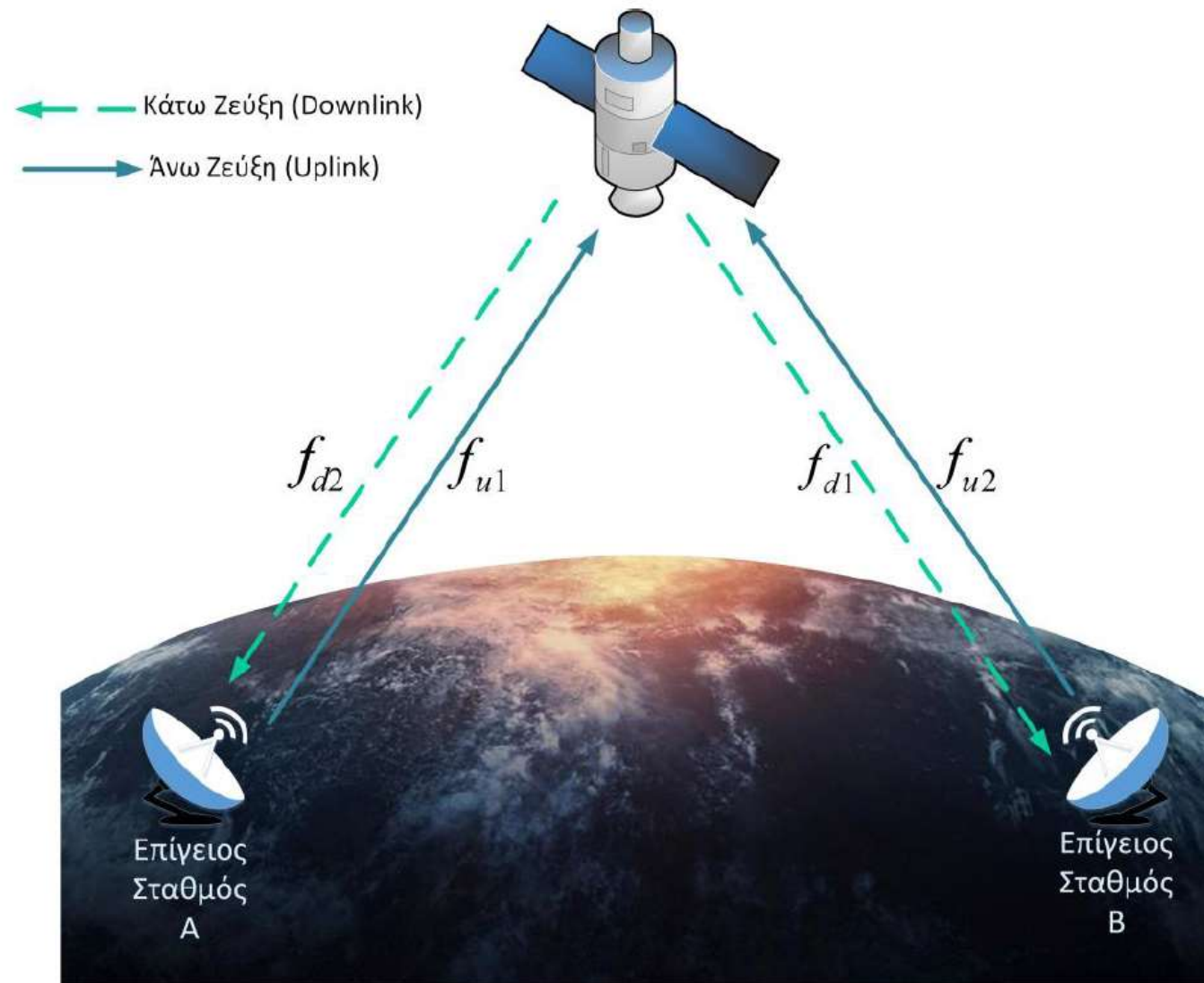


Ανάλυση και Σχεδίαση Δορυφορικών Ζεύξεων

Η ανάλυση και σχεδίαση μίας δορυφορικής ζεύξης αποτελεί τη σημαντικότερη επικοινωνιακή λειτουργία ενός δορυφορικού συστήματος. Η σχεδίαση αποσκοπεί κυρίως στον προσδιορισμό των διαστάσεων και των κερδών των κεραιών, που θα χρησιμοποιηθούν για την ομαλή λειτουργία του συστήματος, της θερμοκρασίας θορύβου του συστήματος λήψης και της απαιτούμενης εκπεμπόμενης ισχύος. Πολλά από τα παραπάνω στοιχεία ενδέχεται να είναι δεδομένα, με αποτέλεσμα να απαιτείται ο βέλτιστος προσδιορισμός των υπολοίπων για την ομαλή λειτουργία ολόκληρου του συστήματος.

Ο σχεδιαστής πρέπει να προσπαθήσει να βελτιστοποιήσει τη συνολική ζεύξη, δίνοντας την αρμόζουσα προσοχή σε κάθε στοιχείο της ζεύξης και στους παράγοντες που συνδέονται με την απόδοσή του. Το πρόβλημα της σχεδίασης μιας δορυφορικής ζεύξης συνίσταται κυρίως στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των επίγειων σταθμών λήψης και εκπομπής, αφού οι δορυφορικοί αναμεταδότες μισθώνονται ή αγοράζονται από τους τηλεπικοινωνιακούς φορείς με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, τα οποία είναι πρακτικά αδύνατο να αλλάξουν. Κατά τη σχεδίαση πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά του δορυφορικού αναμεταδότη, γεωγραφικές και κλιματικές παράμετροι των επίγειων σταθμών, καθώς και διάφορα κριτήρια διαθεσιμότητας και αξιοπιστίας του όλου συστήματος, ώστε να δίνουν στον σχεδιαστή μεγαλύτερη δυνατότητα επιλογών.

Βασική δορυφορική ζεύξη



Ο λόγος που χρησιμοποιείται διαφορετική συχνότητα στην άνω και κάτω ζεύξη είναι η αποφυγή παρεμβολής από τον δορυφορικό πομπό στον δορυφορικό δέκτη. Χρησιμοποιούμε μεγαλύτερη συχνότητα στην άνω ζεύξη, γιατί οι απώλειες διάδοσης αυξάνονται με τη συχνότητα και επιλέγουμε να επιβαρύνουμε την άνω ζεύξη λόγω της μεγαλύτερης διαθεσιμότητας ισχύος στον επίγειο σταθμό, παρά στον δορυφόρο. Όλες οι τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις σχεδιάζονται, ώστε να ανταποκρίνονται σε ορισμένους στόχους επίδοσης, συνήθως έναν ρυθμό σφαλμάτων bit (Bit Error Rate, BER) σε μια ψηφιακή ζεύξη ή έναν σηματοθορυβικό λόγο (Signal-to-Noise, S/N) σε μια αναλογική ζεύξη, που μετριέται στο κανάλι βασικής ζώνης.

Γενικά, η συνολική ζεύξη πρέπει να σχεδιαστεί, ώστε να παρέχει αξιόπιστη και καλής ποιότητας επικοινωνία. Υπάρχει άμεση σχέση (σχεδόν γραμμική) μεταξύ των σηματοθορυβικών λόγων στην έξοδο (S/N ή E_b/N_o) και στην είσοδο (Carrier-to-Noise, C/N) ενός αποδιαμορφωτή. Άρα, σκοπός είναι η μεγιστοποίηση της ισχύος του επιθυμητού σήματος προς εκείνη του θορύβου στην είσοδο του επίγειου δέκτη. Στις περισσότερες εφαρμογές, ο λόγος C/N στην είσοδο του αποδιαμορφωτή πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 6dB, για να επιτευχθεί ο στόχος του BER ή του S/N.

Σε μια δορυφορική ζεύξη υπάρχουν δύο διαδρομές σήματος: η άνω ζεύξη (uplink, UL) και η κάτω ζεύξη (downlink, DL). Ο συνολικός λόγος C/N στον δέκτη του επίγειου σταθμού εξαρτάται και από τις δύο ζεύξεις, επομένως, και οι δύο πρέπει να επιτύχουν την απαραίτητη επίδοση για ένα καθορισμένο ποσοστό του χρόνου. Η εξασθένηση στη γήινη ατμόσφαιρα μπορεί να γίνει υπερβολική κατά τη διάρκεια δυνατής βροχής, κάνοντας τον λόγο C/N να μειωθεί κάτω από την ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή, με αποτέλεσμα να προκύψει μία διακοπή (outage) της ζεύξης. Συνεπώς, η σχεδίαση ενός δορυφορικού συστήματος απαιτεί γνώση της απαιτούμενης επίδοσης της άνω και κάτω ζεύξης, των χαρακτηριστικών διάδοσης και της εξασθένησης εξαιτίας βροχής και άλλων φαινομένων, που επιδρούν στη διάδοση των σημάτων για τη ζώνη συχνοτήτων, η οποία χρησιμοποιείται στους επίγειους σταθμούς, καθώς και των παραμέτρων του δορυφόρου και των επίγειων σταθμών. Πρόσθετοι περιορισμοί μπορούν να επιβληθούν από την ανάγκη αποφυγής σπατάλης του εύρους ζώνης RF και παρεμβολών με άλλους χρήστες.

Η θεμελιώδης διαδικασία σχεδίασης μιας δορυφορικής ζεύξης είναι ο υπολογισμός και η κατάρτιση του προϋπολογισμού της ζεύξης (link budget), δηλαδή ο υπολογισμός των λόγων C/N, C/N_0 , ή E_b/N_0 , ως συνάρτηση των χαρακτηριστικών του δορυφόρου, των επίγειων σταθμών, του τοπικού περιβάλλοντος και των συνθηκών παρεμβολής.

