



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

**Μελέτη και Μοντελοποίηση Απόσβεσης σε Οπτικές Δορυφορικές  
Ζεύξεις και Σύγκριση με τις Δορυφορικές Ζεύξεις στις  
Χιλιοστομετρικές Συχνότητες**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γιάννης Ν. Πουλόπουλος

**Επιβλέπων:** Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος  
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013





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

**Μελέτη και Μοντελοποίηση Απόσβεσης σε Οπτικές Δορυφορικές  
Ζεύξεις και Σύγκριση με τις Δορυφορικές Ζεύξεις στις  
Χιλιοστομετρικές Συχνότητες**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γιάννης Ν. Πουλόπουλος

**Επιβλέπων:** Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος  
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 14 η Δεκεμβρίου 2013.

.....  
Α.Παναγόπουλος  
Επ.Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Ι.Κανελλόπουλος  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Φ.Κωσταντίνου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013

.....  
Γιάννης Ν. Πουλόπουλος  
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Γιάννης Πουλόπουλος, 2013

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.

## Περίληψη

Τα ασύρματα οπτικά συστήματα FSO (Free Space Optics) αποτελούν μία σύγχρονη τεχνολογία ασύρματης οπτικής μετάδοσης. Τα τελευταία χρόνια, βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς των επίγειων αλλά και δορυφορικών επικοινωνιών. Παρέχουν δυνατότητα για πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης, και ως αποτέλεσμα μπορούν να εξυπηρετήσουν το μεγάλο όγκο δεδομένων που χρειάζονται να μεταδοθούν για την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών. Συγκρίνουμε τις ασύρματες οπτικές ζεύξεις με τις ζεύξεις χιλιοστομετρικών ραδιοσυχνοτήτων RF (Radio Frequency), οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως μέχρι σήμερα.

Αρχικά, μοντελοποιείται το σύστημα μετάδοσης και προσομοιώνεται σε περιβάλλον Matlab η απόσβεση που εισάγεται στη δορυφορική ζεύξη. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται τόσο η απόσβεση λόγω ντετερμινιστικών χαρακτηριστικών της ζεύξης όσο και αυτής που εισάγεται στοχαστικά λόγω των ατμοσφαιρικών φαινομένων. Τα κύρια ατμοσφαιρικά φαινόμενα που προσομοιώνουμε είναι η βροχή και τα σύννεφα.

Όσον αφορά στη βροχή, κάνοντας χρήση του στατικού μοντέλου των συνεκτικών βροχοπυρήνων υπολογίζουμε την μακροπρόθεσμη αθροιστική κατανομή πιθανότητας υπέρβασης της απόσβεσης και μέσω του στοχαστικού δυναμικού μοντέλου Maseng-Bakken, παράγονται χρονοσειρές απόσβεσης βροχής τόσο για RF όσο και για FSO τεχνολογία μετάδοσης. Για την απόσβεση λόγω νεφών, διαφορετικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για τις RF ζεύξεις και για τα FSO συστήματα.

Τέλος, μελετούμε τη λειτουργικότητα και τη διαθεσιμότητα μιας υβριδικής RF/FSO ζεύξης. Για συνθήκες καθαρού ουρανού, χωρίς την παρουσία νεφών, προτιμάται η χρήση FSO ζεύξης, ενώ για παρουσία νέφωσης χρησιμοποιούμε RF τεχνολογία μετάδοσης. Για πιο αναλυτική σύγκριση πρέπει να προσδιορίσουμε το ρυθμό μετάδοσης ενώ ταυτόχρονα χρειάζεται να προσδιορίσουμε το είδος των σύννεφων, το κάθετο μήκος τους, την υγρή περιεκτικότητα σε νερό, ενώ για τη βροχή, το ρυθμό βροχόπτωσης και από τι άλλα ατμοσφαιρικά φαινόμενα συνοδεύεται η βροχή.

Συμπερασματικά, η FSO τεχνολογία μετάδοσης είναι πολλά υποσχόμενη για το μέλλον. Περαιτέρω έρευνα χρειάζεται με σκοπό τη μοντελοποίηση των ατμοσφαιρικών φαινομένων και την αλληλεπίδραση τους με το οπτικό σήμα, καθώς θα παρέχει ένα πιο λεπτομερές μοντέλο μέτρησης της απόσβεσης.

## Λέξεις κλειδιά

Χιλιοστομετρικές ραδιοζεύξεις, RF, Ασύρματες οπτικές ζεύξεις, FSO, Υβριδικά συστήματα, Απόσβεση βροχής, Απόσβεση σύννεφων, Στοχαστικό δυναμικό μοντέλο, προσομοίωση απόσβεσης, ατμοσφαιρική διάδοση



## Abstract

Free Space Optics (FSO) is a modern optical transmission technology. In recent years, this technology is applied in many areas of terrestrial and satellite communications. It provides high transmission speed, and as a result we can transmit large volume of data that are required to serve modern broadband services. We compare Free Space Optical links with links which operate in millimeter radio frequency bands (RF) which are widely used in current satellite communication systems.

We model the transmission system and simulate, in Matlab environment, the attenuation introduced in the link. More particularly, we consider both attenuation due to installation and deterministic characteristics of the link and the stochastic ones introduced by atmospheric phenomena. The major atmospheric phenomena which we simulate are rain and clouds.

Adopting the static model of convective raincells, we calculate the long-term exceedance probability of rain attenuation and using stochastic dynamic model Maseng-Bakken time series of rain attenuation are generated for both RF and FSO technology for transmission. Considering the attenuation due to clouds different models are used for RF and FSO systems.

Finally, we study the functionality and the availability of a hybrid RF / FSO system. Under clear sky conditions, or without clouds, FSO link is employed, while under the presence of clouds we use RF transmission technology. For a more detailed comparison we should determine the transmission rate that we need to operate. We also need more characteristics of cloud events, as the type of cloud, its vertical length and its liquid water content.

In conclusion, FSO transmission technology is promising, and further research is needed in order to model the atmospheric phenomena and their interaction with optical signal. Thus, a more detailed model of optical signal attenuation for satellite communication systems is needed.

## Key Words

Millimeter radio links, RF, Free Space Optical links, FSO, Hybrid systems, Rain Attenuation, Cloud Attenuation, Stochastic Dynamic Model, Simulation of attenuation, Atmospheric Propagation





## Ευχαριστίες

Η διπλωματική αυτή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και πιο συγκεκριμένα στο Τομέα Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών.

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή του ΕΜΠ Αθανάσιο Παναγόπουλο για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το επιστημονικό αντικείμενο και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την αρχή μέχρι το τέλος για την περαίωση της εργασίας αυτής. Θέλω να ευχαριστήσω επίσης τον Υποψήφιο Διδάκτορα Χαρίλαο Κουρόγιωργα για τις πολύτιμες συμβουλές του σε όλο το διάστημα εκπόνησης της εργασίας αυτής και για την άμεση βοήθεια του όποτε και αν τη χρειάστηκα.

Επίσης, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για τη συμπαράσταση, υλική και ηθική, που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους και την κοπέλα μου, για όλες αυτές τις πρωτόγνωρες εμπειρίες που μοιραστήκαμε, για τις δύσκολες και ευχάριστες στιγμές που βιώσαμε, και για τους δύσβατους μεν ελπιδοφόρους για ένα καλύτερο αύριο δε δρόμους που διαβήκαμε.



# Περιεχόμενα

## Κεφάλαιο 1

Οπτικά συστήματα, χαρακτηριστικά και λειτουργία	15
1.1. Εισαγωγή στην FSO τεχνολογία	15
1.2. Ατμοσφαιρική θεώρηση	17
1.3. Μοριακή απορρόφηση	18
1.4. Μοριακή σκέδαση	20
1.5. Απορρόφηση αερολυμάτων	21
1.6. Σκέδαση αερολυμάτων	22
1.7. Σπινθηρισμοί	28
1.8. Εξασθένιση λόγω βροχής	30
1.9. Εξασθένιση λόγω χιονιού	31
1.10. Επίδραση φωτός περιβάλλοντος	32
1.11. Αθροιστική συνάρτηση κατανομής της απόσβεσης	33
1.12. Υβριδικά FSO συστήματα	33
1.13. Μέτρηση της ορατότητας	35
Βιβλιογραφία	37

## Κεφάλαιο 2

Σχεδιασμός FSO Ζεύξης	
2.1. Αρχικές εκτιμήσεις στη σχεδίαση οπτικών ζεύξεων	39
2.1.1. Καιρικές συνθήκες	39
2.1.2. Χαρακτηριστικά δρόμου διάδοσης	39
2.1.3. Τοποθέτηση πομπού	40
2.2. Γεωμετρική απόσβεση	40
2.3. Ειδική ατμοσφαιρική απόσβεση	41
2.3.1. Ειδική απόσβεση ομίχλης	42
2.3.2. Ειδική απόσβεση βροχής	43
2.3.3. Ειδική απόσβεση χιονιού	45
2.4. Απόσβεση λόγω σπινθηρισμών	45

- 2.5. Επίδραση περιβαλλοντικού φωτός 47
- 2.6. Αναλυτική έκφραση του περιθωρίου διαλείψεων 48
- 2.7. Προσομοίωση περιθωρίου διαλείψεων 49
- Παράρτημα Α 50
- Βιβλιογραφία 52

## Κεφάλαιο 3

Απόσβεση σε Χιλιοστομετρικές Ζεύξεις 53

- 3.1. Απόσβεση βροχής 53
  - 3.1.1. Στατικό μοντέλο 53
  - 3.1.2. Δυναμικό μοντέλο 57
  - 3.1.3. Προσομοίωση 60
- 3.2. Απόσβεση σύννεφων 62
  - 3.2.1. Δυναμικό μοντέλο 62
  - 3.2.2. Προσομοίωση 66
- 3.3. Συνολική απόσβεση 70
- 3.4. Συγκριτικά αποτελέσματα για απόσβεση βροχής 71
- 3.5. Συγκριτικά αποτελέσματα για απόσβεση σύννεφων 74
- Βιβλιογραφία 78

## Κεφάλαιο 4

Απόσβεση σε Ασύρματες Οπτικές Ζεύξεις 79

- 4.1. Απόσβεση βροχής 79
  - 4.1.1. Μοντέλο απόσβεσης 79
  - 4.1.2. Προσομοίωση 83
- 4.2. Απόσβεση σύννεφων 86
  - 4.2.1. Φυσικά χαρακτηριστικά σύννεφων 86
  - 4.2.2. Δυναμικό μοντέλο 90
  - 4.2.3. Υπολογισμός απόσβεσης 91
  - 4.2.4. Εμπειρική Προσέγγιση 97
  - 4.2.5. Προσομοίωση 99
- 4.3. Συνολική απόσβεση 102
- 4.4. Συγκριτικά αποτελέσματα για απόσβεση βροχής 102

- 4.5. Συγκριτικά αποτελέσματα για απόσβεση συννέφων 104
- Βιβλιογραφία 108

## Κεφάλαιο 5

Σύγκριση οπτικών με χιλιοστομετρικών ασυρμάτων ζεύξεων 109

- 5.1. Απόσβεση μεμονωμένα βροχής-συννέφων 109
- 5.2. Συνολική απόσβεση βροχής και συννέφων 111
- 5.3. Προτάσεις για μελέτη 117



# Κεφάλαιο 1

## Οπτικά συστήματα, χαρακτηριστικά και λειτουργία

### 1.1. Εισαγωγή στην FSO τεχνολογία

Η FSO τεχνολογία μετάδοσης είναι σχετικά καινούργια αλλά προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη μετάδοση σε ζώνες ραδιοσυχνότητας. Το πολύ υψηλής συχνότητας φέρον βρίσκεται στη ζώνη συχνοτήτων από 20 έως 375 THz, και προσφέρει στην τεχνολογία FSO τεράστιους ρυθμούς μετάδοσης. Στο Σχήμα 1 βλέπουμε έναν πομποδέκτη FSO.

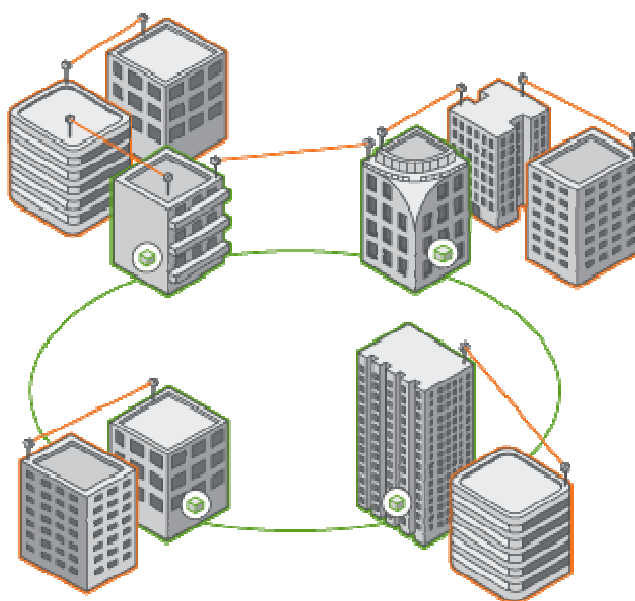


**Σχήμα 1-Πομποδέκτης ασύρματου οπτικού συστήματος μετάδοσης**

Σε αντίθεση με τα RF συστήματα που χρειάζεται καθαρότητα στη ζώνη Fresnel, στα FSO συστήματα χρειάζεται μόνο οπτική επαφή Line Of Sight(LOS). Δε χρειάζεται άδεια για τη χρήση της, καθώς κάνει χρήση μιας μη αδειοδοτημένης ζώνης συχνοτήτων και έτσι μπορεί να είναι πολύ γρήγορη και ευέλικτη η εγκατάσταση και η χρήση του εξοπλισμού της ακόμα και για μικρό χρονικό διάστημα. Σαν συνέπεια αυτών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για υπηρεσίες τελικού χρήστη(last mile connection), παροχή ευρυζωνικού ίντερνετ σε αγροτικές περιοχές χωρίς καλωδιακή

υποδομή ή ακόμα και σε περιοχές που το δίκτυο τους έχει πληγεί από φυσικές καταστροφές.

Στο Σχήμα 2 φαίνεται πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνολογία FSO για τη δημιουργία ενός δικτύου γειτονικών κτιρίων χωρίς να έχουν ενσύρματη πρόσβαση μεταξύ τους.



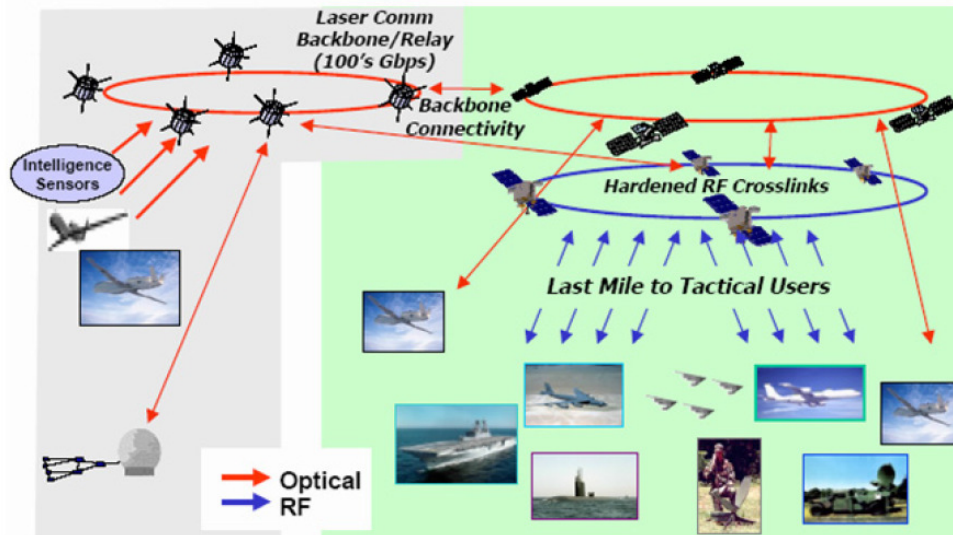
**Σχήμα 2-Τοπικό ασύρματο δίκτυο**

Αποφεύγεται η ηλεκτρομαγνητική μόλυνση, ειδικά σε μια περίοδο που όλο και περισσότερες υπηρεσίες εξυπηρετούνται από ασύρματες ραδιοκυματικές επικοινωνίες, ενώ παράλληλα δεν έχουν να αντιμετωπίσουν θέματα ασφαλείας που έχουν οι ενσύρματες επικοινωνίες[2].

Η χρήση της FSO τεχνολογίας τελευταία μελετάται σε ένα ευρύ πεδίο τρόπων μετάδοσης, επίγειο (μικρής έως μεγάλης απόστασης οπτικής επαφής ζεύξη, LOS), δορυφορικές ζεύξεις (uplink/downlink), δια-δορυφορικές ζεύξεις, εδάφους-αέρα υπηρεσίες όπως Unmanned Aerial Vehicle (UAV) και High Altitude Platforms(HAP)[2]

Στο Σχήμα 3 μπορούμε να δούμε κάποιες από τις προαναφερθείσες χρήσεις οπτικών ασυρμάτων ζεύξεων όπως, δια-δορυφορικές ζεύξεις, εδάφους-αέρα και UAV.





Σχήμα 3-Χρήσεις ασύρματων οπτικών δικτύων εδάφους-αέρα και αέρα-αέρα[3]

Παρόλη όμως τη δυναμική προοπτική ανάπτυξης της τεχνολογίας αυτής, μπαίνουν και εμπόδια που περιορίζουν τη χρήση της. Το κύριο τέτοιο εμπόδιο είναι οι ατμοσφαιρικές μεταβολές οι οποίες περιορίζουν την αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα αυτών των συστημάτων. Έρευνες έχουν δείξει ότι η απόσβεση σε οπτικά δίκτυα μπορεί να φτάσει τα 120db/km σε ηπειρωτικά ομιχλώδη περιβάλλοντα το χειμώνα(Graz, Austria), και στα 480db/km σε πυκνή θαλάσσια ομίχλη τους καλοκαιρινούς μήνες (La Turbie, France). Εκτός από το φαινόμενο της ομίχλης, η βροχή και το χιόνι περιορίζουν, αν και σε μικρότερο βαθμό, τη διαθεσιμότητα μιας FSO ζεύξης.

Η λύση στα θέματα της διαθεσιμότητας σε τέτοια ομιχλώδη περιβάλλοντα, είναι και μια συμπληρωματική ραδιοκυματική ζεύξη, η οποία θα ενεργοποιείται όταν η οπτική ζεύξη δεν είναι πλήρως λειτουργική. Ανάλογα με τη χρήση έχουν προταθεί πολλών ειδών υβριδικά μοντέλα ραδιοκυματικών και FSO ζεύξεων για αερομεταφερόμενες εφαρμογές, ad-hoc κινητά δίκτυα και διαστημικές εφαρμογές. Ανάλογα με τις συνθήκες κάτω από τις οποίες η FSO ζεύξη γίνεται μη λειτουργική, πρέπει να επιλεγεί και η συμφέρουσα συχνότητα στα ραδιοκύματα ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διαθεσιμότητα του ολικού συστήματος. Συγκριτικές μελέτες έχουν δείξει ότι η FSO τεχνολογία είναι προτιμητέα σε σχέση με την RF σε τηλεπικοινωνίες μακρινού διαστήματος(deep space communications) όπου χρειάζονται πολύ υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης όπως σε δορυφορικές ζεύξεις τροφοδοσίας(satellite feeder links).

## 1.2. Ατμοσφαιρική θεώρηση

Οι FSO ζεύξεις επηρεάζονται από τα φαινόμενα της απορρόφησης και της σκέδασης του φωτός από την γήινη ατμόσφαιρα, η οποία αποτελείται από μια ποικιλία διαφορετικών μορίων και μικρών αιωρούμενων σωματιδίων, τα οποία ονομάζονται

αερολύματα. Η αλληλεπίδραση του οπτικού σήματος με τα στοιχεία αυτά δημιουργεί μια σειρά φαινομένων[1]:

- Συχνοεπιλεκτική απορρόφηση

Η ατμοσφαιρική απορρόφηση παρουσιάζεται σε συγκεκριμένα μήκη κύματος ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στα φωτόνια και στα άτομα είτε τα μόρια της ατμόσφαιρας. Η αλληλεπίδραση αυτή οδηγεί στην εξαφάνιση ενός συγκεκριμένου φωτονίου, συνοδευόμενη από έκκλιση θερμότητας και εκπομπή ακτινοβολίας.

- Ατμοσφαιρική σκέδαση

Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στα φωτόνια από τη μία και στα άτομα ή τα μόρια που υπάρχουν στο μέσο διάδοσης από την άλλη, δημιουργεί το φαινόμενο της σκέδασης. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί μια γωνιακή ανακατανομή της ακτινοβολίας που μπορεί είτε να συνοδεύεται είτε όχι από διαφοροποίηση του μήκους κύματος.

- Σπινθηρισμοί

Προκαλούνται από θερμικές αναταράξεις με αποτέλεσμα τη δημιουργία τυχαία κατανεμημένων κυψελών, με μεγέθη που κυμαίνονται από 10cm έως 1 Km, διαφορετική θερμοκρασία και δείκτη διάθλασης. Αυτές οι κυψέλες έχουν ως αποτέλεσμα φαινόμενα σκέδασης, πολύ-όδευσης και διαφοροποίηση στη γωνία άφιξης. Παρατηρούμε λοιπόν μία επιπλέον διακύμανση του πλάτους εξαιτίας αυτών των φαινομένων με συχνότητα από 0.01 έως και 200 Hz. Ένα άλλο αποτέλεσμα των σπινθηρισμών είναι η παραμόρφωση του μετώπου του κύματος με συνέπεια την μη εστίαση της δέσμης.

Επιπροσθέτως, η ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζει την επίδοση της ζεύξης όταν ο ήλιος βρίσκεται στην ίδια ευθεία με την κατεύθυνση της ζεύξης.

### 1.3. Μοριακή απορρόφηση

Η μοριακή απορρόφηση οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ της οπτικής ακτινοβολίας και των ατόμων ή/και των μορίων του μέσου διάδοσης (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, Ar, κτλ.). Ο συντελεστής απορρόφησης εξαρτάται από το είδος και τη συγκέντρωση των μορίων του αερίου. Οι φασματικές μεταβολές του συντελεστή απορρόφησης προσδιορίζουν το φάσμα απορρόφησης. Η μορφή αυτού του φάσματος οφείλεται στις πιθανές ενεργειακές στάθμες του αερίου που προκύπτουν από τις μεταβάσεις των ηλεκτρονίων, τις ταλαντώσεις των ατόμων και την περιστροφή των μορίων. Αύξουσης της πίεσης ή της θερμοκρασίας τείνει να διασπείρει τη φασματική απορρόφηση, με τη διέγερση υψηλότερων ενεργειακών σταθμών και με το φαινόμενο Doppler. Η μοριακή απορρόφηση είναι ένα επιλεκτικό φαινόμενο που έχει ως αποτέλεσμα σχετικά διαυγή ατμοσφαιρικά παράθυρα διάδοσης και σχετικά αδιαφανή παράθυρα συχνοτήτων με παρουσία ατμοσφαιρικής απορρόφησης

Τα παράθυρα μετάδοσης στο οπτικό φάσμα είναι:

- Ορατό και πολύ κοντινό υπέρυθρο: από 0.4 έως 1.4 μm
- Κοντινό υπέρυθρο ή υπέρυθρο I: 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

Τα αέρια μόρια έχουν κβαντισμένες ενεργειακές στάθμες και μπορούν να απορροφούν ενέργεια κάτω από την επίδραση προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με συνέπεια την μεταπήδηση από ένα αρχικό ενεργειακό επίπεδο  $e_i$  σ' ένα υψηλότερο  $e_f$ . Έτσι η εκπεμπόμενη ενέργεια εξασθενίζει από την απώλεια ενός ή περισσότερων φωτονίων. Αυτή η διαδικασία συμβαίνει μόνο όταν η συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος αντιστοιχεί ακριβώς σε μία από τις συχνότητες συντονισμού του μορίου.

Αυτές οι συχνότητες δίδονται από τον εξής τύπο[1]:

$$u_0 = \frac{e_f - e_i}{h} \quad (1)$$

Όπου:

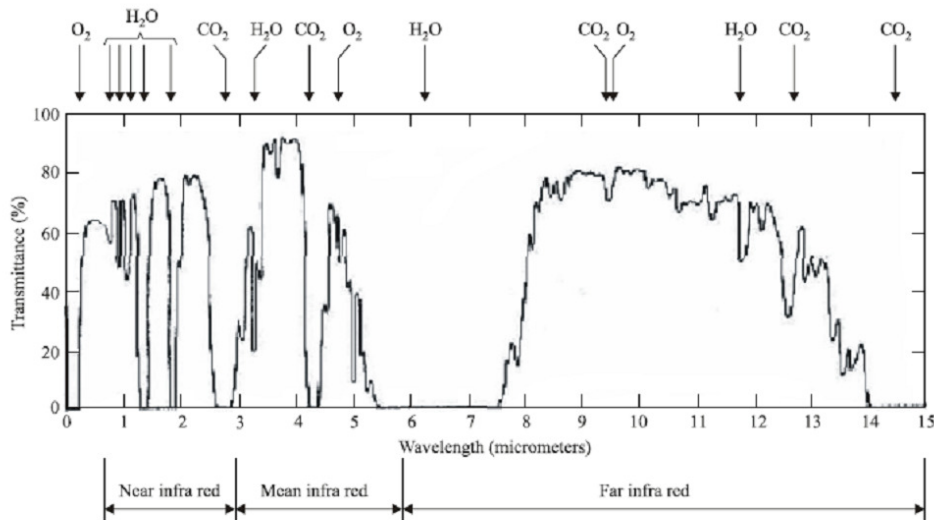
$u_0$  : η συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος σε Hz

$h$ : η σταθερά του Planck,  $h = 6.6262 \cdot 10^{-34}$  J-s.

Οι θεμελιώδεις παράμετροι που προσδιορίζουν την απορρόφηση από τον μοριακό συντονισμό είναι οι πιθανές ενεργειακές στάθμες για κάθε είδος μορίου, η πιθανότητα μετάβασης από μία ενεργειακή στάθμη  $e_i$  σε μια άλλη  $e_f$ , η ένταση των γραμμών συντονισμού και το φυσικό προφίλ κάθε γραμμής.

Το φαινόμενο Doppler τροποποιεί το προφίλ της κάθε γραμμής απορρόφησης, όταν τα μόρια κινούνται σχετικά με το προσπίπτον κύμα, και εξαιτίας των συγκρούσεων που δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση των μορίων. Αυτά τα φαινόμενα οδηγούν σε φασματική διεύρυνση των φυσικών συνιστωσών του εκάστοτε μορίου.

Για συγκεκριμένα μόρια τα προφίλ των φασματικών συνιστωσών απορρόφησης μπορεί να εκτείνονται πολύ πιο μακριά από την κεντρική γραμμή. Αυτή η ιδιότητα οδηγεί σε μια συνέχεια της απορρόφησης. Το Σχήμα 4 απεικονίζει την μετρηθείσα ονομαστική ατμοσφαιρική διαπερατότητα λόγω των μοριακών απορροφήσεων σε μια οριζόντια ζεύξη 1820 m στο θαλάσσιο επίπεδο.



$n(\lambda)$  :ο συντελεστής διάθλασης του αέρα

Μία προσεγγιστική τιμή του  $\beta_m(\lambda)$  δίνεται από τον εξής τύπο[1]:

$$\beta_m(\lambda) = A\lambda^{-4} \quad (3)$$

όπου:

$$A = 1.09 * 10^{-3} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \quad (4)$$

και

P : η ατμοσφαιρική πίεση σε mbar

$P_0$  : 1013 mbar

T :η ατμοσφαιρική θερμοκρασία σε K

$T_0$  :273.15 K

Η μοριακή σκέδαση είναι αμελητέα στα υπέρυθρα μήκη κύματος , και η σκέδαση Rayleigh πρωταρχικά επηρεάζει τα υπεριώδη μέχρι τα ορατά μήκη κύματος.

## 1.5. Απορρόφηση αερολυμάτων

Τα αερολύματα είναι εξαιρετικά μικρά στερεά ή υγρά σωματίδια που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα που κινούνται με πολύ μικρή ταχύτητα και το μέγεθος τους κυμαίνεται από 0.01 έως 100 μm. Τέτοια παραδείγματα είναι ο πάγος , ο καπνός και η σκόνη. Επηρεάζουν τις συνθήκες της ατμοσφαιρικής εξασθένησης ανάλογα με την χημική τους σύσταση , το μέγεθός και την συγκέντρωσή τους. Ο συντελεστής απόσβεσης λόγω της απορρόφησης από τα αερολύματα, σε  $\text{Km}^{-1}$  δίνεται από τον εξής τύπο:

$$a_n(\lambda) = 10^5 \int_0^{\infty} Q_a \left( \frac{2\pi r}{\lambda}, n \right) \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} \quad (5)$$

όπου

$\lambda$ : μήκος κύματος σε μm

$dN(r)/dr$ : η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου σε  $\text{cm}^{-4}$

$n''$  : το φανταστικό μέρος του συντελεστή ανάκλασης  $n$ , του συγκεκριμένου αερολύματος

$r$ : ακτίνα των σωματιδίων σε  $\text{cm}$

$Q_a(2\pi r/\lambda, n'')$ : διατομή απορρόφησης για τον συγκεκριμένο τύπο αερολύματος

Η θεωρία της σκέδασης αερολυμάτων Mie προβλέπει ότι το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο περιθλάται από σφαιρικά σωματίδια. Η διατομή απορρόφησης  $Q_a$  εξαρτάται από το μέγεθος του σωματιδίου, τον δείκτη διάθλασης και το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτίνας. Ο συντελεστής διάθλασης των αερολυμάτων εξαρτάται από τη χημική σύστασή τους και από το μήκος κύματος. Αναπαριστάται σαν  $n = n' + n''$ , όπου το  $n'$  είναι συνάρτηση της σκεδαζόμενης ποσότητας του σωματιδίου και το  $n''$  είναι συνάρτηση της απορρόφησης του σωματιδίου.

Στην ορατή και κοντά υπέρυθρη φασματική περιοχή, το φανταστικό μέρος του συντελεστή ανάκλασης είναι πολύ χαμηλό και μπορεί να αμεληθεί στον υπολογισμό της συνολικής απόσβεσης. Ωστόσο στην μακρινά υπέρυθρη φασματική περιοχή, το φανταστικό μέρος του συντελεστή διάθλασης πρέπει να ληφθεί υπ' όψη.

## 1.6. Σκέδαση αερολυμάτων

Η σκέδαση αερολυμάτων (Σκέδαση Mie) λαμβάνει χώρα όταν το μέγεθος του σωματιδίου είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός. Αυτό το φαινόμενο είναι το πιο περιοριστικό στα οπτικά συστήματα ελεύθερου χώρου σε μεγάλες αποστάσεις, καθώς η εξασθένιση εξαιτίας της σκέδασης φτάνει στα 300dB/Km, σε αντίθεση με μήκη κύματος της τάξης των mm που η εξασθένιση φθάνει λίγα dB/Km. Συμπεραίνουμε τελικά ότι η εξασθένιση είναι συνάρτηση της συχνότητας και της ορατότητας, η οποία ορατότητα σχετίζεται με την κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων.

Ο συντελεστής εξασθένισης λόγω της σκέδασης αερολυμάτων  $\beta_n(\lambda)$  σε  $\text{Km}^{-1}$  δίνεται από τον εξής τύπο:

$$\beta_n(\lambda) = 10^5 \int_0^{\infty} Q_d \left( \frac{2\pi r}{\lambda}, n' \right) \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} (6)$$

όπου

$\lambda$ : μήκος κύματος σε  $\mu\text{m}$

$dN(r)/dr$ : η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου ( $\text{cm}^{-4}$ )

$n'$ : το πραγματικό μέρος του συντελεστή ανάκλασης  $n$ , του συγκεκριμένου αερολύματος

$r$ : ακτίνα των σωματιδίων σε  $\text{cm}$

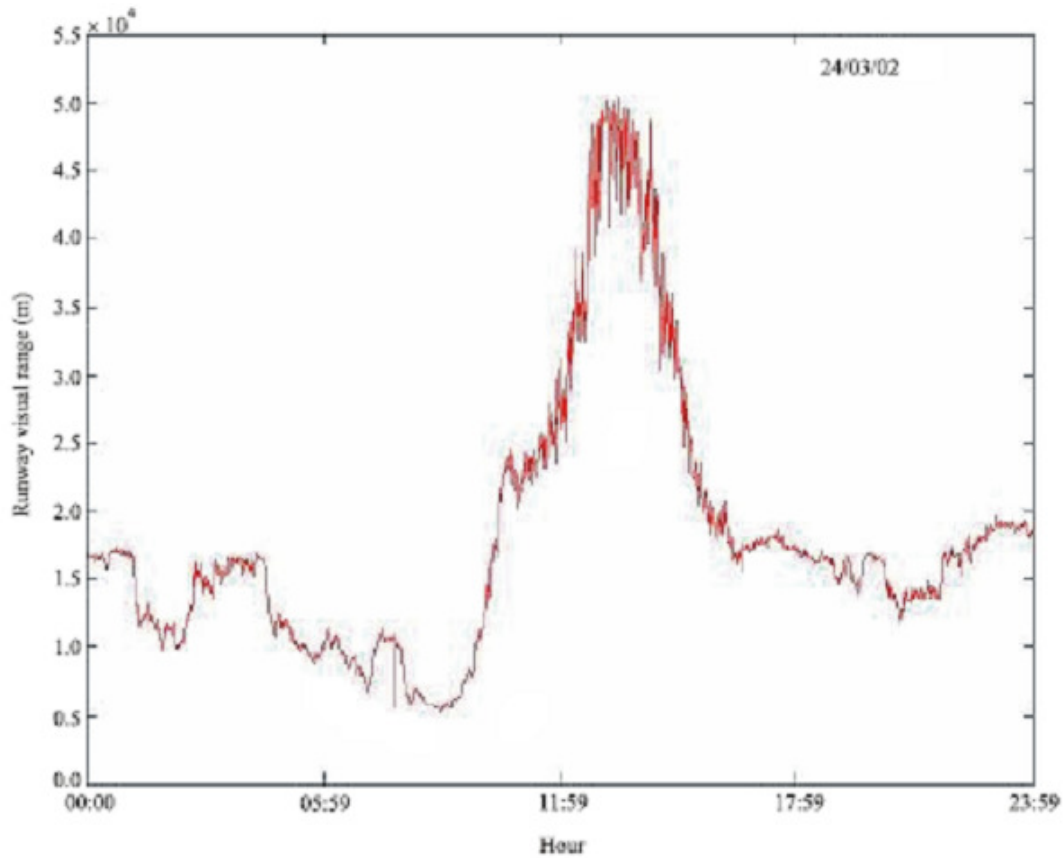
$Q_d(2\pi r/\lambda, n')$ : η διατομή σκέδασης για συγκεκριμένο τύπο αερολύματος

Η θεωρία Mie προβλέπει τον συντελεστή σκέδασης  $Q_d$  εξαιτίας των αερολυμάτων, υποθέτοντας σφαιρικά σωματίδια και διαχωρισμένα ώστε το σκεδαζόμενο πεδίο να μπορεί να υπολογιστεί υποθέτοντας σκέδαση μακρινού πεδίου. Η διατομή σκέδασης  $Q_d$  εξαρτάται σημαντικά από το μέγεθος των αερολυμάτων συγκρινόμενο με το μήκος κύματος και είναι πολύ συχνοεπιλεκτική συνάρτηση για σωματίδια με ακτίνα μικρότερη ή ίση με το μήκος κύματος.

Από τη στιγμή που η συγκέντρωση των αερολυμάτων, η σύσταση και η κατανομή του μεγέθους τους μεταβάλλεται τόσο χρονικά όσο και χωρικά, είναι δύσκολο να προβλεφθεί με ακρίβεια η εξασθένιση που οφείλεται σε αυτά. Αν και η συγκέντρωση τους σχετίζεται με την οπτική ορατότητα, δεν υπάρχει μοναδική κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων για μια δοθείσα.

Η ορατότητα χαρακτηρίζει την διαφάνεια της ατμόσφαιρας όπως υπολογίζεται από έναν ανθρώπινο παρατηρητή. Μετριέται από την οπτική έκταση διαδρόμου και είναι η απόσταση στην οποία ένας οπτικός παλμός πρέπει να ταξιδέψει κατά μήκος της ατμόσφαιρας έτσι ώστε η ένταση του να πέσει στο 0.05 της αρχικής του τιμής. Επίσης μπορεί να μετρηθεί από μετρητή διάχυσης ή διάδοσης.

Στο Σχήμα 5 φαίνεται ένα παράδειγμα των μεταβολών της οπτικής έκτασης διαδρόμου στην La Turbie, Γαλλία κατά τη διάρκεια μίας μέρας με υψηλή ορατότητα.



