ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΚΑΙ ΖΕΥΞΕΙΣ

7ο Εξάμηνο

Σώζος Κώστας

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν Πανεπιστήμιον Αθηνών
ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837

Φαινόμενα διάδοσης

Η ποιότητα της δορυφορικής ζεύξης επηρεάζεται σημαντικά από το ασύρματο περιβάλλον διάδοσης και πρέπει να προβλεφθεί ο βαθμός της επίδρασης κάθε φαινομένου.

Καθώς το ραδιοκύμα διαπερνά τα διάφορα επίπεδα της ατμόσφαιρας, υπόκειται σε μία σειρά από μηχανισμούς εξασθένησης και μεταβολής των χαρακτηριστικών του. Υπάρχουν φαινόμενα που σχετίζονται με τον δείκτη διάθλασης, όπως η πολυδιαδρομική διάδοση και η σκέδαση, καθώς και απώλειες που προκαλούνται από βροχή, πάγο, σύννεφα, ομίχλη κλπ.

Ανάλογα με τη συχνότητα, το περιβάλλον διάδοσης θα προκαλέσει διαφορετική εξασθένηση, η οποία θα πρέπει να αντισταθμιστεί. Επιπλέον, τα δορυφορικά συστήματα αντιμετωπίζουν προβλήματα εξαιτίας του θορύβου από διάφορες κατηγορίες πηγών, καθώς και από την ολίσθηση συχνότητας, εξαιτίας του φαινομένου Doppler.

- Φαινόμενα Διάδοσης
  - Ιονόσφαιρα
  - Τροπόσφαιρα
- Μέθοδοι αντιστάθμισης

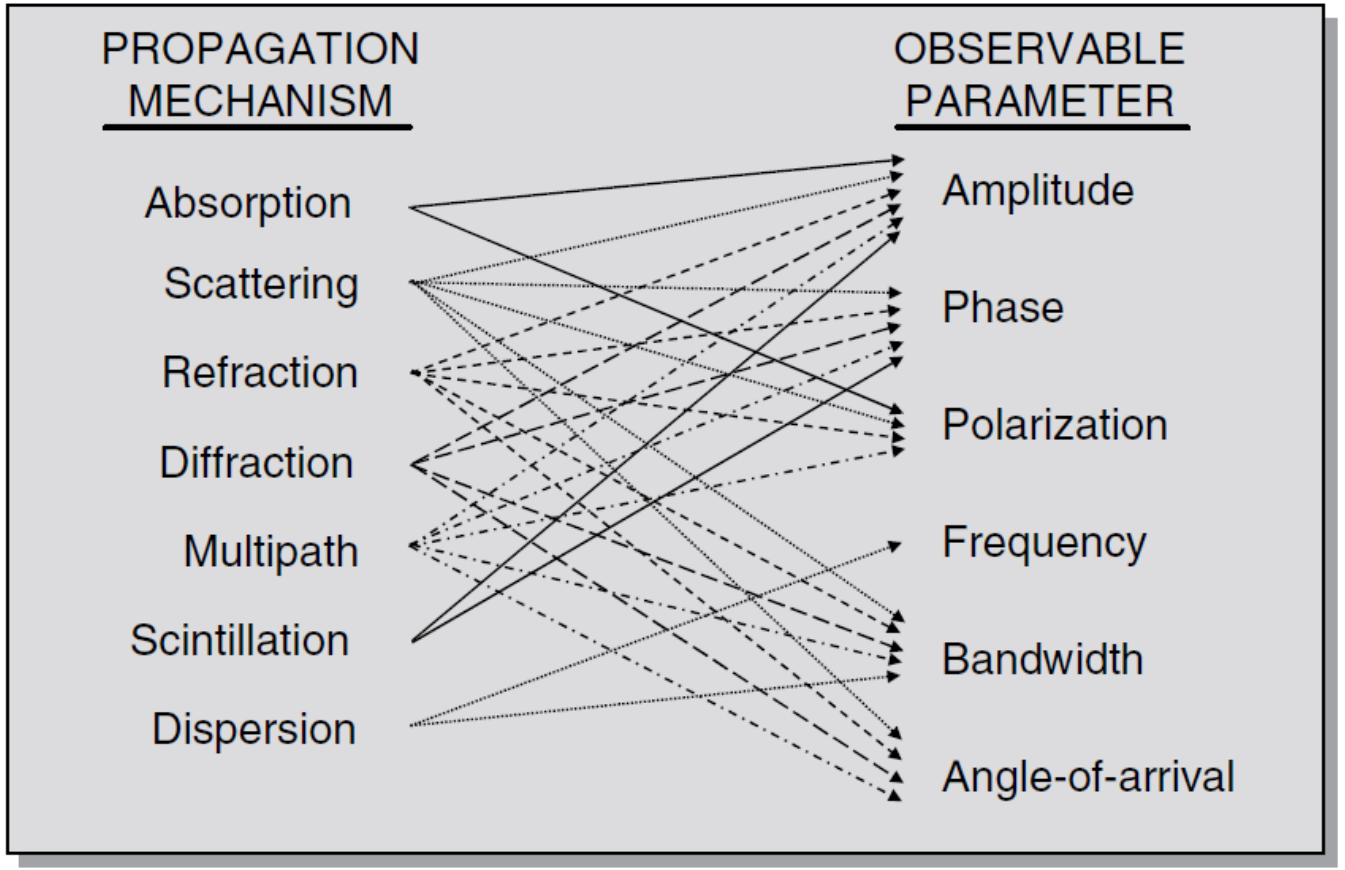
Βασικά φαινόμενα

• **Απορρόφηση**: 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**: η ενέργεια ενός ραδιοκύματος διαχέεται εξαιτίας ανομοιογενειών του μέσου διάδοσης.
• **Διάθλαση**: αλλαγή της κατεύθυνσης διάδοσης, η οποία προκύπτει από τις χωρικές διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης του μέσου διάδοσης.
• **Περίθλαση**: αλλαγή της διεύθυνσης διάδοσης, η οποία προκαλείται από την παρουσίαση ενός εμποδίου, μίας περιορισμένης διατομής ή εξαιτίας άλλου αντικειμένου του μέσου διάδοσης.
• **Διασπορά συχνότητας**: αλλαγή της συχνότητας και της φάσης στο εύρος ζώνης του ραδιοκύματος. 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**: 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**: διακυμάνσεις στο πλάτος που προκαλούνται από αλλαγές στο μέσο διάδοσης με τον χρόνο. Οι διαλείψεις περιγράφουν διακυμάνσεις που λαμβάνουν χώρα σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, ενώ ο σπινθηρισμός αναφέρεται σε γρηγορότερες διακυμάνσεις.

Μηχανισμοί διάδοσης και παρατηρήσιμες μεταβολές

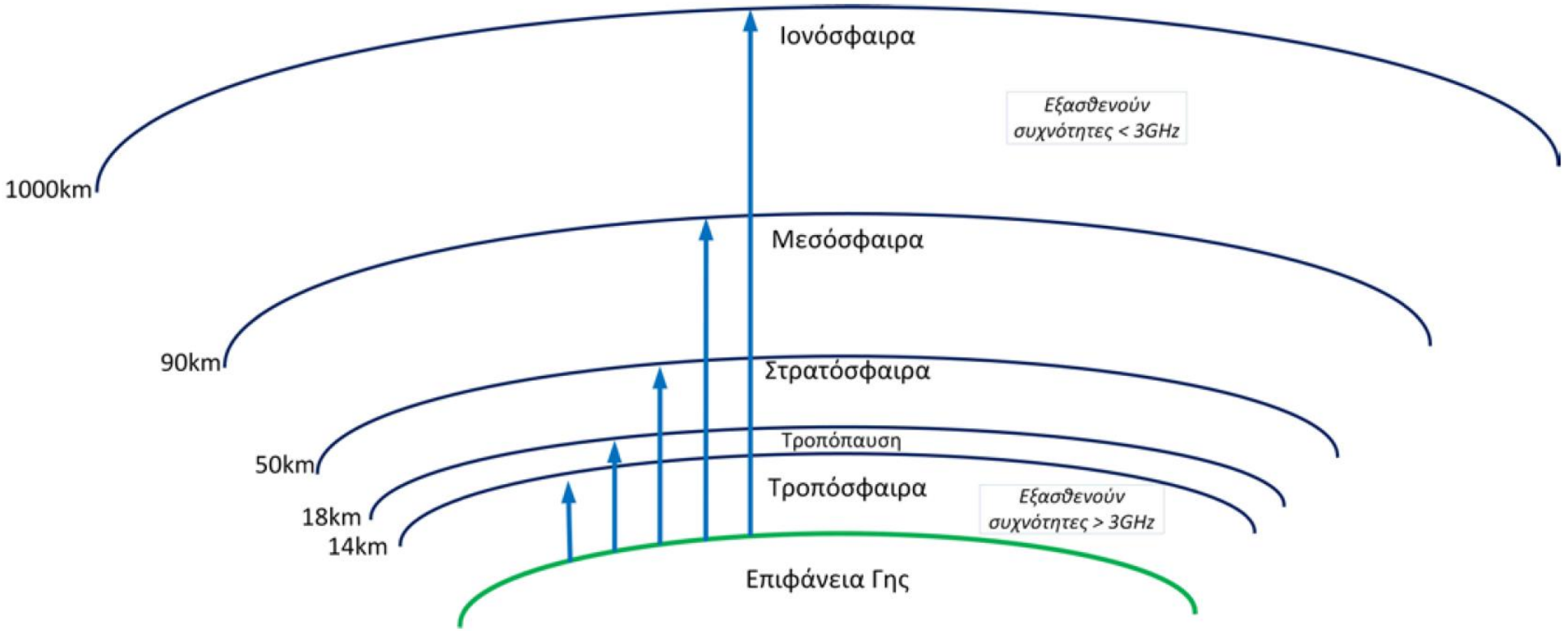
Οι επιδράσεις της διάδοσης ορίζονται συνήθως με βάση τις διακυμάνσεις των παραμέτρων του σήματος, επομένως ένας ή περισσότεροι μηχανισμοί μπορεί να επηρεάζουν την ίδια παράμετρο.

Η μείωση του πλάτους του σήματος που προκαλείται από τη βροχή στη διαδρομή είναι αποτέλεσμα τόσο της απορρόφησης όσο και της σκέδασης.



Διάδοση στην ατμόσφαιρα

Καθώς ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται στα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας, μία σειρά φαινομένων θα οδηγήσει στη μείωση της ενέργειάς του. 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.



Διάδοση στην Ιονόσφαιρα

Ένα ραδιοκύμα θα διαδοθεί από την επιφάνεια της γης στο διάστημα, υπό την **προϋπόθεση ότι η συχνότητά του είναι αρκετά υψηλή ώστε να διαπεράσει την ιονόσφαιρα**, η οποία είναι η ιονισμένη περιοχή που εκτείνεται από 90 χιλιόμετρα έως 400 χιλιόμετρα πάνω από την επιφάνεια της γης.

Οι διάφορες περιοχές (ή στρώματα) της ιονόσφαιρας, που ονομάζονται D, E και F, με σειρά αυξανόμενου υψομέτρου, λειτουργούν ως ανακλαστήρες ή απορροφητές ραδιοκυμάτων σε συχνότητες κάτω από περίπου 30 MHz και οι διαστημικές επικοινωνίες δεν είναι δυνατές. Καθώς αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας, οι ιδιότητες ανάκλασης των στρωμάτων E και F μειώνονται και το σήμα διαδίδεται. **Τα ραδιοκύματα άνω των 30 MHz θα διαδοθούν** μέσω της ιονόσφαιρας, ωστόσο, οι ιδιότητες του κύματος θα τροποποιηθούν/υποβαθμιστούν σε διαφορετικό βαθμό ανάλογα με τη συχνότητα, τη γεωγραφική θέση και την ώρα της ημέρας.

Οι επιδράσεις της ιονόσφαιρας τείνουν να γίνονται λιγότερο σημαντικές καθώς αυξάνεται η συχνότητα του κύματος, και **άνω των 3 GHz η ιονόσφαιρα είναι ουσιαστικά διαφανής** στις διαστημικές επικοινωνίες. Οι εφαρμογές δορυφορικών επικοινωνιών που λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων κάτω των 3 GHz περιλαμβάνουν:

- συνδέσεις χρηστών για κινητά δορυφορικά δίκτυα (χερσαία, αεροναυτικά και θαλάσσια)
- συνδέσεις χρηστών κινητής τηλεφωνίας μέσω δορυφόρου
- συνδέσεις εντολών και τηλεμετρίας που υποστηρίζουν τις δορυφορικές λειτουργίες
- επικοινωνίες στο βαθύ διάστημα

Διάδοση στην Ιονόσφαιρα (<3 GHz)

Η ιονόσφαιρα 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. Ο βαθμός επίδρασης της ιονόσφαιρας στην ακτινοβολία **εξαρτάται από τον ιονισμό υποβάθρου που ποσοτικοποιείται από τη συνολική συγκέντρωση ελεύθερων ηλεκτρονίων, total electron content (TEC).**

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 που οφείλονται στην ιονόσφαιρα είναι:

- η ενεργειακή απορρόφηση
- η στροφή πόλωσης
- η καθυστέρηση ομάδας
- η διασπορά

Ιονοσφαιρικός 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.**

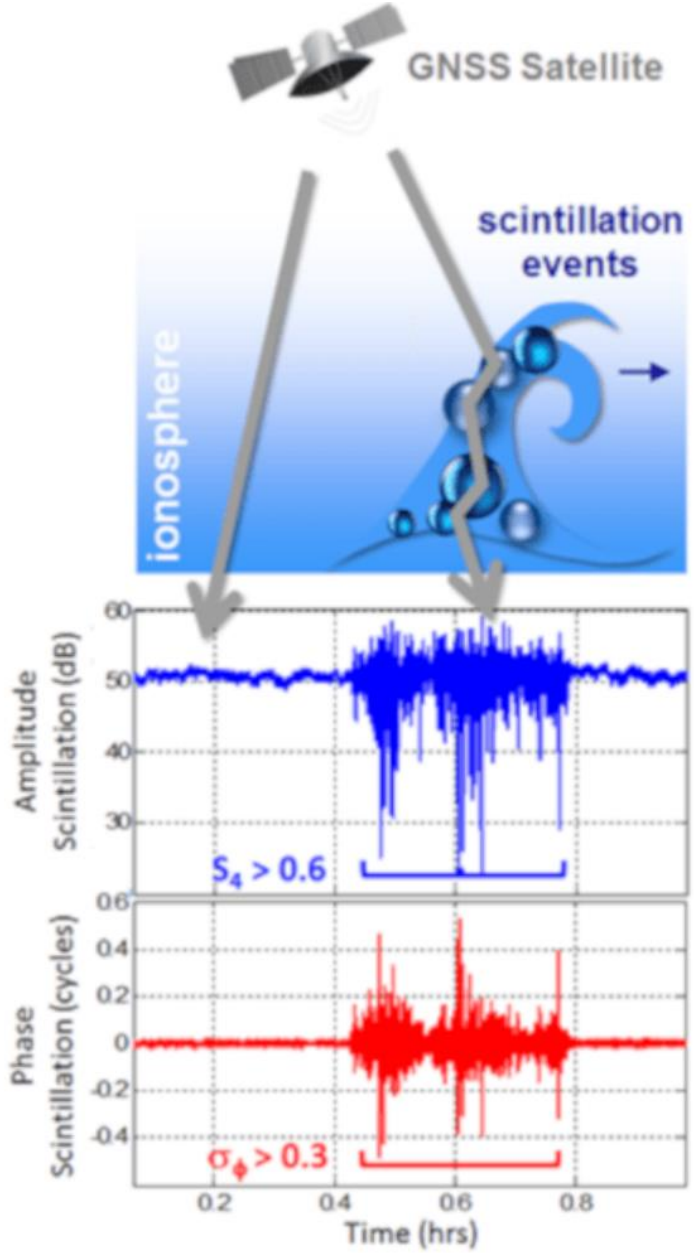
Στην ιονόσφαιρα το φαινόμενο του σπινθηρισμού συμβαίνει **εξαιτίας της διακύμανσης της συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων.** Τα ηλεκτρόνια προκαλούν **μικρής κλίμακας διάθλαση** στο μεταδιδόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα, **η οποία διαφέρει κατά τη διάρκεια της ημέρας**, καθώς, όταν υπάρχει ηλιοφάνεια, η ηλιακή 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.**

Ιονοσφαιρικός σπινθηρισμός

Το μεταδιδόμενο σήμα θα σκεδαστεί και θα ληφθεί στον δέκτη από δύο διαφορετικές διαδρομές, μία απευθείας διαδρομή και μία μέσω διάθλασης. 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 μετάδοσης, είναι αντιστρόφως ανάλογη. Άρα, σε χαμηλές συχνότητες ο σπινθηρισμός θα είναι ισχυρός συγκριτικά με τη μετάδοση σε συχνότητες άνω των 3 GHz. 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.