Βασική θεωρία μετάδοσης

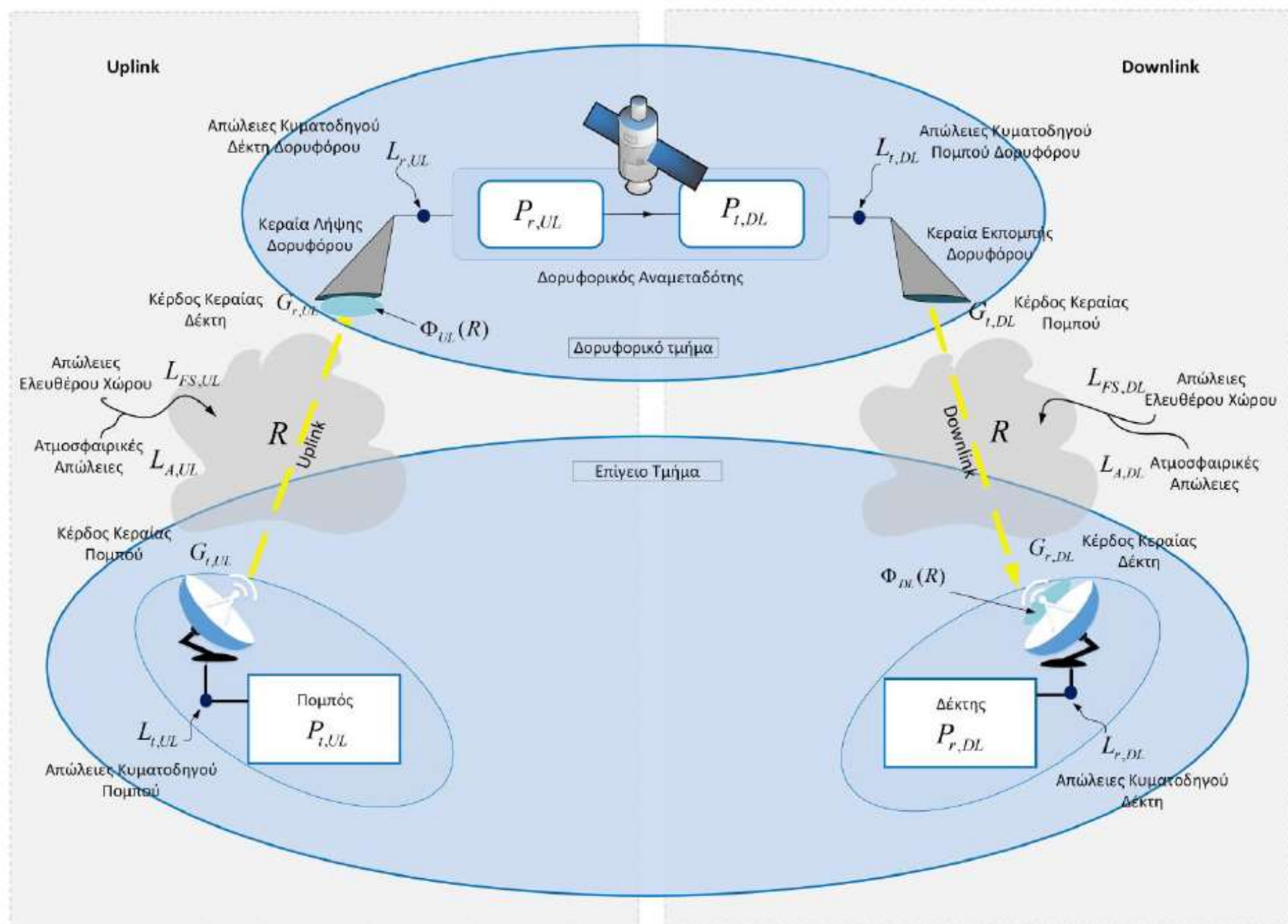
Θεωρούμε ότι υπάρχει μία αμφίδρομη δορυφορική ζεύξη μεταξύ ενός δορυφορικού αναμεταδότη και ενός επίγειου σταθμού, με τη μεταξύ τους απόσταση να είναι ίση με R , η δομή του οποίου φαίνεται στο Σχήμα 8.2, για την άνω (UL) και κάτω ζεύξη (DL). Θα αναλυθεί στο σημείο αυτό η πυκνότητα ροής της ισχύος (Power Flux Density) για την ειδική περίπτωση της ζεύξης από τον δορυφόρο προς τον επίγειο σταθμό λήψης (κάτω ζεύξη), χωρίς βλάβη της γενικότητας του μοντέλου υπό μελέτη (Pratt, Bostian & Allnutt, 2003). Ο πομπός εκπέμπει ισχύ P_t (watts) και εισέρχεται στην κεραία εκπομπής στη διεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας. Αν ο ανακλαστήρας του πομπού ήταν ισοτροπικός, δηλαδή εξέπεμπε ισχύ ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις, τότε σε απόσταση R από αυτόν θα δημιουργούσε πυκνότητα ισχύος Φ_o ίση με

$$\Phi_o(R) = \left| \vec{P}_{av,o}(R) \right| = \frac{P_t}{4\pi R^2}, \quad (W / m^2) \quad (8.1)$$

όπου το σύμβολο o υποδηλώνει ομοιοκατευθυντική κεραία. Όμως, επειδή η κεραία του πομπού έχει κέρδος G_t (σε καθαρό αριθμό) σε σύγκριση με την ισοτροπική κεραία και στη διεύθυνση αυτή το κέρδος της κεραίας του πομπού έχει τη μέγιστη τιμή του, η πυκνότητα ροής ισχύος Φ που δημιουργεί στην περιοχή της κεραίας του δέκτη είναι ίση με:

$$\Phi(R) = \left| \vec{P}_{av}(R) \right| = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} = \frac{EIRP}{4\pi R^2}, \quad (W / m^2) \quad (8.2)$$

όπου το γινόμενο $P_t G_t$ αποτελεί την Ισοδύναμη Ισοτροπικά Ακτινοβολούμενη Ισχύ (Equivalent Isotropically Radiated Power, EIRP) σε μονάδες Watts.



Σχήμα 8.2 Γενική δομή ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος

Στην πλευρά του δέκτη, η λαμβανόμενη ισχύς ισούται με το γινόμενο της πυκνότητας ροής ισχύος Φ στην περιοχή του ανακλαστήρα επί την ενεργό του επιφάνεια $A_{r,eff}$, η οποία για κεραία παραβολικού κατόπτρου δίνεται από την εξίσωση

$$P_r(R) = \Phi(R) A_{r,eff} = \left(\frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \right) \left(\frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \right) = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2, \quad (Watts) \quad (8.3)$$

Η ποσότητα $L_{FS} = \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2$ ονομάζεται απώλεια ελεύθερου χώρου (Free Space Loss) και αναπαριστά τον λόγο της εκπεμπόμενης προς τη λαμβανόμενη ισχύ σε μια ζεύξη μεταξύ δύο ισοτροπικών κεραιών.

Επιπλέον, αν ληφθούν υπόψη οι εσωτερικές απώλειες L_{TX} (σε καθαρό αριθμό) του συστήματος μεταξύ της εξόδου του πομπού και της εισόδου της κεραίας, όπως είναι οι απώλειες καλωδιώσεων, απώλειες φίλτρων κ.λπ., αντίστοιχα οι εσωτερικές απώλειες του συστήματος λήψης L_{RX} (σε καθαρό αριθμό) του συστήματος μεταξύ της εξόδου της κεραίας και της εισόδου του δέκτη, αλλά και αν υπάρχουν ατμοσφαιρικές απώλειες L_A , τότε η εξίσωση (8.3) γίνεται τελικά:

$$P_r(R) = \left(\frac{P_t G_t}{L_{TX}} \right) \left(\frac{1}{L_A L_{FS}} \right) \left(\frac{G_r}{L_{RX}} \right), \quad (Watts) \quad (8.4)$$

Σχεδόν πάντα στην ανάλυση χρησιμοποιούνται οι λογαριθμικές τιμές των μεγεθών, επειδή αυτό βολεύει θεαματικά στην ανάλυση, αφού εξαλείφει την πολυπλοκότητα των πράξεων του πολλαπλασιασμού και της διαίρεσης, ενώ παράλληλα δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού, με προσθαφαιρέσεις λογαριθμικών μεγεθών. Με αυτόν τον τρόπο, η εξίσωση (8.4) γίνεται:

$$\begin{aligned} P_r(dBW) &= 10\log\left(\frac{P_t G_t}{L_{TX}}\right) + 10\log\left(\frac{1}{L_A L_{FS}}\right) + 10\log\left(\frac{G_r}{L_{RX}}\right) = \\ &= EIRP(dBW) - L_{TX}(dB) - L_A(dB) - L_{FS}(dB) + G_r(dBi) - L_{RX}(dB) \end{aligned} \quad (8.5)$$

Οι συνολικές απώλειες των συστημάτων πομπού, δέκτη και διάδοσης, περιγράφονται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα. Σε πραγματικές τιμές θεωρούμε τις απώλειες πάντα μεγαλύτερες της μονάδας και τις διαιρούμε, ενώ σε λογαριθμικές τιμές τις θεωρούμε πάντα μεγαλύτερες του μηδέν και τις αφαιρούμε. Η εξίσωση (8.5) αναφέρεται ως η εξίσωση του προϋπολογισμού ζεύξης (link budget) για μία δορυφορική ζεύξη και αποτελεί την εξίσωση του σχεδιασμού, στην οποία στηρίζεται ο δορυφορικός σχεδιασμός και η αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος.

Απώλειες δορυφορικού συστήματος

Κατά την εκπομπή του σήματος από τον πομπό και μέχρι τη λήψη του στον δέκτη παρατηρείται σημαντική εξασθένηση της ισχύος του σήματος κατά τη διάδοσή του στον ραδιοδίαυλο. Επίσης, παρατηρούνται απώλειες στα εσωτερικά μέρη του πομπού και του δέκτη. Για να μπορέσουν να ληφθούν υπόψη οι περισσότερες εκ των απωλειών για την ανάλυση και σχεδίαση των δορυφορικών ζεύξεων, παρακάτω αναφέρονται οι παράγοντες, οι οποίοι προκαλούν απώλειες στο μεταδιδόμενο σήμα

Εσωτερικές απώλειες του συστήματος εκπομπής

Όπως αναφέρθηκε, υπάρχουν εσωτερικές απώλειες του συστήματος εκπομπής L_{TX} , οι οποίες αναφέρονται στις απώλειες που υφίσταται το σήμα μεταξύ της εξόδου του πομπού και της εισόδου της κεραίας. Οφείλονται, κυρίως, σε απώλειες καλωδιώσεων, φίλτρων κ.ά.

Απώλειες ελεύθερου χώρου

Συνιστούν την κυριότερη αιτία απωλειών, ιδιαίτερα στις δορυφορικές επικοινωνίες, εξαιτίας της πολύ μεγάλης απόστασης διάδοσης. Είναι συνάρτηση του μήκους του ακτινοβολούμενου κύματος και της απόστασης μεταξύ πομπού-δέκτη. Ορίζονται ως ο λόγος της λαμβανόμενης προς την εκπεμπόμενη ισχύ του επιθυμητού σήματος και αποτελούν ουσιαστικά την ελάχιστη απώλεια που υφίσταται το κύμα κατά τη διάδοσή του, στην ιδανική περίπτωση που ο χώρος είναι ελεύθερος εμποδίων. Συνήθως εκφράζονται σε λογαριθμική κλίμακα (dB) και προκύπτουν οι εξισώσεις:

$$L_{FS} (dB) = 10 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) = 22 - 20 \log(\lambda) + 20 \log(R) \quad (8.6)$$
$$L_{FS} (dB) = 20 \log(f_{MHz}) + 20 \log(R_{km}) + 32,45$$

Παρατηρείται ότι αύξηση των απωλειών ελεύθερου χώρου σημειώνεται με την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας, φαινόμενο όμως που αντισταθμίζεται από το κέρδος των κεραίων δεδομένης διαμέτρου. Από την εξίσωση (8.4) είναι επίσης εμφανές ότι για κάθε δεκαπλασιασμό της απόστασης οι απώλειες αυξάνονται κατά 20dB, δηλαδή ο κανόνας που προκύπτει είναι απώλειες 20dB/decade. Επίσης, για κάθε διπλασιασμό της απόστασης οι απώλειες διάδοσης αυξάνονται κατά περίπου 6dB. Τέλος, για κάθε διπλασιασμό της συχνότητας έχουμε αύξηση των απωλειών διάδοσης κατά 6dB.

