

Περιβάλλον Διάδοσης

Η ποιότητα της δορυφορικής ζεύξης επηρεάζεται σημαντικά από το ασύρματο περιβάλλον διάδοσης και είναι ευθύνη του μηχανικού των δορυφορικών συστημάτων να προβλέψει τον βαθμό της επίδρασης επί του μεταδιδόμενου ραδιοκύματος. Καθώς το ραδιοκύμα διαπερνά τα διάφορα επίπεδα της ατμόσφαιρας, υπόκειται σε μία σειρά από μηχανισμούς εξασθένησης και μεταβολής των χαρακτηριστικών του. Ορισμένοι από αυτούς είναι τα φαινόμενα που σχετίζονται με τον δείκτη διάθλασης, όπως η πολυδιαδρομική διάδοση και η σκέδαση, καθώς και οι απώλειες που προκαλούνται από τα υδρομετέωρα (π.χ. βροχή, πάγος, σύννεφα, ομίχλη). Ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας του δορυφορικού συστήματος, το περιβάλλον διάδοσης θα προκαλέσει διαφορετική εξασθένηση, η οποία θα πρέπει να εξισορροπηθεί, ώστε να καταστεί εφικτή η ορθή λήψη του μεταδιδόμενου σήματος. Επιπλέον, εκτός από τις τροποσφαιρικές και ιονοσφαιρικές απώλειες, τα δορυφορικά συστήματα αντιμετωπίζουν προβλήματα εξαιτίας του θορύβου που προκαλείται από διάφορες κατηγορίες πηγών, καθώς και από την ολίσθηση συχνότητας, εξαιτίας του φαινομένου Doppler.

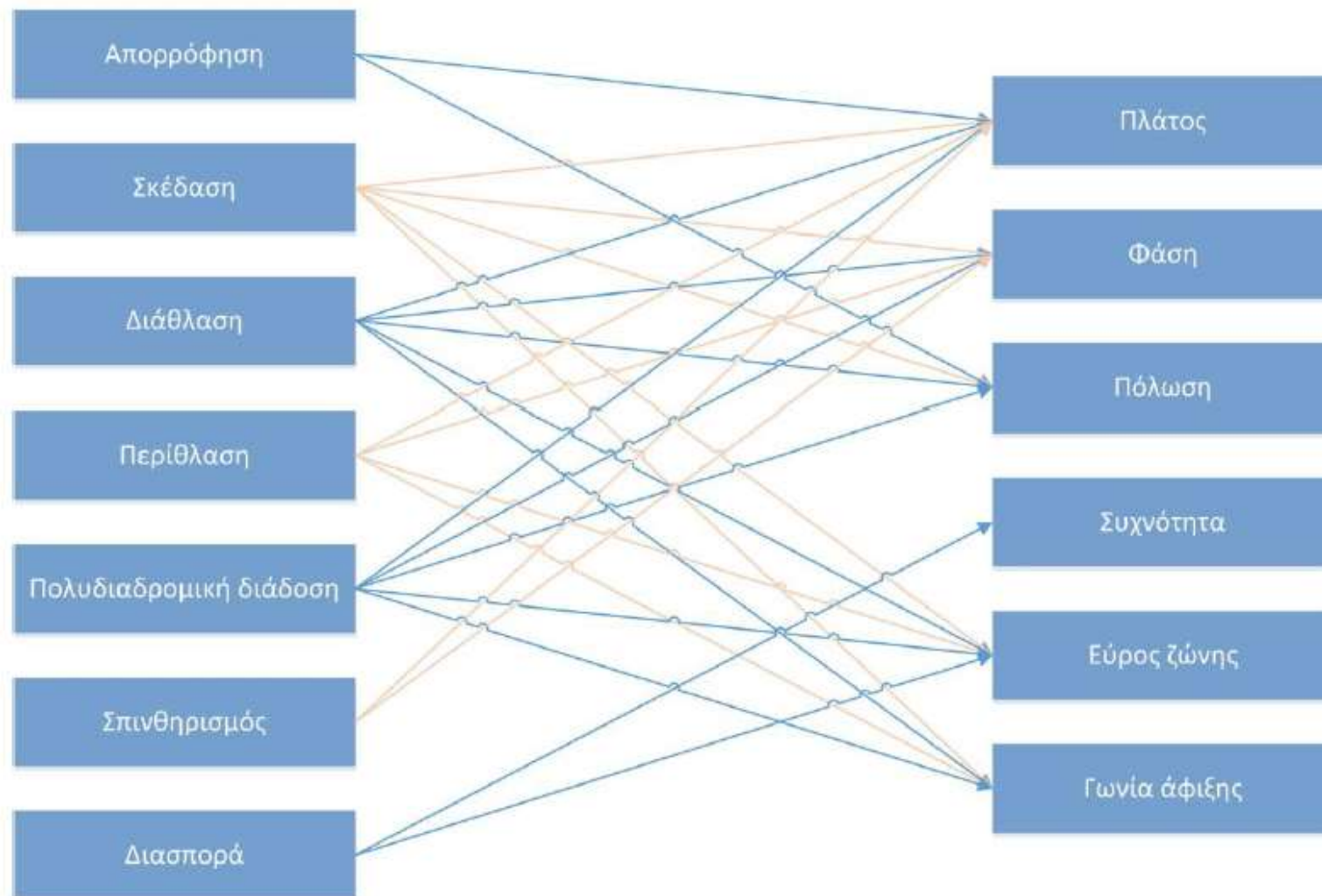
Μηχανισμοί διάδοσης

- **Απορρόφηση:** Ορίζεται ως η μείωση του πλάτους ενός ραδιοκύματος, η οποία προκαλείται από τη μη-αντιστρεπτή μετατροπή της ενέργειας του ραδιοκύματος προς την ύλη κατά τη διάδοσή του.
- **Σκέδαση:** Ορίζεται ως η διαδικασία, κατά την οποία η ενέργεια ενός ραδιοκύματος διαχέεται στην κατεύθυνση διάδοσής του εξαιτίας ανομοιογενειών του μέσου διάδοσης.
- **Διάθλαση:** Είναι η αλλαγή της κατεύθυνσης διάδοσης ενός ραδιοκύματος, η οποία προκύπτει από τις χωρικές διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης του μέσου διάδοσης.
- **Περίθλαση:** Είναι το φαινόμενο της αλλαγής της διεύθυνσης διάδοσης ενός ραδιοκύματος, η οποία προκαλείται από την παρουσία ενός εμποδίου, μίας περιορισμένης διατομής ή εξαιτίας άλλου αντικειμένου του μέσου διάδοσης.
- **Διασπορά συχνότητας:** Ορίζεται ως η αλλαγή της συχνότητας και της φάσης στο εύρος ζώνης του ραδιοκύματος, η οποία προκαλείται από το μέσο διάδοσης. Ένα μέσο διάδοσης που προκαλεί διασπορά είναι αυτό, του οποίου τα χαρακτηριστικά αγωγιμότητας, επιτρεπτότητας και διαπερατότητας, εξαρτώνται από τη συχνότητα ή τη κατεύθυνση του κύματος.

- **Πολυδιαδρομική διάδοση:** Ορίζεται ως ο τρόπος διάδοσης, κατά τον οποίο το μεταδιδόμενο ραδιοκύμα φτάνει στον προορισμό του μέσω δύο ή περισσότερων μονοπατιών. Η πολυδιαδρομική διάδοση μπορεί να προκληθεί από τις ανωμαλίες του δείκτη διάθλασης της τροπόσφαιρας ή της ιονόσφαιρας ή από σκεδάσεις στην επιφάνεια της Γης.
- **Σπινθηρισμός:** Είναι το φαινόμενο των απότομων διακυμάνσεων του πλάτους και της φάσης ενός ραδιοκύματος, οι οποίες προκαλούνται από διαλείψεις μικρής κλίμακας στο μέσο διάδοσης με τον χρόνο.
- **Διαλείψεις:** Ορίζονται ως οι διακυμάνσεις στο πλάτος ενός ραδιοκύματος, οι οποίες προκαλούνται από αλλαγές στο μέσο διάδοσης με τον χρόνο. Παρότι οι έννοιες διαλείψεις και σπινθηρισμός χρησιμοποιούνται συχνά για να περιγράψουν παρόμοια φαινόμενα, οι διαλείψεις περιγράφουν διακυμάνσεις, που λαμβάνουν χώρα σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, ενώ ο σπινθηρισμός αναφέρεται σε γρηγορότερες διακυμάνσεις.

