβο (H. Hemmati,2007), μπορούμε να αποφανθούμε για το κατάλληλο περιθώριο ισχύος σε περίπτωση κωδικοποιημένης ζεύξης, θέτοντας μηδενικό θόρυβο του διαύλου 0 και εφαρμόζοντας τον υπολογισμό ισχύος που μόλις αναφέρθηκε. Για την υλοποίηση αυτής της διαδικασίας, αποδεικνύεται επωφελής η χρήση αναλυτικών εκφράσεων για τη χωρητικότητα ενός γενικά θορυβώδους οπτικού διαύλου τόσο για PPM όσο και DPSK διαμορφώσεις. Η διαδικασία η οποία πρώτα παρουσιάστηκε στο (B. Moision,2012b) για την περίπτωση της PPM διαμόρφωσης, θα χρησιμοποιηθεί ώστε να καταλήξουμε σε προσεγγιστικές αναλυτικές εκφράσεις.

2.10.1 Η Χωρητικότητα του PPM Διαύλου και η Διαδικασία για τον Υπολογισμό της Απαιτούμενης Οπτικής Ισχύος (PPM Channel Capacity and its Application to Determine Required Optical Power)

Με τη χρήση των ροών φωτονίων, σήματος και θορύβου, K_s και K_n αντίστοιχα και τη διάρκεια τους T_s η χωρητικότητα του PPM διαύλου, δίνεται σε (bits/sec) σύμφωνα με τα (B. Moision,2012a), (S.S. Muhammad, 2006),(B. Moision, 2012b) από:

$$C_{PPM} \text{ (bits/ sec)} = \frac{1}{T_s} [(K_s + \frac{K_n}{M}) \log_2(1 + \frac{MK_s}{K_n}) - (K_s + K_n) \log_2(1 + \frac{K_s}{K_n})] \quad (35)$$

Με σκοπό να γράψουμε την παραπάνω έκφραση σε κατάλληλη μορφή ώστε να είναι δυνατή και εφαρμόσιμη η αντιστροφή της ώστε να μπορέσουμε να εξάγουμε το K_s σε σχέση με το C_{PPM} (bits/ sec) , θα εφαρμόσουμε τη διαδικασία που περιγράφεται στο (B. Moision,2012a) ώστε να καταλήξουμε στην παρακάτω έκφραση:

$$C'_{PPM} \text{ (bits/ sec)} = \frac{1}{T_s} \left(\frac{\log(M)}{\log(2)} \right) \left(\frac{K_s^2}{K_s + K_n \frac{2\log(M)}{M-1} + MK_s^2} \right) \quad (36)$$

Ο πρώτος όρος στον παρανομαστή της (36) περιγράφει τη γραμμική κβαντικά περιορισμένη περιοχή της χωρητικότητας, ο δεύτερος όρος τη θορυβώδη τετραγωνικά περιορισμένη περιοχή και ο τελευταίος την κορεσμένη φασματική περιοχή (S. Dolinar, 2012).

Η χωρητικότητα σε όρους bits/photon, bits ανά φωτόνιο, παρουσιάζεται παρακάτω

$$C'_{PPM} \text{ (bits/ photon)} = \frac{T_s}{K_s} C'_{PPM} \text{ (bits/ sec)} \quad (37)$$

2.10.2 Η Απαιτούμενη Οπτική Ισχύς για την Υποστήριξη Ενός Μη Κωδικοποιημένου PPM Ρυθμού Δεδομένων R_b (Required Optical Power to support an Uncoded PPM Data Rate R_b)

Εξισώνοντας το C'_{PPM} με το R_b δηλαδή $C'_{PPM} = R_b$ στην (36) και με δεδομένο το ρυθμό των φωτονίων θορύβου K_n όπως αυτός παρουσιάστηκε παραπάνω, η έκφραση (36) μπορεί να λυθεί για $K_s = K_{SM}$ όπου το K_{SM} εκφράζει τον απαιτούμενο αριθμό φωτονίων σήματος ανά χρονοσχισμή (signal photons/slot) με σκοπό να διατηρηθεί ο ρυθμός δεδομένων R_b στο δίαυλο .

$$C'_{PPM} = R_b , \text{ λύση της εξίσωσης (36) } K_s \equiv K_{SM}$$

Αφού υπολογιστεί το K_{SM} τότε η απαιτούμενη ισχύς σε (Watts) που αντιστοιχεί στη δεδομένη ροή φωτονίων, μπορεί να υπολογιστεί από :

$$Pwr_{Req} = \frac{hc}{\lambda T_s} K_{SM} \quad (38)$$

Αφαιρώντας την (38) από την πραγματική ισχύ που ανιχνεύτηκε ,όπως δίνεται από την εξίσωση (8), το μη κωδικοποιημένο περιθώριο ισχύος σε (dB) είναι :

$$\Delta_{Unc} = 10\log_{10}(Pwr_S) - 10\log_{10}(Pwr_{Req}) \quad (39)$$

2.10.3 Η Απαιτούμενη Οπτική Ισχύς για την Υποστήριξη Ενός Κωδικοποιημένου PPM Ρυθμού Δεδομένων R_b (Required Optical Power to support an Coded PPM Data Rate R_b)

Όμοια, στην περίπτωση του αθόρυβου διαύλου, δηλαδή $K_n = 0$, η εξίσωση (36) με C'_{PPM} (bits/sec) = R_b , λύνεται ώστε να εξαχθεί ο ελάχιστος ρυθμός φωτονίων $K_s = K_{SU}$, που απαιτείται ώστε να διατηρηθεί ο ρυθμός δεδομένων R_b στη ζεύξη:

$$K_{SU} = \frac{R_b}{\Lambda_1 - MR_b}, \quad \Lambda_1 \equiv \frac{\log(M)}{T_s \log(2)} \quad (40)$$

Λοιπόν η απαιτούμενη ελάχιστη ισχύς που αντιστοιχεί στη δεδομένη ροή φωτονίων είναι :

$$Pwr_{Min} = \frac{hc}{\lambda T_s} K_{SU} \quad (41)$$

Όπως και παραπάνω αφαιρώντας την (41) από την πραγματική ισχύ που ανιχνεύτηκε, όπως δίνεται από την εξίσωση (8), το μέσο κωδικοποιημένο περιθώριο ισχύος σε (dB) είναι:

$$\Delta'_{Cod} = 10 \log_{10}(Pwr_S) - 10 \log_{10}(Pwr_{Min}) \quad (42)$$

Ωστόσο, η υλοποίηση οποιουδήποτε σχήματος κωδικοποίησης, χρειάζεται ισχύ για την κωδικοποίηση (coding overhead). Η συνολική ισχύς που χάνεται για την υλοποίηση της κωδικοποίησης $CL_{TL} < 0$ (dB) δίνεται από :

$$CL_{TL} = CL_N + CL_{CR} + CL_D + CL_I \quad (43)$$

Όπου:

$CL_N < 0$: είναι οι απώλειες κωδικοποιητή/αποκωδικοποιητή σε (dB) εξαιτίας του θορύβου (Δεδομένο).

$CL_{CR} < 0$: είναι οι απώλειες κωδικοποιητή/αποκωδικοποιητή σε (dB) εξαιτίας του ρυθμού κώδικα (code rate) (Δεδομένο).

$CL_D < 0$: είναι η απόσταση του κωδικα από τη χωρητικότητα σε (dB) (Δεδομένο).

$CL_I < 0$: είναι οι απώλειες της υλοποίησης της αποκωδικοποίησης σε (dB) (Δεδομένο).

Ως εκ τούτου, στο μέσο περιθώριο ισχύος της (42) θα πρέπει να προσθέσουμε το αποτέλεσμα της (43) ώστε να έχουμε το συνολικό περιθώριο ισχύος σε (dB).

$$\Delta_{Cod} = 10 \log_{10}(Pwr_S) - 10 \log_{10}(Pwr_{Min}) + CL_{TL} \quad (44)$$

2.10.4 Η Χωρητικότητα του DPSK Διαύλου και η Διαδικασία για τον Υπολογισμό της Απαιτούμενης Οπτικής Ισχύος (DPSK Channel Capacity and its Application to Determine Required Optical Power)

Ακολουθώντας παρόμοιο τρόπο με αυτόν που παρουσιάζεται στο (G. Kramer, 2003) για τον υπολογισμό της χωρητικότητας ενός διαύλου για μια DPSK οπτική ζεύξη έχουμε :

$$C_{DPSK} \text{ (bits/ sym)} = \log_2(2) - h_2\left(\frac{1}{2} \exp[-\Gamma(K_s)]\right) \quad (45)$$

Όπου $h_2(\dots)$ είναι η δυαδική συνάρτηση εντροπίας :

$$h_2(p) \equiv -p \log_2(p) - (1-p) \log_2(1-p) \quad (46)$$

Λοιπόν παίρνουμε την χωρητικότητα σε bits/sec :

$$C_{DPSK} \text{ (bits/ sec)} = \frac{1}{T_s} C_{DPSK} \text{ (bits/ sym)} \quad (47)$$

Μια προσεγγιστική αναλυτική έκφραση που μπορεί εύκολα να αντιστραφεί ώστε να εξαχθεί το K_s είναι η ακόλουθη :

$$C'_{DPSK} \text{ (bits/ sec)} = \frac{1}{T_s} \left(\frac{K_s^3}{2F^2 K_s + 4FK_n + K_s^3} \right) \quad (48)$$

Όπως και για την περίπτωση της PPM διαμόρφωσης, θα παρουσιάσουμε την χωρητικότητα και σε μονάδες bits/photon:

$$C'_{DPSK} \text{ (bits/ photon)} = \frac{T_s}{K_s} C'_{DPSK} \text{ (bits/ sec)} \quad (49)$$

2.10.5 Η Απαιτούμενη Οπτική Ισχύς για την Υποστήριξη Ενός Μη Κωδικοποιημένου DPSK Ρυθμού Δεδομένων R_b (Required Optical Power to support an Uncoded DPSK Data Rate R_b)

Εξισώνοντας το C'_{DPSK} (bits/ sec) με το R_b δηλαδή C'_{DPSK} (bits/ sec) = R_b στην (48) και με δεδομένο το ρυθμό των φωτονίων θορύβου K_n όπως αυτός παρουσιάστηκε παραπάνω, η έκφραση (48) μπορεί να λυθεί για $K_s = K_{SM}$ όπου το K_{SM} εκφράζει τον απαιτούμενο αριθμό φωτονίων σήματος ανά χρονοσχισμή (signal photons/slot) με σκοπό να διατηρηθεί ο ρυθμός δεδομένων R_b στον DPSK δίαυλο .

$$C'_{DPSK} \text{ (bits/ sec)} = R_b \text{ , λύση της εξίσωσης (48) } K_s \equiv K_{SM}$$

Λοιπόν, όταν υπολογιστεί το K_{SM} τότε η απαιτούμενη ισχύς σε (Watts) που αντιστοιχεί στη δεδομένη ροή φωτονίων, μπορεί να υπολογιστεί από :

$$Pwr_{Req} = \frac{hc}{\lambda T_s} K_{SM} \quad (50)$$

Αφαιρώντας την (50) από την πραγματική ισχύ που ανιχνεύτηκε ,όπως δίνεται από την εξίσωση (8), το μη κωδικοποιημένο περιθώριο ισχύος σε (dB) είναι :

$$\Delta_{Unc} = 10 \log_{10}(Pwr_s) - 10 \log_{10}(Pwr_{Req}) \quad (51)$$

2.10.6 Η Απαιτούμενη Οπτική Ισχύς για την Υποστήριξη Ενός Κωδικοποιημένου DPSK Ρυθμού Δεδομένων R_b (Required Optical Power to support an Coded DPSK Data Rate R_b)

Ομοια, στην περίπτωση του αθόρυβου διαύλου, δηλαδή $K_n=0$, η εξίσωση (48) με C'_{DPSK} (bits/sec) = R_b λύνεται ώστε να εξαχθεί ο ελάχιστος ρυθμός φωτονίων $K_s = K_{SU}$, που απαιτείται ώστε να διατηρηθεί ο ρυθμός δεδομένων R_b στη DPSK ζεύξη. Εδώ, στην υπόθεση αθόρυβου διαύλου θα θεωρήσουμε ανιχνευτή με $F=1$, και ρυθμό διόρθωσης λαθών (forward error correction) r_{FEC} .

$$C'_{DPSK} = R_b, \text{ λύση της εξίσωσης (48) με } K_n=0, F=1, K_s \equiv K_{SM}$$

$$K_{SU} = \sqrt{\frac{4r_{FEC}R_bT_s}{2r_{FEC}R_bT_s - 1}} \quad (52)$$

Λοιπόν η απαιτούμενη ελάχιστη ισχύς που αντιστοιχεί στη δεδομένη ροή φωτονίων είναι :

$$Pwr_{Min} = \frac{hc}{\lambda T_s} K_{SU} \quad (53)$$

Τέλος ,το περιθώριο ισχύος, για την DPSK οπτική ζεύξη. υπολογίζεται όπως και στο 9.1.2 δηλαδή:

$$\Delta_{Cod} = 10\log_{10}(Pwr_s) - 10\log_{10}(Pwr_{Min}) + CL_{TL} \quad (54)$$

Οπου το CL_{TL} υπολογίζεται σύμφωνα με την (43).

2.11 Επιπρόσθετες Παράμετροι της Ζεύξης (Additional Link Parameters)

Εδώ θα παρουσιαστούν τρεις επιπλέον παράμετροι που θα βοηθήσουν στο χαρακτηρισμό της οπτικής ζεύξης. Βασισμένες στις προηγούμενες παραμέτρους αυτές είναι η οπτική ακτινοβολία (optical irradiance), στο άνοιγμα του φακού του δέκτη σε (Watts/m²) :

$$I_{Inc} = \frac{P_T 10^{(\tau_{am} + \tau_T)/10}}{\pi \left(\frac{w_0 Rng}{2} \right)^2} \quad (55)$$

Και τόσο για PPM όσο και για DPSK διαμόρφωση, το λαμβανόμενο σήμα σε (dB counts/Bit):

$$Sig_{Rcv} = 10\log_{10} \left(\frac{K_s}{R_b T_s} \right) \quad (56)$$

Και το ισοδύναμο σήμα που απαιτείται:

$$Sig_{Rqd} = 10\log_{10} \left(\frac{K_{SM}}{R_b T_s} \right) \quad (57)$$

2.12 Υλοποίηση Κώδικα Προϋπολογισμού Ισχύος Οπτικής Ζεύξης σε Γραφικό Περιβάλλον (Gui)

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η υλοποίηση της διαδικασίας του προϋπολογισμού ισχύος οπτικής ζεύξης όπως αυτή αναλύθηκε στις προηγούμενες ενότητες, σε γραφικό περιβάλλον (GUI).

The GUI is organized into several main panels:

- Transmitter:** Includes fields for Wavelength, Laser Avg Output Power (W), Transmitter Aperture Diameter (cm), Transmitter Optical losses (dB), Maximum Desired BER, and Platform Angular Jitter (gradians). It also has an 'Outputs' section with fields for Laser Peak Output Power (W), Beam Divergence Angle (gradians), Transmitter Aperture Gain (dB), Pointing Error Loss (dB), Pointing Power Penalty (dB), and ERP of Optical Transmitter.
- Receiver:** Includes Receiver Aperture Diameter (cm), Receiver Obstruction Diameter (cm), Receiver Optical Losses (dB), and Focal Plane Losses (dB). It has an 'Outputs' section with fields for Irradiance @ Rcv Aperture (pW/m²), Receiver Obscuration Ratio, Receiver Aperture Gain, Receiver Total Gain (dB), Optical Power Into Rcv Aperture (dB), Rcvd Avg Signal Power (dB-Ph/sec), Detected Avg Signal Pwr (dB-Ph/sec), and Detected Avg Signal Pwr (dB-Ph/slot).
- Detector:** Includes Detector Type (Pin, APD, Nanowire) with associated parameters like APD Gain, Ionization Factor, and Dark Noise. It also has Filter Noise Bandwidth (nm), Quantum Efficiency, Ambient Temp (K), Load Resistance (KΩ), Rcvr Field of View (dB-sr), Detector Dark Noise (Cts/sec), Total Detected Noise (dB-Ph/sec), and Total Detected Noise (dB-Ph/slot).
- Signaling:** Includes Data Rate Mbps, PPM Mod Index, DPSK Bits/Symbol, FEC Rate, Coding Performance Noise Loss (dB), Coding Performance Code Rate Loss, Coding Distance From Capacity (dB), and Decoder Implementation Loss (dB). It has an 'Outputs' section with fields for Symbol Duration (ns), Detected Signal (dB-Cts/Bit), Required Signal (dB-Cts/Bit), Log-Normal Channel Mean, and Log-normal Channel Variance.
- Channel:** Includes Range (Km), Scintillation index (Weak/Strong), Modulation (PPM/DPSK), Atmospheric Attenuation, and Free Space Loss (dB).
- Link Performance Metrics:** A table of metrics including Maximum Noiseless Channel Capacity (dB-Bits/Ph), Channel Capacity with Noise (dB-Bits/Ph), Link Margin Without Coding (dB), Uncoded Ber for Free Space, Uncoded Ber for Weak Turbulence, Uncoded Ber for Strong Turbulence, Coding Implementation Loss (dB), and Link Margin With Coding (dB).
- Background:** Includes Planetary Irrad. (W/cm2/sr/μm), Sky Irrad. (W/cm2/sr/μm), and Detected Bkgnd (ph/sec, dB ph/sec).

At the bottom right, there is a large green 'Run' button and a 'clear' button.

Σχήμα 2.1 Υλοποίηση διαδικασίας προϋπολογισμού ισχύος σε γραφικό περιβάλλον

Transmitter	Receiver	Detector	Signaling
Wavelength: 1550	Receiver Aperture Diameter (cm): 1180	Detector Type: <input checked="" type="radio"/> Nanowire	Data Rate Mbps: 15
Laser Avg Output Power (W): 13	Receiver Obstruction Diameter (cm): 180	APD Gain: []	PPM Mod Index: 32
Transmitter Aperture Diameter (cm): 12.2	Receiver Optical Losses (dB): 2	Ionization Factor: []	DPSK Bits/Symbol: []
Transmitter Optical losses (dB): 2	Focal Plane Losses (dB): 2	Dark Noise: 1e4	FEC Rate: 0.5
Maximum Desired BER: 1e-6			Coding Performance Noise Loss (dB): 1
Platform Angular Jitter (grads): 0.8			Coding Performance Code Rate Loss: 0.5
	Outputs	Filter Noise Bandwidth (nm): 0.1	Coding Distance From Capacity (dB): 0.5
Outputs	Irradiance @ Rcv Aperture (pW/cm ²): 0.450609	Quantum Efficiency: 0.4	Decoder Implementation Loss (dB): 0.7
Laser Peak Output Power (W): 532.48	Receiver Obscuration Ratio: 0.152542	Ambient Temp (K): 300	Outputs
Beam Divergence Angle (grads): 11.4384	Receiver Aperture Gain: 147.472	Load Resistance (kΩ): 50000	Symbol Duration (ns): 5.20833
Transmitter Aperture Gain (dB): 107.884	Receiver Total Gain (dB): 142.752		Detected Signal (dB-Cts/Bit): 1.67263
Pointing Error Loss (dB): -0.0841542	Optical Power Into Rcv Aperture (dB): -111.521	Rcvr Field of View (dB-sr): -118.891	Required Signal (dB-Cts/Bit): -1.01682
Pointing Power Penalty (dB): -1.25098	Rcvd Avg Signal Power (dB-Ph/sec): N/A	Detector Dark Noise (Cts/sec): 10000	Log-Normal Channel Mean: 1.25377
ERP of Optical Transmitter: 115.668	Detected Avg Signal Pwr (dB-Ph/sec): 73.4335	Total Detected Noise (dB-Ph/sec): 77.1535	Log-normal Channel Variance: 0.0953102
	Detected Avg Signal Pwr (dB-Ph/slot): -9.39947	Total Detected Noise (dB-Ph/slot): -5.67953	
Channel		Outputs	
Range(Km): 3.874		Rcvr Field of View (dB-sr): -118.891	
Turbulence: <input checked="" type="checkbox"/> Weak		Detector Dark Noise (Cts/sec): 10000	
Scintillation index: 0.1		Total Detected Noise (dB-Ph/sec): 77.1535	
<input checked="" type="checkbox"/> Strong		Total Detected Noise (dB-Ph/slot): -5.67953	
Modulation: <input checked="" type="radio"/> PPM			
<input type="radio"/> DPSK			
Atmospheric Attenuation: 0.72			
Free Space Loss (dB): -369.941			
	Link Performance Metrics		
	Maximum Noiseless Channel Capacity (dB-Bits/Ph): 0.280976	Background	
	Channel Capacity with Noise (dB-Bits/Ph): N/A	Planetary Irrad. (W/cm ² /sr/μm): 0.00374	
	Link Margin Without Coding (dB): 2.68945	Sky Irrad. (W/cm ² /sr/μm): 0.0085	
	Uncoded Ber for Free Space: 0.000271845	Detected Bckgnd (dB-Ph/sec): 67.3299	
	Uncoded Ber for Weak Turbulence: 0.00133585		
	Uncoded Ber for Strong Turbulence: 0.0512949		
	Coding Implementation Loss (dB): -2.7		
	Link Margin With Coding (dB): 2.95203		
			Calculate
			clear

Σχήμα 2.2 Ενδεικτικές τιμές και υλοποίηση στο γραφικό περιβάλλον (GUI)

2.13 Αναφορές

- (J. D. Barry, 1985) J. D. Barry and G. S. Mecherle, "Beam pointing error as a significant design parameter for satellite-borne free space optical communication system", *Opt. Eng.* 24 (6), pp. 1049-1054 (1985).
- (J. D. Barry, 1986) J. D. Barry and G. S. Mecherle, "Communications channel burst errors induced by Gaussian distributed mispointing" *Proc. SPIE* 616, pp. 137-140(1986).
- (V. W. S. Chan ,1982) V. W. S. Chan, "Coding for the turbulent atmospheric optical channel", *IEEE Trans. Comm.* 30 (1), pp. 2689-275 (1982).
- (C-C Chen, 1989) C-C Chen and C. S. Gardner, "Impact of random pointing and tracking errors on the design of the coherent and incoherent optical intersatellite links", *IEEE Trans. Comm.* 37 (3) pp. 252-260 (1989).
- (S. Dolinar, 2012) S. Dolinar, B. Moision, and B. Erkmen, "Fundamentals of free-space optical communication", *Workshop on Quantum Communications, Sensing and Measurement in Space*, Keck Institute for Space Studies, 25 June, 2012.
- (R. M. Gagliardi, 1995) R. M. Gagliardi and S. Karp, *Optical Communications*, Second Edition, Wiley, New York, 1995. Chapter 6.
- (H. Hemmati, 2007) H. Hemmati, A. Biswas, and D. M. Boroson, "Prospect for improvement of interplanetary laser communication data rates by 30 dB" *Proc. IEEE* 95 (10) pp. 2082-2092 (2007).
- (K. Kiasaleh, 2005) K. Kiasaleh, "Performance of APD-based PPM free-space optical communication systems in atmospheric turbulence, *IEEE Trans. Comm.* 53 (9), pp.1455-1461 (2005).
- (B. J. Klein, 1974) B. J. Klein and J. J. Degnan, "Optical Antenna Gain. 2: Receiving Antennas", *Appl. Opt.* 13 (10) pp. 2397-2401 (1974).
- (G. A. Koepf, 1986) G. A. Koepf, R. Peters, and R. G. Marshalek, "Analysis of burst error occurrence on optical intersatellite link (ISL) design", *Proc. SPIE* 616, pp. 129-136 (1986).
- (G. Kramer, 2003) G. Kramer, A. Ashikhimin, A.J van Wijgaarden, and X. Wei, "Spectral efficiency of coded phase-shift keying for fiber-optic communication", *J. Lightwave Tech.* 21 (10), pp. 2438-2445 (2003).
- (E.A. Lee, 1994) E.A. Lee and D.G Messerschmitt, *Digital Communications*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1994.
- (B. Moision,2012a) B. Moision, J. Wu, and S.Shambayati, "An optical communications link design tool for long-term mission planning for deep-space missions", *Proc. IEEE Aerospace Conf.*, March 3-10, 2012.
- (B. Moision, 2012b) B. Moision, B. I. Erkmen, W. Farr, S. J. Dolinar, and K.M. Birnbaum, "Limits on achievable dimensional and photon efficiencies with intensity-modulation and photon counting due to non-ideal photon counter behavior", *Proc. SPIE* 8246, *Free Space Laser Communication Technologies XXIV*, February 2012.
- (S.S. Muhammad, 2006) S.S. Muhammad, W. Gappmair, and E. Leitgeb, "PPM channel capacity evaluation for terrestrial FSO links", *International Workshop on Satellite and Space Communications*,14-15 Sept., 2006, pp. 222-226.
- (J.G Proakis, 1995) J.G Proakis, *Digital Communications* , Third Edition, McGraw-Hill, New York, 1995.

(P. W. Scott, 1986) P. W. Scott and P.W. Young, "Impact of temporal fluctuations of signal-to-noise ratio (burst error) on free-space laser communications system design", Proc. SPIE 616, pp. 174-182 (1986).

(M. Toyoshima, 2002) M. Toyoshima, et al., "Optimum divergence angle of Gaussian beam wave in the presence of random jitter in free-space laser communication systems", J. Opt. Soc. Am. A19 (3), pp.567-571 (2002).

Κεφάλαιο 3

Επίδραση των Νεφών στη Διάδοση των Δορυφορικών Ζεύξεων από την Ka Ζώνη έως τη Ζώνη των Οπτικών Συχνοτήτων

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί μία σύνοψη του αντίκτυπου που έχουν τα νέφη στη διάδοση του σήματος τόσο σε μικροκυματικές όσο και σε οπτικές συχνότητες στις δορυφορικές επικοινωνίες. Στις παρακάτω Ενότητες 2,3,4 συνοψίζονται οι μικροφυσικές ιδιότητες των νεφών και η απαιτούμενη ηλεκτρομαγνητική θεωρία. Στην Ενότητα 5 ασχολούμαστε με διάφορα μοντέλα που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία για τον υπολογισμό της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών. Τα μοντέλα τα οποία παρατίθενται δεν εκφράζουν απλά μια σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε υγρό νερό, liquid water content, και της ειδικής απόσβεσης, specific attenuation, αλλά επωφελούνται και από μετεωρολογικά δεδομένα που δέχονται ως είσοδο, με σκοπό την όσο το δυνατόν ακριβέστερη πρόβλεψη της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών.

3.2 Φυσικό Υπόβαθρο

Τα νέφη αποτελούνται είτε από μικρές σταγόνες νερού είτε από παγωμένους κρυστάλλους που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα, και σχηματίζονται μετά από συμπύκνωση ατμών ή εξάχνωση όταν ο αέρας ψύχεται. Η μόνη διαφορά μεταξύ της βροχής και της ομίχλης είναι ότι η τελευταία εμφανίζεται πολύ κοντά στο έδαφος. Τα σωματίδια τόσο της ομίχλης όσο και των νεφών τροποποιούν της οπτικές ιδιότητες της ατμόσφαιρας, περιορίζοντας τη διαφάνεια της. Στη μετεωρολογία η ομίχλη εμφανίζεται όταν η ορατότητα (visibility) στον ορίζοντα πέφτει κάτω από το 1 km (Ahrens,2013). Σε μικρότερο βαθμό, και οι μικροκυματικές συχνότητες επηρεάζονται από την ομίχλη και τα νέφη. Τα αποτελέσματα της κυματικής διάδοσης μέσα από την τροπόσφαιρα εξαρτώνται από τη συχνότητα της εμφάνισης τους και από τις φυσικές τους ιδιότητες (φάση σωματιδίων, μέγεθος και αριθμός συγκέντρωσης αυτών).

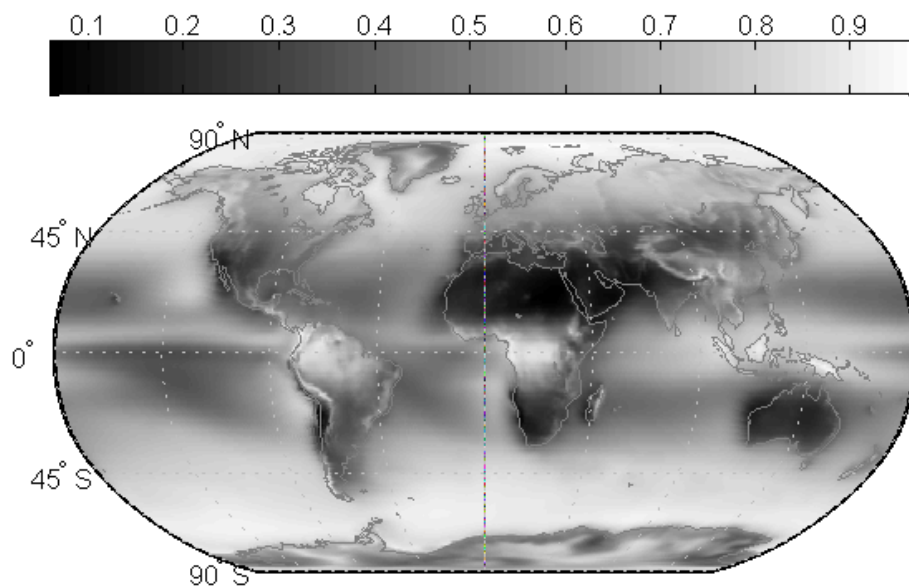
Ακολουθεί μια σύντομη παρουσίαση των ιδιοτήτων των νεφών για τον υπολογισμό και την πρόβλεψη της απόσβεσης ,τόσο των μικροκυμάτων όσο και των οπτικών κυμάτων, που προκαλείται από τα στρώματα των νεφών.

3.2.1 Εμφάνιση Νεφών

Στο Σχήμα 1, παρουσιάζεται ένας παγκόσμιος χάρτης εμφάνισης νεφών, ο οποίος έχει παραχθεί από ανάλυση αριθμητικών δεδομένων για την πρόβλεψη του καιρού (Numerical Weather Prediction data) από το ευρωπαϊκό κέντρο μεσοπρόθεσμων καιρικών

προβλέψεων, European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF, 2014). Απεικονίζεται η συνολική κάλυψη των νεφών ανά $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ pixels. Τέσσερα δείγματα της συνολικής εμφάνισης νεφών είναι διαθέσιμα ημερησίως. Η συλλογή των δεδομένων έγινε στη διάρκεια της περιόδου από το 1984 έως το 2013.

Η κατανομή της κάλυψης των νεφών εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος, το κλίμα και το περιβάλλον (θάλασσα ή στεριά). Τα σύννεφα εμφανίζονται πιο συχνά σε pixels που αντιστοιχούν σε θάλασσα λόγω της διαθεσιμότητας της σε νερό. Για παράδειγμα η μέση συνολική κάλυψη ξεπερνά το 0.5 για το 80% των pixels που αντιστοιχούν σε θάλασσα ενώ για το 60% αυτών που αντιστοιχούν σε στεριά. Σε μέσα γεωγραφικά πλάτη ($30^\circ - 60^\circ$) σχεδόν τα μισά pixels που αντιστοιχούν σε στεριά έχουν μια γεωγραφική κάλυψη της τάξης του 0.5 από νέφη



Σχήμα 3.1. Παγκόσμιος Χάρτης Κάλυψης Νεφών (ECMWF δεδομένα περιόδου 1984-2013).

3.2.2 Κατηγοριοποίηση Νεφών

Τα νέφη μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις ευρείς ομάδες ανάλογα με το ύψος της βάσης τους σε σχέση με την επιφάνεια της γης (Ahrens, 2013):

1. High-level clouds : παγωμένες μάζες που αποτελούνται από παγοκρυστάλλους, με ύψος μεταξύ των 5 και 13 km σε μέσα γεωγραφικά πλάτη.
2. Mid-level clouds : αποτελούνται κυρίως από σταγόνες νερού, μερικές φορές παρατηρείται και ύπαρξη κρυστάλλων πάγου, με ύψος μεταξύ των 2 και 7 km σε μέσα γεωγραφικά πλάτη
3. Low-level clouds : αποτελούνται από σταγόνες νερού και, αν η θερμοκρασία του αέρα είναι αρκετά ψυχρή, από πάγο και χιόνι, με ύψος μικρότερο των 2 km σε μέσα γεωγραφικά πλάτη.

4. Vertically developed clouds : ταραχώδεις δομές που δημιουργούνται είτε μέσω διάδοσης θερμότητας είτε μέσω μετωπικής ανύψωσης, και συνήθως συνδέονται με κατακρημνίσεις

Τα όρια της κάθε ομάδας εξαρτώνται από το γεωγραφικό πλάτος, και αυξάνονται καθώς κινούμαστε από πολικά σε τροπικά γεωγραφικά πλάτη μέσα από εύκρατες περιοχές. Τα σύννεφα που αντιστοιχούν σε μια δεδομένη ομάδα κατηγοριοποιούνται περαιτέρω σε τύπους ανάλογα με τη μορφή τους όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.

Ομάδα	Όνομα	Είδος	Τροπικό	Εύκρατο	Πολικό
1	High clouds	Cirrus (Ci)	6-18 km	5-13 km	3-8 km
		Cirrostratus (Cs)			
		Cirrocumulus (Cc)			
2	Middle clouds	Altostratus (As)	2-8 km	2-7 km	2-4 km
		Altostratus (Ac)			
3	Low clouds	Stratus (St)	0-2 km	0-2 km	0-2 km
		Stratocumulus (Sc)			
		Nimbostratus (Ns)			
4	Vertically developed clouds	Cumulus (Cu)	-	-	-
		Cumulonimbus (Cb)			

Πίνακας 3-1 Κατηγοριοποίηση Νεφών και Προσέγγιση του Ύψους Βάσης (Ahrens, 2013).

Ο τύπος των νεφών χρησιμοποιείται από διάφορα στατιστικά μοντέλα για προβλέψουν την απόσβεση εξαιτίας των νεφών (cloud attenuation) όπως θα δούμε αργότερα.