Απώλειες ιονόσφαιρας και τροπόσφαιρας

Τόσο η ιονόσφαιρα όσο και η τροπόσφαιρα αλληλεπιδρούν με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και προκαλούν απόσβεση στο πλάτος και αποπόλωσή τους. Όσον αφορά την επίδραση της ιονόσφαιρας, τα δύο κύρια φαινόμενα που παρατηρούνται είναι ο σπινθηρισμός και η στροφή Faraday (βλ. Κεφάλαιο 7). Ο σπινθηρισμός προκαλείται από την αλλαγή του συντελεστή διάθλασης της ιονόσφαιρας και έχει ως αποτέλεσμα ταχείες διακυμάνσεις του πλάτους, της φάσης και της γωνίας πρόσπτωσης του κύματος στη γήινη επιφάνεια. Η στροφή Faraday συνίσταται στην περιστροφή γραμμικά πολωμένου κύματος εξαιτίας της αλληλεπίδρασής του με το μαγνητικό πεδίο της Γης και οδηγεί σε αποπόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Και τα δύο αυτά φαινόμενα έχουν ουσιαστική επίδραση, κυρίως σε σήματα με μεγάλα μήκη κύματος, δηλαδή είναι αμελητέα η επίδρασή τους σε υψίσυχνα κύματα.

Τα δύο βασικά συστατικά της τροπόσφαιρας, τα οποία απορροφούν ενέργεια από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι το οξυγόνο και οι υδρατμοί, λόγω της ηλεκτρικής (οξυγόνο) και της μαγνητικής (υδρατμοί) διπολικής ροπής. Οι περιοχές απορρόφησης των αερίων αυτών βρίσκονται σε μεγάλες συχνότητες και, συγκεκριμένα, η επίδρασή τους στις τηλεπικοινωνίες λαμβάνεται υπόψη μόνο για συχνότητες μεγαλύτερες από 30 GHz. Οι απώλειες εξαιτίας του μέσου μετάδοσης στην ιονόσφαιρα και τροπόσφαιρα είναι περιορισμένες και συμβολίζονται με L_A .

Απώλειες αποπόλωσης

Κατά τη διέλευση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος από το μέσο διάδοσης, παρατηρείται αλληλεπίδραση μεταξύ τους, με αποτέλεσμα τη στροφή του διανύσματος του ηλεκτρικού του πεδίου, δηλαδή της αλλαγής της πόλωσής του. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως αποπόλωση και συμβαίνει κυρίως παρουσία βροχής ή γενικότερων ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων. Συγκεκριμένα, οφείλεται στην τυχαιότητα του μεγέθους και της μορφής των σταγόνων της βροχής, καθώς επίσης και στην γωνία κλίσης τους ως προς την κατακόρυφο. Η αποπόλωση, όπως προαναφέρθηκε, προκαλείται και λόγω της στροφής Faraday.

Εν γένει λοιπόν, μπορεί να ειπωθεί ότι στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, όπου η τεχνική επαναχρησιμοποίησης συχνότητας για την αύξηση της διαθέσιμης χωρητικότητας είναι ευρέως διαδεδομένη, η αποπόλωση αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα, που δυσχεραίνει τη σωστή ανάκτηση του σήματος στον δέκτη. Ιδιαίτερα για συχνότητες μεγαλύτερες των 10GHz, οι συνέπειές της υπό συνθήκες βροχής είναι σημαντικές, καθώς τα δύο κάθετα πολωμένα κύματα, που διαδίδονται στην ίδια συχνότητα, αποπολώνονται και δεν μπορούν να διαχωριστούν επιτυχώς στον δέκτη. Το φαινόμενο έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 6, όπου ορίστηκαν οι λόγοι XPI και XPD . Οι απώλειες λόγω αποπόλωσης είναι περιορισμένες και συμβολίζονται με L_{DEPOL} .

Απώλειες ασυμφωνίας πόλωσης

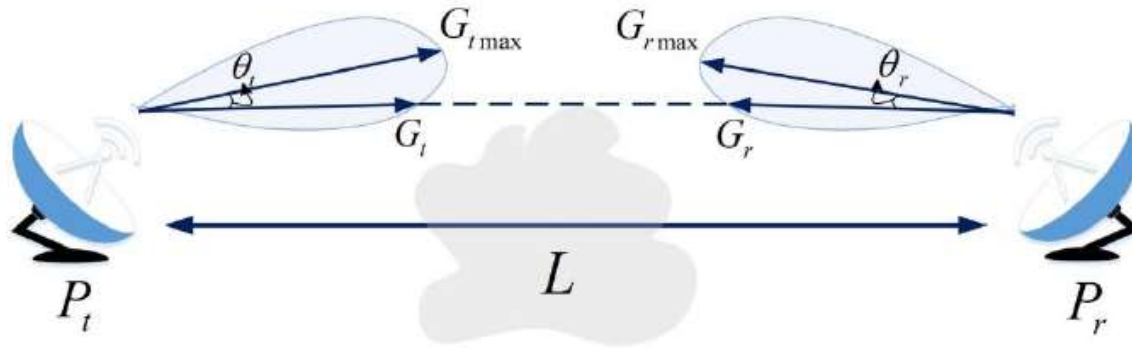
Λόγω της ιδιότητας των κεραιών να λαμβάνουν και να εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μία συγκεκριμένη πόλωση, σε περίπτωση που η πόλωση του λαμβανόμενου κύματος διαφέρει από αυτή της κεραίας λήψης, παρατηρούνται απώλειες εξαιτίας ασυμφωνίας πόλωσης. Οι απώλειες αυξάνονται με την αύξηση της γωνίας μεταξύ των πολώσεων κεραίας-κύματος και στην περίπτωση, μάλιστα, που μια κεραία λαμβάνει σήμα σε πόλωση ορθογώνια (κάθετη) σε σχέση με αυτήν που ιδανικά είναι κατασκευασμένη να λαμβάνει, τότε παρατηρείται πλήρης απώλεια του σήματος.

$$L_{POL} (dB) = -20 \log \left[\cos(\psi_p) \right] \quad (8.9)$$

όπου ψ_p είναι η γωνία μεταξύ της πόλωσης της κεραίας και αυτής του κύματος που λαμβάνεται.

Απώλειες σκόπευσης

Απώλειες σκόπευσης παρατηρούνται, όταν οι κεραίες εκπομπής και λήψης δεν είναι πλήρως ευθυγραμμισμένες μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.4. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κέρδους τους σε σχέση με την τιμή στην κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας τους.



Σχήμα 8.4 Απώλειες λόγω σκόπευσης κεραιών

Ποσοτικά, η τιμή των απωλειών σκόπευσης δίνεται από την εξίσωση

$$\begin{aligned} L_t (dB) &= 12 \left(\frac{\theta_t}{\theta_{3dB}} \right)^2 \\ L_r (dB) &= 12 \left(\frac{\theta_r}{\theta_{3dB}} \right)^2 \end{aligned} \quad (8.10)$$

όπου:

θ_t είναι το γωνιακό σφάλμα σκόπευσης στην κεραία πομπού,

θ_r είναι το γωνιακό σφάλμα σκόπευσης στην κεραία δέκτη,

θ_{3dB} είναι η γωνία ημίσεως ισχύος της κεραίας λήψης.

Απώλειες ανωμαλιών της επιφάνειας του κατόπτρου

Οι ανωμαλίες της επιφάνειας του κατόπτρου σκεδάζουν μέρος της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κάτοπτρο, η οποία είναι πρακτικά αδύνατο να είναι ιδανικά λεία. Αποτέλεσμα είναι να παρατηρούνται απώλειες, των οποίων η τιμή δίνεται από την εξίσωση

$$L_a (dB) = 10 \log \left\{ e^{\left(\frac{-4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2} \right\} \quad (8.11)$$

όπου σ είναι η μέση τετραγωνική τιμή των επιφανειακών ανωμαλιών του κατόπτρου. Η εξίσωση (8.11) αποτελεί τον τεχνολογικό περιοριστικό παράγοντα στη θεωρητικά συνεχώς αυξανόμενη τιμή του κέρδους της κεραίας με την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας. Η σύγχρονη τεχνολογία έχει επιτρέψει την κατασκευή ολοένα και καλύτερων κατόπτρων, τόσο ως προς την εξομάλυνση των επιφανειών τους όσο και ως προς τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι παράγοντες απωλειών.

Εσωτερικές απώλειες του συστήματος λήψης

Αντίστοιχα με την περίπτωση του συστήματος εκπομπής, οι εσωτερικές απώλειες L_{RX} του συστήματος λήψης συνίσταται στο σύνολο των απωλειών που εμπλέκονται μεταξύ της εξόδου της κεραίας λήψης και του δέκτη, ο οποίος είναι είτε ένα σύστημα αποδιαμόρφωσης (αναλογικά σήματα), είτε ένα κύκλωμα απόφασης για το ληφθέν ψηφίο (ψηφιακά σήματα), είτε ένα όργανο μέτρησης της λαμβανόμενης ισχύος (π.χ. ένας αναλυτής φάσματος ή ένα πεδιόμετρο). Ο παράγοντας αυτός οφείλεται στις εισαγόμενες απώλειες καλωδιώσεων, φίλτρων ή άλλων, παθητικών κυρίως, στοιχείων του συστήματος. Η γνώση της τιμής L_{RX} είναι πολύ σημαντική, όχι μόνο για την εκτίμηση της στάθμης του λαμβανόμενου σήματος, αλλά και για τον υπολογισμό του σηματοθορυβικού λόγου στον δέκτη, καθώς ο εσωτερικός θόρυβος ολόκληρου του συστήματος λήψης εξαρτάται δραστικά από την τιμή L_{RX} .

Απώλειες ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων

Οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις (βροχή, χαλάζι, χιόνι κ.ά) προκαλούν σκέδαση και απορρόφηση στο διαδιδόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα, προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο απόσβεση της ισχύος του και αποπόλωση. Μάλιστα, αυτός ο παράγοντας απωλειών είναι ο πιο σημαντικός στις δορυφορικές επικοινωνίες, ιδίως όσον αφορά στο φαινόμενο της βροχής, που προκαλεί τα περισσότερα προβλήματα στις δορυφορικές ζεύξεις, φαινόμενο που είναι έντονο για συχνότητες λειτουργίας πάνω από 10GHz, όπως των δορυφορικών επικοινωνιών. Στη ζώνη συχνοτήτων 6/4 GHz (C-ζώνη) η επίδραση της βροχής στη ζεύξη είναι μικρή. Στη ζώνη συχνοτήτων 14/11 GHz (Ku-ζώνη), και ακόμα περισσότερο στη ζώνη 30/20 GHz (Ka-ζώνη), η εξασθένηση λόγω βροχής γίνεται πολύ σημαντική. Οι δορυφορικές ζεύξεις σχεδιάζονται να επιτυγχάνουν αξιοπιστία από 99,5 ως 99,99%, (ως μέση τιμή στη διάρκεια τυπικά ενός έτους). Άρα, ο λόγος C/N στον δέκτη θα μειωθεί κάτω από την ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή για τη σωστή λειτουργία της ζεύξης για ποσοστό μεταξύ του 0,5 και 0,01% του καθορισμένου χρόνου. Η ζεύξη λέγεται τότε ότι υφίσταται μία διακοπή (outage).

Για να μπορέσει ένα δορυφορικό σύστημα να αντεπεξέλθει στις απώλειες που προέρχονται από τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, απαιτείται μελέτη των φαινομένων αυτών, με σκοπό να προσδιοριστεί ο τρόπος επίδρασής τους πάνω στο σήμα και, τελικά, μοντελοποίηση και ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων τους.