Σχήμα 5-Μεταβολές οπτικής έντασης φωτός[1]

Ένας εναλλακτικός τρόπος μέτρησης της ορατότητας κατά μήκος ενός μονοπατιού μετάδοσης χρησιμοποιώντας μία CCD κάμερα είναι με τη χρήση ενός μαύρου και άσπρου στόχου αναφοράς. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο το οπτικό εύρος  $V_r$  δίνεται από τον εξής τύπο:

$$V_r = \frac{\ln(0.02)}{\ln(C/C_0)} d \quad (7)$$

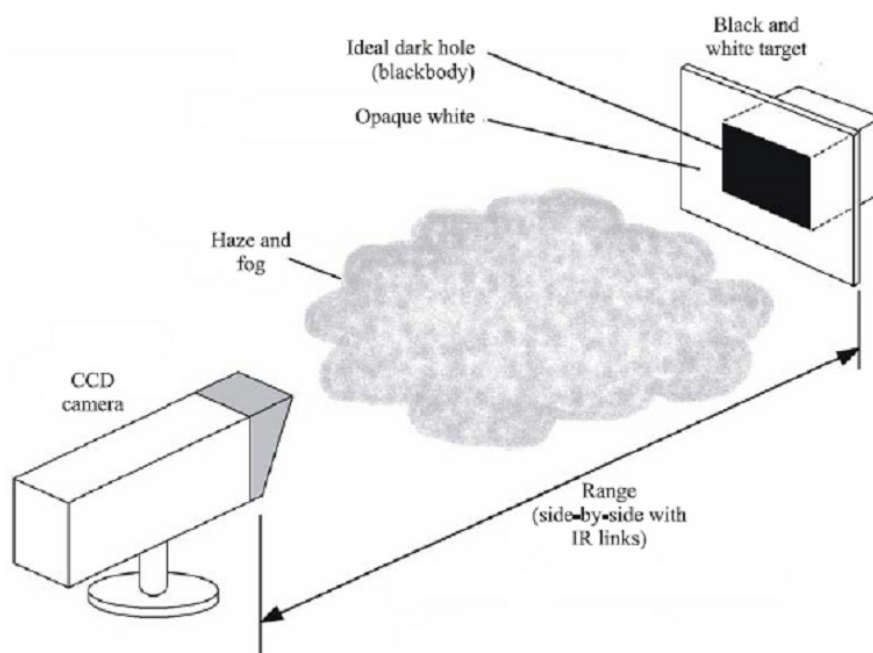
Όπου  $C$  είναι η μετρούμενη αντίθεση ανάμεσα στη μαύρη και άσπρη περιοχή του στόχου, όπου  $C_0$  η εγγενής αναλογία της αντίθεσης του στόχου (μετρούμενη κοντά σε αυτόν) και όπου  $d$  η απόσταση από τον στόχο. Η τιμή του  $C$  δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{L_w - L_b}{L_w + L_b} = 0.02 = e^{-b_{EX} \cdot V_r} \quad (8)$$



όπου  $L_w$  και  $L_b$  είναι η φωτεινότητα των άσπρων και μαύρων μερών του στόχου αντίστοιχα,  $b_{EX}$  ο συντελεστής εξάλειψης και  $V_T$  οπτικό εύρος.

Στο Σχήμα 6 φαίνεται ένας ιδανικός στόχος, ο οποίος αποτελείται από ένα άσπρο πλαίσιο με μια κοιλότητα στο κέντρο της οποίας η επιφάνεια είναι μαύρη, έτσι ώστε να αποφευχθεί οποιοδήποτε άμεσα σκεδαζόμενο φως.



**Σχήμα 6-Πειραματική διάταξη μέτρησης ορατότητας[1]**

Η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων είναι η βασική παράμετρος που προσδιορίζει τις φυσικές και οπτικές ιδιότητες της ομίχλης αλλά και των οπτικών χαρακτηριστικών των άλλων αερολυμάτων.

Γενικά η κατανομή αυτή αντιπροσωπεύεται από αναλυτικές συναρτήσεις όπως η λογαριθμοκανονική για τα αερολύματα και η τροποποιημένη κατανομή gamma για την ομίχλη. Η κατανομή gamma χρησιμοποιείται ευρέως με σκοπό την μοντελοποίηση διαφόρων τύπων ομίχλης και νεφώσεων και δίνεται από τον τύπο:

$$N(r) = ar^{\alpha} \exp(-br) \quad (9)$$

όπου  $N(r)$  είναι ο αριθμός των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα αύξησης της ακτίνας  $r$  και του  $a$ , ενώ  $a$  και  $b$  είναι παράμετροι που χαρακτηρίζουν την κατανομή μεγέθους του σωματιδίου.

Τυπικές παράμετροι της τροποποιημένης gamma κατανομής δίνονται στον Πίνακα 1

	$\alpha$	$a$	B	$N(cm^{-3})$	$W(g/m^3)$	$r_m(\mu m)$	V(m)
Heavy advection fog	3	0.027	0.3	20	0.37	10	130
Moderate radiation fog	6	607.5	3	200	0.02	2	450

**Πίνακας 1-Παράμετροι gamma κατανομής[1]**

όπου:

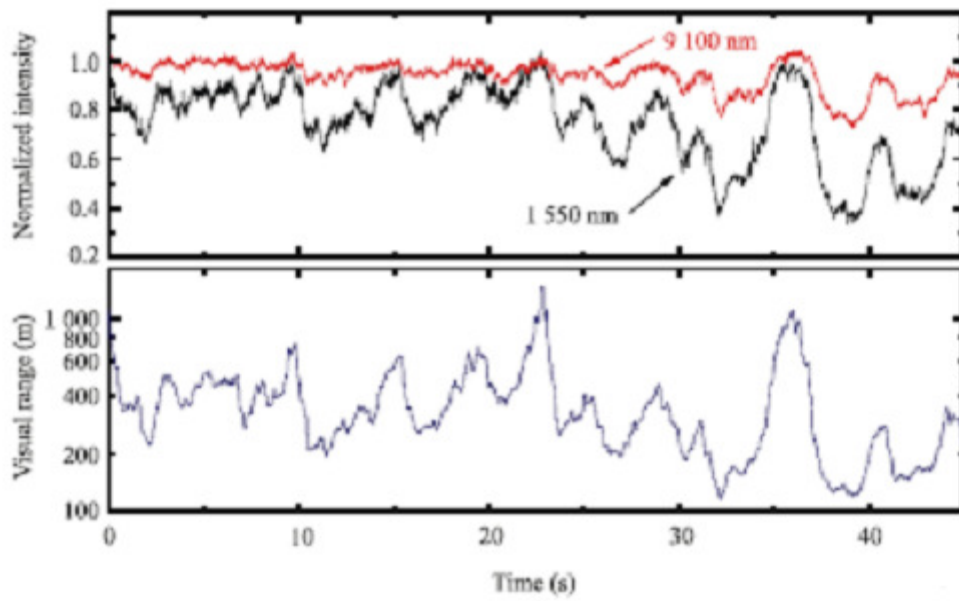
$N$ : ο συνολικός αριθμός των σωματιδίων νερού ανά μονάδα όγκου σε  $cm^{-3}$

$r_m$ : ακτίνα σε  $\mu m$  για την οποία η κατανομή παρουσιάζει ένα μέγιστο

$W$ : περιεχόμενο του υγρού σε νερό ( $g/m^3$ )

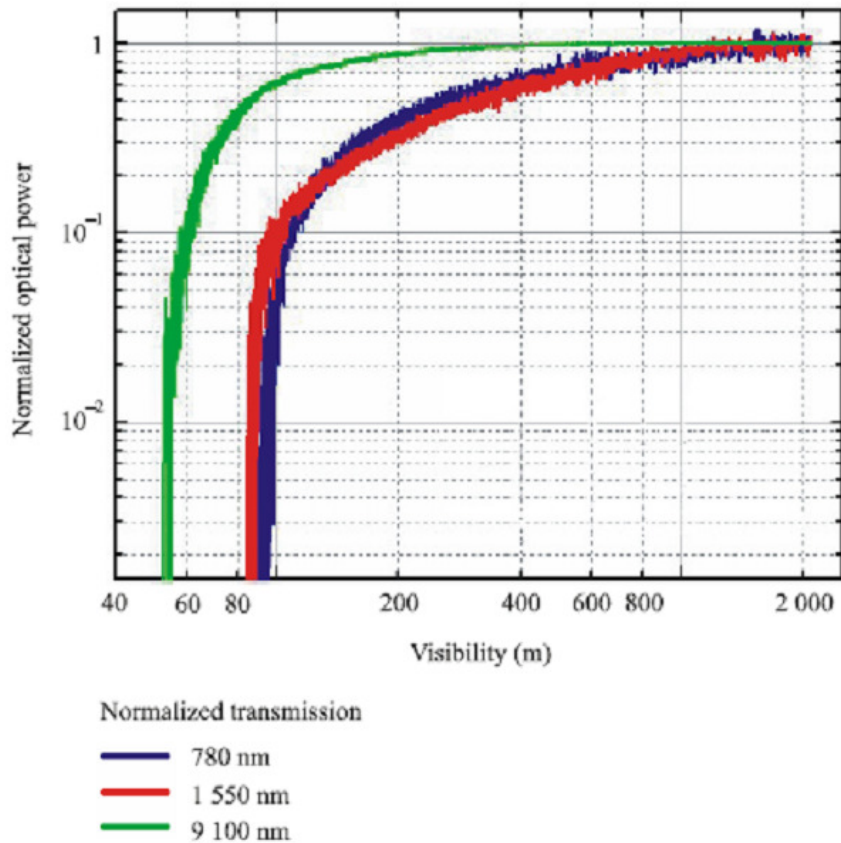
$V$ : ορατότητα σχετιζόμενη με το είδος της ομίχλης σε m

Η λαμβανόμενη στάθμη του σήματος μπορεί να υποστεί σημαντικές βραχύχρονες διακυμάνσεις λόγω μεταβολών της ορατότητας. Στο Σχήμα 7 φαίνονται οι κανονικοποιημένες λαμβανόμενες εντάσεις μιας μακρινής και μιας μέσης υπέρυθρης ζεύξης, μαζί με την ορατότητα της, κατά τη διάρκεια μιας ενός λεπτού χρονοσχισμής.



**Σχήμα 7-Λαμβανόμενη ένταση σήματος σε σύγκριση με την ορατότητα[1]**

Στο Σχήμα 8 φαίνεται η κανονικοποιημένη οπτική ισχύς σαν συνάρτηση της οπτικής εμβέλειας, μετρούμενη στα 780 nm, 1550 nm και 9100 nm.

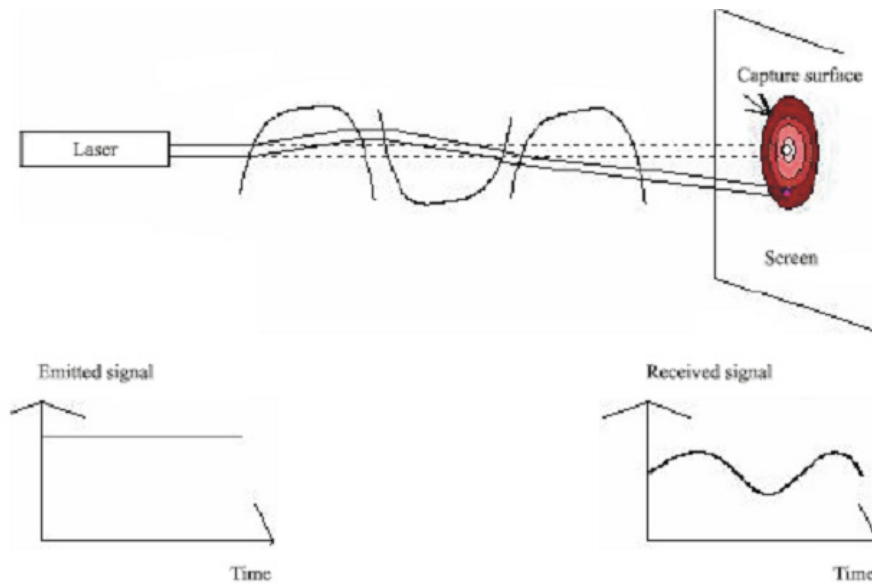


**Σχήμα 8-Κανονικοποιημένη οπτική ενέργεια συναρτήσει της ορατότητας[1]**

## 1.7. Σπινθηρισμοί

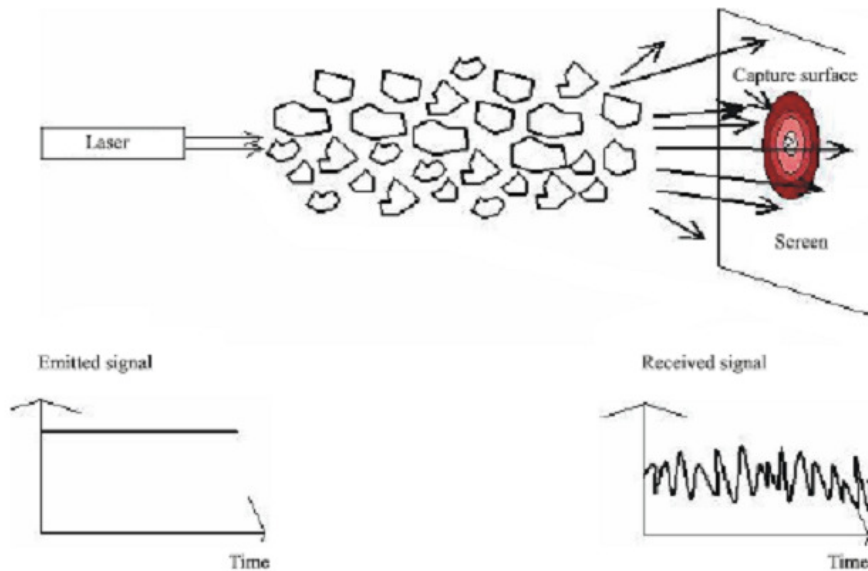
Τυχαία κατανεμημένα κελιά διαφορετικού δείκτη διάθλασης μπορούν να σχηματιστούν μέσα στο μέσο διάδοσης υπό την επίδραση θερμικών στροβιλισμών. Αυτά τα κελιά προκαλούν σκέδαση, πολυ-όδευση και μεταβολές στη γωνία άφιξης, παράγοντας διακυμάνσεις στη στάθμη του λαμβανόμενου σήματος με συχνότητες από 0.01 έως 200 Hz. Οι μεταβολές του μετώπου του κύματος προκαλούν όμοια, χρονο-εξαρτώμενη εστίαση και απόκλιση της φωτεινής δέσμης. Τέτοιες μεταβολές ονομάζονται σπινθηρισμοί. Το πλάτος και η συχνότητα των σπινθηρισμών εξαρτώνται από το μέγεθος των κελιών συγκρινόμενο με τη διάμετρο της δέσμης.

Τα παρακάτω σχήματα παριστάνουν σπινθηρισμούς καθώς και τις μεταβολές (σε μήκος και σε συχνότητα) του λαμβανόμενου σήματος. Στο Σχήμα 9 η δέσμη παρεκκλίνει όταν οι ανομοιογένειες είναι μεγάλες συγκρινόμενες με τη διατομή της δέσμης.



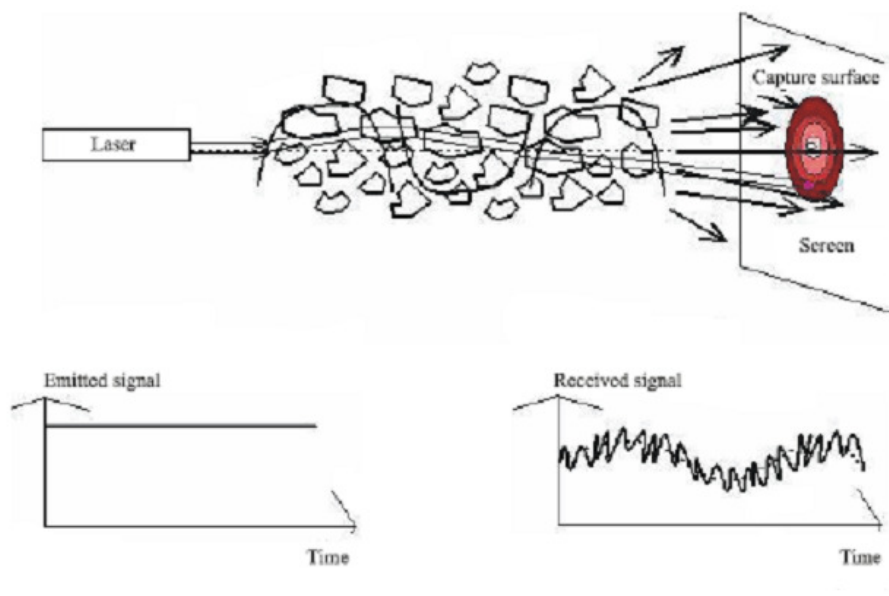
**Σχήμα 9-Παρέκλιση δέσμης [1]**

Στο Σχήμα 10 η δέσμη διευρύνεται καθώς οι ανομοιογένειες είναι μικρές συγκρινόμενες με τη διατομή της δέσμης.



**Σχήμα 10- Διεύρυνση δέσμης λόγω μικρών ανομοιογενειών συγκρίσει της διατομής[1]**

Ο συνδυασμός των ανομοιογενειών έχει ως αποτέλεσμα τους σπινθηρισμούς που παρουσιάζονται στο Σχήμα 11.



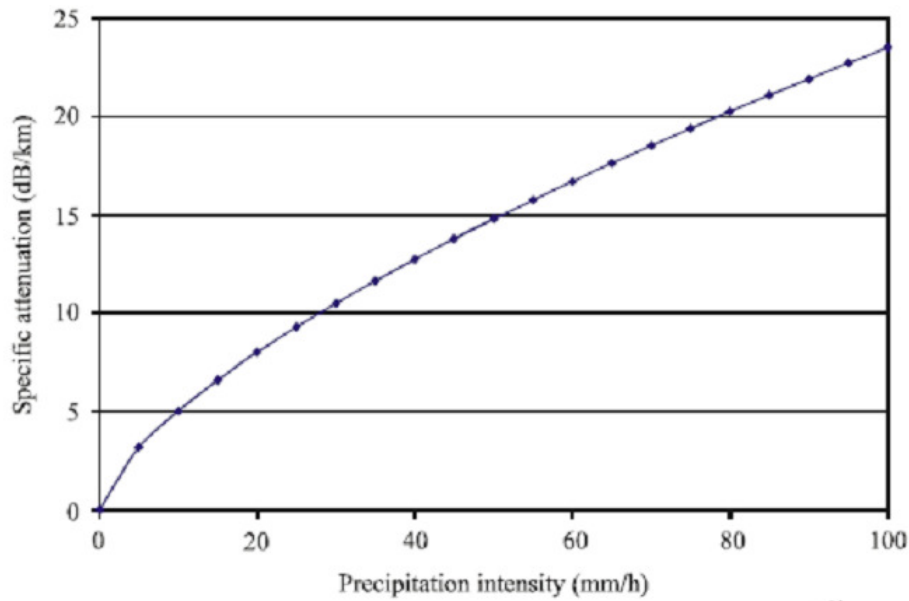
Σχήμα 11-Δημιουργία φαινομένων στροβιλισμών[1]

## 1.8. Εξασθένιση λόγω βροχής

Η ειδική απόσβεση εξαιτίας της βροχής δινόμενη σε dB/km προσεγγίζεται από την εξής σχέση:

$$\gamma_{rain} = k \cdot R^a \quad (10)$$

όπου  $R$  ο ρυθμός βροχόπτωσης, και  $k, a$  παράμετροι που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της βροχής. Το Σχήμα 12 παρουσιάζει τυπικές μεταβολές της ειδικής απόσβεσης εξαιτίας των κατακρημνήσεων, που παρατηρείται στις οπτικές και υπέρυθρες περιοχές.



Σχήμα 12-Ειδική απόσβεση συναρτήσει πυκνότητας κατακρημνήσεων[1]

## 1.9. Εξασθένιση λόγω χιονιού

Η ειδική απόσβεση λόγω χιονιού σε dB/Km δίνεται από τον εξής τύπο:

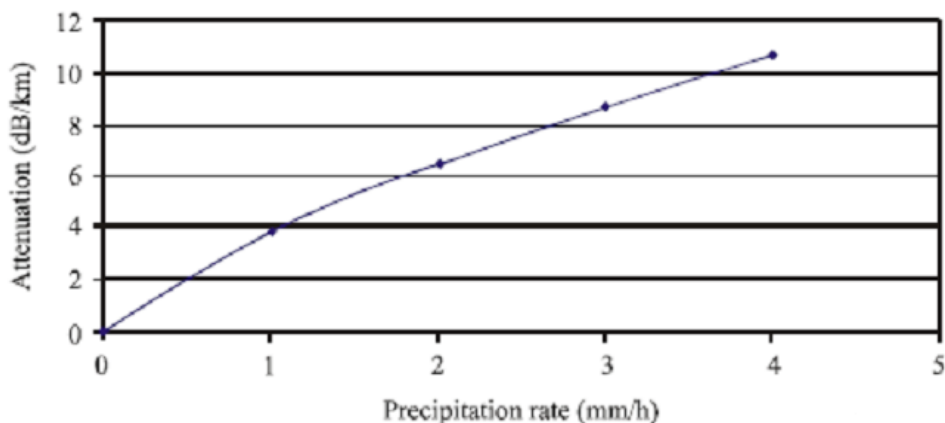
$$\gamma_{snow} = a \cdot S^b \quad (11)$$

όπου  $S$  ο ρυθμός χιονόπτωσης σε mm/h , και  $a, b$  παράμετροι οι οποίες δίνονται από τον Πίνακα 2, όπου το  $\lambda_{nm}$  είναι το μήκος κύματος σε nm.

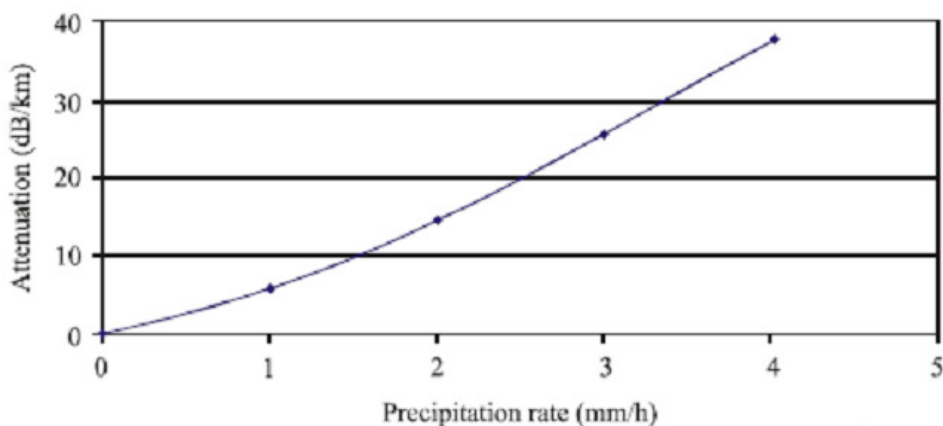
	$A$	$b$
Wet snow	$0.0001023 \lambda_{nm} + 3.7855466$	0.72
Dry snow	$0.0000542 \lambda_{nm} + 5.4958776$	1.38

Πίνακας 2-Παράμετροι εξασθένισης εξαιτίας χιονιού[1]

Η προβλεπόμενη απόσβεση για μήκος κύματος των 1550nm και υγρό χιόνι παρουσιάζεται στο Σχήμα 13 , ενώ για ξηρό χιόνι παρουσιάζεται στο Σχήμα 14.



Σχήμα 13-Ειδική απόσβεση υγρού χιονιού[1]



Σχήμα 14- Ειδική απόσβεση ξηρού χιονιού[1]

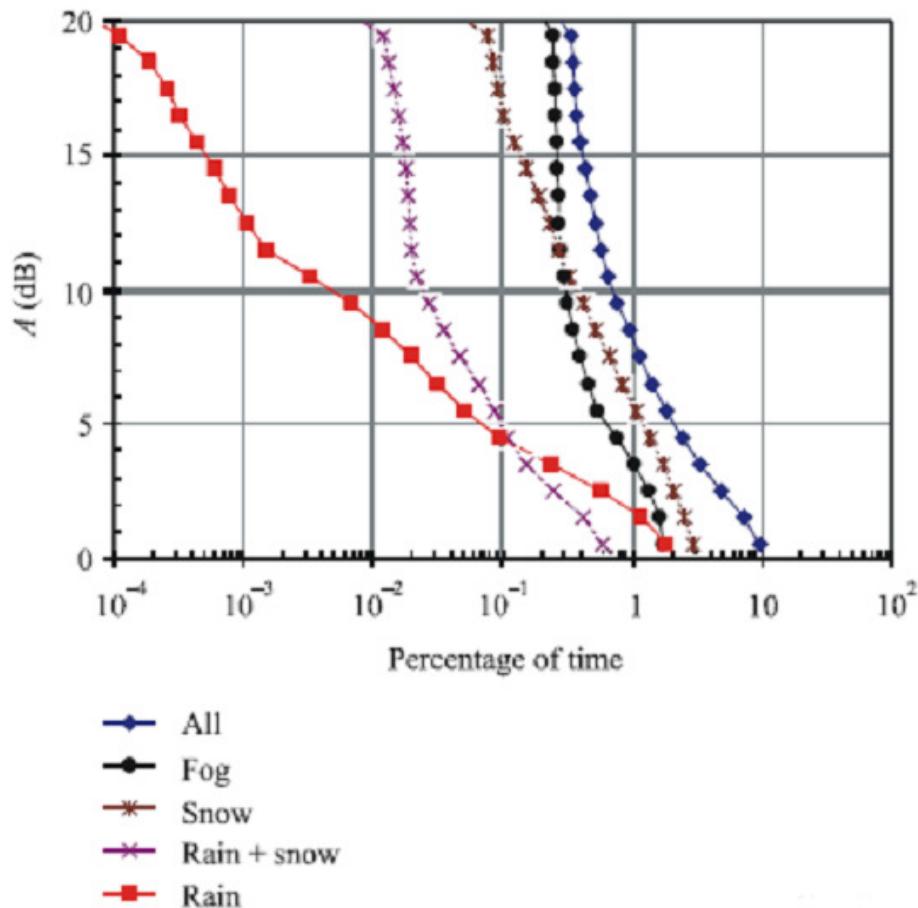
## 1.10. Επίδραση φωτός περιβάλλοντος

Η ηλιακή σύζευξη λαμβάνει χώρα όταν ο ήλιος ή μια ανακλώμενη εικόνα του, είναι κοντά στο στιγμιαίο πεδίο προβολής(IFOV) ενός οπτικού δέκτη. Το λαμβανόμενο IFOV είναι τουλάχιστον τόσο μεγάλο όσο η αποκλίνουσα δέσμη που φτάνει στον δέκτη. Η επίδραση του ηλιακού φωτός συνυπολογίζεται από την πιθανότητα να βρεθεί συνευθειακά ο ήλιος με την ζεύξη και από το κατά πόσον η ενέργεια του ηλιακού φωτός που φθάνει στον δέκτη είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια η οποία φθάνει από τον πομπό[5].



## 1.11. Αθροιστική συνάρτηση κατανομής της απόσβεσης

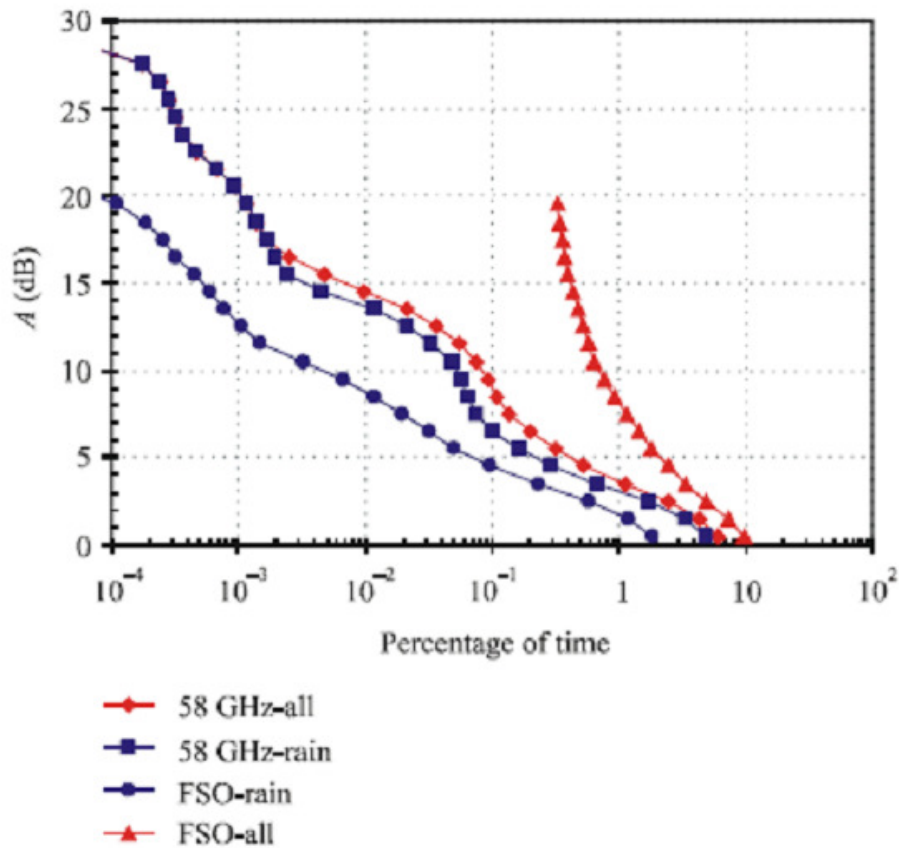
Στο Σχήμα 15 παρουσιάζονται οι αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής της απόσβεσης σε μία ζεύξη μήκους 850m στην περιοχή της Πράγας, Τσεχία κατά τη διάρκεια ενός έτους και μήκους κύματος 850nm, εξαιτίας διαφόρων υδρομετεωριτών καθενός ξεχωριστά αλλά και όλων μαζί.



Σχήμα 15-Αθροιστικές συναρτήσεις απόσβεσης βροχής, ομίχλης και χιονιού[1]

## 1.12. Υβριδικά FSO συστήματα

Το σχήμα 13 συγκρίνει μετρήσεις απόσβεσης στα 58 GHz με μία οπτική ζεύξη που υπόκειται μόνο σε βροχή και από την άλλη σε όλους τους υδρομετεωριτές. Η οπτική διαδρομή έχει μικρότερη εξασθένιση από το κύμα των 58 GHz κατά τη διάρκεια της βροχής. Τα υβριδικά ράδιο-οπτικά (RF/FSO) συστήματα μπορούν να βελτιώσουν την επίδοση της ασύρματης οπτικής (FSO) ζεύξης εκμεταλλευόμενα το γεγονός ότι ένας ραδιοδρόμος υποφέρει με εξασθένιση από τη βροχή αλλά είναι αναισθητός στην ομίχλη. Αντίθετα μια οπτική ζεύξη υποφέρει με έντονη εξασθένιση από την ομίχλη και είναι σχετικά αναισθητή στη βροχή.



Σχήμα 16-Αθροιστικές συναρτήσεις απόσβεσης για RF και FSO ζεύξη[1]

Το Σχήμα 16 δίνει μια εκτίμηση της επίδοσης του υποθετικού υβριδικού RF/FSO συστήματος. Θεωρούμε ένα υβριδικό σύστημα όπου οι RF και οι οπτικοί δρόμοι έχουν το ίδιο περιθώριο διαλείψεων,  $Mlink = 20$  dB. Χρησιμοποιείται μια απλή τεχνική διαφορικής λήψης έτσι ώστε τόσο το RF μέρος όσο και το FSO μέρος του συστήματος να είναι ενεργοποιημένα, εξαρτώμενα από τις στιγμιαίες τιμές απόσβεσης της RF και οπτικής διαδρομής. Υποτίθεται ότι το RF κομμάτι του συστήματος μετριάζει την απόσβεση λόγω μη βροχερών γεγονότων και το FSO κομμάτι μετριάζει την απόσβεση λόγω βροχής. Στον Πίνακα 3 μπορούμε να δούμε τώρα πως εκτιμάται ο λόγος διαθεσιμότητας(AR) σε ένα RF, σε ένα FSO και σε ένα υβριδικό RF/FSO σύστημα.

System	AR(%)
FSO part(850nm)	99.7
RF part(58GHz)	99.999
Hybrid RF/FSO	99.9999

Πίνακας 3-Διαθεσιμότητα σε απλά και υβριδικό σύστημα μετάδοσης[1]

### 1.13. Μέτρηση της ορατότητας

Η ορατότητα  $V$  μετρούμενη σε Km , ορίζεται ως η απόσταση από ένα αντικείμενο στην οποία η αντίθεσή του πέφτει στο 2% της πραγματικής της τιμής. Μετράται στα 550nm, μήκος κύματος που ανταποκρίνεται στην μέγιστη ένταση του ηλιακού φάσματος και δίνεται από την σχέση του Koschmieder[1]:

$$V(km) = \frac{3.912}{\gamma_{550nm}} \quad (12)$$

όπου  $\gamma_{550nm}$  είναι ο συντελεστής εξάλειψης του μέσου διάδοσης.

Ο διεθνής κώδικας ορατότητας που δείχνει την εξασθένιση σε dB/Km για διάφορες κλιματικές συνθήκες παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.

International visibility code				
Weather conditions	Precipitation		Visibility (m)	Attenuation (dB/km)
		mm/h		
Dense fog			0	
Thick fog			50	315
Moderate fog			200	75
Light fog			500	28.9
Very light fog	Storm	100	770	18.3
			1 000	13.8
Light mist	Strong rain	25	1 900	6.9
			2 000	6.6
Very light mist	Average rain	12.5	2 800	4.6
			4 000	3.1
Clear air	Light rain	2.5	5 900	2
			10 000	1.1
Very clear air	Drizzle	0.25	18 100	0.6
			20 000	0.54
			23 000	0.47
			50 000	0.19

Πίνακας 4-Διεθνής κώδικας ορατότητας και ειδικής απόσβεσης[1]

## Βιβλιογραφία

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

[2]Nadeem, Kvicera, Awan, Leitgeb, Muhammad, Kandus “Weather Effects on Hybrid FSO/RF Communication Link” IEEE Journal On Selected Areas In Communications, vol.27, no.9, pp. 1687-1697, December 2009

[3] Anderson, Christine. “Transformational Communications.” March 2002. <http://sunset.usc.edu/GSAW/gsaw2002/s8/canderson.pdf>.

[4] Kenneth St. Germain. “SHIPBOARD RADIO FREQUENCY AND FREE SPACE OPTICS COMMUNICATIONS SYSTEM USING AN AIRBORNE RELAY” September 2005 <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a439542.pdf>

[5]Γιάννης Ν. Τοφής, “Επίδοση πολυβηματικών ασύρματων οπτικών συστημάτων”, Αθήνα, Δεκέμβρης 2009.  
<http://artemis.cslab.ntua.gr/Dienst/UI/1.0/Display/artemis.ntua.ece/DT2009-0126?abstract=%C5%D0%C9%C4%CF%D3%C7+and+%D0%CF%CB%D5%C2%C7%CC%C1%D4%C9%CA%D9%CD+and+%C1%D3%D5%D1%CC%C1%D4%D9%CD+and+%CF%D0%D4%C9%CA%D9%CD+and+%D3%D5%D3%D4%C7%CC%C1%D4%D9%CD>



# Κεφάλαιο 2

## Σχεδιασμός FSO Ζεύξης

Στο σχεδιασμό μιας οπτικής ζεύξης πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν μας μια σειρά χαρακτηριστικά τόσο της ζεύξης (όπως η ευθυγράμμιση πομπού και δέκτη) όσο και του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται η ζεύξη. Ατμοσφαιρικά φαινόμενα όπως οι σπινθηρισμοί περιορίζουν τη διαθεσιμότητα της ζεύξης.

Για τη σχεδίαση μιας οπτικής ζεύξης, πρέπει πρώτα απ' όλα να υπολογίσουμε το περιθώριο διαλείψεων  $M_{link} (dB)$  που είναι η ενέργεια του μεταδιδόμενου παλμού πάνω από το επίπεδο ευαισθησίας του δέκτη και δίνεται από τον τύπο[1]:

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

Όπου

$P_e$  (dBm): η συνολική ενέργεια του πομπού

$S_r$  (dBm): η ευαισθησία του δέκτη, εξαρτάται από το ρυθμό μετάδοσης

$A_{geo}$  (dB): η απόσβεση εξαιτίας της αυξανόμενης ακτίνας της δέσμη λόγω διάδοσης της

$A_{atmo}$  (dB): η ατμοσφαιρική απόσβεση λόγω απορρόφησης και διασποράς

$A_{scintillation}$  (dB): απόσβεση λόγω ατμοσφαιρικών σπινθηρισμών

$A_{system}$  (dB): συμπεριλαμβάνει όλων των άλλων ειδών αποσβέσεις όπως οι απώλειες εξαιτίας κακής ευθυγράμμισης της εκπεμπόμενης ακτίνας, οπτικές απώλειες του δέκτη, απώλειες λόγω ευθυγράμμισης του ήλιου κτλ

### 2.1. Αρχικές εκτιμήσεις στη σχεδίαση οπτικών ζεύξεων

Η επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας για την οπτική ζεύξη είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την επιτυχή λειτουργία ενός συστήματος FSO. Η εγκατάσταση μιας FSO ζεύξης πρέπει να υπολογίσει τις καιρικές συνθήκες, τα φυσικά εμπόδια και τις επιφάνειες του εδάφους κατά μήκος της διαδρομής και τις ρυθμίσεις κατά την εγκατάσταση για εξασφάλιση της απόδοσης της ζεύξης.