3.2.3 Μικροφυσικές (Microphysical) Ιδιότητες Νεφών

Οι μικροφυσικές ιδιότητες των νεφών, σχετίζονται με τις ιδιότητες των στοιχείων που αποτελούν τα συστατικά ενός σύννεφου δηλαδή τις σταγόνες νερού και τους κρυστάλλους πάγου. Σύμφωνα με την οπτική αυτή, το μέγεθος των σωματιδίων (σχετικό με το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας) και ο αριθμός της συγκέντρωσης, καθορίζουν το ποσοστό της ενέργειας που χάνεται από το εισερχόμενο κύμα. Το μέγεθος των σωματιδίων κάθε ατμοσφαιρικού πληθυσμού κατανέμεται σε ένα φάσμα, που αλλιώς λέγεται σωματιδιακή κατανομή, Κατανομή μεγέθους σωματιδίων Particle Size Distribution (PSD). Μια εύχρηστη και βολική μαθηματική αναπαράσταση της PSD μιας μεγάλης ποικιλίας ατμοσφαιρικών σωματιδίων, από αερολύματα (aerosols) μέχρι νέφη και κατακρημνίσεις,

αποτελεί η τροποποιημένη Γάμμα συνάρτηση τεσσάρων παραμέτρων, four-parameter modified gamma function, (Deirmedjian,1965):

$$n(r) = a r^\alpha \exp(-br^\gamma) \quad (1)$$

όπου το r είναι η ακτίνα του σωματιδίου, και $n(r) dr$ είναι ο αριθμός των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου αέρα με ακτίνα μεταξύ του r και του $r+dr$. Οι παράμετροι α , b , γ καθορίζουν σχήμα και το πλάτος της κατανομής γύρω από το μέγιστό της, και η παράμετρος a είναι ανάλογη του αριθμού συγκέντρωσης των σωματιδίων. Άλλες ευρέως γνωστές PSDs που χρησιμοποιούνται είναι η Γάμμα κατανομή με τρεις παραμέτρους, η εκθετική κατανομή και η power law distribution, οι οποίες αποτελούν ειδικές περιπτώσεις της (1) (Petty and Huagg 2011). Λίγοι συγγραφείς χρησιμοποιούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή με τρεις παραμέτρους, για να μοντελοποιήσουν την PSD.

Σε εναλλακτικές μορφές της (1) χρησιμοποιούνται διαφορετικά σετ ανεξάρτητων παραμέτρων που αντιστοιχούν σε φυσικές ποσότητες. Ποσότητες που συνήθως χρησιμοποιούνται στην μικροφυσική των νεφών είναι η συγκέντρωση των σωματιδίων N , the liquid water content w (περιεχόμενο υγρού νερού), the mode radius of distribution (επικρατούσα τιμή της κατανομής) r_c , και η ενεργός ακτίνα r_e η οποία μπορεί να εκφραστεί με τη χρήση των παραμέτρων α , b , γ και a όπως παρακάτω:

$$N = \int_{r_1}^{r_2} n(r) dr \approx \frac{a}{\gamma} \frac{\Gamma((\alpha+1)/\gamma)}{b^{(\alpha+1)/\gamma}} \quad (2)$$

$$w = \frac{4}{3} \pi \rho_w \int_{r_1}^{r_2} r^3 n(r) dr \approx \frac{4}{3} \pi \rho_w \frac{a}{\gamma} \frac{\Gamma((\alpha+4)/\gamma)}{b^{(\alpha+4)/\gamma}} \quad (3)$$

$$r_c = \left(\frac{\alpha}{b\gamma} \right)^{1/\gamma} \quad (4)$$

$$r_e = \frac{\int_{r_1}^{r_2} r^3 n(r) dr}{\int_{r_1}^{r_2} r^2 n(r) dr} \approx \frac{\Gamma((\alpha+4)/\gamma)}{\Gamma((\alpha+3)/\gamma)} \frac{1}{b^{1/\gamma}} \quad (5)$$

όπου $\Gamma(x)$ είναι η Γάμμα συνάρτηση, και ρ_w η πυκνότητα του νερού. Παρότι χρειάζεται ένα μη μηδενικό κάτω όριο (r_1) και ένα πεπερασμένο άνω όριο (r_2) για την ολοκλήρωση στην ακτίνα του σωματιδίου, η ολοκλήρωση στην (1), (2), (3), (4), (5) μπορεί με ασφάλεια να επεκταθεί από το μηδέν έως το άπειρο με αμελητέα σφάλματα. Πράγματι, από τη γνωστή ιδιότητα για την τροποποιημένη Γάμμα συνάρτηση η n -οστή ροπή της κατανομής μπορεί να γραφτεί σε κλειστή μορφή:

$$M_n = \int_0^\infty r^n n(r) dr = \frac{a}{\gamma} \frac{\Gamma((\alpha+n+1)/\gamma)}{b^{(\alpha+n+1)/\gamma}} \quad (6)$$

Όπως θα δούμε αργότερα το w , περιεκτικότητα υγρού νερού, (liquid water content), δηλαδή η μάζα του νερού στο σύννεφο ανά μονάδα όγκου αέρα, αποτελεί μια σημαντική παράμετρο για τον υπολογισμό της μικροκυματικής απόσβεσης από σύννεφα νερού. Μία

παρεμφερής κλειστή μορφή όπως η (3), για την παράμετρο ice water content (περιεκτικότητα παγωμένου νερού), δεν είναι εύκολη καθώς οι κρύσταλλοι πάγου είναι μία μίξη αέρα και πάγου και για αυτό κάποιο ισοδύναμο μέγεθος πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

Η παράμετρος r_c (mode radius), είναι το μέγεθος της ακτίνας που αντιστοιχεί στο μέγιστο της PSD. Η ενεργός ακτίνα r_e είναι ο λόγος της χωρικής προς την επιφανειακή ακτίνα και έχει ευρέως διαδεδομένη χρήση στην παραμετροποίηση για τη μεταφορά ακτινοβολίας και στους δορυφορικούς αλγόριθμους για την ανάκτηση δεδομένων (Slingo et al., 1982), (King et al., 2003). Εκτενής αναφορά για τις ιδιότητες της τροποποιημένης GAMMA κατανομής και τις σχέσεις μετατροπής μεταξύ των διαφόρων παραστάσεων σε σχέση με τα διάφορα σετ παραμέτρων δίνεται στο (Petty and Huang, 2011).

Οι μικροφυσικές ιδιότητες των νεφών παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα εξαιτίας της πολυπλοκότητας κατά τη διαδικασία της δημιουργίας τους. Η ανάπτυξη της εξαρτάται από διαφόρους παράγοντες όπως το μέγεθος, ο τύπος και η συγκέντρωση των ατμοσφαιρικών ρύπων, που δρουν ως πυρήνες συμπύκνωσης νεφών, η θερμοκρασία, η ένταση και η διάρκεια των στροβίλων και ο ρυθμός ψύξης των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Παρ' όλα αυτά, είναι χρήσιμο να παραθέσουμε μερικά μεγέθη, που αντιπροσωπεύουν κατά μέσο όρο τα είδη των νεφών. Σύμφωνα με την (ITU-R P.840-6), το liquid water content, της ομίχλης παίρνει τιμές από 0.05 g/m^3 για μέση ομίχλη (ορατότητα της τάξης των 300m), και 0.5 g/m^3 για πυκνή ομίχλη (ορατότητα της τάξης των 50m). Οι μέγιστες τιμές για σύννεφα τα οποία δεν θα προκαλέσουν κατακρημνίσεις είναι συγκρίσιμες με αυτές της πυκνής ομίχλης. Παράλληλα το w της βροχής είναι 0.5 g/m^3 με ρυθμό βροχόπτωσης mm/h (όταν χρησιμοποιηθεί η κλασική εκθετική PSD των Marshall και Palmer (Marshall and Palmer, 1948)). Για την PSD των νεφών έχουν γίνει αρκετές μετρήσεις σε διάρκεια αρκετών χρόνων. Ως γενικό κανόνα τα σύννεφα αναπτύσσονται σε μολυσμένη ατμόσφαιρα η οποία αποτελείται από μεγαλύτερο αριθμό μικρών σωματιδίων τα οποία έχουν αναπτυχθεί σε κανονική ατμόσφαιρα (Hess et al., 1998). Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τιμές για τα r_c , α , γ , για έναν αριθμό από PSDs για σύννεφα νερού, μοντελοποιημένα σύμφωνα με την τροποποιημένη GAMMA κατανομή (Deirmedjian, 1969), (Tampieri and Tomasi, 1976), (Shettle, 1989), (Miles et al., 2000). Καθώς οι περισσότερες PSDs δόθηκαν σε κανονικοποιημένη μορφή το w παράχθηκε για ονομαστικό $N=100 \text{ particles/cm}^3$ το οποίο περιστασιακά παράγει αφύσικα μεγάλες τιμές του w . Η κλιμάκωση του N σε πραγματικές τιμές για την περιεκτικότητα υγρού νερού χρειάζεται όταν γίνεται προσπάθεια να υπολογιστεί η απόσβεση του σήματος από τις PSDs μέσω της φυσικής προσέγγισης που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.3. Τα μοντέλα του Shettle για τα σύννεφα (Πίνακας 2) είναι οι GAMMA κατανομές με τρεις παραμέτρους, το οποίες χρησιμοποιούνται χαμηλής ακρίβειας μοντέλο διάδοσης, LOWTRAN7 (Abreu and Anderson, 1996). Οι συγγραφείς (Tampieri and Tomasi, 1976) ομαδοποίησαν μια τεράστια βάση δεδομένων με εμπειρικά φάσματα μεγεθών σε ένα περιορισμένο αριθμό PSDs οι οποίες είναι αντιπροσωπευτικές για τους διάφορους τύπους της ομίχλης και των νεφών. Στον πίνακα φαίνονται 13 συνολικά κατανομές για τον τύπο σύννεφου Cu ($\alpha=1-8$, $\gamma = 0.48-11.75$, $r_c = 0.64-15.98 \mu\text{m}$). Τέλος, οι μέσες τιμές για τα δεδομένα για τα St σύννεφα τόσο πάνω από θάλασσα όσο και από στεριά παρουσιάζονται όπως κατηγοριοποιήθηκαν από τον (Miles et al., 2000). Αντίθετα, τα σύννεφα πάγου αποτελούνται από κρυστάλλους με διαφορετικές ιδιότητες (πχ σχήμα) ο καθένας και τις δικές μου μικροφυσικές ιδιότητες. Ως εκ τούτου, η ταυτοποίηση μίας μόνο

PSD για τα σύννεφα πάγου είναι ένα δύσκολο εγχείρημα. Δύο PSDs για αραιά cirrus και cirrus παρουσιάζεται στο paper του Shettle.

Όταν χρησιμοποιούνται τα δεδομένα από μια PSD, πρέπει δίνεται προσοχή κυρίως στην εσωτερική μεταβλητότητα των φαινομένων παρά στους περιορισμούς των μετρήσεων. Τα δεδομένα στον Πίνακα 2 είναι απόρροια του curve fitting για πειραματικά φάσματα μεγεθών στο χώρο και στον χρόνο και αναφέρονται στο μέσο όρο των περιπτώσεων. Το είδος του σύννεφου και το σχετικό φάσμα του μεγέθους του εξαρτώνται από το περιβάλλον και τις τοπικές συνθήκες. Επιπλέον οι ιδιότητες μπορεί να αλλάξουν χώρο μέσα στο σύννεφο, πχ απλό τη βάση μέχρι την κορυφή. Τέλος η μέση κατηγοριοποίηση των μετρήσεων τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο, δημιουργεί μια ποικιλία από παραμέτρους για τις PSDs. Για παράδειγμα, σημαντικές διαφορές έχουν παρατηρηθεί μεταξύ θαλάσσιων και επίγειων low-level stratus σύννεφων. Τα πρώτα παρουσιάζουν μικρό αριθμό συγκέντρωσης και μεγάλη μέση και ενεργή ακτίνα, ενώ τα δεύτερα το αντίθετο, εξαιτίας της μεγάλης συγκέντρωσης ατμοσφαιρικής συμπύκνωσης πυρήνων πάνω από τη στεριά. Παράλληλα, σύννεφα πάνω από τη στεριά παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία στο κάθετο προφίλ του αριθμού συγκέντρωσής τους (Miles et al., 2000). Οι συγγραφείς στο (Deng et al., 2009) έχουν ποσοτικοποιήσει τις μεταβολές των N , w , r_e για θερμά σύννεφα διαφόρων τύπων μέσω επιτόπιων μετρήσεων σε πολύ μολυσμένες περιοχές. Μεγάλες διαφοροποιήσεις στο N έχουν παρατηρηθεί για συγκεκριμένους τύπους σύννεφων. Τιμές που ξεπερνούν τα 1000 particles/cm³ παρατηρούνται στην περίπτωση των Cu σύννεφων, το w για τα Ns και τα As κυμαίνεται από 0.01 έως 0.1 g/m³, ενώ τα Cu παρουσιάζουν περισσότερες παραλλαγές, με πιο συχνή τιμή του w τα 0.1 g/m³. Η ενεργός ακτίνα παρουσιάζει ποικιλομορφία αντίστροφη αυτής του N . Τα Cu παρουσιάζουν τις χαμηλότερες τιμές (r_e μεταξύ 2.5 και 5 μm), ενώ τα As παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα σωματίδια (5-9 μm).

Πηγή	Cloud type	r_c (μm)	α	γ	w (g/m ³)	Σχόλια
Shettle (1989)	Cu	6	3	1	0.401	
	St	3.33	2	1	0.116	
	St/Sc	2.67	2	1	0.060	
	As	4.5	5	1	0.102	
	Ns	4.7	2	1	0.326	
Deirmendjian (1975)	C1 (Cu)	4.0	6	1	0.062	C6 είναι η ισχυρότερη μορφή νέφους κατακρημνίσεων και παρουσιάζει bimodal κατανομή
	C5 (Ns)	6.0	4	1	0.296	
	C6 (Ns)	20.0	1	1	25.083	
Tampieri and Tommasi (1976)	Cu(1)	0.64	3	0.48	0.141	
	Cu(2)	3.19	3	1.04	0.056	
	Cu(3)	3.53	8	2.15	0.230	
	Cu(4)	4.80	5	2.16	0.065	
	Cu(5)	5.28	3	1.07	0.243	
	Cu(6)	5.39	8	1.51	0.096	
	Cu(7)	6.92	5	6.6	0.132	
	Cu(8)	7.06	8	4.8	0.149	
	Cu(9)	7.72	2	2.39	0.356	
	Cu(10)	10.26	8	7.41	0.429	

	Cu(11)	10.40	4	2.34	0.675	
	Cu(12)	15.6	9	11.75	1.450	
	Cu(13)	15.98	2	3.97	2.085	
Miles et al. (2000)	St (Marine)	10.3	7.6	1	0.91	Μέσες τιμές από δεδομένα . $w=0.18 \text{ g m}^{-3}$ (marine) $w=0.19 \text{ g m}^{-3}$ (contin.).
	St (Contin.)	5.0	7.7	1	0.10	

Πίνακας 3-2. PSD παράμετροι r_c , α , και γ και περιεκτικότητα υγρού νερού w θεωρώντας συγκέντρωση σωματιδίων $N=100 \text{ particle/cm}^3$ για διάφορες κατηγορίες νεφών . Cu =cumulus, St=Stratus, St/Sc= Stratus/Stratocumulus, As=Altostratus, Ns=Nimbostratus.

3.3 Δείκτης Διάθλασης Υγρού Νερού και Πάγου

Ο δείκτης διάθλασης n ποσοτικοποιεί το αποτέλεσμα της χημικής σύστασης, της θερμοδυναμικής φάσης και της θερμοκρασίας των σταγόνων του σύννεφου στα ηλεκτρομαγνητικά και οπτικά χαρακτηριστικά τους. Το μοντέλο double-Debye (Manabe et al., 1987), παρέχει μια αναλυτική έκφραση για το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς του νερού, αντίστοιχα για συχνότητες πάνω από 300 GHz και θερμοκρασία από $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ έως $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$\varepsilon'(f) = \varepsilon_2 + \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{1 + (f/f_D)^2} + \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{1 + (f/f_S)^2} \quad (6)$$

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_D [1 + (f/f_D)^2]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_S [1 + (f/f_S)^2]} \quad (7)$$

Όπου

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = n^2$$

$$\varepsilon_0 = 77.67 + 103.3(\Theta - 1), \quad \varepsilon_1 = 5.48 \quad \text{and} \quad \varepsilon_2 = 3.51$$

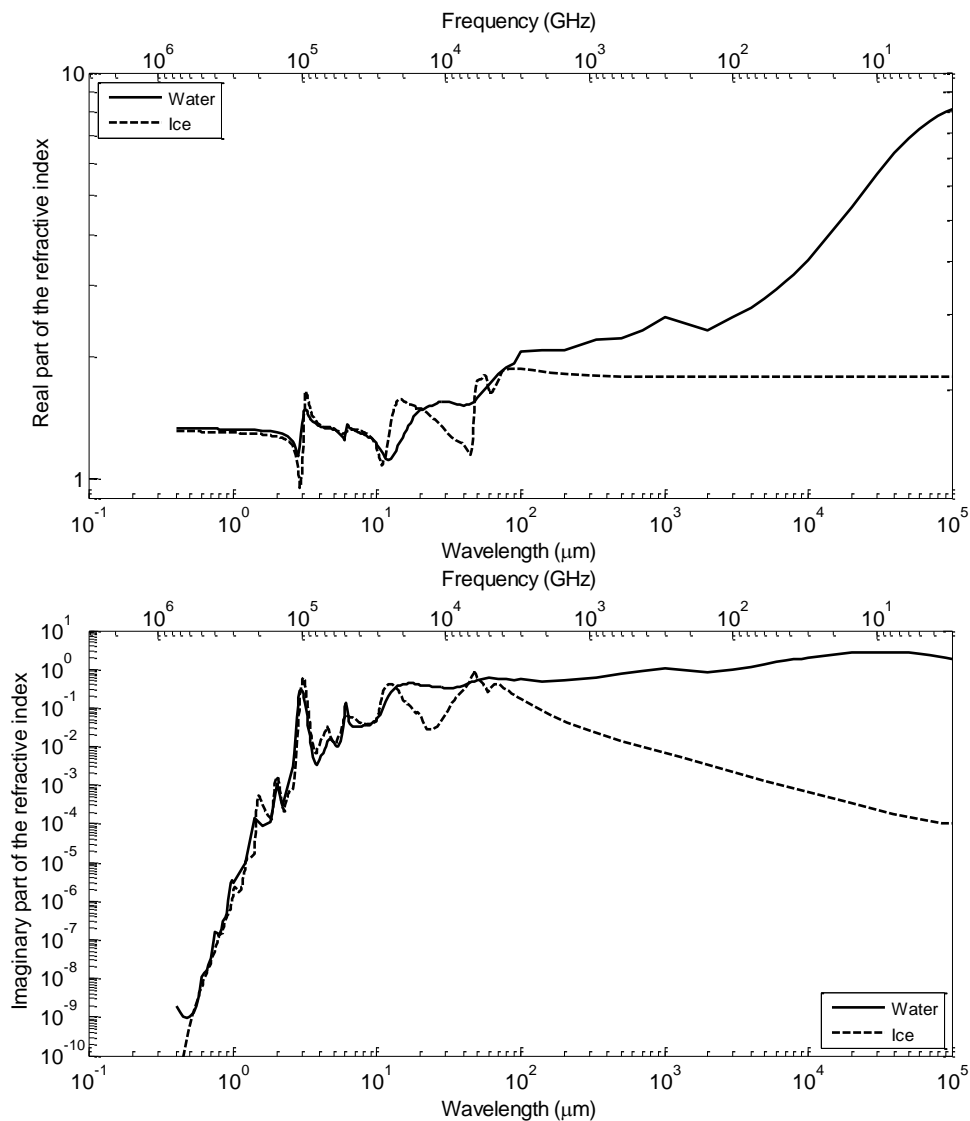
$$f_D = 20.09 - 142.4(\Theta - 1) + 294(\Theta - 1)^2 \quad \text{and} \quad f_S = 590 - 1500(\Theta - 1) \quad (\text{GHz})$$

$$\Theta = \frac{300}{T} \quad (\text{T σε Kelvin}).$$

Στο Σχήμα 2 φαίνονται το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς του υγρού νερού και του πάγου, από το ορατό φάσμα (400nm δηλ. 750THz) έως την μικροκυματική μπάντα (10cm δηλ. 3GHz). Όσο αφορά το liquid water, τα δεδομένα είναι αυτά που συνόψισαν οι Hale και Query (Hale and Query, 1973) και ο Deimendjian (Deimendjian, 1975), στο εύρος από 0.4-200 μm και από 0.2-1 mm, ενώ στη μικροκυματική μπάντα χρησιμοποιούνται οι παραπάνω εξισώσεις του Debye. Ο δείκτης διάθλασης έχει σχεδιαστεί για θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Όσο αφορά τον πάγο, η συλλογή δεδομένων περιλαμβάνει μετρήσεις από τη UV έως τη μικροκυματική μπάντα (Warren and Brandt, 2008) και για θερμοκρασίες κοντά στο σημείο τήξης ($-7 \text{ }^\circ\text{C}$).

Το πραγματικό μέρος του δείκτη διάθλασης για τον πάγο και το νερό είναι ίδιο από το ορατό φάσμα μέχρι και το τρίτο οπτικό παράθυρο (1550 nm) και ανεξάρτητο του μήκους

κύματος. Αντίθετα το φανταστικό μέρος, που είναι υπεύθυνο για την απορρόφηση, υφίσταται μεγάλες μεταβολές και αυξάνεται πάνω από 6 τάξεις μεγέθους από τα 400-20 nm.



Σχήμα 3.2

Πραγματικό και φανταστικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς του υγρού νερού (25°C) και του πάγου (-7°C).

3.4 Διάδοση Μέσα από Νέφη

Η κυματική απόσβεση μέσα από ένα πληθυσμό ατμοσφαιρικών σωματιδίων όπως τα σύννεφα ή οι κατακρημνίσεις, συνήθως υπολογίζεται ακολουθώντας μία από τις παρακάτω προσεγγίσεις:

- Φυσικά μοντέλα : είναι βασισμένα στις μικροφυσικές και ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των μεμονωμένων σωματιδίων. Αρχικά, λαμβάνεται υπ' όψιν η επίδραση

ενός μεμονωμένου σωματιδίου στην εισερχόμενη ακτινοβολία. Η διαδικασία γίνεται πιο πολύπλοκη αν συμπεριλάβουμε και φαινόμενα πολλαπλής σκέδασης (multiple-scattering). Οι μεμονωμένες αυτές συνεισφορές τελικά αθροίζονται για να βρεθεί το ποσό της ενέργειας που χάνεται από το εισερχόμενο κύμα.

- Εμπειρικά μοντέλα: είναι βασισμένα σε εμπειρικές σχέσεις οι οποίες συνδέουν την κυματική απόσβεση με ποσότητες που είναι εύκολο να υπολογιστούν όπως ο παράγοντας περιεκτικότητας υγρού νερού, liquid water content, στην περίπτωση των σύννεφων νερού, liquid water clouds, ή ο παράγοντας παγομένου νερού, ice water content, για την περίπτωση των cirri σύννεφων, ή ο ρυθμός βροχόπτωσης, στην περίπτωση των κατακρημνίσεων.

Τα φυσικά μοντέλα παρέχουν ακριβή αποτελέσματα, όμως απαιτούν δεδομένα όπως η PSD, τα οποία συνήθως είναι διαθέσιμα για ελάχιστες περιοχές. Αντίθετα τα εμπειρικά μοντέλα μπορεί να μην είναι τόσο ακριβή αλλά μπορούν να έχουν ευρεία εφαρμογή.

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των βασικών αρχών που μας επιτρέπουν να ποσοτικοποιήσουμε την αλληλεπίδραση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με ένα πληθυσμό από σωματίδια.

3.4.1 Αλληλεπίδραση Κύματος - Σωματιδίου

Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει πάνω σε ένα σωματίδιο, ένα μέρος από την προσπίπτουσα ενέργεια σκεδάζεται προς όλες τις κατευθύνσεις και ένα απορροφάται από το το σωματίδιο και εκλύεται ως θερμότητα. Συνολικά, μια συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας αφαιρείται από το εισερχόμενο κύμα. Ακολουθώντας το συλλογισμό του Van de Hulst, (Van de Hulst, 1957), η ροή ενέργειας που σκεδάζεται από ένα σωματίδιο μέσα σε μια απειροελάχιστη στερεά γωνία $d\Omega$ στη διεύθυνση (θ, ϕ) , είναι σταθερή και μπορεί να γραφτεί ως :

$$dP_{sca} = I r^2 d\Omega = \frac{I_0}{k^2} F(\theta, \phi) d\Omega \quad (8)$$

όπου I είναι η ένταση του σκεδαζόμενου κύματος (μειούμενη με το $1/r^2$), I_0 η ένταση που εισερχόμενου κύματος (για λόγους απλότητας θεωρούμε βαθμωτό επίπεδο κύμα), r η απόσταση από το σωματίδιο, k η σταθερά διάδοσης στο μέσο που περιβάλλει το σωματίδιο (π. χ. αέρας), και $F(\theta, \phi)$ είναι μια αδιάστατη συνάρτηση που περιγράφει τη γωνιακή κατανομή της σκεδαζόμενης έντασης. Σημειώνεται ότι ενώ η ενέργεια του εισερχόμενου κύματος μεταφέρεται κατά μήκος παραλλήλων ακτίνων, το σφαιρικό σκεδαζόμενο κύμα ακτινοβολεί υπό ακτινωτή μορφή (diverging pencil of rays). Ολοκληρώνοντας την (8) σε μια σφαιρική επιφάνεια A με ακτίνα r , παίρνουμε τη συνολική ροή ενέργειας σε όλες τις κατευθύνσεις :

$$P_{sca} = \oint_A I dA = \frac{I_0}{k^2} \int_{4\pi} F(\theta, \phi) d\Omega \quad (9)$$

Από τη σχέση (9) απορρέει ότι η αναλογία μεταξύ του dP_{scat} και του I_0 έχει τις διαστάσεις ενός διαφορικού χώρου:

$$d\sigma_{sca} = \frac{I r^2 d\Omega}{I_0} = \frac{1}{k^2} F(\vartheta, \varphi) d\Omega \quad (10)$$

Όμοια ως ορίσουμε ένα χώρο σ_{scat} έτσι ώστε η συνολική ροή ενέργειας P_{scat} να σκεδάζεται όμοια σε όλες τις διευθύνσεις ανάλογα με την ένταση του εισερχόμενου κύματος πολλαπλασιασμένο με το σ_{scat} δηλαδή:

$$P_{sca} = \sigma_{sca} I_0 \quad (11)$$

Από την (9) και την (11) καταλήγουμε ότι :

$$\sigma_{sca} = \frac{1}{k^2} \int_{4\pi} F(\vartheta, \varphi) d\Omega \quad (12)$$

Με τον ίδιο τρόπο αν το εισερχόμενο κύμα απορροφάται από το σωματίδιο, ορίζουμε ένα χώρο σ_{abs} τέτοιο ώστε

$$P_{abs} = \sigma_{abs} I_0 \quad (13)$$

Τελικά, αν το P_{ext} αντιστοιχεί στο ποσό της ροής ενέργειας που απωλέσθηκε από το εισερχόμενο κύμα, τότε:

$$P_{ext} = \sigma_{ext} I_0 \quad (14)$$

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας απαιτεί ότι

$$\sigma_{ext} = \sigma_{sca} + \sigma_{abs} \quad (15)$$

τα σ_{scat} , σ_{abs} , και σ_{ext} ονομάζονται διατομή σκέδασης (scattering cross section), διατομή απορρόφησης (absorption cross section) και διατομή απόσβεσης (extinction cross section), αντίστοιχα.

Αν οι τα σ_{ext} και I_0 είναι γνωστά, η ροή ενέργειας που αφαιρέθηκε από το κύμα είναι υπολογίσιμη.

Γενικά, το σ_{ext} εξαρτάται από το μήκος κύματος και την πόλωση του προσπίπτοντος κύματος, από το μέγεθος, σχήμα και χημική σύνθεση του σωματιδίου και από τον προσανατολισμό του σε σχέση με αυτόν του προσπίπτοντος κύματος.

3.4.2 Διάδοση μέσα από ένα Στρώμα Σωματιδίων

Εδώ θα μελετήσουμε την επίδραση που έχει στο κύμα ένας πληθυσμός σωματιδίων με διαφορετικό μήκος και ταυτόσημες οπτικές ιδιότητες, που είναι ομοιογενώς κατανομημένα στο χώρο. Αν τα σωματίδια λειτουργούν σαν αυτόνομοι σκεδαστές, σ_{scat} , σ_{abs} , και σ_{ext} μπορούν να αντικατασταθούν από την αντίστοιχη διατομή ανά μονάδα όγκου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του extinction :

$$\beta_{ext} = \int_{r_1}^{r_2} \sigma_{ext}(r) n(r) dr \quad (16)$$

όπου $n(r)$ είναι η PSD. Το β_{ext} συνήθως αναφέρεται ως συντελεστής όγκου απόσβεσης volume extinction, και εκφράζεται σε Nr/km . Γενικά το r είναι ένα κύριο μέγεθος εξαρτώμενο από το σχήμα του σωματιδίου. Στην περίπτωση των σταγόνων των σύννεφων νερού που προσεγγίζονται σε ικανοποιητικό βαθμό με σφαίρες, το r είναι η ακτίνα τους.

Επιπλέον, μέσω της θεωρίας Mie, Mie theory, παρέχεται μια έκφραση σε κλειστή μορφή για τον υπολογισμό του σ_{ext} στην περίπτωση ομοιογενών σφαιρών σε ένα αυθαίρετο μήκος κύματος (Deirmedjian , 1969).

Μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε την απόσβεση ενός οδεύοντος κύματος χρησιμοποιώντας τον ενεργειακό ορισμό του extinction cross section. Ας θεωρήσουμε ένα επίπεδο κύμα να διαδίδεται κατά μήκος του άξονα z και εισέρχεται σε μια πλάκα μήκους L κατα μήκος του άξονα z, ομοιόμορφα γεμισμένη με σκεδαστές των οποίων η κατανομή του μεγέθους τους περιγράφεται από το $n(r)$. Καθώς το προσπίπτον κύμα ταξιδεύει μέσα από ένα απειροελάχιστο στρώμα πλάτους dz η αντίστοιχη μείωση της ενεργειακής ροής (υποθέτοντας μια ενιαία διατομή, cross section) είναι

$$dI = - \left[\int_{r_1}^{r_2} \sigma_{ext}(r) n(r) dr \right] I(z) dz \quad (17)$$

Λοιπόν, η ροή ενέργειας μετά από μία απόσταση διάδοσης z είναι :

$$I(z) = I_0 \exp \left\{ - \left[\int_{r_1}^{r_2} \sigma_{ext}(r) n(r) dr \right] z \right\} = I_0 \exp(-\beta_{ext} z) \quad (18)$$

όπου I_0 είναι η ροή ενέργειας για $z=0$. Η εξίσωση (18) είναι γνωστή ως νόμος των Beer-Lambert, όταν υπολογίζεται για $z=L$, επιστρέφει τη ροή ενέργειας του εξερχόμενου κύματος. Το ποσό της ενέργειας που χάνεται λοιπόν, είναι

$$\tau(z) = \frac{I(z)}{I_0} = \exp(-\beta_{ext} z) \quad (19)$$

και ονομάζεται διαπερατότητα. Η παραπάνω ποσότητα, στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, συνήθως μετριέται σε dB, και ονομάζεται κυματική απόσβεση, wave attenuation, A,

$$A(\lambda) = \beta_{ext}(\lambda) L \quad (\text{dB}) \quad (20)$$

όπου το L μετριέται σε km και το β_{ext} εκφράζεται σε dB/km, και συχνά αποκαλείται ειδική απόσβεση, specific attenuation, και η εξάρτηση από το μήκος κύματος γίνεται σαφής. Τέλος, χρησιμοποιώντας φυσικές μονάδες στην περίπτωση των νεφών νερού, η (17) μπορεί να γραφεί ως :

$$\beta_{ext}(\lambda) = 4.343 \times 10^3 \int_{r_1}^{r_2} \sigma_{ext}(r, \lambda) n(r) dr \quad (\text{dB/km}) \quad (21)$$

όπου το β_{ext} εκφράζεται σε dB/km το $\sigma_{ext}(r, \lambda)$ σε μm^2 , το $n(r)$ είναι σε $\mu\text{m}^{-1} \text{ cm}^{-3}$, και το r σε μm .

Υπάρχουν δύο θεμελιώδεις παραδοχές πίσω από την παραπάνω λογική:

- Ανεξάρτητη σκέδαση: η κυματική σκέδαση από ένα δεδομένο σωματίδιο είναι ανεξάρτητη από τα άλλα σωματίδια. Αυτή η παραδοχή έχει ως δεδομένο ότι τα σωματίδια είναι αρκετά μακριά το ένα από το άλλο (σε σχέση με το μέγεθός τους). Αν η σχετική θέση των σωματιδίων αλλάζει τυχαία, ο όρος ανεξάρτητη σκέδαση δηλώνει ότι οι επιμέρους συνεισφορές μπορούν να προστεθούν σε ένταση και όχι σε πλάτος και φάση.
- Τα αποτελέσματα της πολλαπλής σκέδασης είναι αμελητέα. Η βασική αρχή της πολλαπλής σκέδασης είναι ότι το κύμα που προσπίπτει πάνω σε ένα σωματίδιο είναι ήδη εξασθενημένο από τη σκέδαση και την απορρόφηση πάνω σε άλλα σωματίδια, και το σωματίδιο διεγείρεται και αυτό από τα διάσπαρτα κύματα. Όταν

αυτές οι διαδικασίες είναι αμελητέες, η ηλεκτρομαγνητική προσπίπτουσα ακτινοβολία σε κάθε σωματίδιο είναι το αρχικό κύμα (αν και εξασθενημένο). Ως εκ τούτου, με την υπέρθεση των επιπτώσεων, η συνολική ενέργεια που αφαιρείται από το εισερχόμενο κύμα εξαιτίας ενός νέφους σωματιδίων είναι το άθροισμα αυτής που αφαιρέθηκε από τα μεμονωμένα σωματίδια.