Σύνοψη Απωλειών

Οι συνολικές απώλειες, τις οποίες υφίσταται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα από τον πομπό του δορυφορικού αναμεταδότη μέχρι και την είσοδο του κυκλώματος του δέκτη, είναι οι ακόλουθες (όλες οι απώλειες με θετικά dB):

$$L_{DL} (dB) = L_{TX} + L_t + L_{FS} + L_A + L_{DEPOL} + L_{POL} + L_{rain} + L_r + 2L_a + L_{RX} \quad (8.12)$$

όπου:

L_{TX} είναι οι εσωτερικές απώλειες του συστήματος εκπομπής (σε dB),

L_t είναι οι απώλειες σκόπευσης της κεραίας εκπομπής (σε dB),

L_{FS} είναι οι απώλειες του ελεύθερου χώρου (σε dB),

L_A είναι οι απώλειες της ιονόσφαιρας και τροπόσφαιρας (σε dB),

L_{DEPOL} είναι οι απώλειες εξαιτίας αποπόλωσης (σε dB),

L_{POL} είναι οι απώλειες εξαιτίας ασυμφωνίας πόλωσης (σε dB),

L_{rain} είναι οι απώλειες βροχής (σε dB),

L_r είναι οι απώλειες σκόπευσης της κεραίας λήψης (σε dB),

L_a είναι οι απώλειες εξαιτίας ανωμαλιών της επιφάνειας του κατόπτρου (σε dB),

L_{RX} είναι οι εσωτερικές απώλειες του συστήματος λήψης (σε dB).

Θόρυβος στις Δορυφορικές Ζεύξεις

Ο θόρυβος είναι το ανεπιθύμητο σήμα, το οποίο δυσχεραίνει τη λειτουργία ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος και αποτελεί τον βασικό περιοριστικό παράγοντα αξιοπιστίας του. Ο θόρυβος γενικά είναι κάθε σήμα με μηδενικό πληροφοριακό περιεχόμενο, το οποίο προστίθεται στα χρήσιμα πληροφοριακά σήματα, μειώνοντας την ικανότητα του δέκτη να αναπαράγει ικανοποιητικά τη μεταδιδόμενη πληροφορία. Αποτελείται από ασυσχέτιστα σήματα διαφορετικής προέλευσης, τα οποία συντίθενται κατά τυχαίο τρόπο και περιγράφεται μαθηματικά ως τυχαία διαδικασία. Θόρυβος θεωρείται οποιαδήποτε εκπομπή από πομπούς διαφορετικούς του επιθυμητού, ενώ πολλές φορές καλείται και παρεμβολή.

Ο θόρυβος μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τον τεχνητό και τον φυσικό θόρυβο. Ο τεχνητός θόρυβος (man-made noise) είναι ο θόρυβος που δημιουργείται από διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες και προέρχεται από συσκευές. Ο θόρυβος αυτού του είδους είναι συνήθως κρουστικής μορφής και γρήγορα αποσβένεται με τον χρόνο. Χρησιμοποιώντας κατάλληλους καταστολείς θορύβου στις διάφορες συσκευές, είναι δυνατόν ο θόρυβος να ελαχιστοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό.

Ο φυσικός θόρυβος είναι ανεξάρτητος των διαφόρων ανθρωπίνων δραστηριοτήτων που αναφέρονται στο ευρύτερο περιβάλλον του δέκτη του τηλεπικοινωνιακού συστήματος και οφείλεται σε διάφορα φυσικά φαινόμενα. Με τη σειρά του, διακρίνεται σε δύο κατηγορίες, τον ουράνιο ή εξωτερικό και τον κυκλωματικό ή εσωτερικό θόρυβο. Στην πρώτη κατηγορία κατατάσσεται ο θόρυβος που οφείλεται στην ηλιακή δραστηριότητα, τη γαλαξιακή ακτινοβολία και την ατμόσφαιρα, αφορά κυρίως τις τηλεπικοινωνίες και εισέρχεται σ' ένα σύστημα μέσω της κεραίας λήψης. Ο ουράνιος θόρυβος μπορεί να μειωθεί, αποφεύγοντας με κατάλληλο προσανατολισμό της κεραίας τις πηγές κοσμικής ακτινοβολίας, όπως τον ήλιο ή διάφορους ακτινοβολούντες αστέρες. Πάντως, ο ουράνιος θόρυβος είναι πολύ χαμηλός σε σχέση με τον κυκλωματικό θόρυβο, ο οποίος άλλωστε αποτελεί και την κυριότερη πηγή φυσικού θορύβου. Ο κυκλωματικός θόρυβος οφείλεται σε δύο φαινόμενα. Αφενός στην τυχαία κίνηση των ελευθέρων ηλεκτρονίων σ' ένα παθητικό στοιχείο ή κύκλωμα, οπότε ονομάζεται θερμικός θόρυβος και αφετέρου στην κατά τυχαίο τρόπο διακύμανση της παραγωγής φορέων σ' ένα ενεργητικό στοιχείο, οπότε ονομάζεται θόρυβος βολής.

Τα φέροντα κύματα, που εκπέμπονται από πομπούς διαφορετικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων στην ίδια ζώνη συχνοτήτων με εκείνη του ζητούμενου συστήματος, όταν λαμβάνονται από τις κεραίες του τελευταίου, αποτελούν σήματα θορύβου. Αυτή η μορφή θορύβου ονομάζεται θόρυβος παρεμβολής. Επίσης, η παρουσία περισσότερων του ενός φερόντων ταυτόχρονα στον ενισχυτή ισχύος του δορυφορικού αναμεταδότη προκαλεί την παραγωγή προϊόντων ενδοδιαμόρφωσης, δηλαδή σημάτων σε συχνότητες, που αποτελούν γραμμικούς συνδυασμούς των συχνοτήτων των χρήσιμων σημάτων. Τα προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης εκπέμπονται μαζί με τα ζητούμενα σήματα, δρώντας σαν θόρυβος, ο οποίος και ονομάζεται θόρυβος ενδοδιαμόρφωσης.

Θόρυβος στα δορυφορικά συστήματα

Στις δορυφορικές επικοινωνίες, οι πιθανές πηγές θορύβου προέρχονται είτε από τον εξωτερικό θόρυβο, που εισέρχεται στον δέκτη μέσω της κεραίας και του περιβάλλοντος (ουρανού και ακτινοβολίας της Γης), είτε από τον εσωτερικό θόρυβο των κυκλωμάτων του δέκτη.

Θερμοκρασία θορύβου κεραίας

Η κεραία τόσο του επίγειου σταθμού όσο και του δορυφορικού αναμεταδότη, εκτός από το χρήσιμο σήμα λαμβάνει και θόρυβο από ποικίλες ακτινοβολίες – παρεμβολές, εφόσον ο συλλεγόμενος θόρυβος είναι μέσα στο εύρος ζώνης του συστήματος, καθώς επίσης μέσα στο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας.

Εάν $T_b(\theta, \varphi)$ είναι η θερμοκρασία λαμπρότητας ενός ακτινοβολούντος σώματος στη διεύθυνση (θ, φ) και $G(\theta, \varphi)$ είναι η συνάρτηση κέρδους της κεραίας, τότε η συνολική θερμοκρασία θορύβου της κεραίας προκύπτει από την ολοκλήρωση όλων των συνεισφορών του εξωτερικού θορύβου στο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας ως εξής:

$$T_A = \left(\frac{1}{4\pi} \right) \iint T_b(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi \quad (8.27)$$

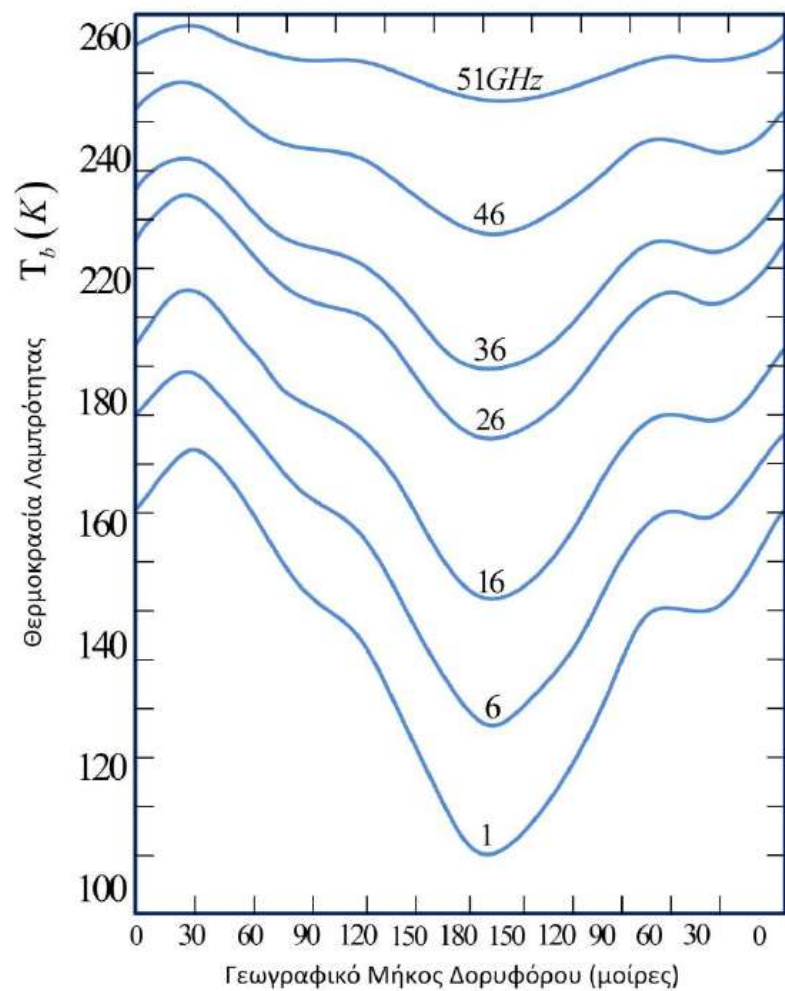
όπου $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$ είναι η στοιχειώδης στερεά γωνία του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας.

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας θορύβου μίας κεραίας πρέπει να υπολογισθεί ο θόρυβος τόσο στην κεραία του δορυφόρου όσο και στην κεραία του επίγειου σταθμού.

Θερμοκρασία θορύβου κεραίας δορυφόρου

Ο θόρυβος, τον οποίο λαμβάνει η κεραία του δορυφόρου, προέρχεται από τη Γη και από το διάστημα. Το εύρος δέσμης μιας κεραίας δορυφόρου είναι γενικά μικρότερο ή ίσο με τη γωνία με την οποία βλέπει ο δορυφόρος τη Γη. Κατά συνέπεια, η Γη έχει τη μέγιστη συνεισφορά στη θερμοκρασία θορύβου. Η συνεισφορά του θορύβου της Γης εξαρτάται από την τροχιακή θέση του δορυφόρου και το εύρος της δέσμης της κεραίας. Στην περίπτωση που το εύρος της δέσμης της δορυφορικής κεραίας είναι περίπου ίσο με τη γωνία ορατότητας του δορυφόρου στη Γη, η οποία είναι $17,5^\circ$ για γεωστατικούς δορυφόρους, η θερμοκρασία θορύβου της κεραίας εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας και την τροχιακή θέση. Στην περίπτωση που το εύρος της δέσμης είναι μικρότερο, όπως στην περίπτωση μιας σημειακής δέσμης, η θερμοκρασία θορύβου της κεραίας εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας και την περιοχή που καλύπτεται από τη Γη.