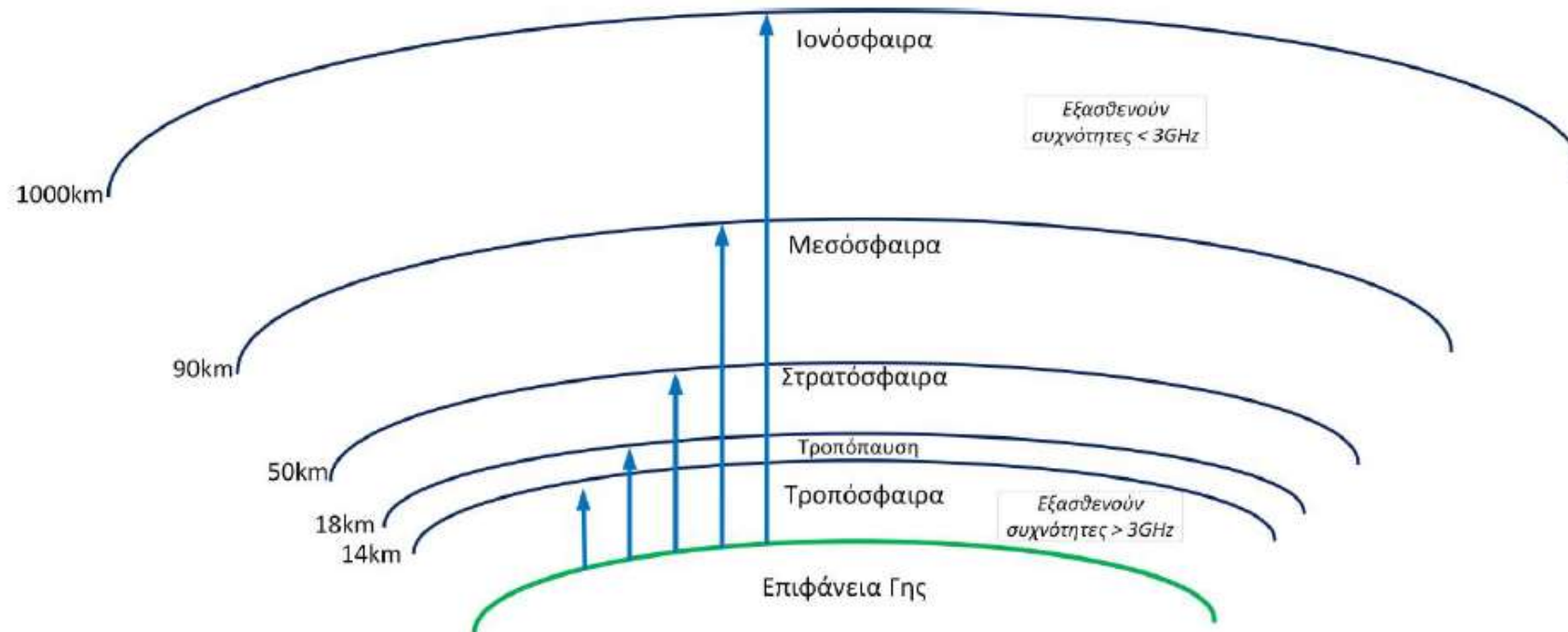
Μηχανισμοί διάδοσης

Επηρεαζόμενοι παράμετροι



7.3 Τροποσφαιρικές απώλειες

Καθώς ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται στα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας, μία σειρά φαινομένων θα οδηγήσει στη μείωση της ενέργειάς του. Στο Σχήμα 7.2 απεικονίζονται τα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας, καθώς και οι συχνότητες, οι οποίες θα επηρεαστούν σε κάθε στρώμα. Πιο συγκεκριμένα, οι συχνότητες άνω των 3GHz θα επηρεαστούν στα χαμηλά στρώματα (τροπόσφαιρα), ενώ οι συχνότητες κάτω από 3GHz θα επηρεαστούν κατά τη μετάδοση από την ιονόσφαιρα. Αρχικά, θα εξετάσουμε τις απώλειες εξαιτίας των φαινομένων, που επικρατούν στα χαμηλά στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας. Οι απώλειες και οι διαταραχές, οι οποίες προκαλούνται στις δορυφορικές επικοινωνίες, οφείλονται στην ενεργειακή απορρόφηση και στις διάφορες διαθλάσεις του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

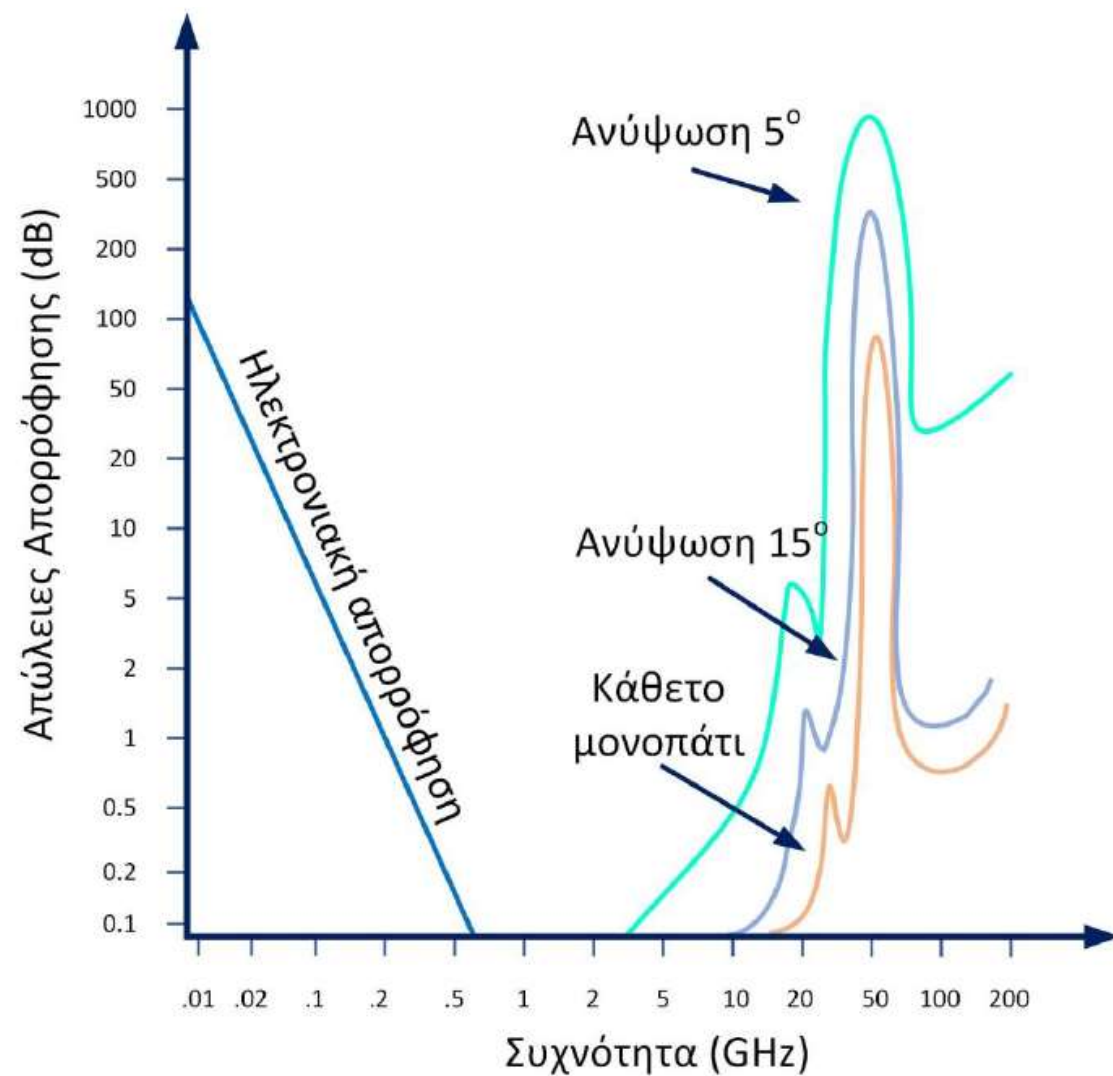


Σχήμα 7.2 Τα στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας

7.3.1 Απώλειες εξαιτίας της ενεργειακής απορρόφησης

Κατά τη μετάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος στην τροπόσφαιρα, η ενέργειά του απορροφάται και μετατρέπεται σε θερμότητα, καθώς απορροφάται από τα αέρια που βρίσκονται εκεί. Σε συχνότητες μικρότερες των 15GHz αυτή η απορρόφηση ενέργειας, η οποία οφείλεται στην ύπαρξη οξυγόνου και υδρατμών, δεν έχει τόσο μεγάλη επίδραση. Ένας άλλος παράγοντας, που οδηγεί στην απώλεια της ενέργειας των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, οφείλεται στην ύπαρξη ελεύθερων ηλεκτρονίων, τα οποία συγκρούονται με το μεταδιδόμενο κύμα. Ωστόσο, τα συστήματα, τα οποία επηρεάζονται από αυτό το φαινόμενο, λειτουργούν σε συχνότητες μικρότερες του 0,5GHz. Το Σχήμα 7.3 απεικονίζει τις απώλειες ενέργειας σε dB για γωνία ανύψωσης 90° συναρτήσει της συχνότητας. Έτσι, παρατηρείται ότι για συγκεκριμένες συχνότητες λειτουργίας η απορρόφηση ενέργειας μεγιστοποιείται, όπως συμβαίνει στη συχνότητα των 22,2GHz εξαιτίας των υδρατμών. Μία άλλη ζώνη συχνοτήτων, όπου παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά εξαιτίας του οξυγόνου, είναι αυτή των 60GHz. Για τον λόγο αυτό οι μηχανικοί, που σχεδιάζουν δορυφορικά συστήματα, προτιμούν να χρησιμοποιούν αυτές τις συχνότητες σε ζεύξεις μεταξύ δορυφόρων και όχι για την επικοινωνία επίγειων σταθμών από και προς τους δορυφόρους (Maini & Agrawal, 2011).