Η μέγιστη συγκέντρωση σωματιδίων σε πολύ πυκνά νέφη φτάνει τα 1000 ανά cm^3 , πράγμα που σημαίνει ότι η μεταξύ τους απόσταση, είναι της τάξεως του 50 φορές το μέγεθός τους (υποθέτοντας ακτίνα σωματιδίου 10 μm), έτσι η παραδοχή της ανεξάρτητης σκέδασης ικανοποιείται. Επιπλέον, τα σωματίδια στην ατμόσφαιρα ανασχηματίζονται συνέχεια, εξαιτίας της επίδρασης της δύναμης της βαρύτητας, του ανέμου και των στροβιλισμών, που οδηγεί σε τυχαία φάση μεταξύ των σκεδασμένων κυμάτων.

Μια εξήγηση των αποτελεσμάτων της πολλαπλής σκέδασης προέρχεται από τη κβαντική θεωρία του φωτός. Όταν ένα φωτόνιο συγκρούεται με ένα σωματίδιο αυτό είτε σκεδάζεται με πιθανότητα ίση με το λόγο $\sigma_{\text{scat}}/\sigma_{\text{ext}}$, ή απορροφάται με πιθανότητα $\sigma_{\text{abs}}/\sigma_{\text{ext}}$. Η κατεύθυνση ενός σκεδαζόμενου φωτονίου εξαρτάται από τη συνάρτηση σκέδασης της φάσης του σωματιδίου. Στην παραδοχή της ανεξάρτητης σκέδασης, τα φωτόνια που αλληλεπιδρούν με ένα σωματίδιο θεωρούνται χαμένα. Όταν λαμβάνονται υπ' όψιν οι πρώτοι όροι πολλαπλής σκέδασης, τα φωτόνια που σκεδάζονται από ένα σωματίδιο, συλλέγονται από τον δέκτη αν η διεύθυνση σκέδασης είναι στη γωνία λειτουργίας του δέκτη. Η υψηλότερης τάξης σκέδαση περιλαμβάνει φωτόνια σκεδασμένα αρκετές φορές πριν τελικά φτάσουν στο δέκτη. Αν ένα σκεδαζόμενο φωτόνιο δε διαδίδεται στην ίδια διεύθυνση με το αρχικό κύμα (forward scattering, ευθεία σκέδαση), παρουσιάζει καθυστέρηση διάδοσης σε σχέση με τα μη σκεδαζόμενα φωτόνια, και λοιπόν μπορεί να θεωρηθεί ως επιπλέον θόρυβος. Συνοψίζοντας τα φωτόνια που σκεδάζονται ευθεία, forward scattered, μειώνουν της απόσβεση ενώ όλα τα άλλα σκεδαζόμενα φωτόνια χειροτερεύουν το SNR. Το αντίκτυπο της πολλαπλής σκέδασης εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες :

- Μήκος κύματος
- Χαρακτηριστικά προσπίπτοντος κύματος
- Albedo και συνάρτηση σκέδασης φάσης ενός σωματιδίου
- Συγκέντρωση σωματιδίων
- Μήκος διαδρομής
- Κέρδος κεραίας δέκτη, και όσο αφορά τα οπτικά και μέγεθος και και οπτικό πεδίο του ανοίγματος του δέκτη

Η παραδοχή για μεμονωμένη σκέδαση είναι αποδεκτή αν περίπου $\tau < 1$ (Ishimaru, 1978), το οποίο είναι λογικό στα μικροκύματα, καθώς η απόσβεση είναι μόνο μερικά dB/km. Στα οπτικά, η ακτίνα του laser διαδίδεται μόνο μέσα από αραιά νέφη με μικρή περιεκτικότητα σε νερό (water content). Σε αυτές τις περιπτώσεις, η γεωμετρία της ζεύξης και το πολύ στενό οπτικό πεδίο του δέκτη, της τάξης του 1 mrad ή και λιγότερο, περιορίζουν το αντίκτυπο της πολλαπλής σκέδασης.

Η πλήρης μέθοδος Mie για τον υπολογισμό του σ_{ext} δεν παρατίθεται εδώ αλλά λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν στο (Deirmedjian, 1969). Εδώ απλά τονίζουμε ότι για τον υπολογισμό του σ_{ext} απαιτείται ο υπολογισμός μιας άπειρης σειράς. Πρακτικά, ο αριθμός των όρων που πρέπει να προστεθεί ώστε να έχουμε σύγκλιση της σειράς είναι περίπου ανάλογος του μεγέθους της παραμέτρου, kr. Οι αριθμητικοί υπολογισμοί είναι

χρονοβόροι και απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ, ειδικά εάν η διαδικασία πρέπει να επαναληφθεί για ένα ευρύ αριθμό από μεγέθη σωματιδίων, και δεν είναι σαφές από τη βιβλιογραφία ότι έχει λυθεί το παρών ζήτημα (Wiscombe, 1979), (Wiscombe, 1980), (Du, 2004). Δωρεάν κώδικας για τον υπολογισμό της σκέδασης είναι διαθέσιμος στο διαδίκτυο καθώς και στο (ScattPort, 2014). Εάν το μέγεθος των σωματιδίων είναι αρκετά μεγαλύτερο ή μικρότερο από το μήκος κύματος, τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μερικές προσεγγίσεις που θα παρουσιαστούν παρακάτω.

3.4.2.1 Rayleigh Προσέγγιση

Η Rayleigh προσέγγιση εφαρμόζεται σε σωματίδια με τυχαίο δείκτη διάθλασης n και με διαστάσεις πολύ μικρότερες από το μήκος κύματος, πχ για σφαίρα $kr \ll 1$. Βάσει αυτού, το σωματίδιο διεγείρεται από ένα ομοιόμορφο προσπίπτων ηλεκτρικό πεδίο. Παράλληλα, η Rayleigh σκέδαση προϋποθέτει ότι το πεδίο πόλωσης θα έχει εμφανιστεί σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα συγκρινόμενο με την περίοδο του κύματος, πράγμα που θέτει την πρόσθετη συνθήκη δηλαδή ότι $|nkr| \ll 1$. Σε αυτή την περίπτωση, $\sigma_{ext}(r, \lambda)$ ακολουθεί την παρακάτω έκφραση που προέρχεται από τη θεωρία για Rayleigh (McCartney, 1976):

$$\sigma_{ext} = \sigma_{abs} + \sigma_{sca} = \frac{8\pi^2 r^3}{\lambda} \operatorname{Im} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) + \frac{128}{3} \frac{\pi^5 r^6}{\lambda^4} \left| \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right|^2 \quad (22)$$

Επιπλέον, αν η απορρόφηση υπερέχει της σκέδασης, όπως στην περίπτωση του suspended liquid water στην μικροκυματική περιοχή, έχουμε

$$\sigma_{ext} \approx \sigma_{abs} = \frac{8\pi^2 r^3}{\lambda} \operatorname{Im} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) \quad (23)$$

Καθώς το σ_{ext} είναι ανάλογο του όγκου του σωματιδίου, αντικαθιστώντας την σχέση (23) στην (21) καταλήγουμε ότι ο συντελεστής απόσβεσης είναι ανάλογος της περιεκτικότητας υγρού νερού, liquid water content, w :

$$\beta_{ext} = \frac{0.0819}{\rho_w \lambda} \operatorname{Im} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) w \quad (\text{dB/km}) \quad (24)$$

όπου το ρ_w είναι η πυκνότητα του υγρού νερού σε g/cm^3 , το λ σε m και το w σε g/m^3 . Σύμφωνα με το (Ulabi et al., 1981), η παραπάνω εξίσωση ισχύει για ακτίνα σταγόνας μικρότερη από 100μm και για συχνότητες κάτω των 100GHz. Συγκρίνοντας την ειδική απόσβεση, specific attenuation, σε (dB/km) που παράγεται με χρήση της θεωρία Mie, σε σχέση με αυτή από τον τύπο (24) για τους τύπους νεφών από τον Πίνακα 2, το σχετικό σφάλμα είναι γύρω στο 1% για 100 GHz σε όλες τις περιπτώσεις νεφών εκτός από τα C6 (μία ανώτερη μορφή σε νέφος κατακρημνίσεων), και παραμένει κάτω από το 4% για συχνότητες μέχρι 300GHz. Συνεπώς, η εξίσωση (24) μπορεί να εφαρμοστεί με ασφάλεια για τον υπολογισμό της απόσβεσης λόγω νεφών στις μικροκυματικές συχνότητες.

3.4.2.2 Οπτική Προσέγγιση

Η γεωμετρική οπτική αναπαράσταση του φωτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λύση του προβλήματος της σκέδασης του φωτός από σωματίδια το μέγεθος των οποίων είναι αρκετά μεγαλύτερο από το μήκος κύματος λ . Σε αυτή την περίπτωση, οι ακτίνες πρέπει να κατηγοριοποιηθούν σε δύο ομάδες ανάλογα με τον τρόπο που παράγονται:

- Ανάκλαση και διάθλαση των ακτίνων που χτυπούν στην επιφάνεια του σωματιδίου. Μέρος της ενέργειας που μεταφέρεται από αυτές τις ακτίνες απορροφάται από το σωματίδιο και ένα μέρος αποβάλλεται με απευθείας διάθλαση από την επιφάνεια του, ή μετά από μία ή περισσότερες εσωτερικές ανακλάσεις και σχηματίζει ένα μοτίβο σκεδαζόμενου φωτός με μία συγκεκριμένη γωνιακή κατανομή.
- Περίθλαση του ημιτελούς μετώπου του κύματος που σχηματίζεται από τις ακτίνες που διέρχονται κατά μήκος του σωματιδίου. Το περιθλώμενο φως, ακολουθεί μια συγκεκριμένη κατανομή έντασης, η οποία σε επαρκώς μεγάλη απόσταση, ακολουθεί το μοντέλο περίθλασης Fraunhofer.

Μια σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο παραπάνω διαδικασιών είναι ότι το περιθλώμενο φως εξαρτάται από το σχήμα και το μέγεθος του σώματος αλλά είναι ανεξάρτητο από τη φύση του. Επιπρόσθετα, η περίθλαση δεν αλλάζει την πόλωση, και το περιθλώμενο μοτίβο παραμένει ίδιο ανεξάρτητα από την πόλωση που προσπίπτοντος κύματος.

Αν το μέγεθος του σωματιδίου είναι αρκετά μεγαλύτερο από το μήκος κύματος του προσπίπτοντος κύματος, η διατομή απόσβεσης, extinction cross section, προσεγγίζει το διπλάσιο της γεωμετρικής διατομής των σωματιδίων (Van de Hulst, 1957):

$$\sigma_{ext} = 2\pi r^2 \quad (25)$$

Τα αποτελέσματα αυτά αποδεικνύονται μέσα από ενεργειακά επιχειρήματα, δεδομένου ότι η σφαίρα κυρίως απορροφά την ενέργεια του κύματος. Στην πραγματικότητα, με τη χρήση της αρχής του Babinet (Born and Wolff, 1999), το μοτίβο της περίθλασης είναι ίδιο (όσο αφορά την ένταση), καθώς παράγεται με αντικατάσταση του σωματιδίου με μια άπειρη μαύρη οθόνη κάθετη στην εισερχόμενη ακτινοβολία με μία σπή της ίδιας γεωμετρικής διατομής όπως το σωματίδιο. Ως εκ τούτου, η ροή ενέργειας που χάνεται λόγω της περίθλασης στο σωματίδιο, ισούται με αυτή που χάνεται εξαιτίας της σκέδασης και της απορρόφησης.

Ως συνέπεια, ο συντελεστής απόσβεσης μπορεί να γραφεί ως :

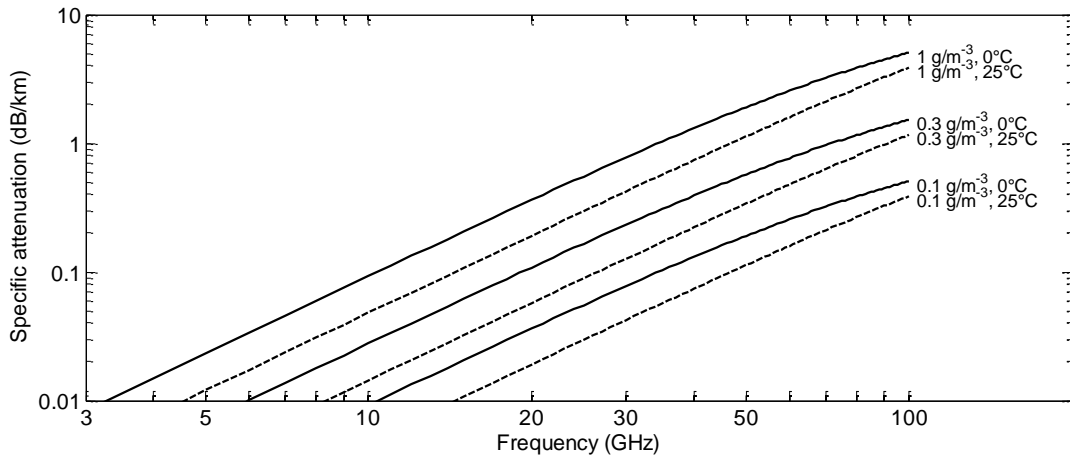
$$\beta_{ext} = 6.51 \times 10^3 \frac{LWC}{\rho r_e} \quad (\text{dB/km}) \quad (26)$$

όπου w είναι σε g/m^3 , το ρ σε g/cm^3 και r_e σε μm . Νέφη, με μέτρια περιεκτικότητα υγρού νερού, $w = 0.1 \text{g/m}^3$ και $5 \mu\text{m}$ ενεργή ακτίνα, δημιουργούν ειδική απόσβεση της τάξης των 100dB/km στο ορατό φάσμα. Σημειώνεται ότι α) για ένα δεδομένο w , το β_{ext} είναι αντιστρόφως ανάλογο του r_e και β) μόνο δύο ανεξάρτητες παράμετροι χρειάζεται να είναι γνωστές για να υπολογιστεί το β_{ext} στα όρια των οπτικών συχνοτήτων, (όπου δεν είναι αναγκαία η γνώση των πλήρη μικροφυσικών λεπτομερειών όπως η PSD).

Η εξίσωση (26) αποτελεί μια αποδεκτή προσέγγιση για το σ_{ext} των σταγόνων των νεφών στο οπτικό φάσμα πάνω από το πρώτο και το τρίτο οπτικό παράθυρο. Για μεγαλύτερα IR μήκη κύματος, πρέπει να χρησιμοποιηθεί η γενική έκφραση (21) και η θεωρία Mie.

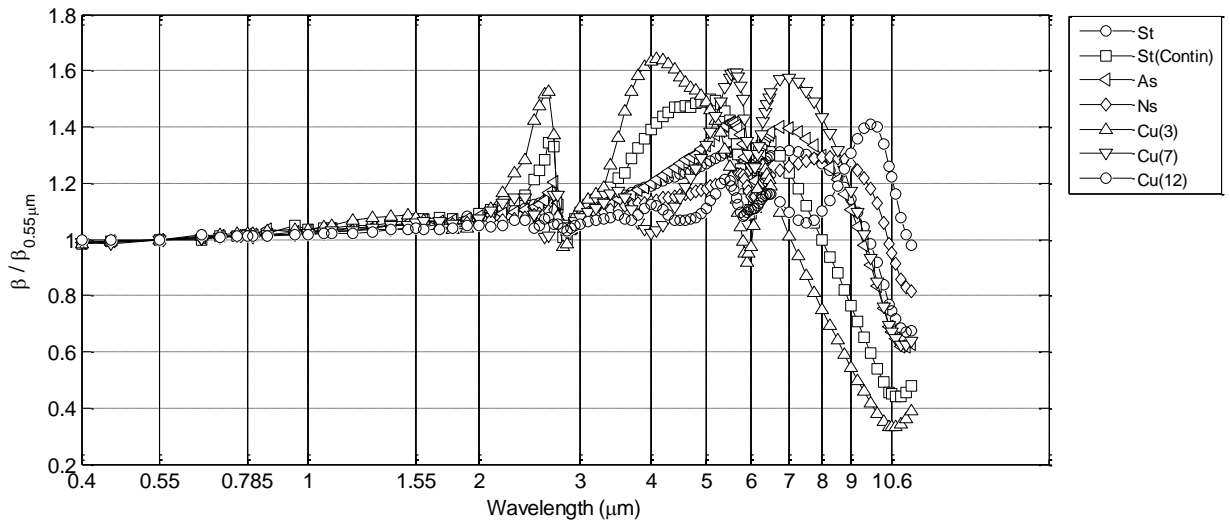
3.4.3 Απόσβεση Εξαιτίας Νεφών

Στη μικροκυματική μπάντα, η ειδική απόσβεση εξαιτίας των νεφών μπορεί να εκτιμηθεί από την εξίσωση (24). στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται το β_{ext} σε σχέση με τη συχνότητα από τα 3-100 GHz με τον παράγοντα περιεκτικότητας υγρού νερού, w , σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες (0 °C και 25 °C).



Σχήμα 3.3.Ειδική απόσβεση συναρτήσει της συχνότητας για διάφορους τύπους νεφών

Αντίθετα στην περίπτωση των οπτικών, οι μικροφυσικές ιδιότητες πρέπει να ληφθούν υπόψη. Μια πρώτη ιδέα για την εξάρτηση του β_{ext} από το λ και τη PSD, στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η αναλογία του $\beta_{\text{ext}}(\lambda)$ και του β_{ext} στα 0.550 μm (δηλαδή παίρνεται ως αναφορά το μέσο του οπτικού παραθύρου, visible window), για μια μεγάλη γκάμα από μήκη κύματος περιλαμβάνοντας και αυτά που είναι κατάλληλα για FSO για διάφορα είδη νεφών από τον Πίνακα 2. Το β_{ext} είναι ανεξάρτητο, τόσο από το λ όσο και από την PSD, για μήκη κύματος περίπου μέχρι το 1 μm . Το β_{ext} στα 1.550 μm είναι συνήθως λίγο μεγαλύτερο από αυτό στα 0.850 μm και αυτό στα 0.550 μm . Οι διαφορές αυτές είναι περίπου στο 10% για όλες τις PSD. Αντιθέτως, μεγάλες διαφορές παρουσιάζονται όταν συγκρίνουμε μήκη κύματος του ορατού φάσματος. Για παράδειγμα, η μείωση στα 10.6 μm πηγαίνει από το 20% στο 45% για τις 6 από τις 13 περιπτώσεις. Οι PSD με μικρά σωματίδια παρουσιάζουν υψηλότερο κέρδος μετάδοσης, transmission gain, στα 10.6 μm . Με επανακλιμάκωση κάθε PSD με τη σωστή τιμή για τη περιεκτικότητα υγρού νερού, liquid water content w , και τη συγκέντρωση σωματιδίων παίρνουμε μία εκτίμηση για την οπτική απόσβεση για τους διάφορους τύπους νεφών.



Σχήμα 3.4 Κανονικοποιημένος συντελεστής απόσβεσης σε σχέση με το μήκος κύματος για διάφορους τύπους νεφών.

Για αυτό τον σκοπό έχει δοθεί ένα άνω και ένα κάτω όριο για την περιεκτικότητα υγρού νερού, όπως υπολογίστηκαν από σειρά μετρήσεων (Squires, 1958), (Durbin, 1959), (Zuen, 1970), (Deng et al., 2009), (Miles et al., 2000). Στον Πίνακα 3 περιέχονται οι μη κανονικοποιημένες PSD που αποτελούν ένα υποσύνολο αυτών του Πίνακα 2 με τις ίδιες χαρακτηριστικές παραμέτρους και ως εκ' τούτου με παρόμοιες τιμές για την απόσβεση. Η μέγιστη συγκέντρωση σωματιδίων έχει περιοριστεί στα 1000 σωματίδια/cm³ (δηλαδή η μεγαλύτερη συγκέντρωση που έχει παρατηρηθεί στη βιβλιογραφία) όταν η περιεκτικότητα σε υγρό νερό για μία συγκεκριμένη PSD παίρνει μη αποδεκτά μεγάλες τιμές, όπως στις περιπτώσεις των C1 και Cu(3) στον Πίνακα 3.

Όσο αφορά τα σωματίδια πάγου είναι εύλογο να υποστηρίξουμε ότι ο παράγοντας απόσβεσης είναι αμελητέος στις μικροκυματικές συχνότητες λόγω τις μικρής συγκέντρωσης των σωματιδίων πάγου. Στην περίπτωση των οπτικών, η ειδική εξασθένιση δεν είναι αμελητέα ακόμα και για μικρές συγκεντρώσεις μορίων. Ο υπολογισμός του παράγοντα απόσβεσης από τον τύπο (21) είναι περίπλοκος καθώς παρατηρούνται διάφορα μεγέθη κρυστάλλων στα νέφη πάγου. Παρά την ποικιλία των κρυστάλλων ο (Platt,1997) έδειξε ότι στα οπτικά, η ειδική απόσβεση εξαιτίας των νεφών πάγου μπορεί να υπολογιστεί με χρήση της περιεκτικότητας παγωμένου νερού, ice water content, w_i απο την παρακάτω σχέση:

$$\beta_{ext} = 40.26w_i^{0.68} \quad (\text{dB/km}) \quad (27)$$

όπου το w_i εκφράζεται σε g/m³.

Είδος Νεφών	r_c μm	α	γ	N (cm ⁻³)	w (g/m ³)	93 GHz	0.550 μm	10.6 μm
Cu	6	3	1	10-210	0.03-0.86	0.1-4.0	17-487	17-479
St	3.33	2	1	10-220	0.01-0.26	0-1.2	8-215	6-160
St/StCu	2.67	2	1	20-750	0.01-0.45	0-2.1	10-468	6-283
As	4.5	5	1	10-100	0.01-0.1	0-0.5	10-96	6-64.
Ns	4.7	2	1	3-30	0.01-0.1	0-0.5	6-58	6-55

C1 (Cu)	4.0	6	1	50-1000	0.03-0.62	0.1-2.9	35-723	19-398
Cu(3)	3.53	8	2.15	130-1000	0.03-0.23	0.1-1.1	53-407	18-135
Cu(5)	5.28	3	1.07	10-350	0.03-0.86	0.1-4.0	20-585	18-517
Cu(7)	6.92	5	6.6	20-650	0.03-0.86	0.1-4.0	29-844	20-567
Cu(10)	10.26	8	7.41	10-200	0.03-0.86	0.1-4.0	20-570	19-554
Cu(11)	10.40	4	2.34	5-130	0.03-0.86	0.1-4.0	16-459	17-496
Cu(12)	15.6	9	11.75	2-60	0.03-0.86	0.1-4.0	13-377	16-460
St(contin)	3.63	7.7	1	30-660	0.01-0.26	0.1-4.0	13.9-361.1	6.3-162.9

Πίνακας 3-3 Παράμετροι PSD, άνω και κάτω όρια για τη συγκέντρωση των σωματιδίων και την περιεκτικότητα σε υγρό νερό και τον αντίστοιχο συντελεστή απόσβεσης στην W-μπάντα, και για τα δύο οπτικά μήκη κύματος για διάφορους τύπους νεφών. Cu =cumulus, St=Stratus, St/Sc= Stratus/Stratocumulus, As=Altostratus, Ns=Nimbostratus.

3.5 Μοντέλα Πρόβλεψης Απόσβεσης Εξαιτίας Νεφών

Η αξιολόγηση της επίδρασης των νεφών στις ασύρματες επικοινωνίες, (στην μικροκυματική μπάντα, ή σε οπτικά μήκη κύματος) αποτελείται κυρίως από την πρόβλεψη των μακροπρόθεσμων στατιστικών, long-term statistics, της απόσβεσης λόγω νεφών για τη πλήρη ζεύξη Γης - Διαστήματος, σύμφωνα με την οποία υπολογίζεται το περιθώριο ισχύος για να αντιμετωπισθούν τέτοιες εξασθενήσεις, για δεδομένη διαθεσιμότητα συστήματος. Ως αποτέλεσμα, τα μοντέλα πρόβλεψης της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών πρέπει να συνδυάζουν τις εκφράσεις που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα για τον υπολογισμό της ειδικής απόσβεσης και βασίζονται στις μικροφυσικές ιδιότητες των σωμάτων των νεφών με πρόσθετες εισόδους και μεθοδολογίες που αφορούν ειδικότερα την συχνότητα εμφάνισης των νεφών στην περιοχή ενδιαφέροντος, (όπως και τη συνολική τους περιεκτικότητα σε νερό), που είναι προφανώς στενά συνδεδεμένα με τη μετεωρολογία. Πράγματι, όπως φαίνεται και από την Σχήμα 1, η κάλυψη των νεφών ποικίλει από σημείο σε σημείο και έτσι το ίδιο συμβαίνει και στη συνολική επίδραση των νεφών στο συστήματα επικοινωνιών.

Παρακάτω παρατίθενται μερικά μοντέλα που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για τον υπολογισμό της εξασθένισης εξαιτίας των νεφών. Στην επισκόπηση που ακολουθεί έχουν επιλεγεί τα μοντέλα που δεν παρουσιάζουν απλά μια σχέση μεταξύ της ειδικής απόσβεσης και της περιεκτικότητας σε υγρό νερό, αλλά χρησιμοποιούν και μετεωρολογικά δεδομένα για να προβλέψουν τα στατιστικά της ετήσιας απόσβεσης λόγω νεφών (τυπικά τη complementary cumulative distribution function – CCDF). Τα μοντέλα έχουν κατηγοριοποιηθεί ανάλογα με το πόσο σύνθετα είναι, ξεκινώντας από τις semi-empirical μεθοδολογίες που δέχονται ως είσοδο τοπικές μετρήσεις όπως θερμοκρασία εδάφους και συγκέντρωση υδρατμών, water vapor concentration, και καταλήγοντας σε πιο περίπλοκα που αξιοποιούν παγκόσμιους χάρτες κάλυψης νεφών και περιεκτικότητας νερού.

3.5.1 Dientelmann and Ortgies Model

Ένα από τα πρώτα μοντέλα που παρουσιάστηκαν, με στόχο την πρόβλεψη της απόσβεσης λόγω των νεφών, είναι αυτό των Dintelmann και Ortgies in (Dintelmann and Ortgies, 1989). Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε φυσικές έννοιες σχετικά με τον σχηματισμό των νεφών όπως η συμπύκνωση υδρατμών αλλά περιλαμβάνει και μια εμπειρική συνιστώσα για την κάθετη επέκταση των νεφών.

Η βασική ιδέα του μοντέλου είναι ότι τα νέφη προέρχονται από τη συμπύκνωση των υδρατμών, η οποία λαμβάνει χώρα όταν η συμπύκνωση των υδρατμών σε ένα ύψος h , $\rho(h)$, υπερβαίνει την πυκνότητα κορεσμού ρ_s . Επιπλέον, στο μοντέλο γίνεται η υπόθεση ότι το $\rho(H)$ μπορεί να παραχθεί από μετεωρολογικές μετρήσεις εδάφους, και η βάση των νεφών βρίσκεται περίπου στους 0°C ισοθερμικού ύψους H η οποία σύμφωνα με (Ito,1989), σχετίζεται με θερμοκρασία εδάφους T_0 σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο (H σε km, T_0 σε K):

$$H = 0.89 + 0.165(T_0 - 273) \quad (27)$$

Η πυκνότητα υδρατμών υπολογίζεται χρησιμοποιώντας adiabatic διαδικασία:

$$\rho(H) = \rho_0 \frac{T_0}{T} \left[1 - \frac{k-1}{k} \frac{gH}{RT_0} \right]^{k/k-1} \quad (28)$$

όπου ρ_0 (g/m^3) και T_0 (K) είναι η πυκνότητα υδρατμών και η θερμοκρασία στο έδαφος, αντίστοιχα, g η επιτάχυνση της βαρύτητας (προσεγγιστικά 9.8 m/s^2), $k = 4/3$ (ειδική αναλογία θερμότητας για το μόριο υδρατμού) και $T(K)$ είναι η απόλυτη θερμοκρασία κοντά στο H . Στο παρών μοντέλο η τελευταία θεωρείται ότι είναι ίση με 270 K .

Αν το $\rho(H)$ είναι διαθέσιμο, η περιεκτικότητα υγρού νερού του νέφους w , υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ της πυκνότητας υδρατμών ρ , και η πυκνότητα κορεσμού ρ_s , της οποίας η τιμή είναι περίπου 3.82 g/m^3 για $T=270 \text{ K} = 3.15^\circ\text{C}$ (Bolton,1980). Με μαθηματικούς όρους:

$$w(H) = \begin{cases} 0 & \rho(H) \leq 3.82 \text{ g/m}^3 \\ \rho(H) - 3.82 & \rho(H) > 3.82 \text{ g/m}^3 \end{cases} \quad (29)$$

Με τη χρήση του w , η ειδική απόσβεση μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση της προσέγγισης του Slobin, (Slobin,1982):

$$\alpha = \frac{5.038 w 10^{-0.744}}{\lambda^2} \quad (30)$$

όπου το α εκφράζεται σε dB/km και το λ είναι το μήκος κύματος σε cm. Το τελικό βήμα για να υπολογίσουμε την απόσβεση A στον κεκλιμένο ραδιοδρόμο σε σχέση με τη γωνία ανύψωσης θ είναι :

$$A = \alpha \frac{D}{\sin(\theta)} \quad (31)$$

όπου D είναι η κάθετη έκταση που νέφους. Ενώ οι περισσότερες έννοιες στις οποίες στηρίζεται το μοντέλο των Dintelmann και Ortgies είναι ορθές, λόγω της ασύμφορης γνώσης του D , οι συγγραφείς κατέφυγαν στην ακόλουθη εμπειρική σχέση για αυτή την παράμετρο (D σε km και το w σε g/m^3)

$$D = 0.15 - 0.023w + 0.0055 w^2 \quad (32)$$

Η εξίσωση (32) προέρχεται από μετρήσεις με ραδιόμετρο στα 20 και 30 GHz και σύγχρονα μετεωρολογικά δεδομένα εδάφους, τα οποία συνδυάζονται για να υπολογιστεί η απόσβεση

στον κεκλιμένο ραδιοδρόμο($\theta=30^\circ$), slant path, εξαιτίας των νεφών, χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η συνεισφορά του οξυγόνου και των υδρατμών.

Η μορφή του μοντέλου των Dintelmann και Ortgies είναι απλή και αποτελεσματική, αλλά, από την άλλη πλευρά το κύριο μειονέκτημα του βρίσκεται στην εμπειρική φύση της εξίσωσης (32) της οποίας η ορθότητα για άλλα μέρη είναι αμφισβητήσιμη. Επιπλέον, κάτι που πρέπει να εξετασθεί περαιτέρω, είναι τα νέφη που συνδέονται με μεγάλα καιρικά μέτωπα, παρά αυτά που διαμορφώνονται τοπικά.

Στον Πίνακα 4 συνοψίζονται οι είσοδοι, οι εξισώσεις και οι σταθερές για πρακτική εφαρμογή του μοντέλου των Dintelmann και Ortgies.

Είσοδοι	Εξοδοι	
Θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους T_0 Πυκνότητα υδρατμών στην επιφάνεια του εδάφους ρ_0 Γωνία ανύψωσης θ Μήκος κύματος λ	Απόσβεση στον κεκλιμένο ραδιοδρόμο A	
Εκφράσεις	Σταθερές	Μονάδες
$H = 0.89 + 0.165(T_0 - 273)$	\	T_0 σε Κ H σε km
$\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T} \left[1 - \frac{k-1}{k} \frac{gH}{RT_0} \right]^{k/k-1}$	$k = 4/3$ $T = 270$ Κ $R = 0.4615$ J/(K·g) $g = 9.8$ m/s ²	T_0 σε Κ ρ and ρ_0 σε g/m ³ H σε km
$w = \begin{cases} 0 & \rho \leq 3.82 \text{ g/m}^3 \\ \rho - 3.82 & \rho > 3.82 \text{ g/m}^3 \end{cases}$	\	w σε g/m ³ ρ σε g/m ³
$\alpha = \frac{5.038w 10^{-0.744}}{\lambda^2}$	\	α σε dB/km w σε g/m ³ λ σε cm
$D = 0.15 - 0.023w + 0.0055w^2$	\	w σε g/m ³ D σε km
$A = \alpha \frac{D}{\sin(\theta)}$	\	A σε dB α σε dB/km D σε km θ σε rad

Πίνακας 3-4.Είσοδοι, εξισώσεις και σταθερές για το μοντέλο των Dintelmann και Ortgies .

3.5.2 Altshuler and Marr Model

Οι Altshuler και Marr ανέπτυξαν μία μεθοδολογία για να κάνουν εκτίμηση της απόσβεσης λόγω νεφών στον κεκλιμένο ραδιοδρόμο, από τη μοναδική γνώση της απόλυτης τιμής της υγρασίας ρ_{AH} (Altshuler and Marr, 1989). Το μοντέλο προέρχεται από μία εκτενή σειρά μετρήσεων που διεξήχθησαν στην Μασαχουσέτη, με τη χρήση ραδιομέτρου δύο συχνοτήτων.