Οι ηπειρωτικές περιοχές εκπέμπουν περισσότερο θόρυβο από τους ωκεανούς. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν ακριβείς εκτιμήσεις, η θερμοκρασία θορύβου μίας κεραίας δορυφόρου μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά ίση με 290K. Σε αντίθετη περίπτωση, το Σχήμα 8.11 απεικονίζει τη θερμοκρασία θορύβου της κεραίας για δορυφόρους GEO, συναρτήσει της συχνότητας και του γεωγραφικού μήκους. Στην περιοχή της Κι-ζώνης συχνοτήτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί η θερμοκρασία θορύβου της κεραίας που απεικονίζεται στο Σχήμα 8.12 για διάφορες περιοχές της Γης, όπου διαφορετικές περιοχές ακτινοβολούν διαφορετικά επίπεδα θορύβου.



Σχήμα 8.11 Θερμοκρασία θορύβου κεραίας για δορυφόρους GEO ([ITU-R P.372](#)) (Με την ελεύθερη άδεια για εκμετάλλευση και αναπαραγωγή από την [ITU](#))



Σχήμα 8.12 Μοντέλο θερμοκρασίας λαμπρότητας για την Ku-ζώνη συχνοτήτων

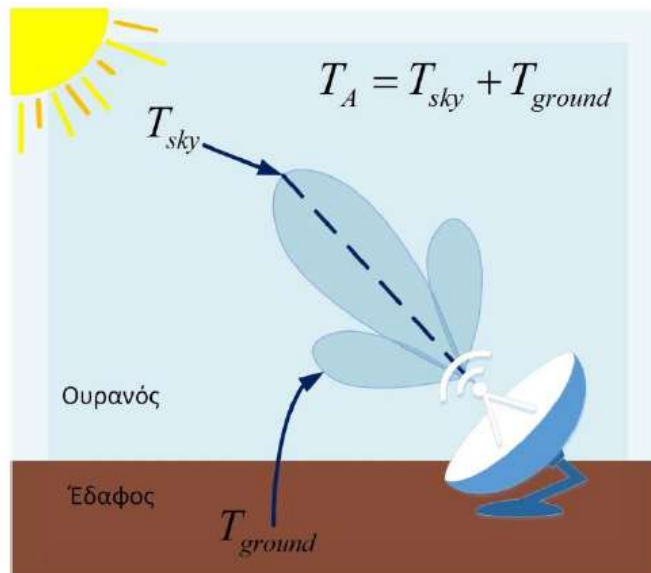
Θερμοκρασία θορύβου κεραίας επίγειου σταθμού

Όταν η κεραία του επίγειου σταθμού είναι προσανατολισμένη προς τον δορυφόρο, δύο είναι οι κύριες πηγές θορύβου, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 8.13:

- Θόρυβος προερχόμενος από τον ουρανό, ο οποίος προκαλείται από το μη ιονισμένο τμήμα της ατμόσφαιρας, περιλαμβάνοντας επιπλέον και τον κοσμικό θόρυβο.
- Θόρυβος προερχόμενος από την ακτινοβολία της Γης. Παρά το γεγονός ότι η κεραία του επίγειου σταθμού δείχνει προς τον δορυφόρο, η ακτινοβολία της Γης συνεισφέρει στον συνολικό θόρυβο της κεραίας του δέκτη μέσω των δευτερευόντων λοβών του διαγράμματος ακτινοβολίας της.

Επομένως, η θερμοκρασία θορύβου του επίγειου σταθμού T_A υπό συνθήκες καθαρού ουρανού υπολογίζεται από την εξίσωση (Maral & Bousquet, 2012):

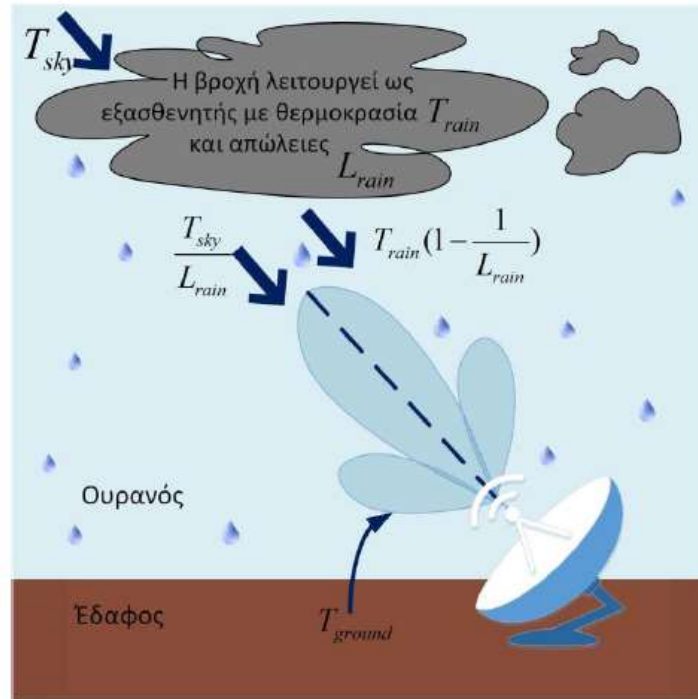
$$T_A = T_{sky} + T_{ground} \quad (8.28)$$



Σχήμα 8.13 Συνεισφορά για τη θερμοκρασία θορύβου κεραίας ενός επίγειου σταθμού υπό συνθήκες καθαρού ουρανού

Στην περίπτωση συνθηκών βροχής (Σχήμα 8.16), η βροχή δρα ως εξασθενητής με εξασθένιση L_{rain} και μέση θερμοδυναμική θερμοκρασία T_{rain} (τυπική τιμή $T_{rain}=275\text{K}$). Δηλαδή, η βροχή εξασθενεί τη συνεισφορά θορύβου του ουρανού, ενώ παράλληλα παράγει επιπλέον θόρυβο με θερμοκρασία θορύβου $T_{rain}\left(1-\frac{1}{L_{rain}}\right)$ στην έξοδο της διαδικασίας εξασθένισης, σύμφωνα με την εξίσωση (8.24). Η αντίστοιχη συνεισφορά του θορύβου από το έδαφος στην ευρύτερη περιοχή του επίγειου σταθμού λόγω βροχής, θεωρείται αμετάβλητη. Επομένως, η θερμοκρασία θορύβου του επίγειου σταθμού παρουσία βροχής περιγράφεται από την εξίσωση (Maral & Bousquet, 2012):

$$T_A = \frac{T_{sky}}{L_{rain}} + T_{rain}\left(1 - \frac{1}{L_{rain}}\right) + T_{ground} \quad (8.30)$$



Σχήμα 8.16 Συνεισφορά για τη θερμοκρασία θορύβου κεραίας ενός επίγειου σταθμού παρουσία βροχής

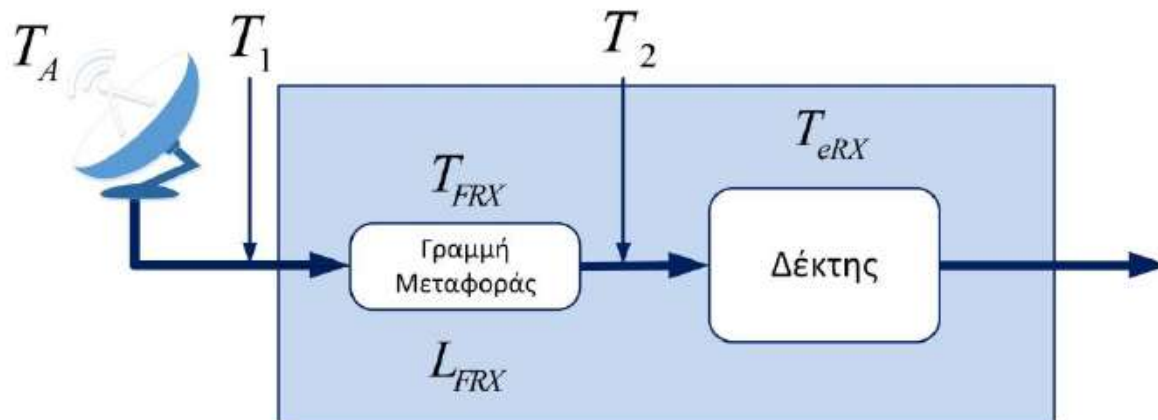
Θερμοκρασία θορύβου στην είσοδο του συστήματος λήψης

Ας θεωρήσουμε ένα απλό σύστημα δορυφορικού δέκτη, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 8.17, όπου η κεραία είναι συνδεδεμένη στον δέκτη μέσω παθητικού κυκλώματος. Τότε μπορούμε, με βάση τις εξισώσεις που περιγράφουν την αλυσίδα των στοιχείων, να υπολογίσουμε την ενεργό θερμοκρασία θορύβου του συστήματος στα σημεία 1 και 2. Αυτή θα είναι αντίστοιχα ίση με $T_1 = T_A + (L_{FRX} - 1)T_{FRX} + \frac{T_{e,RX}}{G_{FRX}}$ και

θερμοκρασία στην είσοδο του δέκτη $T_2 = T_1 G_{FRX} = \frac{T_1}{L_{FRX}} = \frac{T_A}{L_{FRX}} + \left(1 - \frac{1}{L_{FRX}}\right)T_{FRX} + T_{e,RX}$, όπου T_A είναι η

θερμοκρασία θορύβου της κεραίας, T_{FRX} είναι η θερμοκρασία θορύβου του εξασθενητή (καλώδιο), $T_{e,RX}$ είναι η θερμοκρασία θορύβου του δέκτη, L_{FRX} είναι οι απώλειες (εξασθένιση) του καλωδίου και $G_{FRX} = 1/L_{FRX}$.

Από τις προηγούμενες σχέσεις μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η θερμοκρασία θορύβου του συστήματος T_2 λαμβάνει υπόψη όλα τα στοιχεία του δέκτη (τον θόρυβο της κεραίας, της γραμμής μεταφοράς και του δέκτη), ενώ η γραμμή μεταφοράς μειώνει τον θόρυβο από την κεραία, αλλά συνεισφέρει επίσης στον θόρυβο, και τελικά αυξάνει τη θερμοκρασία θορύβου του συστήματος. Υπολογίζεται ότι για κάθε 0,1dB απώλειας του εξασθενητή, συνεισφέρει κατά $(1 - 10^{0,01})290 = 6,6K$ στη θερμοκρασία του συστήματος.