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

$$\Theta\ (\mathrm{rad}) \approx 2.3648 \times 10^4\ \frac{B_{\parallel}\ \mathrm{TEC}}{f^2}$$

όπου θ είναι η γωνία της στροφής πόλωσης εξαιτίας της επίδρασης της στροφής Faraday, B η μέση τιμή του γήινου μαγνητικού πεδίου σε Wb/m_2, f η συχνότητα του ραδιοκύματος και TEC η συνολική συγκέντρωση ηλεκτρονίων σε el/m_2.

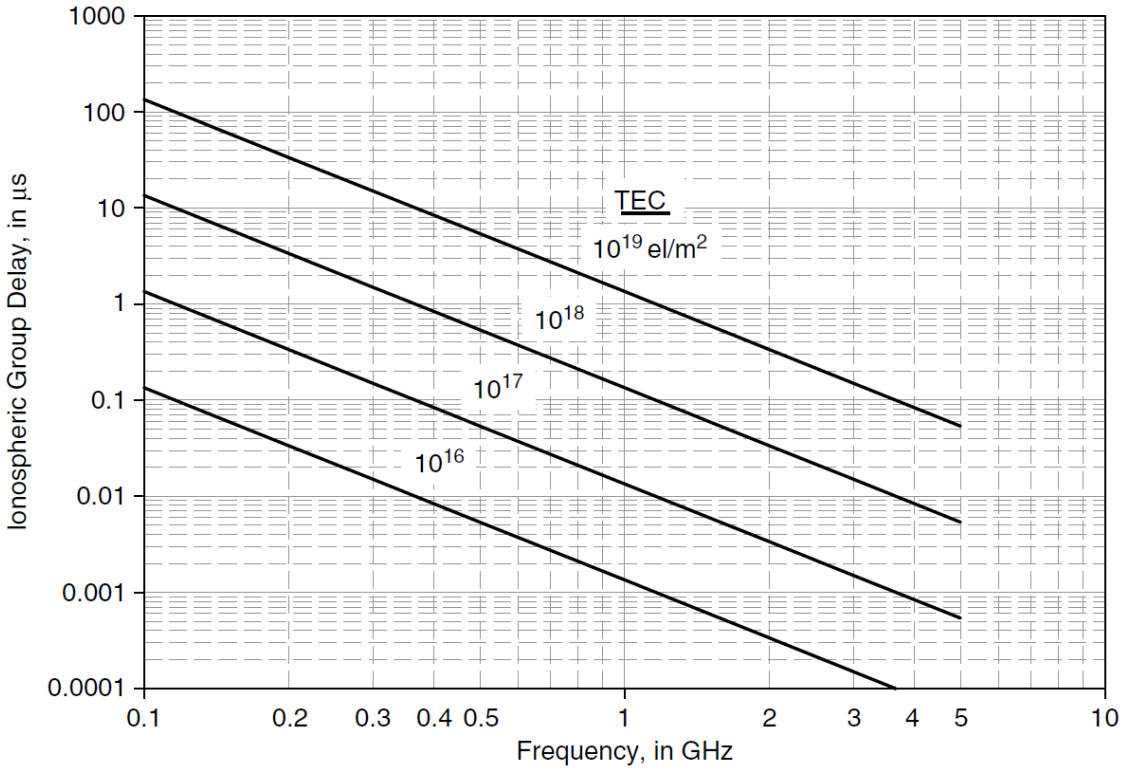
Καθώς η στροφή πόλωσης είναι ανάλογη της συγκέντρωσης ηλεκτρονίων και της μέσης τιμής του μαγνητικού πεδίου, η συμπεριφορά της μπορεί να προβλεφθεί, καθώς εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία. Έτσι, **με τροποποίηση των επίγειων κεραιοσυστημάτων είναι δυνατή η εξομάλυνση της επίδρασης Faraday**. Ωστόσο, σε περιόδους μαγνητικών καταιγίδων και μεγάλων ιονοσφαιρικών απωλειών, η επίδραση Faraday μπορεί να μην είναι εύκολο να εξομαλυνθεί.

Καθυστέρηση ομάδας

Ως καθυστέρηση ομάδας (group delay) 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:

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

όπου t είναι η ιονοσφαιρική καθυστέρηση ομάδας σε σχέση με την περίπτωση διάδοσης στο απόλυτο κενό, υπολογισμένη σε δευτερόλεπτα, f η συχνότητα του ραδιοκύματος σε GHz και N_T η συγκέντρωση ηλεκτρονίων σε el/m$_2$.



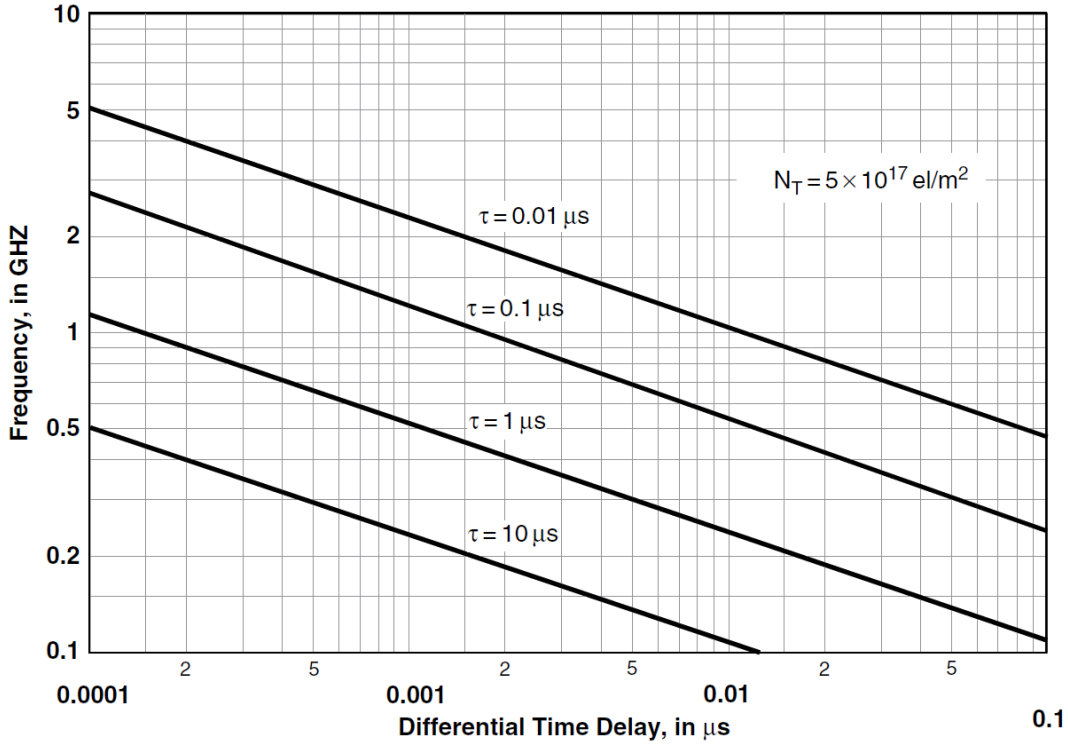
Διασπορά

Όταν ένα ραδιοκύμα με μεγάλο εύρος ζώνης διαδίδεται μέσω της ιονόσφαιρας, **η καθυστέρηση διάδοσης, η οποία είναι συνάρτηση της συχνότητας, εισάγει διασπορά, δηλαδή τη διαφορά στην χρονική καθυστέρηση μεταξύ των χαμηλότερων και των υψηλότερων συχνοτήτων του φάσματος** του μεταδιδόμενου σήματος. Το αποτέλεσμα της διασποράς είναι η εισαγωγή παραμόρφωσης στα ευρυζωνικά σήματα.

$$\Delta\tau \sim N_T \frac{1}{\tau f^3}$$

Το εύρος ζώνης συνοχής **(coherence bandwidth) ορίζεται ως το ανώτατο όριο του εύρους ζώνης του καναλιού που μπορεί να υποστηριχθεί** από ένα ραδιοκύμα, το οποίο υπόκειται στις διασκορπιστικές ιδιότητες της ατμόσφαιρας ή στη διάδοση μέσω πολλαπλών διαδρομών.

Το εύρος ζώνης συνοχής που προκαλείται από τη διασπορά της ιονόσφαιρας δεν αποτελεί συνήθως παράγοντα ανυσηχίας, καθώς το βιώσιμο εύρος ζώνης υπερβαίνει κατά πολύ τις δυνατότητες εύρους ζώνης που μπορεί να υποστηρίξει το RF φέρον. Το εύρος ζώνης συνοχής που οφείλεται σε όλες τις ατμοσφαιρικές αιτίες **για συχνότητες >10 GHz είναι >1 GHz** και δεν αποτελεί πρόβλημα, εκτός από multi-gigabit ζεύξεις.



Διάδοση στην τροπόσφαιρα (>3 GHz)

Πολλές δορυφορικές επικοινωνιακές συνδέσεις λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων άνω των 3 GHz, συμπεριλαμβανομένων των ζωνών C, Ku, Ka και V.

Οι δορυφορικές εφαρμογές που λειτουργούν σε αυτές τις ζώνες συχνοτήτων περιλαμβάνουν:
- ζεύξεις χρηστών σταθερών δορυφορικών υπηρεσιών (FSS)
- ζεύξεις χρηστών κατερχόμενης ζεύξης δορυφορικών υπηρεσιών ραδιοτηλεοπτικών εκπομπών (BSS)
- ευρυζωνικές ζεύξεις δεδομένων
- στρατιωτικές επικοινωνιακές ζεύξεις.

Η τροπόσφαιρα είναι η κύρια πηγή παρεμβολών στη μετάδοση των δορυφορικών επικοινωνιών που λειτουργούν σε αυτές τις ζώνες.

Τροποσφαιρικός σπινθηρισμός

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:

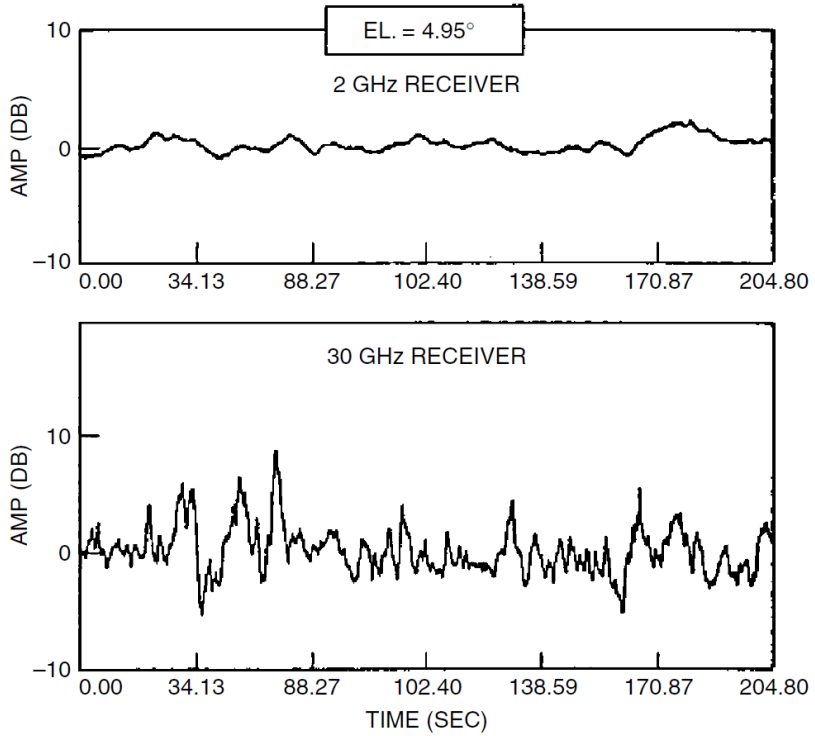
$$N = (n-1)\times 10^6 = \frac{77,6}{T}\left(p + 4.810\frac{e}{T}\right)$$

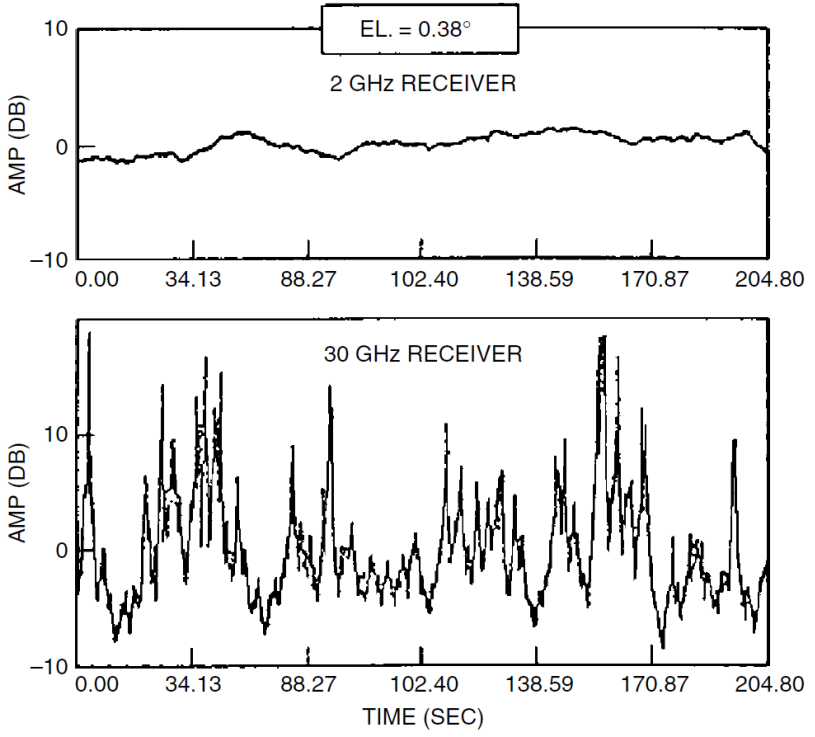
όπου p είναι η ατμοσφαιρική πίεση σε millibars (mb), e είναι η πίεση των υδρατμών σε mb και T είναι η θερμοκρασία σε βαθμούς K.