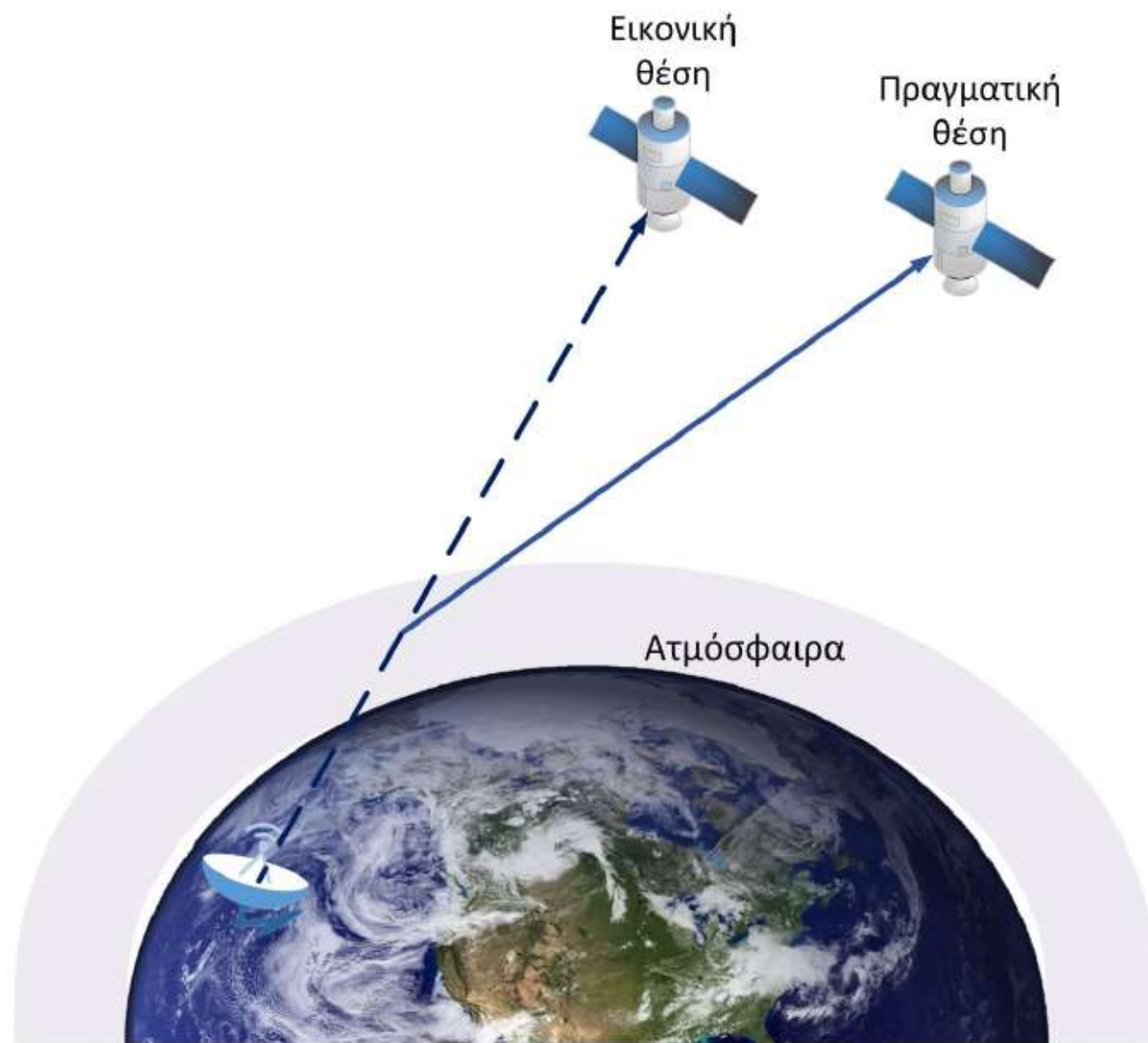
Άλλοι παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν την ενεργειακή απορρόφηση στην ατμόσφαιρα, είναι η θερμοκρασία, η πίεση, η υγρασία και η γωνία ανύψωσης. Πιο συγκεκριμένα, για τη γωνία ανύψωσης ισχύει ότι οποιαδήποτε μείωση της γωνίας επιφέρει αύξηση της διαδρομής, την οποία πρέπει να διανύσει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, αυξάνοντας έτσι τις ενεργειακές απώλειες. Επιστρέφοντας στο Σχήμα 7.3, φαίνονται δύο ζώνες συχνοτήτων, για τις οποίες η επίδραση της ενεργειακής απορρόφησης ελαχιστοποιείται. Η πρώτη εμφανίζεται στο διάστημα 0,5-10 GHz και η δεύτερη στη συχνότητα των 30GHz. Για τον λόγο αυτό, στην άνω και κάτω ζεύξη προτιμώνται συχνότητες, οι οποίες βρίσκονται σε αυτές τις περιοχές, όπου οι ενεργειακές απώλειες δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές.



Σχήμα 7.3 Απορρόφηση ενέργειας εξαιτίας ατμοσφαιρικών αερίων συναρτήσει της συχνότητας και της γωνίας ανύψωσης (Maini & Agrawal, 2011)

7.3.2 Απώλειες εξαιτίας των ατμοσφαιρικών διαθλάσεων

Η διάθλαση είναι το φαινόμενο της αλλαγής κατεύθυνσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, καθώς αυτά μεταδίδονται σε διάφορα στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας. Συγκεκριμένα, όταν ένας δορυφόρος μεταδίδει ένα σήμα προς ένα επίγειο τερματικό, το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, το οποίο μεταφέρει την πληροφορία, θα διαθλαστεί στην τροπόσφαιρα, η οποία βρίσκεται μέχρι το υψόμετρο των 15km. Καθώς η Γη θερμαίνεται από τον Ήλιο, προκαλείται σημαντική δραστηριότητα στον χώρο της τροπόσφαιρας από τις στήλες αερίων που αναμιγνύονται. Έτσι, υπάρχουν διάφοροι δείκτες διάθλασης σε διαφορετικά σημεία της τροπόσφαιρας, προκαλώντας την αλλαγή κατεύθυνσης του μεταδιδόμενου κύματος. Αυτή η αλλαγή κατεύθυνσης προκαλεί διακύμανση στα επίπεδα της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος, εξαιτίας της αλλαγής της φαινόμενης θέσης του δορυφόρου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 7.4. Η συνεχής αλλαγή στα χαρακτηριστικά της, η οποία οφείλεται στα μεταβαλλόμενα ατμοσφαιρικά φαινόμενα, προκαλεί διαλείψεις στις δορυφορικές επικοινωνίες, εξαιτίας της λήψης μέσω πολλαπλών διαδρομών συνιστωσών του σήματος, που φθάνουν με διαφορετική φάση (Κωττής & Καψάλης, 2012).



Σχήμα 7.4 Μετατόπιση της πραγματικής θέσης του δορυφόρου εξαιτίας των ατμοσφαιρικών διαθλάσεων

7.3.3 Τροποσφαιρικός σπινθηρισμός

Με τον όρο σπινθηρισμό περιγράφονται οι γρήγορες διακυμάνσεις των παραμέτρων ενός ραδιοκύματος οι οποίες προκαλούνται από τις χρονικά εξαρτώμενες ανωμαλίες της διαδρομής διάδοσης. Οι παράμετροι οι οποίες μπορεί να μεταβληθούν είναι το πλάτος, η φάση, η πόλωση και η γωνία άφιξης του κύματος.

Ο σπινθηρισμός μπορεί να παρατηρηθεί στην ιονόσφαιρα και την τροπόσφαιρα. Πιο συγκεκριμένα, οι ανωμαλίες στην πυκνότητα ηλεκτρονίων της ιονόσφαιρας επιδρούν σε συχνότητες μέχρι 6GHz, ενώ οι ανωμαλίες του δείκτη διάθλασης της τροπόσφαιρας επηρεάζουν συχνότητες άνω των 3GHz.

Ο τροποσφαιρικός σπινθηρισμός είναι το αποτέλεσμα των διακυμάνσεων του δείκτη διάθλασης στα πρώτα χιλιόμετρα της τροπόσφαιρας, εξαιτίας των στρωμάτων αναστροφής της θερμοκρασίας και της υψηλής υγρασίας. Αυτά τα χαρακτηριστικά διαφέρουν ανάλογα με την εποχή του χρόνου, καθώς και με την περιοχή της Γης. Ο δείκτης διάθλασης n ενός ραδιοκύματος εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την πίεση και το περιεχόμενο των υδρατμών. Οι ιδιότητες του δείκτη διάθλασης περιγράφονται μέσω του τροποποιημένου δείκτη διάθλασης N ως (Ippolito, 2008):

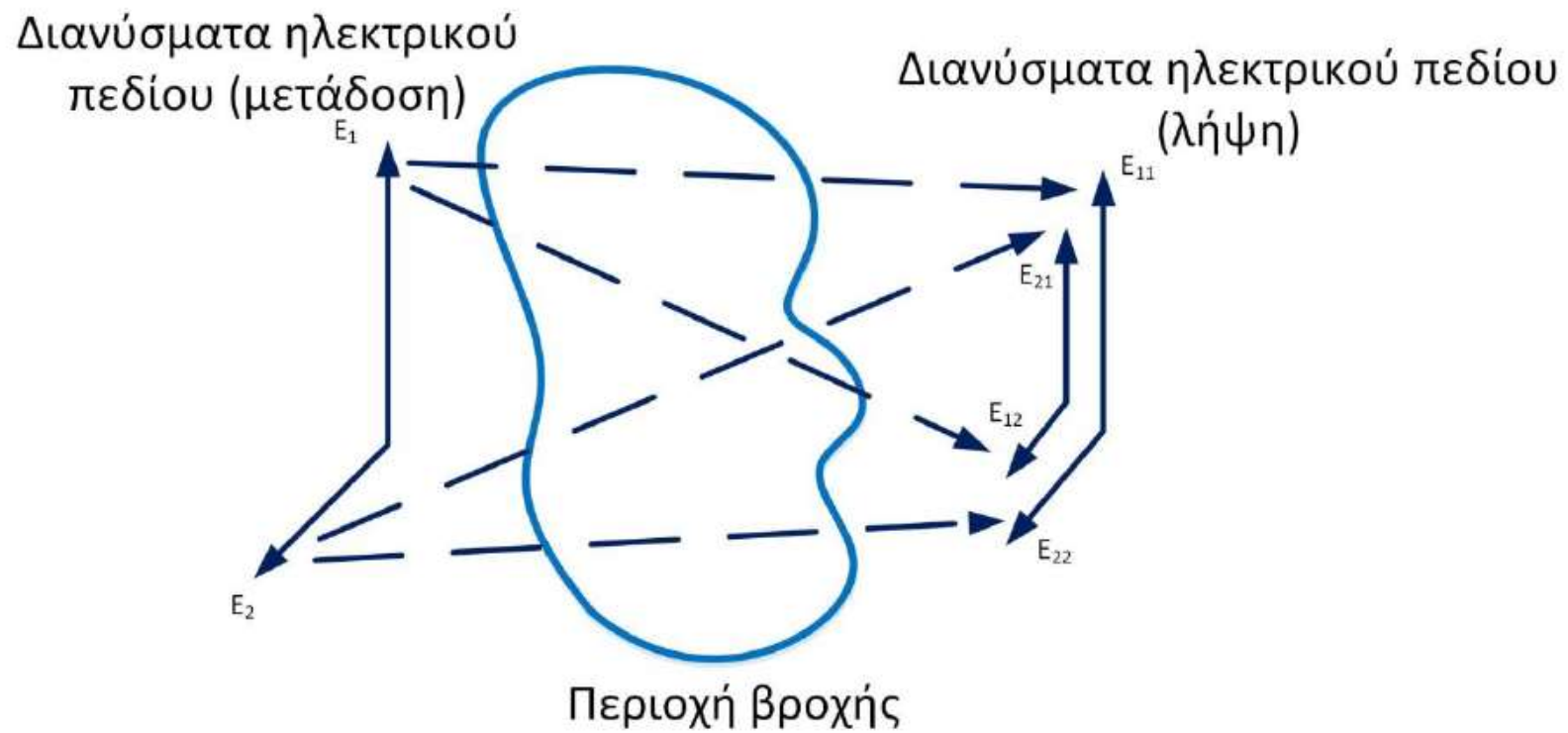
$$N = (n - 1) \times 10^6 = \frac{77,6}{T} \left(p + 4,810 \frac{e}{T} \right) \quad (7.1)$$