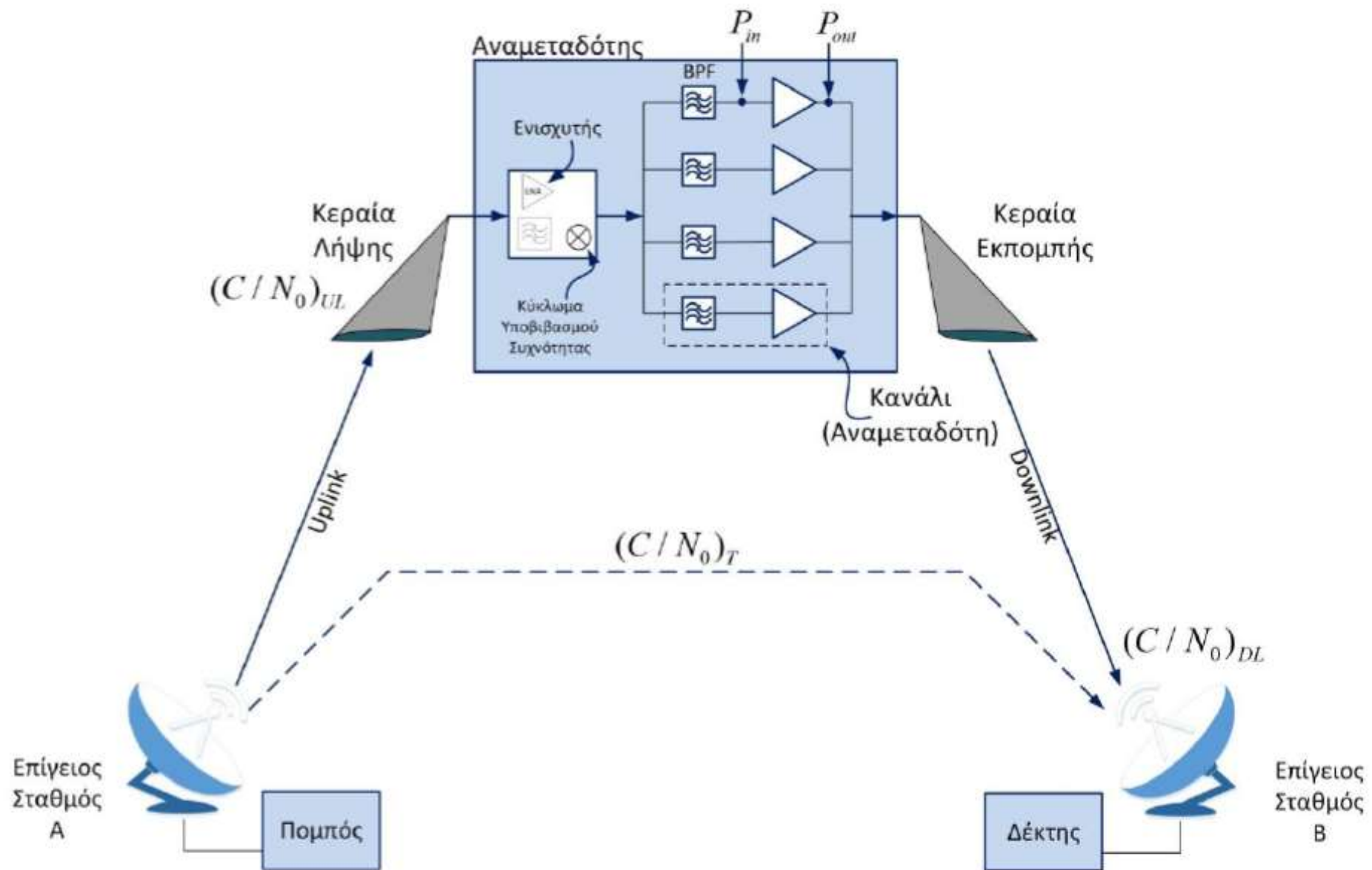
Σχήμα 8.17 Παράδειγμα υπολογισμού θερμοκρασιών θορύβου δορυφορικού δέκτη

Δείκτης ποιότητας εξοπλισμού λήψης

Η ποιότητα ή αποδοτικότητα των τμημάτων ενός δέκτη μίας δορυφορικής ζεύξης συχνά καθορίζεται από τον δείκτη ποιότητας (figure of merit), ο οποίος συνήθως συμβολίζεται ως G/T και έχει μονάδες $1/\text{kelvin}$ ή σε λογαριθμική κλίμακα dBK^{-1} . Ορίζεται ως ο λόγος του κέρδους της κεραίας του δέκτη προς την ενεργό θερμοκρασία θορύβου του συστήματος του δέκτη. Ο λόγος G/T συνήθως ορίζεται σε σχέση με την κεραία λήψης του επίγειου σταθμού και είναι ένας δείκτης της ευαισθησίας της κεραίας στο σήμα φέροντος της κάτω ζεύξης από τον δορυφόρο. Χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει τη συνδυασμένη απόδοση της κεραίας του επίγειου σταθμού και του ενισχυτή χαμηλού θορύβου. Εξαρτάται από το μέγιστο κέρδος της κεραίας, αλλά κυρίως από τη θερμοκρασία θορύβου της κεραίας και την ενεργό θερμοκρασία στην είσοδο του δέκτη.

Σηματοθορυβικός Λόγος

Η απόδοση της ζεύξης αξιολογείται από τον λόγο της λαμβανόμενης ισχύος του φέροντος, C , προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου, N_o στην είσοδο του δέκτη και αναφέρεται ως σηματοθορυβικός λόγος C/N_o , εκφρασμένος σε μονάδες Hertz. Ο λόγος αυτός έχει το πλεονέκτημα ότι δεν προϋποθέτει γνώση του εύρους ζώνης του σήματος, ενώ διευκολύνει τον προσδιορισμό της ποιότητας μιας ζεύξης, χωρίς τον ακριβή προσδιορισμό του σήματος. Η απόδοση της ζεύξης μπορεί να αξιολογηθεί, χρησιμοποιώντας και άλλους λόγους, όπως ο λόγος C/N και C/T . Ο λόγος C/N εκφράζεται από $C/N = (C/N_o)(1/B_n)$ (αδιάστατο μέγεθος), όπου C είναι η ισχύς του φέροντος, N η ισχύς του θορύβου και B_n το εύρος ζώνης θορύβου του δέκτη. Ο λόγος C/T εκφράζεται από $C/T = (C/N_o)k$ (διαστάσεις Watt/Kelvin), όπου T είναι η θερμοκρασία θορύβου και k η σταθερά του Boltzmann.



Σχήμα 8.19 Συνολική ζεύξη μεταξύ δύο επίγειων σταθμών με διάφανο επαναλήπτη

Συνολικός σηματοθορυβικός λόγος

Ο συνολικός υπολογισμός του προϋπολογισμού της ζεύξης, και άρα του συνολικού σηματοθορυβικού λόγου, εξαρτάται από το εάν ο δορυφόρος είναι εφοδιασμένος με έναν συμβατικό αναμεταδότη ή με έναν αναγεννητικό (regenerative) αναμεταδότη. Στην πρώτη περίπτωση, ο ρόλος του αναμεταδότη είναι απλά η ενίσχυση του λαμβανόμενου σήματος της άνω ζεύξης (με ελάχιστη παραμόρφωση και θόρυβο) και η αλλαγή της συχνότητας του φέροντος. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο συχνά αποκαλείται και διαφανής (transparent) αναμεταδότης. Στην περίπτωση του αναγεννητικού αναμεταδότη, το σήμα της άνω ζεύξης (γενικά ψηφιακό) από τον επίγειο σταθμό Α αποδιαμορφώνεται στον αναμεταδότη, μετά αναγεννάται, συχνά μετά την εφαρμογή κάποιας αποκωδικοποίησης και επεξεργασίας βασικής ζώνης, διαμορφώνεται ή εκ νέου ενισχύεται και μεταδίδεται στον επίγειο σταθμό Β. Η όλη διαδικασία ονομάζεται επεξεργασία επί του δορυφόρου (on-board processing, OBP).

Επίδραση άλλων παραμέτρων στο σηματοθορυβικό λόγο

Υπάρχουν και άλλες συνεισφορές θορύβου, οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς του προϋπολογισμού ζεύξης, όπως είναι:

- τα προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης, καθώς και άλλες επιδράσεις, που οφείλονται στις μη γραμμικότητες του εξοπλισμού, οι οποίες προκαλούνται από τη λειτουργία πολλαπλών φερόντων στον δορυφορικό αναμεταδότη (συμπεριλαμβανομένων, ενδεχομένως, και των πολλαπλών διαδρομών) και στον επίγειο σταθμό. Ονομάζονται, επίσης, θόρυβος ενδοδιαμόρφωσης, γενικά εξισώνονται με τον λευκό θόρυβο και προστίθενται στον προϋπολογισμό ζεύξης με έναν όρο $(C / N_o)_{IM}$ και
- η παρεμβολή που παράγεται από το ίδιο δορυφορικό σύστημα ή άλλα συστήματα. Και πάλι, αυτό το είδος της παρεμβολής μπορεί γενικά να θεωρηθεί ως μη-συμφασικό, σχεδόν λευκός θόρυβος και ονομάζεται θόρυβος παρεμβολών.

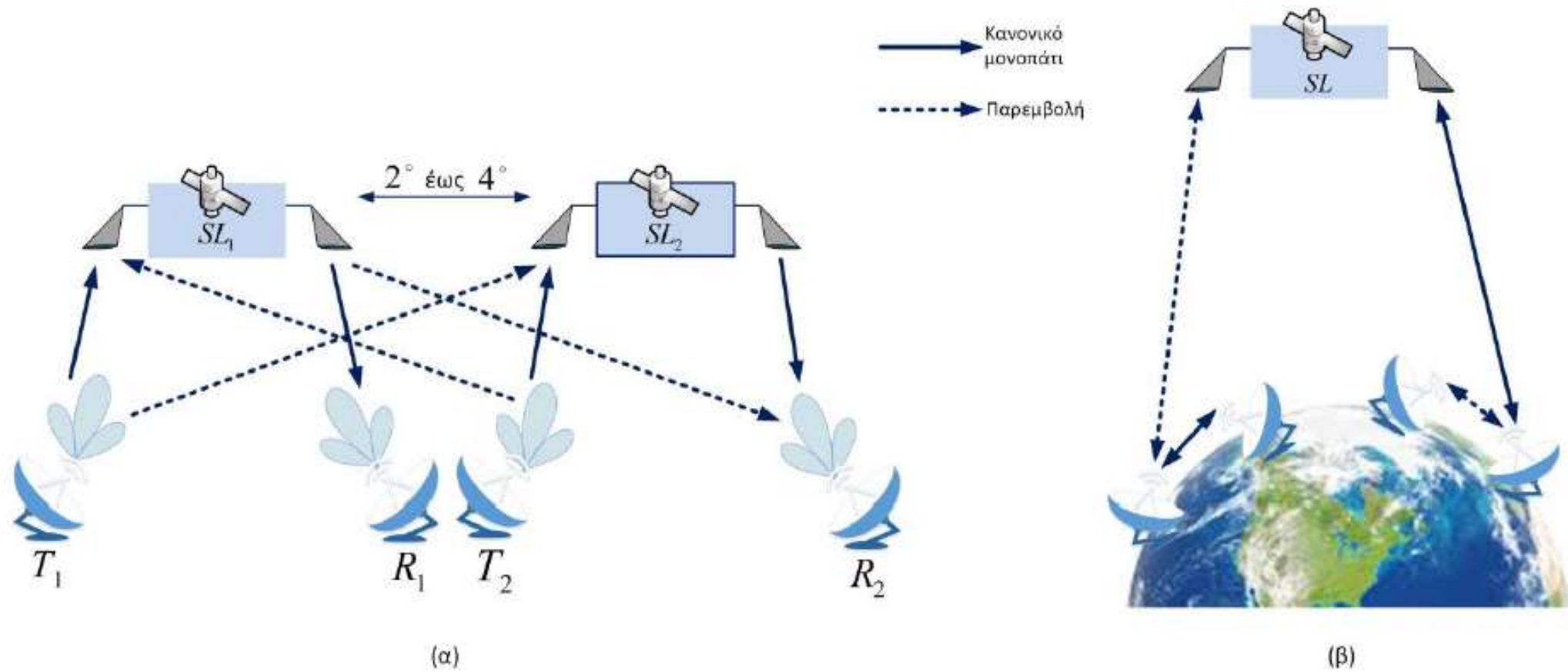
Επίδραση ενδοδιαμόρφωσης στον σηματοθορυβικό λόγο

Το φαινόμενο της ενδοδιαμόρφωσης συμβαίνει, όταν τα πολλαπλά φέροντα μεταδίδονται μέσω του ενισχυτή υψηλής ισχύος (TWTA ή HPA) του αναμεταδότη και προκαλούνται προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης στο πλάτος και τη φάση. Αυτός είναι και ο λόγος λειτουργίας των ενισχυτών σε χαμηλότερη ισχύ απ' ό,τι η ισχύς κορεσμού (backoff). Έχει αποδειχθεί ότι προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης τρίτης τάξης συμπίπτουν με γειτονικές συχνότητες αναμεταδοτών, προκαλώντας τους παρεμβολή. Όταν υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός διαμορφωμένων φερόντων, τα προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης δεν είναι διακριτά, αλλά αντί αυτού εμφανίζονται ως ένα είδος θορύβου, που ονομάζεται θόρυβος ενδοδιαμόρφωσης.