Η βασική μορφή σπινθηρισμού αφορά το πλάτος του μεταδιδόμενου σήματος.

Τροποσφαιρικός σπινθηρισμός

- Οι υψηλότερες συχνότητες έχουν **μικρότερα μήκη κύματος, επομένως είναι πιο ευαίσθητες σε μικρές διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης.**
- Ο σπινθηρισμός **αυξάνεται καθώς μειώνεται η γωνία ανύψωσης**, επειδή **αυξάνεται το μήκος αλληλεπίδρασης της διαδρομής**. Τα φαινόμενα σπινθηρισμού αυξάνονται δραματικά καθώς η γωνία ανύψωσης πέφτει κάτω από 5◦.
- Σε εύκρατα κλίματα, παίρνει τιμές ~1 dB peak-to-peak σε καθαρό ουρανό το καλοκαίρι, ~0.3 dB το χειμώνα και ~5 dB σε συνθήκες συννεφιάς.
- Σε γωνίες ανύψωσης κάτω από 5◦), παρατηρούνται βαθιές διακυμάνσεις ~20 dB, με διάρκεια μερικών δευτερολέπτων.





Απώλειες εξαιτίας της απορρόφησης αερίων

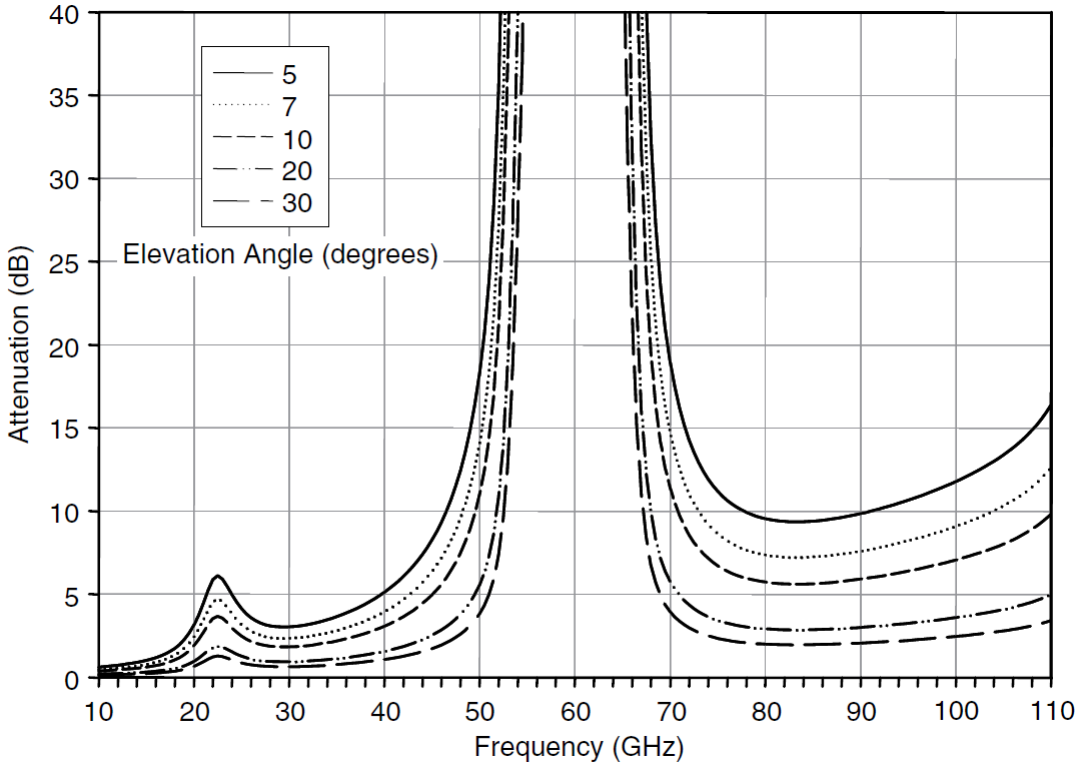
Κατά τη μετάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος στην τροπόσφαιρα, **η ενέργειά του μετατρέπεται σε θερμότητα, καθώς απορροφάται από τα αέρια** που βρίσκονται εκεί. Σε συχνότητες μικρότερες των 15GHz αυτή η απορρόφηση ενέργειας, η οποία οφείλεται στην ύπαρξη οξυγόνου και υδρατμών, δεν έχει τόσο μεγάλη επίδραση.

Για συγκεκριμένες συχνότητες λειτουργίας η απορρόφηση ενέργειας μεγιστοποιείται, όπως συμβαίνει **στη συχνότητα των 22 GHz 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.

Απώλειες εξαιτίας της απορρόφησης αερίων

Υπάρχουν δύο ζώνες συχνοτήτων, για τις οποίες η επίδραση της ενεργειακής απορρόφησης ελαχιστοποιείται. Η πρώτη εμφανίζεται στο διάστημα 0.5-20 GHz και η δεύτερη στα 26-50GHz. 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. Οι συχνότητες 20-25 και 50-70 GHz μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνίες μεταξύ δορυφόρων.

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.



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,** με βάση τις οδηγίες της ITU. 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:

$$L_{rain}\left(dB\right) = \gamma_R L_R$$

όπου γ_R είναι η ειδική απόσβεση λόγω βροχής σε μονάδες dB/km και L_R είναι το ενεργό μήκος της διαδρομής υπό βροχή σε *km*.

Απώλειες Βροχής

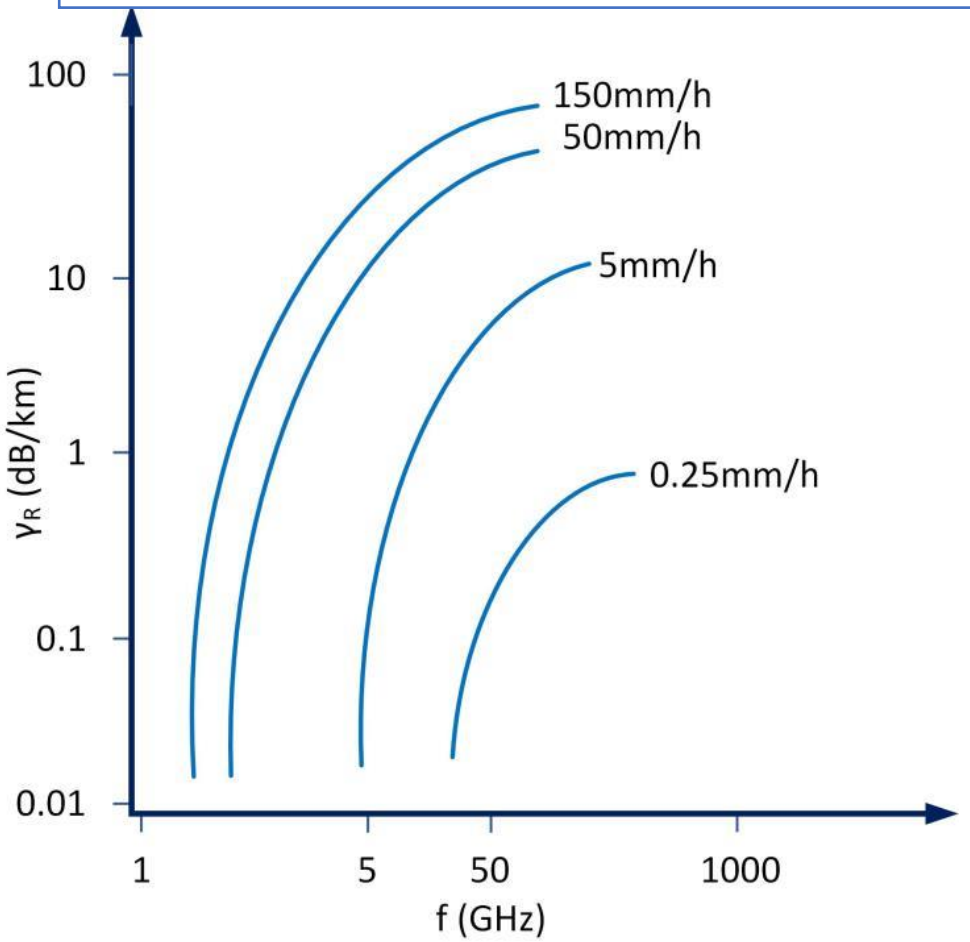
Η τιμή του γ_R εξαρτάται από τη συχνότητα και τον ρυθμό βροχόπτωσης R_p(mm/h). Το αποτέλεσμα είναι μία τιμή εξασθένησης, η οποία ξεπερνιέται κατά τη διάρκεια ενός ποσοστό του χρόνου και δίνεται από:

$$\gamma_R \left(dB / km \right) = a \cdot R^b$$

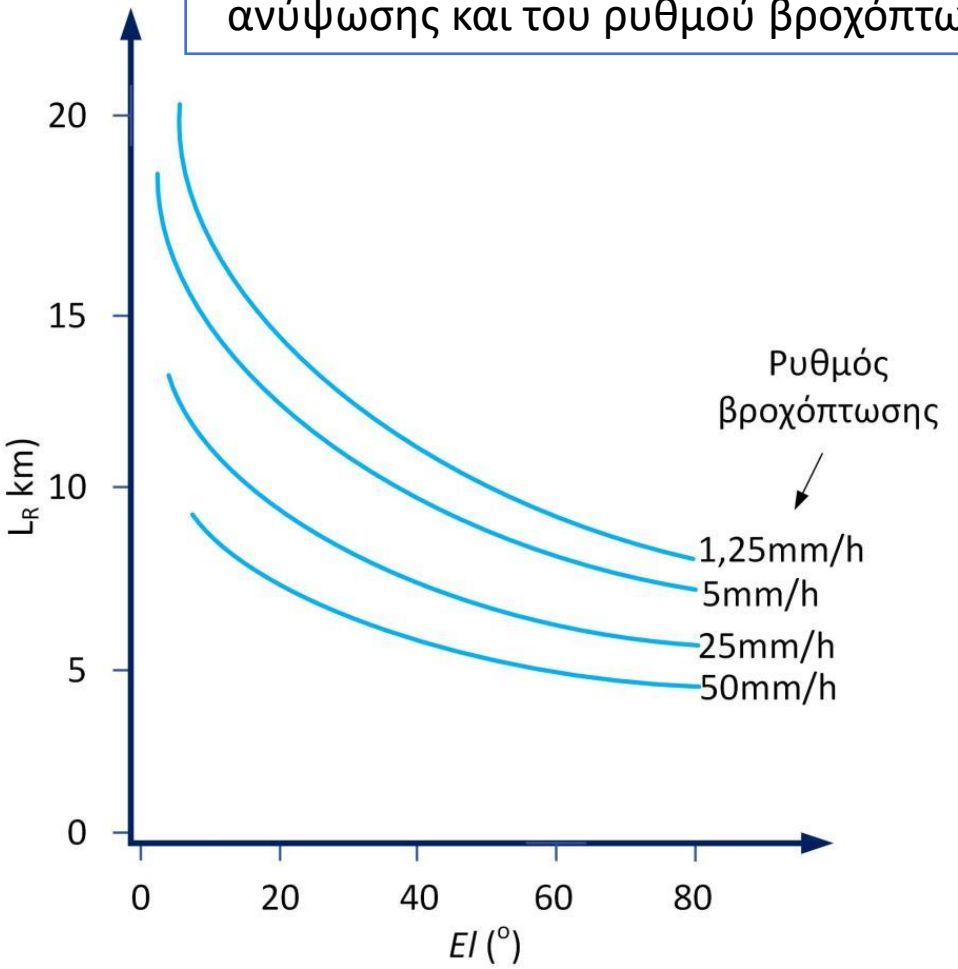
όπου R είναι ο ρυθμός της βροχόπτωσης σε μονάδες mm/h , ο οποίος είτε μετράται σε πραγματικό χρόνο είτε δίνονται τυπικές τιμές του για κάθε περιοχή της Γης, σε ειδικούς πίνακες της ITU. Τα a, b είναι παράμετροι του προτύπου που υπολογίζονται, έτσι ώστε η συνάρτηση του γ_R να προσεγγίζει τα πραγματικά 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 γ_R από γράφημα με βάση τη συχνότητα του φέροντος και το ύψος βροχόπτωσης, καθώς και το ενεργό μήκος υπό βροχή L_R, κάνοντας χρήση και της γωνίας ανύψωσης του ραδιοσήματος.**

Απώλειες Βροχής

Ειδική απόσβεση ως συνάρτηση της συχνότητας και του ρυθμού βροχόπτωσης



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



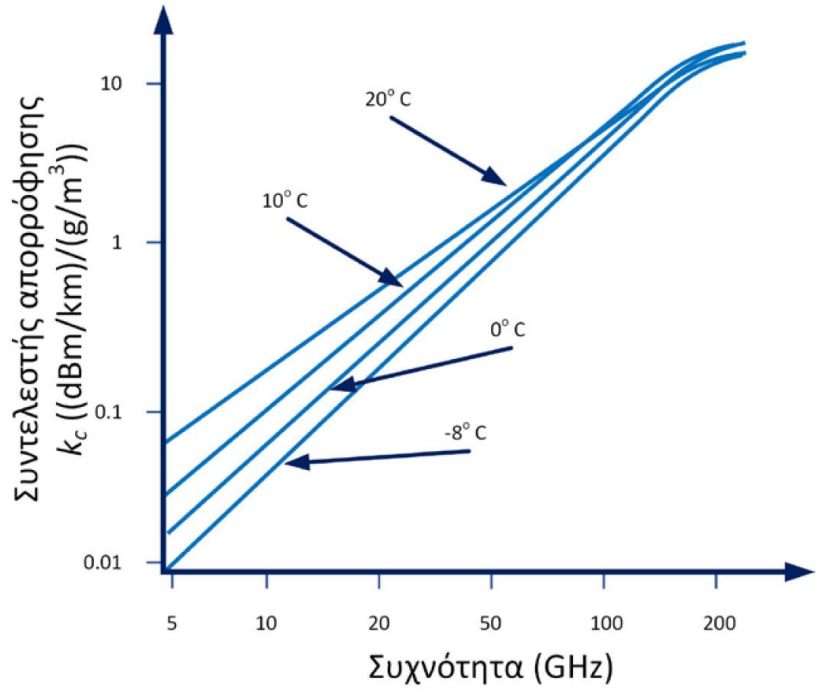
Εξασθένηση εξαιτίας νεφώσεων και ομίχλης

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 0.1 mm, ενώ, αντίθετα, τα σταγονίδια της βροχής έχουν διάμετρο από 0.1 μέχρι 10 mm. Η απόσβεση εξαιτίας της ομίχλης είναι πολύ χαμηλή για δορυφορικά συστήματα με συχνότητες λειτουργίας μικρότερες των 50 GHz.