#### 2.1.1. Καιρικές συνθήκες

Οι καιρικές συνθήκες και ειδικά το τοπικό κλίμα που επικρατεί στις γειτονικές με τη ζεύξη περιοχές, θα επηρεάζει την εμφάνιση χιονιού, βροχής, ομίχλης, αερολύματα και σκόνης/άμμου, που οδηγούν στην απορρόφηση και σκέδαση του μεταδιδόμενου σήματος.

## 2.1.2. Χαρακτηριστικά δρόμου διάδοσης

- Φυσικά εμπόδια μεταξύ του πομπού και του δέκτη πρέπει να αποφεύγονται. Αξίζει να σημειωθεί ότι μεγάλα δέντρα μπορούν να αυξάνουν το ύψος τους 0.5 έως 1 m στη διάρκεια ενός χρόνου και να αλλάζουν την πυκνότητα του φυλλώματός τους κατά τη διάρκεια του.
- Ζεύξεις ανάμεσα σε κτήρια πρέπει να λαμβάνουν υπόψη θερμικά ανοίγματα εξαερισμού που μπορούν να οδηγήσουν σε αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα κατά μήκος του δρόμου διάδοσης και να προκαλέσουν στροβιλισμούς (turbulence) που με τη σειρά τους μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικούς σπινθηρισμούς στο λαμβανόμενο σήμα.
- Η τοπογραφία και το είδος της επιφάνειας κάτω από μια FSO ζεύξη μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την επίδοσή της. Ζεύξεις κατά μήκος κοιλάδων ή κατά μήκος περιοχών ανοικτής θαλάσσης, θα εμφανίζουν συχνά φαινόμενα ομίχλης. Κτηριακές κατασκευές κάτω από τη ζεύξη μπορούν να προκαλέσουν πρόσθετη θερμική δραστηριότητα στο αέρα πάνω απ' αυτά, η οποία οδηγεί σε αυξημένους σπινθηρισμούς στο λαμβανόμενο σήμα.

## 2.1.3. Τοποθέτηση πομπού

Τα περισσότερα συστήματα FSO έχουν δέσμη πολύ στενού πλάτους και ως αποτέλεσμα η ακριβής ευθυγράμμιση του πομπού και του δέκτη είναι σημαντική. Οποια έλλειψη ευθυγράμμισης προκαλεί σημαντική απώλεια σήματος. Η βάση του τηλεσκοπίου πρέπει να είναι σταθερή και κατευθείαν τοποθετημένη σε τοίχους ή στην κορυφή μιας κολώνας, γεγονός θεμελιώδες για την αξιόπιστη επίδοση του συστήματος. Η κίνηση ως αποτέλεσμα της θερμικής διαστολής ή λόγω του ανέμου, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί.

## 2.2. Γεωμετρική απόσβεση

Σε οποιοδήποτε ατμοσφαιρικό περιβάλλον, η μεταδιδόμενη δέσμη αποκλίνει, με αποτέλεσμα στον δέκτη να φτάνει μικρότερη ποσότητα ενέργειας. Η απόσβεση εξαιτίας τη διάχυσης αυτής του παλμού ονομάζεται γεωμετρική απόσβεση και δίνεται από τον τύπο[1]:

$$A_{geo}(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{S_d}{S_{capture}} \right) \quad (2)$$

Όπου

$S_{capture}$  : η επιφάνεια σύλληψης του δέκτη ( $m^2$ )

$S_d$  : η επιφάνεια μετάδοσης της δέσμη σε απόσταση  $d$  (km) από το πομπό

υπολογιζόμενη από  $S_d = \frac{\pi}{4} (d \cdot \theta)^2$ , όπου  $\theta$  η απόκλιση της δέσμης σε mrad



Σε μικρών αποστάσεων ζεύξεις που η επιφάνεια σύλληψης του δέκτη είναι μεγαλύτερη από αυτή της εκπεμπόμενης ακτίνας τότε η γεωμετρική απόσβεση είναι μηδενική.

## 2.3. Ειδική ατμοσφαιρική απόσβεση

Η ειδική ατμοσφαιρική απόσβεση  $\gamma_{atmo}$  (dB / km) αποτελείται από δυο όρους:

$\gamma_{clear\_air}$  (dB / km) : ειδική απόσβεση υπολογιζόμενη υπό καθαρή ατμόσφαιρα (εξαιτίας της παρουσίας αέριων μορίων)

$\gamma_{excess}$  (dB / km) : ειδική απόσβεση εξαιτίας περιστασιακής παρουσίας ομίχλης, χιονιού, σκόνης, νεφών, βροχής κτλ

Καθώς όμως η ατμόσφαιρα είναι ένα χρονομεταβλητό μέσο διάδοσης, η ειδική ατμοσφαιρική απόσβεση είναι μια στοχαστική διαδικασία και δεν παίρνει μια συγκεκριμένη τιμή.

Η απόσβεση υπό καθαρό αέρα  $\gamma_{clear\_air}$  (dB / km) είναι κυρίως η απόσβεση εξαιτίας της απορρόφησης από αέρια μόρια. Η παρουσία τέτοιων αέριων μορίων (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, κτλ) και η πυκνότητα τους καθορίζουν το μέτρο της απόσβεσης. Η μοριακή απορρόφηση είναι ένα φαινόμενο επιλεκτικό ως προς το μήκος κύματος. Έτσι δημιουργούνται παράθυρα μετάδοσης σε συγκεκριμένες συχνότητες που η ζεύξη δεν υπόκειται σε μοριακή απορρόφηση, άρα η ειδική απόσβεση καθαρού αέρα είναι αμελητέα. Τέτοια παράθυρα μετάδοσης είναι γύρω από τα 690, 780, 850, και 1550nm.

Αξίζει ωστόσο να σημειώσουμε ότι σε αστικές περιοχές με υψηλή συγκέντρωση αερολυμάτων τα παράθυρα μετάδοσης αυτά μπορεί να μην ισχύουν.

Η ειδική απόσβεση υπέρβασης  $\gamma_{excess}$  (dB / km) προκαλείται από περιστασιακά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα και ανακατευθύνουν το σήμα εκπομπής προς διάφορες κατευθύνσεις. Το φαινόμενο αυτό της σκέδασης ανάλογα με την ακτίνα των σωματιδίων και με το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτίνας μπορεί να χωριστεί σε 3 κατηγορίες σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα στον οποίο για το ορατό και υπέρυθρο φάσμα φαίνεται ποια ατμοσφαιρικά φαινόμενα ακολουθούν την κάθε κατηγορία σκέδασης.

	Rayleigh scattering	Mie scattering	Non-selective or geometrical scattering
	$r \ll \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^{-4}$	$r \approx \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^{-1.6}$ to $Q(\lambda) \sim \lambda^0$	$r \gg \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^0$
Type of scatter	Air molecules Haze	Haze Fog Aerosol	Fog Rain Snow Hail

**Πίνακας 1-Προσεγγίσεις σκέδασης συναρτήσει μεγέθους σωματιδίων και μήκους κύματος ακτινοβολίας[1]**

Στη σκέδαση Rayleigh εξαιτίας της  $-4$  δύναμης ως προς το μήκος κύματος, η απόσβεση που εισάγεται είναι αμελητέα.

Για σωματίδια που το μέγεθος τους είναι πολύ μεγαλύτερο από το μήκος κύματος μετάδοσης η πρόσπτωση των ακτίνων μπορεί να εξηγηθεί με νόμους γεωμετρικής οπτικής και έτσι η απόσβεση είναι ανεξάρτητη του μήκους κύματος. Τέτοιες περιπτώσεις είναι η βροχή, το χιόνι, σταγονίδια στα σύννεφα και παχιά ομίχλη.

Για σωματίδια που το μέγεθος τους είναι συγκρίσιμο με το μήκος κύματος, θα χρησιμοποιήσουμε τη Mie theory. Τέτοιες περιπτώσεις είναι η ομίχλης και στερεά αεροσωματίδια.

### 2.3.1. Ειδική απόσβεση ομίχλης $\gamma_{fog}$

Υπάρχουν αναλυτικές μέθοδοι υπολογισμού της ειδικής απόσβεσης μέσω της Mie theory, ωστόσο χρησιμοποιούνται ευρέως εμπειρικά μοντέλα που υπολογίζουν αυτή την απόσβεση με πιο απλές σχέσεις. Για το εμπειρικό μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε, χρησιμοποιούμε την τιμή της ορατότητας ( $V$ ), που έχει εξηγηθεί στο κεφάλαιο 1. Ο τύπος που υπολογίζει την ειδική απόσβεση είναι[1]:

$$\gamma_{fog}(\lambda) = \frac{3.91}{V} \left( \frac{\lambda}{550nm} \right)^{-q} \quad (3)$$

Όπου

$V$  :η ορατότητα σε km

$q$  :μια παράμετρος που εξαρτάται από την χωρική κατανομή των σωματιδίων σκέδασης. Από πειραματικά δεδομένα έχει προσδιοριστεί ως εξής:

$$\begin{aligned} &=1.6 && \text{για } V > 50\text{km} \\ &=1.3 && \text{για } 6\text{km} < V < 50\text{km} \\ &=0.585 V^{1/3} && \text{για } V < 6\text{km} \end{aligned}$$

### 2.3.2. Ειδική απόσβεση βροχής $\gamma_{rain}$

Η ειδική απόσβεση λόγω βροχής δίνεται από τον εξής τύπο:

$$\gamma_{rain} = k \cdot R^{\alpha} \quad (4)$$

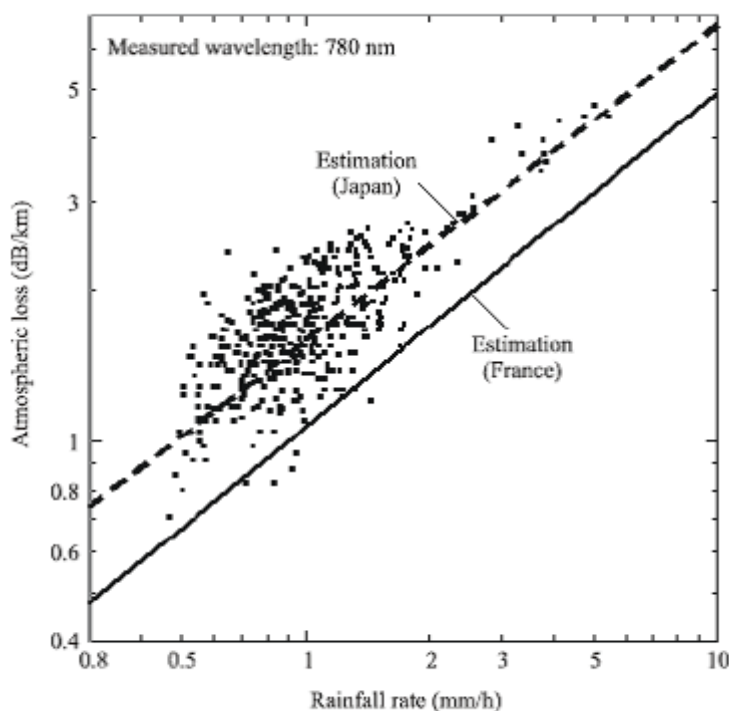
Η σύσταση P.837 της ITU-R [2] προσδιορίζει το ρυθμό βροχόπτωσης R σε mm/h.

Πειραματικά έχουν προσδιοριστεί οι τιμές  $k$  και  $\alpha$  για Ιαπωνία και Γαλλία και φαίνονται στον πίνακα 2.

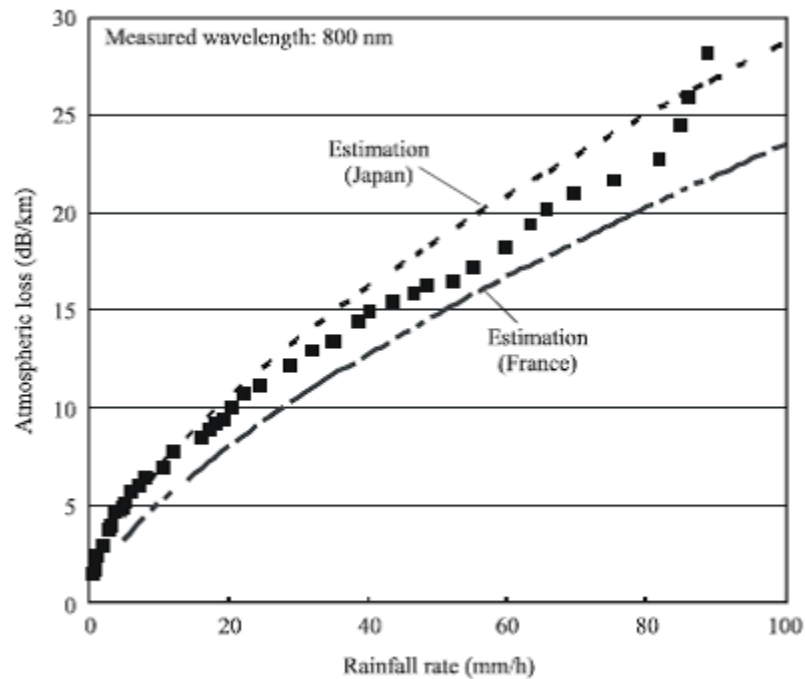
Location	k	$\alpha$
Japan	1.58	0.63
France	1.076	0.67

**Πίνακας 2-Παράμετροι για τον υπολογισμό της ειδικής απόσβεσης εξαιτίας βροχής[1]**

Στα σχήματα 1 και 2 φαίνονται δυο σειρές μετρήσεων στα 780 και στα 800nm αντίστοιχα που δείχνουν τη σχέση του ρυθμού βροχόπτωσης και της απόσβεσης. Παρουσιάζονται επίσης και οι θεωρητικές καμπύλες με τις τιμές των παραμέτρων  $k$  και  $\alpha$  όπως εξάγονται από τον πίνακα 2.



**Σχήμα 1-Ατμοσφαιρική απόσβεση εξαιτίας βροχής[1]**



Σχήμα 2-Ατμοσφαιρική απόσβεση εξαιτίας βροχής[1]

### 2.3.3. Ειδική απόσβεση χιονιού $\gamma_{snow}$

Η ειδική απόσβεση χιονιού υπολογίζεται συναρτήσει του ρυθμού χιονόπτωσης  $S$  (mm/h) ως εξής :

$$\gamma_{snow} = \alpha \cdot S^b \quad (5)$$

Με τις παραμέτρους  $\alpha$  και  $b$  να εξαρτώνται από το είδος του χιονιού και η παράμετρος  $\alpha$  συνάρτηση του μήκους κύματος. Δίνονται στον πίνακα 3.

	$\alpha$	$b$
Wet snow	$0.0001023 \lambda_{nm} + 3.7855466$	0.72
Dry snow	$0.0000542 \lambda_{nm} + 5.4958776$	1.38

Πίνακας 3-Παράμετροι για τον υπολογισμό της ειδικής απόσβεσης εξαιτίας χιονιού[1]

## 2.4. Απόσβεση λόγω σπινθηρισμών

Οι ατμοσφαιρικοί στροβιλισμοί παράγουν προσωρινούς θύλακες αέρα με ελαφρώς διαφορετικές θερμοκρασίες, πυκνότητες και δείκτες διάθλασης. Ανάλογα με το μέγεθος των θυλάκων-κελιών αυτών, συναρτήσκει της διαμέτρου της εκπεμπόμενης δέσμης, δημιουργούνται φαινόμενα που συμβάλλουν στη τυχαία διακύμανση της ληφθείσας ισχύος.

Αν τα κελιά αυτά είναι μεγαλύτερα από τη διάμετρο της δέσμης, τότε η δέσμη ανακατευθύνεται τυχαία, και μπορεί να προκληθεί ολική απώλεια του σήματος αν βγει εκτός της επιφάνειας σύλληψης του δέκτη. Παρόλο που η εξάρτηση αυτού του φαινομένου είναι ασθενής σε σχέση με το μήκος κύματος, τα μεγαλύτερα μήκη κύματος εκτρέπονται λιγότερο από τα μικρότερα.

Όταν τα κελιά είναι μικρότερα από τη διάμετρο της δέσμης, πιο σύνηθες φαινόμενο, η κάμψη της δέσμης και η διάθλαση προκαλούν διαταραχές στο μέτωπο του κύματος. Αυτές οδηγούν σε προσωρινές διαταραχές στην λαμβανόμενη ένταση του παλμού (γνωστές ως σπινθηρισμοί), με φάσμα συχνοτήτων από 0.01 έως 200Hz.

Το μέγεθος το οποίο περιγράφει τους σπινθηρισμούς λόγω των στροβιλισμών στην τροπόσφαιρα είναι ο λογάριθμος  $\chi$  του πλάτους του παρατηρούμενου σήματος. Πιο συγκεκριμένα το μέγεθος αυτό ορίζεται ως ο λόγος ανάμεσα στη στιγμιαία τιμή του πλάτους του σήματος και στη μέση τιμή και μετριέται σε dB. Η ένταση και ο ρυθμός των διακυμάνσεων αυξάνεται με το μήκος κύματος. Για ένα επίπεδο κύμα και για αδύναμο στροβιλισμό η διακύμανση  $\sigma_x^2 (dB^2)$  δίνεται από[1]:

$$\sigma_x^2 = 23.17 \cdot k^{7/6} \cdot C_n^2 \cdot L^{11/6} \quad (6)$$

Όπου:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} : \text{ο κυματαριθμός σε } m^{-1}$$

$L$ : το μήκος της ζεύξης σε  $m$

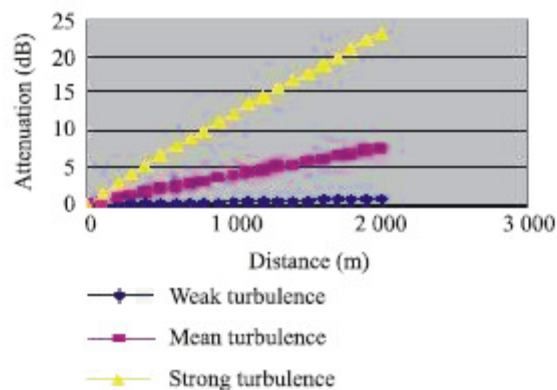
$C_n^2$ : δομικός παράγοντας του δείκτη διάθλασης σε  $m^{-2/3}$

Οι σπινθηρισμοί έχουν μέγιστο πλάτος  $4\sigma_x$  και η απόσβεση εξαιτίας αυτών είναι  $2\sigma_x$ . Για δυνατούς στροβιλισμούς, παρατηρείται κορεσμός της διακύμανσης όπως υπολογίζεται από τον τύπο 6. Η παράμετρος  $C_n^2$  παίρνει διαφορετικές τιμές στα οπτικά μήκη κύματος από τη mm μπάντα. Οι σπινθηρισμοί στη mm μπάντα είναι κυρίως αποτέλεσμα της διακύμανσης της υγρασίας, ενώ στα οπτικά μήκη κύματος οι σπινθηρισμοί είναι αποτέλεσμα της θερμοκρασίας. Οι διαφοροποιήσεις αυτές για μια ζεύξη 1 km φαίνονται στο πινάκα 4.

	Turbulence		
	Low	Moderate	High
$C_n^2$ optic waves ( $m^{-2/3}$ )	$10^{-16}$	$10^{-14}$	$10^{-13}$
Attenuation (0.98 $\mu$ m)(dB)	0.51	5.06	16.00
Attenuation (1.55 $\mu$ m)(dB)	0.39	3.87	12.25
$C_n^2$ millimetre waves ( $m^{-2/3}$ )	$10^{-15}$	$10^{-13}$	$10^{-12}$
Attenuation (40GHz)(dB)	0.03	0.09	0.27
Attenuation (60GHz)(dB)	0.03	0.11	0.35

**Πίνακας 4-Βάθος διαλείψεων σπινθηρισμών για δρόμο διάδοσης 1km[1]**

Στο σχήμα 3 παρουσιάζεται η απόσβεση ενώ οπτικού κύματος στα 1550nm για ασθενή, μέσο και δυνατό στροβιλισμό σε απόσταση μέχρι 2km. Είναι φανερό ότι η απόσβεση μεγαλώνει όσο ο στροβιλισμός αυξάνεται.



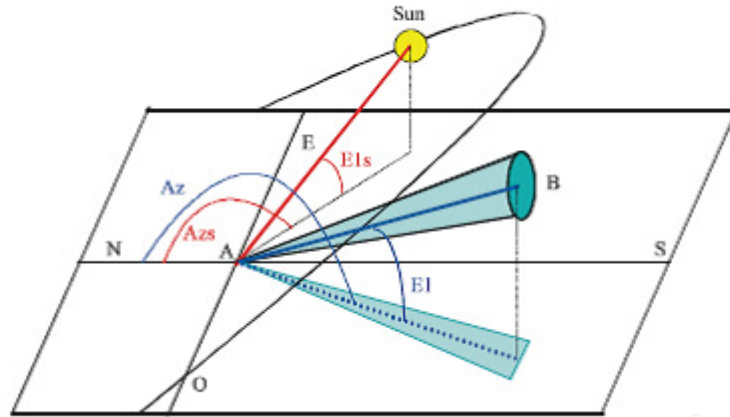
**Σχήμα 3-Απόσβεση σπινθηρισμών για διάφορους τύπους στροβιλισμών[1]**

Οι σπινθηρισμοί μπορούν να μειωθούν χρησιμοποιώντας πολλαπλούς οπτικούς παλμούς αντί για έναν, είτε μεγαλώνοντας την επιφάνεια σύλληψης του δέκτη. Σημαντικό επίσης στη σχεδίαση ενός συστήματος ασύρματης οπτικής μετάδοσης είναι να μην τοποθετούνται πομπός και δέκτης κοντά σε ζεστές επιφάνειες ακριβώς λόγω παρουσίας στροβιλισμών.

## 2.5. Επίδραση περιβαλλοντικού φωτός

Όταν ο ήλιος ή μια ανακλώμενη εικόνα του ήλιου είναι μέσα ή κοντά στο πεδίο προβολής του οπτικού δέκτη, τότε εμφανίζεται το φαινόμενο της ηλιακής συμβολής. Όταν όμως ο ήλιος είναι παράλληλα στη διεύθυνση που πλησιάζει η ακτίνα στο δέκτη, τότε η ηλιακή ενέργεια που εισέρχεται στο δέκτη είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια του προσπίπτοντος παλμού. Για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα ο οπτικός

δέκτης(A) και ο οπτικός πομπός (B) πρέπει να μην προσανατολίζονται με τον ήλιο όπως φαίνεται στο σχήμα 4.



**Σχήμα 4-Απεικόνιση ηλιακού μονοπατιού σε σχέση με το μονοπάτι διάδοσης του οπτικού σήματος[1]**

Η ηλιακή ενέργεια που λαμβάνει ο δέκτης είναι:

$$P_{\text{solar}} = F_{\text{solar}} \cdot P_{\text{radiated}} \cdot S_{\text{capture}} \cdot W_{\text{receiver}} / 100 \quad (7)$$

Όπου:

$F_{\text{solar}}$  : Η ηλιακή φασματική ενέργεια συναρτήσεως του μήκους κύματος, δίνεται από την  $F_{\text{solar}} = 8.97 \times 10^{-13} \lambda^5 - 4.65 \times 10^{-9} \lambda^4 + 9.37 \times 10^{-6} \lambda^3 - 9.067 \times 10^{-3} \lambda^2 + 4.05 \lambda - 5.70$

$S_{\text{capture}}$  : Η επιφάνεια σύλληψης του δέκτη σε  $m^2$

$W_{\text{receiver}}$  : Το εύρος ζώνης του δέκτη σε  $nm$

$P_{\text{radiated}}$  : Η ενέργεια που εκπέμπεται από τον ήλιο σε  $W/m^2$  και δίνεται από

$$P_{\text{radiated}} = 1200 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - E_{\text{ls}}\right), \text{ όπου } E_{\text{ls}} \text{ το ύψος του ήλιου σε rad}$$

## 2.6. Αναλυτική έκφραση του περιθωρίου διαλείψεων

Το περιθώριο διαλείψεων της ζεύξης μπορεί να εκφραστεί τελικά από τη σχέση[1]:

$$M_{\text{link}} = P_e - S_r - A_{\text{system}} - A_{\text{geo}} - \gamma_{\text{clear\_air}} \cdot d - \gamma_{\text{fog}} \cdot d - \gamma_{\text{rain}} \cdot d - \gamma_{\text{snow}} \cdot d \quad (8)$$

Ωστόσο πρέπει να λάβουμε υπολογίσαμε' όσιν μας και κάποιους άλλους περιορισμούς:

Διεθνείς κανονισμοί ασφάλειας περιορίζουν αυστηρά τη μεγίστη ισχύ εκπομπής των οπτικών συστημάτων. Στα 1550nm επιτρέπεται περίπου 100 φορές περισσότερη ενέργεια από τα πιο μικρά μήκη κύματος που είναι ασφαλή για το μάτι. Το μειονέκτημα τέτοιων τύπων laser είναι το κόστος τους όταν συγκρίνονται με μικρότερα μήκη κύματος γύρω από τα 850nm.

Οι πομποδέκτες FSO συστημάτων μπορούν να τοποθετηθούν πίσω από παράθυρα. Η γωνία που σχηματίζει η δέσμη με το παράθυρο είναι σημαντικός παράγοντας και θα πρέπει να είναι όσο πιο κάθετη γίνεται, ώστε να μειωθεί όσο γίνεται η ανάκλαση της ακτίνας στον υποδοχέα. Προσοχή πρέπει επίσης να δοθεί στο υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένα τα παράθυρα καθώς κάποια μπορεί να περιέχουν γυαλί ή να έχουν επένδυση γυαλιού. Αυτά τα παράθυρα είναι έτσι κατασκευασμένα ώστε να απορρίπτουν τις υπέρυθρες ακτίνες και έτσι μπορούν να μειώσουν την ενέργεια του σήματος περισσότερο και από 60%.

Η χαμηλή ορατότητα που μπορεί να εμφανίζεται σε ένα περιβάλλον περιστασιακά για κάποια ώρες ή μέρες μέσα στο χρόνο, και συνήθως οφείλεται σε ένα τοπικό φαινόμενο, όπως κάποιους νέφος ομίχλης, περιορίζει σημαντικά την αποτελεσματικότητα και τη διαθεσιμότητα μιας οπτικής ζεύξης.

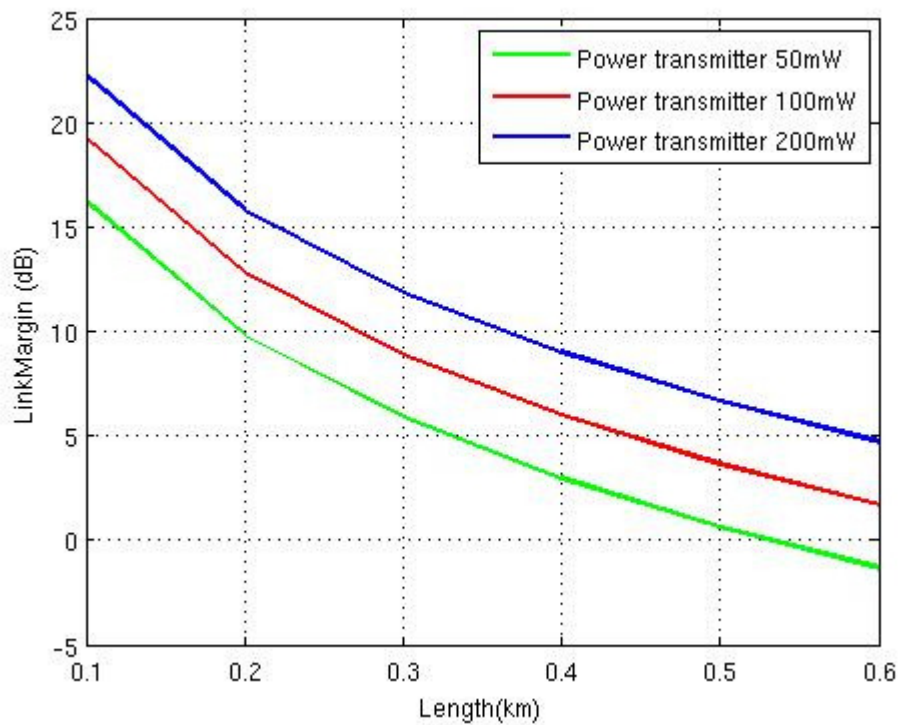
Μια λύση που μπορεί να δοθεί σε αυτό το πρόβλημα είναι να μειωθεί η απόσταση ανάμεσα στους πομποδέκτες ώστε να αυξηθεί το περιθώριο διαλείψεων της ζεύξης και να μπορεί η ζεύξη να μείνει διαθέσιμη ακόμα και σε άσχημες καιρικές συνθήκες.

## 2.7. Προσομοίωση περιθωρίου διαλείψεων

Είδαμε στις προηγούμενες παραγράφους με ποιο τρόπο επηρεάζεται το περιθώριο διαλείψεων συναρτήσει ατμοσφαιρικών παραγόντων, στροβιλισμών, εγκατάστασης της ζεύξης κτλ.

Σύμφωνα με τον κώδικα σε περιβάλλον Matlab και όπως παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α θα δούμε στο Σχήμα 5 πως επηρεάζεται το περιθώριο διαλείψεων συναρτήσει του μήκους της ζεύξης. Προσομοιώνουμε ισχύ εκπομπής 50mW, 100mW και 200mW.

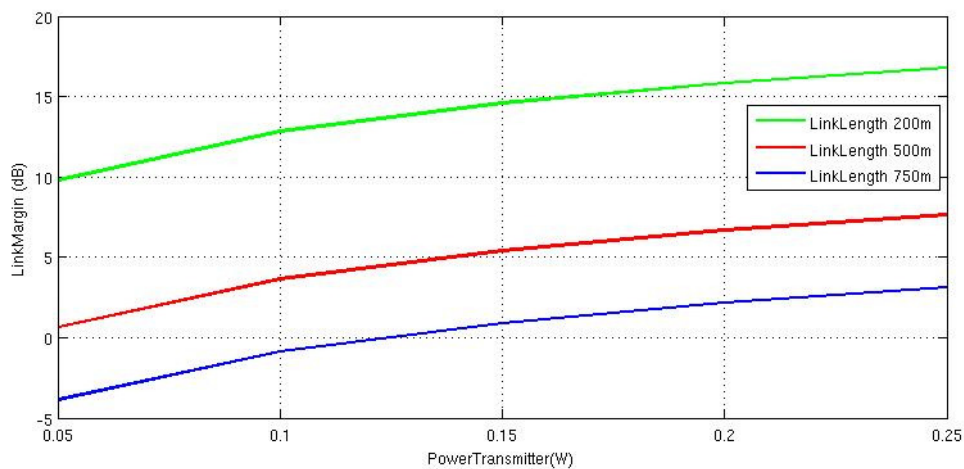




**Σχήμα 5-Περιθώριο διαλείψεων συναρτήσει του μήκους ζεύξης**

Βλέπουμε ότι η αύξηση του μήκους της ζεύξης μειώνει το περιθώριο διαλείψεων και έτσι μειώνει τη διαθεσιμότητα της ζεύξης και τη λειτουργικότητά της, ενώ η αύξηση της ισχύος εκπομπής αυξάνει και το περιθώριο διαλείψεων.

Στο Σχήμα 6 βλέπουμε πως επηρεάζει το περιθώριο διαλείψεων η αλλαγή στην ισχύ εκπομπής, και πώς μπορεί τελικά να χρησιμοποιηθεί η προσαρμογή της ισχύος εκπομπής ανάλογα με τα καιρικά φαινόμενα που παρουσιάζονται και τις διαλείψεις ώστε να παραμείνει λειτουργική η ζεύξη. Θεωρούμε μήκη ζεύξης 200m, 500m και 750m.



**Σχήμα 6-Περιθώριο διαλείψεων συναρτήσει της ισχύος εκπομπής**

Στο Σχήμα 6 μπορούμε να δούμε ότι για ισχύ εκπομπής 150mW, εάν η ζεύξη έχει μήκος 750m το περιθώριο διαλείψεων είναι μόλις 1dB, ενώ σχετικά μικρό (5dB)

είναι και εάν το μήκος της ζεύξης είναι 500m. Μόνο για μήκος ζεύξης 200m το περιθώριο διαλείψεων αυξάνει σημαντικά και φτάνει τα 15dB.

Άξια σχολιασμού είναι επίσης η τιμή που λαμβάνει το περιθώριο διαλείψεων για ισχύ εκπομπής 100mW και για μήκος ζεύξης 750m όπου το περιθώριο διαλείψεων λαμβάνει αρνητικές τιμές. Ποιοτικά αυτό μας υποδικνύει ότι για τέτοια χαρακτηριστικά της οπτικής ζεύξης δε μπορεί να υπάρξει επιτυχής επικοινωνία ανάμεσα στο πομπό και στο δέκτη και είτε πρέπει να αυξηθεί η ισχύς εκπομπής του σήματος.

## Παράρτημα Α

Κώδικας σε περιβάλλον Matlab για τον υπολογισμό του περιθωρίου διαλείψεων της ζεύξης:

```
Pea=0.100; %synolikh isxys ekpomphs se W
%Sra=0.001; %euaisthsia tou dektis se W
Sr=-27; %%%euaisthsia se dBm,prosoxh orizetai kai mesa ston kwdika , ena apo ta 2
na trexei
l=750; %mhkos kymatos se nm
Sc=0.0025; %receiver capture surface(m^2)
theta=0.8; %beam divergence (mrad)
L=0.3; %distance emmitter-receiver
V=3; %visibility se km
k=1.076; a=0.67; %times gia wrain se eukrata klimata
R=40; %rythmos broxoptoshs
S=1; %rythmos xionoptwshs
sn=0; %0 ean einai wet snow , 1 ean einai dry snow
Els=0.5; %ypsos tou hliou se rad
Wreceiver=30; %receiver bandwidth se nm
Cn2=10^-16;

%ypologismos Ageo
Sd=(pi/4)*(L*theta)^2;
Ageo=10*log10(Sd/Sc);
if Ageo<0
    Ageo=0;
end
%ypologismos Watmo , dedomenou mhkos kymatos se para8yro
%metadoshs , Wclear_air=0
wclear_air=0;
%ypologismos wfog
if V>=50
    q=1.6;
elseif V>=6
    q=1.3;
else q=0.585*V^(1/3);
end
wfog=(3.91/V)*(1/550)^q;
```

```

%ypologismos wrain
wrain=k*R^a;

%ypologismos wsnow
if sn==0
    c=0.000102*1+3.79;
    b=0.72;
elseif sn==1
    c=0.0000452*1+5.5;
    b=1.38;
end
wsnow=c*S^b;
%%%%
wexcess=wrain+wfog+wsnow;
watmo=wclear_air+wexcess;
%metatroph apolytwn megethwn se dBm
Pe=10*log10(Pea)+30;
%Sr=10*log10(Sra)+30;
%ypologismos Asystem
Pradiated=1200*cos(pi/2-Els);
Fsolar=8.97*10^(-13)*1^5-4.65*10^(-9)*1^4+9.37*10^(-6)*1^3-9.067*10^(-3)*1^2+4.05*1-5.7;
Psolar_abs=Fsolar*Pradiated*Sc*Wreceiver/100;
Psolar=10*log10(Psolar_abs);
sx2=23.17*(2*pi*10^9/l)^(7/6)*Cn2*(1000*L)^(11/6);
sx=sqrt(sx2);
Pscin=2*sx;
Asystem=Psolar+Pscin;

LinkMargin=Pe-Sr-Asystem-Ageo-watmo*L

```

## Βιβλιογραφία

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

[2] ITU-R Recommendation P.837-6, “Characteristics of precipitation for propagation modelling” February 2012.

[3] Γιάννης Ν. Τοφής, “Επίδοση πολυβηματικών ασύρματων οπτικών συστημάτων”, Αθήνα, Δεκέμβρης 2009.

<http://artemis.cslab.ntua.gr/Dienst/UI/1.0/Display/artemis.ntua.ece/DT2009-0126?abstract=%C5%D0%C9%C4%CF%D3%C7+and+%D0%CF%CB%D5%C2%C7%CC%C1%D4%C9%CA%D9%CD+and+%C1%D3%D5%D1%CC%C1%D4%D9%CD+and+%CF%D0%D4%C9%CA%D9%CD+and+%D3%D5%D3%D4%C7%CC%C1%D4%D9%CD>



# Κεφάλαιο 3

## Απόσβεση σε Χιλιοστομετρικές Ζεύξεις

Οι χιλιοστομετρικές συχνότητες τα τελευταία χρόνια ήταν το φάσμα εκείνο των συχνοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν για τις ασύρματες επικοινωνίες. Όπως όλες οι ασύρματες επικοινωνίες επηρεάζονται από το περιβάλλον μέσα από το οποίο διέρχεται το σήμα. Έτσι και σε μια δορυφορική ζεύξη, το μονοπάτι μετάδοσης περνάει μέσα από όλα τα στρώματα της ατμόσφαιρας και έτσι συναντάει πολλών ειδών ατμοσφαιρικά φαινόμενα. Ανάλογα με τη φύση των σωματιδίων εμφανίζονται και διάφορα φαινόμενα εξασθένισης, είτε λόγω ανάκλασης, σκέδασης σπινθηρισμών κτλ. Σε αυτή τη μελέτη θα επικεντρωθούμε στα φαινόμενα βροχής και συννεφιάς και στον τρόπο που αυτά επηρεάζουν το μεταδιδόμενο σήμα και μέσα από τοπολογικούς χάρτες οι οποίοι προσδιορίζουν το ρυθμό βροχόπτωσης σε κάθε περιοχή αλλά και την περιεκτικότητα σε νερό των σύννεφων θα προσπαθήσουμε να υπολογίσουμε μέσα από στατικά αλλά και δυναμικά μοντέλα -όπως θα τα προσομοιώσουμε μέσα από περιβάλλον προγραμματισμού Matlab- την απόσβεση σε μια χιλιοστομετρική ραδιοζεύξη. Θα μελετήσουμε ραδιοκυματικές ζεύξεις μέχρι και τα 100GHz.