Επίδραση παρεμβολών στο σηματοθορυβικό λόγο

Οι παρεμβολές εκπομπών μπορούν να προέρχονται από το ίδιο το δορυφορικό σύστημα, με τη μορφή μεταδόσεων σε γειτονικά κανάλια και κάθετα πολωμένες μεταδόσεις, καθώς και από άλλα δορυφορικά και επίγεια συστήματα, όπως:

- εκπομπές (ανεπιθύμητη ισχύς), που λαμβάνονται από έναν γειτονικό δορυφόρο από τους πλευρικούς λοβούς των επίγειων σταθμών του οικείου συστήματος (downlink),
- λήψη από τον εκάστοτε δορυφόρο των εκπομπών (ανεπιθύμητη ισχύς) εκτός άξονα (off-axis) της διεύθυνσης σκόπευσης από τους επίγειους σταθμούς, οι οποίοι λειτουργούν προς την κατεύθυνση ενός παρακείμενου δορυφόρου (uplink), όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.26(α), και
- επίγειες εκπομπές, κυρίως ζεύξεις αναμετάδοσης, που λειτουργούν στην ίδια (κοινή) ζώνη συχνοτήτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.26(β) (Maral & Bousquet, 2012).



Σχήμα 8.26 (α) Γεωμετρία παρεμβολής μεταξύ γειτονικών δορυφόρων, (β) Γεωμετρία παρεμβολής μεταξύ επίγειων σταθμών, αναμεταδοτών και δορυφόρου

Ένα άλλο είδος παρεμβολής είναι η παρεμβολή γειτονικού καναλιού (adjacent channel interference) που συμβαίνει, όταν το εύρος ζώνης του αναμεταδότη ταυτόχρονα μοιράζεται από πολλά φέροντα, όπου οι κεντρικές συχνότητες έχουν μικρή απόσταση μεταξύ τους εντός του εύρους ζώνης του αναμεταδότη. Όταν ο δορυφόρος μεταδίδει στους επίγειους σταθμούς, οι οποίοι βρίσκονται εντός του ίχνους του, τα διαφορετικά φέροντα φιλτράρονται από τον δέκτη, έτσι ώστε κάθε επίγειος σταθμός να λαμβάνει μόνο το προβλεπόμενο σήμα. Το φιλτράρισμα θα ήταν πιο εύκολο να πραγματοποιηθεί, εάν υπήρχε μία μεγάλη ζώνη προστασίας μεταξύ των γειτονικών καναλιών, η οποία πρακτικά δεν είναι εφικτή, καθώς θα οδηγούσε στην αναποτελεσματική χρήση του εύρους ζώνης του αναμεταδότη. Το αποτέλεσμα είναι ότι ένα μέρος της ισχύος του φέροντος του γειτονικού καναλιού από το επιθυμητό λαμβάνεται στον δέκτη, εξαιτίας της επικάλυψης των χαρακτηριστικών του πλάτους των φίλτρων, προκαλώντας κατά συνέπεια αύξηση του θορύβου.

Προδιαγραφές διαθεσιμότητας και αξιοπιστίας του συστήματος

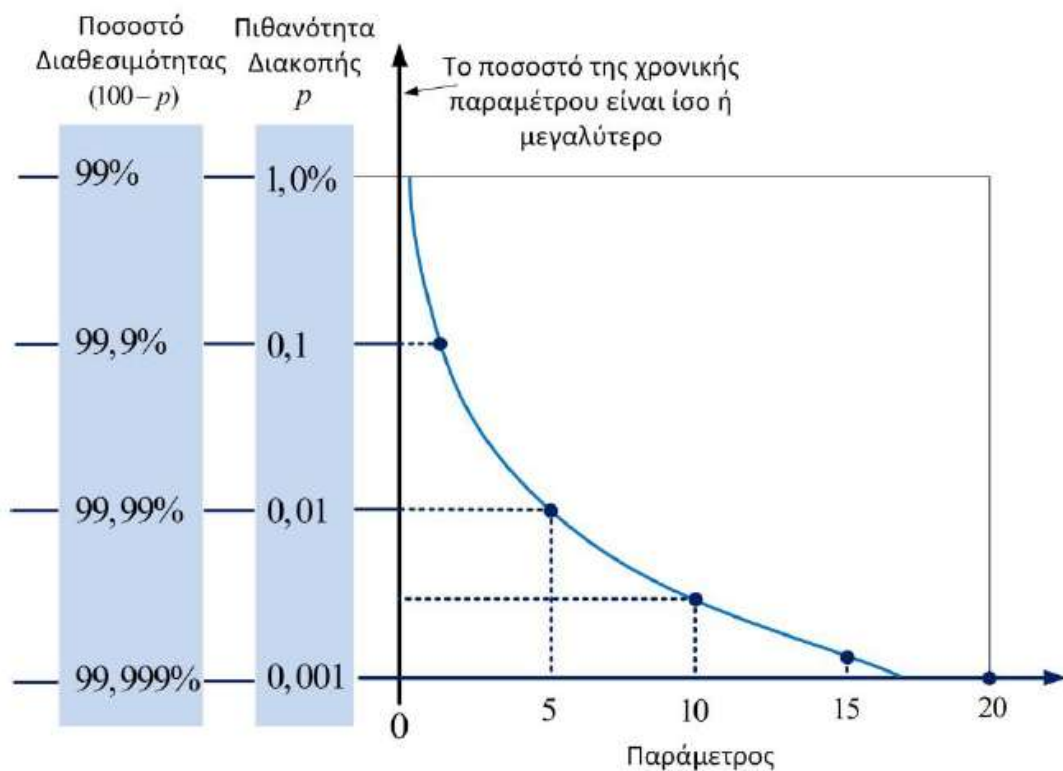
Τα κριτήρια και οι στόχοι ποιότητας, που χρησιμοποιούνται συνήθως για τη σχεδίαση των δορυφορικών ζεύξεων, είναι η διαθεσιμότητα (availability), η οποία αναφέρεται στο ποσοστό του χρόνου, όπου το σύστημα είναι λειτουργικό, και η επίδοση σφαλμάτων (error performance), η οποία αναφέρεται στον ρυθμό σφαλμάτων για το χρονικό διάστημα, όπου το σύστημα είναι διαθέσιμο. Είναι συχνά απαραίτητο και προς το συμφέρον του σχεδιαστή να διευκρινιστούν ορισμένες παράμετροι του δορυφορικού συστήματος ζεύξης με στατιστικό τρόπο, λόγω της στοχαστικής φύσης του μέσου μετάδοσης. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο κατά την εξέταση των παραμέτρων, που επηρεάζονται από διαταραχές μετάδοσης μέσω της ατμόσφαιρας, διότι οι βασικοί μηχανισμοί διάδοσης ραδιοκυμάτων δεν είναι ντετερμινιστικοί και μπορεί να περιγραφούν μόνο με στατιστικό τρόπο. Η επίδοση μπορεί να περιγραφεί μόνο με την πιθανότητα να ικανοποιούνται συγκεκριμένες τιμές για τα δύο κριτήρια ποιότητας ή, ισοδύναμα, με το ποσοστό του χρόνου, για το οποίο οι τιμές ικανοποιούνται. Τα κριτήρια αυτά, όπως θα δείξουμε στη συνέχεια, συνδέονται με τιμές κατωφλίου S/N για αναλογική μετάδοση ή BER για ψηφιακή μετάδοση.

Οι παράμετροι απόδοσης με βάση τη στατιστική, ορίζονται συνήθως από ένα ποσοστό επί τοις εκατό σε ετήσια βάση $p(\%)$, όπως αναλύθηκε προηγουμένως. Δηλαδή, είναι το ποσοστό του χρόνου σε ένα έτος ή ένα μήνα, όπου μία παράμετρος είναι ίση με ή υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή. Παραδείγματα παραμέτρων, που συχνά καθορίζονται σε ποσοστό επί τοις εκατό, είναι:

- λόγος φέροντος-προς-θόρυβο και όλες οι συναφείς παράμετροι: C/N , C/N_0 , E_b/N_0 ,
- παράμετροι ατμοσφαιρικών επιδράσεων, όπως π.χ. εξασθένηση εξαιτίας βροχής, απομόνωση πόλωσης,
- λόγος σήματος-προς-θόρυβο S/N ,
- λόγος φέροντος-προς-παρεμβολή C/I .

Οι δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενες χρονικές περίοδοι για τις προδιαγραφές των παραμέτρων είναι η ετήσια και η περίοδος του χειρότερου μήνα. Τα περισσότερα μοντέλα πρόβλεψης της διάδοσης και των απαιτήσεων σταθερών υπηρεσιών FSS καθορίζονται σε ετήσια βάση. Οι υπηρεσίες ευρυεκπομπής (broadcasting services), συμπεριλαμβανομένης της ραδιοτηλεοπτικής μετάδοσης δορυφορικών υπηρεσιών (BSS), συχνά καθορίζονται με βάση τον χειρότερο μήνα. Ο χειρότερος μήνας δηλώνει τον ημερολογιακό μήνα, όπου τα προβλήματα μετάδοσης, κυρίως η εξασθένηση εξαιτίας βροχής, δημιουργούν τη σημαντικότερη υποβάθμιση στην απόδοση του συστήματος. Οι παράμετροι που επηρεάζονται από την εξασθένηση εξαιτίας βροχής, για παράδειγμα ο λόγος φέροντος-προς-θόρυβο και ο λόγος σήματος-προς-θόρυβο, θα έχουν χειρότερες τιμές τον μήνα Ιούλιο ή Αύγουστο για τις περισσότερες περιοχές των Ηνωμένων Πολιτειών ή της Ευρώπης, όταν είναι πιο πιθανή η εμφάνιση συνεχούς δυνατής βροχής.

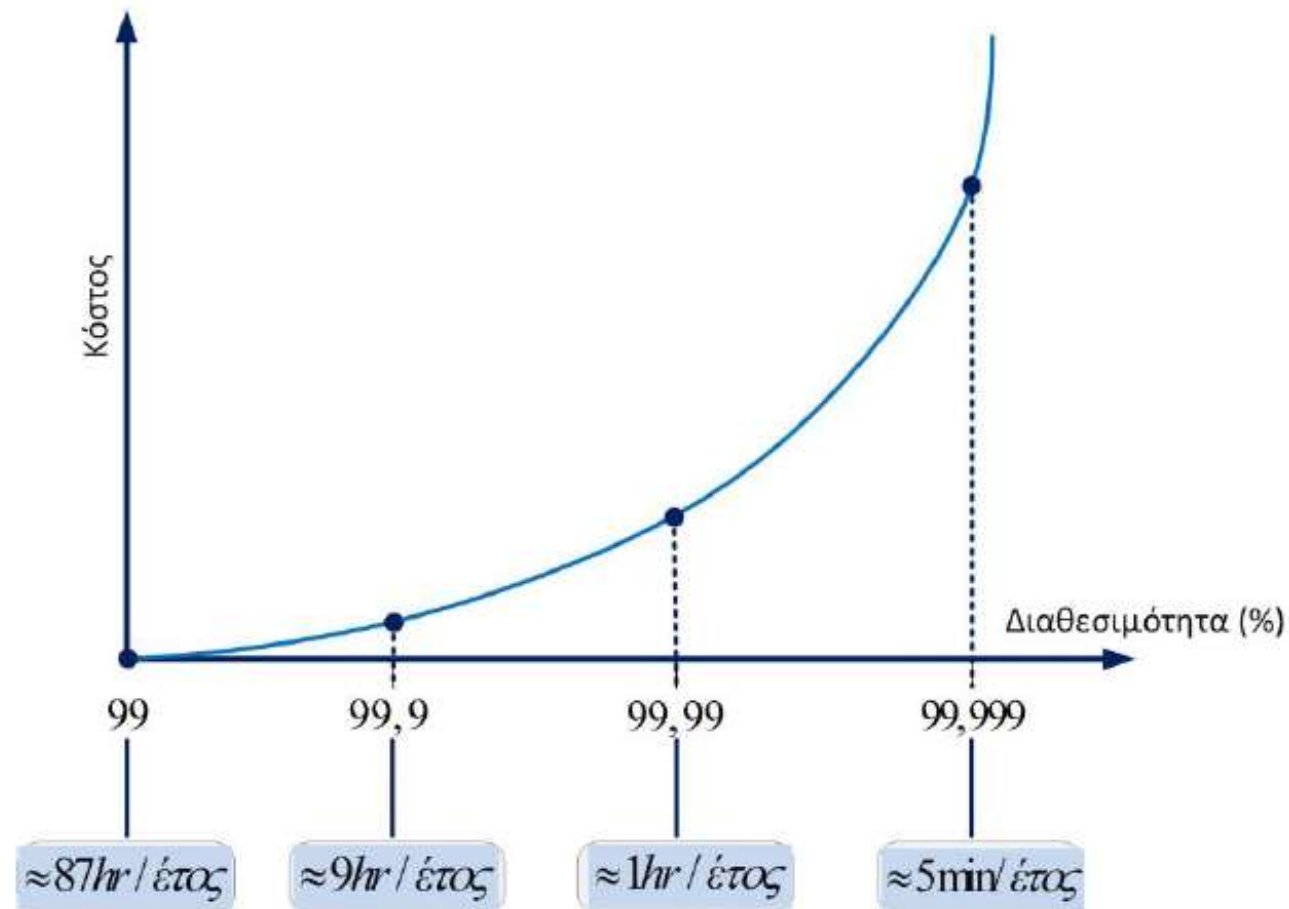
Το Σχήμα 8.27 δείχνει μια τυπική μέθοδο εμφάνισης μίας παραμέτρου απόδοσης ζεύξης, η οποία προσδιορίζεται επί τοις εκατό σε μία χρονική βάση. Η παράμετρος (οριζόντιος άξονας) παρουσιάζεται σε γραμμική κλίμακα μίας ημι-λογαριθμικής γραφικής παράστασης, με τη μεταβλητή του ποσοστού του χρόνου (κάθετος άξονας) να απεικονίζεται σε λογαριθμική κλίμακα. Ο Πίνακας 8.2 παρουσιάζει τις ετήσιες και μηνιαίες περιόδους διακοπής, σε ώρες και λεπτά, που αντιστοιχούν στο εύρος των ποσοστιαίων τιμών του p και $(100-p)$, οι οποίες συναντώνται συνήθως στις προδιαγραφές ζεύξης των δορυφορικών επικοινωνιών. Στο Σχήμα 8.28 απεικονίζεται η διαθεσιμότητα ενός δορυφορικού συστήματος βάσει του Πίνακα 8.2 (Ippolito, 2008) και η σχέση με το κόστος υλοποίησης. Όσα περισσότερα 'εννιάρια' χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση του δορυφορικού συστήματος, δηλαδή πολύ μικρή πιθανότητα διακοπής, τόσο μεγαλύτερο είναι και το κόστος υλοποίησης. Ο λόγος προφανής, αφού θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν περισσότερες εφεδρείες σε όλες τις ζεύξεις επίγειου σταθμού και δορυφόρου.



Υπέρβαση διακοπής p (%)	Διαθεσιμότητα ή αξιοπιστία $100-p$ (%)	Χρόνος διακοπής της ζεύξης	
		Ετήσια βάση	Μηνιαία βάση
0	100	0 hr	0 hr
10	90	876 hr	73 hr
1	99	87,6 hr	7,3 hr
0,1	99,9	8,76 hr	44 min
0,05	99,95	4,38 hr	22 min
0,01	99,99	53 min	4 min
0,005	99,995	26 min	2 min
0,001	99,999	5 min	0,4 min

Πίνακας 8.2 Ετήσιος και μηνιαίος χρόνος διακοπής για συγκεκριμένη διαθεσιμότητα και ποσοστό διακοπής

Σχήμα 8.27 Ποσοστό του χρόνου για μία παράμετρο



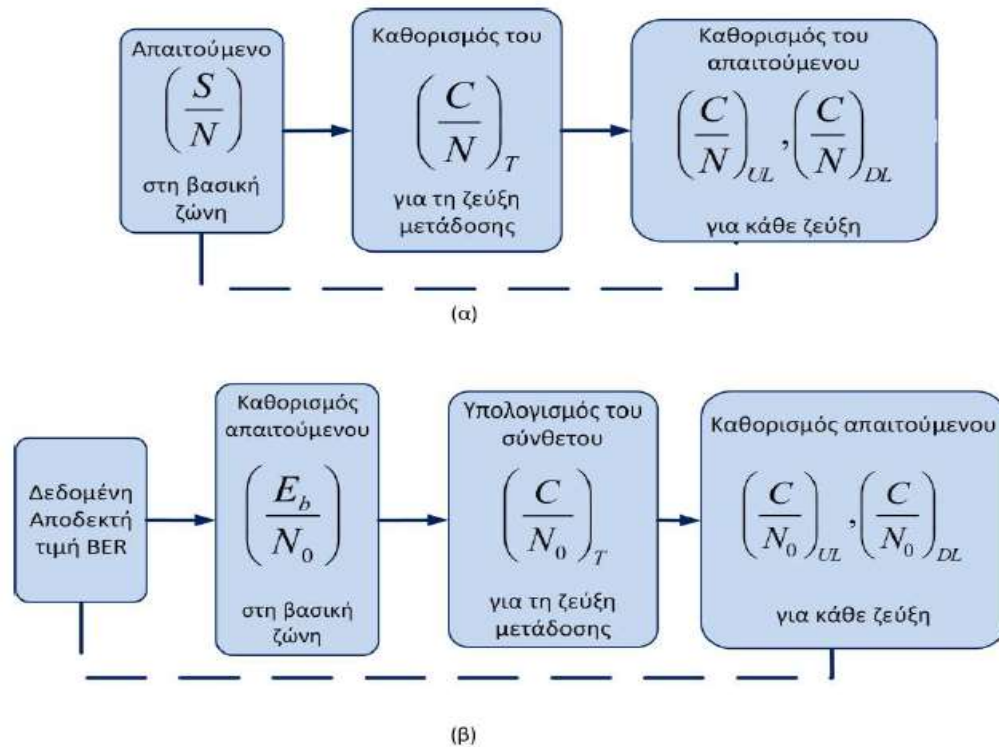
Σχήμα 8.28 Σχέση κόστους-διαθεσιμότητας για δορυφορικές ζεύξεις

Η ποιότητα των, ψηφιακών κυρίως, δορυφορικών συστημάτων επικοινωνίας εκφράζεται μέσω της διαθεσιμότητας και της αξιοπιστίας τους για δεδομένο ρυθμό μετάδοσης ψηφίων.

Σύνοψη σχεδιασμού ζεύξης

Οι περισσότερες δορυφορικές ζεύξεις είναι σχεδιασμένες με έναν συγκεκριμένο σύνθετο λόγο C/N ή απαίτηση E_b/N_0 , για να επιτευχθεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο απόδοσης. Το επίπεδο απόδοσης για τα αναλογικά συστήματα μετάδοσης συνήθως ορίζεται από το απαιτούμενο επίπεδο του λόγου σήματος-προς-θόρυβο S/N βασικής ζώνης για αποδεκτή απόδοση. Για ψηφιακά συστήματα μετάδοσης, η συνήθης προδιαγραφή, για να επιτευχθεί ένα αποδεκτό ποσοστό σφάλματος bit (BER), είναι ο λόγος E_b/N_0 .

Η διαδικασία ανάλυσης της απόδοσης, που ακολουθείται για να επιτευχθεί ένας επιθυμητός σχεδιασμός ενός δορυφορικού συστήματος, συνοψίζεται στο Σχήμα 8.30(α) για την αναλογική μετάδοση και στο Σχήμα 8.30(β) για την ψηφιακή μετάδοση. Η διαδικασία σχεδιασμού είναι επαναληπτική, με τις παραμέτρους του συστήματος, όπως ισχύ εκπομπής, κέρδη κεραιών, ρυθμό μετάδοσης, συντελεστές θορύβου, κ.λπ., να μεταβάλλονται, για να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση του συνολικού συστήματος.



Σχήμα 8.30 Διαδικασία ανάλυσης των επιδόσεων για μία δορυφορική ζεύξη για (α) συστήματα αναλογικής μετάδοσης (β) συστήματα ψηφιακής μετάδοσης

Συνήθως καθορίζονται περιθώρια στην άνω και κάτω ζεύξη και περιλαμβάνονται στον προϋπολογισμό ζεύξης, ώστε να λαμβάνεται υπόψη η εξασθένηση διάδοσης ή/και ο θόρυβος. Τα περιθώρια συνυπολογίζονται για:

- εξασθένηση διάδοσης, όπως ατμοσφαιρικά αέρια, βροχή, σύννεφα κ.λπ.,
- θόρυβος, όπως πηγές εξασθένησης, θόρυβος περιβάλλοντος, ενδοδιαμόρφωση,
- παρεμβολές, όπως από άλλους δορυφόρους, από επίγεια δίκτυα, από φυσικές πηγές, και
- περιθώρια εφαρμογής, όπως για μόντεμ, κωδικοποίηση, συμπίεση και άλλα στοιχεία επεξεργασίας.

Γενικά, κάθε σύστημα πρέπει να αξιολογηθεί από μόνο του. Η απόδοση μπορεί να διαφέρει σημαντικά ακόμη και για τις ίδιες παραμέτρους του συστήματος, λόγω της υποβάθμισης της άνω και κάτω ζεύξης και τη συνεισφορά άλλων απωλειών. Αυτό το κεφάλαιο παρείχε τις βασικές εξισώσεις, που αφορούν τον σχεδιασμό και τις διαδικασίες αξιολόγησης, μαζί με σημαντικούς προβληματισμούς για την αξιολόγηση της απόδοσης από άκρο-σε-άκρο για τα δορυφορικά δίκτυα.