Η πυκνότητα του νερού της ομίχλης είναι μικρότερη από $0.1 g/m^3$ και επιτρέπει ορατότητα μεγαλύτερη των 100 m, ενώ για χαμηλότερες τιμές ορατότητας, η πυκνότητα του νερού είναι περίπου $0.5 g/m^3$. 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 50 GHz.
Στα σύννεφα, η πυκνότητα του νερού κυμαίνεται από 0.05 μέχρι $2 g/m^3$, ενώ σε περιπτώσεις καταιγίδας μπορεί να υπερβεί τα $5 g/m^3$. Για τον υπολογισμό της απόσβεσης εξαιτίας των νεφώσεων χρησιμοποιείται η εξίσωση (σε dB/km):

$$\gamma_{cloud} = k_c M$$

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.

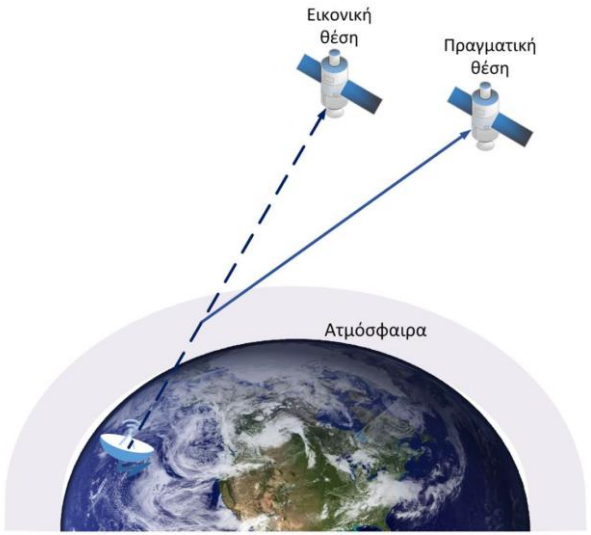


Απώλειες εξαιτίας ατμοσφαιρικών διαθλάσεων

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.

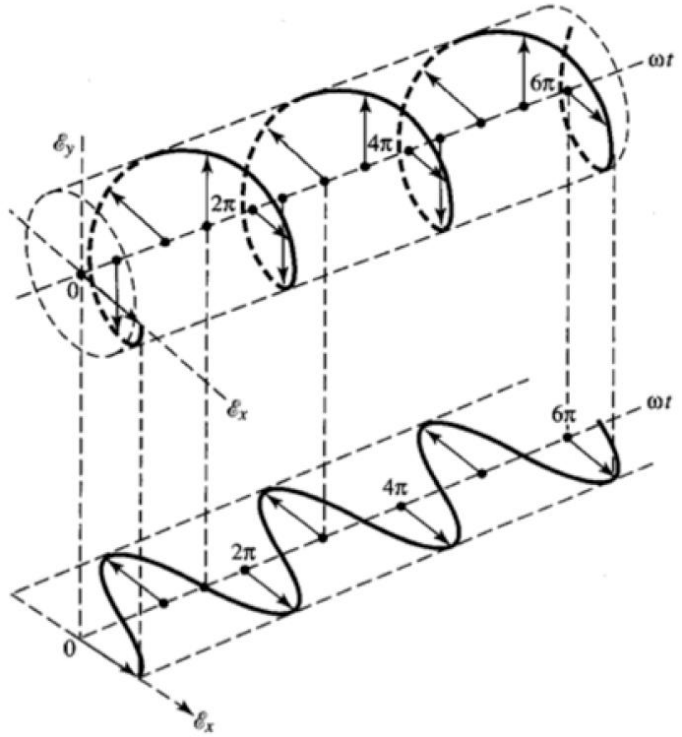
Καθώς η Γη θερμαίνεται από τον Ήλιο, προκαλείται σημαντική δραστηριότητα στον χώρο της τροπόσφαιρας από τις στήλες αερίων που αναμιγνύονται. Έτσι, υπάρχουν διάφοροι δείκτες διάθλασης σε διαφορετικά σημεία της τροπόσφαιρας, προκαλώντας την αλλαγή κατεύθυνσης του μεταδιδόμενου κύματος.
Αυτή η αλλαγή κατεύθυνσης προκαλεί διακύμανση στα επίπεδα της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος, εξαιτίας της αλλαγής της φαινόμενης θέσης του δορυφόρου.

Η συνεχής αλλαγή της φαινόμενης θέσης, η οποία οφείλεται στα μεταβαλλόμενα ατμοσφαιρικά φαινόμενα, **προκαλεί διαλείψεις** στις δορυφορικές επικοινωνίες.



Πόλωση

Πόλωση μίας κεραίας σε μία ορισμένη διεύθυνση ορίζεται ως η πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που ακτινοβολεί η κεραία στη συγκεκριμένη διεύθυνση. Για λειτουργία δέκτη, η πόλωση της κεραίας σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση αναφέρεται στην πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που προσπίπτει στην κεραία από αυτήν την κατεύθυνση και προκαλεί τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ στους ακροδέκτες της. Στη γενική περίπτωση, μία κεραία εκπέμπει κύματα συγκεκριμένων πολώσεων ανάλογα με την κατασκευή της και τον τρόπο με τον οποίο το ηλεκτρικό ρεύμα ταλαντώνεται στο εσωτερικό της.



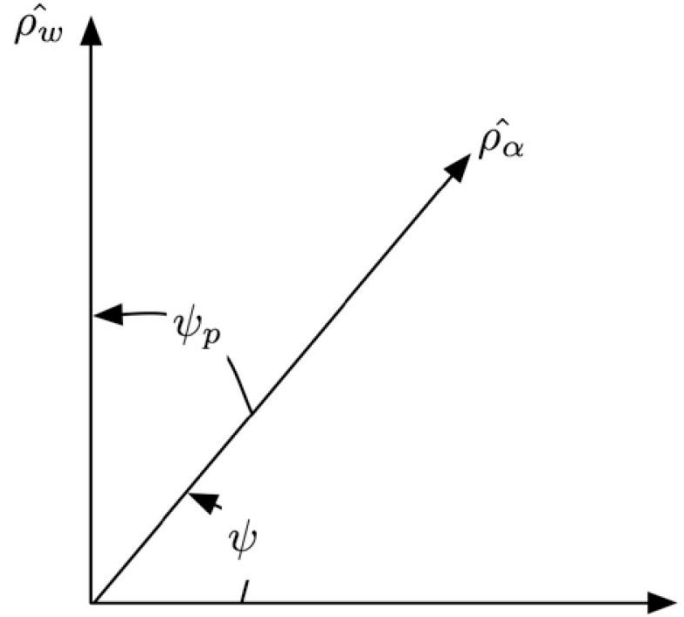
Πόλωση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε ένα σημείο του χώρου ονομάζεται η καμπύλη που διαγράφει το άκρο του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου ως συνάρτηση του χρόνου. Στη γενική περίπτωση, η καμπύλη αυτή είναι μία έλλειψη, οπότε μιλάμε για ελλειπτική πόλωση. Αν οι δύο άξονες της έλλειψης είναι ίσοι, τότε έχουμε κυκλική πόλωση, ενώ, αν ο ένας άξονας είναι πολύ μεγαλύτερος από τον άλλο ή ο ένας άξονας είναι μηδενικός, τότε έχουμε γραμμική πόλωση. Επίσης, αν κατά την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος η διαγραφή της έλλειψης γίνεται κατά την ωρολογιακή φορά, η πόλωση ονομάζεται δεξιόστροφη, ενώ αν γίνεται κατά την ανθωρολογιακή φορά ονομάζεται αριστερόστροφη.

Πόλωση

Γενικά, η πόλωση μιας κεραίας σε λειτουργία δέκτη δεν ταυτίζεται με την πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, το οποίο προσπίπτει σε αυτήν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ισχύς που λαμβάνει η κεραία να μην είναι η μέγιστη δυνατή. Αν το προσπίπτον στην κεραία κύμα είναι πολωμένο κατά την κατεύθυνση ρ_α , ενώ η πόλωση της κεραίας είναι κατά την κατεύθυνση ρ_w, οι απώλειες που συνεπάγεται η μη ευθυγράμμιση των δύο πολώσεων λαμβάνονται υπόψιν μέσω του παράγοντα απωλειών πόλωσης (polarization loss factor, PLF), που ορίζεται από την εξίσωση:

$$PLF = \left|\hat{\rho}_w \cdot \hat{\rho}_a\right|^2 = \left|\cos\psi_p\right|^2$$

Η μέγιστη τιμή του PLF είναι ίση με 1 και επιτυγχάνεται, όταν υπάρχει πλήρης ευθυγράμμιση των δύο πολώσεων, ενώ η ελάχιστη τιμή του PLF είναι ίση με 0, όταν οι δύο πολώσεις είναι κάθετες μεταξύ τους. Οι απώλειες εξαιτίας μη προσαρμογής των δύο πολώσεων θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη σε υπολογισμούς δορυφορικών ζεύξεων, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου κρίσιμη παράμετρος είναι η ισχύς λήψης.



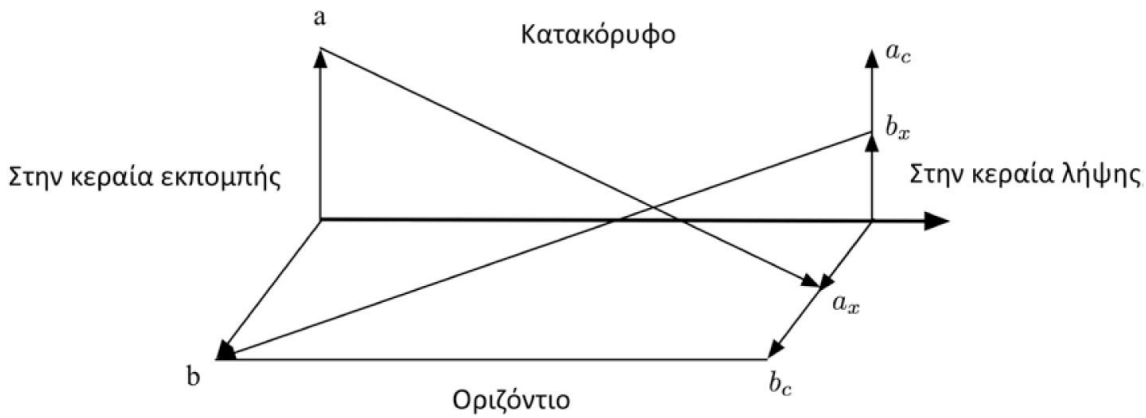
Αποπόλωση

Δύο κύματα είναι σε ορθογωνική πόλωση, αν τα ηλεκτρικά τους πεδία περιγράφουν πανομοιότυπες ελλείψεις σε αντίθετες διευθύνσεις.

- Δύο ορθογωνικές κυκλικές πολώσεις, που περιγράφονται ως δεξιόστροφη κυκλική και αριστερόστροφη κυκλική (η φορά περιστροφής είναι για έναν παρατηρητή που βλέπει προς τη διεύθυνση μετάδοσης).
- Δύο ορθογωνικές γραμμικές πολώσεις, που περιγράφονται ως οριζόντια και κατακόρυφη (σε σχέση με μία κατεύθυνση αναφοράς).

Μία κεραία, η οποία σχεδιάζεται να εκπέμπει ή να λαμβάνει ένα κύμα μιας δεδομένης πόλωσης, δεν μπορεί ούτε να εκπέμψει, ούτε να λάβει την ορθογωνική πόλωση της πόλωσης λειτουργίας της. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει τη **λειτουργία δύο ταυτόχρονων ραδιοζεύξεων στην ίδια συχνότητα και μεταξύ των ίδιων δύο τοποθεσιών, διαδικασία που περιγράφεται ως επαναχρησιμοποίηση συχνότητας μέσω ορθογωνικής πόλωσης.**

Για να επιτευχθεί αυτό, είτε πρέπει να υπάρχουν δύο πολωμένες κεραίες σε κάθε τοποθεσία είτε μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια κεραία, η οποία λειτουργεί με τις δυο καθορισμένες πολώσεις. Αυτή η πρακτική, όμως, πρέπει να λάβει υπόψη τις ατέλειες των κεραιών και **την πιθανή αποπόλωση των κυμάτων από το μέσο μετάδοσης. Αυτές οι επιδράσεις έχουν ως αποτέλεσμα την αμοιβαία παρεμβολή μεταξύ των δυο ραδιοζεύξεων.**



Αποπόλωση

Έστω a και b τα μέτρα, που υποτίθεται ότι είναι ίσα, του ηλεκτρικού πεδίου των δύο κυμάτων, τα οποία εκπέμπονται ταυτόχρονα με γραμμική πόλωση, a_c και b_c τα πλάτη που λαμβάνονται με την ίδια πόλωση και a_x και b_x τα λαμβανόμενα πλάτη με ορθογωνική πόλωση. Ορίζονται τα εξής:

- Η απομόνωση λόγω ορθογωνικής πόλωσης:

$$XPI\left(dB\right)=20\log\left(\frac{a_c}{b_x}\right) \text{ ή } XPI\left(dB\right)=20\log\left(\frac{b_c}{a_x}\right)$$

- Ο διαχωρισμός λόγω ορθογωνικής πόλωσης (όταν εκπέμπεται μία μόνο πόλωση), ώστε: $XPD\left(dB\right)=20\log\left(\frac{a_c}{a_x}\right)$

Οι τιμές των XPI και XPD μεταβάλλονται ως συνάρτηση της διεύθυνσης μετάδοσης σε σχέση με τη διεύθυνση ακτινοβολίας της κεραίας. Ουσιαστικά, ο **λόγος XPD εκφράζει τι ποσοστό του σήματος σε μία δεδομένη πόλωση σκεδάζεται στην αντίθετη πόλωση μόνο λόγω του μέσου μετάδοσης**, ενώ ο **λόγος XPI δείχνει κατά πόσο δύο σήματα σε αντίθετες πολώσεις, που μεταδίδονται ταυτόχρονα, θα παρεμβάλλουν μεταξύ τους στον δέκτη**.