Η μέθοδος, ξεκίνησε από την ανακάλυψη της ειδικής απόσβεσης εξαιτίας της ομίχλης, ως συνάρτηση της περιεκτικότητας υγρού νερού (Altshuler,1989), όπου οι θεωρητικοί υπολογισμοί για την απόσβεση εξαιτίας της ομίχλης δίνεται για διαφορετικές θερμοκρασίες ($-8^{\circ}\text{C} < T < 25^{\circ}\text{C}$), όπου η διηλεκτρική σταθερά του νερού εξαρτάται από τις τιμές που έχουν ταξινομηθεί στο (Rosenberg,1974) και από το μήκος κύματος, δηλαδή $3\text{mm} < \lambda < 3\text{cm}$ (συχνότητες μεταξύ των 10 και 100 GHz για το κενό). Τα αποτελέσματα που προέρχονται από το (Altshuler,1989) για την ομίχλη είναι έγκυρα και για τα νέφη καθώς και τα δύο αποτελούνται από μικρά αιωρούμενα σταγονίδια νερού, των οποίων η τυπική διάμετρος (της τάξης των microns) είναι πολύ μικρότερα από τη γκάμα των μηκών κύματος που εξετάζονται. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 4.2.1, σε αυτή την περίπτωση, η Rayleigh προσέγγιση ισχύει για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων απόσβεσης των σταγόνων και έτσι η ειδική απόσβεση μόνο από τη συγκέντρωσή τους (αριθμός σωματιδίων ανά μονάδα όγκου), και όχι από το σχήμα τους. Οι προκύπτουσες τιμές (απόσβεση σε $\text{dB/km}/(\text{g/m}^3)$) είναι αποτέλεσμα της χρήσης του παρακάτω τύπου για $T=10^{\circ}\text{C}$ (ίδια θερμοκρασία θεωρείται για όλες τις σταγόνες των νεφών):

$$\alpha_w = 1.2 + 0.0371\lambda + \frac{19.96}{\lambda^{1.5}} \quad (33)$$

όπου λ είναι σε mm.

Η ανάλυση μεγάλου σετ μετρήσεων που έγιναν με τη χρήση του ραδιομέτρου έδειξαν ότι η απόσβεση εξαιτίας των νεφών, και η απόλυτη υγρασία της επιφάνειας ρ_{AH} , που μετρήθηκε με βοηθητικούς αισθητήρες, έχουν γραμμική σχέση. Συνδυάζοντας την παραπάνω πληροφορία με τη σχέση (33), οι συγγραφείς κατέληξαν στην παρακάτω έκφραση για την κάθετη απόσβεση εξαιτίας των νεφών $A_z(\text{dB})$:

$$A_z = \left(-0.0242 + 0.00075\lambda + \frac{0.403}{\lambda^{1.15}} \right) (11.3 + \rho_{AH}) \quad (34)$$

όπου η απόλυτη υγρασία ρ_{AH} μετριέται σε g/m^3 .

Η εξίσωση (34) είναι έγκυρη για κάθετα μονοπάτια. Η κάθετη έκταση των νεφών, συμπεριλαμβάνεται πειραματικά στην έκφραση καθώς η εξίσωση προέρχεται από τις μετρήσεις με το ραδιόμετρο. Η εξάρτηση από τη συνολική απόσβεση εξαιτίας των νεφών A (περίπτωση πλήρους κάλυψης των νεφών) στη γωνία ανύψωσης λαμβάνεται υπ' όψιν με την παρακάτω σχέση:

$$A_{full} = A_z D(\theta) \quad (35)$$

όπου:

$$D(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 8^{\circ} \\ \frac{\sin(\theta)}{\sqrt{(a_e + h_e)^2 - a_e^2 \cos^2(\theta)} - a_e \sin(\theta)} & \theta \leq 8^{\circ} \end{cases} \quad (36)$$

το $D(\theta)$ υπολογίζεται ως συντέμνουσα της γωνίας ανύψωσης (παραδοχές επίπεδης Γης και οριζόντια ομοιογένεια των νεφών) για $\theta > 8^{\circ}$, ενώ για χαμηλότερες γωνίες, απαιτείται η χρήση του μοντέλου κυρτής Γης. Στην παραπάνω περίπτωση, επιπλέον τιμές είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό του $D(\theta)$, δηλαδή η ενεργός ακτίνα της Γης $a_e=8497$ km και το ενεργό ύψος της ατμόσφαιρας που προκαλεί απόσβεση, h_e (km). Το τελευταίο είναι απόρροια μιας παλαιότερης μελέτης (Altshuler and Marr, 1988), και αποτελεί συνάρτηση της απόλυτης υγρασίας ρ_{AH} :

$$h_e = 6.35 - 0.302 \rho_{AH} \quad (37)$$

Η στατιστική σύγκριση των δεδομένων για μερική (A_{part}) και ολική (A_{Full}) κάλυψη νεφών, έδειξε ότι, ενώ για πολύ χαμηλές τιμές υγρασίας τα δεδομένα συμπίπτουν, για υψηλότερες τιμές υγρασίας, η απόσβεση λόγω μερικής κάλυψης είναι περίπου 85% της ολικής κάλυψης. Έτσι εύκολα συμπεραίνουμε ότι :

$$A_{part} = 0.85 A_{full} \quad (38)$$

Το μοντέλο που προτάθηκε από τους Altshuler και Marr είναι εύκολο στην υλοποίηση καθώς απαιτεί ως είσοδο μόνο τιμές για την απόλυτη υγρασία της τοπικής επιφάνειας, αλλά επειδή η διατύπωσή της μερικώς εμπειρική, η αξιοπιστία της για άλλες περιοχές είναι αμφισβητήσιμη.

Στον Πίνακα 5 συνοψίζονται οι είσοδοι, οι εξισώσεις και οι σταθερές για πρακτική εφαρμογή του μοντέλου των DAltshuler και Marr.

Είσοδοι		Εξοδοι	
Απόλυτη υγρασία ρ_{AH} Γωνία ανύψωσης θ Μήκος κύματος λ		Απόσβεση στον κεκλιμένο ραδιοδρόμο A	
Εκφράσεις	Σταθερές	Μονάδες	
$A_z = \left(-0.0242 + 0.00075\lambda + \frac{0.403}{\lambda^{1.15}} \right) (11.3 + \rho_{AH})$	\	A_z σε dB λ σε mm ρ_{AH} σε g/m^3	
$h_e = 6.35 - 0.302 \rho_{AH}$	\	h_e σε km ρ_{AH} σε g/m^3	
$D(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{\sin(\theta)} & \theta > 8^\circ \\ \frac{1}{\sqrt{(a_e + h_e)^2 - a_e^2 \cos^2(\theta)} - a_e \sin(\theta)} & \theta \leq 8^\circ \end{cases}$	$a_e = 8497$ km	θ σε rad h_e σε km	
$A = A_z D(\theta)$	\	A σε dB A_z σε dB	

Πίνακας 3-5 Είσοδοι, εξισώσεις και σταθερές για πρακτική εφαρμογή του μοντέλου των DAltshuler και Marr.

3.5.3 Salonen and Uppala Model (ITU-R P.840-6)

Το μοντέλο αυτό προτάθηκε από τους Salonen και Uppala (Salonen and Uppala, 1991), και έχει υιοθετηθεί από την πρόταση της ITU-R P.840-6 (ITU-R P.840-6), βασίζεται στη μέθοδο που αναπτύχθηκε από τον Liebe (Liebe et al., 1993), το οποίο υπολογίζει την απόσβεση εξαιτίας των νεφών χρησιμοποιώντας μικροφυσικές ιδιότητες, κάθετο προφίλ θερμοκρασίας T και την περιεκτικότητα υγρού νερού w. Σύμφωνα με το (Liebe et al., 1993), η ειδική απόσβεση γ_c (dB/km) εξαιτίας των νεφών εκφράζεται ως:

$$\gamma_c = K_l w \quad (39)$$

όπου το w είναι η περιεκτικότητα υγρού νερού (g/m^3) και :

$$K_l = \frac{0.819 f}{\varepsilon''(1 + \eta^2)} \quad (40)$$

f η συχνότητα σε GHz.

Στην (14), $n^2 = (2 + \varepsilon') / \varepsilon''$, όπου τα ε' , ε'' είναι το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς του νερού αντίστοιχα. Τα τελευταία συνάγονται από το double-Debye μοντέλο (Manabe et al., 1987), του οποίου οι εξισώσεις (6) και (7) έχουν είδη παρουσιαστεί στην ενότητα 3. Η σημαντική συμβολή των Salonen και Urrala στο (Salonen and Urrala, 1991), στη σαφήνεια του μοντέλου να προβλέψει με απλό τρόπο την κατανομή της περιεκτικότητας του υγρού νερού κατά μήκος του δρόμου διάδοσης, χρησιμοποιώντας κάθετα προφίλ θερμοκρασίας (T), πίεσης (P) και σχετικής υγρασίας (RH). Με τη σειρά τους, αυτές οι ποσότητες μπορούν να μετρηθούν με τη χρήση ραδιοβολίσεων (κυρίως στα αεροδρόμια για περισσότερες από 4 φορές την ημέρα) ή να εξαχθούν ως προϊόντα αριθμητικών προβλέψεων καιρού, Numerical Weather Prediction (NWP), που είναι για παράδειγμα διαθέσιμα από το European Centre for Medium-range Weather Forecast (ECMWF) (Urrala et al., 2005). Το μοντέλο νεφών που αναπτύχθηκε από τους Salonen και Urrala, τροποποιήθηκε στο (Martellucci et al., 2002), για να συμπεριλάβει και την πρόβλεψη για την περιεκτικότητα σε παγωμένο νερό, εντοπίζει σύννεφα σε όλα τα στρώματα για τα οποία η σχετική υγρασία, RH(h), ξεπερνά ένα κρίσιμο κατώφλι υγρασίας το οποίο ορίζεται ως :

$$RH_c(h) = 1 - \alpha \sigma(h)(1 - \sigma(h)) [1 + \beta (\sigma(h) - 0.5)] \quad (41)$$

όπου $\alpha=1.0$, $\beta=\sqrt{3}$ και το $\sigma(h)$ είναι ανάλογο της πίεσης στο ύψος h και στο επίπεδο της επιφάνειας. Εάν η σχετική υγρασία που μετρήθηκε είναι υψηλότερη από την κρίσιμη στο ίδιο ύψος πίεσης ($RH_c(h)$), το επίπεδο θεωρείται ότι είναι στο νέφος. Όταν ένα επίπεδο αξιολογείται ότι είναι στο νέφος, το επόμενο στάδιο είναι να υπολογιστεί η περιεκτικότητα σε υγρό νερό $w(g/m^3)$ σε αυτό το επίπεδο χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

$$w = \begin{cases} w_0 (1 + cT) \left(\frac{h_c}{h_r} \right) p_w(T) & T \geq 0^\circ C \\ w_0 e^{cT} \left(\frac{h_c}{h_r} \right) p_w(T) & T < 0^\circ C \end{cases} \quad (g/m^3) \quad (42)$$

Στην (42), το T είναι η θερμοκρασία σε ($^\circ C$), h_c είναι το ύψος από τη βάση του νέφους (m), $w_0=0.17(g/m^3)$, $c=0.04(1/^\circ C)$ και σε χαμηλή ($T \leq -20^\circ C$) θερμοκρασία, και $h_r=1500(m)$. Το κλάσμα υγρού νερού / πάγου, $p_w(T)$, δίνεται από:

$$p_w(T) = \begin{cases} 1 & 0^\circ C < T \\ 1 + \frac{T}{20} & -20^\circ C < T \leq 0^\circ C \\ 0 & T \leq -20^\circ C \end{cases} \quad (43)$$

Σύμφωνα με τη σχέση (43), το μοντέλο προβλέπει ότι μόνο το υγρό νερό υφίσταται σε υψηλές θερμοκρασίες ($T > 0^\circ C$) και το παγωμένο σε χαμηλές ($T \leq -20^\circ C$), αντίστοιχα, ενώ συνυπάρχουν και οι 2 φάσεις του νερού για θερμοκρασίες μεταξύ $0^\circ C < T \leq -20^\circ C$

Ως αποτέλεσμα χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση είναι εφικτός ο υπολογισμός του κάθετου προφίλ της ειδικής απόσβεσης λόγω του νέφους γ_c , όπως και την απόσβεση κατά μήκος της διαδρομής διάδοσης A με μία απλή ολοκλήρωση. Αν και ακριβής και ενδιαφέρουσα, η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται μέχρι στιγμής είναι αρκετά περίπλοκη

καθώς απαιτεί την πλήρη γνώση της κάθετης δομής της τροπόσφαιρας. Ως επόμενο βήμα, οι Salonen και Urrala, πρότειναν έναν τρόπο για τον απλούστερο υπολογισμό του A χρησιμοποιώντας κάθετα ολοκληρώσιμες ποσότητες, που είναι πολύ πιο εύκολο να τις χειριστούμε σε σχέση με το πλήρες προφίλ, ορίζοντας την περιεκτικότητα υγρού νερού περιορισμένη σε μια δεδομένη θερμοκρασία T_R , $w(T_R)$, και έτσι :

$$\gamma_C \approx \gamma'_C = K_I(T_R) w_R(T_R) \quad (44)$$

το γ'_C στην εξίσωση (44) δείχνει ότι η πληροφορία της μεταβολής της θερμοκρασίας με το ύψος μπορεί να εισαχθεί στο w_R . Με άλλα λόγια, η ειδική απόσβεση λόγω νεφών, υπολογίζεται θεωρώντας ότι η θερμοκρασία σε όλο το νέφος είναι T_R , ανεξάρτητα από το ύψος του στρώματος του νέφους, και αυτή η απόκλιση από τις πραγματικές τιμές του T λαμβάνεται υπ' όψη μετασχηματίζοντας το w σε w_R . Αυτό με τη σειρά του επιτρέπει τη χρήση του ίδιου $K_I(T_R)$ για όλα τα στρώματα του νέφους και για αυτό θεωρείται το ολοκλήρωμα της περιεκτικότητας σε υγρό νερό, *integrated liquid water content* περιορισμένο στο T_R , $W_R(T_R)$ (mm), για τους υπολογισμούς της πλήρους απόσβεσης εξαιτίας των νεφών στη διαδρομή διάδοσης (τα L , l αντιστοιχούν στην κάθετη διαδρομή διάδοσης μέσα στο νέφος και ύψος του στρώματος του νέφους, αντίστοιχα :

$$\begin{aligned} A \approx A' &= \int_L K_I(T_R) w_R(T_R, l) dl / \sin(\theta) \\ &= K_I(T_R) \int_L w_R(T_R, l) dl / \sin(\theta) = K_I(T_R) W_R(T_R) / \sin(\theta) \end{aligned} \quad (45)$$

Στην (45), η εξάρτηση από την γωνία ανύψωσης γίνεται σαφής με την εισαγωγή του $\sin(\theta)$, το οποίο δείχνει ότι στο μοντέλο των Urrala και Salonen γίνεται μια απλή κλιμάκωση της απόσβεσης θεωρώντας οριζόντια ομοιογένεια για τα νέφη. Αυτό ίσως αποτελεί ένα περιορισμό για πολύ μικρές γωνίες ανύψωσης ($<10^\circ$), επειδή η πιθανότητα στη ζεύξη να συναντήσουμε διαφορετική περιεκτικότητα σε υγρό νερό αυξάνεται.

Η έκφραση για το w_R υπολογίζεται στο (Salonen and Urrala, 1991), ελαχιστοποιώντας τη διαφορά μεταξύ του γ_C και γ'_C σε όλο το εύρος συχνοτήτων $f_{int}=f_{min}-f_{max}$ που η εξίσωση (45) αναμένεται να καλύψει. Αυτό οδηγεί:

$$w_R(T_R) = \frac{\int_{f_{min}}^{f_{max}} \gamma_C(w, f, T) \gamma_C(w, f, T_R) df}{\int_{f_{min}}^{f_{max}} [\gamma_C(w, f, T_R)]^2 df} \quad (46)$$

Η ITU-R έχει υιοθετήσει στη σύσταση P.840-6 (ITU-R P.840-6) την προσέγγιση που προτείνεται από τους Salonen και Urrala, για τον υπολογισμό της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών χρησιμοποιώντας το W_R , τα στατιστικά του οποίου, που περιέχονται στη σύσταση υπολογίζονται με τη χρήση της εξίσωσης (46) από τα P-RH-T προφίλ που προέρχονται από τη βάση δεδομένων ERA40 με ανάλυση πλέγματος ίση με $1.125^\circ \times 1.125^\circ$ γεωγραφικό μήκος και πλάτος αντίστοιχα (Urrala et al., 2005). Σε αυτήν την περίπτωση έχει επιλεγεί $\Delta f = 10-60$ GHz και $T_R = 0^\circ$ C. Πράγματι, η εφαρμογή της (45) είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τέτοια βάση δεδομένων, καθώς αυτή η απλουστευμένη προσέγγιση δεν μπορεί να αποκτήσει εύκολα πλεονέκτημα με τη χρήση εναλλακτικών εισόδων (και πιθανών με μεγαλύτερη ακρίβεια), όπως δεδομένα για το ολοκλήρωμα της περιεκτικότητας υγρού νερού, *integrated liquid water content*, με τη χρήση αισθητήρων παρατήρησης Γης, Earth

Observation sensors, βάσεις δεδομένων (e.g. MODIS (MODIS, 2012) and CPR (Stephens et al., 2002) και δορυφορικούς αισθητήρες (Aqua and CloudSat satellites).

Στον Πίνακα 6 συνοψίζονται οι είσοδοι, οι εξισώσεις και οι σταθερές για πρακτική εφαρμογή του μοντέλου των Salonen και Urrala που υιοθετήθηκε από την ITU-R P.840-6.

Είσοδοι	Εξοδοι	
Τοπικά στατιστικά δεδομένα του περιορισμένου ολοκληρώματος της περιεκτικότητας σε υγρό νερό W_R (ITU-R P.840-6) Γωνία ανύψωσης θ Συχνότητα f	Απόσβεση στον κεκλιμένο ραδιοδρόμο A	
Εκφράσεις	Σταθερές	Μοναδες
$\varepsilon'(f) = \varepsilon_2 + \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{1 + (f/f_D)^2} + \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{1 + (f/f_S)^2}$ $\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_D [1 + (f/f_D)^2]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_S [1 + (f/f_S)^2]}$ $\eta^2 = (2 + \varepsilon')/\varepsilon''$	$\varepsilon_0 = 87.81$ $\varepsilon_1 = 5.48$ $\varepsilon_2 = 3.51$ $f_D = 8.97 \text{ GHz}$ $f_S = 442.55 \text{ GHz}$	f σε GHz
$K_l = \frac{0.819 f}{\varepsilon''(1 + \eta^2)}$	\	f σεGHz K_l σε(dB/km)/(g/m ³)
$A = \frac{K_l W_R}{\sin(\theta)}$	Το W_R εξάγεται από παγκόσμιους πίνακες για το περιορισμένο ολοκλήρωμα της περιεκτικότητας σε υγρό νερό ,σύμφωνα με τη σύστασηITU-R P.840-6	A σε dB K_l σε (dB/km)/(g/m ³) W_R σε mm θ σε rad

Πίνακας 3-6 Είσοδοι, εξισώσεις και σταθερές για πρακτική εφαρμογή του μοντέλου των Salonen και Urrala που υιοθετήθηκε από την ITU-R P.840-6.

3.5.4 Συντελεστές Απορρόφησης Μάζας, mass absorption coefficients, για τον Υπολογισμό της Απόσβεσης Εξαιτίας των Νεφών

Το μοντέλο των Salonen και Urrala, σε ακριβείς φυσικές έννοιες, και ως εκ τούτου αναμένεται οι προβλέψεις που προέρχονται από αυτό να είναι ακριβείς, πράγμα που όντως επαληθεύεται στα (Davies et al., 1998) και (Salonen and Urrala, 1991). Από την άλλη πλευρά, τα πολύ ακριβή αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν μόνο με τη χρήση πλήρων κάθετων προφίλ θερμοκρασίας και περιεκτικότητας σε υγρό νερό (ακολουθώντας την προσέγγιση που παρουσιάζεται στο (Liebe et al., 1993)),ενώ, από την άλλη, η

απλουστευμένη μέθοδος (εξίσωση (45)), απαιτεί ως είσοδο χάρτες του ολοκληρώματος της περιεκτικότητας του υγρού νερού, W_R , τα οποία υπολογίζονται από το NWP. Αυτό θέτει δύο βασικά προβλήματα: πρώτον, μια αλλαγή στο T_R όπως παρουσιάστηκε στο (Luini et al., 2013), για να μειωθεί το σφάλμα προσέγγισης που κληρονομείται από τη χρήση του w_R , αντί του w και/ή το Δf (παραδείγματος χάρη να διαχειριστούμε συχνότητες μεγαλύτερες από 60 GHz, με ελάχιστο σφάλμα) χρειάζεται μια καθολική επαναπροσέγγιση των κάθετων προφίλ της ERA40 P-RH-T. Δεύτερον η ακρίβεια του προκύπτοντος W_R (και ως εκ τούτου της προβλεπόμενης απόσβεσης χρησιμοποιώντας την εξίσωση (45)) ίσως επηρεαστεί αρνητικά από την αδρή χωρική και χρονική ανάλυση των προϊόντων του NWP. Μια διαφορετική προσέγγιση για τον αποτελεσματικό υπολογισμό της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών προτείνεται στο (Luini and Carsoni, 2014). Η μέθοδος αυτή δεν απαιτεί τη γνώση της κάθετης δομής της τροπόσφαιρας, αλλά περιλαμβάνει την χρήση του συντελεστή απορρόφησης μάζας για το υγρό νερό $a_w(f)$ στην (47), που χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές τηλεσκοπίσης για να δημιουργήσουμε γραμμική σχέση του ολοκληρώματος περιεκτικότητας υγρού νερού W (mm) με την αντίστοιχη απόσβεση για δεδομένη συχνότητα f , A (θ η γωνία ανύψωσης) (Luini et al., 2007):

$$A(f) = \frac{a_w(f)W}{\sin(\theta)} \quad (47)$$

Είναι γεγονός ότι το a_w μπορεί να υπολογιστεί ως η κλίση της γραμμής που έχει προσαρμοστεί στο W/A επίπεδο, το οποίο όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες ενότητες αποτελεί απόρροια ραδιοβολήσεων (RAOBS) χρησιμοποιώντας το μοντέλο των Salonen και Urrala για τα κάθετα προφίλ του P-RH-T για την ανίχνευση των νεφών και την ποσοτικοποίηση του ολοκληρώματος της περιεκτικότητας υγρού νερού και έπειτα χρησιμοποιώντας το μοντέλο (Liebe et al., 1993), για τον υπολογισμό του γ_c (εξίσωση(39)) και ως εκ τούτου το A . Με αυτόν τον τρόπο η μεταβολή της θερμοκρασίας στο προφίλ του νέφους (και της σχετιζόμενης ειδικής απόσβεσης) δεν περιέχεται στο W_R , αλλά λαμβάνεται υπόψιν με τη χρήση του συντελεστή απορρόφησης μάζας a_w .

Στο (Luini and Carsoni, 2014), το a_w προέρχεται από ενδεδειγμένη σετ δεδομένων RAOBS τα οποία συλλέγονταν σε καθημερινή βάση δύο φορές την ημέρα για δέκα χρόνια (1980-1989), σε 14 σημεία ξεκινώντας από Βόρεια (πχ Sondankyla στη Φιλανδία) μέχρι Νότια (πχ Trapani στην Ιταλία) Ευρώπη, δηλαδή μελετήθηκαν πολύ διαφορετικά κλίματα. Οι διαφορές στο a_w από περιοχή σε περιοχή αποδείχθηκαν αμελητέες για τον υπολογισμό της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών. Με γνώμονα αυτό, παρόλο που τόσο το είδος όσο και η πιθανότητα εμφάνισης των νεφών διαφέρει από περιοχή σε περιοχή, η κάθετη δομή τους, όσο αφορά τη σχέση μεταξύ πίεσης θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, είναι παρεμφερής. Αυτό μας επιτρέπει να καταλήξουμε σε μια απλή έκφραση για το a_w (dB/mm), ως συνάρτηση μόνο της συχνότητας (Luini and Carsoni, 2014):

$$a_w^*(f) = \frac{0.819 \left(0.0155f^{1.668} + 14.8523f^{0.3885} - 27.4863 \right)}{\varepsilon''(1+\eta^2)} \quad (48)$$

όπου $20 \text{ GHz} \leq f \leq 200 \text{ GHz}$, ενώ το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της ηλεκτρικής διαπερατότητας του νερού (εξισώσεις (6),(7)) υπολογίζονται για $T=0 \text{ }^\circ\text{C}$. Η ακρίβεια της εξίσωσης (24) αξιολογήθηκε σε σχέση με τα δεδομένα από το βάση δεδομένων του RAOBS που αναφέρθηκε παραπάνω, δείχνοντας ένα μέγιστο σχετικό σφάλμα προσέγγισης της τάξης του 6% (Luini and Carsoni, 2014).

Ως αποτέλεσμα, η εξίσωση (48) που αποτελεί παράκλιση από το ΚΙ στην (40), μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εύκρατα και μέσα γεωγραφικά πλάτη για τον υπολογισμό της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών κατά μήκος της διαδρομής διάδοσης A, για συχνότητες από 20 GHz έως 200GHz, ως συνάρτηση των τοπικών τιμών του W που προέρχονται από διαφορετικές πηγές/ μοντέλα. Στον Πίνακα 7 συνοψίζονται οι είσοδοι, οι εξισώσεις και οι σταθερές για τον υπολογισμό της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών με χρήση του συντελεστή απορρόφησης μάζας.

Είσοδοι		Έξοδοι
Τοπικά στατιστικά δεδομένα του ολοκληρώματος της περιεκτικότητας σε υγρό νερό W Γωνία ανύψωσης θ Συχνότητα f		Slant path attenuation A
Εκφράσεις	Σταθερές	Μοναδες
$\varepsilon'(f) = \varepsilon_2 + \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{1 + (f/f_D)^2} + \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{1 + (f/f_S)^2}$ $\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_D [1 + (f/f_D)^2]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_S [1 + (f/f_S)^2]}$ $\eta^2 = (2 + \varepsilon')/\varepsilon''$	$\varepsilon_0 = 87.81$ $\varepsilon_1 = 5.48$ $\varepsilon_2 = 3.51$ $f_D = 8.97$ GHz $f_S = 442.55$ GHz	f in GHz
$a_w = \frac{0.819 (0.0155f^{1.668} + 14.8523f^{0.3885} - 27.4863)}{\varepsilon''(1 + \eta^2)}$	\	f σε GHz a _w σε (dB)/(mm)
$A = \frac{a_w W}{\sin(\theta)}$	\	A σε dB a _w σε(dB)/(mm) W σε mm θ σε rad

Πίνακας 3-7 Είσοδοι, εξισώσεις και σταθερές για τον υπολογισμό της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών με χρήση του συντελεστή απορρόφησης μάζας.

3.5.5 Dissanayake-Allnutt-Haidara Model

Το μοντέλο DAH (Dissanayake-Allnutt-Haidara) αρχικά παρουσιάστηκε στο (Dissanayake et al., 1997) και επεκτάθηκε στο (Dissanayake et al., 2001) για μεγαλύτερη ακρίβεια στην πρόβλεψη της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών για διαδρομές χαμηλών γωνιών ανύψωσης. Η κύρια θεώρηση που γίνεται στο μοντέλο DAH, είναι ότι η απόσβεση εξαιτίας των νεφών A, ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή, lognormal distribution, (όπως αποδείχθηκε από μετρήσεις που έγιναν πχ (Al-Ansafi et al., 2003)), σύμφωνα με το οποίο η πιθανότητα το A(dB) να περάσει ένα όριο A* σε ένα χρόνο είναι:

$$P(A > A^*) = 1 - \frac{P_c^{tot}}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\ln A^* - \mu}{\sqrt{2}\sigma}\right) \quad (49)$$

Στην εξίσωση (49) το P_c^{tot} είναι η χρόνια πιθανότητα να υφίσταται απόσβεση εξαιτίας των νεφών, μ, σ είναι η μέση τιμή και η απόκλιση τιμές του $\ln A$ ενώ η erfc η complementary error function. Ένα κύριο χαρακτηριστικό του μοντέλου DAH, ότι λαμβάνει υπόψη την απόσβεση που προκαλείται από τέσσερα είδη νεφών, των οποίων οι μέσες ιδιότητες παρατίθενται στον Πίνακα 8.

Είδος Νέφους	Κάθετη Έκταση L_V (km)	Οριζόντια Έκταση L_H (km)	Περιεκτικότητα σε υγρό νερό (g/m^3)
Cumulonimbus	3.0	4.0	1.0
Cumulus	2.0	3.0	0.6
Nimbostratus	0.8	10.0	1.0
Stratus	0.6	10.0	0.4

Πίνακας 3-8 Κύρια χαρακτηριστικά των τεσσάρων τύπων νεφών που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο DAH.

Η χωρική κατανομή της περιεκτικότητας σε υγρό νερό w , σε πραγματικά νέφη παρουσιάζει ανομοιογένεια αλλά για απλότητα και ευκολία στην υλοποίηση το μοντέλο DAH θεωρεί και σχεδιάζει κάθε νέφος ως ένα κύλινδρο (με οριζόντιο και κάθετο άνοιγμα ίσο με L_H και L_V αντίστοιχα) που περιέχει το ίδιο w . Ανάλογα με την περιοχή, κάθε ένα από τα είδη νεφών που παρατίθενται στον Πίνακα 8 σχετίζεται με διαφορετική συχνότητα εμφάνισης, κάτι λογικό καθώς μεταφερόμαστε από τη μια κλιματική περιοχή στην άλλη. Στο μοντέλο DAH, αυτές οι πιθανότητες εμφάνισης εξάγονται από χάρτες κάλυψης νεφών που έχουν βασιστεί στις βάσεις περισσότερων από 4000 WMO (Παγκόσμιοι Μετεωρολογικοί Οργανισμοί) σταθμούς όπου οι οπτικές παρατηρήσεις των διαφόρων τύπων νεφών διεξάγονται για περισσότερο από δέκα χρόνια τουλάχιστον τέσσερις φορές την ημέρα. Τέτοια δεδομένα, συγκεντρώθηκαν για να δημιουργήσουν έναν παγκόσμιο χάρτη κάλυψης νεφών παρέχοντας έτσι την πιθανότητα εμφάνισης για διάφορους τύπους νεφών (Warren et al., 1986), σε ένα ενιαίο πλέγμα γεωγραφικού μήκους/πλάτους $5^\circ \times 5^\circ$.

Η ειδική απόσβεση εξαιτίας των νεφών γ_c (dB/km) υπολογίζεται σύμφωνα με τη Rayleigh προσέγγιση που παρουσιάστηκε παραπάνω καθώς δινόταν περιγραφή του μοντέλου των Salonien και Uppala.

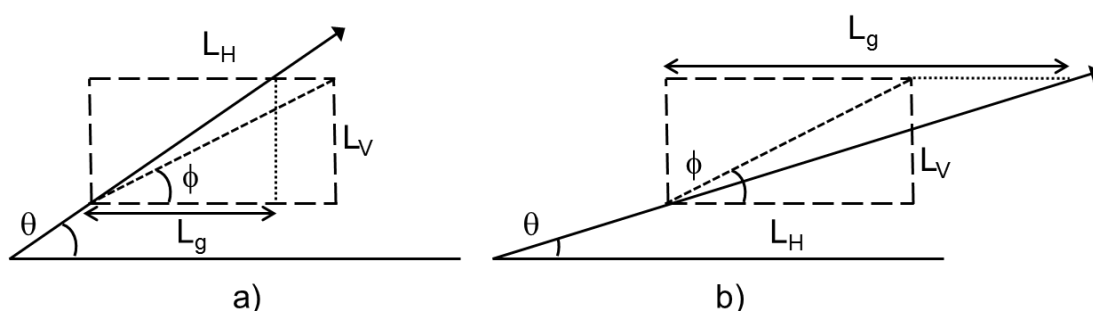
Καταλήγουμε λοιπόν ότι, η κάθετη διαδρομή υφίσταται απόσβεση (dB):

$$A_z = 0.52 \gamma_c w L_V = 0.52 \left[0.4343 \left(\frac{3\pi}{50\lambda\rho_d} \right) \operatorname{Im} \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon+2} \right) \right] w L_V \quad (50)$$

όπου η περιεκτικότητα σε υγρό νερό w (g/m^3) και το κάθετο άνοιγμα L_V (km), προέρχονται από τον Πίνακα 8. Η μορφή του γ_c που παρουσιάστηκε στο (Dissanayake et al., 2001), είναι ισοδύναμη με την εξίσωση (40), αλλά εκφράζεται ως συνάρτηση του μήκους κύματος λ (m) και της πυκνότητας του νερού ρ_d (g/m^3), η οποία για εύρος θερμοκρασιών $-20^\circ\text{C} \leq T \leq 10^\circ\text{C}$, μπορεί να θεωρείται ως 1. Για λόγους απλότητας, η θερμοκρασία στο σώμα του νέφους θεωρείται ότι είναι $T = 0^\circ\text{C}$ (από την οποία εξαρτάται η ηλεκτρική διαπερατότητα του

νερού ε) και ο συντελεστής προσαρμογής υπολογίζεται εμπειρικά ως 0.52 σε σχέση με τις μετρήσεις απόσβεσης των πραγματικών νεφών. Επιπλέον πρέπει να τονιστεί ότι οι τιμές της κάλυψης των νεφών που περιέχονται στους χάρτες αφορούν τον πλήρη ουρανό ενώ η απόσβεση εξαιτίας των νεφών υπολογίζεται για μια δεδομένη κατεύθυνση. Έτσι λοιπόν, οι τέσσερις τύποι νεφών (απόσβεση και πιθανότητα εμφάνισης) και η συνολική κάλυψη νεφών (που και αυτή εξάγεται από τους χάρτες) παρέχουν σημεία της CCDF καμπύλης και η καλύτερη καμπύλη εφαρμογής, best fit curve, (αναφερόμενος στην εξίσωση (49)) βρίσκεται από αυτά τα 5 σημεία.