### 3.1. Απόσβεση βροχής

#### 3.1.1. Στατικό μοντέλο

Ένα σημαντικό πρόβλημα στο σχεδιασμό συστημάτων αναμετάδοσης σε συχνότητες μεγαλύτερες από τα 10 GHz είναι η διακοπή μετάδοσης του σήματος που προκαλείται από την απόσβεση εξαιτίας της βροχής. Για την ομαλή και οικονομική λειτουργία ενός συστήματος ασυρμάτων ζεύξεων σε ραδιοσυχνότητες χρειάζεται να γνωρίζουμε την κατανομή της συνάρτησης πιθανότητας της απόσβεσης συναρτήσει των γεωμετρικών και ηλεκτρικών χαρακτηριστικών της ζεύξης, σε διάφορες γεωγραφικές τοποθεσίες. Χρειαζόμαστε λοιπόν μια μέθοδο για να υπολογίσουμε την κατανομή της απόσβεσης εξαιτίας βροχής από την κατανομή του ρυθμού βροχόπτωσης.

Ο ρυθμός βροχόπτωσης  $R(\text{mm/h})$  σύμφωνα με το μοντέλο του Lin[1] ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή που δίνεται από τη σχέση:

$$P[R \geq r] = P_0(0) \cdot \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{\ln r - \ln R_m}{\sqrt{2S_R}} \right] \quad (1)$$

Ενώ η απόσβεση λόγω βροχής που ακολουθεί και αυτή λογαριθμοκανονική κατανομή δίνεται από[1]:

$$P[A(L) \geq A_m] = P_0(L) \cdot \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{\ln A_m - \ln A_m}{\sqrt{2S_a}} \right] \quad (2)$$

Όπου  $S_a$  και  $S_R$  είναι οι τυπικές αποκλίσεις των  $\ln A$  και  $\ln R$  αντίστοιχα. Ενώ  $A_m$  και  $R_m$  είναι οι μέσες τιμές των  $A$  και  $R$  αντίστοιχα. Όλα αυτά τα μεγέθη υπολογιζόμενα μόνο στο χρονικό διάστημα που υπάρχει βροχή. Ως  $P_0(0)$  ορίζεται η πιθανότητα να υπάρχει βροχή στο σημείο που μετράται ο ρυθμός βροχόπτωσης και υπολογίζεται από γεωγραφικά δεδομένα, και ως  $P_0(L)$  η πιθανότητα να υπάρξει βροχή κάπου στο ράδιο-μονοπάτι μήκους  $L$ .

Επειδή όμως είναι αρκετά πολύπλοκο να υπολογιστεί η πιθανότητα να υπάρχει βροχή κάπου στο μήκος της ζεύξης εμείς δε θα χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο του Lin, της οποίας η κατανομή αναφέρεται μόνο σε περιόδους που βρέχει αλλά θα χρησιμοποιήσουμε τη κατανομή ανεξαρτήτως παρουσίας βροχής.

Η απόσβεση εξαιτίας της βροχής στο συνολικό μήκος της ζεύξης ισούται με το άθροισμα των στοιχειωδών αποσβέσεων σε κάθε στοιχειώδες ραδιοβήμα  $dz$  και δίνεται από τον τύπο[2]:

$$A = \int_0^L a \cdot R^b(z) \cdot dz \quad (3)$$

Θεωρούμε ότι η κατανομή  $R$  έχει τις ίδιες παραμέτρους  $R_m$  και  $S_R$  σε όλη την περιοχή της ζεύξης.

Από τη Σχέση 3 παίρνουμε τη μέση τιμή της απόσβεσης  $A$ [2]:

$$\mu_a = E[A] = \int_0^L a \cdot E[R^b(z)] \cdot dz = a \cdot E[R^b] \cdot L \quad (4)$$

Και τη τυπική απόκλιση:

$$\sigma_a^2 = E[A^2] - \mu_a^2 = \int_0^L \int_0^L a^2 \cdot E[R^b(z) \cdot R^b(z')] \cdot dz \cdot dz' - \mu_a^2 \quad (5)$$

Από τον Lin έχει προταθεί η εξής σχέση που υπολογίζει το σημειακό συντελεστή συσχέτισης  $\rho_0$  μεταξύ των  $R^b(z)$  και  $R^b(z')$  που απέχουν απόσταση  $\Delta z$ [1]:

$$\rho_0(\Delta z) = \frac{G}{(G^2 + \Delta z^2)^{1/2}} \quad (6)$$

Όπου  $G$  είναι μια σταθερά για την οποία η τιμή του συντελεστή  $\rho_0$  γίνεται  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ .

Οι τυπικές τιμές της παραμέτρου  $G$  κυμαίνονται από 0.75km μέχρι 3km.

Από τον ορισμό του συντελεστή συσχέτισης  $\rho_0$  και από την παραδοχή ότι οι παράμετροι της σημειακής έντασης βροχόπτωσης παραμένουν σταθερές σε όλο το μήκος της ζεύξης έχουμε:

$$\rho_0(|z - z'|) = \frac{E[R^b(z) \cdot R^b(z')] - (E[R^b])^2}{E[(R^b)^2] - (E(R^b))^2} \quad (7)$$

Από τις σχέσεις 4, 5 και 7 παίρνουμε:

$$\sigma_\alpha^2 = a^2 \cdot \left\{ E[(R^b)^2] - (E(R^b))^2 \right\} \cdot \int_0^L \int_0^L \rho_0(|z - z'|) \cdot dz \cdot dz' \quad (8)$$

Και δεχόμενοι ότι[2]:

$$E[R^b] = \exp \left[ b \cdot R_m + \frac{b^2 \cdot S_r^2}{2} \right] \quad (9)$$

$$E[R^{2b}] = \exp \left[ 2b \cdot R_m + 2b^2 \cdot S_r^2 \right] \quad (10)$$

Καταλήγουμε στις:

$$\mu_\alpha = a \cdot \exp \left[ b \cdot R_m + \frac{b^2 \cdot S_r^2}{2} \right] \cdot L \quad (11)$$

$$\sigma_\alpha^2 = a^2 \cdot \exp \left\{ 2b \cdot R_m + b^2 \cdot S_r^2 \right\} \cdot \left( \exp(b^2 \cdot S_r^2) - 1 \right) \cdot \int_0^L \int_0^L \rho_0(|z - z'|) \cdot dz \cdot dz' \quad (12)$$

Το διπλό ολοκλήρωμα

$$H_1 = \int_0^L \int_0^L \rho_0(|z - z'|) \cdot dz \cdot dz' \quad (13)$$

Μετατρέπεται σε απλό και υπολογίζεται αναλυτικά :

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

Καταλήγουμε έτσι τελικά στον υπολογισμό των παραμέτρων  $A_m$  και  $S_a$  :

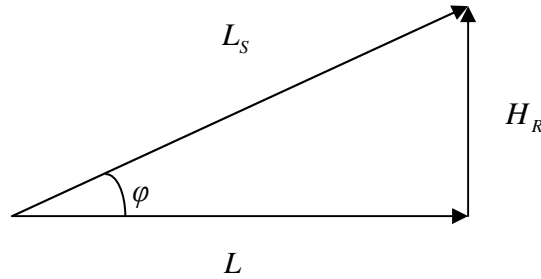
$$S_a^2 = \ln \left[ 1 + (\exp(b^2 \cdot S_r^2) - 1) \frac{H_1}{L^2} \right] \quad (15)$$

$$A_m = \ln \left[ a \cdot \exp(b \cdot R_m) \cdot \exp \left( \frac{b^2 \cdot S_r^2 - S_a^2}{2} \right) \cdot L \right] \quad (16)$$

Στους παραπάνω τύπους υπολογίζουμε την πιθανότητα κατανομής απόσβεσης για μήκος  $L$  . Όμως επειδή χρησιμοποιούμε δορυφορική ζεύξη, και σύμφωνα με το Σχήμα 1:

$$L = L_s \cos \varphi \quad (17)$$

όπου  $L_s$  το slantpath ,  $L$  η οριζόντια προβολή του, και  $\varphi$  η γωνία ανύψωσης.



**Σχήμα 1-Slantpath, οριζόντια προβολή του, και ύψος βροχής**

Η γωνία ανύψωσης σχετίζεται με το ύψος της βροχής  $H_R$  από τον εξής τύπο:

$$L_s = \frac{H_R}{\sin \varphi} \quad (18)$$

Για να υπολογίσουμε τη πιθανότητα η απόσβεση να υπερβαίνει κάποια στάθμη  $x$  dB χρησιμοποιούμε την εξής σχέση:

$$P[A \geq x] \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{\ln(x \cos \varphi) - \ln A_m}{\sqrt{2} \cdot S_a} \right] \quad (19)$$



### 3.1.2. Δυναμικό μοντέλο

Είδαμε στη προηγούμενη παράγραφο, πως σύμφωνα με το μοντέλο του Lin, η απόσβεση εξαιτίας βροχόπτωσης ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή[2]:

$$P[A(L) \geq A_{th}] \approx P_0(L) \cdot \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{\ln A_{th} - \ln A_m}{\sqrt{2} S_a} \right] \quad (20)$$

Όπου:

$S_a$  : η τυπική απόκλιση του  $\ln a$

$a_m$  : η μεσαία τιμή της απόσβεσης  $a$

Ωστόσο σύγχρονες εφαρμογές, όπως δορυφορικές επικοινωνίες χρειάζεται να προσαρμόζουν συνεχώς την ένταση εκπομπής του σήματος ανάλογα με τις κατακρημνίσεις που συναντά στην ατμόσφαιρα. Η μέθοδος Maseng-Bakken , εισάγει ένα δυναμικό μοντέλο που χρησιμοποιεί ένα μη-γραμμικό, χωρίς μνήμη μηχανισμό για να μετατρέπει τη λογαριθμοκανονική κατανομή της απόσβεσης σε πρώτης τάξεως διαδικασία Markov τύπου Ornstein-Uhlenbeck. Η εξάρτηση από το χρόνο περιγράφεται από μία παράμετρο  $\beta$ . Από τη στιγμή που έχουμε και τις 3 παραμέτρους, μπορούμε να υπολογίσουμε πολλά χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν όπως η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της απόσβεσης και η διάρκεια των διαλείψεων.

Η πρώτη τάξεως συνεχής διαδικασία Markov υποδηλώνει ότι δοσμένης της απόσβεσης σε μια χρονική στιγμή  $t$ , το μοντέλο επιτρέπει την στατιστική παραγωγή της μελλοντικής απόσβεσης.

Η εξίσωση που δίνει τη μεταβολή της απόσβεσης δίνεται από[3] :

$$da(t) = K_{1a}(a)dt + dW_a(a) \quad (21)$$

Όπου  $W_a(a)$  είναι μια διαδικασία με ανεξάρτητες προσαυξήσεις, τέτοια ώστε:

$$E\{dW_a | a\} = 0 \quad (22)$$

και

$$E\{|dW_a|^2 | a\} = K_{2a}(a)dt \quad (23)$$

όπου  $K_{1a}$  και  $K_{2a}$  είναι ντετερμινιστικές συναρτήσεις της απόσβεσης  $a$  ανταποκρινόμενες στις δύο πρώτες υποθετικές στιγμές( $n=1,2$ ):

$$K_{n_a}(a) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} E\{(a(t + \Delta t) - a(t))^n | a(t)\} \quad (24)$$

Η πυκνότητα πιθανότητας  $p(\alpha, t)$  σχετίζεται με τις δύο αυτές στιγμές από την εξής σχέση:

$$\frac{\partial p(\alpha, t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial a^2} (K_{2a}(a)p(\alpha, t)) - \frac{\partial}{\partial a} (K_{1a}(a)p(\alpha, t)) \quad (25)$$

Από το μοντέλο του Lin δείχτηκε ότι η κατανομή πιθανότητας της απόσβεσης  $a$  είναι λογαριθμοκανονική  $\Lambda(\alpha_m, \sigma_a^2; \alpha)$ :

$$\frac{1}{\sigma_a \sqrt{2\pi}} \int_0^\alpha \frac{1}{u} \exp(-(\ln(u/a_m)/\sigma_a \sqrt{2})^2) du \quad (26)$$

Και άρα μας αρκεί να κρατήσουμε μόνο τη μία από τις δύο χρονικές στιγμές. Διαλέγοντας λοιπόν:

$$K_{2a}(\alpha) = 2\beta\alpha^2\sigma_a^2 \quad (27)$$

Το οποίο συνεπάγεται ότι  $K_{1a}(\alpha) = \alpha\beta[\sigma_a^2 - \ln(\alpha/a_m)]$ , όπου  $\beta$  είναι η παράμετρος που περιγράφει το ρυθμό μεταβολής της μοντελοποιημένης διαδικασίας.

Με αυτή τη διαλογή και χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό

$$x(t) = \ln(\alpha(t)/\alpha_m)/\sigma_a \quad (28)$$

Η εξίσωση μεταβολής του  $a$ , σχέση 22, μετασχηματίζεται στην:

$$dx = -\beta x dt + dW_x(x) \quad (29)$$

όπου  $E\{dW_x | x\} = 0$  και  $E\{|dW_x|^2 | x\} = 2\beta dt$ .

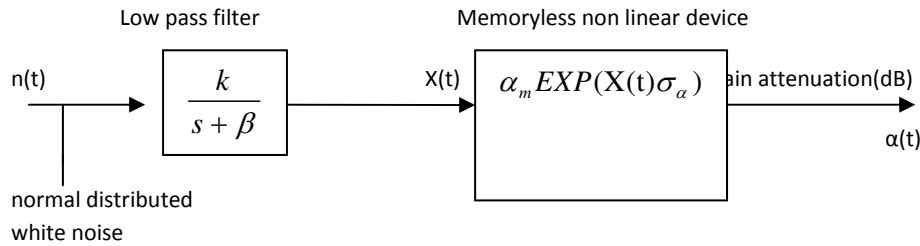
Η σχέση 29 εάν θεωρήσουμε  $K_{1x} = -x\beta$  και  $K_{2x} = 2\beta$  επιλύεται και καταλήγει σε μια πρώτης τάξεως διαδικασία Markov.

Με την υποκατάσταση της σχέσης 27 στην διαδικασία Markov, παίρνουμε τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της απόσβεσης. Η λογαριθμοκανονική της κατανομή είναι:

$$\Pr\{\alpha(t + \Delta t) < \alpha(t) | \alpha(t) = \alpha_0\} = \Lambda(p_1(\alpha_0), p_2; \alpha_0) \quad (30)$$

όπου  $p_1(\alpha_0) = \alpha_m^{(1-\exp(-\beta|\Delta t|))} \cdot \alpha_0^{\exp(-\beta|\Delta t|)}$  και  $p_2 = \sigma_a^2(1 - \exp(-2\beta|\Delta t|))$ .

Τελικά, η σχέση που συνδέει το λευκό γκαουσιανό θόρυβο που δημιουργεί τη πηγή  $n(t)$ , με την Ornstein-Uhlenbeck εγγενώς κατανομημένη στοχαστική μεταβλητή  $x(t)$  και τη στιγμιαία απόσβεση εξαιτίας της βροχής  $\alpha(t)$  φαίνονται στο Σχήμα 2.



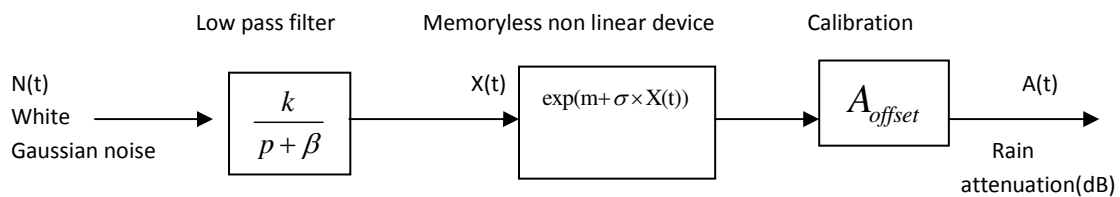
**Σχήμα 2-Μπλοκ διάγραμμα του στοχαστικού δυναμικού μοντέλου της απόσβεσης βροχής [3]**

Για να προσεγγίζουν πιο κοντά τις πραγματικές τιμές της απόσβεσης, οι παραγόμενες χρονοσειρές της απόσβεσης πρέπει να γίνει βαθμονόμηση μετά το τελευταίο στάδιο κατά μια σταθερά  $A_{offset}$  σύμφωνα με τη σύσταση ITU-R: P. 1853-1 [5]:

$$A_{offset} = \exp \left[ m + \sigma Q^{-1} \left( \frac{P^{rain}}{100} \right) \right] \quad (31)$$

Όπου,  $P^{rain}$  η πιθανότητα βροχής [4].

Το τελικό μοντέλο παραγωγής χρονοσειρών απόσβεσης φαίνεται στο Σχήμα 3.



**Σχήμα 3-Μπλοκ διάγραμμα παραγωγής χρονοσειρών απόσβεσης βροχής [5]**

όπου :

$m$ : η μέση τιμή της λογαριθμοκανονικής κατανομής απόσβεσης

$\sigma$ : η τυπική απόκλιση της λογαριθμοκανονικής κατανομής απόσβεσης

### 3.1.3. Προσομοίωση

Στη προσομοίωση που εκτελούμε σε περιβάλλον Matlab, θεωρούμε τόπο διεξαγωγής του πειράματος μας τη περιοχή Λυών, Γαλλία με συντεταγμένες (45.75 ° N, 4.66 ° E). Το πείραμα μας γίνεται σε μια δορυφορική ζεύξη με το δορυφόρο σε γωνία ανύψωσης 43.21° και σε συχνότητα 40GHz. Το διάστημα προσομοίωσης ορίζεται στα 4 έτη.

Από τη μέθοδο του Lin και τη σύσταση ITU-R P.837 [4] παίρνουμε τις εξής χαρακτηριστικές τιμές της λογαριθμοκανονικής κατανομής απόσβεσης:

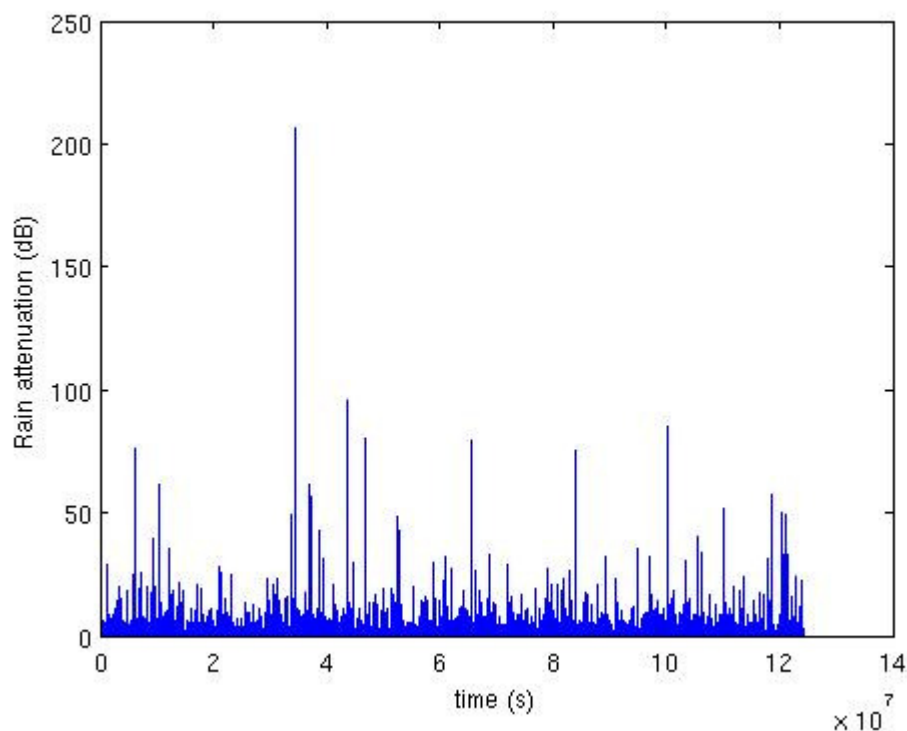
$$S_a = 1.59$$

$$a_m = 0.07$$

Και  $P_0$  την πιθανότητα βροχής:

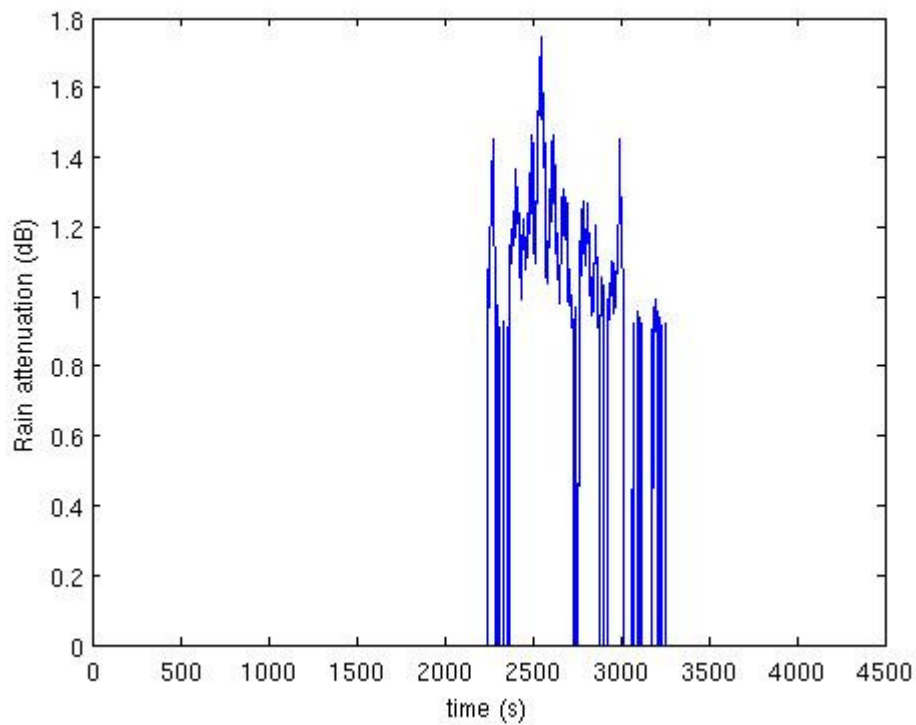
$$P_0 = 5.95\%$$

Στο Σχήμα 4 φαίνεται η χρονοσειρά απόσβεσης λόγω βροχής υπολογισμένη μέσω μοντέλου Maseng-Bakken.



**Σχήμα 4-Χρονοσειρά απόσβεσης βροχής**

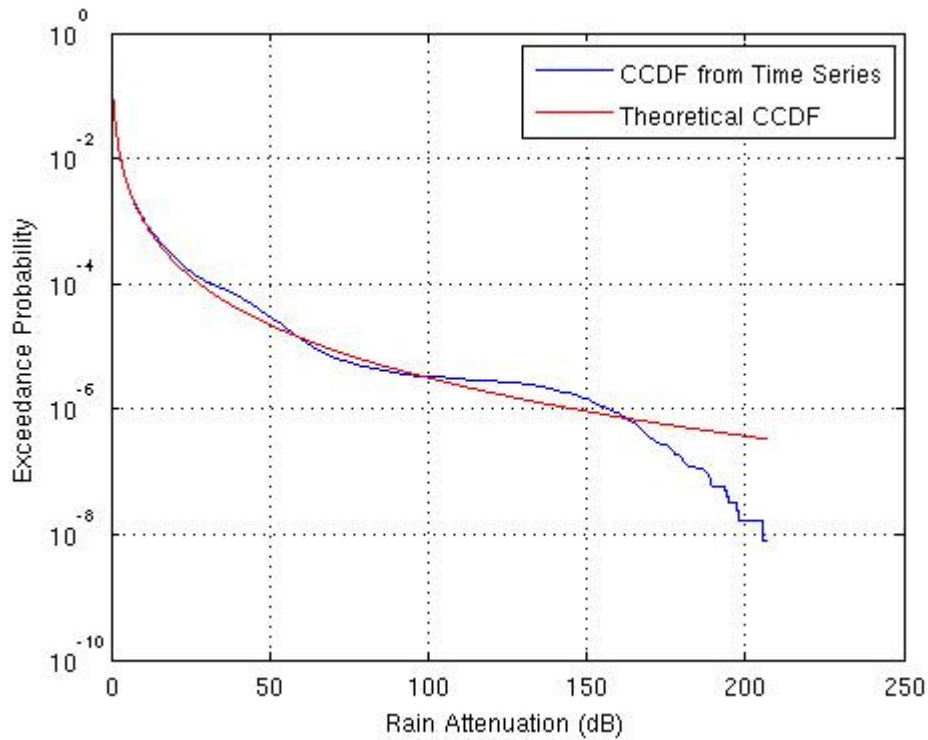
Στο Σχήμα 5 μπορούμε να δούμε ένα περιστατικό βροχής (rain event) κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Μπορούμε να δούμε την εκρηκτικότητα του φαινομένου βροχής και τη μικρή διάρκειά της η οποία κρατάει για περίπου 20 λεπτά.



**Σχήμα 5- Γεγονός (Περιστατικό) απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης (rain event)**

Στο Σχήμα 6 βλέπουμε την αθροιστική συμπληρωματική πιθανότητα , όπως υπολογίζεται τόσο από τη λογαριθμοκανονική κατανομή προερχόμενη από τη μέθοδο του Lin, όσο και από τις χρονοσειρές που προβλέπονται από τη μέθοδο Maseng-Bakken. Η προσομοίωση έλαβε χώρα στο Παρίσι, Γαλλία και το διάστημα προσομοίωσης ήταν 4 χρόνια.

Βλέπουμε ότι είναι πολύ κοντά και επιβεβαιώνεται και πειραματικά μέσω της προσομοίωσης η αποτελεσματικότητά του.



**Σχήμα 6- Αθροιστική συμπληρωματική πιθανότητα με θεωρητικό υπολογισμό και μέσω προσομοίωσης**

## 3.2. Απόσβεση σύννεφων

### 3.2.1. Δυναμικό μοντέλο

Για σύννεφα, αλλά και για ομίχλη που αποτελείται κυρίως από μικρά σταγονίδια μικρότερα από 0.01cm, η προσέγγιση Rayleigh είναι αποδεκτή για συχνότητες μικρότερες των 200GHz και γίνεται δυνατό να εκφράσουμε την απόσβεση συναρτήσει συνολικού περιεχομένου νερού ανά όγκο. Άρα η ειδική απόσβεση μέσα σε ένα σύννεφο εκφράζεται ως εξής:

$$\gamma_c = K_l M \quad (32)$$

όπου:

$\gamma_c$  :η ειδική απόσβεση ( $dB / km$ )

$K_l$  :ο συντελεστής ειδικής απόσβεσης ( $dB / km$ ) / ( $g / m^3$ )

$M$  :η πυκνότητα υγρού νερού στο σύννεφο ( $g / m^3$ )

Για συχνότητες μέχρι και 1000GHz, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα μαθηματικό μοντέλο βασισμένο στη σκέδαση Rayleigh που χρησιμοποιεί ένα διπλό-Debye μοντέλο για τη διηλεκτρική διαπερατότητα  $\varepsilon(f)$  του νερού, την οποία θα χρησιμοποιήσουμε για να υπολογίσουμε τη τιμή της μεταβλητής  $K_l$ :

$$K_l = \frac{0.819f}{\varepsilon''(1+\eta^2)} \quad (33)$$

όπου  $f$  η συχνότητα σε GHz και :

$$\eta = \frac{2+\varepsilon'}{\varepsilon''} \quad (34)$$

Η σύνθετη διηλεκτρική διαπερατότητα του νερού που δίνεται από:

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p [1 + (f/f_p)^2]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s [1 + (f/f_s)^2]} \quad (35)$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{[1 + (f/f_p)^2]} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{[1 + (f/f_s)^2]} + \varepsilon_2 \quad (36)$$

όπου:

$$\varepsilon_0 = 77.6 + 103.3(\theta - 1) \quad (37)$$

$$\varepsilon_1 = 5.48 \quad (38)$$

$$\varepsilon_2 = 3.51 \quad (39)$$

$$\theta = 300/T \quad (40)$$

όπου  $T$  η θερμοκρασία (K).

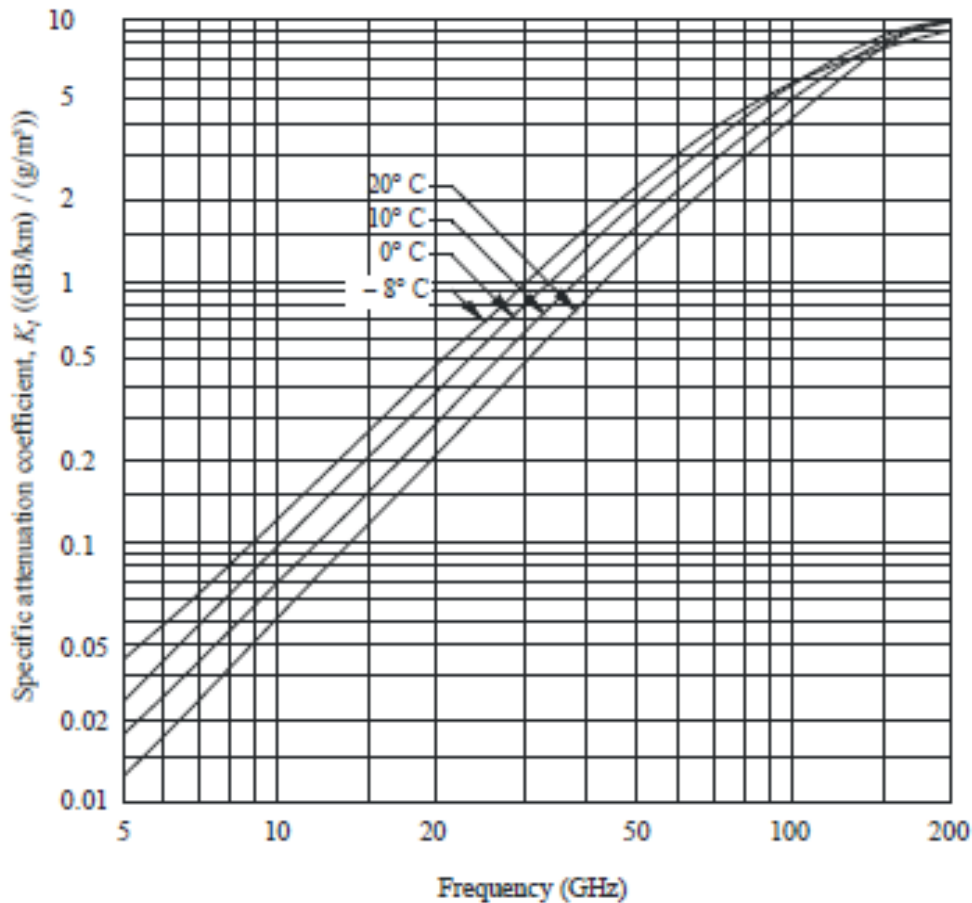
Οι πρωτεύουσα  $f_p$  και η δευτερεύουσα  $f_s$  συχνότητα σε GHz είναι:

$$f_p = 20.09 - 142(\theta - 1) + 294(\theta - 1)^2 \quad (41)$$

$$f_s = 590 - 1500(\theta - 1) \quad (42)$$

Στο Σχήμα 7 φαίνονται οι τιμές της μεταβλητής  $K_l$ , για σύννεφα και για ομίχλη, για συχνότητες από 5 έως 200GHz και θερμοκρασίες από  $-8^\circ C$  έως  $20^\circ C$ .

Στην περίπτωση όμως των σύννεφων που μας ενδιαφέρει η ισοθερμική καμπύλη των  $0^\circ C$  πρέπει να χρησιμοποιηθεί.



Σχήμα 7-Ειδική απόσβεση συναρτήσει θερμοκρασίας και συχνότητας [3]

Την απόσβεση εξαιτίας σύννεφων  $A(\text{dB})$  μπορούμε να την υπολογίσουμε από την εξής σχέση:

$$A = \frac{LK_l}{\sin \theta} \quad (43)$$

Όπου:

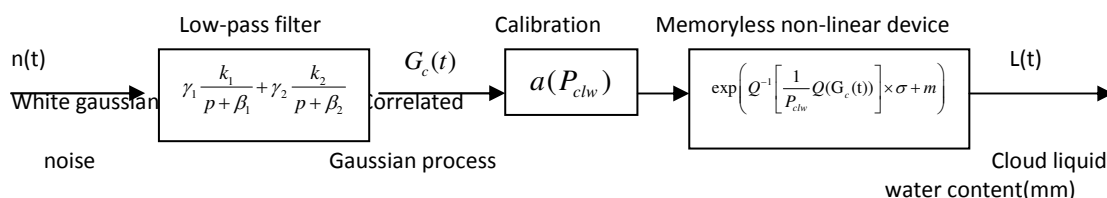
$\theta$ : η γωνία ανύψωσης και  $5^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$

$L$ : το συνολικό ανά στήλη περιεχόμενο σε υγρό νερό  $\text{kg}/\text{m}^2$  (Integrated Liquid Water Content-ILWC), ή αλλιώς τα  $\text{mm}$  νερού που περιέχονται στο σύννεφο σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία.

Σύμφωνα με τη σύσταση ITU-R P.840 [6], για κάθε γεωγραφική τοποθεσία υπάρχουν ψηφιακοί χάρτες που με την επεξεργασία τους μπορούμε να υπολογίσουμε τα χαρακτηριστικά μεγέθη  $m$ : μέση τιμή και  $\sigma$ : τυπική απόκλιση της λογαριθμοκανονικής κατανομής που ακολουθεί η ILWC καθώς και την πιθανότητα να υπάρχουν σύννεφα στη συγκεκριμένη τοποθεσία  $P_{clw}$ .



Θα χρησιμοποιήσουμε τη διαδικασία σύνθεσης χρονοσειρών για το ILWC, για τη μεταβλητή  $L(t)$  σε  $kg/m^2$ . Το μπλοκ διάγραμμα που παράγει τις χρονοσειρές της μεταβλητής  $L(t)$  φαίνεται στο σχήμα 8.



**Σχήμα 8-Μπλοκ διάγραμμα παραγωγής χρονοσειρών L(t) [4]**

Με τις εξής παραμέτρους:

$m$  : μέση τιμή της λογαριθμοκανονικής κατανομής LWC

$\sigma$  : τυπική απόκλιση της λογαριθμοκανονικής κατανομής LWC

$P_{CLW}$  :πιθανότητα ύπαρξης σύννεφων

$\alpha$  :όριο αποκοπής συσχετισμένου γκαουσιανού θορύβου

$\beta_1$  :παράμετρος που περιγράφει τη χρονική δυναμική της διαδικασίας του γρήγορου συστατικού

$\beta_2$  : παράμετρος που περιγράφει τη χρονική δυναμική της διαδικασίας του αργού συστατικού

$\gamma_1$  : παράμετρος που περιγράφει το βάρος της διαδικασίας του γρήγορου συστατικού

$\gamma_2$  : παράμετρος που περιγράφει το βάρος της διαδικασίας του αργού συστατικού

Οι αριθμητικές τιμές των παραμέτρων ορίζονται:

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

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

$$\gamma_1 = 0.349$$

$$\gamma_2 = 0.830$$

Το κατώφλι βαθμονόμησης  $\alpha$  υπολογίζεται ως εξής:

$$\alpha = Q^{-1}(P_{CLW}) \quad (44)$$

Η διαδικασία σύνθεσης των χρονοσειρών γίνεται ως εξής:

- Συντίθενται χρονοσειρές γκαουσιανού θορύβου  $n(kT_s)$ , όπου  $k=1,2,3,\dots$  ,με μηδενική μέση τιμή και μοναδιαία απόκλιση με ρυθμό δειγματοληψίας  $T_s=1\text{sec}$ .
- Ορίζουμε  $X_1(0) = X_2(0) = 0$
- Φιλτράρουμε το θόρυβο  $n(kT_s)$  με δύο παράλληλα βαθυπερατά φίλτρα ως εξής:

$$\begin{cases} X_1(kT_s) = \rho_1 \times X_1((k-1)T_s) + \sqrt{1-\rho_1^2} \times n(kT_s) \\ X_2(kT_s) = \rho_2 \times X_2((k-1)T_s) + \sqrt{1-\rho_2^2} \times n(kT_s) \end{cases} \quad (45)$$

όπου :

$$\begin{cases} \rho_1 = e^{-\beta_1 T_s} \\ \rho_2 = e^{-\beta_2 T_s} \end{cases} \quad (46)$$

- Υπολογίζουμε το  $G_c(kT_s)$  :

$$G_c(kT_s) = \gamma_1 \times X_1(kT_s) + \gamma_2 \times X_2(kT_s) \quad (47)$$

- Υπολογίζουμε τη χρονοσειρά  $L(kT_s)$  (dB) ως εξής:

$$L(kT_s) = \exp\left( Q^{-1}\left[ \frac{1}{P_{clw}} Q(G_c(kT_s)) \right] \times \sigma + m \right) \text{ για } G_c(kT_s) > \alpha \quad (48)$$

και

$$L(kT_s) = 0 \text{ για } G_c(kT_s) < \alpha \quad (49)$$

- Αφαιρούμε τα 500.000 πρώτα δείγματα από τη συντεθειμένη χρονοσειρά (αφορούν τα μεταβατικά φαινόμενα του φίλτρου) .