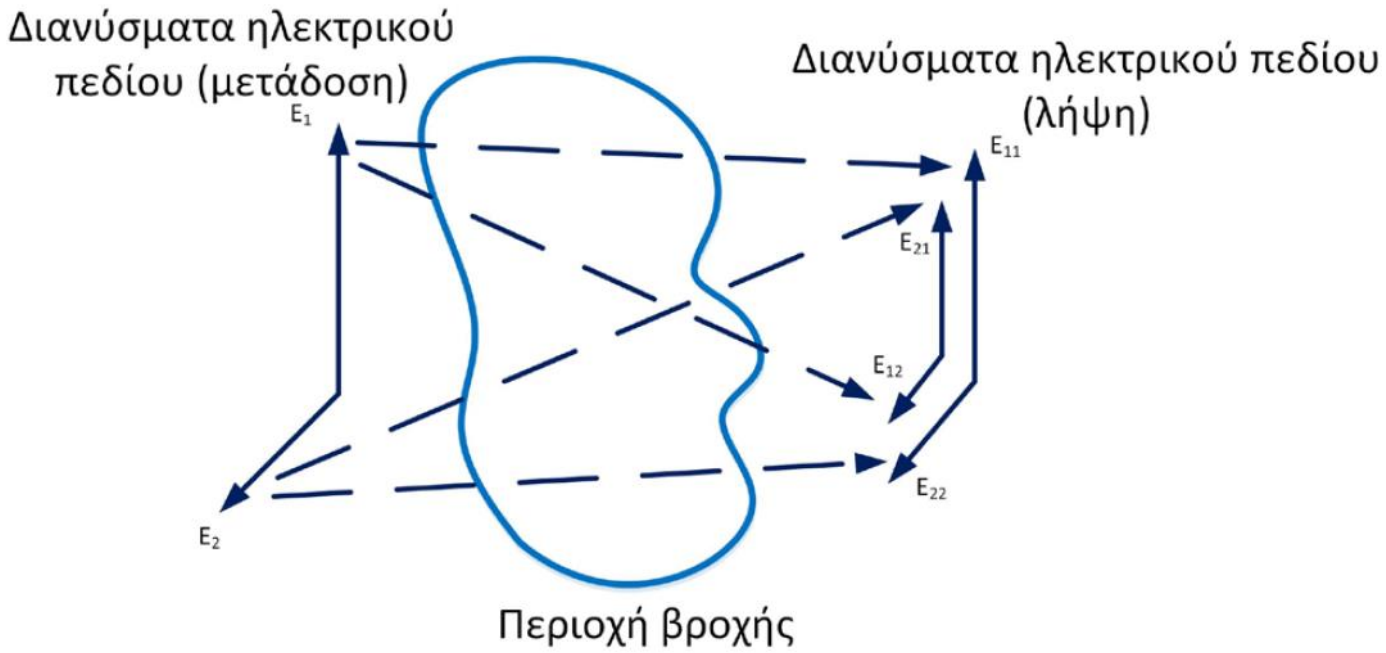
Αποπόλωση εξαιτίας βροχής και πάγου

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.

Αποπόλωση εξαιτίας βροχής και πάγου

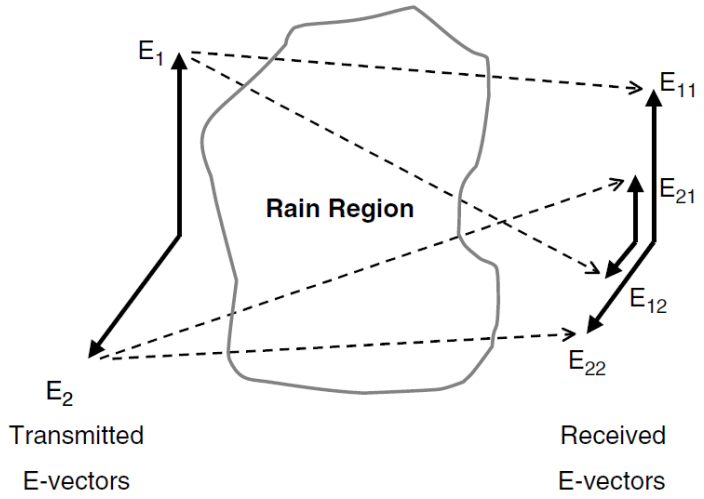
Στο σχήμα απεικονίζεται η επίδραση της αποπόλωσης αναφορικά με τα διανύσματα του ηλεκτρικού πεδίου σε μία γραμμικά πολωμένη μετάδοση. Τα διανύσματα Ε1 και Ε2 είναι τα μεταδιδόμενα ορθογώνια κύματα, τα οποία παρέχουν δύο ανεξάρτητα μεταδιδόμενα σήματα. Μετά την επίδραση του μέσου διάδοσης, τα μεταδιδόμενα κύματα θα ληφθούν ως διάφορες συνιστώσες, όπως φαίνεται στα δεξιά.

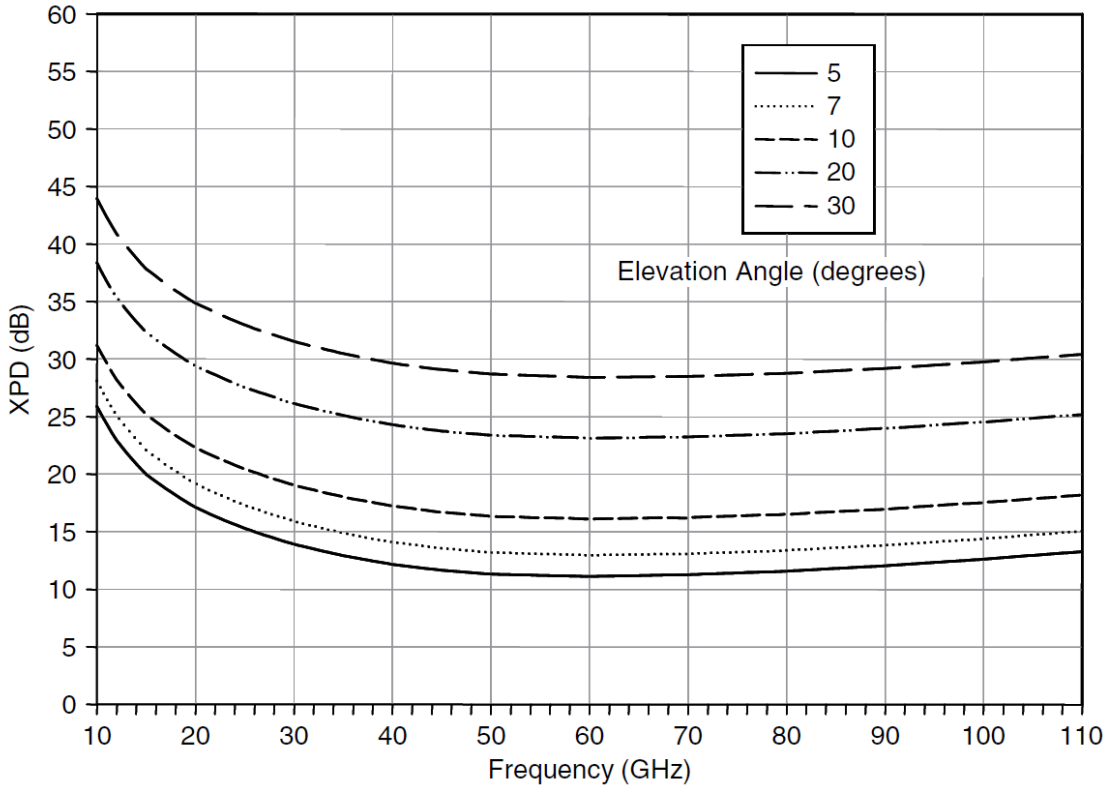


Αποπόλωση εξαιτίας βροχής και πάγου

Η διασταύρωση πολώσεων, XPD, ορίζεται για τα γραμμικά πολωμένα κύματα ως:

$$XPD_1 = 20 \log \frac{|E_{11}|}{|E_{12}|} \qquad XPD_2 = 20 \log \frac{|E_{22}|}{|E_{21}|}$$



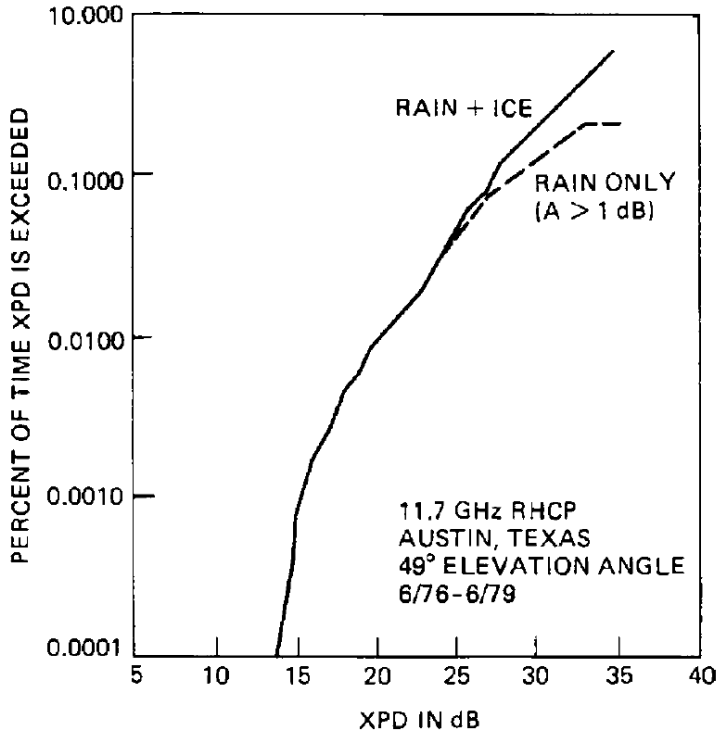


Τα E11 και E22 είναι τα ληφθέντα ηλεκτρικά πεδία στις συν-πολωμένες (επιθυμητές) κατευθύνσεις 1 και 2, αντίστοιχα, και τα E12 και E21 είναι τα ηλεκτρικά πεδία που μετατρέπονται στις ορθογώνιες διασταυρούμενες πολωμένες (ανεπιθύμητες) κατευθύνσεις 1 και 2.

Αποπόλωση εξαιτίας βροχής και πάγου

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 1 mm και η συγκέντρωσή τους κυμαίνεται από 10^3 μέχρι 10^6 κρυστάλλους/m3.



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.

Radio Noise

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.

Γήινες πηγές θορύβου	**Εξωγήινες πήγες 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

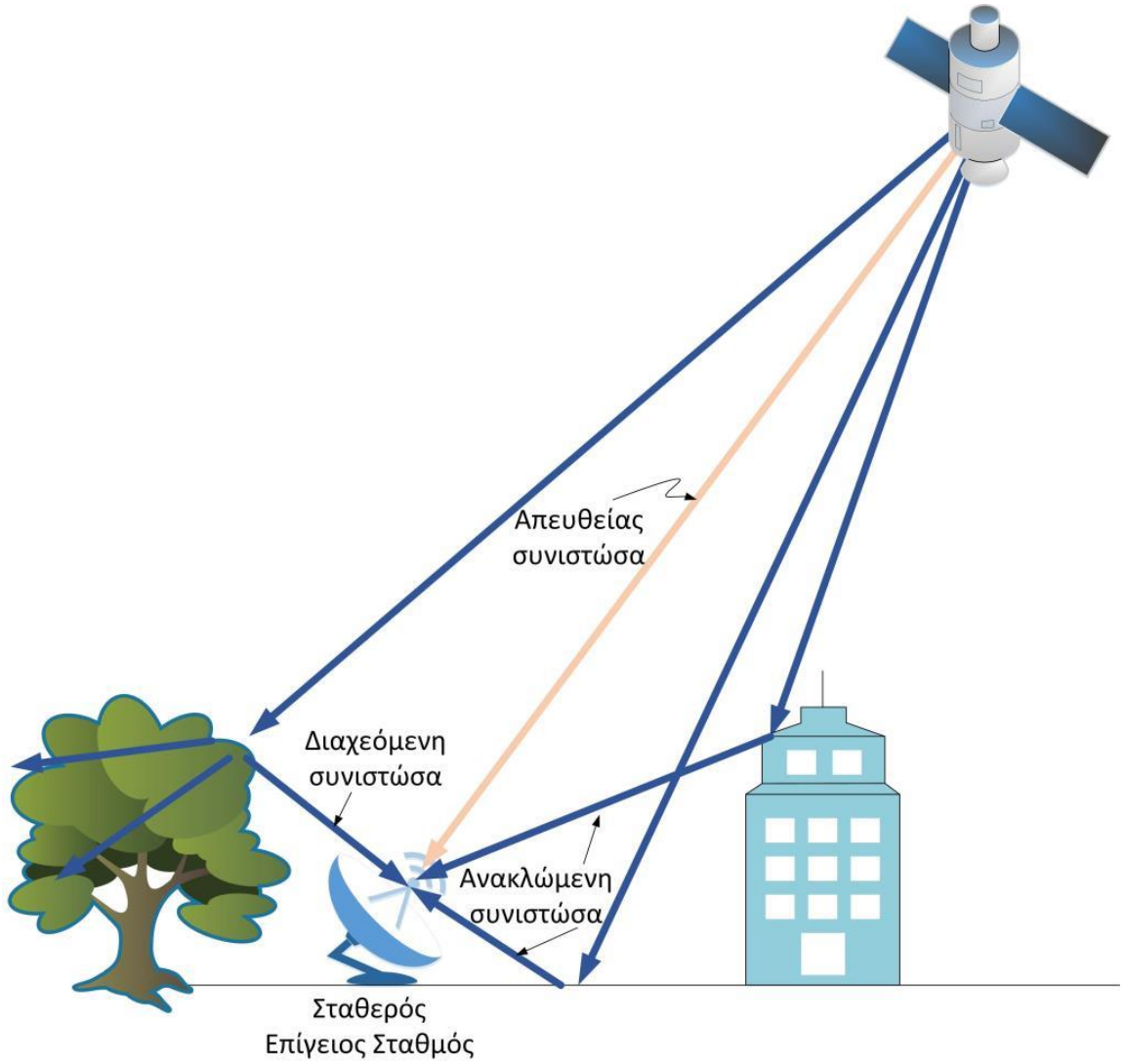
Radio Noise

Πιο συγκεκριμένα, οι γήινες πηγές θορύβου σχετίζονται με την αλληλεπίδραση του μεταδιδόμενου κύματος με τα ατμοσφαιρικά αέρια και τα υδρομετέωρα, καθώς και την ακτινοβολία, η οποία ανακλάται στο έδαφος της Γης. Αναφορικά με τον ουράνιο θόρυβο, που οφείλεται στη βροχή, προστίθεται απευθείας στον θόρυβο του δέκτη και προκαλεί μείωση της επίδοσης του δορυφορικού συστήματος. Ακόμη, **η αύξηση της ισχύος του θορύβου συμπίπτει με τη μείωση της ισχύος του σήματος εξαιτίας των απωλειών λόγω βροχής, δημιουργώντας προσθετική επίδραση** και συνεισφέροντας στη μείωση του λόγου ισχύος σήματος προς θόρυβο.

Για τις εξωγήινες πηγές θορύβου λαμβάνονται υπόψη διάφορα ουράνια σώματα. Ο θόρυβος επηρεάζει την άνω και κάτω ζεύξη του δορυφορικού συστήματος και η ισχύς του εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας του δορυφορικού συστήματος και σε συστήματα με συχνότητες άνω των 2GHz λαμβάνονται υπόψη μόνο η επίδραση από τον ήλιο, τη σελήνη, καθώς και από ορισμένες ισχυρές μη-θερμικές πηγές, όπως τα άστρα Κασσιόπη Α, Κύκνος Α και Χ.