Ενώ η εξίσωση (50) είναι έγκυρη για κάθετες ζεύξεις, για κεκλιμένη διαδρομή διάδοσης, η ενεργός διαδρομή μέσα από κάθε νέφος, L_i πρέπει να αντικαταστήσει το L_v . Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 5, αν η γωνία ανύψωσης θ είναι μεγαλύτερη από την ϕ (περίπτωση α), η διαδρομή περιέχεται ολόκληρη στο κυλινδρικό νέφος. Για θ μικρότερη από την ϕ (περίπτωση β), η πιθανότητα να υπεισέρχονται περισσότερα του ενός νέφους στη διαδρομή αυξάνεται, το οποίο μπορεί να ληφθεί υπ όψιν με τη χρήση της διαδρομής L_{eff} όμοια με αυτή που χρησιμοποιείται στα μοντέλα απόσβεση εξαιτίας της βροχής (ITU-R P.618-11).



Σχήμα 3.5 Σύστημα αναφοράς για τον υπολογισμό των στατιστικών απόσβεσης εξαιτίας νεφών σε κεκλιμένο ραδιοδρόμο χρησιμοποιώντας το μοντέλο DAK

L^i σε km, το i είναι ο δείκτης σε σχέση με τον τύπο των νεφών του Πίνακα 8

$$L^i = \begin{cases} L_v^i / \sin(\theta) & \theta \geq \phi^i \\ L_{eff}^i / \cos(\theta) & \theta < \phi^i \end{cases} \quad (51)$$

Όπου

$$L_{eff}^i = L_H^i + \frac{(L_g^i - L_H^i)}{1 + 0.78\sqrt{L_g^i} - 0.38[1 - \exp(-2L_g^i)]} \quad (52)$$

Το μοντέλο DAK είναι παγκόσμιο και έχει αποδειχθεί ότι δύναται να προβλέψει τα στατιστικά δεδομένα της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών για διάφορες περιοχές (Dissanayake et al., 2001) με μεγάλη ακρίβεια. Αντίθετα η δυνατότητα εφαρμογής του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από χάρτες κάλυψης των νεφών, οι οποίοι δεν είναι πάντα πολύ εύκολα να ανακτηθούν, και περιέχουν πληροφορίες για τα τέσσερα είδη νεφών που ορίστηκαν στο μοντέλο.

Στον Πίνακα 9 συνοψίζονται οι είσοδοι, οι εξισώσεις και οι σταθερές για πρακτική εφαρμογή του μοντέλου DAH.

Είσοδοι		Εξοδοι
Γεωγραφικό μήκος και πλάτος της περιοχής Γωνία ανύψωσης θ Συχνότητα f		CCDF of cloud attenuation A
Εκφράσεις	Σταθερές	Μονάδες
$\varepsilon'(f) = \varepsilon_2 + \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{1 + (f/f_D)^2} + \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{1 + (f/f_S)^2}$ $\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_D [1 + (f/f_D)^2]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_S [1 + (f/f_S)^2]}$ $\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''$	$\varepsilon_0 = 87.81$ $\varepsilon_1 = 5.48$ $\varepsilon_2 = 3.51$ $f_D = 8.97 \text{ GHz}$ $f_S = 442.55 \text{ GHz}$	f σε GHz
$\gamma_C = \left[0.4343 \left(\frac{3\pi}{50\lambda\rho_d} \right) \text{Im} \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \right]$	$\rho_d = 1 \text{ g/m}^3$	γ_C σε dB/km λ σε m
$L_g^i = L_V^i \cot(\theta)$ $L_{eff}^i = L_H^i + \frac{(L_g^i - L_H^i)}{1 + 0.78\sqrt{L_g^i} - 0.38[1 - \exp(-2L_g^i)]}$	i δείκτης κατηγορίας νέφους (Πίνακας 8)	L_{eff}, L_g, L_H (εξάγονται από την 3 ^η στήλη του Πίνακα 8) and L_V (εξάγονται από την 2 ^η στήλη του Πίνακα 8) σε km θ σε rad
$A_Z^i = 0.52 \gamma_C w^i L_V^i$	i δείκτης κατηγορίας νέφους (Πίνακας 8)	A_Z in dB w_C in dB/km w (εξάγονται από την 4 ^η στήλη του Πίνακα 8) in g/m^3 L_H (εξάγονται από την 3 ^η στήλη του Πίνακα 8) σε km
$\phi^i = \tan^{-1}(L_V^i / L_H^i)$ $L^i = \begin{cases} L_V^i / \sin(\theta) & \theta \geq \phi^i \\ L_{eff}^i / \cos(\theta) & \theta < \phi^i \end{cases}$	i δείκτης κατηγορίας νέφους (Πίνακας 8)	Τα L_S, L_{eff}, L_H (εξάγονται από την 3 ^η στήλη του Πίνακα 8) και το L_V (εξάγεται από τη 2 ^η στήλη του Πίνακα 8) σε km φ and θ σε rad
$A^i = A_Z^i L^i$	i δείκτης κατηγορίας νέφους (Πίνακας 8)	A και A_Z σε dB L σε km

Πίνακας 3-9 Είσοδοι, εξισώσεις και σταθερές για πρακτική εφαρμογή του μοντέλου DAH.

3.5.6 Stochastic Model of Clouds (SMOC)

Είναι φανερό από τις μεθόδους υπολογισμού της απόσβεσης που περιγράφηκαν μέχρι στιγμής, ακριβείς προβλέψεις για το A μπορούν να γίνουν μόνο αν συνδυαστούν τόσο τα φυσικά μοντέλα για την αλληλεπίδραση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και των σταγόνων υγρού νερού με κατάλληλη γνώση της χωρικής κατανομής της περιεκτικότητας υγρού νερού w , ή έστω του ολοκληρώματος της περιεκτικότητας υγρού νερού W . Αυτή είναι μια καίρια άποψη που αποκτά ιδιαίτερη σημασία καθώς η πολυπλοκότητα των συστημάτων επικοινωνιών αυξάνεται. Στην πραγματικότητα, για συστήματα που υλοποιούν σχήματα χωρικού διαφορισμού, space diversity, για την αντιμετώπιση μεγάλων διαλείψεων (Luini and Carsoni, 2013) ή για εφαρμογές δορυφόρων χαμηλής τροχιάς, Low Earth Orbit (LEO), όπου η επίγεια κεραία αλλάζει τη γωνία ανύψωσης και το αζιμούθιο σε μερικά λεπτά, η χωρική συσχέτιση των νεφών παίζει σημαντικό ρόλο τόσο επειδή εμπλέκεται εμμέσως στο σχεδιασμό των σχημάτων διαφορισμού, όσο και γιατί για πολύ χαμηλές γωνίες ανύψωσης, η παραδοχή της οριζόντιας ομοιογένειας των νεφών παύει να ισχύει και ως εκ τούτου, πρέπει να ληφθεί υπ' όψη η πλήρης οριζόντια και κάθετη κατανομή του w .

Όλες αυτές οι απόψεις χρησιμοποιούνται από το SMOC, μια μεθοδολογία που πρώτα παρουσιάστηκε στο (Luini and Carsoni, 2012) και έπειτα επεκτάθηκε στο (Luini and Caroni, 2014b), για τη σύνθεση υψηλής ανάλυσης τριών διαστάσεων περιοχών νεφών. Το μοντέλο αυτό επωφελείται από τη στοχαστική προσέγγιση που εισήγαγε ο Bell (Bell, 1987), το οποίο ως ενδιάμεσο βήμα, γεννά τυχαία χωρικά συσχετισμένα Γκαουσιανά πεδία. Η σύνθεση της χωρικής συσχέτισης των περιοχών νεφών, έγκειται στη γνώση της κλασματικής κάλυψης των νεφών f_w και το μέσο ολοκλήρωμα νέφους υγρού νερού, average integrated cloud liquid water, E_w σε μια συγκεκριμένη περιοχή, τυπικά προερχόμενο από μετεωρολογικά δεδομένα (πχ NWP from the ECMWF (Uppala et al., 2005)), από το οποίο σε συνδυασμό με τη τυπική απόκλιση του νέφους υγρού νερού, the standard deviation of the cloud liquid water content, για μια δεδομένη περιοχή, S_w , μπορεί να υπολογιστεί όπως εξηγείται παρακάτω.

Η κεντρική ιδέα του SMOC είναι ότι, εισάγοντας κατάλληλες στατιστικές ιδιότητες για το ολοκλήρωμα της περιεκτικότητας υγρού νερού W , (πρώτης τάξης στατιστικά δεδομένα και χωρική κατανομή) παρατηρούμενα σε πραγματικά πεδία νεφών, είναι δυνατό να να “απο-ολοκληρώσεις” μέσες ποσότητες για τα νέφη που παρέχονται τακτικά σε παγκόσμιο επίπεδο, για αδρή πλέγμα γεωγραφικού πλάτους/μήκους (τουλάχιστον για εφαρμογές διάδοσης ραδιοκυμάτων) και στην πράξη για το σχηματισμό ρεαλιστικών πεδίων του w με καλή χωρική ανάλυση ($1 \text{ km} \times 1 \text{ km} \times 100 \text{ m}$) για περιοχές της τάξης των $200 \text{ km} \times 200 \text{ km}$ (για τη συγκεκριμένη περιοχή).

3.5.6.1 Ανάπτυξη του Μοντέλου

Οι στατιστικές ιδιότητες του ολοκληρώματος της περιεκτικότητας σε υγρό νερό προκύπτουν από εκτενή σειτ πεδίων νεφών που παρατηρήθηκαν από το MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), που βρίσκεται επί του LEO Aqua δορυφόρου, το οποίο παρέχει δεδομένα ακτινοβολίας για 36 οπτικά κανάλια (με μήκος κύματος στην κλίμακα από 0.4

εως 14.4μm) με υψηλή χωρική ανάλυση (από 250 m έως 1 km). Μεταξύ των υψηλής ανάλυσης ατμοσφαιρικών δεδομένων που δίνονται ελεύθερα από τη National Aeronautics and Space Administration (NASA), χάρτες του W (διαστάσεις of 200 km×200 km, 1 km×1 km χωρική ανάλυση, 40000 pixels) παρήχθησαν για να ερευνηθούν οι στατιστικές ιδιότητες του W (MODIS, 2012).

Αρχικά, η ανάλυση των χαρτών του W έφερε στο φώς μια στενή σχέση μεταξύ του E_w και του S_w : η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) του S_w δεδομένου του E_w ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή, και οι κύριες παράμετροι της μ_p , σ_p στην (53) εξαρτώνται από το E_w . Δηλαδή:

$$p(S_w | E_w) = \frac{1}{S_w \sigma_p \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln S_w - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right] \quad (53)$$

όπου:

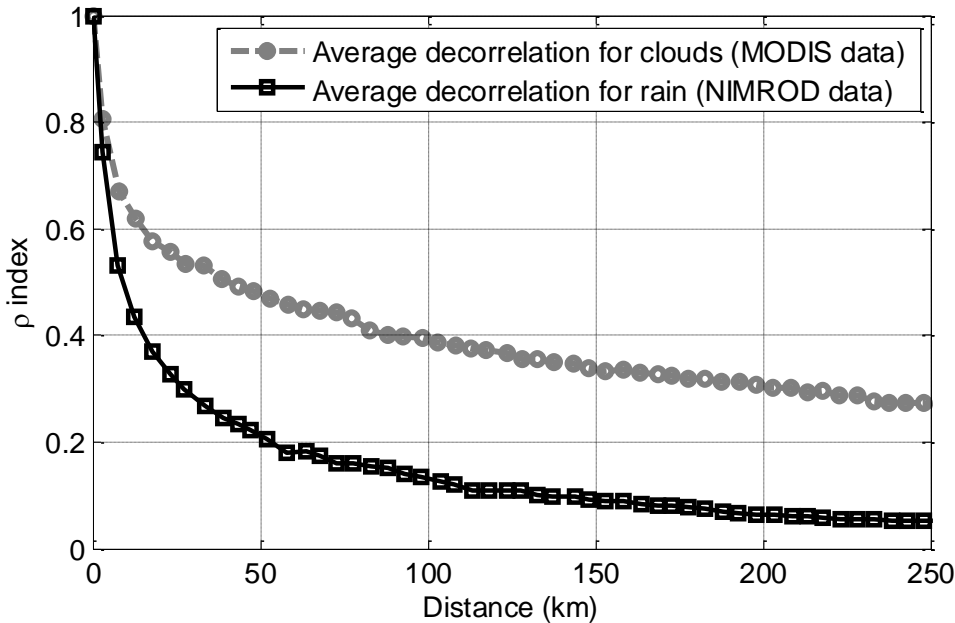
$$\begin{aligned} \mu_p(E_w) &= -5.61E_w^{-0.076} + 4.69 \\ \sigma_p(E_w) &= 1.03E_w^{-0.029} - 0.81 \end{aligned} \quad (54)$$

Με τη σειρά της, η κατανομή του W σε κάθε χάρτη 200 km×200 km (λα τα δείγματα στο χάρτη είναι υπό τη συνθήκη ότι το $W > 0$ mm) βρέθηκε ότι είναι και αυτή λογαριθμοκανονική. Επίσης η χωρική συσχέτιση των νεφών, ερευνήθηκε από τα δεδομένα του MODIS χρησιμοποιώντας το συνήθη δείκτη χωρικής συσχέτισης:

$$\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{E[W(\mathbf{x}) \cdot W(\mathbf{y})] - E[W(\mathbf{x})]E[W(\mathbf{y})]}{\sigma[W(\mathbf{x})] \sigma[W(\mathbf{y})]} \quad (55)$$

το $E[*]$ και το $\sigma[*]$ είναι οι τελεστές μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης αντίστοιχα, ενώ τα $W(\mathbf{x})$ και $W(\mathbf{y})$ είναι οι χρονοσειρές της περιεκτικότητας σε υγρό νερό του νέφους, που αντιστοιχούν στα x και y pixels σε κάθε χάρτη νεφών 200 km×200 km αντίστοιχα. Στο Σχήμα 6 απεικονίζεται η χωρική συσχέτιση του W που προέκυψε από το μέσο όρο όλων των τιμών του ρ σε σχέση με τα ζευγάρια pixels στην ίδια απόσταση (γκρι γραμμή με κύκλους).

Για λόγους σύγκρισης, έχει προστεθεί στο Σχήμα 6 η μέση χωρική συσχέτιση της βροχόπτωσης όπως λαμβάνεται από ένα σύνολο πεδίων βροχής που προέρχονται από το δίκτυο ραντάρ καιρού NIMROD (, 2012b Luini και Carsoni) , για να δειχθεί η υψηλότερη χωρική μεταβλητότητα των κατακρημνίσεων σε σχέση με τα νέφη. Τα αποτελέσματα στο Σχήμα 6 υποδεικνύουν μια τάση αποσυσχετισμού των νεφών που είναι ίδια με αυτή στο (Garcia et al., 2008) (μικρή μείωση με την απόσταση), όπου η χωρική συσχέτιση των νεφών ερευνήθηκε για 5 χρόνια και τα δεδομένα συλλέγονταν κάθε 6 ώρες σε 33 περιοχές τις Ισπανίας, ωστόσο, τα δύο σετ μετρήσεων, δεν είναι ευθέως συγκρίσιμα καθώς στο (Garcia et al., 2008) χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης στατιστικής εξάρτησης, αντί για τον δείκτη συσχέτισης και επιπλέον, η ποσότητα που ερευνήθηκε δεν είναι το W αλλά η κάλυψη f_w .

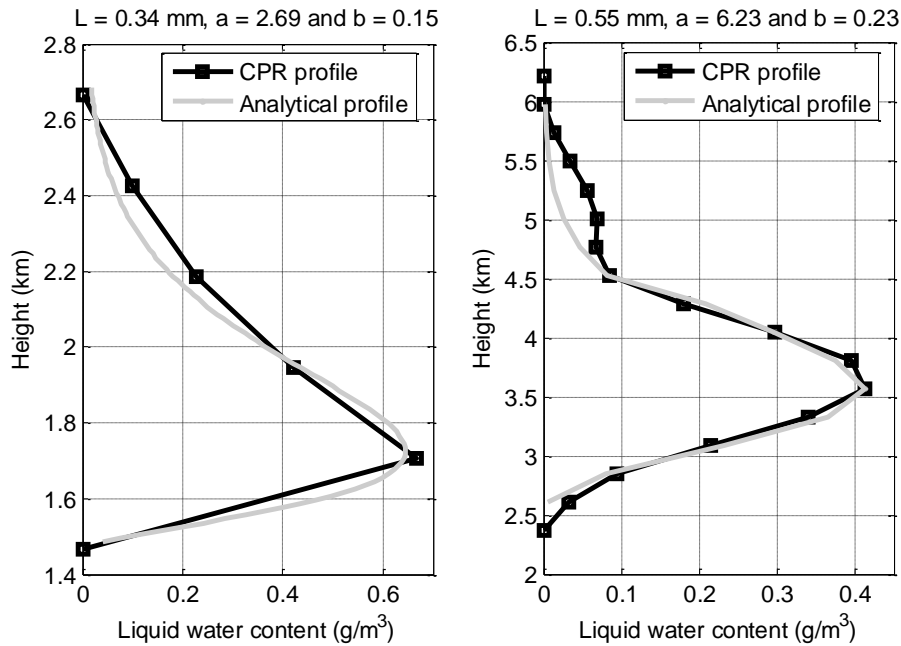


Σχήμα 3.6 Η μείωση της συσχέτισης με την απόσταση δύο σημείων του ολοκληρώματος της περιεκτικότητας σε υγρό νερό W , όπως υπολογίστηκε από τα δεδομένα του MODIS (γκρι καμπύλη με κύκλους), και του ρυθμού βροχόπτωσης R από τα δεδομένα του NIMROD (μαύρη καμπύλη με τετράγωνα)

Όπως γίνεται σαφές στο (Bell, 1987), η στοχαστική προσέγγιση στην οποία βασίζεται το SMOC για τη σύνθεση πεδίων/περιοχών νεφών, προέρχεται από τη δημιουργία τυχαίων Γκαουσιανών πεδίων, των οποίων η χωρική συσχέτιση $\rho_G(d)$ πρέπει να είναι γνωστή. Αυτό παρατηρήθηκε επίσης και κατά την πρώτη μετατροπή κάθε πεδίου νεφών του MODIS σε αποκομμένα Γκαουσιανά πεδία, όπου, υπό την θεώρηση της λογαριθμοκανονικής κατανομής του W , που αντιστοιχεί στην αναστροφή (61) που παρατίθεται στον Πίνακα 10 παρακάτω. Έπειτα η χωρική συσχέτιση των τυχαίων Γκαουσιανών διαδικασιών υπολογίζεται από τροποποιημένους χάρτες χρησιμοποιώντας την ίδια σχέση για το ρ όπως στην (55). Η προκύπτουσα μέση $\rho_G(d)$ εκφράζεται με τον παρακάτω αναλυτικό τύπο (d σε km):

$$\rho_G(d) = 0.35e^{-\frac{d}{7.8}} + 0.65e^{-\frac{d}{225.3}} \quad (56)$$

Ένα σημαντικό σημείο για την ακριβή πρόβλεψη της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών αποτελεί η κάθετη ανάπτυξη των νεφών, η οποία ερευνήθηκε στο (Luini and Carsoni, 2014b) εκμεταλλευόμενοι ένα άλλο προϊόν παρακολούθησης της Γης, Earth Observation product, δηλαδή συλλέχθηκαν πολλά κάθετα προφίλ του w (από το έδαφος έως 25km) με υψηλή χωρική ανάλυση (αποτύπωμα των $1.4 \text{ km} \times 1.7 \text{ km}$ και το προφίλ του δείγματος κάθε 240 m) από το Cloud Profiling Radar (CPR) στα 94-GHz στραμμένο προς το ναδίρ, πάνω στο δορυφόρο CloudSat (Stephens et al., 2002). Η ανάλυση διάφορων προφίλ (αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 7), επισημαίνει για τα περισσότερα νέφη, ότι το $w(h)$ έχει την τάση να παρουσιάζει ασυμμετρία με το ύψος h (η μέγιστη τιμή της περιεκτικότητας σε υγρό νερό παρουσιάζεται κοντά στη βάση του νέφους) και τα προφίλ σιγά σιγά φθίνουν στο μηδέν όσο αυξάνεται το ύψος.



Σχήμα 3.7 Παραδείγματα των κάθετων προφίλ της περιεκτικότητας σε υγρό νερό $w(h)$, όπως μετρήθηκε από το CPR που βρίσκεται επί του δορυφόρου CloudSat και με διαδικασία παλινδρόμησης με τη χρήση της έκφρασης (57).

Σύμφωνα με τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις, προτείνεται η παρακάτω αναλυτική έκφραση

(Luini and Capsoni, 2014b) για τη μοντελοποίηση του $w(h)$ (h σε km a.m.s.l.):

$$\tilde{w}(h) = \begin{cases} \frac{W}{b^a \Gamma(a)} (h - h_0)^{a-1} e^{-(h-h_0)/b} & \text{for } h \geq h_0 \\ 0 & \text{for } h < h_0 \end{cases} \quad (57)$$

Στην (57), τα a και b είναι παράμετροι που είναι υπεύθυνες για το σχήμα του $\tilde{w}(h)$, το h_0 είναι η βάση των νεφών, Γ είναι η κατανομή Γάμμα και W είναι το ολοκλήρωμα της περιεκτικότητας υγρού νερού του νέφους. Η αναλυτική έκφραση (57), προσαρμόζεται στα προφίλ τους Σχήματος 7, και πρέπει να περικόπτεται για να μοντελοποιήσουμε πραγματικά νέφη θέτοντας $\tilde{w}(h) = 0$ για $\tilde{w}(h) < 0.06 W$. Η περαιτέρω ανάλυση όλων των προφίλ των νεφών έδειξε ότι οι παράμετροι a, b στην (57) υπολογίζονται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$a = 4.27 e^{-4.93(W+0.06)} + 54.12 e^{-61.25(W+0.06)} + 1.71 \quad (58)$$

$$b = 3.17 a^{-3.04} + 0.074 \quad (59)$$

Συνεπώς με τη χρήση των (57), (58), (59) και απλή γνώση του W , καταλήγουμε στο κάθετο προφίλ της περιεκτικότητας υγρού νερού.

Το τελευταίο συμπέρασμα που εξήχθη από τα δεδομένα του CloudSat έχει να κάνει με τη βάση των νεφών h_0 . Στο SMOC γίνεται η υπόθεση ότι η βάση των νεφών σε μια δεδομένη περιοχή (200km x 200km) θεωρείται σταθερή και οι τιμές του h_0 ακολουθούν την extreme generalized value PDF:

$$p(h_0) = \frac{1}{\sigma} t(h_0)^{\xi+1} e^{-t(h_0)} \quad \text{with} \quad t(x) = \begin{cases} \left[1 + \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^\xi \right]^{-\frac{1}{\xi}} & \xi \neq 0 \\ e^{-(x-\mu)/\sigma} & \xi = 0 \end{cases} \quad (60)$$

όπου $\xi=0.484$, $\sigma=0.582$, $\mu=0.987$

3.5.6.2 Διαδικασία για τη Σύνθεση Πεδίων με Νέφη, (cloud fields)

Σύμφωνα με το SMOC, η οριζόντια σύνθεση των χώρων με νέφη σε μι διαδεδομένη περιοχή μπορεί να επιτευχθεί με τη γνώση των E_w και f_w . Με τη σειρά της αυτή η πληροφορία μπορεί να προέρχεται από τα δεδομένα του NWP. Για να γίνει πιο σαφής η διαδικασία της σύνθεσης, θα κάνουμε αναφορά στη βάση δεδομένων ECMWF ERA40 (Urrala et al., 2005), στην πραγματικότητα τα E_w και f_w παράγονται από δειγματοληψία κάθε 6 ώρες (δηλαδή σχεδόν στιγμιαίες τιμές κάθε 6 ώρες) και χωρική ανάλυση $2^\circ \times 2^\circ$ (γεωγραφικό πλάτος/μήκος) αντίστοιχα, που αντιστοιχεί περίπου σε $200\text{km} \times 200\text{km}$, σε περιοχές μέσου γεωγραφικού πλάτους.

Στον Πίνακα 10 συνοψίζεται βήμα προς βήμα η διαδικασία για πρακτική εφαρμογή του SMOC για τον υπολογισμό των στατιστικών της πρόβλεψης της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών.

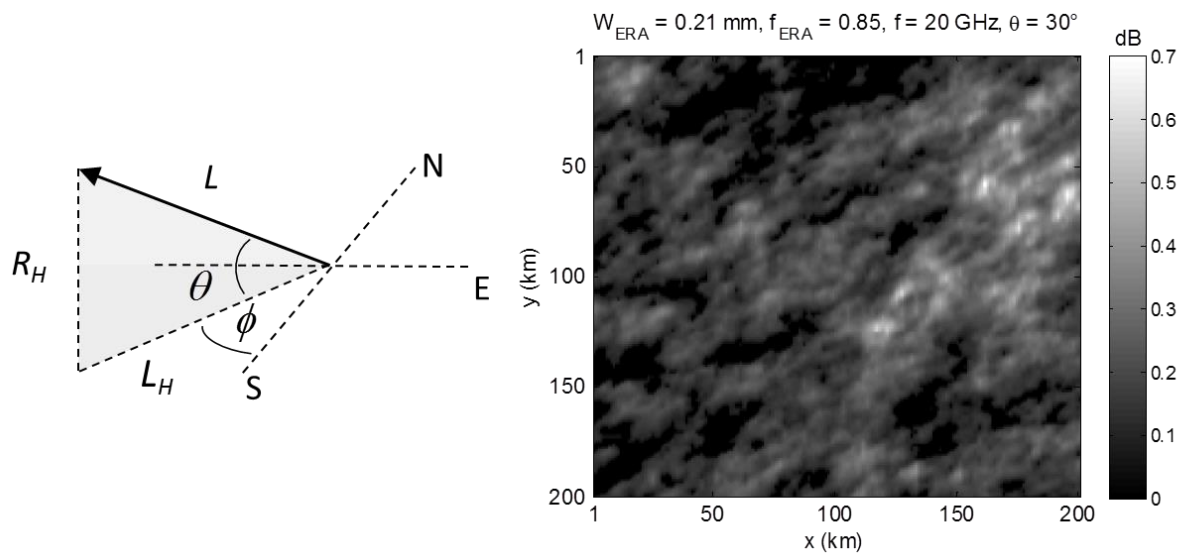
Είσοδοι	Έξοδοι
Γεωγραφικό μήκος και πλάτος της περιοχής Γωνία ανύψωσης θ Συχνότητα f	CCDF της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών A
Βήμα	Σχόλια
1. Η τμηματική κάλυψη νεφών (f_{ERA}) και ο χωρικός μέσος του ολοκληρώματος της περιεκτικότητας του υγρού νερού (W_{ERA}) εξάγονται από τη βάση δεδομένων ERA40. Ως εκ τούτου, $E_w = W_{ERA}$ (mm) και $f_w = f_{ERA}$ (0-1)	Για μια δεδομένη περιοχή με συντεταγμένες (lat, lon), οι f_{ERA} και W_{ERA} θα προκύψουν από γραμμική παρεμβολή των τιμών σε σχέση με τα περιβάλλοντα pixels, όπως προτάθηκε από το ECMWF
2. Από το E_w , εξάγουμε τα μ_p και σ_p όπως στην έκφραση (54)	Τα μ_p and σ_p καθορίζουν την $p(S_w E_w)$ στην έκφραση (53)
3. Το S_w εξάγεται τυχαία από τη λογαριθμοκανονική κατανομή $p(S_w E_w)$ που βρέθηκε στο βήμα 2	\
4. Δημιουργούμε τυχαίο Gaussian πεδίο $g(x,y)$ με χωρική συσχέτιση ρ_G , έκφραση (56)	Πληροφορίες για τη δημιουργία τυχαίου Gaussian πεδίου παρέχονται στο (Bell, 1987)
5. Υπολογισμός των μ_{LN} και σ_{LN} της λογαριθμοκανονικής κατανομής που χαρακτηρίζουν το χάρτη νεφών που θα δημιουργηθεί (για $W > 0$ mm):	μ_{LN} και σ_{LN} εξάγονται με αντιστροφή των παρακάτω εκφράσεων: $\begin{cases} E_w = f_w \exp(\mu_{LN} + \sigma_{LN}^2/2) \\ S_w = \sqrt{f_w \exp(2\mu_{LN} + 2\sigma_{LN}^2) - f_w^2 \exp(2\mu_{LN} + \sigma_{LN}^2)} \end{cases}$ Ενώ τα E_w και S_w στις παραπάνω εκφράσεις εξάγονται από τη βάση δεδομένων NWP, στο

$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{LN} = \ln \left[\frac{1}{f_w^{1.5}} \frac{E_w^2}{\sqrt{E_w^2 + S_w^2}} \right] \\ \sigma_{LN} = \sqrt{\ln \left[f_w \left(\frac{S_w^2}{E_w^2} + 1 \right) \right]} \end{array} \right.$	<p>δεξί σκέλος των παραπάνω εκφράσεων αναπαρίσταται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της τυχαίας μεταβλητής, με τιμή 0 για πιθανότητα $1-f_w$ (δεν υπάρχει κάλυψη από νέφη στη δεδομένη περιοχή) και εξάγεται ο από τη λογαριθμοκανονική κατανομή (με παραμέτρους μ_{LN} και σ_{LN}) με πιθανότητα f_w</p>
<p>6. Μετατροπή του Gaussian πεδίου $g(x,y)$ σε λογαριθμοκανονικό (lognormal) πεδίο νεφών $C(x,y)$: θέτουμε $C(x,y) = 0$ if $g < g_{th}$, αλλιώς:</p> $C(x,y) = \exp \left\{ \mu_{LN} + \sqrt{2} \sigma_{LN} \operatorname{erfc}^{-1} \left[\frac{1}{f_w} \operatorname{erfc} \left(\frac{g(x,y)}{\sqrt{2}} \right) \right] \right\}$ <p>(2)</p>	<p>$g_{th} = \sqrt{2} \operatorname{erfc}^{-1}(2f_w)$ και erfc είναι η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος (complementary error function).</p>
<p>7. Το ύψος της βάσης των νεφών h_0 εξάγεται τυχαία από τη generalized extreme value PDF έκφραση (60)</p>	<p>\</p>
<p>8. Για κάθε ρίxel του χάρτη που δημιουργήσαμε (δηλ. Κάθε τιμή του W), υπολογίζουμε τα a και b από τις εκφράσεις (58) and (59) and, και ως εκ τούτου, υπολογίζουμε το κάθετο προφίλ w με χρήση της έκφρασης (57)</p>	<p>\</p>
<p>9. Για κάθε θέση του σταθμού βάσης σε όλο το συνθετικό πλέγμα νεφών, ολοκληρώνουμε το w κατα μήκος του ραδιοδρόμου για να εξάγουμε το ολοκλήρωμα της περιεκτικότητας σε υγρό νερό</p>	<p>\</p>
<p>10. Υπολογίζουμε τον συντελεστή a απορρόφησης a_w από την έκφραση (48)</p>	<p>Όπως στον Πίνακα 7, η θερμοκρασία του υγρού νερού θεωρείται 0°C</p>
<p>11. Υπολογίζεται η απόσβεση στον κεκλιμένο ραδιοδρόμο σε dB χρησιμοποιώντας τις τιμές των a_w και W που εξάχθηκαν από το συνθετικό πλέγμα νεφών:</p> $A = a_w W$	<p>\</p>

Πίνακας 3-10 Βήμα προς βήμα η διαδικασία για πρακτική εφαρμογή του SMOG για τον υπολογισμό των στατιστικών της πρόβλεψης της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών (CCDF).

Λοιπόν, τα παραπάνω βήματα έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας τρισδιάστατης κατανομής της περιεκτικότητας σε υγρό νερό w , διατηρώντας τη βασική πληροφορία ολοκληρώματος του χώρου, field integral information, (f_{ERA} και W_{ERA}) και δημιουργώντας ξανά την οριζόντια και κάθετη χωρική συσχέτιση όπως παρατηρήθηκε στα πραγματικά νέφη. Χρησιμοποιώντας πολλαπλά ζευγάρια f_{ERA} και W_{ERA} που προέρχονται από τη βάση δεδομένων NWP (δηλαδή τα 5 χρόνια αντιστοιχούν σε 7300 δείγματα), είναι ως εκ τούτου είναι δυνατό να δημιουργηθεί ένα σημαντικό στατιστικό σετ χώρων νεφών, του οποίου το

σύνολο να αντικατοπτρίζει τις τοπικές στατιστικές ιδιότητες του ολοκληρώματος του υγρού νερού W και της περιεκτικότητας σε υγρό νερό w . Αυτό στην πραγματικότητα επαληθεύεται ικανοποιητικά στο (Luini and Carsoni, 2014b) χρησιμοποιώντας το ίδιο σετ δεδομένων που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα. στο Σχήμα 8 απεικονίζεται ένα παράδειγμα απόσβεσης εξαιτίας των νεφών που υφίσταται μία ζεύξη Γης - διαστήματος που λειτουργεί στο 20GHz και έχει γωνία ανύψωσης $\theta=30^\circ$. Η ζεύξη είναι στραμμένη στο Νότο ($\phi=0^\circ$ αριστερά στο Σχήμα 8) και η θέση του σταθμού βάσης μετακινείται σε όλη την περιοχή του νέφους για τον υπολογισμό του A για κάθε ρίξελ του χάρτη.



Σχήμα 3.8 Αριστερά: σχήμα αναφοράς για ζεύξεις Γης-διαστήματος που επηρεάζονται από νέφη.

Δεξιά: παράδειγμα του πεδίου της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών που εξήχθη από την αλληλεπίδραση της ζεύξης ($f = 20 \text{ GHz}$ and $\theta = 30^\circ$) και του πεδίου νεφών που δημιουργήθηκε με χρήση του SMOC (ERA40 είσοδοι: $W_{ERA} = 0.21 \text{ mm}$, $f_{ERA} = 0.85$).