όπου p είναι η ατμοσφαιρική πίεση σε millibars (mb), e είναι η πίεση των υδρατμών σε mb και T είναι η θερμοκρασία σε βαθμούς Κ.

7.3.4 Αποπόλωση εξαιτίας βροχής και πάγου

Ο όρος αποπόλωση αναφέρεται στη μεταβολή των χαρακτηριστικών πόλωσης ενός ραδιοκύματος, η οποία προκαλείται από υδρομετέωρα βροχής και πάγου, καθώς και από την πολυδιαδρομική διάδοση. Η αποπόλωση μπορεί να τροποποιήσει την κατάσταση πόλωσης σε μη επιθυμητή ορθογώνια πολωμένη κατάσταση εισάγοντας φαινόμενα παρεμβολών μεταξύ των δύο ορθογώνια πολωμένων καναλιών. Η αποπόλωση εξαιτίας των μορίων βροχής και πάγου μπορεί να προκαλέσει προβλήματα σε συχνότητες άνω των 12GHz, κυρίως σε συστήματα με επαναχρησιμοποίηση συχνότητας διαφορετικής ορθογώνιας πόλωσης.

Αρχίζοντας με την αποπόλωση εξαιτίας της βροχής, η βασική αιτία είναι οι μη-σφαιρικές σταγόνες οι οποίες προκαλούν εξασθένηση πλάτους και αλλαγή φάσης. Όσο αυξάνει το μέγεθος των σταγονιδίων, η αεροδυναμική επίδραση προκαλεί αλλαγή της μορφής τους από σφαιρική σε σφαιροειδή. Τα χαρακτηριστικά της αποπόλωσης εξαρτώνται από τη γωνία πόλωσης του μεταδιδόμενου ραδιοκύματος. Έτσι, σε συστήματα επαναχρησιμοποίησης συχνότητας, όπου υιοθετείται διπλή ανεξάρτητη ορθογώνια πόλωση στα μεταδιδόμενα ραδιοκύματα, απαιτείται κατανόηση της επίδρασης της αποπόλωσης. Στο Σχήμα 7.5 απεικονίζεται η επίδραση της αποπόλωσης αναφορικά με τα διανύσματα του ηλεκτρικού πεδίου σε μία γραμμικά πολωμένη μετάδοση. Τα διανύσματα E_1 και E_2 είναι τα μεταδιδόμενα ορθογώνια κύματα, τα οποία παρέχουν δύο ανεξάρτητα μεταδιδόμενα σήματα. Μετά την επίδραση του μέσου διάδοσης, τα μεταδιδόμενα κύματα θα ληφθούν ως διάφορες συνιστώσες, όπως φαίνεται στα δεξιά.



Σχήμα 7.5 Συνιστώσες αποπόλωσης γραμμικά πολωμένων κυμάτων

Εκτός από τις σταγόνες της βροχής, μία δεύτερη αιτία αποπόλωσης αποτελούν οι κρύσταλλοι πάγου, οι οποίοι βρίσκονται σε μεγάλα υψόμετρα. Αντίθετα με την αποπόλωση εξαιτίας της βροχής, η αποπόλωση εξαιτίας του πάγου δεν οφείλεται στη διαφορική εξασθένηση πλάτους, αλλά σε διαφορικές μεταβολές φάσης. Πιο συγκεκριμένα, οι κρύσταλλοι πάγου σχηματίζουν μόρια διαφορετικού σχήματος ανάλογα με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και ο προσανατολισμός τους εξαρτάται από τον προσανατολισμό του ηλεκτροστατικού πεδίου. Αναφορικά με το μέγεθός τους, οι κρύσταλλοι μπορεί να έχουν διαστάσεις από 0,1 μέχρι 1mm και η συγκέντρωσή τους κυμαίνεται από 10^3 μέχρι 10^6 κρυστάλλους/ m^3 .

Η συνεισφορά της αποπόλωσης εξαιτίας του πάγου στη συνολική αποπόλωση της δορυφορικής ζεύξης είναι δύσκολο να καθοριστεί με απευθείας μετρήσεις, αλλά μπορεί να εξαχθεί μέσω της παρατήρησης της απόσβεσης του σήματος. Αν η απόσβεση κυμαίνεται σε τιμές μικρότερες του 1,5dB, τότε οφείλεται αποκλειστικά στους κρυστάλλους πάγου, ενώ μεγαλύτερες τιμές απόσβεσης μπορούν να αποδοθούν και στους κρυστάλλους πάγου και στα σταγονίδια της βροχής.

7.3.5 Εξασθένηση εξαιτίας νεφώσεων και ομίχλης

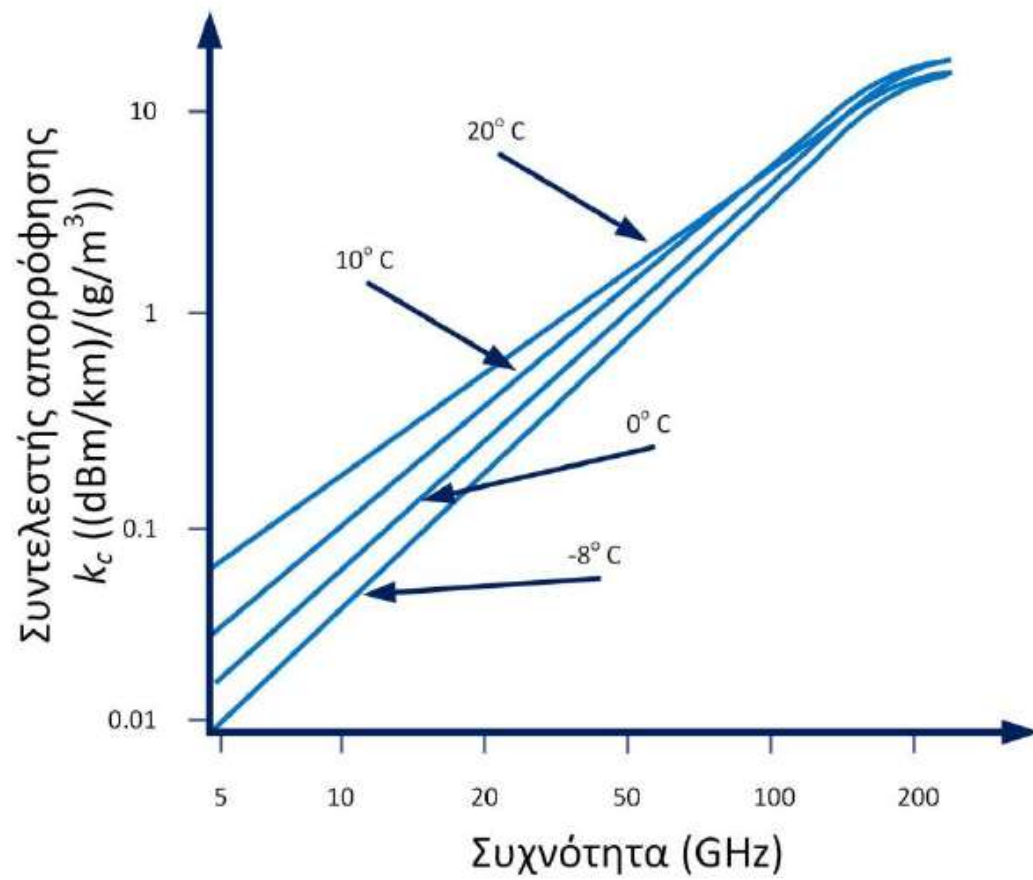
Παρότι η βροχή έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην εξασθένηση του πλάτους του ραδιοκύματος, τα σύννεφα και η ομίχλη μειώνουν περαιτέρω την ισχύ του μεταδιδόμενου σήματος. Τα σύννεφα και η ομίχλη αποτελούνται από σταγονίδια νερού με διάμετρο μικρότερη του 0,1mm, ενώ, αντίθετα, τα σταγονίδια της βροχής έχουν διάμετρο από 0,1 μέχρι 10mm. Η απόσβεση εξαιτίας της ομίχλης είναι πολύ χαμηλή για δορυφορικά συστήματα με συχνότητες λειτουργίας μικρότερες των 100GHz. Η πυκνότητα του νερού της ομίχλης είναι μικρότερη από 0,1g/m³ και επιτρέπει ορατότητα μεγαλύτερη των 100m, ενώ για χαμηλότερες τιμές ορατότητας, η πυκνότητα του νερού είναι περίπου 0,5g/m³. Καθώς το μήκος της δορυφορικής ζεύξης, υπό συνθήκες ομίχλης, είναι της τάξης των εκατοντάδων μέτρων, η απόσβεση εξαιτίας της ομίχλης θεωρείται αμελητέα, εφόσον η συχνότητα λειτουργίας δεν υπερβαίνει τα 100GHz (ITU-R, 1999).