Τέλος, ο θόρυβος που οφείλεται στον ανθρώπινο παράγοντα σχετίζεται με την ακτινοβολία από διάφορα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά μηχανήματα, μηχανές εσωτερικής καύσης, δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος, καθώς και με τις ραδιοεκπομπές από άλλα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

Επίγειες πολυδιαδρομικές διαλείψεις



Ιονοσφαιρικός Σπινθηρισμός: Προκαλεί φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath fading) λόγω διαθλάσεων από συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων στην ιονόσφαιρα.

Επίγειες Πολυδιαδρομικές Διαλείψεις:

- Προκαλούνται κοντά στη γη λόγω διαθλάσεων και σκέδασης από φυσικά εμπόδια (βουνά, λόφους) και αστικά αντικείμενα (κτίρια, οχήματα).
- Εξαρτώνται από την κινητικότητα του τερματικού:
  - **Σταθερό Τερματικό**: Σταθερά χαρακτηριστικά σήματος.
  - **Κινούμενο Τερματικό**: Ταχείες μεταβολές στο πλάτος του σήματος λόγω διαφορών στη φάση μεταξύ απευθείας και διαθλώμενων συνιστωσών.

Φαινόμενο Doppler

Αρχή του Φαινομένου Doppler:
•Αφορά μεταβολή στη συχνότητα του σήματος ανάλογα με την κίνηση του δορυφόρου.
•Αυξομείωση συχνότητας καθώς ο δορυφόρος πλησιάζει ή απομακρύνεται από τον επίγειο σταθμό.

Υπολογισμός Συχνότητας Doppler:

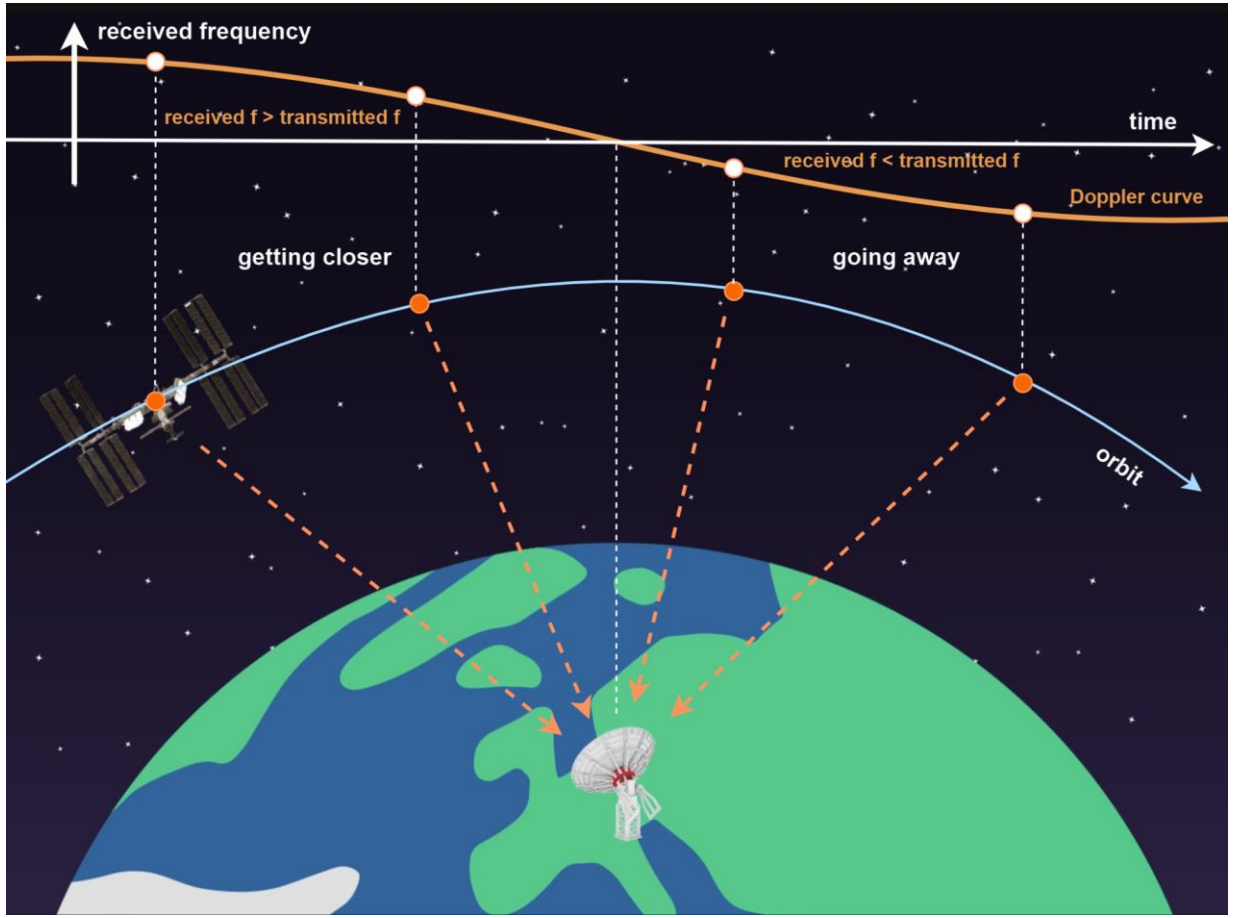
$$\left(\frac{f_R - f_T}{f_T}\right) = \left(\frac{f_d}{f_T}\right) = \left(\frac{u_T \cos\zeta}{c}\right)$$

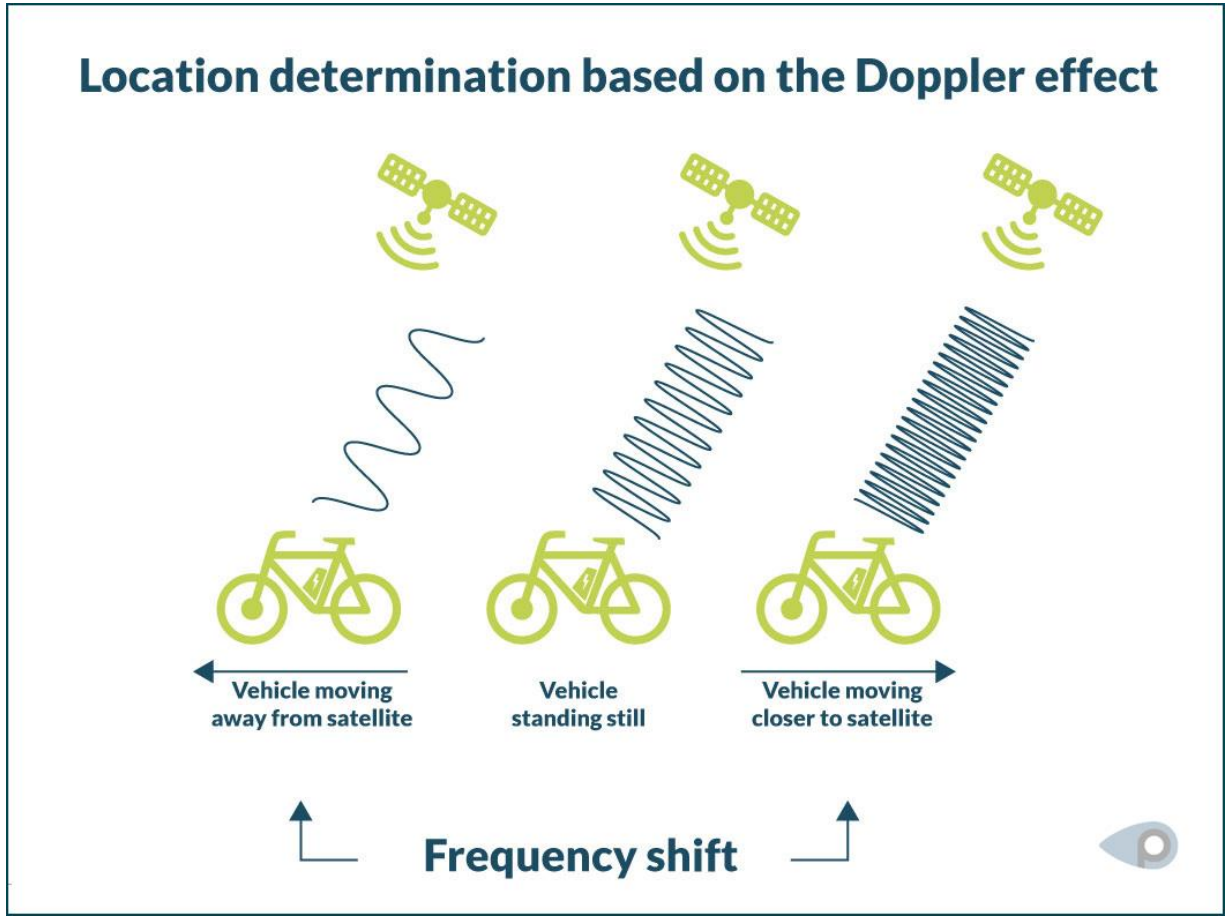
•Παράμετροι: Συχνότητα πομπού f_T, ταχύτητα δορυφόρου u_T, γωνία άφιξης του κύματος ζ

Σημαντικότητα στη Σχεδίαση Δορυφορικών Συστημάτων:
•Διόρθωση αβεβαιότητας στον δέκτη.
•Εκτίμηση συχνότητας κάτω ζεύξης για μεγαλύτερη ακρίβεια.
•Ιδιαίτερη σημασία σε στενής ζώνης επικοινωνίες.

Εφαρμογές:
•Χρήσιμο για εντοπισμό θέσης παρατηρητών όταν γνωρίζουμε τα στοιχεία της τροχιάς του δορυφόρου.

Φαινόμενο Doppler





Τεχνικές αντιστάθμισης

Τα συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών που λειτουργούν σε συχνότητες πάνω από 10 GHz υπόκεινται σε απώλειες που εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες, και οι οποίες μπορεί να είναι σοβαρές για σημαντικά χρονικά διαστήματα. Ωστόσο, μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να παρέχουν επαρκή περιθώρια ισχύος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί άμεσα με την αύξηση του μεγέθους της κεραίας, την αύξηση της ισχύος μετάδοσης RF ή και τα δύο. Συνήθως, περιθώρια ισχύος 5 έως 10 dB στη ζώνη C και 10 έως 15 dB στη ζώνη K μπορούν να επιτευχθούν σχετικά εύκολα με κεραίες λογικού μεγέθους και με ισχύ RF εντός των επιτρεπόμενων επιπέδων. Τα επίπεδα ισχύος RF περιορίζονται από τη διαθέσιμη ισχύ του δορυφόρου και από τους περιορισμούς της ακτινοβολούμενης ισχύος στο έδαφος που καθορίζονται από διεθνείς συμφωνίες.

Εάν η αναμενόμενη εξασθένηση της διαδρομής υπερβαίνει το διαθέσιμο περιθώριο ισχύος, κάτι που μπορεί εύκολα να συμβεί στις ζώνες Ku, Ka για πολλές περιοχές της γης, **πρέπει να εξεταστούν πρόσθετες μέθοδοι για να ξεπεραστούν οι σοβαρές συνθήκες εξασθένησης** και να αποκατασταθεί η αποδεκτή απόδοση στις ζεύξεις. Οι τεχνικές αποκατάστασης σταθερών δορυφορικών συνδέσεων μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες.

Ο πρώτος τύπος, **η αποκατάσταση ισχύος, δεν αλλάζει τη βασική μορφή του σήματος** κατά τη διαδικασία αποκατάστασηςτης σύνδεσης. Ο δεύτερος τύπος, **η αποκατάσταση τροποποίησης σήματος, υλοποιείται με την τροποποίηση των βασικών χαρακτηριστικών του σήματος**. Τα χαρακτηριστικά του σήματος περιλαμβάνουν τη φέρουσα συχνότητα, το εύρος ζώνης, το ρυθμό δεδομένων και το σχήμα κωδικοποίησης.

Τεχνικές αντιστάθμισης-Αποκατάσταση ισχύος

Οι τεχνικές αποκατάστασης ισχύος δεν μεταβάλλουν τη βασική μορφή του σήματος κατά τη διαδικασία αποκατάστασης της σύνδεσης. Οι ακόλουθες τεχνικές αυτού του τύπου, παρατίθενται κατά προσέγγιση με σειρά αυξανόμενης πολυπλοκότητας εφαρμογής:

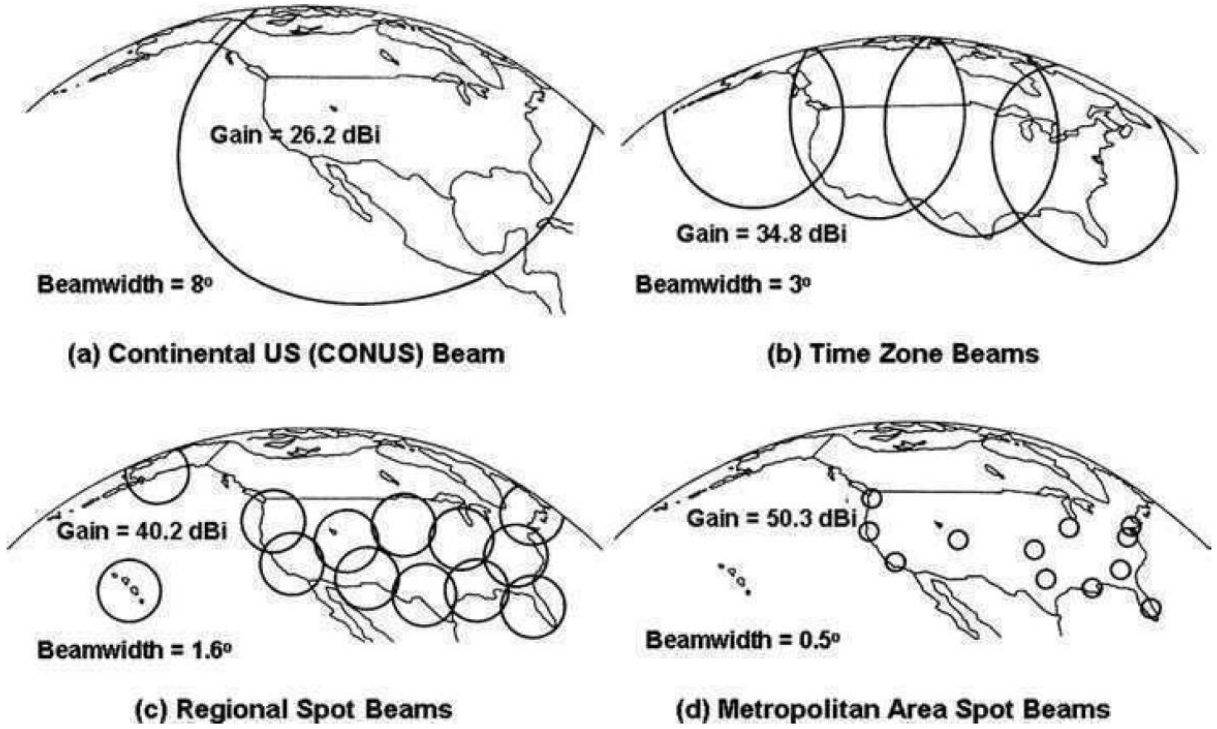
- Beam diversity
- Έλεγχος ισχύος
- Site diversity
- Orbit diversity

Η Beam diversity και ο έλεγχος ισχύος συνεπάγονται αύξηση της ισχύος του σήματος ή του EIRP για να υπερνικηθεί ένα σοβαρό φαινόμενο εξασθένησης. Οι Site/Orbit diversity συνεπάγονται επιλεκτική εναλλαγή μεταξύ δύο ή περισσότερων εφεδρικών συνδέσεων που μεταφέρουν το ίδιο σήμα πληροφοριών. Οι ρυθμοί δεδομένων και οι ρυθμοί πληροφοριών δεν μεταβάλλονται και δεν απαιτείται καμία επεξεργασία της μορφοποίησης του σήματος.