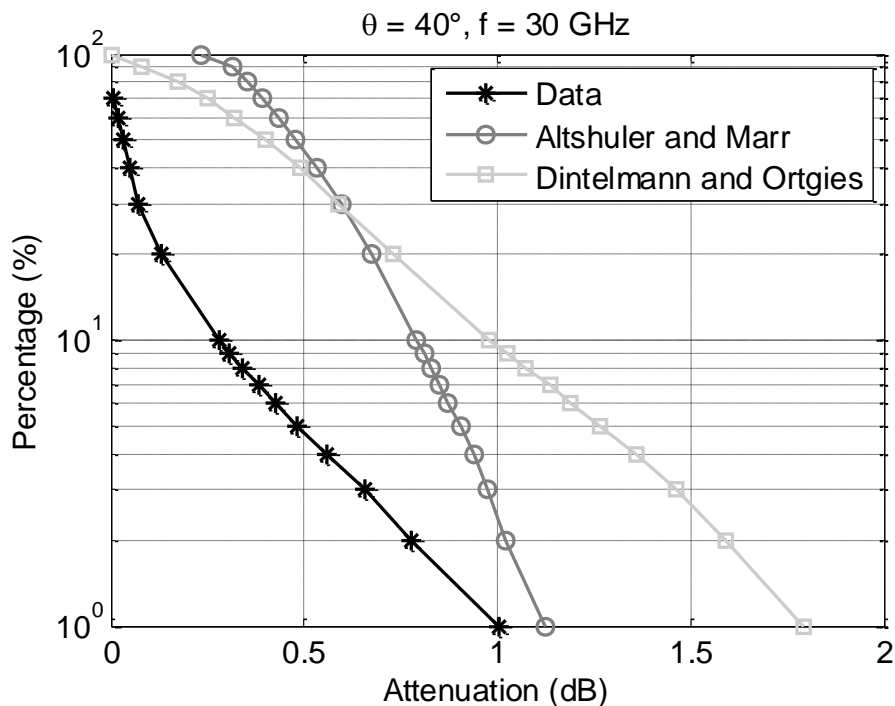
3.5.7 Σύγκριση Μοντέλων Απόσβεσης Εξαιτίας των Νεφών

Μια αναλυτική σύγκριση των μοντέλων απόσβεσης εξαιτίας των νεφών που περιγράφηκαν μέχρι τώρα δεν είναι ένα εύκολο έργο, όχι μόνο επειδή οι είσοδοι σε τέτοια μοντέλα ποικίλουν και δεν είναι πάντα εύκολα ανακτήσιμες, αλλά και λόγω της δυσκολίας εύρεσης αξιόπιστων δεδομένων βάσει των οποίων η ακρίβεια των μοντέλων μπορεί να αξιολογηθεί. Το τελευταίο μπορεί να ληφθεί από ραδιόμετρα μετά από κατάλληλη βαθμονόμηση του οργάνου και επεξεργασία της θερμοκρασίας θορύβου καθαρού ουρανού ληφθεί μόνο η απόσβεση εξαιτίας των νεφών. Μια πιο εύκολη εναλλακτική αναφερόμενοι στα στατιστικά δεδομένα της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών είναι η χρησιμοποίηση των δεδομένων από το ROBS ως είσοδο στο μοντέλο των Salonen και Uppala (για να ποσοτικοποιήσουμε το κάθετο προφίλ των νεφών) και μετά στο μοντέλο του Liebe MPM93 (για να υπολογιστεί η

ειδική εξασθένιση εξαιτίας των νεφών χρησιμοποιώντας τη Rayleigh προσέγγιση, δηλαδή τις εξισώσεις (39) και (40)). Με τον τρόπο αυτό κάθε σετ του προφίλ P-RH-T που συλλέγονται κατά τη διάρκεια μιας ραδιοβόλισης μπορεί να μετατραπεί σε μονοπάτι απόσβεσης που οφείλεται μόνο στα νέφη.

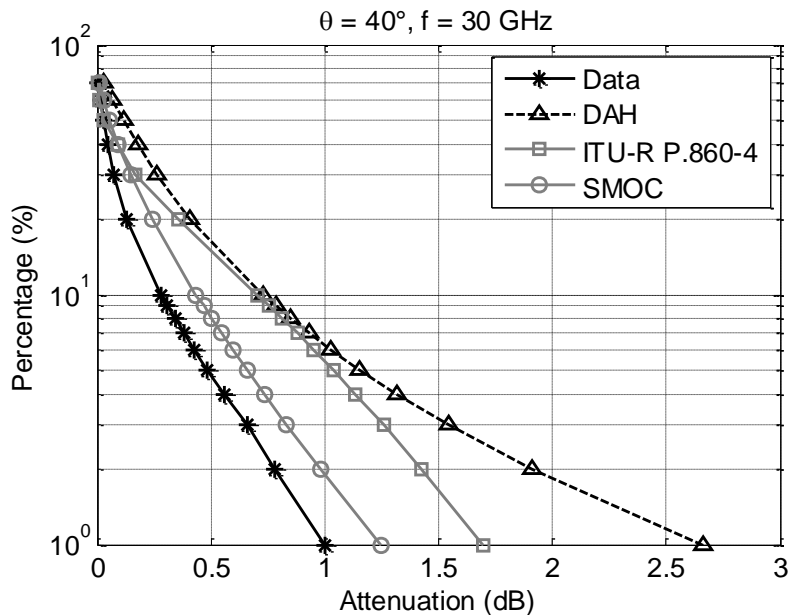
Προκειμένου να δοθεί τουλάχιστον μια βασική ιδέα για την συμπεριφορά και απόδοση των μοντέλων, χρησιμοποιήθηκαν τα εκτενή σετ δεδομένων του RAOBS που διατίθενται ελεύθερα από το College of Engineering of the University of Wyoming (RAOBS data). Ως παράδειγμα επιλέχθηκε ο σταθμός Nottingham/Watnall station (WMO - World Meteorological Organization code 03354), που βρίσκεται στην Αγγλία (γεωγραφικό πλάτος 53° Β και γεωγραφικό μήκος -1.25° Ε, υψόμετρο 117m a.m.s.l) και επιλέχθηκαν από το RAOBS τα αντίστοιχα προφίλ πίεσης, θερμοκρασίας, και σχετικής υγρασίας για δέκα χρόνια (2004-2013) σε σχέση με το 0 και 12 UTC. Η συνολική βάση δεδομένων του RAOBS περιλαμβάνει 6049 σετ P-RT-H προφίλ, τα οποία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της CCDF της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών (ζεύξη Γη - διάστημα με γωνία ανύψωσης $\theta=40^{\circ}$ και συχνότητα $f=30\text{GHz}$) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 9 και Σχήμα 10 χρησιμοποιώντας τη διαδικασία που παρουσιάστηκε παραπάνω. Για τη διευκόλυνση της αναγνωσιμότητας των αποτελεσμάτων οι καμπύλες έχουν χωριστεί σε δύο εικόνες.

Στο Σχήμα 9 απεικονίζονται τα αποτελέσματα από τη χρήση των μοντέλων των Altshuler-Marr και Dintelmann-Ortigies. Οι CCDFs σε αυτά τα δύο μοντέλα υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας ως εισόδους μετεωρολογικά δεδομένα (απόλυτη υγρασία ρ_{AH} για το πρώτο μοντέλο, και η περιεκτικότητα σε υδρατμούς ρ_o , καθώς και η θερμοκρασία T_o για το δεύτερο) που καταγράφηκαν με τη χρήση ραδιοβολίσεων κοντά στο έδαφος (υψόμετρο πρώτου στρώματος μεταξύ των 0 και 100 m). Και τα δύο μοντέλα έδειξαν αξιοσημείωτη υπερεκτίμηση της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών και πρόβλεψη για ύπαρξη νεφών για το 100% του ετήσιου χρόνου, ενώ η η καμπύλη αναφοράς υποδεικνύει ότι το 30% του ετήσιου χρόνου δεν υπάρχουν νέφη.



Σχήμα 3.9 Σύγκριση μοντέλων απόσβεσης εξαιτίας των νεφών: η CCDF αναφοράς ελήχθη με χρήση των δεδομένων του RAOBS σε συνδυασμό με τη μέθοδο ανίχνευσης νεφών των Salonen και Urrala και το μοντέλο απορρόφησης μάζας του Liebe MPM93 (μαύρη καμπύλη με αστερίσκους), επιπλέον οι καμπύλες πρόβλεψης των μοντέλων των Altshuler-Marr (καμπύλη με κύκλους) και των Dintelmann-Ortgies (καμπύλη με τετράγωνα).

Στο Σχήμα 10 απεικονίζονται τα αποτελέσματα των μοντέλων DAH (διακεκομμένη γραμμή με τρίγωνα), της ITU-R P.840-6 (συνεχής γραμμή με τετράγωνα) και το SMOC (συνεχής γραμμή με κύκλους). Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις τα δεδομένα εισόδου δεν προέρχονται από το RAOBS αλλά από ανεξάρτητες βάσεις δεδομένων για τα νέφη: χάρτες για την κάλυψη των νεφών για το DAH μοντέλο, παγκόσμιοι χάρτες για το ολοκλήρωμα της περιορισμένης περιεκτικότητας υγρού νερού W_R για τη μέθοδο που ακολουθείται στη ITU-R P.840-6 και από τη βάση δεδομένων ERA40 για το SMOC. Και τα τρία μοντέλα καταλήγουν σχεδόν στην ίδια πιθανότητα για την ύπαρξη απόσβεσης εξαιτίας της βροχής, (σχεδόν για το 70% του συνολικού χρόνου) και τείνουν στην υπερεκτίμηση. Η ακριβέστερη πρόβλεψη δίνεται από το SMOC και ακολουθεί η ITU-R P.840-6 και τέλος το DAH το οποίο παρουσιάζει όλο και μεγαλύτερη υπερεκτίμηση όσο μειώνεται το P(%).



Σχήμα 3.10 Σύγκριση μοντέλων απόσβεσης εξαιτίας των νεφών: η CCDF αναφοράς ελήχθη με χρήση των δεδομένων του RAOBS σε συνδυασμό με τη μέθοδο ανίχνευσης νεφών των Salonen και Urrala και το μοντέλο απορρόφησης μάζας του Liebe MPM93 (μαύρη καμπύλη με αστερίσκους), επιπλέον οι καμπύλες πρόβλεψης των μοντέλων του DAH (διακεκομμένη καμπύλη με τρίγωνα), της ITU-R P.840-6 (καμπύλη με τετράγωνα) και του SMOC (καμπύλη με κύκλους).

Παρόλο που τα αποτελέσματα που παρέχονται σε αυτή την ενότητα είναι απλά ένα παράδειγμα και δεν μας επιτρέπει να καταλήξουμε σε γενικά συμπεράσματα, η σύγκριση που φαίνεται στις εικόνες 9 και 10 αντικατοπτρίζουν το πόσο σύνθετη είναι η διαδικασία σύγκρισης των μοντέλων. Τα μοντέλα Altshuler-Marr και the Dintelmann-Ortgies δέχονται ως είσοδο αρκετά περιορισμένη επίγεια μετεωρολογική πληροφορία, για να αποφανθούν για την ύπαρξη των νεφών πάνω από την περιοχή και να ποσοτικοποιηθούν οι επιπτώσεις στη ζεύξη. Παράλληλα περιλαμβάνουν εμπειρικές εκφράσεις, των οποίων η εγκυρότητα για άλλες περιοχές είναι αμφίβολη. Αντιθέτως, τα τρία μοντέλα του Σχήματος 10 είναι εγγενώς εφαρμόσιμα παγκοσμίως, καθώς όλα βασίζονται σε παγκόσμιες βάσεις δεδομένων παρέχοντας απλότητα και θεμελιώδεις πληροφορίες για τα νέφη. Το μοντέλο DAH οφείλει τη μικρή του ακρίβεια στην αδρή χωρική ανάλυση των χαρτών με τα νέφη ($5^\circ \times 5^\circ$) και στην αρκετά απλουστευμένη παραδοχή του για την οριζόντια και κάθετη έκταση των νεφών, καθώς και στον μέσο όρο περιεκτικότητας υγρού νερού (Πίνακας 8). Το μοντέλο της ITU-R αποτελεί ένα μεγάλο βήμα προς τα μπροστά για τη μοντελοποίηση της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών καθώς λαμβάνει υπόψη τη συνολική κάθετη δομή των νεφών που παρέχεται από τη βάση δεδομένων ERA40. Σε αυτή την περίπτωση, οι περιορισμοί ακρίβεια του μοντέλου δεν οφείλονται στην προσέγγιση περιορισμένου υγρού (αποδίδονται πολύ μικρά σφάλματα (Luini et al., 2013)), αλλά πιθανότατα, από τον μέσο όρο των επιπτώσεων που σχετίζονται με την αδρή χωρική ανάλυση της βάσης δεδομένων ERA40 ($1.125^\circ \times 1.125^\circ$). Αυτό το ζήτημα λύνεται στο SMOC, με κόστος την αυξημένη πολυπλοκότητα, καθώς επωφελείται από την ίδια NWP βάση δεδομένων αλλά επιβάλλει από-ολοκλήρωση σε αυτά τα δεδομένα (π.χ. το μέσο χωρικό ολοκλήρωμα της περιεκτικότητας σε υγρό νερό E_w) για να ανακτήσει τις ενσωματωμένες αρχικές υψηλής ανάλυσης πληροφορίες για τα νέφη.

Επιπλέον συμβολή στην αύξηση της ακρίβειας του SMOC μοντέλου έχει η τρισδιάστατη αναπαράσταση της κατανομής της περιεκτικότητας σε υγρό νερό w , η οποία επιτρέπει αρκετά πιο ακριβείς προσομοιώσεις της αλληλεπίδρασης μεταξύ των νεφών και των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε μια ποικιλία σεναρίων, από αυτά που περιλαμβάνουν κλασικά γεωστατικούς δορυφόρους μέχρι αυτά που περιλαμβάνουν LEO δορυφόρους και deep space ανιχνευτές.

3.6 Αναφορές

(Abreu and Anderson, 1996) Abreu, L. W., and Anderson, G. P. (Eds.). The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 MODEL, prepared by Ontar Corporation for Phillips Laboratory, Geophysics Directorate (1996).

(Ahrens, 2013) Ahrens, C. D. (2013). "Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment (10th Ed.)." Brooks/Cole, Pacific Grove, CA, 640 pp.

(Al-Ansafi et al., 2003) Al-Ansafi, K., Garcia, P., Riera, J. M., Benarroch, A. (2003). "One-year cloud attenuation results at 50 GHz." Electronics Letters, Vol. 39, Issue 1, pp. 136 –137, 9 Jan. 2003.

(Altshuler and Marr, 1988) Altshuler, E., and Marr, R. A. (1988). "A comparison of experimental and theoretical values of atmospheric absorption at the longer millimeter wavelengths." IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 36, no. 10, pp. 1471-1480, Oct. 1988.

(Altshuler, 1989) Altshuler, E. (1989). "A simple expression for estimating attenuation by fog at millimeter wavelengths." IEEE Transactions On Antennas and Propagation, vol. AP-32, no. 7, pp. 757-758, 1989.

(Altshuler and Marr, 1989) Altshuler, E., and Marr, R. (1989). "Cloud attenuation at millimetre wavelengths." IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 37, 1473-1479, 1989.

(Andrews and Philips, 1998) Andrews, L. C., and Phillips, R. L (1998). "Laser Beam Propagation through Random Media." Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering, 1998.

(Bell, 1987) Bell, T. L. "A Space-Time Stochastic Model of Rainfall for Satellite Remote-Sensing Studies." Journal Of Geophysical Research, Vol. 92, No. D8, pp. 9631-9643, 1987.

(Bolton, 1980) Bolton, D., "The computation of equivalent potential temperature." Monthly Weather Review, 108, 1046-1053, 1980.

(Born and Wolff, 1999) Born M., and Wolff E. (1999). "Principles of optics." Cambridge University Press, 1999.

(Davie et al., 1998) Davies, O.T., Howell, R.G., Watson, P.A. (1998). "Measurement and modelling of cloud attenuation at millimetre wavelengths." Electronics Letters, 10th December 1998, Vol. 34, No. 25.

(Deirmedjian , 1969) Deirmedjian, D. (1969). "Electromagnetic scattering on spherical polydispersions." American Elsevier Publishing, New York, 1969.

(Deirmedjian , 1975) Deirmedjian, D. (1975). "Far-infrared and submillimeter wave attenuation by clouds and rain." J. Appl. Meteorol., Vol. 14, pp. 1584-1593.

(Deng et al., 2009) Deng, Z., Zhao, C., Zhang, Q., Huang, M., Ma, Xi. (2009). "Statistical analysis of microphysical properties and the parameterization of effective radius of warm clouds in Beijing area." *Atmospheric Research* **93**:4, 888-896. Online publication date: 1-Aug-2009.

(Dintelmann and Ortgies, 1989) Dintelmann, F., and Ortgies, G. (1989). "Semi-empirical model for cloud attenuation prediction." *Electron. Lett.*, 25, 1487-1479, 1989.

(Dissanayake et al., 1997) Dissanayake, A., Allnut, J., Haidara, F. (1997). "A prediction model that combines rain attenuation and other propagation impairments along Earth-satellite paths." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 45 (10), 1546-1558, 1997.

(Dissanayake et al., 2001) Dissanayake, A., Allnut, J., Haidara, F. (2001). "Cloud attenuation modelling for SHF and EHF applications." *Int. J. Satell. Commun.* 2001; 19:335-345.

(Du, 2004) H. Du (2004). "Mie-scattering calculation." *Appl. Opt.*, 43, p.1951-1956, 2004.

(Durbin, 1959) Durbin, W. G. (1959). "Droplet sampling in cumulus clouds." *Tellus Vol. 11*, pp. 202-215.

(ECMWF, 2014) ECMWF (2014). The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) website, <http://www.ecmwf.int/>, last accessed July 2014.

(EUMETSAT, 2014) EUMETSAT (2014), <http://www.eumetsat.int/>, site of the European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, last accessed on July 2014.

(Garcia et al., 2008) Garcia, P., Benarroch, A., Riera, J. M. (2008). "Spatial distribution of cloud cover." *Int. J. Satell. Commun.* 2008; 26:141-155.

(Hale and Querry, 1973) Hale G.M., Querry, M.R. (1973). "Optical constants of water in the 200 nm to 200 μ m wavelength region." *Appl. Opt.*, Vol. 12, pp. 555-563.

(Hemmati et al., 2011) Hemmati H., Biswas, A., Djordjevic, I. B. (2011). "Deep-space optical communications: future perspectives and applications." *Proc. IEEE Vol. 99 (11)*, pp. 2020-2039 (2011).

(Hess et al., 1998) Hess, M., Koepke, P., Schult, I. (1998). "Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC.", *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 831-844

(Ippolito, 2008) Ippolito, L. J. (2008). "Satellite Communications Systems Engineering Handbook: Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance." Hoboken, NJ: Wiley, 2008.

(Ishimaru, 1978) Ishimaru, A. (1978). "Wave propagation and scattering in random media." Academic Press, 1978.

(Ito, 1989) Ito, S. (1989). "Dependence of 0°C isotherm height of temperature at ground level in rain." Trans. IEICE, 1989, E72, (2), pp.98-100.

(ITU-R P.618-11) ITU-R recommendation P.618-11 (2013). "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems ." Geneva, Switzerland, 2013.

(ITU-R P.840-6) ITU-R recommendation P.840-6 (2013). "Attenuation due to clouds and fog." Geneva, Switzerland, 2013.

(Kim et al., 2001) Kim, I.I., McArthur, B., Korevaar, E. (2001) "Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications." in Optical Wireless Communications III, E. Korevaar, ed., Proc. SPIE 4214, 26–37, 2001.

(King et al., 2003) King, M.d., Menzel W.p., Kaufman Y.j., Tanre D., Bo-Cai Gao, Platnick S., Ackerman S.A., Remer L.A., Pincus R., and Hubanks P.A. "Cloud and Aerosol Properties, Precipitable Water, and Profiles of Temperature and Water Vapor from MODIS", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Vol. 41 (2) (2003) pp. 442-58.

(Liebe et al., 1993) Liebe, H. J., Hufford, G. A., Cotton, M. G. (1993). "Propagation modeling of moist air and suspended water/ice particles at frequencies below 1000 GHz", in Proc. AGARD 52nd Spec. Meeting EM Wave Propag. Panel, Palma De Maiorca, Spain, pp. 3.1–3.10, 1993.

(Luini et al., 2007) Luini, L., Riva, C., Capsoni, C., Martellucci, A. (2007). "Attenuation in non rainy conditions at millimeter wavelengths: assessment of a procedure." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, pp. 2150-2157, Vol. 45, Issue 7, July 2007.

(Luini and Capsoni, 2012) Luini, L., and Capsoni, C. (2012). "A Methodology to Generate Cloud Attenuation Fields From NWP Products", European Conference on Antennas and Propagation 2012, pp. 1-5, 26-30 March 2012, Prague, Czech Republic.

(Luini and Capsoni, 2012b) Luini, L., and Capsoni, C. (2012). "The Impact of Space and Time Averaging on The Spatial Correlation of Rainfall." Radio Science, 47, RS3013, doi:10.1029/2011RS004915, 2012.

- (Luini and Capsoni, 2013) Luini, L., and Capsoni, C. (2013). "A Rain Cell Model for the Simulation and Performance Evaluation of Site Diversity Schemes." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 12, No. 1, Page(s): 1327-1330, 2013.
- (Luini and Capsoni, 2013b) Luini, L., and Capsoni, C. (2013). "On the Relationship Between the Spatial Correlation of Point Rain Rate and of Rain Attenuation on Earth-Space Radio Links." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 10, Page(s): 5255 - 5263, October 2013.
- (Luini et al., 2013) Luini, L. Riva, C., Capsoni, C. (2013). "Reduced liquid water content for cloud attenuation prediction: the impact of temperature." *Electronics Letters*, Vol. 49, Issue 20, pp. 1259 –1261, 26 September 2013.
- (Luini and Capsoni, 2014) Luini, L., and Capsoni, C. (2014). "Efficient Calculation of Cloud Attenuation for Earth-space Applications." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 13, No. 1, pp. 1136-1139, December 2014.
- (Luini and Capsoni, 2014b) Luini, L., and C. Capsoni, (2014). "Modeling High Resolution 3-D Cloud Fields for Earth-space Communication Systems." to appear in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (Vol. 62, No. 10, 2014).
- (McCartney, 1976) McCartney, E. J. "Optics of the Atmosphere: Scattering by Molecules and Particles", New York: Wiley, 1976.
- (Manabe et al., 1987) Manabe, T., Liebe, H. J., Hufford, G.A. (1987). "Complex permittivity of water between 0 and 30 THz." 12th International Conference on Infrared and Millimeter Waves, pp. 229-230, 1987.
- (Marshall and Palmer, 1948) Marshall J.S., Palmer, W. Mc K. (1948). "The Distribution of Raindrops with Size." *Journal of Meteorology*, Vol. 5, pp. 165-166, 1948.
- (Martellucci et al., 2002) Martellucci, A., Poiares-Baptista, J. P. V., Blarzino, G. (2002). "New climatological databases for ice depolarisation on satellite radio links." paper presented at COST Action 280, First Int. workshop, PM3037, Jul 2002.
- (Miles et al., 2000) Miles, N. L., Verlinde, J., Clothiaux, E. E. (2000). "Cloud Droplet Size Distributions in Low-Level Stratiform Clouds." *J. Atmos. Sci.*, Vol. 57, pp. 295-311.
- (MODIS, 2012) Members of the MODIS Characterization Support Team (2012). "MODIS Level 1B Product User's Guide." July 20, 2012
- (NASA, 2014) NASA (2014) "Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer (LADEE)." 14 January 2014, http://www.nasa.gov/mission_pages/ladee/main/#.U9nhb7E2STp (31 July 2014).

(Platt, 1997) Platt, C. M. R. (1997). "A parameterization of the visible extinction coefficient of ice clouds in terms of the ice water content." *J. Atmos. Sci.*, Vol. 54, pp. 2083-2098, 1997.

(Petty and Huang, 2011) Petty, G. W., and Huang, W. (2011) "The Modified Gamma Size Distribution Applied to Inhomogeneous and Nonspherical Particles: Key Relationships and Conversions." *J. Atmos. Sci.*, **68**, 1460–1473, 2011.

(RAOBS data) <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>, accessed July 2014.

(Riva et al., 2014) Riva, C., Capsoni, C., Luini, L., Luccini, M., Nebuloni, R., Martellucci, A. (2014) "The Challenge of Using the W Band in Satellite Communication." *Int. J. Satell. Commun. Network.* 2014; 32:187–200.

(Rozenberg, 1974) Rozenberg, V. I. (1974). "Scattering and attenuation of electromagnetic radiation by atmospheric particles." NASA TT F-771, Feb. 1974.

(Salonen and Uppala, 1991) Salonen, E. , and Uppala, S. (1991). "New prediction method of cloud attenuation." *Electron. Lett.*, vol. 27, no. 12, pp. 1106–1108, Jun. 1991.

(ScattPort) ScattPort (2014). The Light Scattering Information Portal website. <http://www.scattport.org/>, accessed July 2014.

(Shettle, 1989) Shettle, E. P. (1989). "Models of aerosols, clouds and precipitation for atmospheric propagation studies." AGARD conference 454 (15), pp. 1-13, 1989.

(Slingo, 1982) Slingo, A., and Schrecker H. M. "On the Shortwave Radiative Properties of Stratiform Water Clouds." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 108, 1982, pp. 407-426.

(Slobin, 1982) Slobin, S. D. (1982). "Microwave noise temperature and attenuation of clouds: statistics of these effects at various sites in the United States, Alaska, and Hawaii." *Radio Science*, 1982,17, pp. 1443-1454.

(Squire, 1958) Squires, P. (1958). "The microstructure and colloidal stability of warm clouds. I. The relation between structure and stability." *Tellus* Vol. 10, pp. 256-261.

(Stephens et al., 2002) Stephens, G. L., Vane, D. G., Boain, R. J., et al. (2002). "The CloudSat mission and the A-TRAIN: A new dimension to space-based observations of clouds and precipitation." 2002, *Bull. Am. Met. Soc.*, 83, 1771-1790.

(Strickland et al., 1999) Strickland, B. R., Lavan, M. J., Woodbridge, E., Chan, V. (1999) "Effects of Fog on the Bit-Error Rate of a Free-Space Laser Communication System." *Applied Optics* 38.3 (1999): 424.

(Tamperi and Tomasi, 1976) Tampieri F., and Tomasi C. (1976). "Size distribution models of fog and cloud droplets in terms of the modified gamma function." *Tellus*, Vol. XXVIII, pp.333-347, 1976.

(Ulaby et al., 1981) Ulaby, F. T., Moore, R. K., Fung, A.K. (1981). "Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Vol. I -- Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry." Addison-Wesley, Advanced Book Program, Reading, Massachusetts, 456 pages.

(Uppala et al., 2005) Uppala, S. M. et al. (2005). "The ERA-40 re-analysis." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume 131, Issue 612, pages 2961–3012, October 2005 Part B.

(Van de Hulst, 1957) Van de Hulst, H. C. (1957). "Light Scattering by Small Particles." New York: John Wiley & Sons, 1957.

(Warren and Brandt, 2008) Warren, S. G., Brandt, R. E. (2008). "Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: A revised compilation." *J. Geophys. Res.*, 113, D14220,

(Warren et al., 1986) Warren, S.G. et al. (1986). "Global distribution of total cloud cover and cloud type amounts over land." National Center for Atmospheric Research (NCAR) Technical Notes, NCAR/N-273, October 1986.

(Wiscombe, 1979) Wiscombe, W. J. (1979). "Mie Scattering Calculations: Advances in Technique and Fast, Vector-Speed Computer Codes." NCAR TECHNICAL NOTE, June 1979 (edited/revised August 1996).

(Wiscombe, 1980) Wiscombe, W. J. (1980). "Improved Mie scattering algorithms." *Appl. Opt.*, 19, p.1505-1509, 1980.

(Zuev, 1970) Zuev, V. E. (1970). "Atmospheric transparency in the visible and the infrared." Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1970.

Κεφάλαιο 4

Μοντέλο Υπολογισμού Απόσβεσης Νεφών με χρήση Στοχαστικών Διαφορικών Εξισώσεων

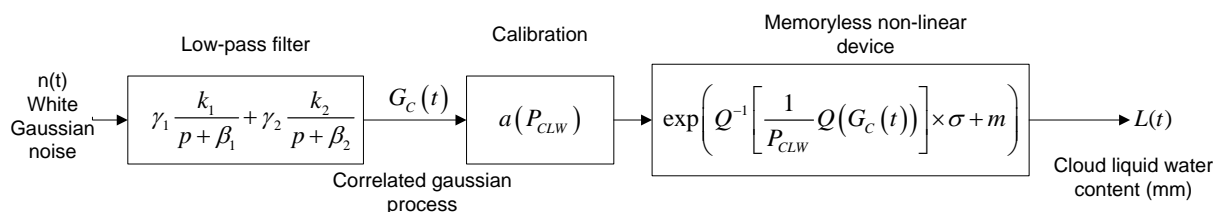
4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο αναδεικνύεται ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι 1^{ης} τάξης Στοχαστικές Διαφορικές Εξισώσεις για την σύνθεση των χρονοσειρών του ολοκληρώματος της περιεκτικότητας του υγρού νερού στα νέφη, (integrated cloud liquid water content, ILWC), που αποτελεί τον κύριο παράγοντα και το κυρίως δεδομένο για τον υπολογισμό της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών σε μια δορυφορική ζεύξη. Παράλληλα θα παρουσιαστεί μια νέα προσέγγιση για τον υπολογισμό της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών, που βασίζεται στη διεθνή βιβλιογραφία και στα μέχρι τώρα προτεινόμενα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

4.2 Χρήση Στοχαστικών Διαφορικών 1ης Τάξης για το ILWC

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του ILWC όπως έχει αποδειχθεί μετά από μελέτες ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή (Jeannin, 2008)(ITU-R P.840-6).

Στην (ITU-R P.1853-1) προτείνεται το παρακάτω block διάγραμμα για τη σύνθεση χρονοσειρών για το ILWC :



Σχήμα 4.1 Block διάγραμμα για τη σύνθεση χρονοσειρών ILWC (ITU-R P.1853-1)

m = μέση τιμή της λογαριθμοκανονικής κατανομής του ILWC

σ = η τυπική απόκλιση της λογαριθμοκανονικής κατανομής του ILWC

P_{CLW} = η πιθανότητα εμφάνισης των νεφών

a = όριο αποκοπής συσχετισμένου Γκαουσιανού θορύβου

β_1 = δυναμική παράμετρος που περιγράφει τη χρονική εξάρτηση της διαδικασίας, fast component (s^{-1})

β_2 =δυναμική παράμετρος που περιγράφει τη χρονική εξάρτηση της διαδικασίας, slow component (s^{-1})

γ_1 =παράμετρος που περιγράφει το βάρος της διαδικασίας, fast component

γ_2 =παράμετρος που περιγράφει το βάρος της διαδικασίας, slow component

Οι παράμετροι $\beta_1, \beta_2, \gamma_1, \gamma_2$ είναι σταθερές με τιμές (ITU-R P.1853-1) :

$$\beta_1 = 7.17 \times 10^{-4} \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

$$\beta_2 = 2.01 \times 10^{-5} \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

$$\gamma_1 = 0.349$$

$$\gamma_2 = 0.830$$

Στο παραπάνω μοντέλο, αρχικά παράγονται δύο τυχαίες διαδικασίες Markov πρώτης τάξης, οι οποίες ακολουθούν την κανονική κατανομή. Η έξοδος των δύο βαθυπερατών φίλτρων είναι η ίδια διαδικασία όπως αυτή περιγράφεται από τους Maseng και Bakken για Κανονικές διαδικασίες με συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης εκθετικά μειούμενου με τη διαφορά χρόνου (M-B).

Στο σημείο αυτό για καλύτερη και ακριβέστερη μοντελοποίηση στην προσομοίωση θα χρησιμοποιηθεί η θεωρία των στοχαστικών διαφορικών εξισώσεων που παρουσιάζεται στο (Κανελλόπουλος, 2007), αντί η χρήση ενός απλού βαθυπερατού φίλτρου. Μπορούμε εύκολα να δούμε ότι το $G_c(t)$ αποτελείται από τη σύνθεση δύο τυχαίων στάσιμων διαδικασιών Markov 1^{ης} τάξης. Μια συνεχής στάσιμη τυχαία διαδικασία Markov, ονομάζεται διαδικασία διάχυσης και περιγράφεται από μια 1^{ης} τάξης Στοχαστική Διαφορική Εξίσωση της μορφής (Stratonovich, 1963).

$$\dot{x} = f(x) + g(x)\xi(t) \quad (1)$$

Όπου $\dot{x} = \frac{d}{dt} x(t)$ η χρονική παράγωγος που δρα επί της διαδικασίας, $\xi(t)$ ο λευκός

θόρυβος μοναδιαίου πλάτους και $W(t)$ η διαδικασία Wiener (Paroulis, 1991).

όπου :

$$K_1(x) = f(x) \quad (2)$$

$$K_2(x) = g^2(x) \quad (3)$$

οπότε παίρνει τη μορφή

$$\dot{x} = K_1(x(t)) + \sqrt{K_2(x(t))} * \xi(t) \quad (4)$$

Είναι γνωστό από (M-B) ότι για κανονική κατανομή με εκθετικά μειούμενη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, ισχύει ότι:

$$K_1(x) = -\beta_i x \quad (5)$$

$$K_2(x) = 2\beta_i \quad (6)$$

Η μορφή συνεπώς δίνεται από τη σχέση:

$$X_t = x_0 - \beta_i \cdot \int_0^t X_s ds + \int_0^t \sqrt{2 \cdot \beta_i} dB_s \quad (7)$$

Έτσι από τις εξισώσεις του Παραρτήματος Β (Κανελλόπουλος, 2007) παίρνουμε τη λύση του $X(t)$:

$$X_i = \exp(-\beta_i \cdot t) \cdot \left(x_0 + \sqrt{2 \cdot \beta_i} + \int_0^t \exp(-\beta_i \cdot s) \cdot dB_s \right) \quad (8)$$

Όπως προείπαμε στο block διάγραμμα το G_c ισούται με τη σύνθεση δύο στάσιμων τυχαίων διαδικασιών Markov. Η πρώτη έστω $X_1(t)$ θα έχει λύση σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία με $\beta_1 = 7.17 \times 10^{-4} \text{ (s}^{-1}\text{)}$, και αντίστοιχα η δεύτερη $X_2(t)$ με $\beta_2 = 2.01 \times 10^{-5} \text{ (s}^{-1}\text{)}$. Η εκτίμηση των m , σ , P_{CLW} για τη λογαριθμοκανονική κατανομή θα γίνει με τη χρήση της (ITU-R P.840), για την περιοχή ενδιαφέροντος ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος/μήκος.