Στα σύννεφα, η πυκνότητα του νερού κυμαίνεται από 0,05 μέχρι 2g/m³, ενώ σε περιπτώσεις καταιγίδας μπορεί να υπερβεί τα 5g/m³. Για τον υπολογισμό της απόσβεσης εξαιτίας των νεφώσεων χρησιμοποιείται η εξίσωση (σε dB/km):

$$\gamma_{cloud} = k_c M \quad (7.2)$$

όπου γ_{cloud} είναι η απόσβεση εξαιτίας νεφώσεων, k_c είναι ο συντελεστής απόσβεσης σε (dB/km)/(g/m³) και M είναι η πυκνότητα του νερού σε g/m³.

Η σχέση του συντελεστή k_c με τη συχνότητα λειτουργίας και τη θερμοκρασία απεικονίζεται στο Σχήμα 7.6.



Σχήμα 7.6 Η σχέση της απόσβεσης εξαιτίας των σόννεφων με τη συχνότητα λειτουργίας και τη θερμοκρασία

7.4 Ιονοσφαιρικές απώλειες

Η ιονόσφαιρα βρίσκεται σε υψόμετρο 80-1000 km και σχηματίζεται από την αλληλεπίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας με διάφορα αέρια της ατμόσφαιρας. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία θα περάσουν από την ιονόσφαιρα, θα δεχθούν διάφορες επιδράσεις, οι οποίες θα επηρεάσουν την ποιότητα της δορυφορικής επικοινωνίας. Η σημαντικότερη επίδραση είναι αυτή του ιονοσφαιρικού σπινθηρισμού (ionospheric scintillation), ο οποίος προκαλεί απότομες μεταβολές στα χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, όπως στο πλάτος και στη φάση. Άλλες διαταραχές στις δορυφορικές επικοινωνίες προκαλούν η καθυστέρηση στη μετάδοση και η ενεργειακή απορρόφηση, όμως, σε σημαντικά μικρότερο βαθμό. Στη συνέχεια, θα περιγραφεί ο ιονοσφαιρικός σπινθηρισμός, η στροφή πόλωσης, η καθυστέρηση ομάδας, η διασπορά και οι επίγειες πολυδιαδρομικές διαλείψεις.

7.4.1 Ιονοσφαιρικός σπινθηρισμός

Στην ιονόσφαιρα το φαινόμενο του σπινθηρισμού συμβαίνει εξαιτίας της διακύμανσης της συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων, που βρίσκονται στον χώρο. Τα ηλεκτρόνια προκαλούν μικρής κλίμακας διάθλαση στο μεταδιδόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα, οι οποίες διαφέρουν κατά τη διάρκεια της ημέρας, καθώς, όταν υπάρχει ηλιοφάνεια, η ηλιακή ακτινοβολία αυξάνει κατά δύο τάξεις μεγέθους τη συγκέντρωση ηλεκτρονίων συγκριτικά με τις νυκτερινές ώρες.

Αυτή η ανισοκατανομή της συγκέντρωσης ηλεκτρονίων προκαλεί ταχείες διακυμάνσεις στα χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, γνωστές και ως ιονοσφαιρικός σπινθηρισμός. Ο μηχανισμός λειτουργίας του ιονοσφαιρικού σπινθηρισμού απεικονίζεται στο Διαδραστικό Σχήμα 7.1. Εκεί παρατηρείται ότι το μεταδιδόμενο σήμα θα ληφθεί στον δέκτη από δύο διαφορετικές διαδρομές, μία απευθείας διαδρομή και μία μέσω διάθλασης. Όπως συμβαίνει και κατά τα φαινόμενα διαλείψεων στις επίγειες επικοινωνίες, η πολυδιαδρομική διάδοση μπορεί να προκαλέσει ενίσχυση του σήματος ή ακύρωσή του, ανάλογα με τη φάση που θα ληφθούν τα σήματα στον δέκτη.

Η σχέση, η οποία συνδέει τον ιονοσφαιρικό σπινθηρισμό με τη συχνότητα λειτουργίας του δορυφορικού συστήματος, είναι αντιστρόφως ανάλογη. Με αυτόν τον τρόπο, σε χαμηλές συχνότητες ο σπινθηρισμός θα είναι ισχυρός συγκριτικά με τη μετάδοση σε συχνότητες άνω των 4GHz. Επιπλέον, η επίδραση του σπινθηρισμού θα αυξάνει κατά τις περιόδους υψηλής ηλιακής δραστηριότητας. Πρέπει να επισημανθεί ότι ο ιονοσφαιρικός σπινθηρισμός είναι ανεξάρτητος της γωνίας ανύψωσης.

Για να ποσοτικοποιηθεί το φαινόμενο του σπινθηρισμού ορίζεται ο δείκτης σπινθηρισμού, ο οποίος ορίζεται από την εξίσωση:

$$S = \left(\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \right) \quad (7.3)$$

όπου το I δηλώνει την ένταση του ιονοσφαιρικού σπινθηρισμού.

Ο δείκτης σπινθηρισμού μπορεί να περιγραφεί από την κατανομή Nakagami και, καθώς πλησιάζει την τιμή 1, η κατάλληλη κατανομή για την περιγραφή του είναι η κατανομή Rayleigh. Μία εκτίμηση του δείκτη σπινθηρισμού μπορεί να πραγματοποιηθεί, χρησιμοποιώντας τη μέγιστη διακύμανση του ιονοσφαιρικού σπινθηρισμού σε dB από κορυφή σε κορυφή (peak-to-peak) I_{p-p} :

$$S = I_{p-p}^{0.794} \quad (7.4)$$

7.4.2 Στροφή πόλωσης – Επίδραση Faraday

Το φαινόμενο της στροφής πόλωσης (polarization rotation) αναφέρεται στην αλλαγή της πόλωσης ενός ραδιοκύματος εξαιτίας της αλληλεπίδρασης του μεταδιδόμενου κύματος με τα ηλεκτρόνια, που βρίσκονται στην ιονόσφαιρα. Το φαινόμενο, το οποίο ευθύνεται για τη στροφή πόλωσης, ονομάζεται επίδραση Faraday και επηρεάζει κυρίως δορυφορικά συστήματα με γραμμική πόλωση. Η στροφή πόλωσης αλλάζει το επίπεδο της πόλωσης, καθώς τα δύο περιστρεφόμενα τμήματα του κύματος περνούν από την ιονόσφαιρα με διαφορετικές ταχύτητες μετάδοσης (Ippolito, 2008).

Η εξίσωση, που δίνει τη γωνία στροφής θ , έχει ως εξής:

$$\theta = \frac{236 B_{av} N_T}{f^2} \quad (7.5)$$

όπου θ είναι η γωνία της στροφής πόλωσης εξαιτίας της επίδρασης της στροφής Faraday, B_{av} η μέση τιμή του γήινου μαγνητικού πεδίου σε Wb/m^2 , f η συχνότητα του ραδιοκύματος και N_T η συνολική συγκέντρωση ηλεκτρονίων σε e/m^3 .

Καθώς η στροφή πόλωσης είναι ανάλογη της συγκέντρωσης ηλεκτρονίων και της μέσης τιμής του μαγνητικού πεδίου, η συμπεριφορά της μπορεί να προβλεφθεί, καθώς εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία. Έτσι, με μία τροποποίηση των επίγειων κεραιοσυστημάτων είναι δυνατή η εξομάλυνση της επίδρασης Faraday. Ωστόσο, σε περιόδους μαγνητικών καταιγίδων και μεγάλων ιονοσφαιρικών απωλειών, η επίδραση Faraday μπορεί να μην είναι εύκολο να εξομαλυνθεί. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι δορυφορικά συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν κυκλική πόλωση, δεν επηρεάζονται από την επίδραση Faraday, καθώς αυτή τροποποιεί μόνο την πόλωση γραμμικά πολωμένων κυμάτων.

7.4.3 Καθυστέρηση ομάδας

Ως καθυστέρηση ομάδας (group delay) ή καθυστέρηση διάδοσης ορίζουμε τη μείωση της ταχύτητας διάδοσης ενός ραδιοκύματος, η οποία προκαλείται από την παρουσία ελεύθερων ηλεκτρονίων στη διαδρομή διάδοσης. Διάφορες δορυφορικές εφαρμογές οι οποίες βασίζονται στη ραδιοπλοήγηση μπορεί να αντιμετωπίσουν σημαντικές δυσκολίες εξαιτίας της καθυστέρησης διάδοσης. Η εξίσωση, η οποία συνδέει τη συχνότητα του ραδιοκύματος με την καθυστέρηση διάδοσης, είναι η εξής:

$$t = 1,345 \frac{N_T}{f^2} \times 10^{-25} \quad (7.6)$$

όπου t είναι η ιονοσφαιρική καθυστέρηση ομάδας σε σχέση με την περίπτωση διάδοσης στο απόλυτο κενό, υπολογισμένη σε δευτερόλεπτα, f η συχνότητα του ραδιοκύματος και N_T η συγκέντρωση ηλεκτρονίων σε el/m^2 .