Beam Diversity

Η πυκνότητα ισχύος που λαμβάνεται σε μια δορυφορική κατερχόμενη ζεύξη **μπορεί να αυξηθεί κατά τη διάρκεια περιόδων εξασθένησης με την εναλλαγή σε μια δορυφορική κεραία με στενότερο εύρος δέσμης**. Το στενότερο εύρος δέσμης, που αντιστοιχεί σε υψηλότερο κέρδος κεραίας, συγκεντρώνει την ισχύ σε μια μικρότερη περιοχή στην επιφάνεια της γης, με αποτέλεσμα υψηλότερο EIRP προς τον τερματικό σταθμό εδάφους που υφίσταται την εξασθένηση της διαδρομής.

Η κάλυψη CONUS (CONtinental US) είναι τυπική για τα συστήματα σταθερών δορυφορικών υπηρεσιών, ενώ οι δέσμες ζώνης ώρας είναι χρήσιμες για εφαρμογές άμεσης μετάδοσης. Περιφερειακές και μητροπολιτικές δέσμες περιοχής χρησιμοποιούνται σε συστήματα επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων καθώς και για εφαρμογές αποκατάστασης εξασθένησης λόγω βροχής.



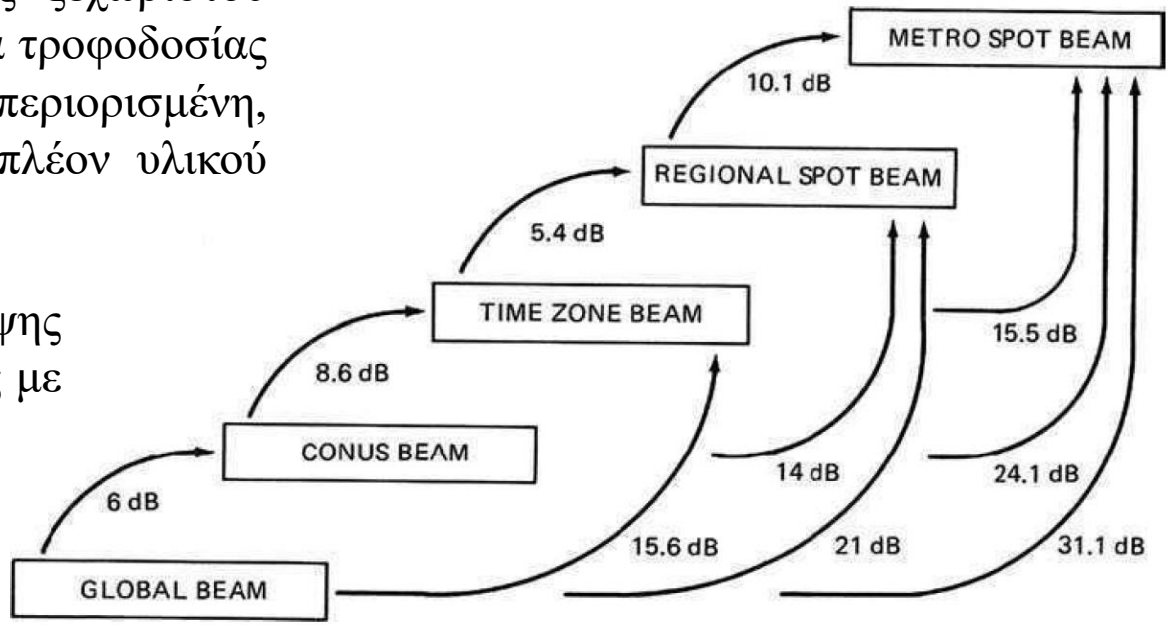
Beam Diversity

Ένας δορυφόρος που εξυπηρετεί πολλούς επίγειους τερματικούς σταθμούς μπορεί να διαθέτει **μία ή περισσότερες ενσωματωμένες κεραίες υψηλότερης απολαβής,** που μερικές φορές αναφέρονται ως κεραίες σημειακής δέσμης, για την **κάλυψη συγκεκριμένων περιοχών όπου παρατηρείται ή αναμένεται σοβαρή εξασθένιση του σήματος.**

Η κεραία σημειακής δέσμης κατευθύνεται προς την επιθυμητή θέση του επίγειου τερματικού σταθμού είτε με μηχανική κίνηση ενός ξεχωριστού ανακλαστήρα είτε με ένα ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενο σύστημα τροφοδοσίας κεραίας. Ωστόσο, η χρήση του beam diversity είναι συχνά περιορισμένη, επειδή το κόστος και η πολυπλοκότητα της προσθήκης επιπλέον υλικού μπορεί να είναι απαγορευτικά.

Οι δορυφόροι που διαθέτουν ήδη κεραίες πολλαπλής κάλυψης μπορούν να εφαρμόσουν την αποκατάσταση σημειακής δέσμης με τους υπάρχοντες πόρους του δορυφόρου.

Το Beam diversity μπορεί να προσφέρει αποδεκτά επίπεδα βελτίωσης, εάν λίγοι τερματικοί σταθμοί εδάφους βρίσκονται σε περιοχές με έντονη βροχή.



Power Control

Ο έλεγχος ισχύος αναφέρεται στη διαδικασία **μεταβολής της ισχύος μετάδοσης** σε μια δορυφορική σύνδεση, παρουσία απόσβεσης διαδρομής, για τη διατήρηση του επιθυμητού επιπέδου ισχύος στον δέκτη. Ο έλεγχος ισχύος επιχειρεί να αποκαταστήσει τη σύνδεση **αυξάνοντας την ισχύ μετάδοσης κατά τη διάρκεια ενός συμβάντος εξασθένησης και, στη συνέχεια, μειώνοντας την ισχύ μετά το συμβάν στην τιμή της πριν από την εξασθένηση**. Ο στόχος του ελέγχου ισχύος είναι να μεταβάλλει την ισχύ μετάδοσης σε άμεση αναλογία με την εξασθένηση στη σύνδεση, έτσι ώστε η ισχύς λήψης να παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια σοβαρών εξασθενήσεων.

Ένα σημαντικό στοιχείο που πρέπει να παρακολουθείται συνεχώς όταν χρησιμοποιείται ο έλεγχος ισχύος, ιδιαίτερα στην ανερχόμενη ζεύξη, είναι **να διασφαλίζεται ότι τα επίπεδα ισχύος δεν είναι ρυθμισμένα σε πολύ υψηλά επίπεδα, κάτι που θα μπορούσε να προκαλέσει υπερφόρτωση του front-end του δέκτη**. Επίσης, όταν πολλαπλοί φορείς μοιράζονται τον ίδιο αναμεταδότη χρησιμοποιώντας έναν μη γραμμικό ενισχυτή ισχύος, πρέπει να διατηρείται η ισορροπία ισχύος για **να αποφεύγεται η καταστολή της απολαβής των ασθενέστερων φορέων.**

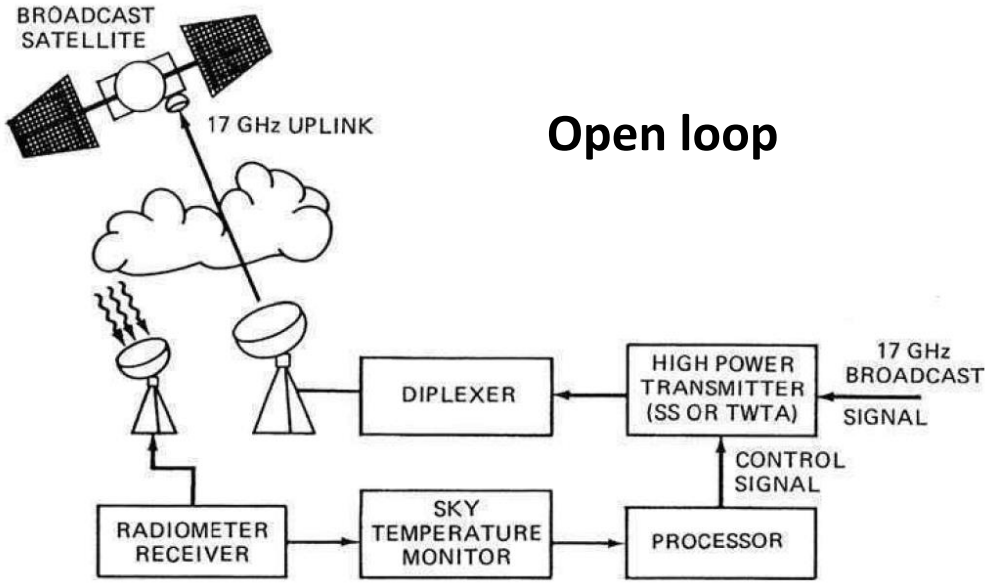
Ο έλεγχος ισχύος απαιτεί γνώση της εξασθένησης της διαδρομής στη σύνδεση που πρέπει να ελεγχθεί. Η επίδραση του ελέγχου ισχύος στη διαθεσιμότητα, υποθέτοντας ότι ο έλεγχος είναι τέλειος, είναι η ίδια με την ύπαρξη αυτού του περιθωρίου ισχύος ανά πάσα στιγμή. Ένα τέλειο σύστημα ελέγχου ισχύος μεταβάλλει την ισχύ ακριβώς ανάλογα με την εξασθένηση λόγω βροχής. Τα σφάλματα στο έλεγχο ισχύος έχουν ως αποτέλεσμα πρόσθετες διακοπές, μειώνοντας αυτό το περιθώριο.

Power Control

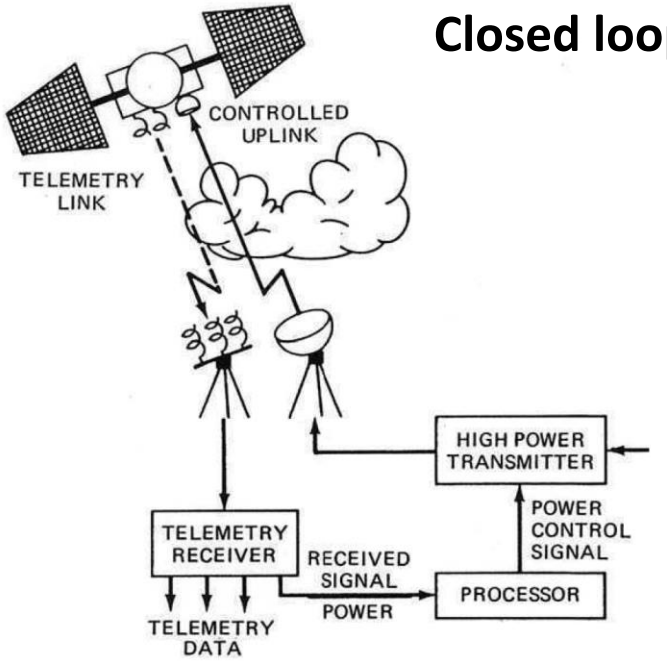
Μπορούν να εφαρμοστούν δύο τύποι ελέγχου ισχύος, συστήματα κλειστού βρόχου (closed loop) ή ανοιχτού βρόχου (open loop). Σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου, το επίπεδο ισχύος μετάδοσης ρυθμίζεται άμεσα από το ανιχνευόμενο σήμα λήψης το οποίο επιστρέφεται μέσω ενός link τηλεμετρίας πίσω στο έδαφος.
Σε ένα σύστημα ελέγχου ισχύος ανοιχτού βρόχου, το επίπεδο ισχύος μετάδοσης ρυθμίζεται με τη λειτουργία ενός σήματος ελέγχου ραδιοσυχνότητας που το ίδιο υφίσταται εξασθένηση διαδρομής και χρησιμοποιείται για να συμπεράνουμε την εξασθένηση που υφίσταται στην ανερχόμενη ζεύξη.
Το σήμα ελέγχου ραδιοσυχνότητας μπορεί να είναι ένα από τα ακόλουθα:

- το σήμα κατερχόμενης ζεύξης
- ένα σήμα φάρου στη συχνότητα ανερχόμενης ζεύξης ή κοντά σε αυτήν
- ένα ραδιόμετρο ή ραντάρ με βάση το έδαφος.

Open loop



Closed loop



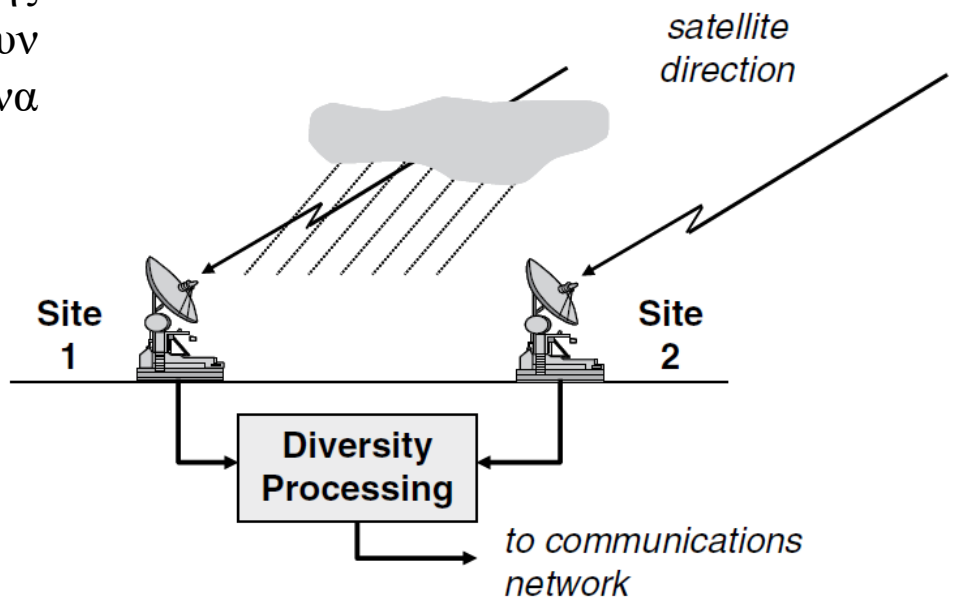
Site Diversity

Site diversity είναι ο γενικός όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη χρήση δύο (ή περισσότερων) γεωγραφικά ξεχωριστών επίγειων τερματικών σε μια δορυφορική ζεύξη για να ξεπεραστούν οι απώλειες στο downlink κατά τη διάρκεια έντονης βροχής. Το site diversity βελτιώνει τη συνολική απόδοση της ζεύξης, εκμεταλλευόμενο το περιορισμένο μέγεθος και την τοπικότητα της έντονης βροχής. Με επαρκή φυσική απόσταση μεταξύ των επίγειων τερματικών, η πιθανότητα υπέρβασης ενός δεδομένου επιπέδου απωλειών και στις δύο τοποθεσίες είναι πολύ μικρότερη από την πιθανότητα υπέρβασης αυτού του επιπέδου σε μία μόνο τοποθεσία.