Έτσι λοιπόν:

$$G_c = \gamma_1 \cdot X_1(t) + \gamma_2 \cdot X_2(t) \quad (9)$$

Δηλαδή:

$$G_c(kT_s) = \gamma_1 \cdot X_1(kT_s) + \gamma_2 \cdot X_2(kT_s) \quad (10)$$

όπου :

T_s : η περίοδος του ρυθμού δειγματοληψίας

k : ο αριθμός του δείγματος

Στη συνέχεια ακολουθώντας τα επόμενα βήματα της (ITU-R P.1853-1) υπολογίζουμε το α δηλαδή

$$a = Q^{-1}(P_{CLW}) \quad (11)$$

και έχουμε:

$$L(kT_s) = \left\{ \begin{array}{ll} \exp\left(Q^{-1}\left(\frac{1}{P_{CLW}} Q(G_c(kT_s))\right) \times \sigma + m\right) & G_c(kT_s) \geq \alpha \\ 0 & G_c(kT_s) \leq \alpha \end{array} \right\} \quad (12)$$

4.3 Δημιουργία Χωροχρονικά Συσχετισμένων ILWC

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάσαμε τον τρόπο με τον οποίο συνθέτουμε χρονοσειρές για το ILWC με τη χρήση Στοχαστικών Διαφορικών Εξισώσεων 1^{ης} τάξης υπό τη θεώρηση ότι το ILWC είναι στοχαστική τυχαία διαδικασία Markov 1^{ης} τάξης. Με αυτή τη μέθοδο αναφερόμαστε μόνο σε ένα σημείο στο χώρο και αγνοούμε τελείως την χωρική μεταβλητότητα του ILWC. Για το λόγο αυτό στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστεί ένα μοντέλο που λαμβάνει υπ' όψιν του και τη χωρική συσχέτιση του ILWC και μπορεί να εφαρμοστεί για τον υπολογισμό του ILWC κατά μήκος ενός ραδιοδρόμου υπό νέφος. Το μοντέλο θα ενσωματώνει τη χωρική και χρονική μεταβλητότητα του ILWC, είναι βασισμένο στις Στοχαστικές Διαφορικές Εξισώσεις, και θα αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για τη παραγωγή χωρο-χρονικά συσχετισμένων ILWC.

Αρχικά σύμφωνα με το (Karagiannis, 2012) θα παρουσιαστούν επιγραμματικά οι βασικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται για λύση μιας γραμμικής n-διάστατης Στοχαστικής

Διαφορικής Εξίσωσης στην περίπτωση μας για την παραγωγή χωρο-χρονικά εξαρτημένων ILWC.

Η n-διάστατη Στοχαστική Διαφορική Εξίσωση είναι της μορφής:

$$d\mathbf{X}_t = \mathbf{B} \cdot \mathbf{X}_t dt + \mathbf{S} \cdot d\mathbf{W}_t \quad (13)$$

με

$$\mathbf{X}_i = \frac{\ln\left(\frac{L_i(t)}{\exp(m)}\right)}{\sigma} \quad (14)$$

η οποία έχει λύση (Κανελλόπουλος, 2007) :

$$\mathbf{X}_t = e^{t\mathbf{B}} \cdot \mathbf{X}_0 + e^{t\mathbf{B}} \cdot \int_0^t e^{-s\mathbf{B}} \cdot \mathbf{S} \cdot d\mathbf{W}_s \quad (15)$$

όπου \mathbf{B} είναι ο διαγώνιος πίνακας

$$\mathbf{B}=[b_{ij}] \quad \text{με } 1 \leq i, j \leq n \quad (16)$$

με στοιχεία:

$$b_{ij} = -\beta_i \cdot \delta_{ij} \quad (17)$$

με δ_{ij} τη συνάρτηση δέλτα του Kronecker και $\beta_i, 1 \leq i \leq n$ οι δυναμικές παράμετροι του ILWC που όπως παρουσιάστηκε παραπάνω είναι δύο $\beta_1=7.17 \times 10^{-4} \text{ (s}^{-1}\text{)}$, $\beta_2=2.01 \times 10^{-5} \text{ (s}^{-1}\text{)}$

$\mathbf{W}(t)$ είναι η n-διάστατη διαδικασία Wiener δηλαδή οι $W_i(t) 1 \leq i \leq n$, είναι ανεξάρτητες διαδικασίες Wiener.

$$\mathbf{W}(t) = [W_1(t), \dots, W_n(t)]^T \quad (18)$$

Για τον υπολογισμό του \mathbf{S} αρχικά θα ορίσουμε τον πίνακα συσχέτισης \mathbf{C} .

Ο πίνακας αυτός θα περιέχει την πληροφορία που σχετίζεται με την χωρική συσχέτιση του ILWC. Δηλαδή όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή της ενότητας το ILWC διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Είναι φυσικό λοιπόν ακόμα και για την ίδια ζεύξη το σήμα μας να υφίσταται εξασθένηση από διαφορετικές ομάδες νεφών, δηλαδή από διαφορετικά ILWC (ως προς το χώρο) τα οποία όμως όσο πιο κοντά είναι το ένα με το άλλο τόσο μεγαλύτερη συσχέτιση έχουν. Η συσχέτιση $\rho_{i,j}$ των μεταβλητών X_i και X_j της (14), εξαρτάται από την απόσταση και εκφράζεται σύμφωνα με τη σχέση (56) του προηγούμενου κεφαλαίου (Luini and Capsoni, 2014b):

$$\rho_G(d) = 0.35e^{-\frac{d}{7.8}} + 0.65e^{-\frac{d}{225.3}} \quad (19)$$

Έχουμε λοιπόν τον πίνακα συσχέτισης \mathbf{C}

$$C = \begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \rho_{1,n} \\ \cdot & 1 & & & \cdot \\ \cdot & & 1 & & \cdot \\ \cdot & & & 1 & \cdot \\ \rho_{n,1} & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix}$$

και έπειτα τον πίνακα **G**:

$$G = 2 \cdot \beta_i \cdot C \quad (20)$$

και από τη σχέση:

$$G = S \cdot S^T \quad (21)$$

θα υπολογίσουμε τελικά το **S** (μέσω της μεθόδου Cholesky) το οποίο και χρησιμοποιούμε στην (15).

Λοιπόν για την υλοποίηση συσχετισμένων ILWC θα θεωρήσουμε δύο n-διαστατες Στοχαστικές Διαφορικές Εξισώσεις όπου το n θα είναι ο αριθμός των διαφορετικών σημείων στα οποία υπολογίζεται το ILWC ,δηλαδή περιοχών από νέφη (cloud fields) ,που θα υλοποιήσουμε. Έστω λοιπόν X_{1n} η πρώτη και X_{2n} η δεύτερη με αντίστοιχες τιμές β_1 και β_2 . Με τη χρήση της (ITU-R P.840), θα υπολογιστούν τα m , σ , P_{CLW} (αυτά είτε μπορεί να είναι ίδια για κάθε ILWC αν μιλάμε για μια περιοχή ενδιαφέροντος, είτε διαφορετικά αν οι ζεύξεις μας είναι σε διαφορετικές περιοχές).

Έχοντας αποκτήσει τα στατιστικά αυτά στοιχεία μπορεί να ξεκινήσει η υλοποίηση της παραπάνω διαδικασίας, δηλαδή τον υπολογισμό των πινάκων **B**, **C**, **S** και της n-διάστατης διαδικασίας Wiener.

Καταλήγουμε λοιπόν ότι :

$$G_{cn} = \gamma_1 \cdot X_{1n}(t) + \gamma_2 \cdot X_{2n}(t) \quad (22)$$

Δηλαδή

$$G_{cn}(kT_s) = \gamma_1 \cdot X_{1n}(kT_s) + \gamma_2 \cdot X_{2n}(kT_s) \quad (23)$$

Στη συνέχεια ακολουθώντας τα επόμενα βήματα της (ITU-R P.1853-1) υπολογίζουμε το a δηλαδή:

$$a = Q^{-1}(P_{CLW}) \quad (24)$$

και έχουμε:

$$L_n(kT_s) = \left\{ \begin{array}{ll} \exp(Q^{-1}(\frac{1}{P_{CLW}} Q(G_{cn}(kT_s)))) \times \sigma + m & G_{cn}(kT_s) \geq \alpha \\ 0 & G_{cn}(kT_s) \leq \alpha \end{array} \right\} \quad (25)$$

4.4 Μοντέλο

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστεί ένα νέο μοντέλο υπολογισμού της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών, που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλα τα μήκη κύματος. Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη τη θεωρία και τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί στη διεθνή βιβλιογραφία και παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3, και επίσης κάνει χρήση των Στοχαστικών Διαφορικών Εξισώσεων για να προσομοιώσει τη στοχαστική συμπεριφορά του καναλιού.

Σκοπός του μοντέλου είναι η εκτίμηση της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών που βρίσκονται στο κεκλιμένο ραδιοδρόμο διάδοσης του οπτικού σήματος, ως εκ τούτου επιδίωξη μας είναι η όσο το δυνατόν πιο ακριβής υλοποίηση των σχέσεων

$$A(\lambda) = \int_{L_0}^{L_{\max}} \beta_{ext}(\lambda) dx \text{ (dB)} \quad (26)$$

Όπου L_0 και L_{\max} η αρχή και το τέλος του κεκλιμένου ραδιοδρόμου.

$$\beta_{ext}(\lambda) = 4.343 \times 10^3 \int_{r_1}^{r_2} \sigma_{ext}(r, \lambda) n(r) dr \text{ (dB/km)} \quad (27)$$

που έχουν καθολική εφαρμογή και δεν χρησιμοποιούνται μόνο για συγκεκριμένη κλίμακα μηκών κύματος.

Είναι εμφανές από τη (27) ότι θα πρέπει αρχικά να υπολογιστούν τα $n(r)$ και σ_{ext} . Στο παρόν κείμενο δε θα γίνει παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού του σ_{ext} καθώς υπάρχει έτοιμος ελεύθερος κώδικας υλοποίησης του στο διαδίκτυο (ScattPort,2014).

Είναι ήδη γνωστό ότι το $n(r)$ ακολουθεί την τροποποιημένη Γάμμα κατανομή τεσσάρων παραμέτρων (Deirmedjian,1975):

$$n(r) = g r^\alpha \exp(-br^\gamma) \quad (28)$$

Οι παράμετροι της (29) εξαρτώνται από το είδος των νεφών. Σύμφωνα με τη θεωρία που αναπτύχθηκε στο DAH model (Dissanayake et al., 1997) καθώς και στο (Resteghini, 2014) τα νέφη μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με την κάθετη έκτασή τους.

Είδος Νεφών	Κάθετη έκταση dh(km)
Cumulonimbus	>2.5
Cumulus	2.5
Nimbostratus	1.4
Stratus	0.7

Πίνακας 4-1 Κατηγοριοποίηση ανάλογα την Κάθετη Έκταση Νεφών

Βρίσκοντας την κάθετη έκταση (dh) των νεφών και σύμφωνα με (Shettle, 1989) μπορούμε να αποφανθούμε για τις τρεις από τις τέσσερις παραμέτρους α, b, γ .

Είδος Νεφών	α	b	γ
Cumulonimbus	3.0	0.5	0.85
Cumulus	3.0	0.5	0.85
Nimbostratus	2.0	0.425	1.0
Stratus	2.0	0.6	1.0

Πίνακας 4-2 Παράμετροι α, b, γ για την τροποποιημένη Γάμμα κατανομή τεσσάρων παραμέτρων.

Σε αυτό το σημείο θα επωφεληθούμε από τη σχέση που παρουσίασε ο Luini (Luini and Capsoni, 2014a), για το $\tilde{w}(h)$

$$\tilde{w}(h) = \begin{cases} \frac{W}{b^a \Gamma(a)} (h - h_0)^{a-1} e^{-(h-h_0)/b} & \text{for } h \geq h_0 \\ 0 & \text{for } h < h_0 \end{cases} \quad (29)$$

$$a = 4.27 e^{-4.93(W+0.06)} + 54.12 e^{-61.25(W+0.06)} + 1.71 \quad (30)$$

$$b = 3.17 a^{-3.04} + 0.074$$

Σε αυτό παρουσιάζεται η σχέση της περιεκτικότητας σε υγρό νερό, με μόνη εξάρτηση από το ολοκλήρωμα της περιεκτικότητας σε υγρό νερό ILWC ή αλλιώς W ή L , και την κάθετη έκταση του νέφους. Σύμφωνα με τη θεωρία και τα πειράματα που αναπτύχθηκαν και παρουσιάστηκαν από τον Luini μπορούμε να θεωρήσουμε ότι τα σημεία τα οποία παράγουν $\tilde{w}(h)$ μικρότερα του $0.06 W$ θεωρούμε ότι έχουν μηδενική περιεκτικότητα νερού και επομένως η κάθετη έκταση του νέφους είναι $dh = h_{th} - h_0$.

$$dh = b \cdot \Gamma_{up}^{-1}(0.06, a) - b \cdot \Gamma_{Lo}^{-1}(0.06, a) \quad (31)$$

Όπου:

Η $\Gamma_{Lo}^{-1}(0.06, a)$ είναι η αντίστροφη συνάρτηση της lower incomplete gamma:

$$\Gamma_{Lo}(x, a) = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_0^x \exp(-t) \cdot t^{a-1} dt$$

Και η $\Gamma_{up}^{-1}(0.06, a)$ είναι η αντίστροφη συνάρτηση της upper incomplete gamma :

$$\Gamma_{up}(x, a) = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_x^\infty \exp(-t) \cdot t^{a-1} dt$$

σημειώνουμε ότι το h_0 ακολουθεί την (Luini and Capsoni, 2014a):

$$p(h_0) = \frac{1}{\sigma} t(h_0)^{\xi+1} e^{-t(h_0)} \quad \mu\epsilon \quad t(x) = \begin{cases} \left[1 + \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^\xi \right]^{-\frac{1}{\xi}} & \xi \neq 0 \\ e^{-(x-\mu)/\sigma} & \xi = 0 \end{cases} \quad (32)$$

όπου $\xi=0.484$, $\sigma=0.582$, $\mu=0.987$

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζεται η ανάγκη προσομοίωσης του ILWC. Θα το υλοποιήσουμε σύμφωνα με τη θεωρία που αναπτύχθηκε στην Ενότητα 2 ώστε να έχουμε και την χωρική συσχέτιση των διάφορων ILWC και να μελετήσουμε την επίδραση στη ζεύξη μας από περισσότερα από ένα ILWC (δηλαδή διαφορετικά cloud fields), και πιθανόν και περισσότερες από μια ζεύξεις.

Για τον υπολογισμό του πίνακα **C** θα χρησιμοποιηθεί η (Luini and Carsoni, 2014b):

$$\rho_G(d) = 0.35e^{-\frac{d}{7.8}} + 0.65e^{-\frac{d}{225.3}} \quad (33)$$

Συνεπώς πλέον για το $n(r)$ μας μένει μόνο ο προσδιορισμός μιας παραμέτρου, του g . Όπως φαίνεται από τη σχέση (Deirmedjian, 1969):

$$w = \frac{4}{3} \pi \rho_w \int_{r_1}^{r_2} r^3 n(r) dr \square \frac{4}{3} \pi \rho_w \frac{g}{\gamma} \frac{\Gamma((\alpha+4)/\gamma)}{b^{(\alpha+4)/\gamma}} \quad (34)$$

το w συνδέεται με το $n(r)$ μέσω αυτής, όπως τα ορίσαμε παραπάνω.

Παρατηρούμε ότι ο τύπος (30) εξαρτάται από το ύψος h άρα θα προσδιορίσουμε το g συναρτήσει του ύψους, $g(h)$, για διάφορα ύψη στο δρόμο διάδοσης του σήματος μέσα στο νέφος.

Λοιπόν, θα εξισώσουμε την σχέση (35) με τη σχέση για το (30) ώστε να βρούμε το g με δεδομένα τα α, b, γ

$$g(h) = \frac{3 \cdot \gamma \cdot b^{\alpha+4/\gamma} \cdot \tilde{w}(h)}{4 \cdot \pi \cdot \rho_w \cdot \Gamma((\alpha+4)/\gamma)} \quad (35)$$

Είναι εύκολα κατανοητό λοιπόν, ότι μπορούμε με αυτό τον τρόπο να υπολογίσουμε το $n(r, h)$ για τα διάφορα $g(h)$ και ως εκ τούτου προσδιορίζουμε και το β_{ext} για τα διάφορα ύψη.

Εδώ χρήσιμο είναι να τονίσουμε ότι μας απασχολεί μόνο η κεκλιμένη διαδρομή (εξαρτάται από τη γωνία ανύψωσης) μέσα στο νέφος δηλαδή για $h_0 \leq h \leq h_{th}$ και αυτά μόνο αν είναι επί της κεκλιμένης διαδρομής. Πλέον θα υπολογίσουμε το β_{ext} με αριθμητικό τρόπο από το ολοκλήρωμα της σχέσης (28). Για το λόγο αυτό διακριτοποιούμε τις τιμές των ακτίνων σε ίσα βήματα dr με συνολικό αριθμό βημάτων k και επιπλέον διακριτοποιούμε το μήκος του κεκλιμένου ραδιοδρόμου με βήμα dm και συνολικό αριθμό βημάτων m για να υπολογίσουμε αντίστοιχα το $A(\lambda)$ με αριθμητικό τρόπο από τη σχέση (27) και έχουμε :

$$A(\lambda) = 4.343 \cdot 10^3 \left(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^k \sigma_{ext}(r+i \cdot dr, \lambda) \square n(r+i \cdot dr, h+j \cdot dm) \right) \cdot dr \cdot dm \quad (36)$$

με r, h αρχικές τιμές ίσες με το 0.

Όπου το dm μπορεί να υπολογιστεί ως :

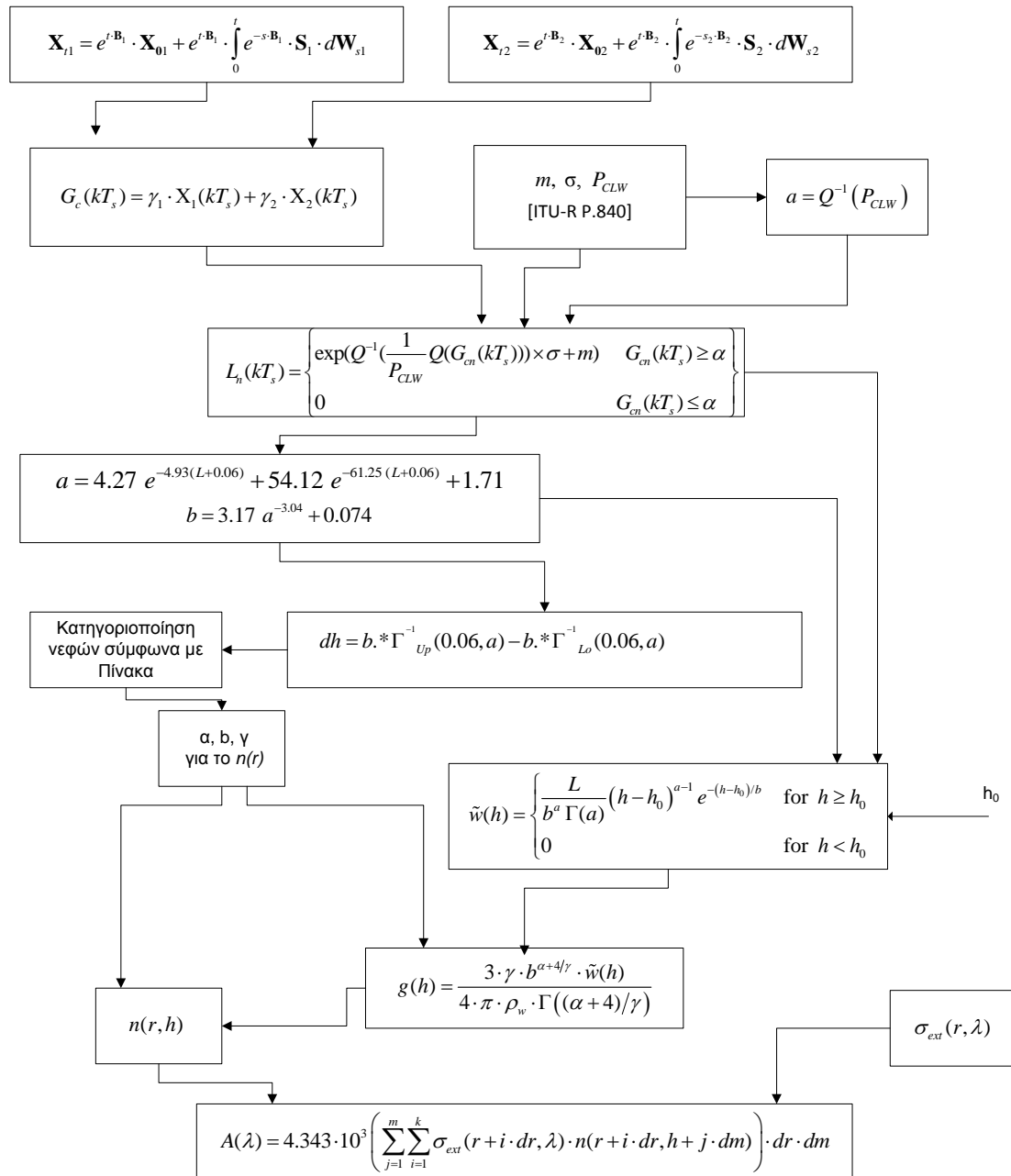
$$dm = \frac{dh}{m \cdot \sin(\theta)} \quad (37)$$

με θ τη γωνία ανύψωσης

Τέλος επιγραμματικά παρουσιάζονται με τη σειρά τα βήματα για την υλοποίηση του μοντέλου και τη διαδικασία υπολογισμού

1. Υπολογισμός των m , σ , P_{CLW} από την [ITU-R P.840].
2. Υπολογισμός του X_0 από την έκφραση (14).
3. Υπολογισμός του $\rho_{i,j}$ από την έκφραση (19).
4. Υπολογισμός των πινάκων **B**, **C**, **S** από τις εκφράσεις (16),(20),(21).
5. Υπολογισμός της n -διάστατης διαδικασίας Wiener.
6. Υλοποίηση του L_n .
7. Υπολογισμός παραμέτρων α, b από (30)
8. Υπολογισμός dh από την (31), κατηγοριοποίηση των νεφών από τον Πίνακα 1 και υπολογισμός των α , b , γ .
9. Υπολογισμός $g(h)$ από την (35) για τα διάφορα ύψη.
10. Υπολογισμός $\sigma_{ext}(r, \lambda)$.
11. Υπολογισμός για τα διάφορα ύψη του $n(r, h)$.
12. Υπολογισμός από τη σχέση (36) του $A(\lambda)$.

Διάγραμμα Ροής



Σχήμα 4.2 Διάγραμμα Ροής

4.5 Αναφορές

(Deirmedjian , 1975) Deirmedjian, D. (1975). "Far-infrared and submillimeter wave attenuation by clouds and rain." *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 14, pp. 1584-1593.

(Dissanayake et al., 1997) Dissanayake, A., Allnutt, J., Haidara, F. (1997). "A prediction model that combines rain attenuation and other propagation impairments along Earth-satellite paths." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 45 (10), 1546-1558, 1997.

(Jeannin, 2008) N.Jeannin, L. Feral, H. Sauvageot, and L. Castanet, "Statistical Distribution of Integrated Liquid Water and Water Vapor Content From Meteorological Reanalysis", *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* (Volume:56 , Issue: 10).

(ITU-R P.840-6) ITU-R recommendation P.840-6 (2013). "Attenuation due to clouds and fog." Geneva, Switzerland, 2013.

(ITU-R P.1853-1) "Tropospheric attenuation time series synthesis," ITU-R P.1853-1, vol. ITU-R P Series Recommendations Radiowave Propagation, 2012

(Karagiannis, 2012) G. Karagiannis, A. Panagopoulos, J. Kanellopoulos, "Multidimensional Rain Attenuation Stochastic Dynamic Modeling: Application to Earth-Space Diversity Systems", *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* (Volume:60 , Issue: 11), 2012.

(Luini and Capsoni, 2012a) Luini, L., and Capsoni, C. (2012). "A Methodology to Generate Cloud Attenuation Fields From NWP Products", *European Conference on Antennas and Propagation 2012*, pp. 1-5, 26-30 March 2012, Prague, Czech Republic.

(Luini and Capsoni, 2012b) Luini, L., and Capsoni, C. (2012). "The Impact of Space and Time Averaging on The Spatial Correlation of Rainfall." *Radio Science*, 47, RS3013, doi:10.1029/2011RS004915, 2012.

(M-B) T. Maseng and P. M. Bakken (1981) "A stochastic dynamic model of rain attenuation," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-29, no. 5, p. 660-669.

(Resteghini, 2014) Resteghini L., Capsoni, C. Luini, L. Nebuloni, R. "An attempt to classify the types of clouds by a dual frequency microwave radiometer", *Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad), 2014 13th Specialist Meeting on*.

(ScattPort) ScattPort (2014). The Light Scattering Information Portal website. <http://www.scattport.org/>, accessed July 2014.

(Shettle, 1989) Shettle E. P. (1989). "Models of aerosols, clouds and precipitation for atmospheric propagation studies." *AGARD conference 454* (15), pp. 1-13, 1989.

(Stratonovich, 1963) R. L. Stratonovich, (1963), "Topics in the Theory of Random Noise", Volume 1,2, Gordon and Breach.

(Papoulis,1991) A. Papoulis, (1991)," *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*: McGraw-Hill".

(Κανελλοπουλος, 2007) Σ. Κανελλόπουλος, Διδακτορική Διατριβή , "Σύνθεση Στοχαστικών Διαφορικών Εξισώσεων 1^{ης} Τάξης για τη Μοντελοποίηση Στάσιμων Τυχαίων Διαδικασιών Με Εμφαση στην Απόσβεση Λόγω της βροχής που Επιβαρύνει τις Μικροκυματικές Ζεύξεις", 2007.

Κεφάλαιο 5

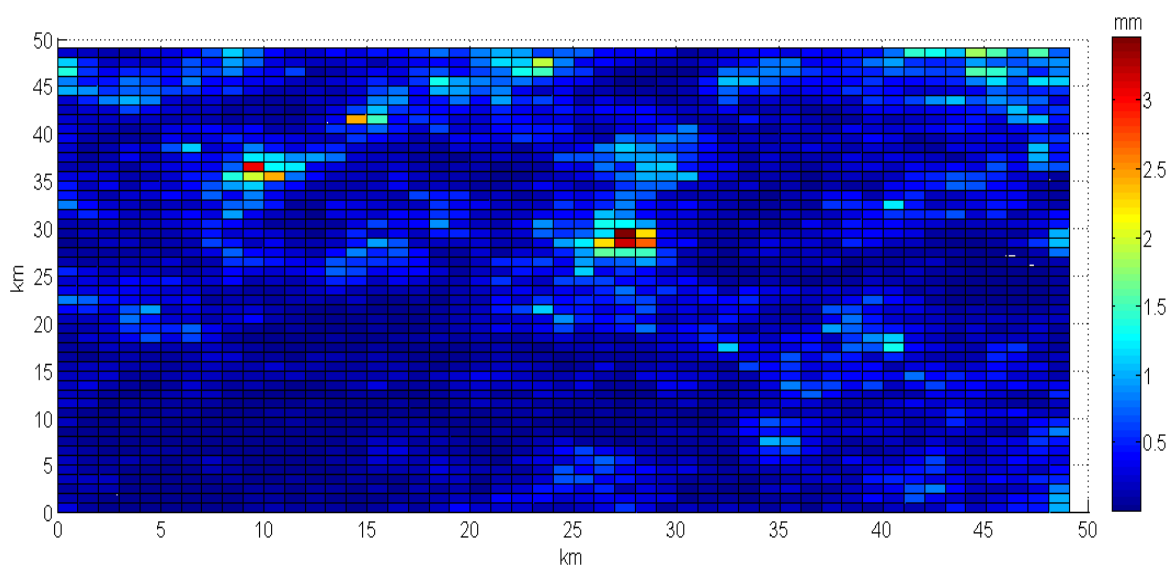
Αριθμητικά Αποτελέσματα- Συμπεράσματα-Προτάσεις για το Μέλλον

5.1 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Στο παρών κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των αριθμητικών αποτελεσμάτων, του μοντέλου υπολογισμού της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών όπως αυτό παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4. Παράλληλα, γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν και παρουσιάζονται γραφήματα των χρονοσειρών του ILWC και της απόσβεσης του οπτικού σήματος εξαιτίας των νεφών, τόσο για μία ζεύξη όσο και για σχήμα διαφορισμού θέσης. Πραγματοποιήθηκαν αναλυτικές και ακριβείς προσομοιώσεις σε περιβάλλον Matlab. Τέλος παρατίθενται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

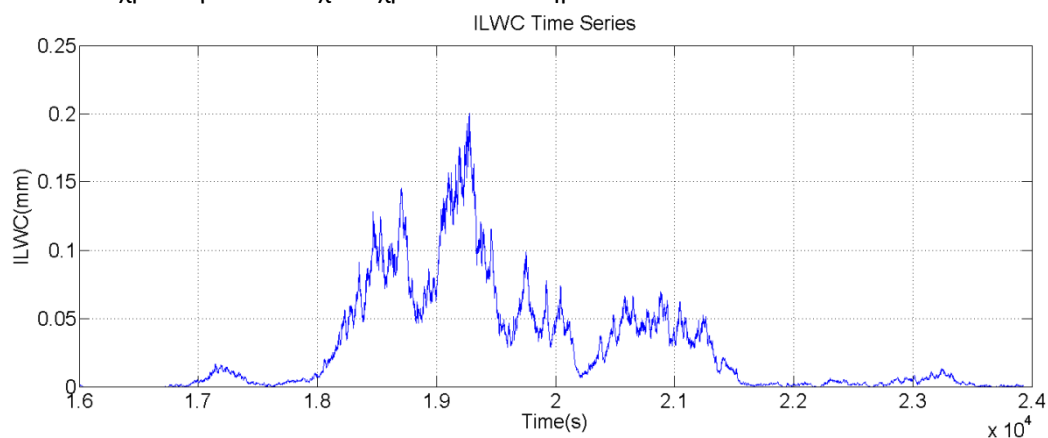
Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4 το μοντέλο που αναπτύξαμε εκμεταλλεύεται τη χρήση των στοχαστικών διαφορικών εξισώσεων για τη σύνθεση σύνθεση των χρονοσειρών δισδιάστατων τυχαίων πεδίων νεφών, χαρακτηρισμένα μέσω του μεγέθους του ολοκληρώματος της περιεκτικότητας σε υγρό νερό των νεφών (ILWC).

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται ένα πεδίο νεφών συσχετισμένο στο χώρο δηλαδή απεικονίζεται η χωρική συσχέτιση του ILWC. Κάθε πεδίο νέφους έχει διαστάσεις 1x1 km, και ο δείκτης χρωμάτων δείχνει την ένταση του ILWC σε mm.



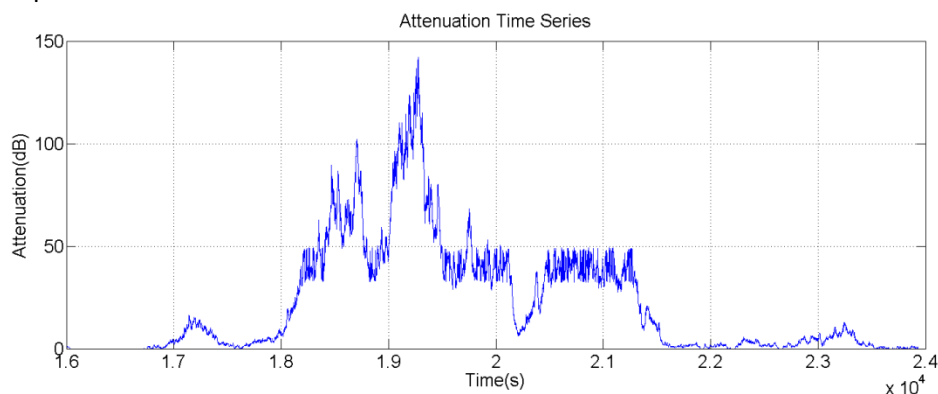
Σχήμα 5.1 Χωρική συσχέτιση ILWC

Στη συνέχεια στο Σχήμα 2 απεικονίζονται οι χρονοσειρές του ILWC δηλαδή η εξέλιξη του ILWC στο χρόνο για ένα τυχαίο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 5.2 Χρονοσειρές του ολοκληρώματος της περιεκτικότητας σε υγρό νερό (ILWC)

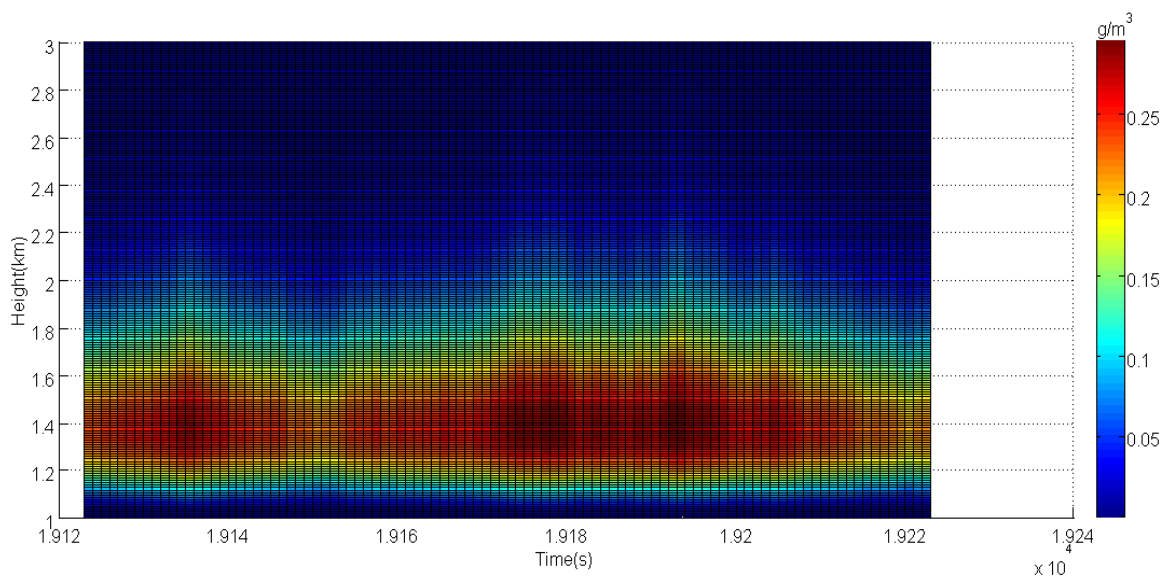
Για το ίδιο χρονικό διάστημα που απεικονίζονται το ILWC, στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η απόσβεση που υφίσταται το οπτικό σήμα σύμφωνα με το μοντέλο που παρουσιάσαμε στο Κεφάλαιο 4.