Να σημειώσουμε ότι φαινόμενα νέφωσης θεωρούνται εκείνα που οι τιμές της χρονοσειράς είναι μεγαλύτερη των 0mm.

### 3.2.2. Προσομοίωση

Παρακάτω φαίνονται οι χαρακτηριστικές τιμές των τριών παραμέτρων από τη σύσταση ITU-R P.840 [6] για την προσομοίωση που εκτελέσαμε:

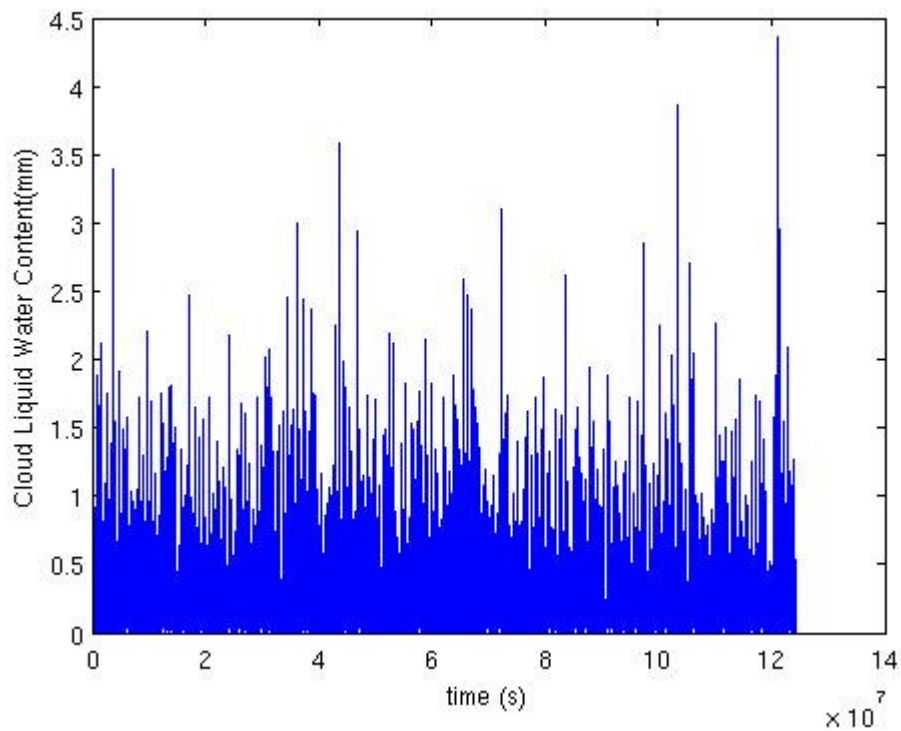
$$m = -1.3995$$

$$\sigma = 0.6473$$

$$P_{clw} = 0.4367$$

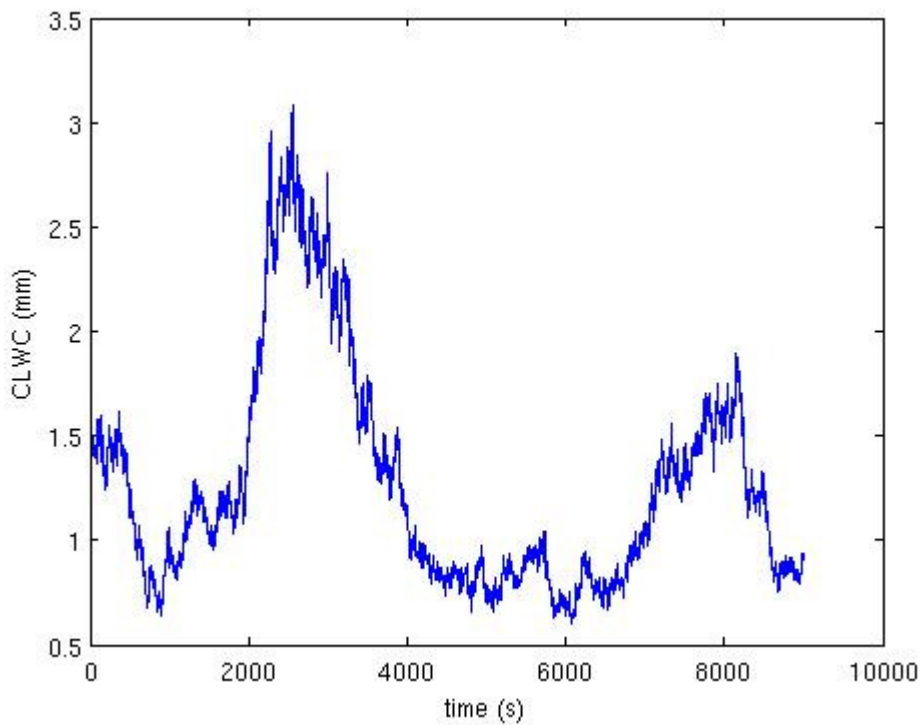
Και  $P_{clw}$  η πιθανότητα ύπαρξης σύννεφων.

Στο Σχήμα 9 φαίνεται η χρονοσειρά  $L(kT_s)$  όπως προέκυψε από τη προσομοίωση μας.



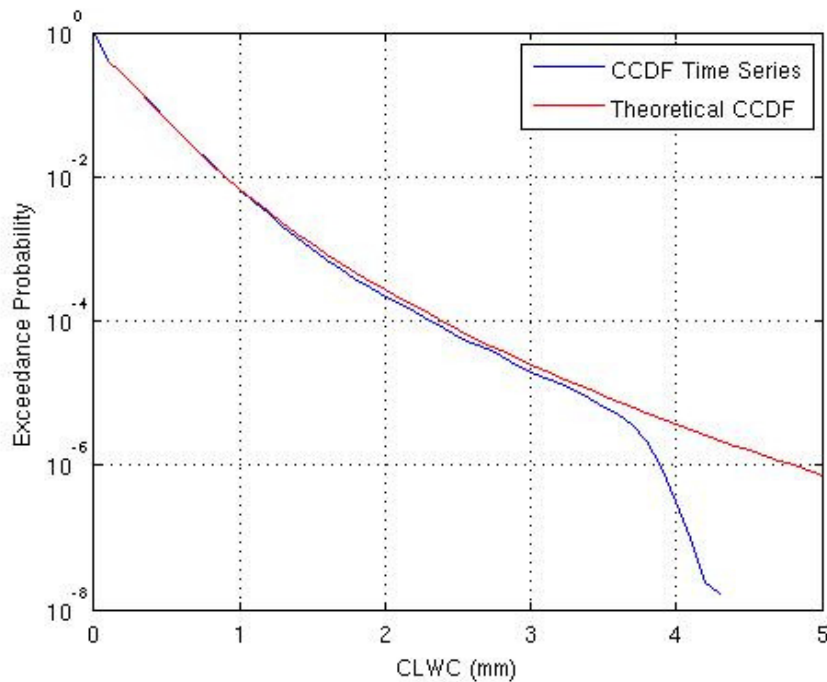
**Σχήμα 9- Χρονοσειρά L(kTs) (cloud liquid water content) όπως περιγράφεται στη (43)**

Στο Σχήμα 10 βλέπουμε σε ζουμ μια περιοχή του Σχήματος 9. Μπορούμε να δούμε ότι η περιεκτικότητα σε υγρό νερό του σύννεφου δεν παρουσιάζει εκρηκτικότητα και είναι ένα γεγονός σχετικά μεγάλης διάρκειας.



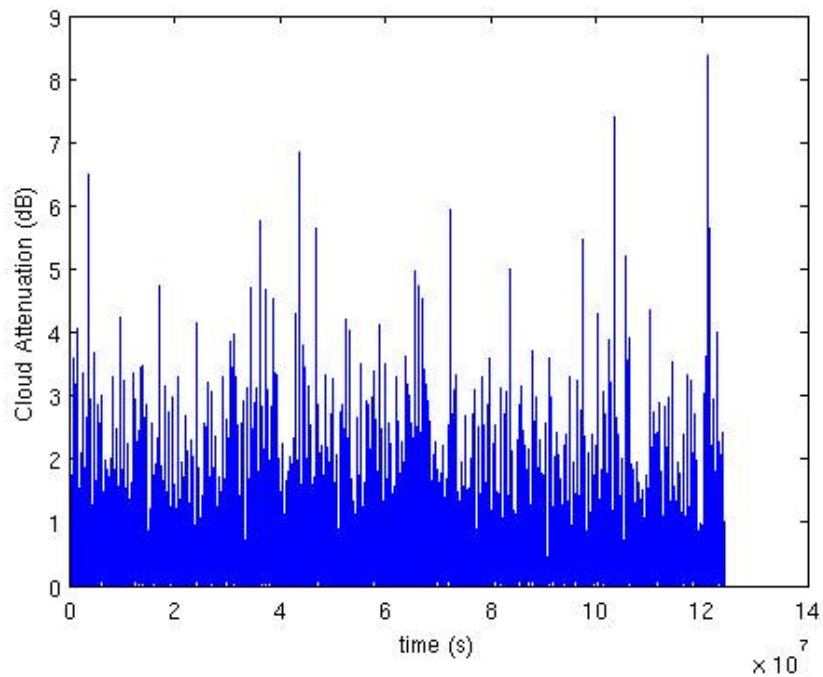
**Σχήμα 10-Φαινόμενο συννεφιάς (cloud event)**

Στο Σχήμα 11 φαίνεται η συμπληρωματική αθροιστική συνάρτηση του LWC, όπως βρίσκεται από τη λογαριθμοκανονική κατανομή από τη σύσταση ITU-R P.840 σε σύγκριση με αυτή που προέρχεται από τη χρονοσειρά  $L(kT_s)$ .



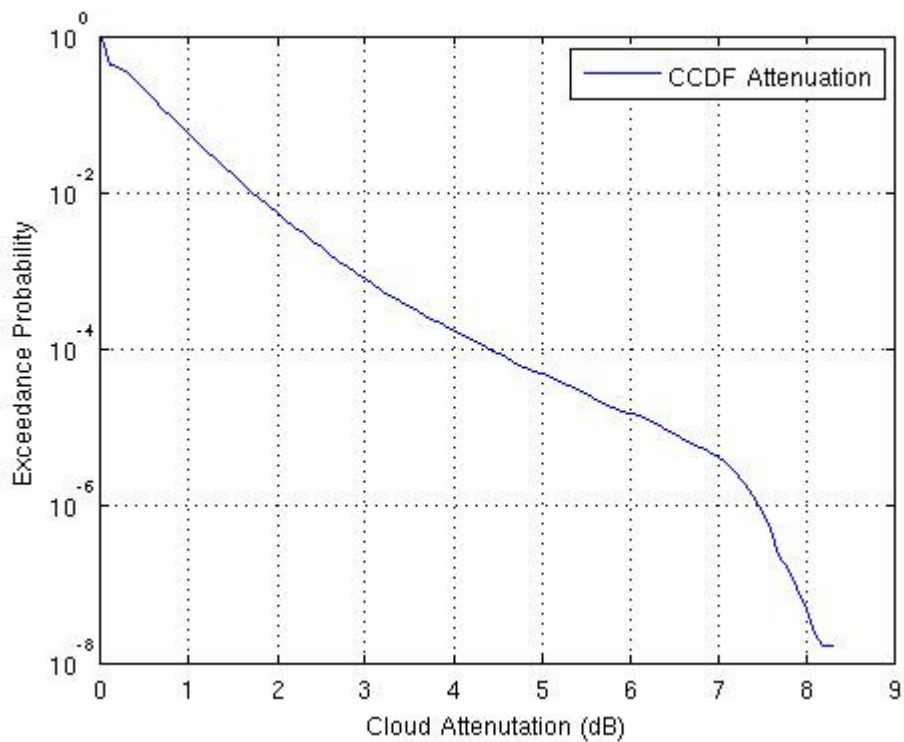
**Σχήμα 11-Αθροιστική συμπληρωματική πιθανότητα του CLWC**

Στο Σχήμα 12 φαίνεται η χρονοσειρά απόσβεσης λόγω συννέφων όπως υπολογίστηκε από τη σχέση 44.



**Σχήμα 12-Χρονοσειρά απόσβεσης**

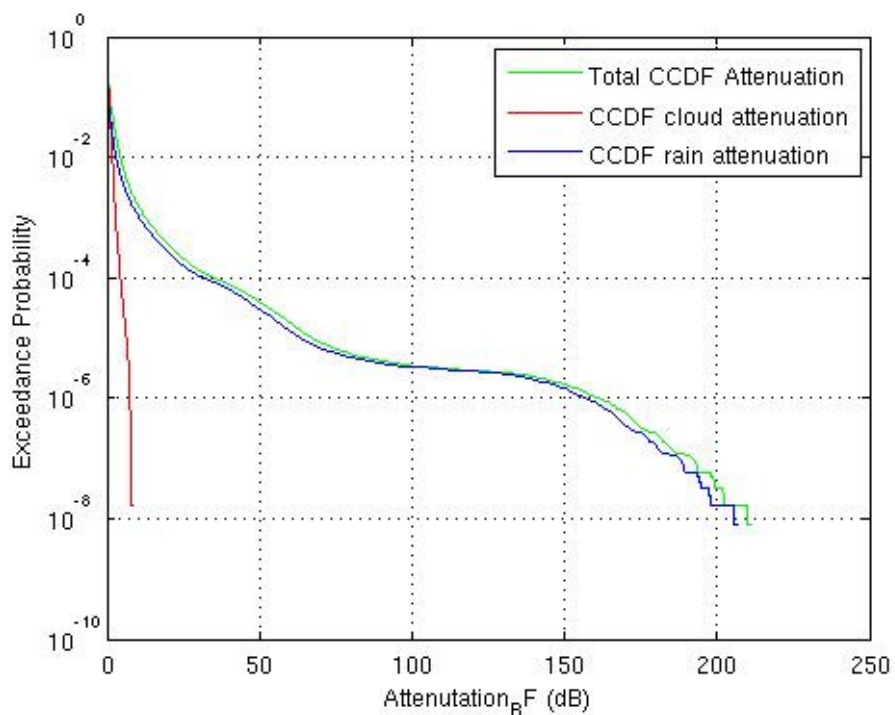
Στο Σχήμα 13 παρουσιάζεται η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της απόσβεσης λόγω συννέφων.



**Σχήμα 13- Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της απόσβεσης**

### 3.3. Συνολική απόσβεση

Για να υπολογίσουμε τη συνολική απόσβεση σε μια χλιοστομετρική ραδιοζεύξη προσθέτουμε τις χρονοσειρές απόσβεσης της βροχής και των συννέφων, όπως αυτό προτείνεται στις ITU-R. P. 618-10 P. 1853-1 [5], [7]. Στο Σχήμα 14 μπορούμε να δούμε την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας για τη συνολική απόσβεση στη ζεύξη.

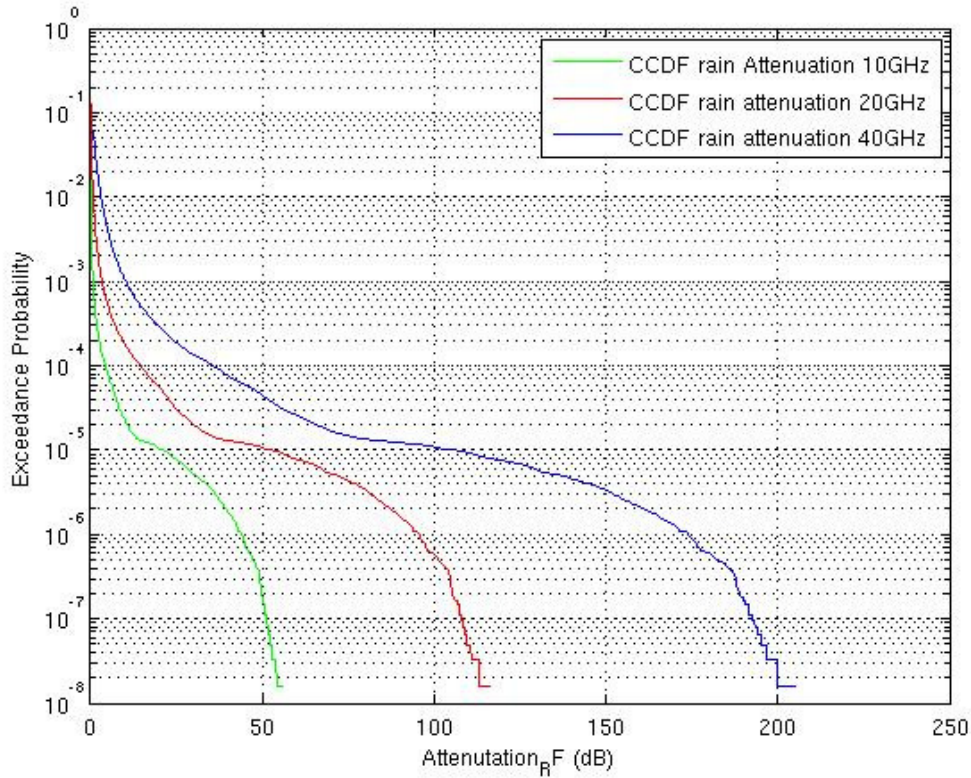


**Σχήμα 14- Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας για τη συνολική απόσβεση στη ζεύξη**

Όπως μπορούμε να δούμε το μεγαλύτερο κομμάτι της απόσβεσης στην χλιοστομετρική ραδιοζεύξη το προκαλεί η βροχή. Τα σύννεφα συνεισφέρουν πολύ λίγο στην απόσβεση του σήματος. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι μια χλιοστομετρική ραδιοζεύξη διατηρεί τη λειτουργικότητά του σε φαινόμενα ωέφωσης, ενώ σε φαινόμενα βροχής υπάρχει μεγάλη πιθανότητα για ένα ποσοστό του χρόνου να μην είναι διαθέσιμη.

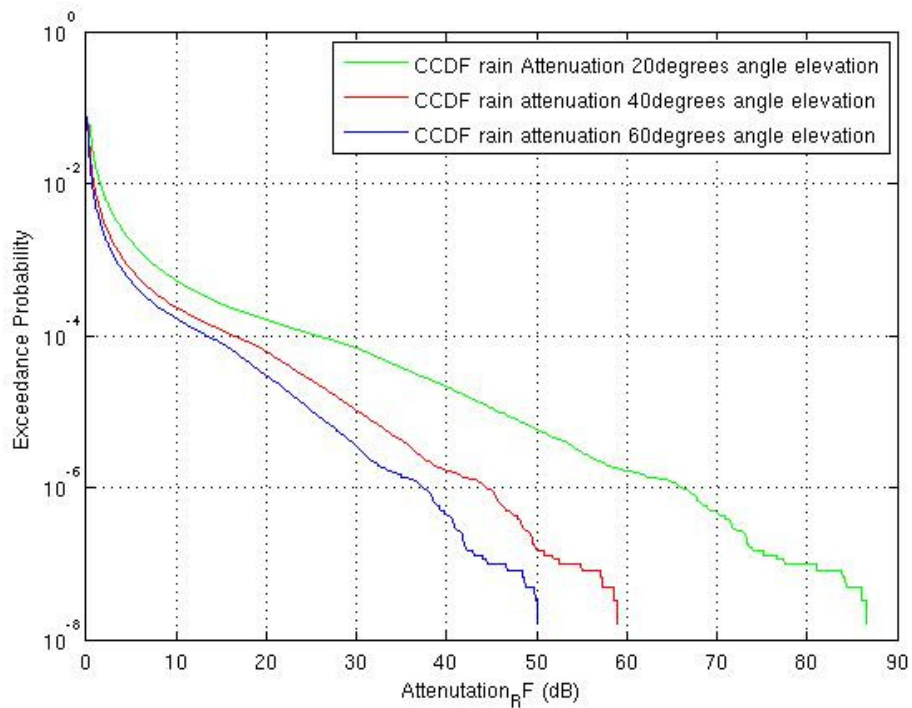
### 3.4. Συγκριτικά αποτελέσματα για απόσβεση βροχής

Στο Σχήμα 15 βλέπουμε την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας, αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την περιοχή της Λυών, Γαλλία , με γωνία ανύψωσης  $43,21^\circ$ . Δοκιμάζουμε χιλιοστομετρικές ραδιοζεύξεις στα 10, 20 και 40GHz.



**Σχήμα 15-Προσομείωση απόσβεσης βροχής για διαφορετικές συχνότητες**

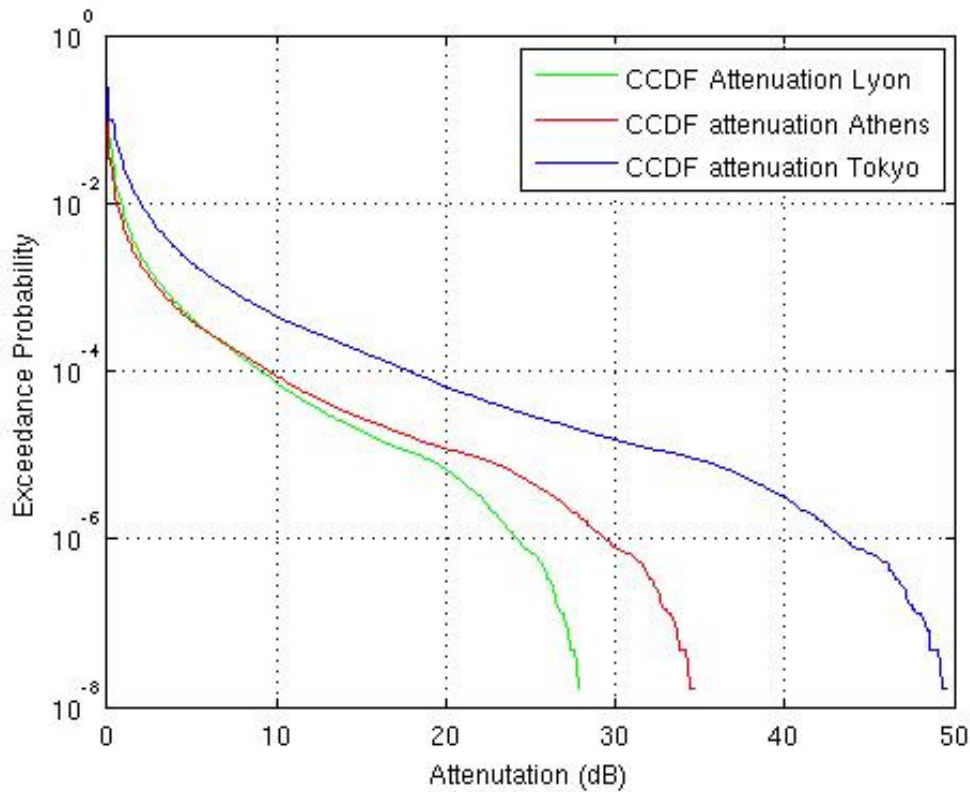
Στο Σχήμα 16 βλέπουμε την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας, αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την περιοχή της Λυών, Γαλλία , συχνότητα μετάδοσης 20 GHz. Δοκιμάζουμε διαφορετικές γωνίες ανύψωσης  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ , και  $60^\circ$ .



**Σχήμα 16- Προσομοίωση απόσβεσης βροχής για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης**

Στο Σχήμα 17 βλέπουμε την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας, αποτέλεσμα της προσομοίωσης για συχνότητα μετάδοσης 20 GHz, και γωνία ανύψωσης 40°, σε 3 διαφορετικές περιοχές, οι δύο μεσογειακού κλίματος και η άλλη στην Ιαπωνία (Λυών-Γαλλία, Τόκιο, Ιαπωνία και Αθήνα-Ελλάδα). Βλέπουμε ότι το κλίμα της Ιαπωνίας είναι πιο βροχερό και στη ζεύξη παρατηρείται μεγάλη απόσβεση.

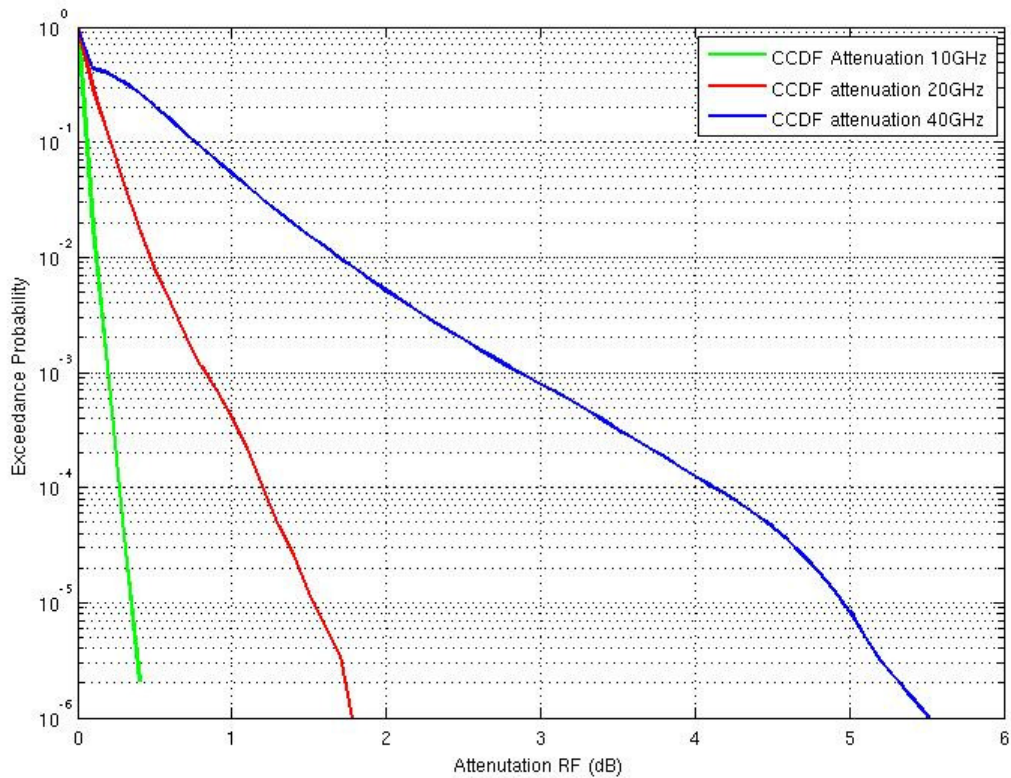




Σχήμα 17-Προσομοίωση απόσβεσης βροχής για διαφορετικές τοποθεσίες

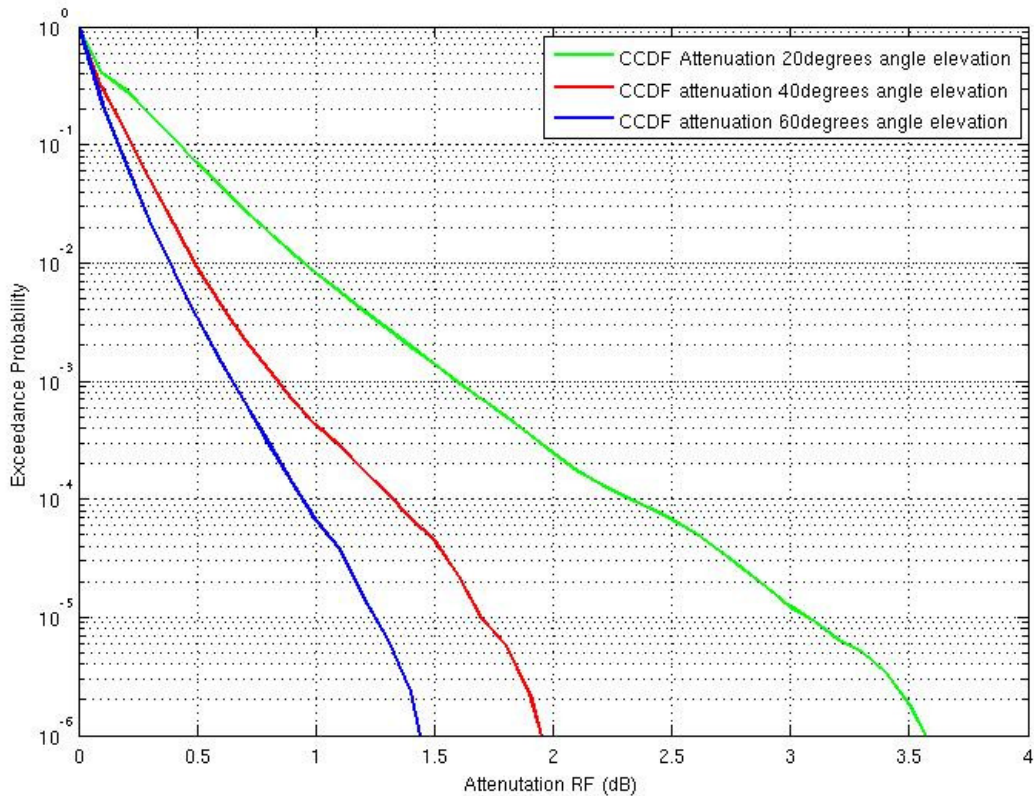
### 3.5. Συγκριτικά αποτελέσματα για απόσβεση σύννεφων

Στο Σχήμα 18 βλέπουμε την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας, αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την περιοχή της Λυών, Γαλλία, με γωνία ανύψωσης  $43,21^\circ$ . Δοκιμάζουμε ραδιοκυματικές ζεύξεις στα 10, 20 και 40GHz. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει η συχνότητα τόσο αυξάνει και η απόσβεση για συγκεκριμένη πιθανότητα. Χαρακτηριστικά βλέπουμε ότι για πιθανότητα  $10^{-4}$  του χρόνου η ζεύξη των 10GHz έχει απόσβεση 0.3dB, η ζεύξη των 20GHz έχει απόσβεση 1dB και η ζεύξη των 40GHz παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη απόσβεση περίπου 4dB.



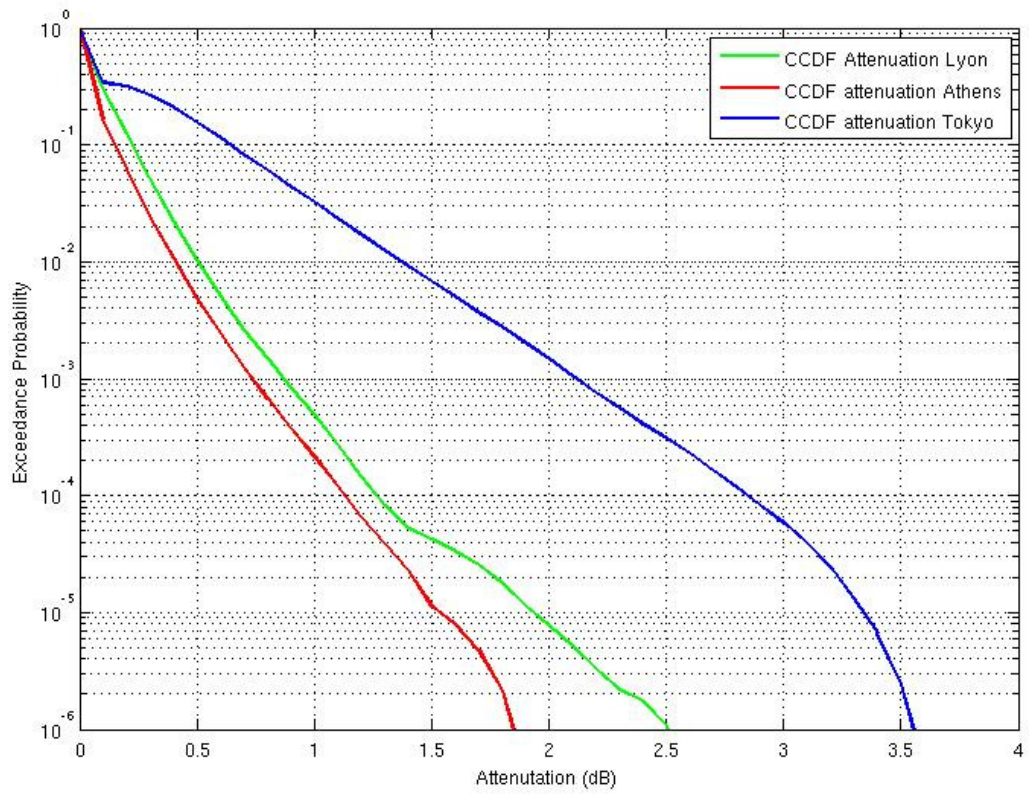
**Σχήμα 18 -Προσομοίωση απόσβεσης συννέφων για διαφορετικές συχνότητες**

Στο Σχήμα 19 βλέπουμε την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας, αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την περιοχή της Λυών,Γαλλία , συχνότητα μετάδοσης 20 GHz.Δοκιμάζουμε διαφορετικές γωνίες ανύψωσης 20°, 40°, και 60°. Παρατηρούμε ότι για πιθανότητα 10<sup>-5</sup> του χρόνου, η ζεύξη με γωνία ανύψωσης 60° παρουσιάζει απόσβεση περίπου 1.3dB, η ζεύξη με γωνία ανύψωσης 40° 1.8dB και η ζεύξη με γωνία ανύψωσης 60° παρουσιάζει αρκετά μεγαλύτερη απόσβεση περίπου 3dB. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι όσο η γωνία ανύψωσης πλησιάζει στις 90°, τόσο λιγότερο εξασθενεί το σήμα σε σχέση με ζεύξεις με μικρότερη γωνία ανύψωσης.



**Σχήμα 19-Προσομοίωση απόσβεσης σύννεφων για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης**

Στο Σχήμα 20 βλέπουμε την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας, αποτέλεσμα της προσομοίωσης για συχνότητα μετάδοσης 20 GHz, και γωνία ανύψωσης 40°, σε 3 διαφορετικές περιοχές μεσογειακού κλίματος (Λυών-Γαλλία, Αθήνα-Ελλάδα, και Τόκυο- Ιαπωνία). Μπορούμε να δούμε ότι η απόσβεση λόγω συννεφιάς στο Τόκυο είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή στα μεσογειακά κλίματα. Χαρακτηριστικά παρατηρούμε ότι για πιθανότητα υπέρβασης 10<sup>-3</sup>, η δορυφορική ζεύξη στο Τόκυο εξασθενεί κατά περίπου 2dB, ενώ στη Λυών και στην Αθήνα οι δορυφορικές ζεύξεις εξασθενούν κατά 0.8dB-0.9dB.



**Σχήμα 20- Προσομοίωση απόσβεσης συννέφων για διαφορετικές τοποθεσίες**

## Βιβλιογραφία

- [1] S. H.Lin “A Method for Calculating Rain Attenuation Distributions on Microwave Paths” The Bell System Technical Journal, vol.54, no.6, pp. 1051-1086, January 1975
- [2]Αθ. Παναγόπουλος “Stochastic propagation models of electromagnetic waves at frequencies above 10 GHz, with application to the satellite communication systems design”, pp. 24-36 , PhD Thesis in Greek, 2002
- [3] T. Maseng, P. Bakken “A Stochastic Dynamic Model of Rain Attenuation” IEEE Transactions on Communications , vol.29, no.5, pp. 660-669, May 1981
- [4] ITU-R Recommendation P.837-6, “Characteristics of precipitation for propagation modelling”, February 2012
- [5] ITU-R Recommendation P.1853-1, “Tropospheric attenuation time series synthesis”, February 2012
- [6] ITU-R Recommendation P.840-5, “Attenuation due to clouds and fog” ,February 2012
- [7]ITU-R Recommendation P.618-10, “Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems”, September 2009



# Κεφάλαιο 4

## Απόσβεση σε Ασύρματες Οπτικές Ζεύξεις

Στα δύο πρώτα κεφάλαια είδαμε τα φαινόμενα εκείνα που εξασθενούν ένα οπτικό σήμα όταν περνά μέσα από την ατμόσφαιρα. Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε πώς η βροχή και τα σύννεφα επηρεάζουν τη μετάδοση ενός οπτικού σήματος. Θα δούμε τις κατανομές εκείνες που περιγράφουν τα ατμοσφαιρικά αυτά φαινόμενα και μέσω χρονοσειρών θα δούμε πιο συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των ατμοσφαιρικών αυτών φαινομένων.

### 4.1. Απόσβεση βροχής

#### 4.1.1. Μοντέλο απόσβεσης

Το οπτικό σήμα όταν περνάει από την ατμόσφαιρα συναντάει διάφορα ατμοσφαιρικά φαινόμενα. Αν και η βροχή δεν είναι ο βασικός ατμοσφαιρικός παράγοντας απόσβεσης του οπτικού σήματος μετάδοσης, εισάγει απόσβεση η οποία εξαρτάται από την συνάρτηση κατανομής μεγέθους των σταγονιδίων της βροχής, και δίνεται από τον Weibull[1]:

$$N_{\alpha} = \frac{N_T}{\alpha_0 V_{\alpha}} \varphi(n) n \left( \frac{\alpha}{\alpha_0} \right)^{n-1} e^{-\varphi(n) \frac{\alpha}{\alpha_0} n} \quad (1)$$

Όπου

$$\alpha_0 = d (z_a)^b e^{-cz_a}$$

$$\varphi(n) = \Gamma^n \left( 1 + \frac{1}{n} \right)$$

Με  $z_a$  να είναι να είναι ο ρυθμός βροχόπτωσης των σταγονιδίων με ακτίνα  $a$ .

Η σχέση που χρησιμοποιείται ευρέως για τον υπολογισμό της ειδικής απόσβεσης σε  $dB / km$  όπως υπολογίζεται από τη σχέση που εξήχθη από τον van de Hulst[2]:

$$\gamma_0 = 8.686 \cdot 10^3 \cdot \lambda \cdot \text{Im} \int \hat{f}(D) \cdot N(D) dD \quad (2)$$

Όπου

$\lambda$  : το μήκος κύματος

$f$  : η συνάρτηση σκέδασης

$D$  : η διάμετρος των σταγονιδίων βροχής

$N$  : η συνάρτηση κατανομής μεγέθους των σταγονιδίων όπως ορίζεται από τη σχέση 1

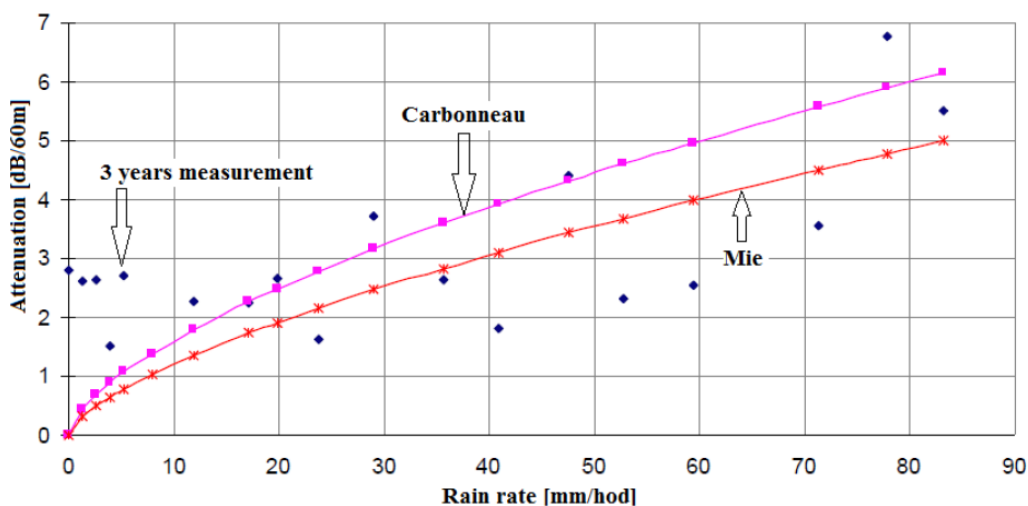
Χρησιμοποιώντας τη θεωρία σκέδασης Mie και το μοντέλο Marshall-Palmer για την κατανομή μεγέθους σταγόνας, καταλήγουμε στη πρακτική προσέγγιση :

$$a_{1,rain} = 1,5625 \cdot R^{0,6334} [dB / km] \quad (3)$$

Θα συγκρίνουμε αυτή τη σχέση με αυτή που προτάθηκε από τον Carbonneau[2]:

$$a_{1,rain} = 1,076 \cdot R^{0,67} [dB / km] \quad (4)$$

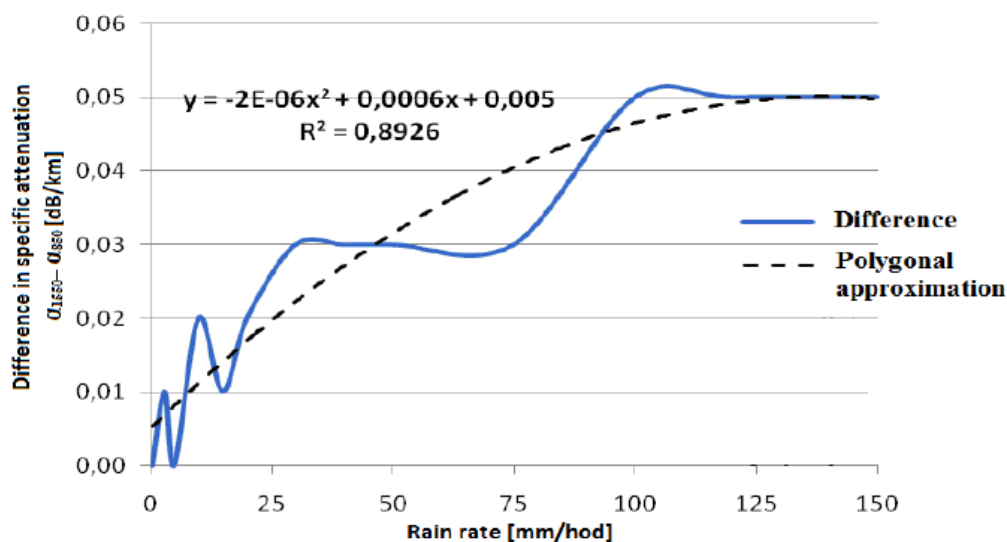
Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται η θεωρητική απόσβεση όπως εξάγεται από τις σχέσεις 3 και 4 ενώ σημειώνονται και τα πειραματικά δεδομένα όπως αυτά μετρήθηκαν σε μια πειραματική FSO ζεύξη στο παρατηρητήριο Mileskova. Χρησιμοποιήθηκε μήκος κύματος 1550nm.



**Σχήμα 2-Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για την απόσβεση βροχής[2]**



Στο Σχήμα 1 δε λάβαμε υπ' όψιν το μήκος κύματος για τη θεωρητική προσέγγιση της απόσβεσης βροχής. Όντως έχει δειχθεί ότι οι διαφορές στην απόσβεση βροχής σε μια FSO ζεύξη είναι πολύ μικρές, σχεδόν μηδαμινές και άρα δε χρειάζεται να τη λάβουμε υπόψιν. Αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 2 όπου παρουσιάζεται η διαφορά στην απόσβεση σε δύο ζεύξεις, εκ των οποίων η μία στα 850nm και η άλλη στα 1550nm.

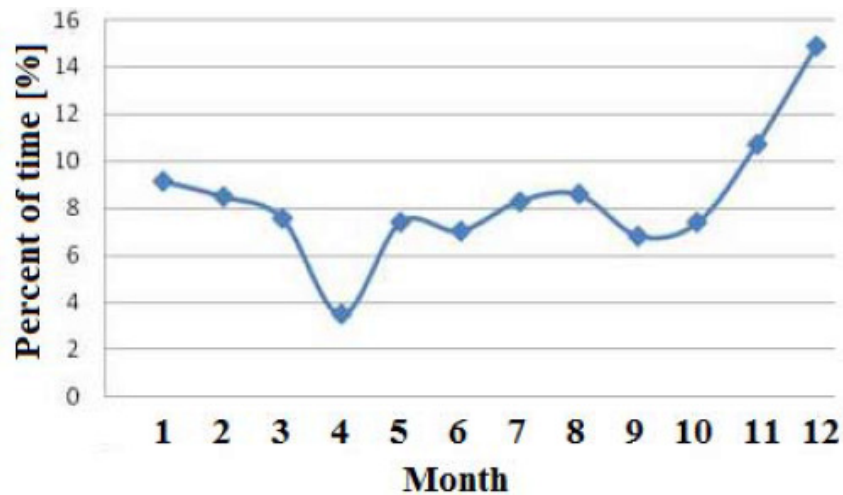


**Σχήμα 3-Διαφορά απόσβεσης 850nm με 1550nm[2]**

Είναι φανερό ότι η διαφορά είναι πάρα πολύ μικρή και άρα μπορούμε πρακτικά να πούμε ότι η απόσβεση βροχής σε μια FSO ζεύξη είναι ανεξάρτητη του μήκους κύματος εκπομπής.

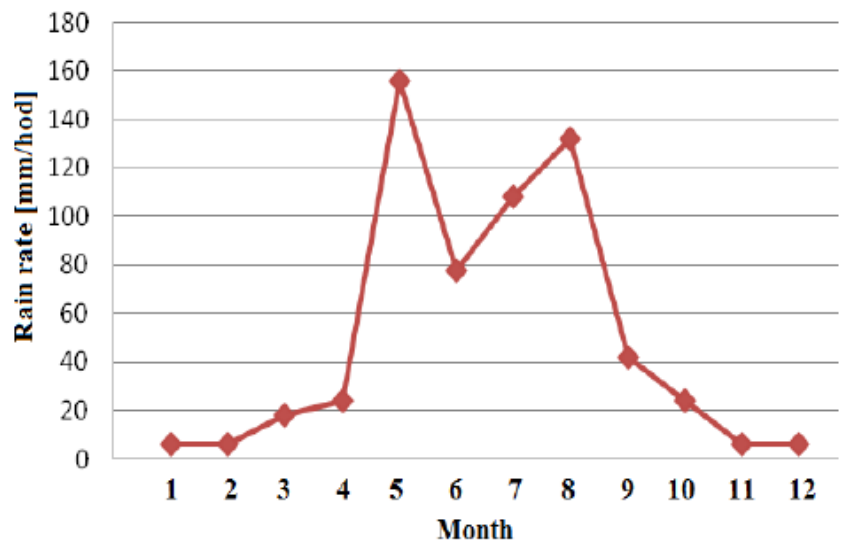
Στο ορεινό παρατηρητήριο Mileskova μετρήθηκε στη διάρκεια τριών ετών ο ρυθμός βροχοπτώσης.

Στο Σχήμα 3 φαίνεται στη διάρκεια τριών ετών το μέσο ποσοστό του χρόνου που υπάρχουν βροχοπτώσεις.



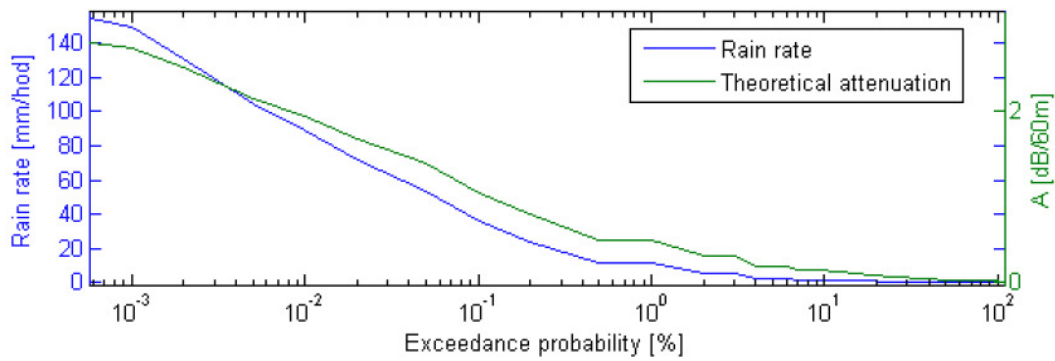
**Σχήμα 4-Ποσοστό του χρόνου που παρατηρούνται βροχοπτώσεις[2]**

Στο Σχήμα 4 βλέπουμε το μέσο ρυθμό βροχόπτωσης για κάθε μήνα στη διάρκεια παρατήρησης των τριών ετών.



**Σχήμα 5-Μέσο ποσοστό βροχόπτωσης[2]**

Να παρατηρήσουμε εδώ ότι το Δεκέμβριο παρουσιάζεται το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου να βρέχει, ενώ αντίθετα ο μεγαλύτερος μέσος ρυθμός βροχόπτωσης παρατηρείται την άνοιξη και κυρίως το Μάιο. Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κατανομές ρυθμού βροχόπτωσης και η θεωρητική απόσβεση εξαιτίας αυτών των βροχοπτώσεων στη διάρκεια του τριετούς πειράματος.



**Σχήμα 6-Κατανομές ρυθμού βροχόπτωσης και απόσβεσης [2]**

Και εδώ , όπως και στο Κεφάλαιο 3 η κατανομή του ρυθμού βροχόπτωσης ακολουθεί το μοντέλο του Lin. Ο ρυθμός δηλαδή βροχόπτωσης όσο και η απόσβεση εξ' αιτίας βροχής ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή και οι τιμές των χαρακτηριστικών τιμών τους μπορούν εξαχθούν από τη σύσταση ITU-R P.837 [3] και εφ' όσον υποθέτουμε την ισχύ της μεθόδου Maseng-Bakken μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο των χρονοσειρών ώστε να μελετήσουμε την απόσβεση βροχής σε ασύρματα οπτικά συστήματα.

#### 4.1.2. Προσομοίωση

Στη προσομοίωση που εκτελούμε σε περιβάλλον Matlab, θεωρούμε τόπο διεξαγωγής του πειράματος μας τη περιοχή Λυών,Γαλλία με συντεταγμένες (45.75 ° , 4.66 °). Το πείραμα μας γίνεται σε μια δορυφορική ζεύξη με το δορυφόρο σε γωνία ανύψωσης 43.21 ° και στα 785nm. Το διάστημα προσομοίωσης ορίζεται στα 4 έτη.

Από τη μέθοδο του Lin και τη σύσταση ITU-R P.837 παίρνουμε τις εξής χαρακτηριστικές τιμές της λογαριθμοκανονικής κατανομής απόσβεσης [3]:

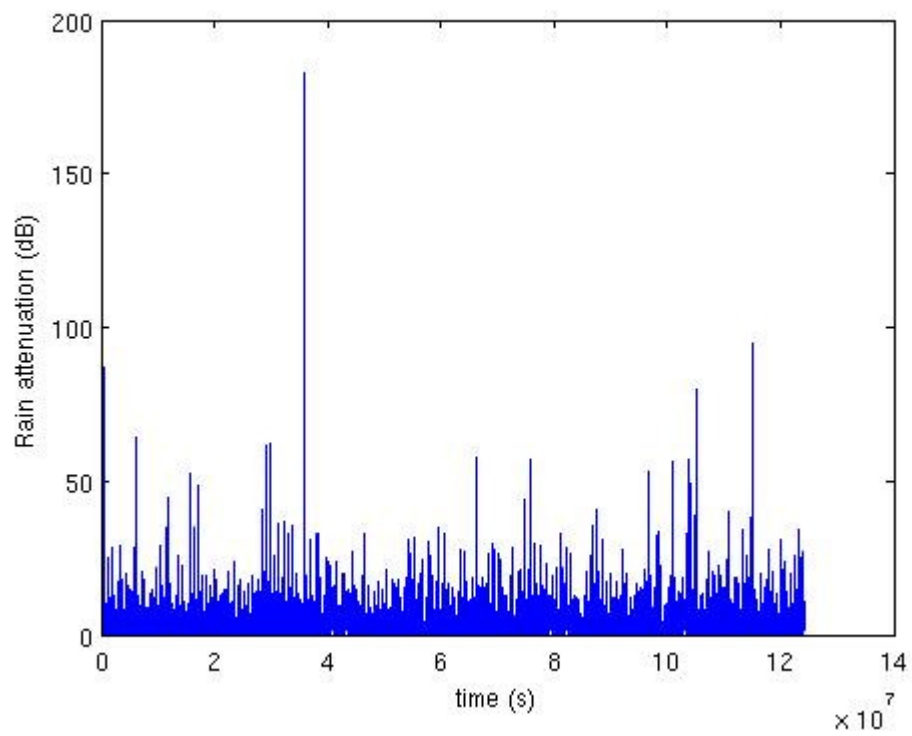
$$S_a = 1.24$$

$$a_m = 0.34$$

$$P_0 = 5.95$$

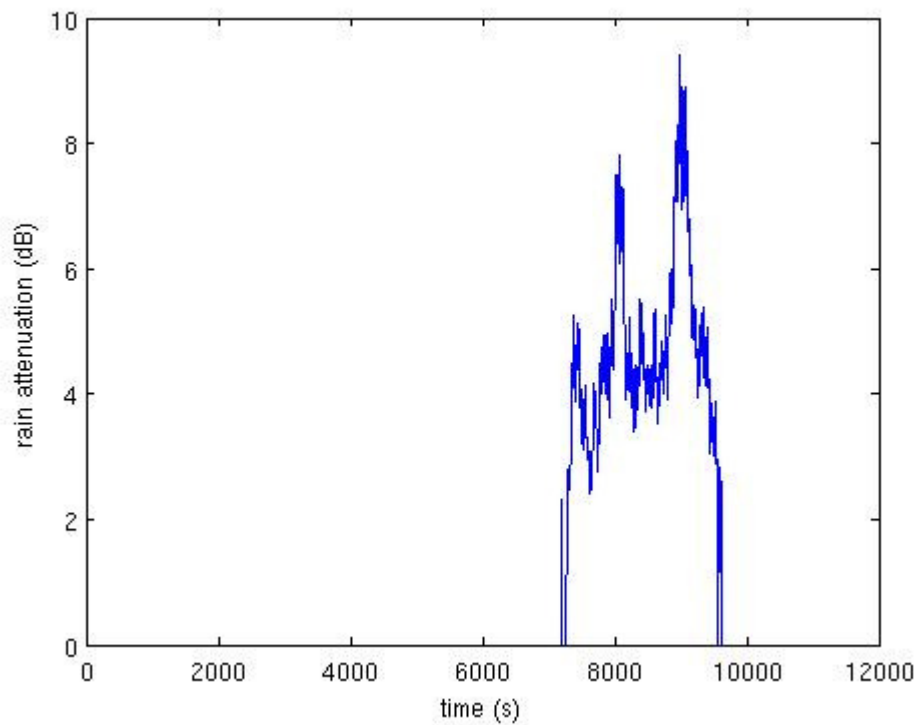
Όπου  $P_0$  η πιθανότητα βροχόπτωσης.

Στο Σχήμα 6 φαίνεται η χρονοσειρά απόσβεσης λόγω βροχής υπολογισμένη μέσω μοντέλου Maseng-Bakken.



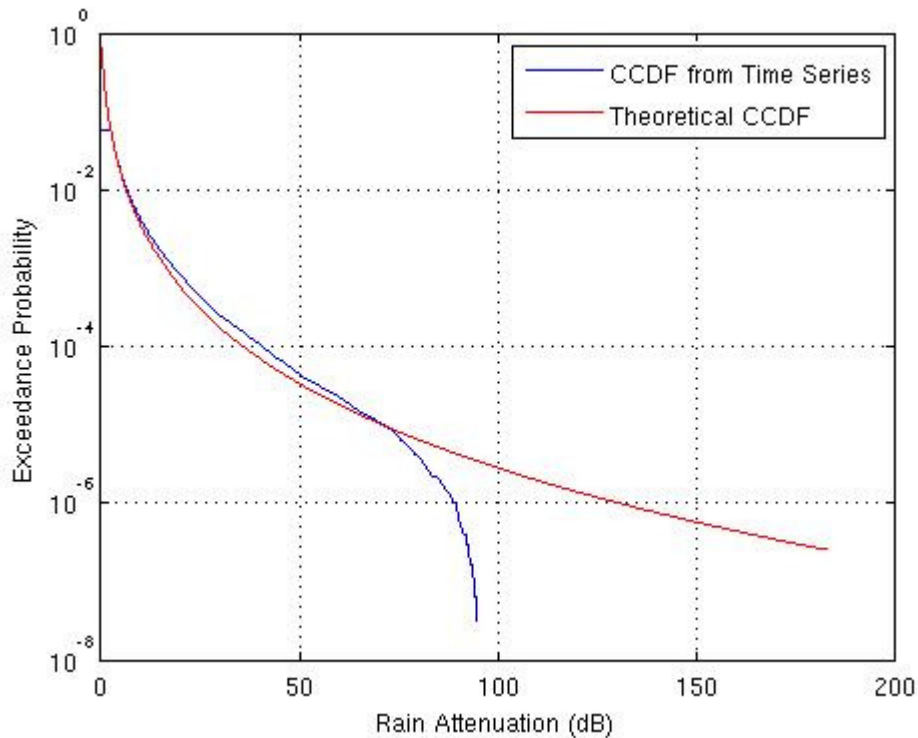
**Σχήμα 6-Χρονοσειρά απόσβεσης βροχής**

Στο Σχήμα 7 μπορούμε να δούμε ένα βροχερό συμβάν διάρκειας περίπου 30min στην οποία μπορούμε να δούμε τη σχετική εκρηκτικότητα και την μη υπαρξη βροχής τις κοντινές στο περιστατικό ώρες.



**Σχήμα 7-Απόσβεση ενός συμβάντος βροχής**

Στο Σχήμα 8 βλέπουμε την αθροιστική συμπληρωματική πιθανότητα , όπως υπολογίζεται τόσο από τη λογαριθμοκανονική κατανομή προερχόμενη από τη μέθοδο του Lin, όσο και από τις χρονοσειρές που προβλέπονται από τη μέθοδο Maseng-Bakken. Βλέπουμε ότι είναι πολύ κοντά και επιβεβαιώνεται και πειραματικά μέσω της προσομοίωσης η αποτελεσματικότητά του.



**Σχήμα 8- Αθροιστική συμπληρωματική πιθανότητα με θεωρητικό υπολογισμό και μέσω προσομοίωσης**

## 4.2. Απόσβεση σύννεφων

### 4.2.1. Φυσικά χαρακτηριστικά σύννεφων

Η απόσβεση σε οπτικές δορυφορικές ζεύξεις επηρεάζεται πάρα πολύ από τα τροποσφαιρικά φαινόμενα. Τα σύννεφα είναι αυτά που προκαλούν τη μεγαλύτερη απόσβεση. Το μέγεθος των σταγονιδίων, η υψηλή συγκέντρωσή τους, και το μήκος της διαδρομής της ζεύξης μέσα από το σύννεφο είναι παράγοντες που μπορεί να προκαλέσουν μεγάλες τιμές απόσβεσης.

Τα σύννεφα μπορούν να χωριστούν σε 4 μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το ύψος της βάσης του σύννεφου[4]:

- Σύννεφα υψηλού επιπέδου: Κρύα σώματα αποτελούμενα κυρίως από παγοκρυστάλλους που βρίσκονται σε ύψος από 5 έως 13km.
- Μεσαίου επιπέδου σύννεφα(Nimbostratus): Αποτελούνται κυρίως από υγρά σταγονίδια ενώ κάποιες φορές παρατηρείται και μικρή ποσότητα παγοκρυστάλλων και βρίσκονται σε ύψος από 2 έως 7km.

- Χαμηλού επιπέδου σύννεφα(Stratus): Βρίσκονται σε ύψος μικρότερο των 2km, αποτελούνται από υγρά σταγονίδια και εάν η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας είναι κρύα, δημιουργούνται κρύσταλλοι πάγου και χιονιού.
- Κάθετα αναπτυγμένα σύννεφα(Cumulus/Cumulonimbus) : Δημιουργούνται είτε μέσω θερμικής μεταφοράς ή μετωπικής ανύψωσης, και συνήθως συνδέονται με κατακρημνίσεις.

Το πλήθος των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου αέρα με ακτίνα σωματιδίου  $r$  δίνεται από τη σχέση[4]:

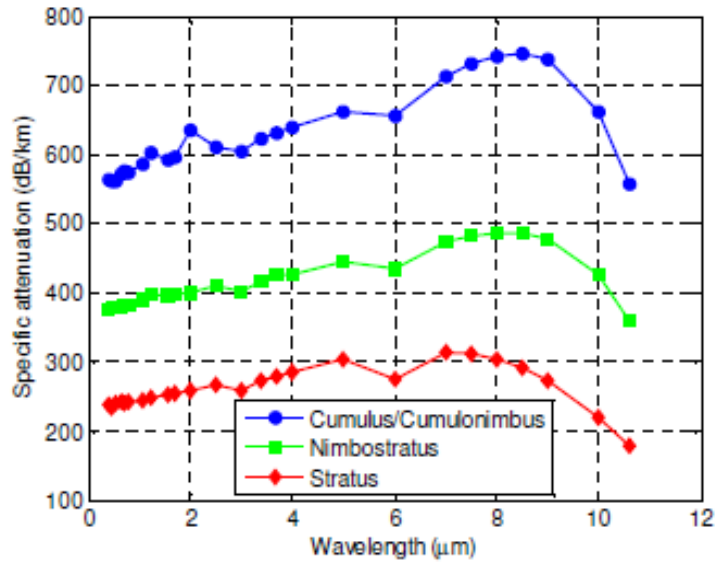
$$n(r) = ar^\alpha e^{-br^\gamma} \quad (5)$$

Όπου  $\alpha$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $\gamma$  είναι ανεξάρτητες μεταβλητές των οποίων οι τιμές για τα διάφορα είδη σύννεφων δίνονται στον Πίνακα 1. Το  $\Delta H(km)$  που εμφανίζεται στον πίνακα είναι το κάθετο μήκος του σύννεφου, και βλέπουμε ότι παίρνει τιμές από 0.6-3 km.

Cloud type	$r_c(\mu m)$	$B$	$\alpha$	$\gamma$	$\Delta H(km)$
Vertically developed cloud(Cumulonimbus)	10-20	0.5	6-5	0.5-0.3	3
Vertically developed cloud(Cumulus)	10-20	0.5	6-5	0.5-0.3	2
Mid-Level(Nimbostratus)	6	0.425	4	1	0.8
Low-Level(Stratus)	10	0.6	6	1	0.6

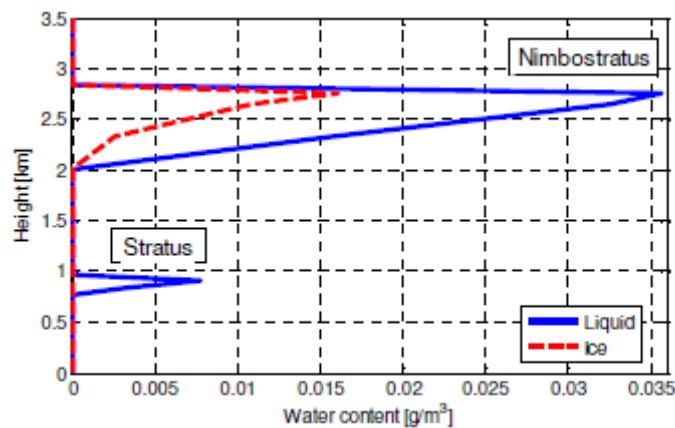
**Πίνακας 1-Χαρακτηριστικές τιμές για διαφορετικά είδη σύννεφων[4]**

Στο σχήμα 9 παρουσιάζεται η ειδική απόσβεση για μήκη κύματος από το ορατό έως το άκρα-υπέρυθρο φάσμα, και για διάφορα είδη σύννεφων. Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι τα κάθετα αναπτυγμένα σύννεφα εισάγουν τεράστια απόσβεση στη ζεύξη, και ότι στο άκρα υπέρυθρο φάσμα έχουμε καλύτερη μετάδοση σε σχέση με το υπέρυθρο φάσμα.



Σχήμα 9-Ειδική απόσβεση συναρτήσει μήκους κύματος και είδους σύννεφου[4]

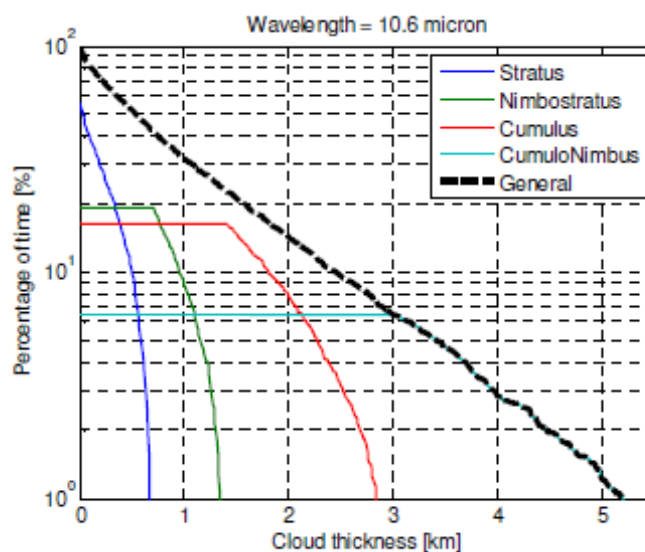
Στο σχήμα 10 μπορούμε να δούμε τη συγκέντρωση του νερού σε υγρή και σε παγωμένη μορφή σε ένα σύννεφο Nimbostratus και σε ένα Stratus αντίστοιχα καθώς και τα υψομετρικά τους χαρακτηριστικά.



Σχήμα 10-Συγκέντρωση νερού[4]

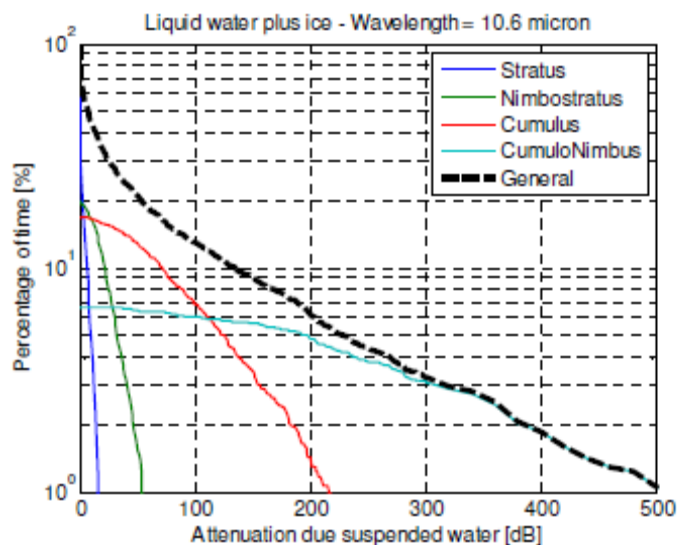
Στο σχήμα 11 παρουσιάζεται η παρουσία όλων των ειδών σύννεφων όπως παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια ενός δεκαετούς πειράματος μετρήσεων στο Milano/Linate airport στα 10.6 μm.





Σχήμα 11-Συνάρτηση πιθανότητας ύπαρξης διαφόρων ειδών συννέφων[4]

Στο σχήμα 12 βλέπουμε την απόσβεση που εισάγει το κάθε είδος σύννεφου.



Σχήμα 12-Συνάρτηση πιθανότητας απόσβεσης συννέφων[4]

Παρόλο που τα cumulonimbus εμφανίζονται με μικρότερη συχνότητα από τα άλλα είδη, εισάγουν τη μεγαλύτερη απόσβεση λόγω του PSD και λόγω του μεγάλου κάθετου μήκους τους.

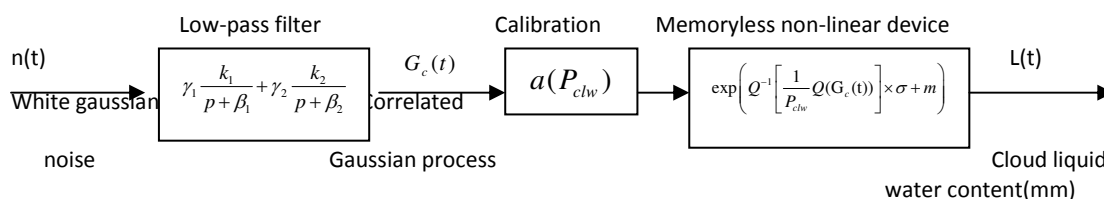
Συνολικά μπορούμε να πούμε ότι σε αυτό το μήκος κύματος, για μια ζεύξη που επιτρέπει εξαιτίας εξασθένισης σύννεφων περιθώριο 50db θα βρίσκεται εκτός λειτουργίας για το 15% του χρόνου ετησίως σε μια mid-latitude περιοχή.

## 4.2.2. Δυναμικό μοντέλο

Τα χαρακτηριστικά των χρονοσειρών του ολοκληρωμένου υγρού περιεχομένου νερού σε σύννεφο(ILWC) προσεγγίζονται από τα χαρακτηριστικά μιας λογαριθμοκανονικής κατανομής.

Ωστόσο εμείς δε θα μείνουμε στην λογαριθμοκανονική κατανομή, αλλά θα μελετήσουμε τις ILWC χρονοσειρές διότι έχουν πολλά πλεονεκτήματα όπως η αναπαραγωγή των φασματικών χαρακτηριστικών, ο ρυθμός μεταβολής και τα στατιστικά της διάρκειας των ILWC φαινομένων[5].

Οι χρονοσειρές αυτές συντίθενται από λευκό γκαουσιανό θόρυβο ο οποίος φιλτράρεται από ένα βαθυπερατό φίλτρο, βαθμονομείται για να ταιριάζει με τη συγκεκριμένη πιθανότητα ύπαρξης σύννεφων, και στο τέλος μετατρέπεται από κανονική σε μια λογαριθμοκανονική κατανομή σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα:



**Σχήμα 13-Μπλοκ διάγραμμα υγρού περιεχομένου νερού σύννεφων[5]**

Με τις εξής παραμέτρους:

- $m$  : μέση τιμή της λογαριθμοκανονικής κατανομής απόσβεσης βροχής
- $\sigma$  : τυπική απόκλιση της λογαριθμοκανονικής κατανομής απόσβεσης βροχής
- $P_{CLW}$  :πιθανότητα ύπαρξης σύννεφων
- $\alpha$  :όριο αποκοπής συσχετισμένου γκαουσιανού θορύβου
- $\beta_1$  :παράμετρος που περιγράφει τη χρονική δυναμική της διαδικασίας του γρήγορου συστατικού

- $\beta_2$ : παράμετρος που περιγράφει τη χρονική δυναμική της διαδικασίας του αργού συστατικού
- $\gamma_1$ : παράμετρος που περιγράφει το βάρος της διαδικασίας του γρήγορου συστατικού
- $\gamma_2$ : παράμετρος που περιγράφει το βάρος της διαδικασίας του αργού συστατικού

### 4.2.3. Υπολογισμός απόσβεσης

Θα προσπαθήσουμε τώρα να δούμε πως μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσβεση σε μια FSO ζεύξη από την παρουσία σύννεφων. Θα συνδέσουμε την υγρή περιεκτικότητα σε νερό(LWC) με την απόσβεση. Η περιεκτικότητα σε νερό ενός σύννεφου είναι εύκολα μετρήσιμη από μετεωρολογικούς σταθμούς από όπου μπορούμε να εξάγουμε και την απόσβεση που εισάγει αυτό το σύννεφο στη ζεύξη, τουλάχιστον για συγκεκριμένα μήκη κύματος. Ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και αντίστροφα ώστε μέσω της μέτρησης της απόσβεσης να υπολογίζουμε την υγρή περιεκτικότητα σε νερό.

Ιστορικά έχουν υπάρξει αρκετές μέθοδοι συσχέτισης των, αλλά εξαρτάται από την κατανομή του μεγέθους των υγρών σωματιδίων. Αυτό τις κάνει μερικά επιτυχείς καθώς διαφοροποιούνται σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με την περίσταση. Θα δείξουμε ότι σε συγκεκριμένα μήκη κύματος το οποίο προσδιορίζεται από το μέγεθος των μεγαλύτερων σωματιδίων μέσα σε ένα επίπεδο του σύννεφου μπορούμε να εξάγουμε μια σαφή σχέση ανάμεσα σε απόσβεση και LWC.

Ένα σύννεφο αποτελείται από πολλές σταγόνες διαφορετικού μεγέθους, με την χωρική κατανομή  $n(r)$ .

Η υγρή περιεκτικότητα σε νερό[6]:

$$W = \frac{4}{3} \pi \rho \int r^3 n(r) dr \quad (6)$$

Και ο συντελεστής εξασθένησης:

$$k(\lambda) = \int \sigma_{ext}(\lambda, r) n(r) dr \quad (7)$$

ή με τη μορφή της κανονικοποιημενης απόσβεσης

$$k(\lambda) = \pi \int Q_{ext}(\lambda, r) r^2 n(r) dr \quad (8)$$

Όπου

$\rho$  : η πυκνότητα του νερού

$\lambda$  : το μήκος κύματος της επιθυμητής ακτινοβολίας

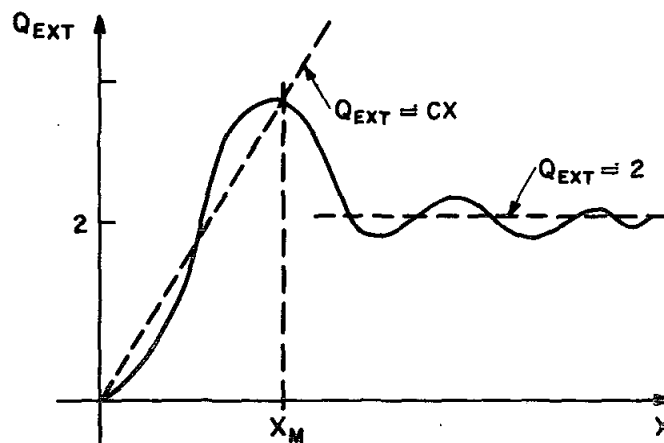
$\sigma_{ext}$  : η απόσβεση ενός σφαιρικού σταγονιδίου

$$Q_{ext} = \frac{\sigma_{ext}}{\pi r^2} \quad (9)$$

Καταλήγουμε λοιπόν στην εξής σχέση ανάμεσα σε  $k$  και  $W$ :

$$W = \frac{4\rho}{3} \frac{\int r^3 n(r) dr}{\int Q_{ext}(\lambda, r) r^2 n(r) dr} k(\lambda) \quad (10)$$

Ορίζοντας την παράμετρο  $x = \frac{2\pi r}{\lambda}$  μπορούμε να δούμε τη σχέση μεταξύ  $Q_{ext}$  και  $x$  στο σχήμα 14.



Σχήμα 14-  $Q_{ext}$  συναρτήσει του  $X$  [6]

Παρατηρούμε ότι για σχετικά μεγάλες τιμές της παραμέτρου  $x$ , η κανονικοποιημένη απόσβεση σταγονιδίου προσεγγίζει ασυμπτωτικά την τιμή 2.

Εάν θεωρήσουμε  $Q_{ext}=2$  τότε η σχέση (10) γίνεται :

$$W = \frac{2\rho k r_{eff}}{3} \quad (11)$$

$$, \text{ όπου } r_{eff} = \frac{\int r^3 n(r) dr}{\int r^2 n(r) dr} \text{ ορίζουμε την αποτελεσματική ακτίνα}$$

Παρολαυτά δεν επιλύεται και πάλι το θέμα της συσχέτισης συναρτήσεων της χωρικής κατανομής σταγονιδίων, ώστε να έχουμε μια μονοσήμαντη και σαφή σχέση ανάμεσα στο συντελεστή απόσβεσης και στην υγρή πυκνότητα νερού.

Αυτή η σχέση θα μπορούσε μονοσήμαντη να απλοποιηθεί στη περίπτωση μιας μονοδιασπορικής χωρικής κατανομής σταγονιδίων με μέγεθος  $r_0$ , οπότε και η  $r_{eff} = r_0$ . Καταλήγουμε έτσι στη πρόταση του Trabert(1901)[6].

Θα προσπαθήσουμε να εξάγουμε τώρα μια σχέση ανάμεσα στα  $k$  και  $W$  χωρίς αυτή να εξαρτάται από τη χωρική κατανομή των σταγονιδίων.

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 14 υπάρχει μια τιμή της παραμέτρου  $x$ ,  $x_M$ . Για τιμές της παραμέτρου  $x$  που είναι μικρότερες από αυτήν η  $Q_{ext}$  προσεγγίζεται από τη γραμμική σχέση  $Q_{ext} = cx$ . Αυτή η προσέγγιση κάποιες φορές υπερεκτίμα τις πραγματικές τιμές και κάποιες τις υποεκτιμά. Ωστόσο στη σχέση (8) που μετασχηματίζεται ως εξής:

$$k = \left(\frac{2\pi c}{\lambda}\right) \int r^3 n(r) dr \quad (12)$$

αυτές οι διαφορές αλληλοαναιρούνται και η σχέση (11) γίνεται :

$$W = \frac{2\rho\lambda k}{3\pi c} \quad (13)$$

Όπου  $c$  η κλίση της εξίσωσης  $Q_{ext} = cx$ .

Χρησιμοποιώντας πινάκες με δείκτες διάθλασης του νερού, για κάθε δεδομένο μήκος κύματος  $\lambda$ , προσδιορίζουμε τη μέγιστη τιμή  $x_M$ , για τιμές κάτω από την οποία μπορούμε να θεωρήσουμε τη γραμμική προσέγγιση  $Q_{ext} = cx$ . Χρησιμοποιώντας τη σχέση :

$$r_m = \frac{\lambda x_M}{2\pi} \quad (14)$$

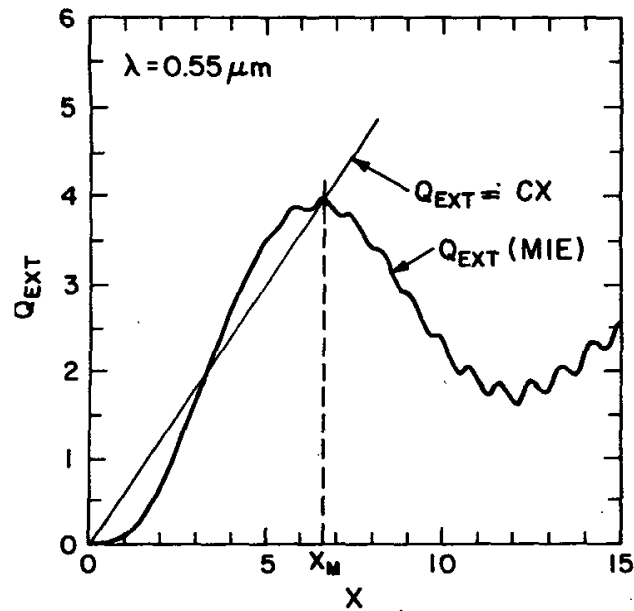
προσδιορίζουμε τη μέγιστη ακτίνα των σταγονιδίων για την οποία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη γραμμική προσέγγιση.

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι τιμές  $x_M$ ,  $r_m$  και η κλίση  $c$  για διάφορες τιμές μήκους κύματος μετάδοσης.

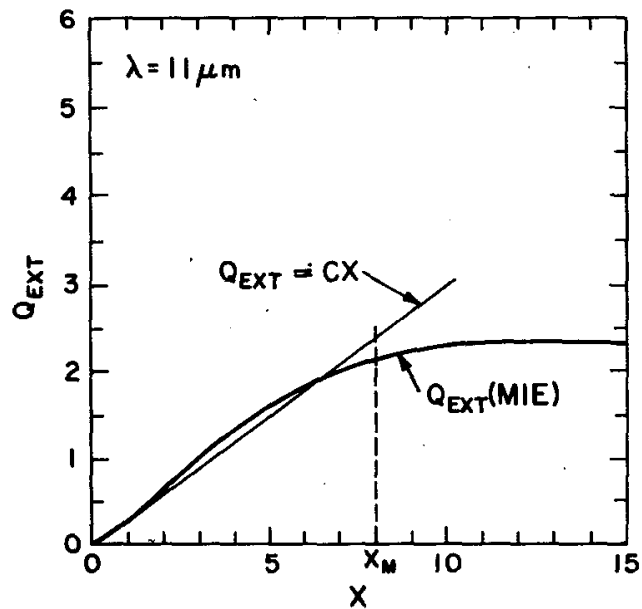
$\lambda(\mu m)$	$x_M$	$r_m (\mu m)$	$c$
0.5	6.5	0.5	0.61
1.2	6.5	1.2	0.61
3.8	6.0	3.6	0.68
5.3	6.7	5.6	0.58
10	8	12	0.35
11	8	14	0.30
12	8	15	0.35

**Πίνακας 2-**  $x_M$ ,  $r_m$ ,  $c$  συναρτήσει μήκους κύματος μετάδοσης [6]

Στα σχήματα 15 και 16 βλέπουμε την  $Q_{ext}$  για  $\lambda=0.55\mu\text{m}$  και  $\lambda=11\mu\text{m}$  αντίστοιχα. Βλέπουμε επίσης την  $x_M$ , μέχρι την οποία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη γραμμική προσέγγιση.



Σχήμα 15-  $Q_{ext}$  συναρτήσει του  $X$  για  $\lambda=0.55\mu\text{m}$ [6]

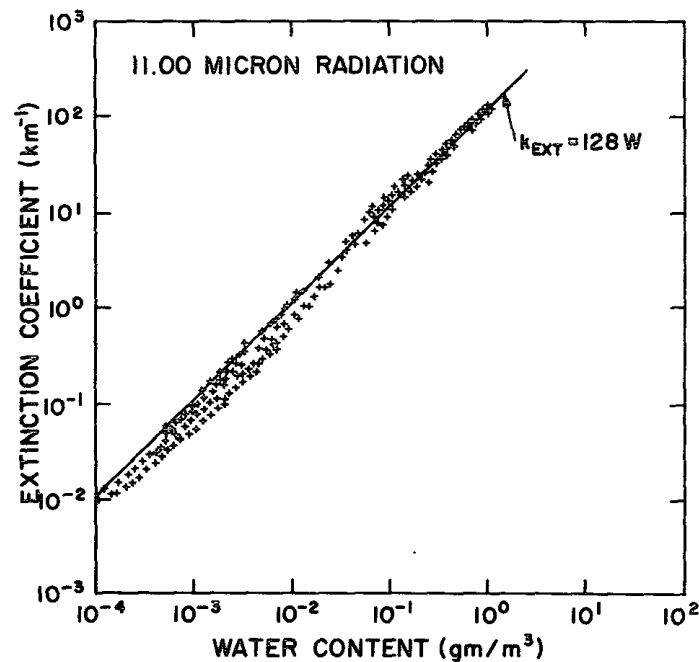


Σχήμα 16-  $Q_{ext}$  συναρτήσει του  $X$  για  $\lambda=11\mu\text{m}$  [6]

Ας δούμε τώρα λίγο πιο αναλυτικά τη περίπτωση μήκους κύματος  $\lambda=11\mu\text{m}$ . Η μεγίστη ακτίνα των σταγονιδίων για να ισχύει η προσέγγιση είναι  $r_m=14\mu\text{m}$ . Εδώ να σημειώσουμε ότι δεν είναι τόσο σημαντικό να μην ξεπερνά τα  $14\mu\text{m}$  αλλά αυτές οι λίγες σταγόνες που τα προσπερνάμε να μην συμβάλλουν υπερβολικά στη είτε στο  $k$  είτε στο  $W$ . Αντικαθιστώντας τις τιμές για  $\lambda=11\mu\text{m}$  στην εξίσωση (14) καταλήγουμε:

$$k = 128W \quad (15)$$

Παίρνουμε πειραματικά δεδομένα για 300 κατανομές σύννεφων όπως μετρήθηκαν από Pinnick(1978) και Platt(1976)[6] και υπολογίζοντας με τη Mie theory το συντελεστή απόσβεσης  $k$  τα εμφανίζουμε στο σχήμα 17 για να το συγκρίνουμε με τη σχέση 15. Όλα τα σημεία είναι πολύ κοντά στην ευθεία που έχουμε χαράξει και έτσι επιβεβαιώνουμε τη συμφωνία της Mie theory με την προτεινόμενη προσέγγιση.



Σχήμα 17-Ο συντελεστής απόσβεσης  $k$ [6]

Σε αυτό το σημείο αξίζει να παρατηρήσουμε την σχεδόν ταύτιση της  $k = 128W$  με τα αποτελέσματα της Mie theory για  $W > 0.1 \text{ gm/m}^3$ . Για τόσο μεγάλες τιμές του LWC η κατανομή μεγέθους περιλαμβάνει όλα σταγονίδια με μέγεθος έως και  $x_M$  με αποτελεσματική η υπερεκτίμηση και η υποεκτίμηση του  $Q_{ext}$  όπως φαίνονται στο Σχήμα 14 να αλληλοαναιρούνται.



Στον αντίποδα. Για μικρές τιμές του LWC περιέχονται μόνο σταγονίδια με μικρή ακτίνα και  $x \ll x_M$ . Η υποεκτίμηση του  $Q_{ext}$  για μικρές τιμές του  $x$ , δεν αναιρείται και γι αυτό παρατηρείται η μικρή αυτή απόκλιση.

#### 4.2.4. Εμπειρική Προσέγγιση

Έχει προταθεί στο παρελθόν, Eldridge(1966), μια εμπειρική σχέση της μορφής[6]:

$$k = aW^b \quad (16)$$

με  $150 \leq a \leq 230$  και  $0.65 \leq b \leq 1$  για συχνότητες του ορατού φωτός και διάφορες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Οι ακριβείς τιμές των δύο αυτών παραμέτρων προσδιορίζονται από πειραματικές μετρήσεις της απόσβεσης και της υγρής περιεκτικότητας νερού.

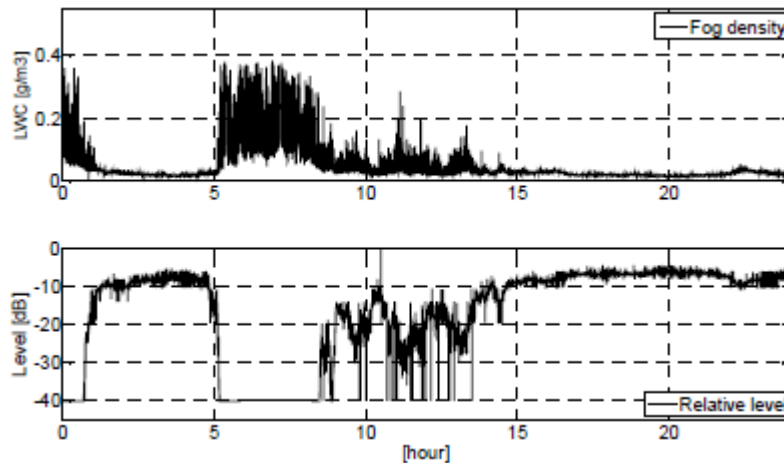
Ένα τέτοιο πείραμα έγινε στο Πανεπιστήμιο Τεχνολογίας και Οικονομικών της Βουδαπέστης, όπου λειτουργεί μια οπτική ζεύξης με τα εξής χαρακτηριστικά τοποθετημένη σε αστική περιοχή σε ύψος 45 μέτρων[7]:

Wavelength	785nm
Power	35mW
Range	650-1500m
Path Length	930m
Transmission speed	100Mbps
Sampling Rate	1/sec

**Πίνακας 3-Χαρακτηριστικά πειραματικής ζεύξης [7]**

Υπάρχει επίσης μια συσκευή η οποία μετρά την πυκνότητα ομίχλης και μέσω συστάσεων της ITU-R προσδιορίζουμε το LOC. Μελετήθηκαν αρκετά φαινόμενα ομίχλης και ένα από αυτά παρουσιάζεται παρακάτω.

Βλέπουμε λοιπόν στο Σχήμα 18 τις τιμές του LWC και της εξασθένισης του οπτικού σήματος στο διάστημα του εικοσιτετράωρου της 23/12/2010[7].



Σχήμα 18-Τιμές του LWC στο διάστημα ενός εικοσιτετραώρου [7]

Να σημειώσουμε ότι ο εξοπλισμός μπορεί να μετρήσει εξασθένιση μέχρι 40db γι' αυτό σε κάποια διαστήματα δεν έχουμε ακριβείς τιμές της εξασθένισης.

Από αυτές τις μετρήσεις και τις συγκρίσεις ανάμεσα στην απόσβεση του οπτικού σήματος και της υγρής περιεκτικότητας νερού βρέθηκε η έκφραση[7]:

$$\gamma_{785nm} = 238 \cdot LWC^{0.86} (dB / km) \quad (17)$$

Η οποία δίνει την ειδική απόσβεση ενός οπτικού σήματος στα 785nm.

Η απόσταση  $L$  που διανύει το οπτικό σήμα μέσα στο σύννεφο δίνεται από τη σχέση:

$$L = \frac{\Delta H}{\sin \varphi} \quad (18)$$

Όπου  $\Delta H$  το κάθετο μήκος του σύννεφου όπως δίνεται από τον Πίνακα 1 και  $\varphi$  η γωνία ανύψωσης.

Η συνολική λοιπόν απόσβεση  $A(db)$  δίνεται από:

$$A = \int_0^L \gamma_{785nm} dx = \int_0^L 238 \cdot LWC^{0.86} dx \quad (19)$$

Εάν μετασχηματίσουμε τη σχέση 19 ώστε να εμφανίσουμε τον όρο ILWC που παίρνουμε από τις χρονοσειρές καταλήγουμε στη σχέση:

$$A = z1 \cdot ILWC^{z2} \cdot \Delta H^{1-z2} \cdot \sin \varphi^{-1} \quad (20)$$

Όπου

$$z_1=238$$

$$z_2=0.86$$

$\varphi$  : η γωνία ανύψωσης

#### 4.2.5. Προσομοίωση

Παρακάτω φαίνονται οι χαρακτηριστικές τιμές των τριών παραμέτρων της λογαριθμοκανονικής κατανομής υγρού περιεχομένου νερού συννέφων από τη σύσταση ITU-R P.840[8] για την προσομοίωση που εκτελέσαμε με γωνία ανύψωσης  $43.21^\circ$ . Θεωρούμε κάθετο μήκος της ζεύξης που παρουσιάζονται σύννεφα  $\Delta H=2\text{km}$ .

Η προσομοίωση γίνεται σε συντεταγμένες  $(45.75^\circ, 4.66^\circ)$  στη περιοχή Λυών, Γαλλία:

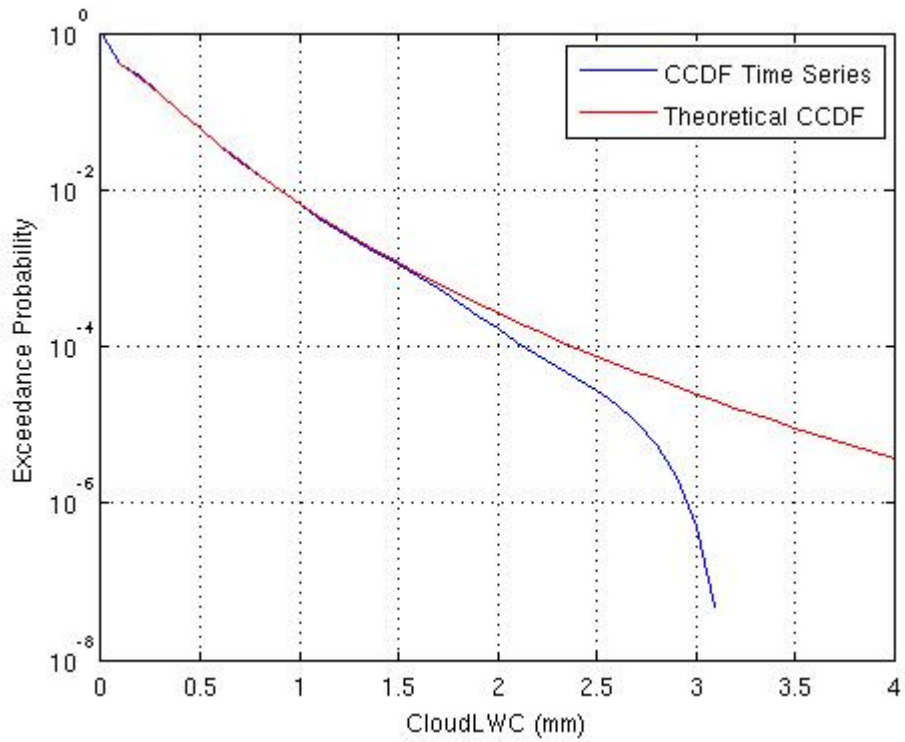
$$m=-1.4$$

$$\sigma=0.64$$

$$P_{clw}=0.43$$

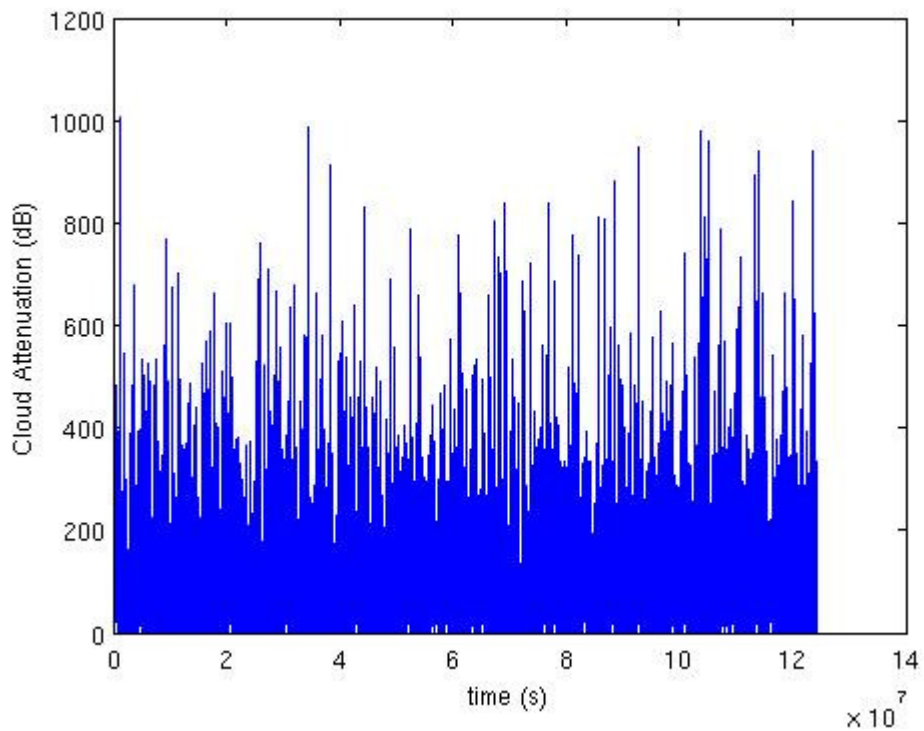
Όπου  $P_{clw}$  η πιθανότητα ύπαρξης συννέφων.

Στο Σχήμα 19 φαίνεται η συμπληρωματική αθροιστική συνάρτηση του LWC, όπως βρίσκεται από τη λογαριθμοκανονική κατανομή από τη σύσταση ITU-R P.840[8] σε σύγκριση με αυτή που προέρχεται από τη χρονοσειρά  $L(kT_s)$ .



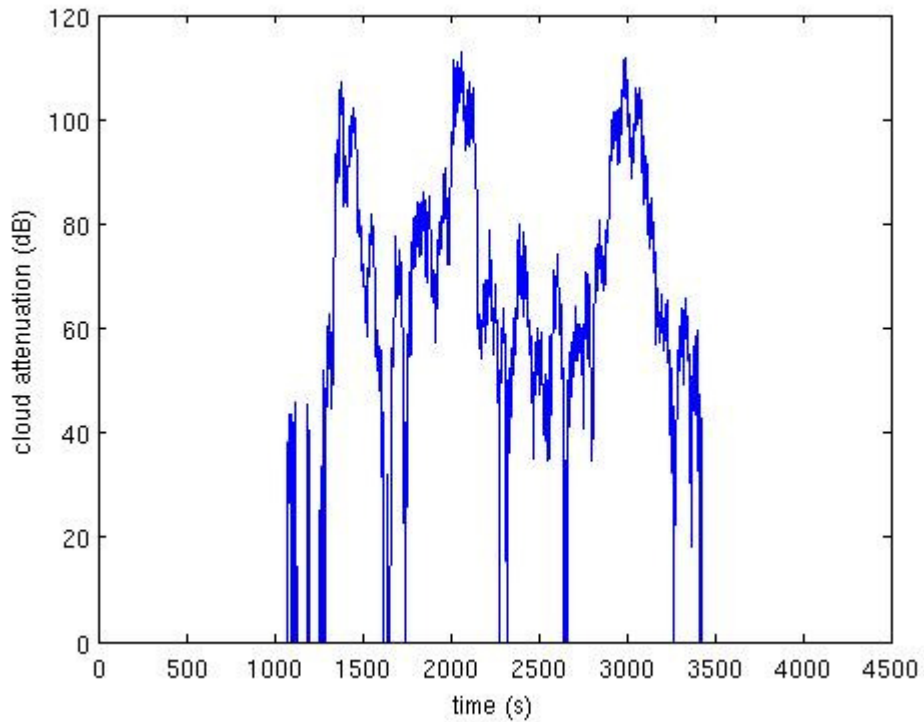
**Σχήμα 19-Αθροιστική συμπληρωματική πιθανότητα του CLWC**

Στο Σχήμα 20 φαίνεται η χρονοσειρά απόσβεσης λόγω συννέφων.



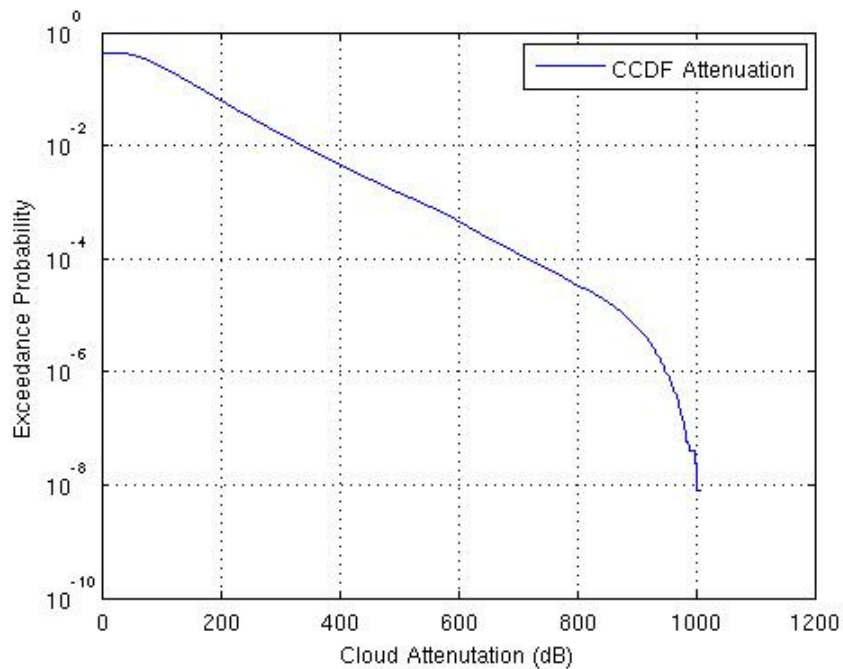
**Σχήμα 20-Χρονοσειρά απόσβεσης**

Στο Σχήμα 21 βλέπουμε την απόσβεση που εισάγει ένα συμβάν συννεφιάς.



**Σχήμα 21-Απόσβεση που εισάγει ένα συμβάν συννεφιάς(cloud event)**

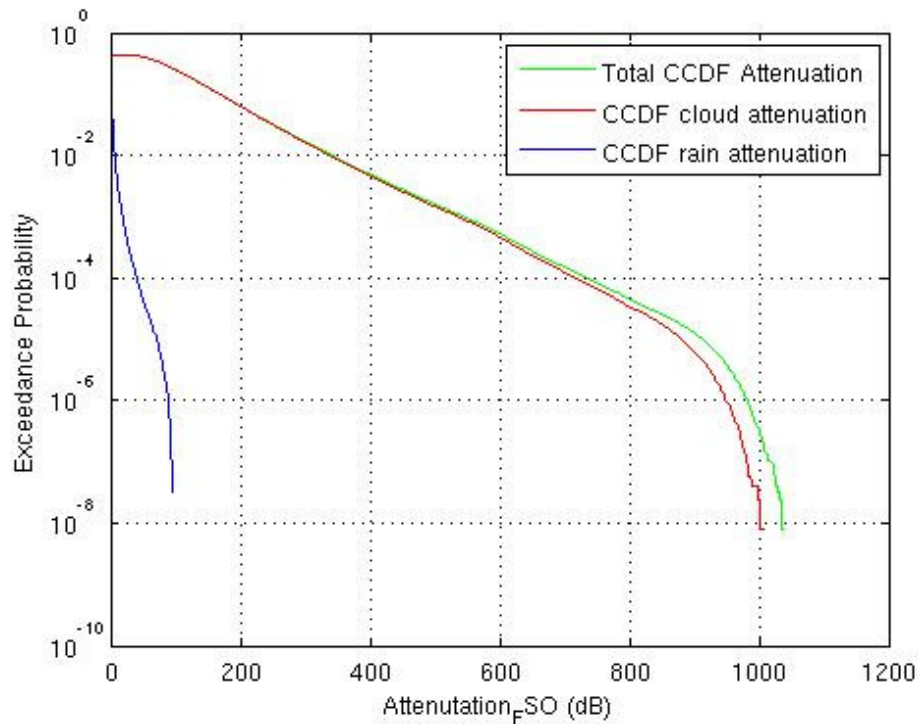
Στο Σχήμα 22 παρουσιάζεται η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της απόσβεσης λόγω συννέφων.



**Σχήμα 22- Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της απόσβεσης**

### 4.3. Συνολική απόσβεση

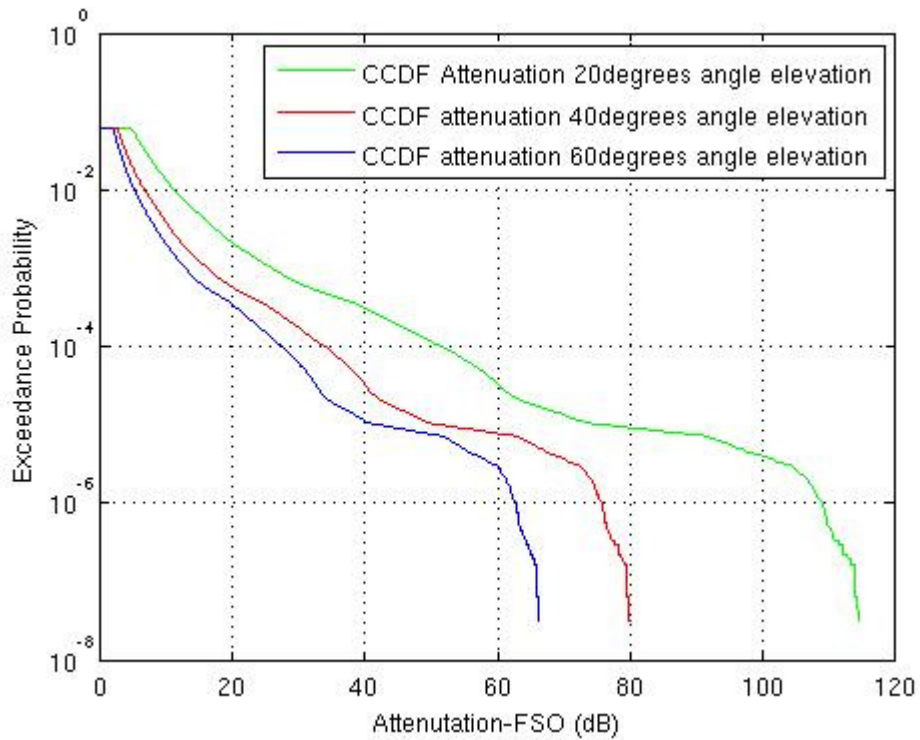
Για να υπολογίσουμε τη συνολική απόσβεση σε μια οπτική ζεύξη προσθέτουμε τις χρονοσειρές απόσβεσης της βροχής και των συννέφων. Στο Σχήμα 23 βλέπουμε την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας για τη συνολική απόσβεση στη ζεύξη.



**Σχήμα 23- Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας για τη συνολική απόσβεση στη ζεύξη**

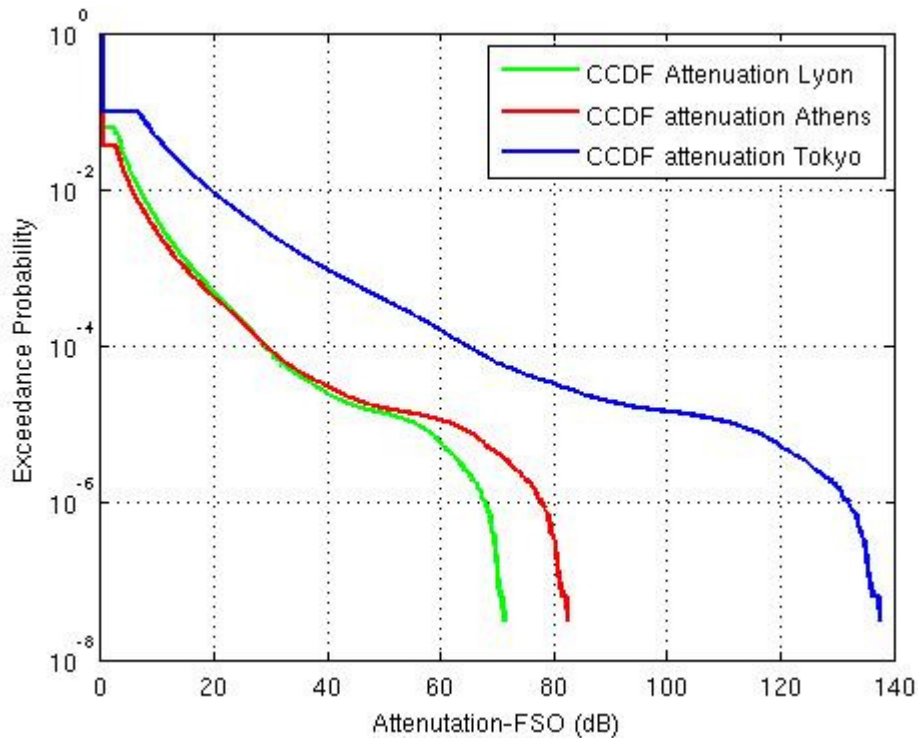
### 4.4. Συγκριτικά αποτελέσματα για απόσβεση βροχής

Στο Σχήμα 24 βλέπουμε την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας, αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την περιοχή της Λυών, Γαλλία. Δοκιμάζουμε διαφορετικές γωνίες ανύψωσης 20°, 40°, και 60°.



**Σχήμα 24- Προσομοίωση απόσβεσης βροχής για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης**

Στο Σχήμα 25 βλέπουμε την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας, αποτέλεσμα της προσομοίωσης για γωνία ανύψωσης 40°, σε 2 περιοχές μεσογειακού κλίματος (Λυών-Γαλλία και Αθήνα-Ελλάδα) και στο Τόκυο, Ιαπωνία. Είναι ξεκάθαρο το πόσο περισσότερο αποσβένει το οπτικό σήμα στο Τόκυο απότι στην Αθήνα ή στη Γαλλία. Ενώ οι 2 μεσογειακές πόλεις για πιθανότητα μεγαλύτερη του 10<sup>-5</sup> δεν εμφανίζουν διαφορά ως προς την απόσβεση, από αυτή τη πιθανότητα και κάτω στην Αθήνα το σήμα αποσβένει περισσότερο.

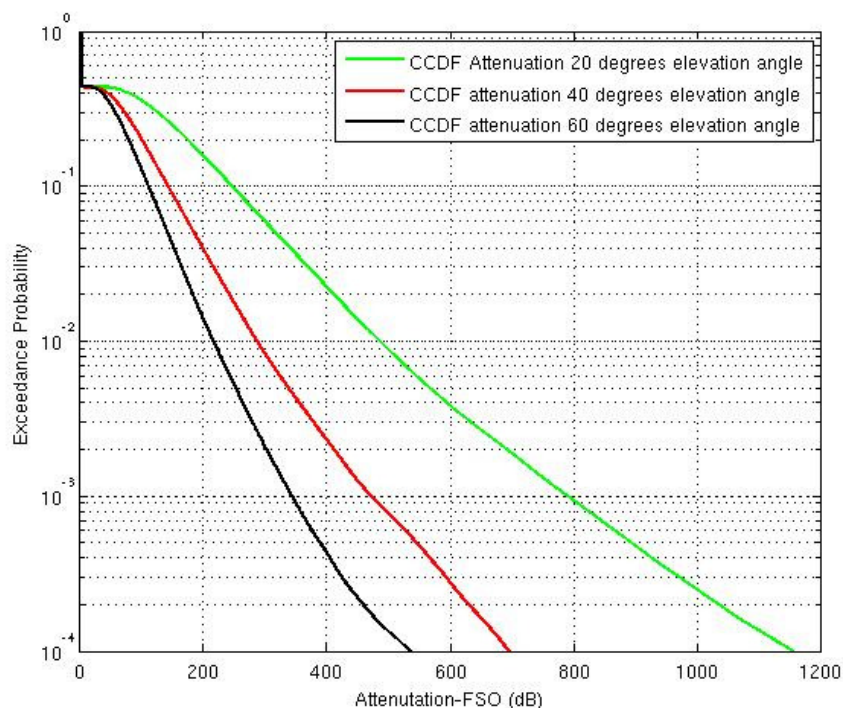


**Σχήμα 25- Προσομοίωση απόσβεσης βροχής για διαφορετικές τοποθεσίες**

#### 4.5. Συγκριτικά αποτελέσματα για απόσβεση συννέφων

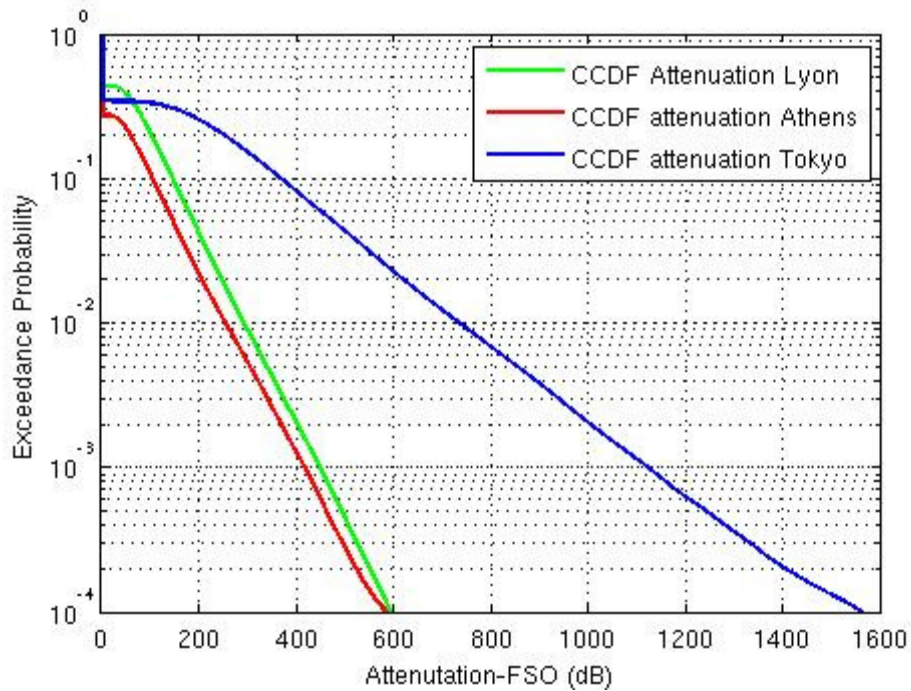
Στο Σχήμα 26 βλέπουμε την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας, αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την περιοχή της Λυών. Δοκιμάζουμε διαφορετικές γωνίες ανύψωσης  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ , και  $60^\circ$ . Θεωρούμε παρουσία συννέφου Stratus. Παρατηρούμε ότι για μικρότερη γωνία ανύψωσης η απόσβεση μεγαλώνει και αυτό οφείλεται στο ότι μεγαλώνει το μήκος της ζεύξης το οποίο βρίσκεται μέσα στα σύννεφα. Ενώ όσο πλησιάζουμε σε  $90^\circ$  ανύψωση το μήκος αυτό μειώνεται στο κάθετο και άρα η απόσβεση είναι μικρότερη. Για πιθανότητα  $10^{-2}$  η απόσβεση του σήματος με γωνία ανύψωσης  $60^\circ$  υπολογίζεται περίπου 200dB ενώ για πιθανότητα  $10^{-4}$  στα 500dB.