Η έντονη βροχή συνήθως εμφανίζεται εντός κυψελοειδών δομών περιορισμένης οριζόντιας και κάθετης έκτασης. Αυτές οι βροχοπτώσεις μπορεί να έχουν οριζόντιο και κάθετο μέγεθος μόλις μερικών χιλιομέτρων και τείνουν να γίνονται μικρότερες καθώς αυξάνεται η ένταση της βροχής.

Τα σήματα που λαμβάνονται από τα δύο τερματικά μεταφέρονται σε μία μόνο τοποθεσία (η οποία μπορεί να είναι σε ένα από τα τερματικά), όπου **συγκρίνονται και εφαρμόζεται μια διαδικασία λήψης απόφασης για την επιλογή του «καλύτερου» σήματος** για χρήση στο σύστημα επικοινωνιών.

Η site diversity, μπορεί να προσφέρει σημαντικό κέρδος 5-10 dB κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων.



Orbit Diversity

Το **orbit diversity** αναφέρεται στη χρήση δύο δορυφόρων, προκειμένου να παρέχουν ξεχωριστές συγκλίνουσες διαδρομές προς έναν ενιαίο τερματικό σταθμό εδάφους. Το κέρδος επιτυγχάνεται με τη χρήση της ζεύξης με τη χαμηλότερη εξασθένηση διαδρομής.

Η βελτίωση δεν οφείλεται κυρίως στην κυτταρική δομή της έντονης βροχής, όπως στην περίπτωση του site diversity, αλλά συμβαίνει επειδή θα υπάρχει πάντα κάποια ποσοτική στατιστική αποσυσχέτιση μεταξύ δύο ξεχωριστών διαδρομών προς έναν ενιαίο επίγειο τερματικό σταθμό που αντιμετωπίζει βροχόπτωση.

Το orbit diversity είναι λιγότερο αποτελεσματικό από το site diversity για τον μετριασμό της εξασθένησης βροχής, επειδή είναι δυσκολότερο να βρεθούν ενναλακτικά μονοπάτια που να αποφεύγουν τη περιοχή της βροχώπτωσης, εκτός αν οι δορυφόροι απέχουν αρκετά μεταξύ τους.

Ωστόσο, έχει το πλεονέκτημα ότι οι δύο δορυφόροι μπορούν να μοιραστούν (ως μέρος ενός σχεδίου κοινής χρήσης πόρων) με πολλές εγκαταστάσεις εδάφους. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την περίπτωση του site diversity, όπου η περιττή εγκατάσταση εδάφους μπορεί γενικά να αφιερωθεί μόνο σε μία κύρια εγκατάσταση εδάφους.

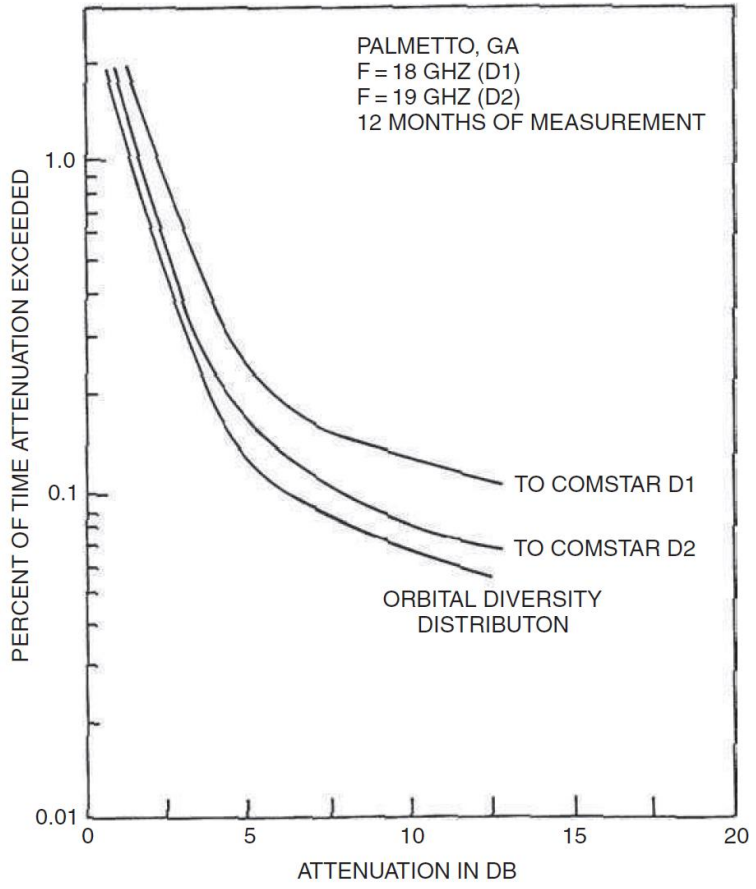
Το orbit diversity παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον για συστήματα LEO που διαθέτουν αστερισμούς με πολλούς δορυφόρους, ιδιαίτερα για συστήματα που λειτουργούν στις ζώνες Ka ή V.

Orbit Diversity

Λοιπές παράμετροι εκτός από τις απώλειες βροχής μπορούν να κάνουν τη χρήση του orbit diversity πιο ελκυστική. Πχ. βλάβες του δορυφορικού εξοπλισμού ή η διέλευση του ήλιου από τον κύριο δορυφόρο, οι οποίες απαιτούν μεταβίβαση σε εφεδρικό δορυφόρο για τη διατήρηση της επικοινωνίας. Η χρήση εφεδρικού δορυφόρου για λόγους πέραν των απωλειών βροχής μπορεί να συμβάλει στην οικονομική πρακτικότητα του orbit diversity.

Εάν ένας επίγειος σταθμός θέλει να εκμεταλλευτεί πλήρως την πολλαπλή τροχιά, θα πρέπει να διαθέτει δύο συστήματα κεραιών, ώστε ο χρόνος μετάβασης μεταξύ των διαδρομών διάδοσης να ελαχιστοποιηθεί. Εάν ο τερματικός σταθμός διαθέτει ένα σύστημα κεραιών με σχετικά στενό εύρος δέσμης, ο χρόνος εναλλαγής μπορεί να είναι υπερβολικός λόγω του περιορισμένου χρόνου που απαιτείται για την περιστροφή της επίγειας κεραίας από τον ένα δορυφόρο στον άλλο και λόγω του χρόνου που απαιτείται για την εκ νέου λήψη των σημάτων ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης από τους δέκτες.

Η απόδοση ενός συστήματος diversity συνήθως ποσοτικοποιείται από το diversity gain, το οποίο είναι η βελτίωση που οφείλεται στη λήψη ποικιλομορφίας για ένα συγκεκριμένο επίπεδο εξασθένησης που υπερβαίνεται ανά ποσοστό χρόνου.



Τεχνικές αντιστάθμισης με τροποποίηση του σήματος

Ο δεύτερος γενικός τύπος αποκατάστασης σύνδεσης περιλαμβάνει την τροποποίηση των χαρακτηριστικών του σήματος επικοινωνίας για την επίτευξη βελτίωσης της απόδοσης σε περίπτωση εξασθένησης της σύνδεσης και άλλων υποβαθμίσεων της διαδρομής. Σε αντίθεση με τις τεχνικές τροποποίησης ισχύος, οι οποίες δεν αλλάζουν τη βασική μορφή του σήματος κατά τη διαδικασία αποκατάστασης της σύνδεσης, οι μέθοδοι τροποποίησης του σήματος επιφέρουν αλλαγή σε βασικά χαρακτηριστικά του για τη βελτίωση της απόδοσης της σύνδεσης.

Βασικές τεχνικές αποκατάστασης τροποποίησης σήματος είναι:
- diversity συχνοτήτων
- μείωση εύρους ζώνης
- diversity χρόνου

Συνήθως οι τεχνικές εφαρμόζονται μεμονωμένα, ωστόσο είναι δυνατό να συνδυαστούν δύο ή περισσότερες για συγκεκριμένες εφαρμογές ή συνθήκες συστήματος, προκειμένου να επιτευχθούν επιπλέον βελτιώσεις.

Frequency Diversity

Η τεχνική Frequency Diversity για ζεύξεις που λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων που υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω βροχής, για παράδειγμα, 14/12 GHz ή 30/20 GHz, περιλαμβάνει τη **μετάβαση σε χαμηλότερη ζώνη συχνοτήτων**, όπως 6/4 GHz, όπου η εξασθένηση λόγω βροχής είναι αμελητέα, όποτε υπερβαίνεται ένα καθορισμένο περιθώριο.

Οι επίγειοι σταθμοί και οι δορυφόροι που χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο πρέπει να είναι εξοπλισμένοι για λειτουργία διπλής συχνότητας. Ο αριθμός των αναμεταδοτών χαμηλότερης συχνότητας που απαιτούνται για έναν δεδομένο δορυφόρο εξαρτάται από τον αριθμό των ζεύξεων που εξυπηρετούνται ταυτόχρονα από τον δορυφόρο και από την πιθανότητα οι απώλειες βροχής να υπερβούν το link margin για οποιαδήποτε ζεύξη.

Για δορυφόρους που λειτουργούν ήδη σε δύο ή περισσότερες ζώνες συχνοτήτων, η frequency diversity μπορεί να είναι μια πρακτική και χαμηλού κόστους μέθοδος αντιστάθμισης για πολλές εφαρμογές.

Μείωση εύρους ζώνης και time diversity

Το εύρος ζώνης του σήματος που μεταφέρει πληροφορίες είτε στην ανερχόμενη είτε στην κατερχόμενη ζεύξη **μπορεί να μειωθεί κατά τη διάρκεια περιόδων έντονης εξασθένησης**, με αποτέλεσμα την **αύξηση του διαθέσιμου C/N στη ζεύξη**. Μια μείωση του εύρους ζώνης κατά το ήμισυ θα είχε ως αποτέλεσμα μια βελτίωση 3 dB για τη συγκεκριμένη ζεύξη.

Η μείωση του εύρους ζώνης περιορίζεται προφανώς σε εκείνες τις εφαρμογές όπου μια αλλαγή στον ρυθμό δεδομένων μπορεί να γίνει ανεκτή. Είναι πιο εύκολο να εφαρμοστεί σε ψηφιακά συστήματα και σε ζεύξεις όπου οι καθυστερήσεις προσαρμογής του σήματος είναι αποδεκτές.

Time diversity είναι μια τεχνική αποκατάστασης, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί **όταν η λειτουργία σε πραγματικό χρόνο δεν είναι απαραίτητη** (όπως σε μεταφορά μαζικών δεδομένων, εφαρμογές αποθήκευσης και προώθησης κ.λπ.).

Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει την αποθήκευση δεδομένων κατά τη διάρκεια της περιόδου μεγάλης εξασθένησης λόγω βροχής και τη μετάδοση μετά το τέλος του συμβάντος. Απαιτούνται περίοδοι αποθήκευσης από μερικά λεπτά έως μερικές ώρες, ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας και τις συνθήκες βροχής στον επίγειο σταθμό του συστήματος.

Ερωτήσεις

Ως διαλείψεις ορίζεται ο μηχανισμός διάδοσης, ο οποίος προκαλεί:
Α) Αλλαγή της κατεύθυνσης διάδοσης ενός ραδιοκύματος.
Β) Αποπόλωση του ραδιοκύματος.
Γ) Απότομες διακυμάνσεις του πλάτους ενός ραδιοκύματος.
Δ) Όλα τα παραπάνω.

Τα δορυφορικά συστήματα με συχνότητα λειτουργίας άνω των 3 GHz επηρεάζονται από φαινόμενα, τα οποία λαμβάνουν χώρα στην:
Α) Τρόποσφαιρα.
Β) Ιονόσφαιρα.
Γ) Στρατόσφαιρα.
Δ) Επιφάνεια της Γης.

Οι απώλειες βροχής προκαλούν σημαντικές απώλειες σε δορυφορικά συστήματα με συχνότητα λειτουργίας:
Α) 1 έως 3 GHz.
Β) 3 έως 6 GHz.
Γ) 6 έως 10 GHz.
Δ) Άνω των 10 GHz.

Ερωτήσεις

Ο τροποσφαιρικός σπινθηρισμός προκαλεί σε ένα ραδιοκύμα:
Α) Αλλαγή της φάσης του.
Β) Διακυμάνσεις του πλάτους του.
Γ) Αλλαγή της γωνίας άφιξής του.
Δ) Όλα τα παραπάνω.

Η αποπόλωση ενός ραδιοκύματος προκαλεί:
Α) Μείωση του πλάτους του σήματος.
Β) Παρεμβολές μεταξύ όμοια πολωμένων ραδιοκυμάτων.
Γ) Και το Α) και το Β).
Δ) Κανένα από τα Α) και Β).

Ο ιονοσφαιρικός σπινθηρισμός οφείλεται:
Α) Στην αλλαγή της συγκέντρωσης ηλεκτρονίων.
Β) Στην παρουσίαση υδρομετέωρων.
Γ) Στα μόρια της ατμόσφαιρας.
Δ) Στη δημιουργία νεφώσεων.

Ερωτήσεις

Οι επίγειες πολυδιαδρομικές διαλείψεις οφείλονται σε φαινόμενα:
Α) Διάθλασης.
Β) Σκέδασης.
Γ) Και το Α και το Β.
Δ) Κανένα από τα Α και Β.

Το φαινόμενο Doppler προκαλεί σε ένα δορυφορικό σύστημα:
Α) Αλλαγή της πόλωσης.
Β) Ολίσθηση της συχνότητας.
Γ) Απόσβεση της ισχύος.
Δ) Κανένα από τα παραπάνω.

Ασκήσεις

Προσδιορίστε τη γωνία περιστροφής Faraday για μια κινητή δορυφορική σύνδεση 1 GHz που λειτουργεί με μέση TEC=10^{19} el/m^2 και μέσο γεωμαγνητικό πεδίο 10^{-5} Wb/m^2. Ποια είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη TEC για τις παραπάνω συνθήκες, ώστε η περιστροφή Faraday να παραμείνει κάτω από 60◦;

$$\Theta\ (\text{rad}) \approx 2.3648 \times 10^4\ \frac{B_{\parallel}\ \text{TEC}}{f^2}$$

$$\theta = \frac{2.365 \times 10^4 \times 10^{-5} \times 10^{19}}{1 \times 10^{18}} = 2.365\ rad = 0.75\ \pi\ rad$$

Προσδιορίστε τη καθυστέρηση ομάδας για μια κινητή δορυφορική σύνδεση 1.16 GHz που λειτουργεί με μέση TEC=10^{19} el/m^2.

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

$$\theta = \frac{1.345 \times 10^{19} \times 10^{-25}}{1.16^2} = 1 \times 10^{-6}\ s = 1\ \mu s$$