Σχήμα 5.3 Χρονοσειρές απόσβεσης εξαιτίας των νεφών

Παρατηρούμε ότι όσο υψηλότερη είναι η τιμή του ILWC τόσο μεγαλύτερη απόσβεση υφίσταται το σήμα μας.

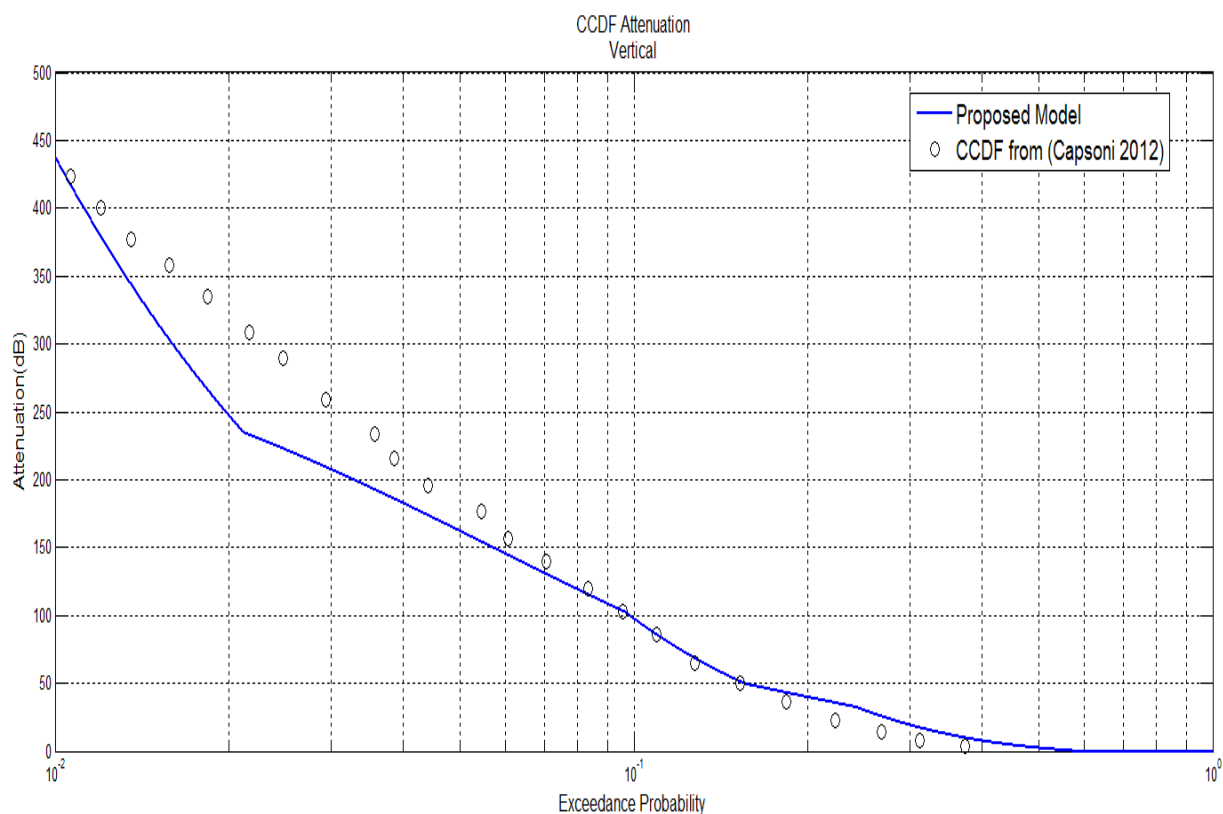
Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται το $\tilde{w}(h)$, (Κεφάλαιο 4, Έκφραση 29), για ένα μέρος του παραπάνω χρονικού διαστήματος. Απεικονίζεται η ένταση του $\tilde{w}(h)$ σε σχέση με το ύψος και τον χρόνο (κάθε χρονική στιγμή διαφορετικό ILWC, Σχήμα 2).



Σχήμα 5.4 Κάθετη έκταση του $\tilde{n}(h)$ στο χρόνο

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η κάθετη έκταση των νεφών και η δυνατότητα κατηγοριοποίησης τους όπως δείξαμε στο Κεφάλαιο 4. Όπως φαίνεται το $\tilde{n}(h)$ μειώνεται όσο αυξάνεται το ύψος και παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές στη βάση των νεφών.

Στη συνέχεια στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών για κάθετη ζεύξη (γωνία ανύψωσης $\theta=90^\circ$), με μήκος κύματος 10.6 μm . Στην παρούσα περίπτωση δεν έγινε χρήση της [ITU-R P.840] για τον υπολογισμό των m , σ , P_{CLW} για τη σύνθεση των χρονοσειρών του ILWC, αντιθέτως οι ποσότητες αυτές υπολογίστηκαν μέσω μη γραμμικής παλινδρόμησης από τη γραφική που παρουσιάζεται στο (Carsoni, 2012) για το ILWC. Με τον τρόπο αυτό παρουσιάζεται μια πρώτη σύγκριση του μοντέλου με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο (Carsoni, 2012).



Σχήμα 5.5 Σύγκριση CCDF προτεινόμενου μοντέλου με την αντίστοιχη από (Capsoni, 2012)

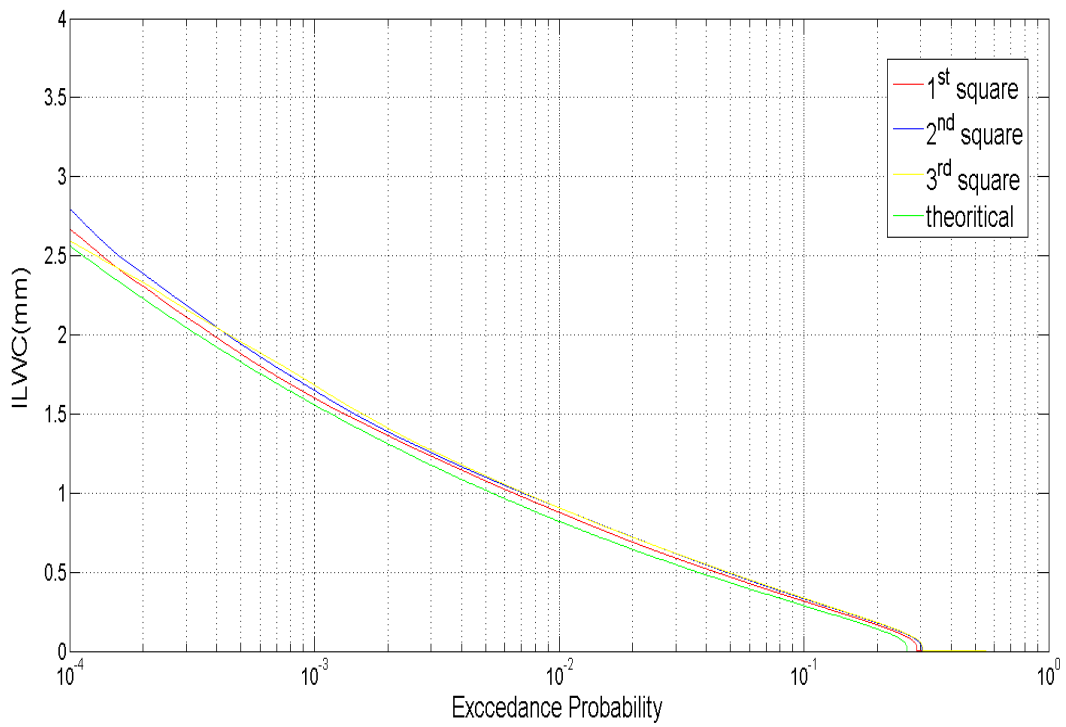
Όπως φαίνεται από το παραπάνω Σχήμα 5 το προτεινόμενο μοντέλο προσεγγίζει αρκετά καλά τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο (Capsoni, 2012) για την απόσβεση εξαιτίας των νεφών.

Στο σημείο αυτό θα παρουσιάσουμε τα αριθμητικά αποτελέσματα για τρεις οπτικές ζεύξεις. Θεωρούμε τον πρώτο σταθμό βάσης στην Κατάνια με γεωγραφικό πλάτος 37.51° N και γεωγραφικό μήκος 15.06° E, σε ύψος 400m από τη μέση στάθμη της θάλασσας, τον δεύτερο στην Αθήνα με γεωγραφικό πλάτος 37.98° N, γεωγραφικό μήκος 23.79° E σε ύψος 400m από τη μέση στάθμη της θάλασσας και τον τρίτο στο Ηράκλειο με γεωγραφικό πλάτος 35.35° E, γεωγραφικό μήκος 25.13° E σε ύψος 1.7 km από τη στάθμη της θάλασσας. Η γωνία ανύψωσης και για τους τρεις σταθμούς είναι 42.5° .

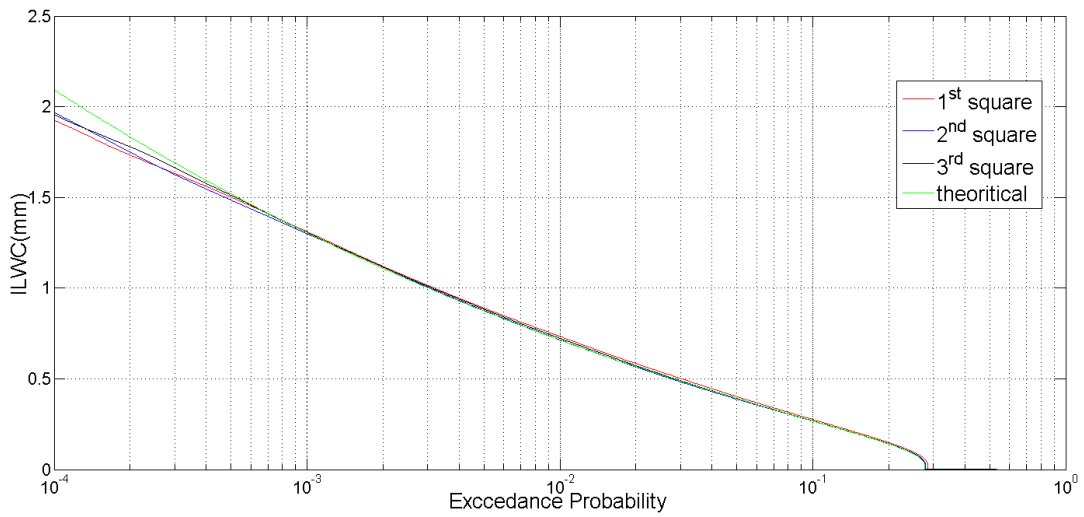
Για τον υπολογισμό του πίνακα συσχέτισης θεωρούμε απόσταση Αθήνα-Κατάνια ίση με 770 km, Κατάνια-Ηράκλειο ίση με 930 km και Αθήνα-Ηράκλειο ίση με 317 km. Για την προσομοίωση αυτή θα χρησιμοποιηθούν δύο μήκη κύματος ένα στα 1064 nm και ένα στα 1550 nm.

Τα αποτελέσματα παρήχθησαν από τις προσομοιώσεις των χρονοσειρών απόσβεσης λόγω νεφών διάρκειας τεσσάρων χρόνων.

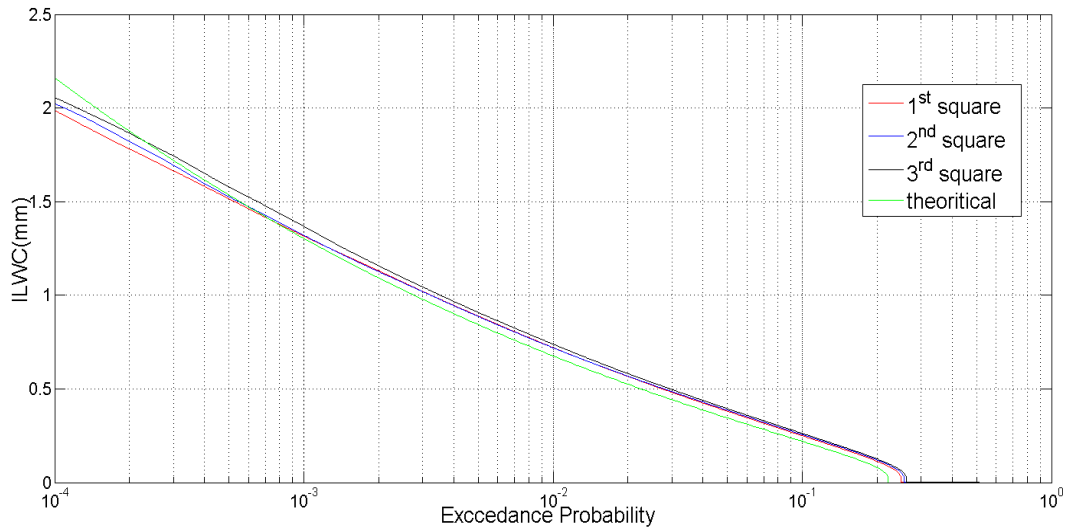
Στα Σχήματα 6, 7, 8 απεικονίζεται η πιθανότητα υπέρβασης για την Κατάνια, την Αθήνα και το Ηράκλειο αντίστοιχα, για τρία διαφορετικά σημεία του ILWC που απέχουν το πρώτο από το δεύτερο 1 km, το δεύτερο από το τρίτο 1 km και το πρώτο από το τρίτο 2 km. Η πιθανότητα υπέρβασης η παράγεται μέσω των χρονοσειρών όπως φαίνεται και στα τρία γραφήματα συγκλίνει στη θεωρητική καμπύλη.



Σχήμα 5.6 Πιθανότητα Υπέρβασης για τρία διαφορετικά συνευθειακά με μεταξύ τους απόσταση 1km, 1km,2 km για την Κατάνια

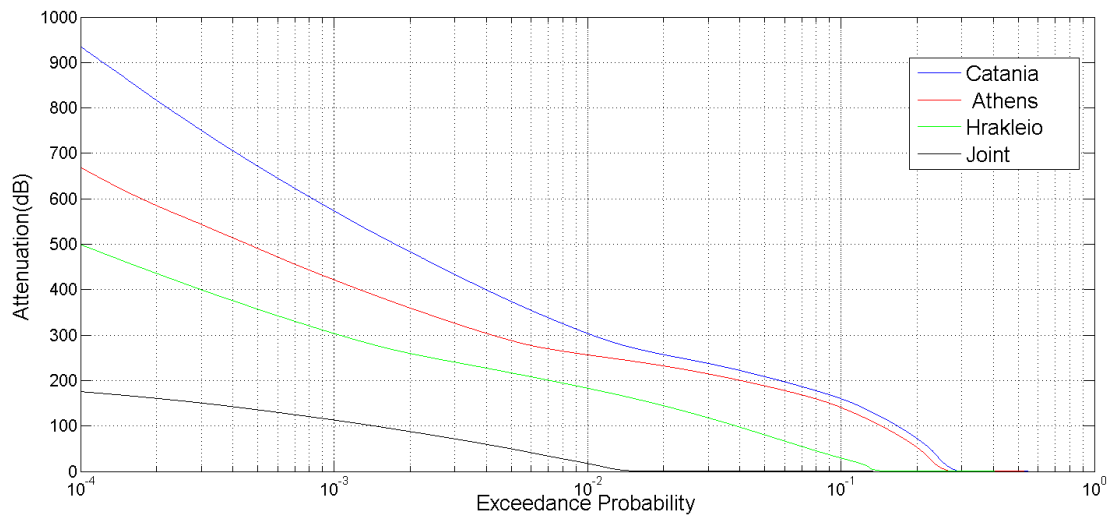


Σχήμα 5.7 Πιθανότητα Υπέρβασης για τρία διαφορετικά συνευθειακά σημεία με μεταξύ τους απόσταση 1km, 1km,2 km για την Αθήνα

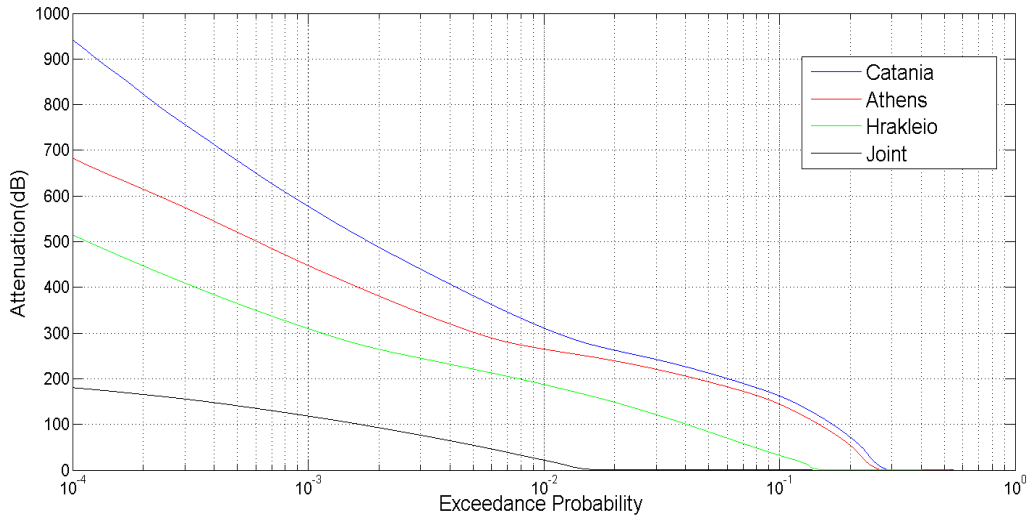


Σχήμα 5.8 Πιθανότητα Υπέρβασης για τρία διαφορετικά συνευθειακά σημεία με μεταξύ τους απόσταση 1km, 1km,2 km για το Ηράκλειο

Στα Σχήματα 9 και 10 παρουσιάζεται η πιθανότητα υπέρβασης όπως αυτή προκύπτει από το προτεινόμενο μοντέλο για μήκη κύματος 1064 και 1550 nm αντίστοιχα, για τους τρεις σταθμούς βάσης. Παράλληλα παρουσιάζεται και σχήμα διαφορισμού θέσης.

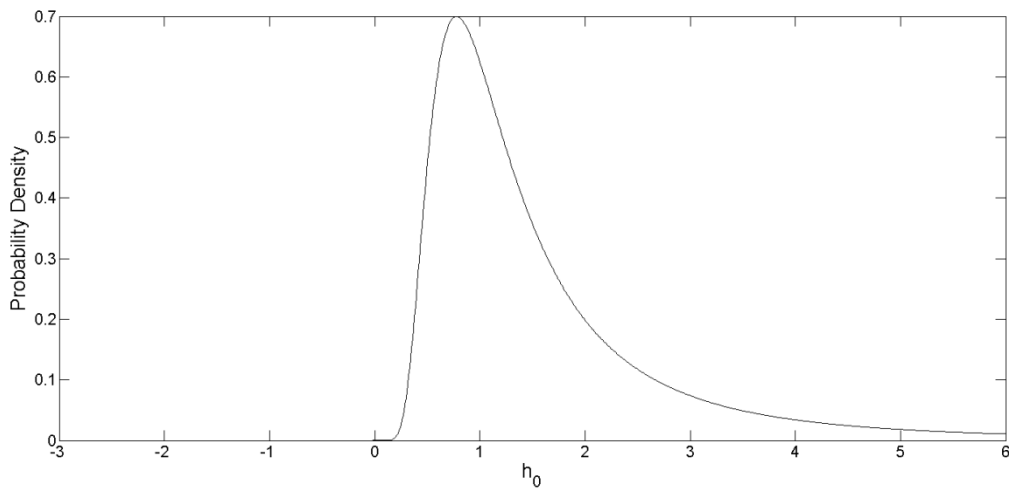


Σχήμα 5.9 Πιθανότητα Υπέρβασης για την απόσβεση εξαιτίας των νεφών για τρεις σταθμούς βάσης και σχήμα διαφορισμού θέσης για μήκος κύματος 1064 nm



Σχήμα 5.10 Πιθανότητα Υπέρβασης για την απόσβεση εξαιτίας των νεφών για τρεις σταθμούς βάσης και σχήμα διαφορισμού θέσης για μήκος κύματος 1550 nm

Όπως μπορούμε να δούμε από τις δύο παραπάνω γραφικές η μεγαλύτερη απόσβεση παρατηρείται για τον σταθμό στην Κατάνια ενώ η μικρότερη για αυτόν στο Ηράκλειο. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς για την περιοχή του Ηρακλείου θεωρήσαμε ότι ο σταθμός βάσης βρίσκεται σε υψόμετρο 1.7 km. Είναι ήδη γνωστό από τη θεωρία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 ότι η βάση των νεφών ακολουθεί κατανομή με συγκέντρωση τιμών γύρω από το 1 km όπως φαίνεται και στο Σχήμα 11, και τα νέφη με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης δηλαδή τα Stratus έχουν κάθετη έκταση μικρότερη των 0.8 km. Λοιπόν, γίνεται εύκολα κατανοητό ότι πολλά νέφη δεν θα επηρεάζουν τον κεκλιμένο δρόμο διάδοσης ενδιαφέροντός μας.

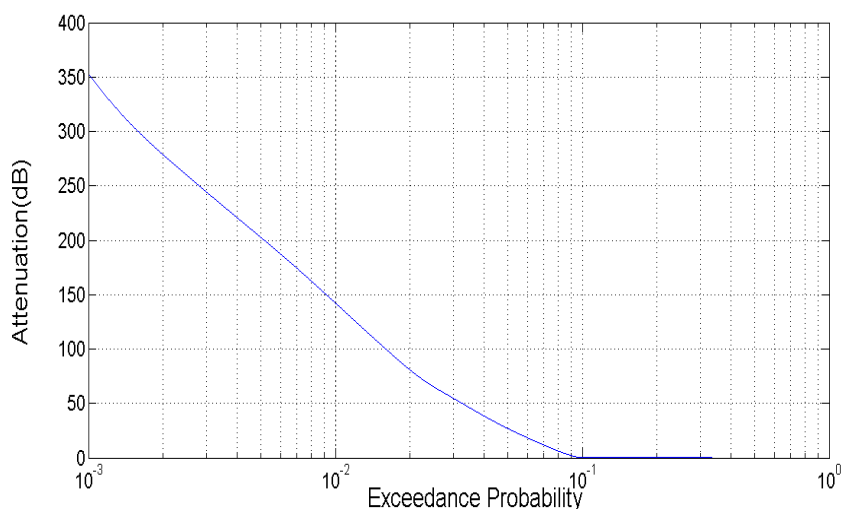


Σχήμα 5.11 Κατανομή του ύψους της βάσης των νεφών (Εκφραση 33, Κεφάλαιο 4)

Παράλληλα, αυτό που θα πρέπει να τονιστεί είναι το κέρδος από το σχήμα διαφορισμού θέσης. Καταρχήν, παρατηρούμε ότι το κέρδος διαφορισμού είναι πολύ μεγάλο, δηλαδή για την περίπτωση του μήκους κύματος των 1064 nm, και για πιθανότητα υπέρβασης ίση με 10^{-4} ο σταθμός της Κατάνιας παρουσιάζει απόσβεση σχεδόν ίση με 942 dB, της Αθήνας με

690 dB και του Ηρακλείου με 525 dB, ενώ το σχήμα διαφορισμού θέσης παρουσιάζει απόσβεση σχεδόν ίση με 180 dB. Ταυτόχρονα, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία και στην αρχή της εμφάνισης του φαινομένου της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών για την περίπτωση του σχήματος διαφορισμού καθώς ουσιαστικά αρχίζει να εμφανίζεται για πιθανότητα λίγο υψηλότερη του 10^{-2} . Παρατηρώντας προσεκτικά τα Σχήματα 9 και 10 θα δούμε ότι δε διαφέρουν πολύ και θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι παράλληλα, πράγμα απολύτως λογικό καθώς το μήκος κύματος υπεισέρχεται μόνο στον υπολογισμό του και η διαφορά των δύο μηκών κύματος που χρησιμοποιήσαμε, και προτείνονται στη βιβλιογραφία για οπτικές δορυφορικές επικοινωνίες, δε διαφέρουν πολύ.

Μια ακόμη προσομοίωση που υλοποιήθηκε αφορά ένα σταθμό βάσης στην Τενερίφη, με γεωγραφικό πλάτος 28.27° και γεωγραφικό μήκος 16.64° W. Ο σταθμός βρίσκεται σε υψόμετρο 2.4 km από τη μέση στάθμη της θάλασσας, με γωνία ανύψωσης είναι 32.5° και με μήκος κύματος 1550 nm. Τα αποτελέσματα παρήχθησαν μέσω χρονοσειρών απόσβεσης λόγω νεφών διάρκειας τριών χρόνων.



Σχήμα 5.12 Πιθανότητα Υπέρβασης για την απόσβεση εξαιτίας των νεφών για σταθμό βάσης στην Τενερίφη 1550 nm

Ο σταθμός βάσης στην Τενερίφη βρίσκεται σε υψόμετρο 2.4 km και σε συνδυασμό με την κατανομή της βάσης των νεφών και την κάθετη έκταση των νεφών παρατηρούμε στο Σχήμα 12 ότι για μία μόνη ζεύξη η εμφάνιση του φαινομένου της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών εμφανίζεται για πιθανότητα υπέρβασης μικρότερη του 0.1, άρα η ζεύξη παρουσιάζει διαθεσιμότητα για το 90% του χρόνου. Παράλληλα για πιθανότητα υπέρβασης 10^{-3} η απόσβεση γίνεται σχεδόν ίση με 350 dB. Όπως και προηγουμένως, το υψόμετρο στο οποίο είναι τοποθετημένος ο σταθμός βάσης, συντελεί ώστε μεγάλο ποσοστό των νεφών που δημιουργούνται να αναπτύσσονται κάτω από τον κεκλιμένο ραδιοδρόμο ενδιαφέροντος μας.

5.2 Συμπεράσματα

Οι οπτικές δορυφορικές επικοινωνίες αποτελούν ένα σύγχρονο πεδίο έρευνας που μπορεί να προσφέρει σημαντικές λύσεις στα μείζονα ζητήματα της ζήτησης φάσματος και αύξησης των ρυθμών μετάδοσης. Όμως παρόλα τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν, παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στα ατμοσφαιρικά φαινόμενα και ιδιαίτερα στα νέφη. Για το λόγο αυτό κρίνεται αναγκαία η ανάπτυξη μοντέλων για τον υπολογισμό της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών. Το μοντέλο που προτείνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία όπως παρουσιάζεται και παραπάνω επωφελείται από τη χρήση των στοχαστικών διαφορικών εξισώσεων για τη σύνθεση των χρονοσειρών του ολοκληρώματος της περιεκτικότητας σε υγρό νερό των νεφών και χρησιμοποιώντας τη θεωρία για την κάθετη έκταση των νεφών προσπαθεί να εκτιμήσει με ακρίβεια την απόσβεση εξαιτίας των νεφών. Από τις προσομοιώσεις που έγιναν επιβεβαιώνεται η ευαισθησία του οπτικού σήματος στα νέφη, όμως παράλληλα αναδεικνύονται και ελκυστικές λύσεις που μπορούν να καταστήσουν καθολικά εφαρμόσιμες τις οπτικές δορυφορικές επικοινωνίες. Η ύπαρξη σχημάτων διαφορισμού θέσης είναι αναγκαία και άκρως αποτελεσματική. Παράλληλα το κέρδος αυξάνεται αν οι σταθμοί βάσης που θα επιλεγούν βρίσκονται σε ύψος μεγαλύτερο του 1 km.

5.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύξαμε και προτείναμε ένα μοντέλο για τον υπολογισμό της απόσβεσης εξαιτίας των νεφών στις Οπτικές Δορυφορικές Επικοινωνίες. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί την τροποποιημένη Γάμμα κατανομή τεσσάρων παραμέτρων για την αναπαράσταση της συγκέντρωσης των σωματιδίων $n(r)$. Μια μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να περιλαμβάνει τη χρήση διαφορετικής κατανομή με σκοπό να διερευνηθεί αν αυτή δύναται να προσεγγίσει καλύτερα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα για την απόσβεση λόγω νεφών στις οπτικές συχνότητες. Παράλληλα θα μπορούσε να γίνει ανάλυση μετεωρολογικών δεδομένων/βάσεων ώστε είτε να βρεθεί μια καινούργια PDF είτε να τροποποιηθούν κατάλληλα οι παράμετροι της κατανομής που χρησιμοποιείται μέχρι τώρα. Επιπλέον θα ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές και πιο ακριβείς βάσεις δεδομένων για τον υπολογισμό των στατιστικών στοιχείων, για τη σύνθεση των χρονοσειρών του ολοκληρώματος της περιεκτικότητας σε υγρό νερό των νεφών.

Ταυτόχρονα το προτεινόμενο μοντέλο επωφελείται από τη θεωρία και την κατηγοριοποίηση των νεφών σε σχέση με την κάθετη έκτασή τους. Μια αρκετά ενδιαφέρουσα τροποποίηση του μοντέλου θα ήταν πέρα από την κάθετη έκταση των νεφών να χρησιμοποιεί και την οριζόντια έκτασή τους ώστε η εκτίμηση της απόσβεσης να γίνει πιο ακριβής.

Επιπρόσθετα η μελέτη και το κανάλι που παρουσιάστηκε αφορούσε γεωστατικούς δορυφόρους με σταθερή γωνία ανύψωσης. Είναι πολύ σημαντικό να γίνει επέκταση του μοντέλου για χρονικά μεταβαλλόμενες γωνίες ανύψωσης δηλαδή για μη γεωστατικούς δορυφόρους δηλαδή σε δορυφόρους χαμηλής τροχιάς (Low Earth Orbit), όσο και σε δορυφόρους μέσης τροχιάς (Medium Earth Orbit).

Στην παρούσα μελέτη Διπλωματική Εργασία ασχοληθήκαμε μόνο με την επίδραση των νεφών στην οπτική ζεύξη. Κάτι που θα έκανε πιο πλήρη τη μελέτη των επιπτώσεων της ατμόσφαιρας στο οπτικό σήμα, θα ήταν να προταθούν μοντέλα που να συνυπολογίζουν και την απόσβεση που εισάγεται εξαιτίας της βροχής, των στροβιλισμών, των σπινθηρισμών και του χιονιού, ώστε να υπολογίσουμε τη συνολική απόσβεση της ατμόσφαιρας στο οπτικό σήμα. Επίσης, ταυτόχρονα (concurrent) μετεωρολογικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να βρεθεί πιθανή σχέση μεταξύ μερικών τύπων νεφών και του ρυθμού βροχόπτωσης.

Επιπλέον, εκτός από της μελέτης της διαφορικής προστασίας (διαφορισμός θέσης) ως πιθανή τεχνική άμβλυση διαλείψεων, πάρα πολύ ενδιαφέρον θα είχε η μελέτη και άλλων τεχνικών διαφορισμού όπως ο διαφορισμός τροχιάς, δηλαδή η χρησιμοποίηση περισσότερων από έναν δορυφόρο για ένα σταθμό βάσης, ή κάποιο υβριδικό σχήμα όπου όταν οι συνθήκες το επιβάλλουν το σήμα από τις οπτικές συχνότητες να μεταβαίνει σε μικροκυματικές/χιλιοστομετρικές ζώνες συχνοτήτων ώστε να αποκτά μεγαλύτερη ανοχή σε φαινόμενα όπως αυτό των νεφών. Το υβριδικό σχήμα είναι ένα σχήμα διαφορισμού συχνότητας.

Όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2 για τον προϋπολογισμό της ισχύος της οπτικής ζεύξης χρησιμοποιούνται μόνο δύο σχήματα κωδικοποίησης. Πρέπει να ερευνηθούν και άλλα σχήματα, ήδη γνωστά από τις RF επικοινωνίες, για να αποφανθούμε για τη δυνατότητα χρησιμοποίησης τους στις οπτικές επικοινωνίες και τα οφέλη που μπορεί να υπάρξουν. Τέλος, αναλυτικές μελέτες για την χωρητικότητα θα είχαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

5.4 Αναφορές

(Capsoni, 2012) C. Capsoni, L. Luini, R. Nebuloni, “*Prediction of Cloud Attenuation on Earth-space Optical Links*”, EuCAP 2012, pp. 1-4, 26-30 March 2012, Prague, Czech Republic.