7.4.4 Διασπορά

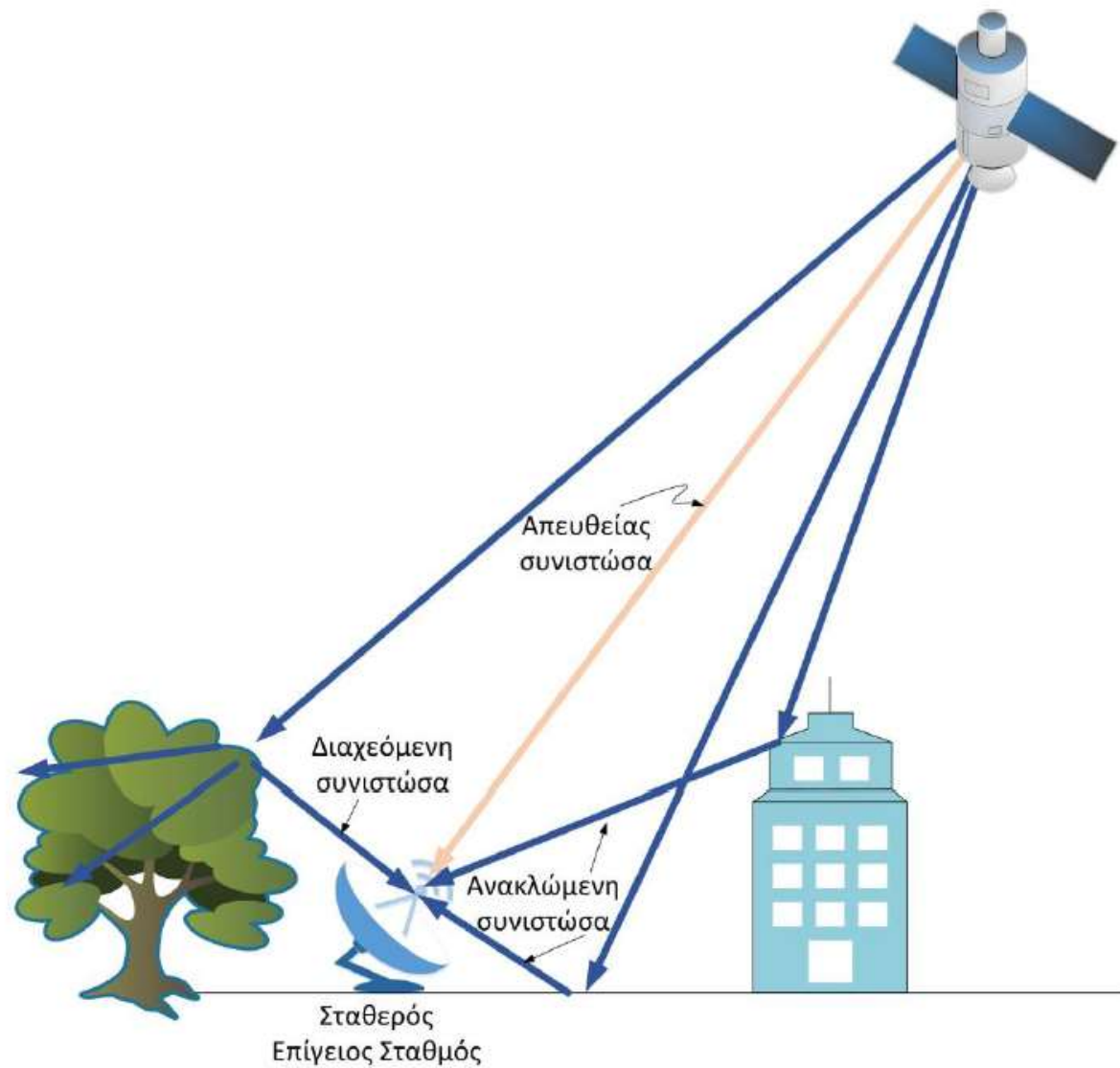
Όταν ένα ραδιοκύμα με μεγάλο εύρος ζώνης διαδίδεται στην ιονόσφαιρα, η καθυστέρηση διάδοσης η οποία είναι συνάρτηση της συχνότητας προκαλεί διασπορά. Η διασπορά (dispersion) ορίζεται ως η χρονική διαφορά μεταξύ της κάτω και άνω συχνότητας του φάσματος του μεταδιδόμενου κύματος.

Η σχέση, η οποία συνδέει την πυκνότητα ηλεκτρονίων με τη χρονική καθυστέρηση του εύρους ζώνης, είναι αναλογική. Η άμεση επίδραση της διασποράς στις δορυφορικές επικοινωνίες είναι η εισαγωγή παραμορφώσεων σε ευρυζωνικά σήματα και συστήματα VHF και UHF.

Για να προσδιοριστούν οι επιδράσεις της διασποράς ορίζεται το εύρος ζώνης συνοχής (coherence bandwidth), το οποίο είναι το άνω όριο του εύρους ζώνης πληροφορίας ή αλλιώς της χωρητικότητας του ασύρματου καναλιού, μέσω του οποίου μεταδίδεται το ραδιοκύμα, το οποίο υφίσταται διασπορά από την ατμόσφαιρα και πολυδιαδρομική διάδοση. Το εύρος ζώνης συνοχής εξαιτίας όλων των ατμοσφαιρικών φαινομένων για δορυφορικά συστήματα με συχνότητες λειτουργίας 30GHz και άνω είναι μεγαλύτερο του 1GHz και δεν προκαλεί σημαντικούς περιορισμούς, εκτός από τις περιπτώσεις ζεύξεων πολύ μεγάλου εύρους ζώνης.

7.5 Επίγειες πολυδιαδρομικές διαλείψεις

Ο ιονοσφαιρικός σπινθηρισμός, όπως περιγράφηκε προηγουμένως, προκαλεί φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath fading) εξαιτίας των διαθλάσεων, τις οποίες προκαλούν οι συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων της ατμόσφαιρας (Maini & Agrawal, 2011). Ωστόσο, η πολυδιαδρομική διάδοση προκαλείται και κοντά στη γήινη επιφάνεια εξαιτίας των φαινομένων διάθλασης και σκέδασης σε περιβάλλοντα με βουνά, λόφους αλλά και σε αστικές περιοχές, εξαιτίας του υψηλού βαθμού δόμησης και της παρουσίας αυτοκινήτων και άλλων αντικειμένων. Σε αυτές τις περιπτώσεις αναφερόμαστε σε επίγειες πολυδιαδρομικές διαλείψεις, η επίδραση των οποίων διαφέρει ανάλογα με το αν το επίγειο τερματικό είναι σταθερό ή κινείται. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του σταθερού τερματικού τα χαρακτηριστικά της μετάδοσης δεν μεταβάλλονται σε σημαντικό βαθμό με τον χρόνο. Από την άλλη, όταν το επίγειο τερματικό κινείται, λαμβάνεται η απευθείας συνιστώσα του σήματος, καθώς και διαθλώμενες συνιστώσες με τη σχέση μεταξύ των φάσεών τους να μεταβάλλεται σημαντικά με τον χρόνο, προκαλώντας ταχείες μεταβολές στο πλάτος του λαμβανόμενου σήματος (Σχήμα 7.7).



Σχήμα 7.7 Διαλείψεις προκαλούμενες από τις διαθλάσεις στο επίπεδο της ιονόσφαιρας

7.6 Απώλειες βροχής

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, που προκαλεί ενεργειακές απώλειες στις δορυφορικές επικοινωνίες, οι οποίες λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 3GHz και κυρίως, άνω των 10GHz, είναι η βροχή. Σε αντίθεση με τις απορροφήσεις εξαιτίας των ατμοσφαιρικών αερίων, οι απορροφήσεις από τα σταγονίδια της βροχής είναι πολύ πιο δύσκολο να προβλεφθούν. Έτσι, η διαθεσιμότητα και η αξιοπιστία των δορυφορικών ζεύξεων σε αυτές τις συχνότητες μπορεί να μειωθούν σημαντικά. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά της πόλωσης του μεταδιδόμενου κύματος μπορεί να τροποποιηθούν εξαιτίας της μη-σφαιρικής δομής των σταγονιδίων της βροχής. Γι' αυτό τον λόγο, κατά τον σχεδιασμό μίας δορυφορικής ζεύξης εισάγονται περιθώρια απωλειών εξαιτίας της βροχής, τα οποία βασίζονται στη μελέτη των ρυθμών βροχόπτωσης, όπως δείχνεται παρακάτω, με βάση τις οδηγίες της ITU-R [ITU-R, 2005].

Αναφορικά με τη βροχή, έχουν αναπτυχθεί διάφορα πρότυπα για τη μοντελοποίηση της απόσβεσης που εισάγει. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο στην πράξη μοντέλο για την απώλεια λόγω βροχής είναι το ακόλουθο:

$$L_{rain}(dB) = \gamma_R L_R \quad (7.7)$$

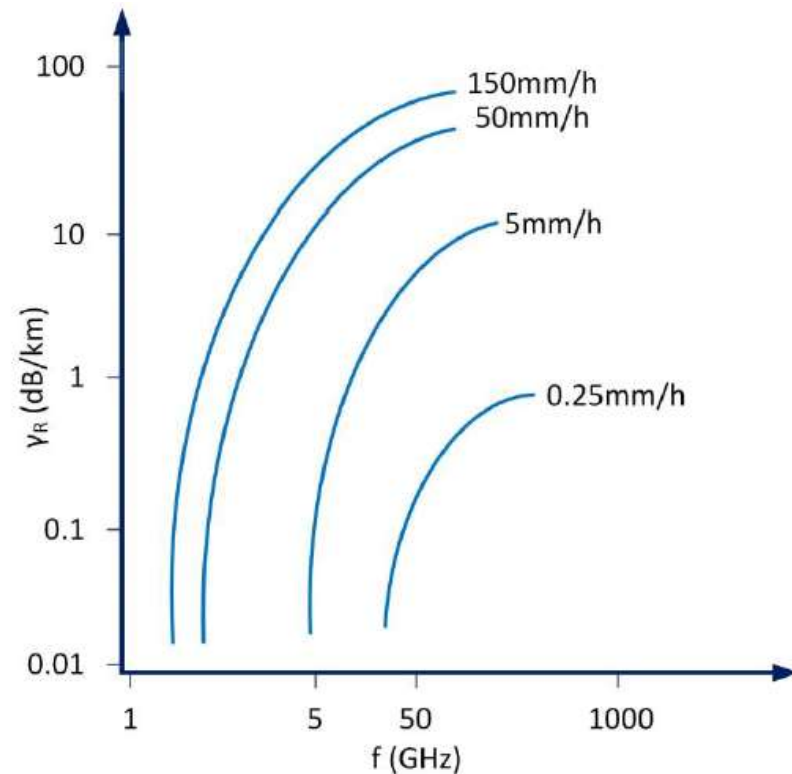
όπου $\square_R$ είναι η ειδική απόσβεση λόγω βροχής σε μονάδες dB/km και L_R είναι το ενεργό μήκος της διαδρομής υπό βροχή σε km , ενώ η εξασθένιση L_{rain} αναφέρεται σε ποσοστό χρόνου 100- p (%).