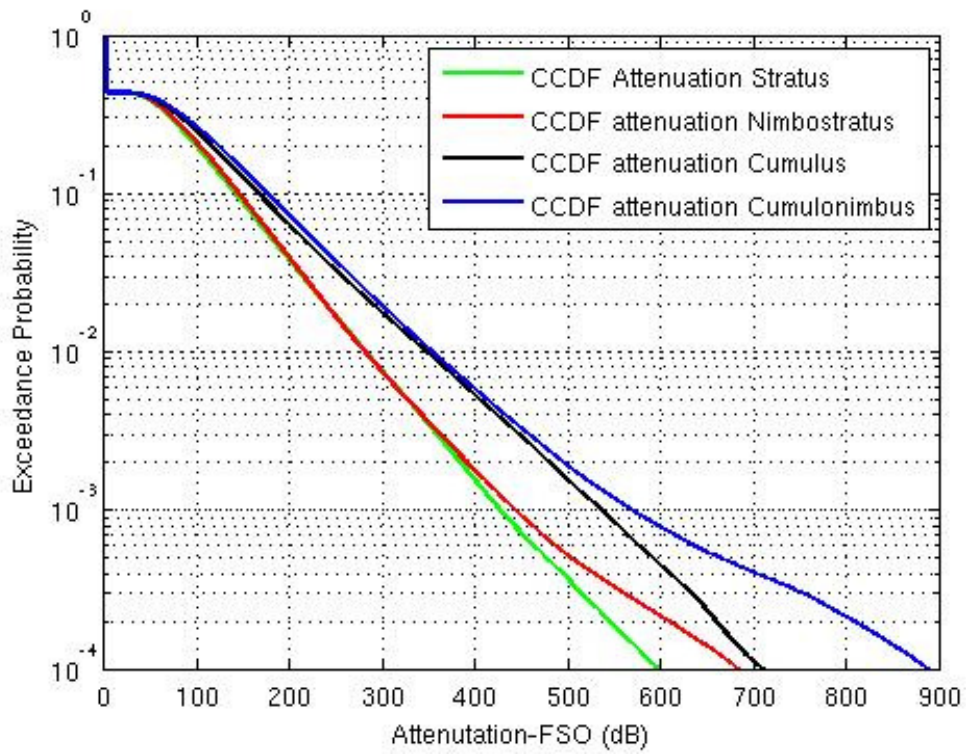
**Σχήμα 26-Προσομοίωση απόσβεσης σύννεφων για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης**

Στο Σχήμα 27 βλέπουμε την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας, αποτέλεσμα της προσομοίωσης για γωνία ανύψωσης 40°, παρουσία σύννεφου Stratus σε 3 διαφορετικές περιοχές (Λυών-Γαλλία, Αθήνα-Ελλάδα και Τόκιο-Ιαπωνία). Παρατηρούμε ότι το οπτικό σήμα στο Τόκιο αποσβένει σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από τις άλλες δύο περιοχές. Χαρακτηριστικά για πιθανότητα 10<sup>-2</sup> η οπτική ζεύξη στο Τόκιο παρουσιάζει απόσβεση περίπου 700dB, ενώ οι ζεύξεις στη Λυών και η Αθήνα για την ίδια πιθανότητα, παρουσιάζουν απόσβεση 300dB. Αυτό οφείλεται στη διαφορά κλιματικής ζώνης των χωρών αυτών.



**Σχήμα 27- Προσομοίωση απόσβεσης σύννεφων για διαφορετικές τοποθεσίες**

Στο Σχήμα 28 μπορούμε να δούμε την απόσβεση για δορυφορική ζεύξη με γωνία ανύψωσης  $40^\circ$ , στην περιοχή της Λυών, Γαλλία για τα 4 διαφορετικά είδη συννέφων. Βλέπουμε ότι για σύννεφα χαμηλού και μεσαίου επιπέδου (Stratus, Nimbostratus), παρουσιάζεται μικρότερη απόσβεση, γεγονός το οποίο δικαιολογείται και από το μικρό κάθετο μήκος των σύννεφων αυτών. Για την ίδια πιθανότητα υπέρβασης, η διαφορά στην απόσβεση ανάμεσα στα χαμηλού επιπέδου σύννεφα και στα υψηλού επιπέδου υπολογίζεται στα 100dB, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 28.



**Σχήμα 28- Προσομοίωση απόσβεσης σύννεφων για διαφορετικά είδη σύννεφων**

## Βιβλιογραφία

[1]Nadeem, Kvicera, Awan, Leitgeb, Muhammad, Kandus “Weather Effects on Hybrid FSO/RF Communication Link” IEEE Journal On Selected Areas In Communications, vol.27, no.9, pp. 1687-1697, December 2009

[2] Fiser, Brazda, Chladova, Pesice, Svoboda, Schejbal “MODELS OF FSO LINK ATTENUATION DUE TO FOG, RAIN AND WIND DERIVED FROM MEASUREMENT” September 2011

[3] ITU-R Recommendation P.837-6, “Characteristics of precipitation for propagation modelling”, February 2012

[4]Carlo Capsoni, Lorenzo Luini, Roberto Nebuloni “Prediction of Cloud Attenuation on Earth-space Optical Links”

[5] ITU-R Recommendation P.1853-1, “Tropospheric attenuation time series synthesis”, February 2012

[6]Chylek “Extinction and Liquid Water Content of Fogs and Clouds” Journal of the Atmospheric Sciences, vol.35 , pp. 296-300, October 1977

[7]Laszlo Csurgai-Horvath, Janos Bito, Petr Pesice, Ondrej Fiser “The Impact of Liquid Water Content on Free Space Optical Propagation”

[8] ITU-R Recommendation P.840-5, “Attenuation due to clouds and fog”,February 2012

[9]Pinnick, Jennings, Chylek, Ham “BACKSCATTER AND EXTINCTION IN WATER CLOUDS” October 1981

[10] T. Maseng, P. Bakken “A Stochastic Dynamic Model of Rain Attenuation” IEEE Transactions on Communications , vol.29, no.5, pp. 660-669, May 1981

# Κεφάλαιο 5

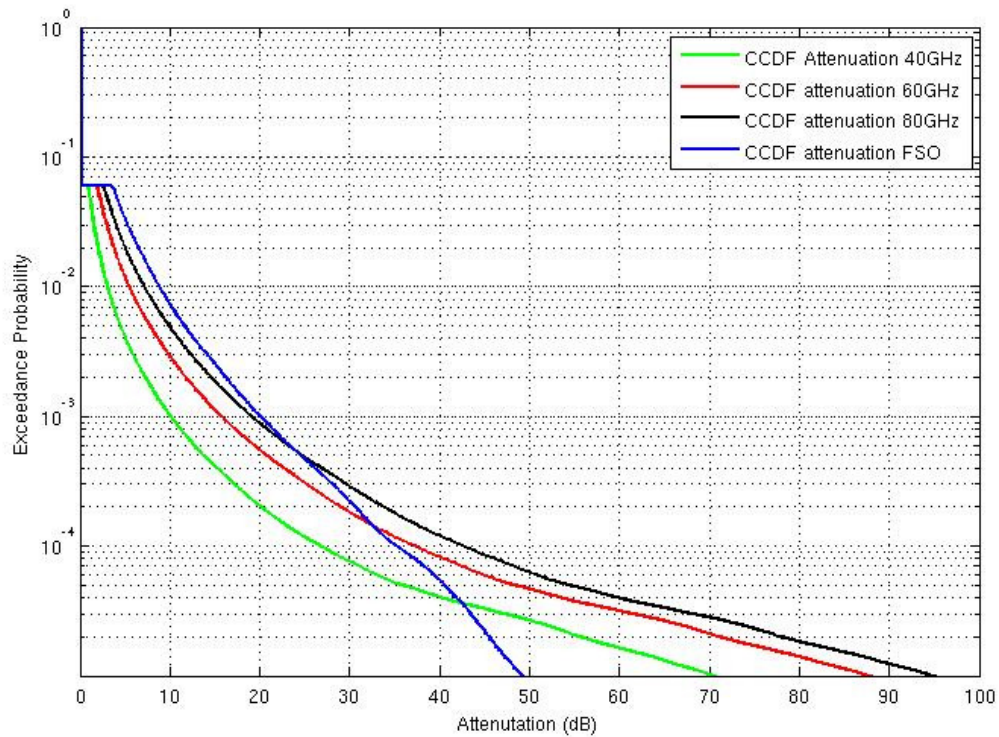
## Σύγκριση οπτικών με χιλιοστομετρικών ασυρμάτων ζεύξεων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα συγκρίνουμε την χιλιοστομετρική και την οπτική δορυφορική ζεύξη και θα δούμε πως αποσβένει το κάθε σήμα παρουσία βροχής και συννέφων.

### 5.1. Απόσβεση μεμονωμένα βροχής-συννέφων

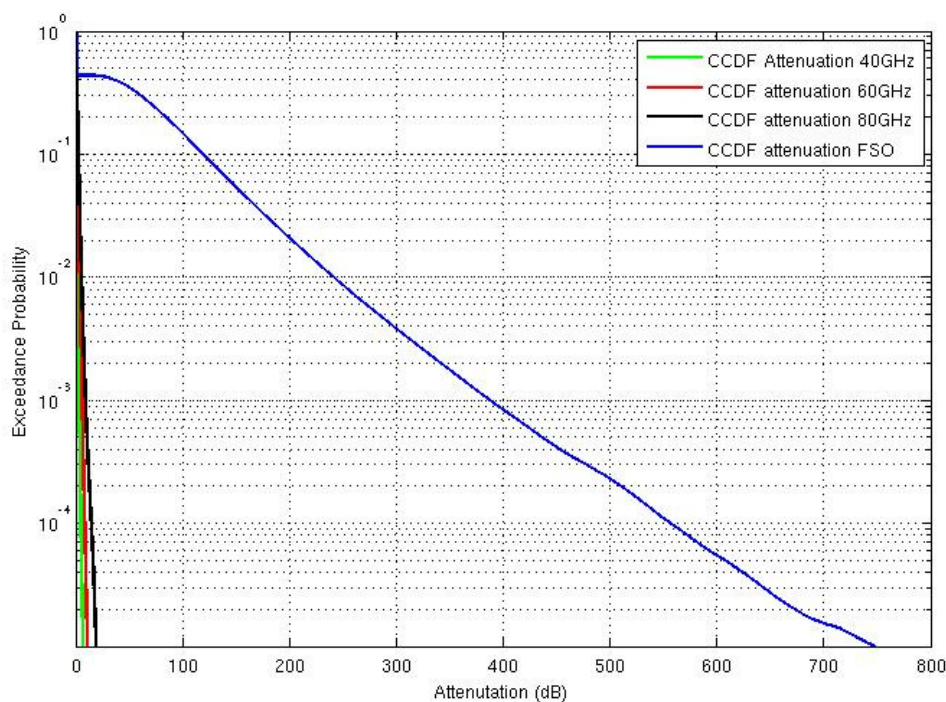
Ας προσομοιώσουμε ένα τέτοιο πείραμα στην περιοχή Λυών, Γαλλία και με γωνία ανύψωσης  $43^\circ$ . Θα προσομοιώσουμε τρεις χιλιοστομετρικές ραδιοζεύξεις στα 40, 60 και 80 GHz και θα συγκρίνουμε την απόσβεσή τους με την απόσβεση οπτικής ζεύξης. Το πείραμα εκτελείται σε βάθος τεσσάρων ετών. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα Σχήματα 1 και 2.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η απόσβεση μόνο από φαινόμενα βροχής. Μπορούμε να δούμε ότι για πιθανότητα μέχρι  $10^{-3}$  η απόσβεση του οπτικού σήματος είναι παρόμοια με αυτό στα 80 GHz. Επίσης για πιθανότητα μικρότερη από  $10^{-4}$  φαίνεται καθαρά η υπεροχή του οπτικού σήματος το οποίο αποσβένει λιγότερο σε σχέση με τα ραδιοκύματα. Σε περιβάλλον βροχόπτωσης θα χρησιμοποιήσουμε FSO τεχνολογία μετάδοσης.



**Σχήμα 1-CCDF απόσβεσης βροχής**

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η απόσβεση παρουσία Stratus σύννεφου με  $\Delta H=0.5\text{km}$  τόσο για οπτική όσο και για χιλιοστομετρικές ραδιοζεύξεις. Είναι φανερό ότι σε συνθήκες συννεφιάς το οπτικό σήμα εξασθενεί υπερβολικά και άρα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μόνο κύματα σε χιλιοστομετρικές ραδιοσυχνότητες.

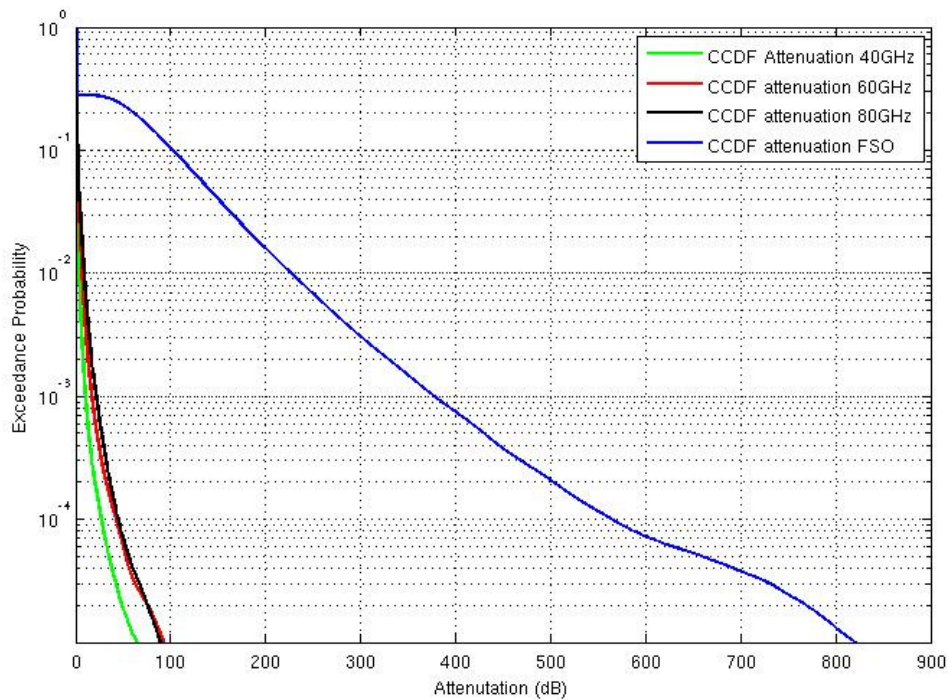


Σχήμα 2- CCDF απόσβεσης συννέφων

## 5.2. Συνολική απόσβεση βροχής και συννέφων

Ας προσομοιώσουμε ένα πείραμα στην περιοχή Μασσαλία, Γαλλία και με γωνία ανύψωσης  $60^\circ$ . Θα προσομοιώσουμε τρεις χιλιοστομετρικές ραδιοζεύξεις στα 40, 60 και 80 GHz και θα συγκρίνουμε την απόσβεσή τους με την απόσβεση οπτικής ζεύξης όταν και τα δύο σήματα περνάν μέσα από βροχή και από σύννεφα. Υποθέτουμε παρουσία Stratus με κάθετο μήκος 600m. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης φαίνεται στο Σχήμα 3. Παρατηρούμε ότι για χιλιοστομετρικές ραδιοζεύξεις όσο μεγαλώνει η συχνότητα τόσο αυξάνει και η απόσβεση του σήματος, με πιθανότητα μικρότερη από  $10^{-4}$  η απόσβεση να ξεπερνάει τα 50dB. Παρατηρούμε επίσης ότι το οπτικό σήμα αποσβένει πολύ από μεγάλες κιάλας πιθανότητες, καθιστώντας ασύμφορη τη λειτουργία της οπτικής ζεύξης παρουσία συννέφων με κάθετο μήκος πάνω από 600 μέτρα.

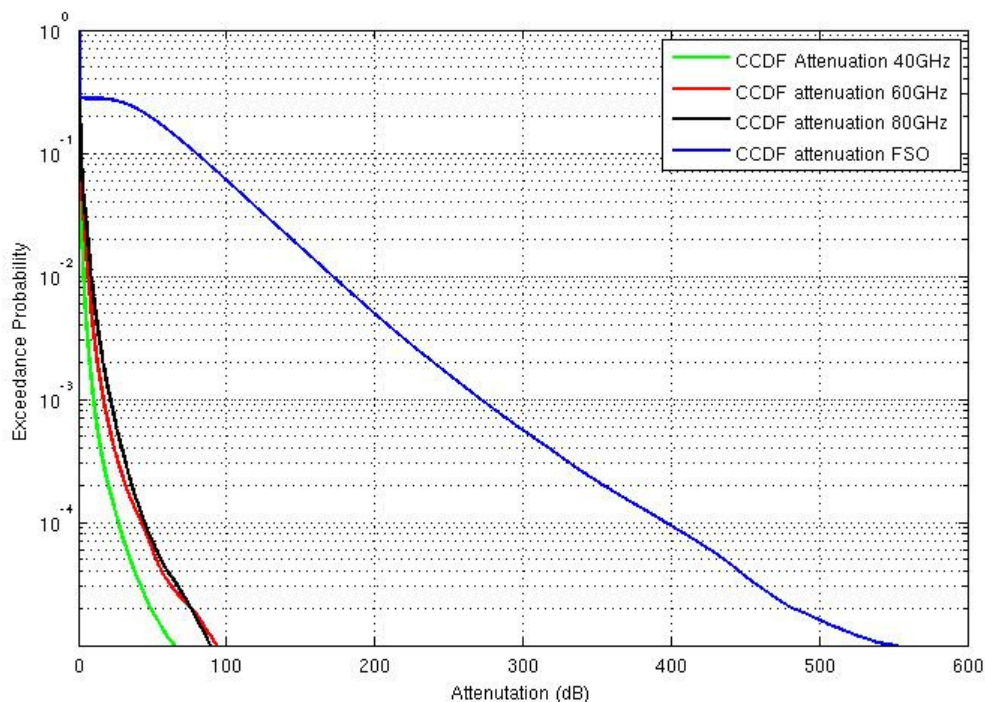




**Σχήμα 3-CCDF απόσβεσης , ΔΗ=600m**

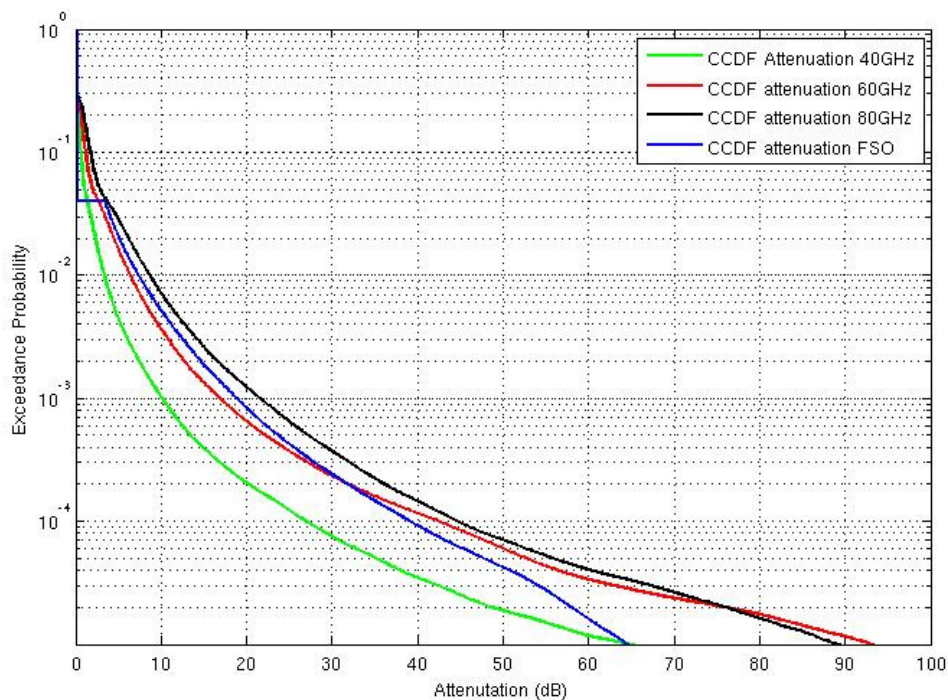
Στο Σχήμα 4 βλέπουμε το ίδιο πείραμα με το Σχήμα 1 αλλά τώρα έχουμε παρουσία Stratus σύννεφου με κάθετο μήκος 100m. Αν συγκρίνουμε το Σχήμα 3 με το Σχήμα 4 θα δούμε ότι στην Σχήμα 3 για την ίδια πιθανότητα υπέρβασης αντιστοιχεί λίγο μικρότερη απόσβεση. Πράγμα που ήταν αναμενόμενο αφού το κάθετο μήκος του σύννεφου στο Σχήμα 4 είναι μικρότερο από αυτό του Σχήματος 3.





**Σχήμα 4- CCDF απόσβεσης , ΔH=100m**

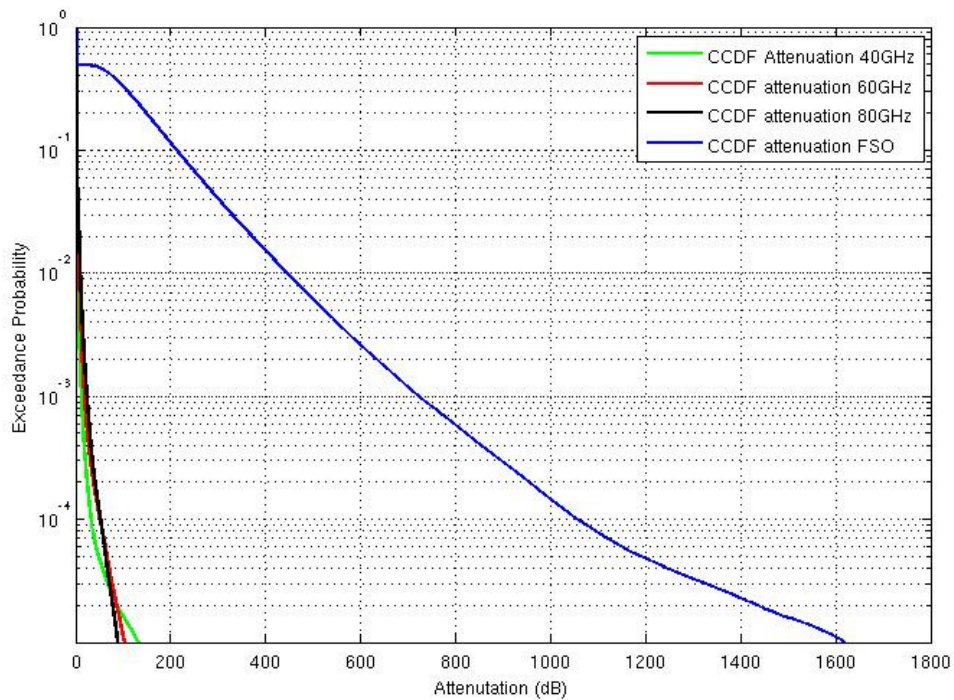
Στο Σχήμα 5 προσομοιώνουμε δορυφορικές ζεύξεις στην ίδια περιοχή με την ίδια γωνία ανύψωσης αλλά με σχεδόν μηδενική παρουσία συννέφων. Παρατηρούμε ότι στη ζεύξη των 40GHz εισάγεται η λιγότερη απόσβεση. Για τις άλλες τρεις ζεύξεις μέχρι τη πιθανότητα  $10^{-4}$  εισάγεται η ίδια σχεδόν απόσβεση. Από αυτή τη πιθανότητα και κάτω οι ζεύξεις των 60GHz και 80GHz αποσβένουν πολύ γρήγορα σε σχέση με την οπτική, πράγμα που καθιστά την οπτική ζεύξη χρησιμοποιήσιμη καθώς για πιθανότητα  $10^{-5}$  η εξασθένισή της είναι 65dB. Χωρίς παρουσία συννέφων γίνεται σαφές ότι το οπτικό σήμα μπορεί να λειτουργήσει καλύτερα από τη ζεύξη των 60GHz, και αν συμπεριλάβουμε και το ρυθμό μετάδοσης γίνεται καθαρή η υπεροχή της FSO μετάδοσης.



**Σχήμα 5- CCDF απόσβεσης, χωρίς παρουσία σύννεφων**

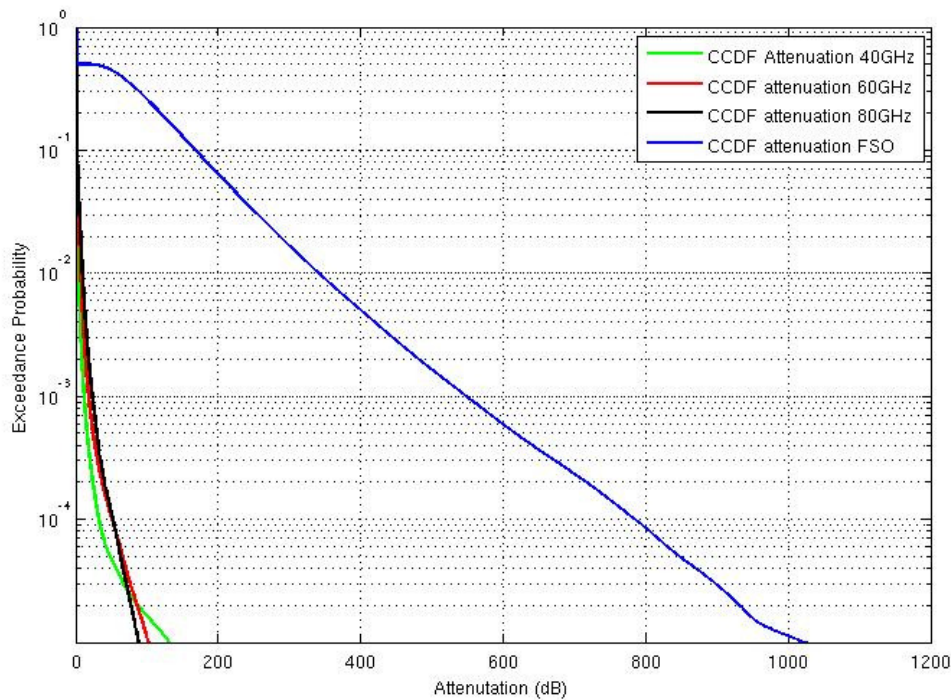
Τώρα θα εκτελέσουμε ένα πείραμα στη περιοχή Παρίσι ,Γαλλία. Η δορυφορική ζεύξη έχει γωνία ανύψωσης  $43^\circ$  και θα συγκρίνουμε μια οπτική ζεύξη με τρεις χιλιοστομετρικές στα 40, 60 και 80GHz.

Στο Σχήμα 6 θεωρούμε παρουσία κάθετα αναπτυγμένων συννέφων (cumulonimbus) με κάθετο μήκος 3km. Είναι ένα αρκετά μεγάλο σύννεφο, και έτσι μπορεί να δικαιολογηθεί η τεράστια απόσβεση που εισάγεται στην οπτική ζεύξη. Για πιθανότητα  $10^{-4}$  η απόσβεση των 1000dB καθίσταται απαγορευτική, για τη λειτουργία της οπτικής ζεύξης και καθιστά προτιμητέα τη χρήση των χιλιοστομετρικών ζεύξεων των οποίων η απόσβεση για πιθανότητα  $10^{-4}$  υπολογίζεται στα 30dB-40dB.



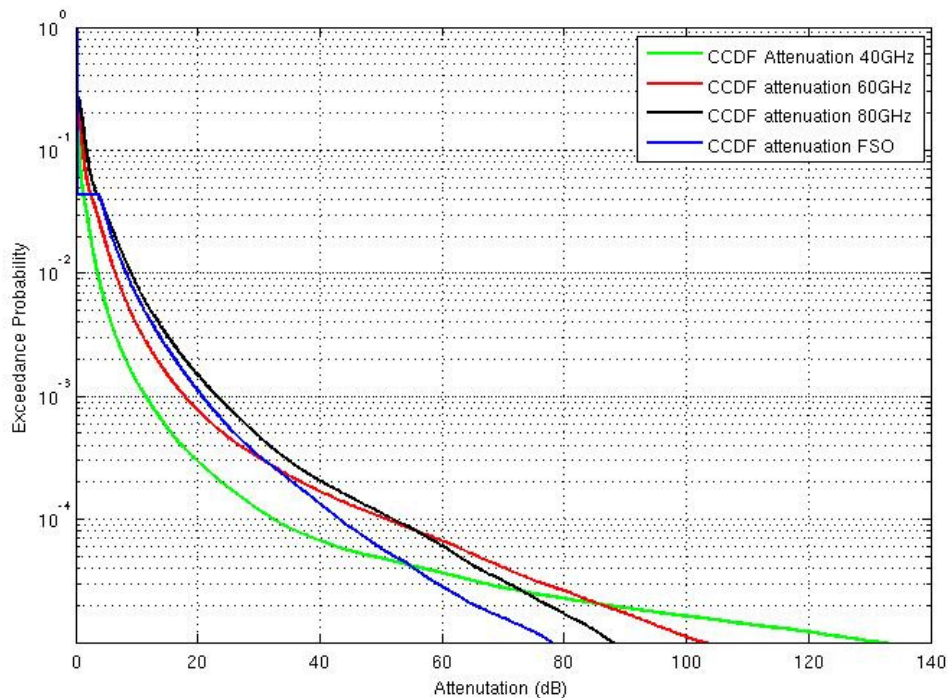
**Σχήμα 6- CCDF απόσβεσης, ΔH=3km**

Στο Σχήμα 7 βλέπουμε το αποτέλεσμα του ίδιου πειράματος αυτή τη φορά όμως παρουσία χαμηλού επιπέδου συννέφων (Stratus) , με μέγιστο κάθετο μήκος 100m. Παρατηρούμε ότι η απόσβεση του οπτικού σήματος είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με το Σχήμα 6 και την ύπαρξη cumulonimbus σύννεφων. Παρ' όλα αυτά, η απόσβεση του οπτικού σήματος είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των ραδιοκυματικών ζεύξεων και άρα δε συνίσταται η χρήση της FSO μετάδοσης ακόμα και με μικρή παρουσία συννέφων.



**Σχήμα 7- CCDF απόσβεσης, ΔH=100m**

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της ίδιας προσομοίωσης αυτή τη φορά όμως χωρίς παρουσία σύννεφων. Βλέπουμε ότι το οπτικό σήμα δεν αποσβένει τόσο όσο τα χιλιοστομετρικά ραδιοκύματα. Για πιθανότητα  $10^{-3}$  η εξασθένηση του οπτικού σήματος είναι μεγαλύτερη από αυτή των 40GHz και 60GHz, και μικρότερη από το σήμα των 80GHz, και υπολογίζεται στα 20dB. Για πιθανότητα  $10^{-4}$  η εξασθένηση του οπτικού σήματος είναι μεγαλύτερη από αυτή των 40GHz, και μικρότερη από το σήμα των 80GHz και 60GHz, και υπολογίζεται περίπου στα 40dB. Για πιθανότητα μικρότερη από  $10^{-5}$  η εξασθένηση του οπτικού σήματος είναι μικρότερη από αυτή όλων των χιλιοστομετρικών ραδιοζεύξεων. Οι παρατηρήσεις αυτές καθιστούν προτιμητέα την οπτική ζεύξη, χωρίς κιάλας να συνυπολογίσουμε το κέρδος σε ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων που ξεφεύγει από τα όρια της εργασίας αυτής.



**Σχήμα 8- CCDF απόσβεσης, χωρίς παρουσία συννέφων**

Βλέπουμε λοιπόν συνολικά ότι όταν υπάρχουν σύννεφα στην ατμόσφαιρα και το οπτικό σήμα οδεύει μέσα από αυτά, τότε αποσβένει σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από αυτόν των χιλιοστομετρικών ραδιοσημάτων. Πράγμα που κάνει ανέφικτη τη λειτουργία της οπτικής ζεύξης παρουσία συννέφων. Σε μία υβριδική RF-FSO ζεύξη όμως, όσο δεν υπάρχουν σύννεφα το οπτικό σήμα αποσβένει σε βαθμό συγκρίσιμο με τα ραδιοσήματα, και μάλιστα αποσβένει πολύ λιγότερο σε σχέση με ραδιοσήματα υψηλών συχνοτήτων τα οποία είναι αυτά που προτιμώνται κυρίως καθώς αυτά προσφέρουν ικανοποιητικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Σε περιπτώσεις που υπάρχει βροχόπτωση το οπτικό σήμα προτιμάται ανά περίπτωση, και μπορεί να διαφέρει η επιλογή ανάλογα με το ρυθμό βροχόπτωσης, από τι συνοδεύεται η βροχή και από το ρυθμό μετάδοσης που χρειαζόμαστε.

### 5.3. Προτάσεις για μελέτη

Στην εργασία αυτή ασχοληθήκαμε με τα οπτικά σήματα και τα ραδιοκύματα χιλιοστομετρικών συχνοτήτων και είδαμε πώς αυτά τα σήματα εξασθενούν όταν οδεύουν μέσα από σύννεφα και από βροχή. Χρησιμοποιήσαμε τη μέθοδο των χρονοσειρών για να προσομοιώσουμε το περιεχόμενο σε νερό κατ'όγκον σε περιβάλλον βροχής και συννέφων. Έπειτα υπολογίσαμε την απόσβεση ανά δευτερόλεπτο και έτσι καταλήξαμε στην κατανομή της απόσβεσης κατά τη διάρκεια όλης της προσομοίωσης και στην συμπληρωματική αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας την οποία χρησιμοποιήσαμε για να κάνουμε τις συγκρίσεις μας.



Μια πιο αναλυτική μελέτη θα μπορούσε να περιλαμβάνει σημειακούς ρυθμούς βροχόπτωσης και το άθροισμα της απόσβεσης που εισάγει το κάθε σημείο να προστίθεται στη συνολική απόσβεση. Αυτό θα χρειαζόταν μεγάλο πλήθος δεδομένων και ακόμα περισσότερη υπολογιστική ισχύ, στο βαθμό που θα θέλαμε να προσομοιώσουμε ένα τέτοιο πείραμα.

Ένα άλλο σημείο που θα μπορούσε να μελετηθεί περαιτέρω θα ήταν πέρα από την υγρή περιεκτικότητα σε νερό των συννέφων να μπορούσαμε να είχαμε τοπογραφικά δεδομένα για το ποια είδη συννέφων εμφανίζονται σε κάθε περιοχή, αν μαζί με αυτά τα είδη εμφανίζονται και κάποια άλλα και ποια είναι η συσχέτισή τους, ώστε λόγω χάρη με κάποιες τεχνικές διαφορικής λήψης χώρου να μπορούμε να αποφύγουμε τοπικά φαινόμενα συννεφιάς. Ακόμα θα μπορούσαμε να δούμε τη πιθανή συσχέτιση μερικών τύπων συννέφων με φαινόμενα βροχής. Ή ακόμα και από τους χάρτες βροχόπτωσης να εξαγάγουμε συμπεράσματα για το ποια είδη εμφανίζονται μαζί με τη βροχή. Βέβαια εδώ μπορεί να γίνει χρήση και μετεωρολογικών δεδομένων των οποίων η χρησιμότητα να φανεί σε συνδυασμό με τα αναλυτικά μοντέλα στη δημιουργία ενός υβριδικού μοντέλου που να μπορεί να ανταποκρίνεται σε μεγάλο βαθμό στη πραγματικότητα, τουλάχιστον για κάποια συγκεκριμένα κλίματα, λόγω χάρη μεσογειακού κλίματος.

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

Σε αυτή τη μελέτη είδαμε την απόσβεση σε φυσικό επίπεδο του σήματος. Θα μπορούσαμε να δούμε το ποσοστό του χρόνου για το οποίο κάθε σύστημα μετάδοσης μπορεί να λειτουργεί. Ή αν ερευνούσαμε το θέμα της ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων, θα μπορούσαμε να βρούμε σχήματα κωδικοποίησης ή και αλλαγή του ρυθμού μετάδοσης, ώστε ακόμα και αν σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα μετάδοσης η απόσβεση υπερβαίνει το περιθώριο διαλείψεων, να μειώνεται ο ρυθμός μετάδοσης και να συνεχίζει έτσι να παραμένει ενεργή η ζεύξη μέσω αυτού του συστήματος αυτομάτου ελέγχου.