Η τιμή του $\square_R$ εξαρτάται από τη συχνότητα και τον ρυθμό βροχόπτωσης R_p (mm/h). Το αποτέλεσμα είναι μία τιμή εξασθένισης, η οποία ξεπερνιέται κατά τη διάρκεια ενός ποσοστό του χρόνου p και δίνεται από:

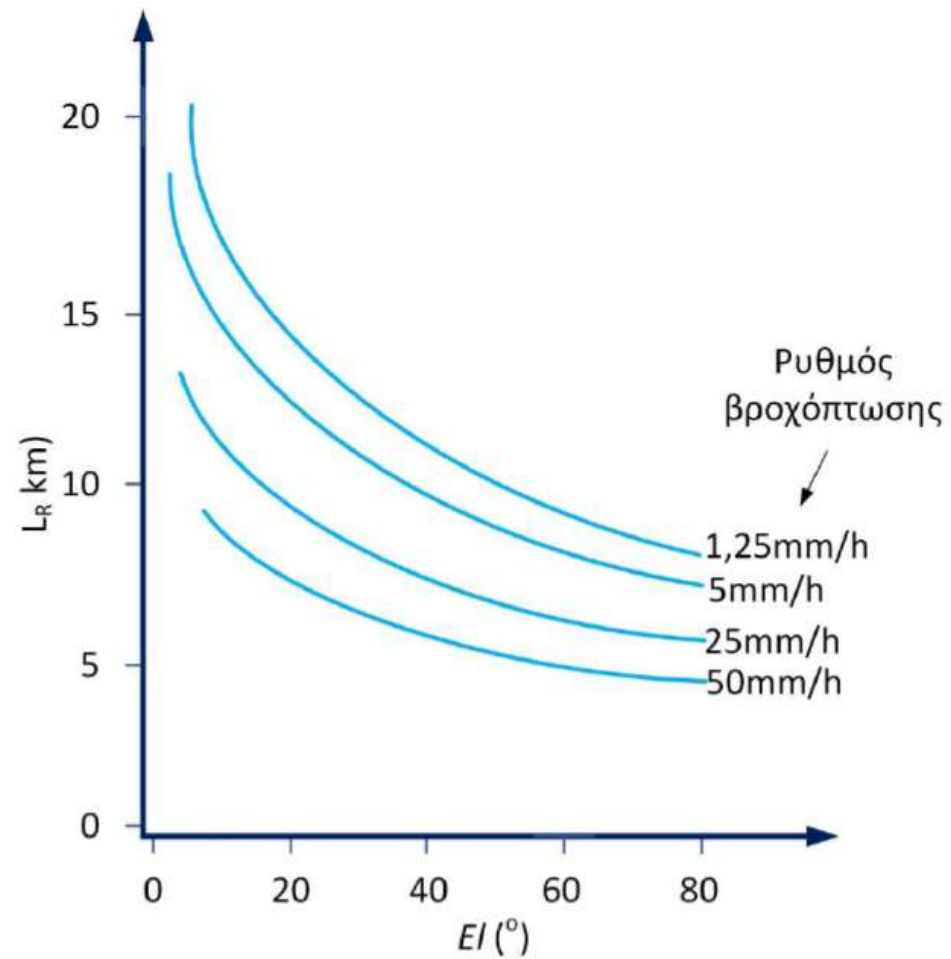
$$\gamma_R(dB/km) = a \cdot R^b \quad (7.8)$$

όπου R είναι ο ρυθμός της βροχόπτωσης σε μονάδες mm/h , ο οποίος είτε μετράται σε πραγματικό χρόνο είτε δίνονται τυπικές τιμές του για κάθε περιοχή της Γης, σε ειδικούς πίνακες της ITU. Τα a, b είναι παράμετροι του προτύπου που υπολογίζονται, έτσι ώστε η συνάρτηση $\square_R$ να προσεγγίζει τα πραγματικά δεδομένα, που δίνονται από μετρήσεις. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει η δυνατότητα να πραγματοποιηθούν τέτοιου είδους μετρήσεις, οι παράμετροι αυτές υπολογίζονται με βάση τις τυποποιημένες σχέσεις, ανάλογα με τη συχνότητα, την πόλωση, τη γωνία ανύψωσης του δορυφόρου ως προς το σημείο λήψης κ.λπ.

Εμπειρικά, ο υπολογισμός των απωλειών εξαιτίας βροχόπτωσης πραγματοποιείται, βρίσκοντας την ειδική απόσβεση $\square_R$ από το Σχήμα 7.8 με βάση τη συχνότητα του φέροντος και το ύψος βροχόπτωσης, καθώς και το ενεργό μήκος υπό βροχή L_R από το Σχήμα 7.9, κάνοντας χρήση και της γωνίας ανύψωσης του ραδιοβήματος.



Σχήμα 7.8 Ειδική απόσβεση ως συνάρτηση της συχνότητας και του ρυθμού βροχόπτωσης



Σχήμα 7.9 Μεταβολή του ενεργού μήκους της ζεύξης υπό βροχή συναρτήσει της γωνίας ανύψωσης και του ρυθμού βροχόπτωσης

Οι συντελεστές a και b καθορίζονται από τη συχνότητα λειτουργίας του δορυφορικού συστήματος και από σχέσεις υπολογισμού της σκέδασης,

Στο Διαδραστικό Σχήμα 7.2 απεικονίζονται τα μεγέθη που σχετίζονται με τη διαδρομή, την οποία διανύει το σήμα, όπου L_G είναι το γεωμετρικό μήκος, El η γωνία ανύψωσης και h_{rain} το μέγιστο υψόμετρο της βροχόπτωσης, πριν τον σχηματισμό παγοκρυστάλλων. Για τον υπολογισμό του γεωμετρικού μήκους υποτίθεται μοντέλο επίπεδης Γης για $El \geq 10^\circ$ και έτσι, βάσει του Διαδραστικού Σχήματος 7.2, προκύπτει:

$$L_G = \frac{h_{rain} - h_o}{\sin(El)} \quad (7.9)$$

Το ενεργό μήκος υπολογίζεται από το γεωμετρικό ως εξής:

$$L_R = L_G r_p \quad (7.10)$$

όπου r_p είναι ένας παράγοντας μείωσης ο οποίος δίνεται από τον Πίνακα 7.2 (Roddy, 2006) και καθορίζεται από το ποσοστό του έτους, κατά το οποίο υπερβαίνεται η απόσβεση εξαιτίας της βροχής και την οριζόντια προβολή του γεωμετρικού μήκους L_{hor} .

Έπειτα, η οριζόντια προβολή του γεωμετρικού μήκους είναι:

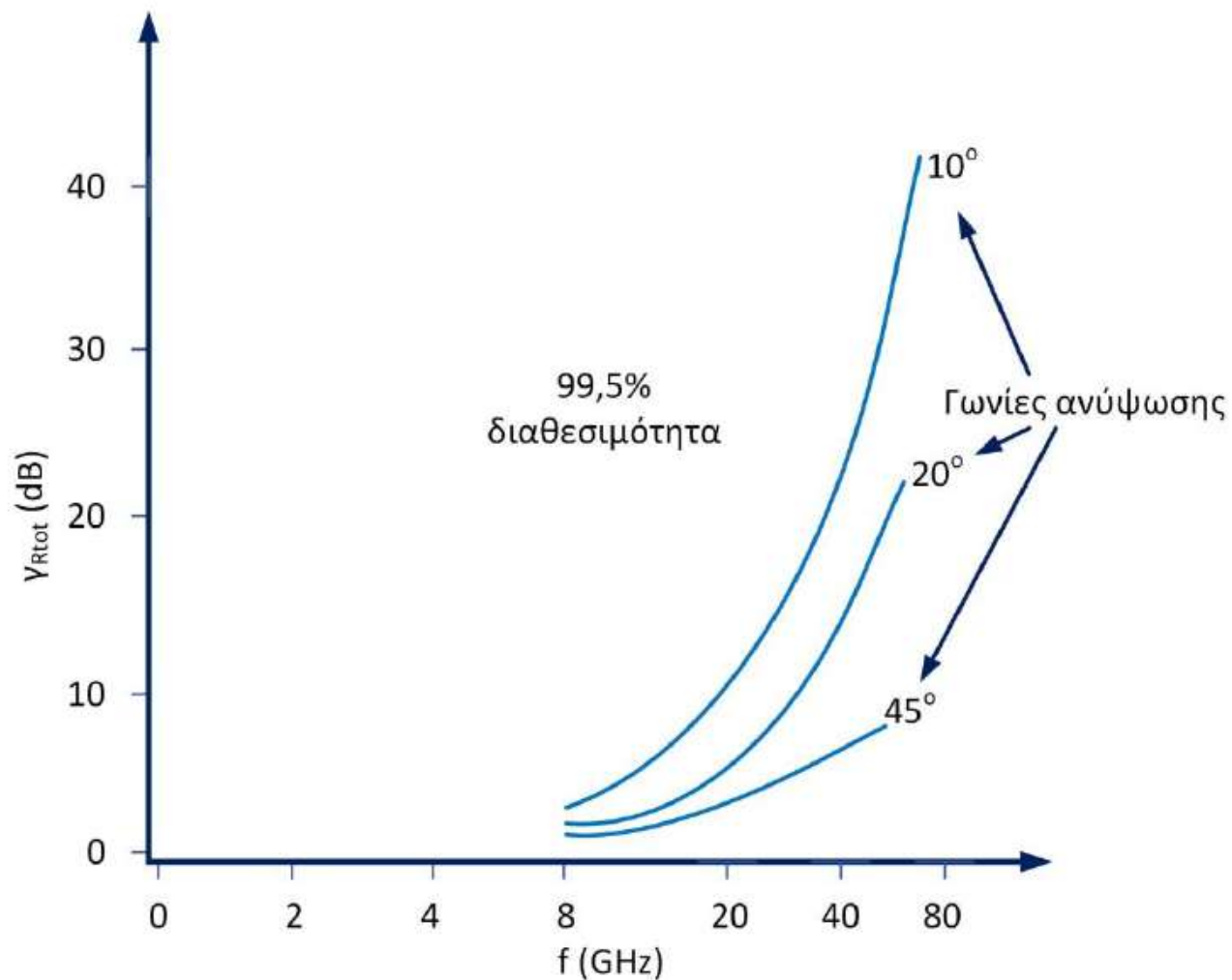
$$L_{hor} = L_G \cos(EI) \quad (7.11)$$

Χρησιμοποιώντας όλα τα παραπάνω στοιχεία, η απόσβεση εξαιτίας της βροχής δίνεται τελικά από την εξίσωση:

$$\gamma_{R,tot} = \gamma_R L_G r_p \quad (7.12)$$

Επιπλέον, στο Διαδραστικό Σχήμα 7.2 φαίνεται πως η γωνία ανύψωσης αυξάνει την απαιτούμενη διαδρομή που διανύει το σήμα σε συνθήκες βροχής. Είναι εμφανές ότι μία χαμηλή γωνία ανύψωσης θα αυξήσει σημαντικά την επίδραση της βροχής στο μεταδιδόμενο κύμα.

Το Σχήμα 7.10 καθιστά ακόμα πιο σαφή τη σχέση της γωνίας ανύψωσης με τις απώλειες εξαιτίας της βροχής και δίνει και τη σχέση με τη συχνότητα λειτουργίας του δορυφορικού συστήματος. Εκεί φαίνεται ότι για συχνότητες άνω των 10GHz υπάρχει σημαντική απώλεια ενέργειας και πρέπει να γίνουν λεπτομερείς προβλέψεις των συνεπειών της βροχοπτώσης, ώστε να τεθεί το κατάλληλο περιθώριο απωλειών ισχύος.



Σχήμα 7.10 Εξασθένιση λόγω βροχής συναρτήσει της συχνότητας και της γωνίας ανύψωσης

7.7 Άλλες εξασθενήσεις διάδοσης

Ένας σημαντικός παράγοντας, που μπορεί να μειώσει την επίδοση των δορυφορικών ζεύξεων, είναι οι διάφορες πηγές που εισάγουν θόρυβο στο σύστημα. Οποιοδήποτε μέσο διάδοσης το οποίο αλληλεπιδρά με το ραδιοκύμα εισάγει θερμικό θόρυβο. Ο θόρυβος, που σχετίζεται με αυτές τις πηγές, ονομάζεται ουράνιος θόρυβος (sky noise) και αυξάνει τη θερμοκρασία της κεραίας του δέκτη. Όταν ο λόγος της ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου είναι χαμηλός, η ποιότητα της επικοινωνίας μειώνεται σε μεγάλο βαθμό.

Ο Πίνακας 7.3 περιλαμβάνει διάφορες πηγές, οι οποίες εισάγουν θόρυβο στις δορυφορικές επικοινωνίες, καθώς και τα συγκεκριμένα είδη θορύβου, τα οποία προκαλεί κάθε πηγή. Είναι προφανές ότι οι πηγές που προκαλούν θόρυβο κατηγοριοποιούνται βάσει με το αν οφείλονται σε γήινους παράγοντες ή όχι, καθώς και με το αν οφείλονται στην ανθρώπινη δραστηριότητα.

Γήινες πηγές θορύβου	Εξωγήινες πηγές θορύβου	Θόρυβος εξαιτίας της ανθρώπινης δραστηριότητας
Εκπομπές από ατμοσφαιρικά αέρια, όπως οξυγόνο και υδρατμοί	Κοσμική ακτινοβολία	Ακτινοβολία από ηλεκτρικές μηχανές και από ηλεκτρικό-ηλεκτρονικό εξοπλισμό
Εκπομπές από υδρομετέωρα, όπως σύννεφα και βροχή	Ακτινοβολία από τον ήλιο και τη σελήνη	Ακτινοβολία από γραμμές μεταφοράς ισχύος
Ακτινοβολία από ηλεκτρικές εκκενώσεις, όπως κεραυνοί	Ακτινοβολία από ουράνιες πηγές, όπως άστρα	Πυροδότηση από μηχανές εσωτερικής καύσης
Ακτινοβολία από το έδαφος ή από άλλα εμπόδια εντός του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας		Εκπομπές από άλλα τηλεπικοινωνιακά συστήματα

Πίνακας 7.3 Διάφορες πηγές θορύβου

7.8 Φαινόμενο Doppler

Οι γεωστατικοί δορυφόροι εμφανίζονται ακίνητοι σε σχέση με έναν τερματικό επίγειο σταθμό, ενώ στην περίπτωση των δορυφόρων σε χαμηλή τροχιά, ο δορυφόρος είναι σε σχετική κίνηση σε σχέση με το τερματικό. Αποτέλεσμα αυτής της κίνησης, συνήθως με μεγάλη ταχύτητα, είναι η ύπαρξη ορισμένων μεταβολών μεταξύ του δορυφόρου και του επίγειου τερματικού σταθμού. Καθώς ο δορυφόρος κινείται σε σχέση με τον επίγειο τερματικό σταθμό, η συχνότητα του δορυφορικού πομπού μεταβάλλεται σε σχέση με τον δέκτη του επίγειου τερματικού σταθμού. Εάν η συχνότητα που μεταδίδεται από τον δορυφόρο είναι f_T , τότε η λαμβανόμενη συχνότητα f_R δίνεται από την εξίσωση:

$$\left(\frac{f_R - f_T}{f_T} \right) = \left(\frac{f_d}{f_T} \right) = \left(\frac{u_T \cos \zeta}{c} \right) \quad (7.13)$$

όπου u_T είναι η ταχύτητα του δορυφορικού πομπού ο οποίος μεταδίδει προς τον επίγειο δέκτη, ζ είναι η γωνία, η οποία σχηματίζεται μεταξύ της κατεύθυνσης άφιξης του κύματος και της κατεύθυνσης της σχετικής κίνησης του δορυφόρου και f_d είναι η ολίσθηση Doppler. Η συχνότητα αυξάνει, καθώς ο πομπός (δορυφόρος) πλησιάζει τον δέκτη και, αντίστροφα, μειώνεται, καθώς ο πομπός απομακρύνεται από τον δέκτη. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συχνότητα ολίσθησης Doppler μπορεί να παίρνει και αρνητικές τιμές στην περίπτωση κατά την οποία ο πομπός απομακρύνεται από τον δέκτη (Maral & Bousquet, 2012).

Η συχνότητα ολίσθησης θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη κατά τη σχεδίαση των δορυφορικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων για τους παρακάτω λόγους:

- Για την εξάλειψη της αβεβαιότητας ως προς τη συχνότητα στον δέκτη. Στις προδιαγραφές του δέκτη θα πρέπει να περιλαμβάνεται και ο ισολογισμός συχνοτήτων για την εκτίμηση του εύρους ζώνης του φίλτρου του δέκτη, και της συχνότητας του τοπικού ταλαντωτή του κυκλώματος κλειδώματος φάσης. Ο ισολογισμός αυτός περιλαμβάνει τόσο την πιθανή ολίσθηση συχνότητας στον δορυφορικό αναμεταδότη και στους επίγειους σταθμούς, όσο και την ολίσθηση συχνότητας, η οποία οφείλεται στο φαινόμενο Doppler στην άνω και στην προς τα κάτω δορυφορική ζεύξη.
- Για την απαλοιφή της συχνότητας Doppler από τη συχνότητα τόσο του επίγειου σταθμού, όσο και του δορυφορικού αναμεταδότη. Συνήθως, η διαδικασία αυτή γίνεται με τη βοήθεια σταθμών παρακολούθησης, στους οποίους μετρώνται όλες οι παράμετροι κάθε φέροντος σήματος του δορυφορικού δικτύου επικοινωνίας.
- Για την εκτίμηση της συχνότητας κάτω ζεύξης, όταν οι συχνότητες των τοπικών ταλαντωτών τόσο του επίγειου σταθμού εκπομπής, όσο και του δορυφορικού αναμεταδότη είναι γνωστές. Σε επικοινωνίες που περιλαμβάνουν μεγάλους επίγειους σταθμούς, η συχνότητα Doppler συνήθως δεν είναι πρόβλημα, επειδή το εύρος ζώνης είναι πολύ μεγαλύτερο από την ολίσθηση συχνότητας. Όμως, σε επικοινωνίες που περιλαμβάνουν επίγειους πομποδέκτες στενής ζώνης, το φαινόμενο Doppler παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο.