

ΔΟΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΚΑΙ ΖΕΥΞΕΙΣ

7^ο Εξάμηνο

Σώζος Κώστας

Υποσυστήματα δορυφορικών ζεύξεων

- Κεραίες
- Απώλειες ελεύθερου χώρου
- Link Budget
- Θερμοκρασία θορύβου
- Βασικές παράμετροι της ζεύξης

Πυκνότητα ροής ισχύος

p_t = εκπεμπόμενη ισχύς

p_r = λαμβανόμενη ισχύς

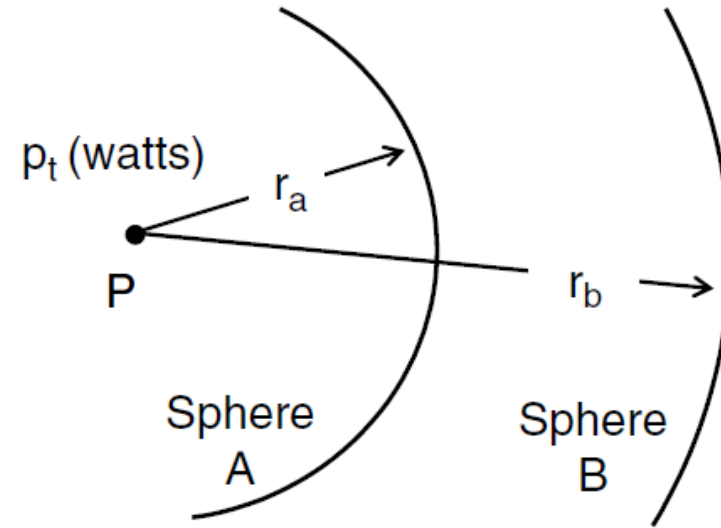
g_t = κέρδος κεραίας πομπού

g_r = κέρδος κεραίας δέκτη

r = απόσταση

Πυκνότητα ροής ισχύος
(power flux density)

$$pfd = \frac{p_t}{4\pi r^2}$$



Η μεταδιδόμενη πυκνότητα ισχύος ενός ραδιοκύματος είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης από την πηγή.

Κέρδος κεραίας

- Η ισοτροπική ακτινοβολία ισχύος συνήθως δεν είναι αποτελεσματική για τις δορυφορικές επικοινωνίες, επειδή τα επίπεδα πυκνότητας ισχύος θα είναι χαμηλά για τις περισσότερες εφαρμογές.
- Κάποια κατευθυντικότητα (κέρδος) είναι επιθυμητή τόσο για τις κεραίες εκπομπής όσο και για τις κεραίες λήψης. Το κέρδος της ιδανικής κεραίας με εμβαδό A ορίζεται ως:

$$g = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad \text{με} \quad A_e = \eta A \quad \eta: \text{aperture efficiency}$$

- Η απολαβή κεραίας σε dB για δορυφορικές εφαρμογές εκφράζεται συνήθως ως η τιμή dB πάνω από την απολαβή ενός ισοτροπικού ακτινοβολητή, που γράφεται ως dBi. Σε λογαριθμική κλίμακα έχουμε:

$$G = 10 \log_{10} \left[\eta \frac{4\pi A}{\lambda^2} \right], dBi$$

- Για παράδειγμα, ένας πομπός 100 watt που τροφοδοτεί μια κεραία με κέρδος 4 (ισοδύναμο με 6 dBi) θα έχει την ίδια ισχύ σήματος στην κατεύθυνση του κύριου λοβού του με έναν πομπό 400 watt που τροφοδοτεί μια κεραία με κέρδος 1 (ισοδύναμο με 0 dBi).

EIRP

Ενεργή ισοτροπική ακτινοβολούμενη ισχύς (effective isotropic radiated power), eirp.

- Είναι η υποθετική ισχύς που θα έπρεπε να ακτινοβολείται από μια ισοτροπική κεραία για να δώσει την ίδια ισχύ σήματος με μια πραγματική κεραία στην κατεύθυνση της ισχυρότερης δέσμης της κεραίας.
- Είναι η βασική μετρική που ποσοτικοποιεί την ποιότητα ενός πομπού.

Γραμμικά

$$eirp = p_t g_t$$

$$pfd = \frac{eirp}{4\pi r^2}$$

Σε dB

$$\textbf{EIRP} = \textbf{P}_t + \textbf{G}_t$$

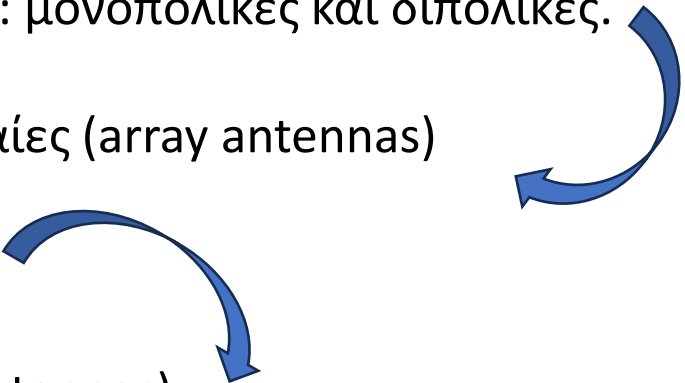
$$PFD = 10\log_{10} \frac{p_t g_t}{4\pi r^2}$$

$$= 10\log_{10}(p_t) + 10\log_{10}(g_t) - 20\log_{10}(r) - 10\log_{10}(4\pi)$$

$$= P_t + G_t - 20\log_{10}(r) - 10.99 = \textbf{EIRP} - 20\log_{10}(r) - 10.99$$

Βασικοί τύποι κεραιών

Στους δορυφόρους χρησιμοποιούνται 2 βασικοί τύποι κεραιών.
Αυτοί είναι:

- Κεραίες σύρματος (wire antennas): μονοπολικές και διπολικές.
 - Κεραίες συστοιχίας ή στοιχειοκεραίες (array antennas)
 - Κεραίες χοάνης (horn antennas).
 - Κεραίες ανακλαστήρα (reflector antennas).
- 

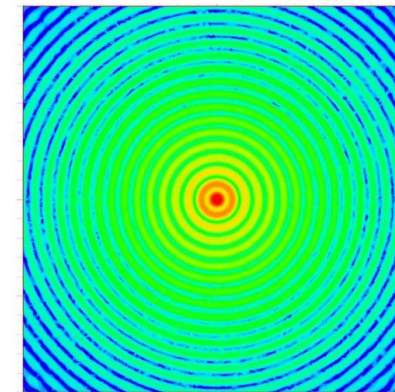
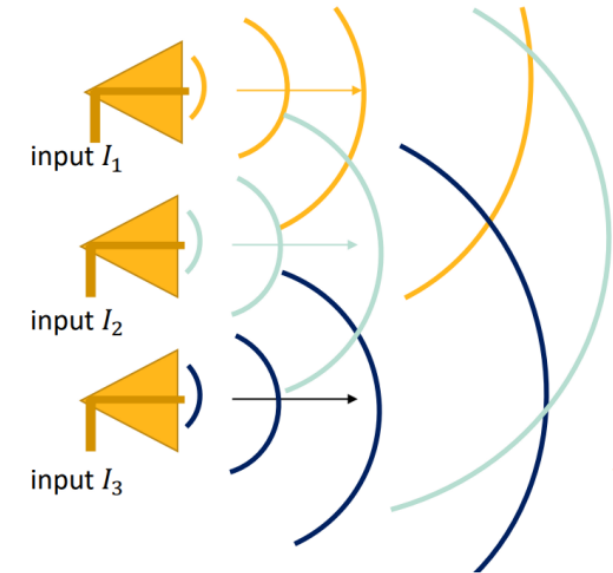
Στοιχειοκεραίες σύρματος

Κάθε μεμονωμένη κεραία εκπέμπει ενέργεια ισοτροπικά. Εάν τοποθετήσουμε πολλαπλά στοιχεία (κεραίες) έτσι ώστε τα κύματά τους να συμβάλλουν ενισχυτικά σε μία κατεύθυνση και καταστρεπτικά στις άλλες τότε έχουμε:

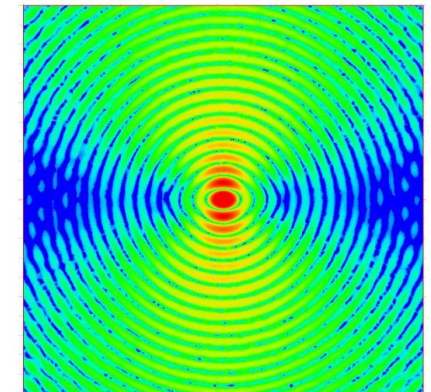
- Περισσότερη ενέργεια στην επιθυμητή κατεύθυνση.
- Μια στενότερη δέσμη με υψηλότερο κέρδος.

Περιοχές Συχνοτήτων:

- Χρησιμοποιούνται κυρίως στις **VHF** και **UHF** ζώνες.
- Βασικός ρόλος: Επικοινωνία για **συστήματα τηλεμετρίας και ελέγχου δορυφόρων**.



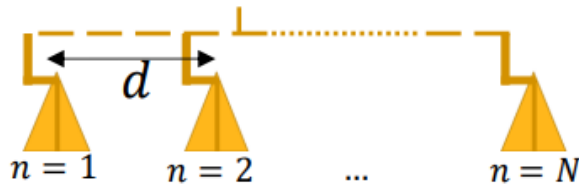
Ισοτροπικός
ακτινοβολητής



Δύο ισοτροπικοί
ακτινοβολητές που
απέχουν $\lambda/2$

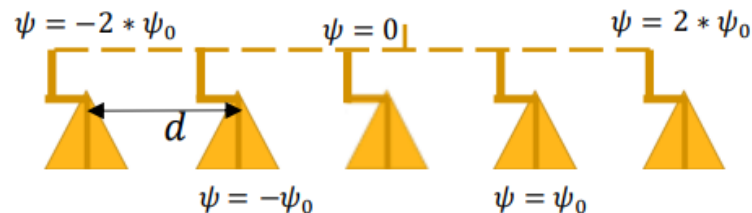
Στοιχειοκεραίες σύρματος

Μεταβάλλοντας την απόσταση ή τον αριθμό των στοιχείων κάνουμε τη δέσμη πιο κατευθυντική.

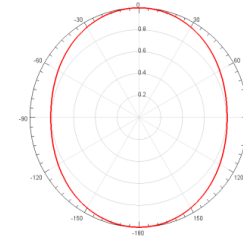


- 1 στοιχείο: 2.15 dBi (για διπολική)
- 4 στοιχεία: $2.15 + 10 \log_{10}(4) \approx 8.15$ dBi
- 8 στοιχεία: $2.15 + 10 \log_{10}(8) \approx 11.15$ dBi
- 1000 στοιχεία: $2.15 + 10 \log_{10}(1000) \approx 32.15$ dBi

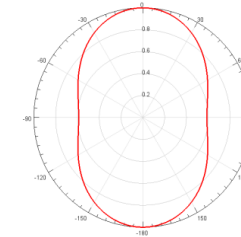
Επιβάλλοντας διαφορά φάσης ψ μεταξύ των στοιχείων μπορούμε να κατευθύνουμε τους λοβούς (steering) χωρίς να αναδιατάξουμε τα στοιχεία.



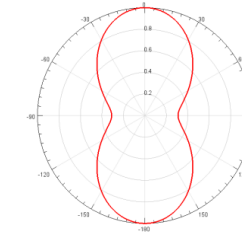
AF for $d = 0.2\lambda$



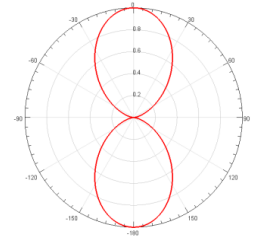
AF for $d = 0.3\lambda$



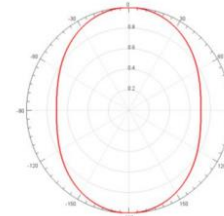
AF for $d = 0.4\lambda$



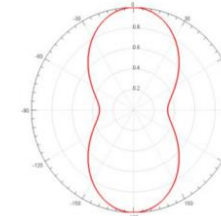
AF for $d = 0.5\lambda$



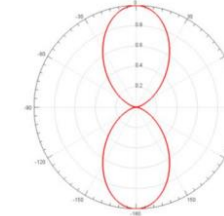
$N = 2$



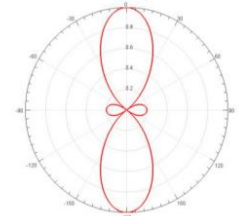
$N = 3$



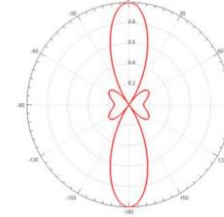
$N = 4$



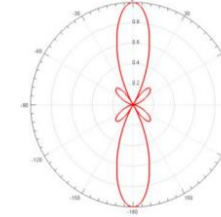
$N = 5$



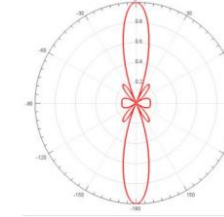
$N = 7$



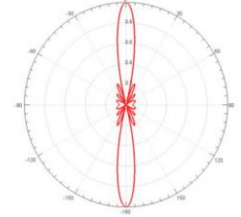
$N = 8$



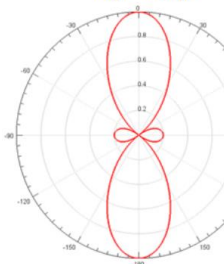
$N = 10$



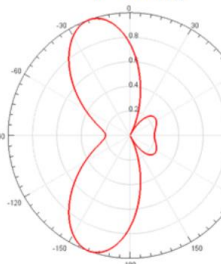
$N = 15$



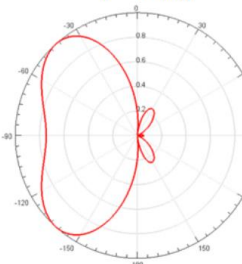
$\psi_0 = 0 \text{ deg}$



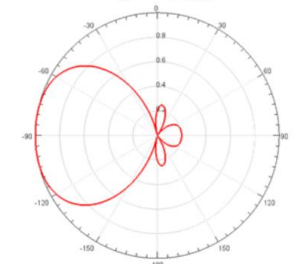
$\psi = 30 \text{ deg}$



$\psi = 60 \text{ deg}$



$\psi = 90 \text{ deg}$



Κεραία χοάνης

Εάν χρησιμοποιείται ως κεραία ένας απλός κυματοδηγός ανοιχτού τύπου, το τέλος των αγωγίμων τοιχωμάτων προκαλεί μια απότομη αλλαγή στην σύνθετη αντίσταση, από την σύνθετη αντίσταση του κυματοδηγού στην σύνθετη αντίσταση του ελεύθερου χώρου (περίπου 377Ω). Αυτή η μεγάλη διαφορά σύνθετης αντίστασης οδηγεί σε ανάκλαση ενός σημαντικού μέρους της ενέργειας του κύματος πίσω στον οδηγό προς την πηγή. Τα ανακλώμενα κύματα προκαλούν στάσιμα κύματα στον κυματοδηγό.

Πλεονεκτήματα Χοάνης έναντι Κυματοδηγών:

- Σταδιακή μεταβολή της σύνθετης αντίστασης (καλύτερο impedance matching)
- Μεγαλύτερο άνοιγμα και ασθενέστεροι πλευρικοί λοβοί.
- Βελτιωμένη ενεργειακή σύζευξη και μείωση ανακλώμενης ενέργειας.
- Μεγαλύτερο εύρος ζώνης και συχνότητα λειτουργίας $\gg 1 \text{ GHz}$.

Βασικά Χαρακτηριστικά:

• Κατευθυντικότητα Διαγράμματος Ακτινοβολίας:

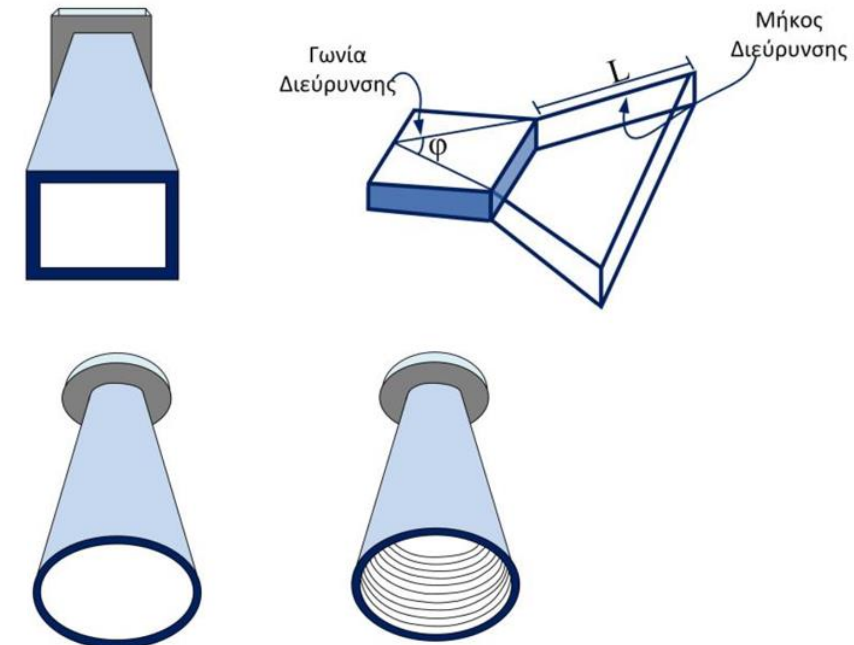
- Αυξάνεται με κατάλληλη σχεδίαση της χοάνης (μήκος διεύρυνσης L , γωνία διεύρυνσης ϕ).
- Μικρή ή μεγάλη τιμή ϕ μπορεί να μειώσει την κατευθυντικότητα λόγω περιθλάσεων.

• Τύποι Κεραιών Χοάνης:

- Κωνική (Λεία και Αυλακωτή)
- Πυραμιδοειδής

• Χρήση στις Δορυφορικές Επικοινωνίες:

- Τροφοδοσία παραβολικών ανακλαστήρων για εκπομπή παράλληλων δεσμών.



Παραβολική Κεραία Ανακλαστήρα

•Ορισμός Παραβολής:

- Τα σημεία ισαπέχουν από την εστία και τη διευθετούσα.

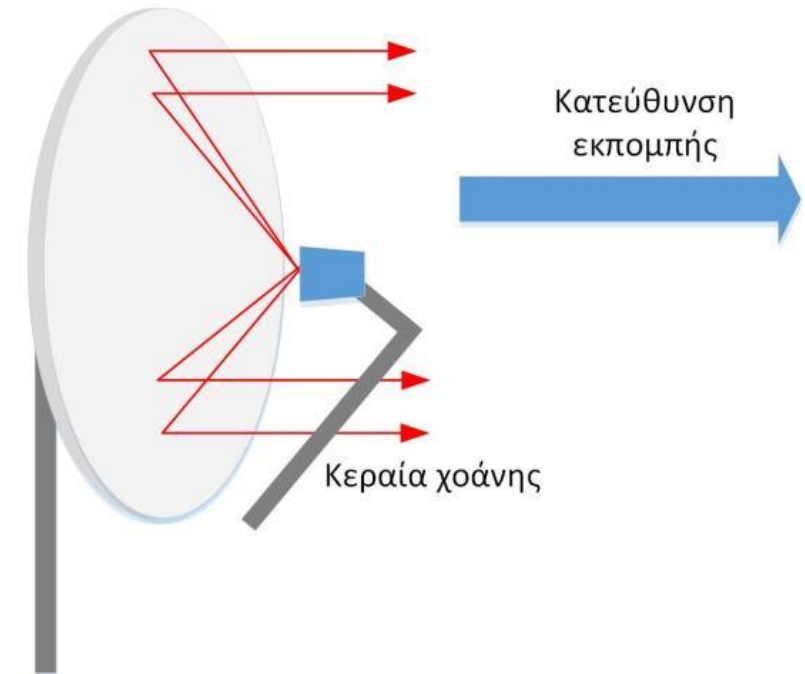
•Χρήση στις Δορυφορικές Επικοινωνίες:

- Υψηλό κέρδος.
- Μικρής στάθμης πλευρικοί λοβοί.

•Βασικά Τμήματα της Κεραίας:

- **Πηγή Τροφοδοσίας:**
 - Πρωτεύουσα πηγή (π.χ., κεραία χοάνης).
 - Υποανακλαστήρας στις κεραίες τύπου *Cassegrain*.
- **Ανακλαστήρας:**
 - Παραβολικό, αγωγίμο σχήμα.
 - Κατευθύνει την ισχύ ως παράλληλες δέσμες.

Παραβολικό κάτοπτρο



Κεραία χοάνης

Παραβολική Κεραία Ανακλαστήρα

Ο κυκλικός παραβολικός ανακλαστήρας είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος κεραίας που χρησιμοποιείται για δορυφορικούς επίγειους σταθμούς και κεραίες διαστημικών σκαφών. Είναι εύκολος στην κατασκευή και έχει καλά χαρακτηριστικά κέρδους και εύρους δέσμης για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Αριθμητικό άνοιγμα κεραίας

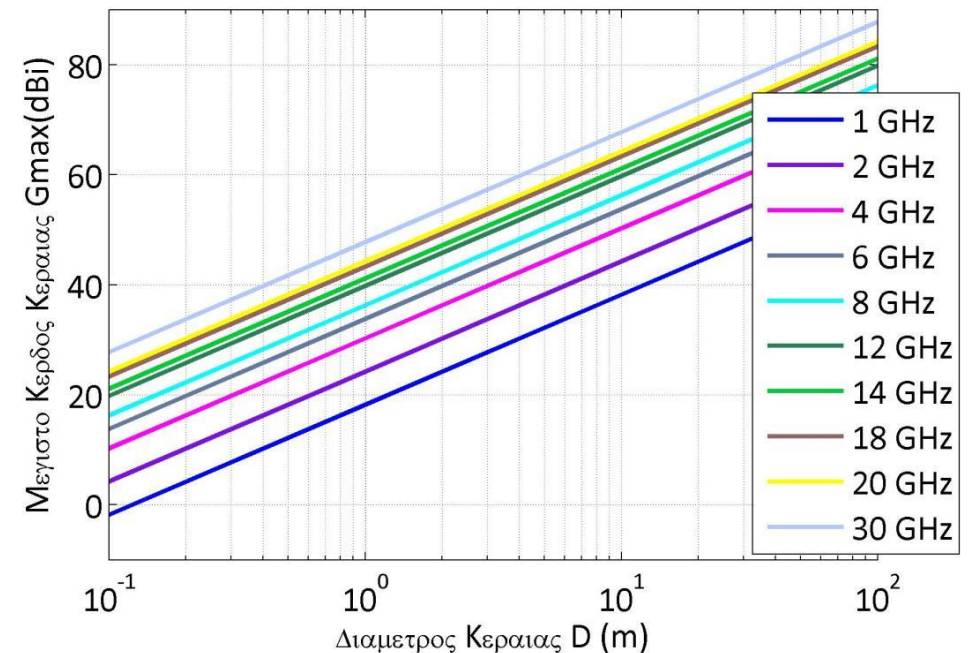
$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

Κέρδος κεραίας

$$g = \eta \frac{4\pi}{\lambda^2} \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) = \eta \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2$$

$$G = 10 \log_{10} \left[\eta \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 \right], dBi$$

$$G = 10 \log_{10}(109.66 f^2 d^2 \eta) \quad \text{όπου } \lambda = c/f \text{ και } f \rightarrow \text{GHz}$$



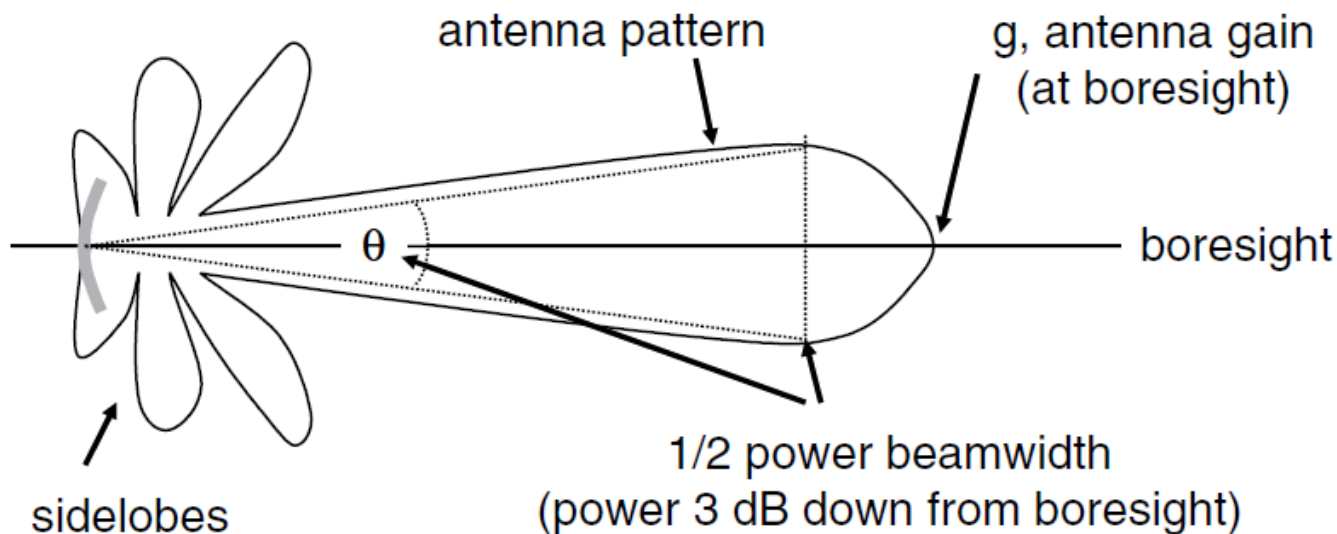
Γωνιακό εύρος (Beamwidth)

- Το άνοιγμα της κεραίας είναι στη πράξη μια συλλογή πολλών μικροσκοπικών ακτινοβολούντων στοιχείων. Όλα αυτά τα μικροσκοπικά ακτινοβολούντα στοιχεία εκπέμπουν κύματα. Στην επιθυμητή κατεύθυνση, αυτά τα κύματα διανύουν την ίδια απόσταση και φτάνουν σε φάση, δημιουργώντας ενισχυτική συμβολή και ένα ισχυρό σήμα. Καθώς απομακρυνόμαστε από τον οπτικό άξονα, τα κύματα από διαφορετικά μέρη της κεραίας αρχίζουν να φτάνουν σε ένα μακρινό σημείο με διαφορετικά μήκη διαδρομής.
- Το εύρος δέσμης (beamwidth) είναι η γωνία στην οποία αυτή η διαφορά φάσης γίνεται αρκετά σημαντική ώστε να προκαλέσει καταστροφική συμβολή. Η κατεύθυνση του οπτικού άξονα (boresight) αναφέρεται στην κατεύθυνση της μέγιστης απολαβής. Το εύρος δέσμης 3 dB είναι η κωνική γωνία για την οποία η απολαβή είναι 3 dB χαμηλότερη από την τιμή απολαβής του οπτικού άξονα.
- Όσο μεγαλύτερη είναι η κεραία σε σχέση με το λ στο οποίο λειτουργεί, τόσο καλύτερα εστιάζει τη δέσμη.
 - Σε μια μεγαλύτερη κεραία τα κύματα από τα άκρα πρέπει να διανύσουν πολύ μεγαλύτερη διαδρομή για να προκαλέσουν καταστροφική συμβολή σε μια δεδομένη γωνία.
 - Εάν το μήκος κύματος είναι πολύ μικρό, ακόμη και μια μικρή διαφορά διαδρομής αποτελεί σημαντικό κλάσμα του μήκους κύματος, προκαλώντας καταστροφική συμβολή σε μια μικρότερη γωνία.

$$\theta \cong 75 \frac{\lambda}{d} = \frac{22.5}{d f}$$

Γωνιακό εύρος (Beamwidth)

- Τα πλάτη δέσμης των κεραιών για δορυφορικές συνδέσεις τείνουν να είναι πολύ μικρά, στις περισσότερες περιπτώσεις πολύ μικρότερα από 1° , απαιτώντας προσεκτική ευθυγράμμιση και έλεγχο της κεραίας για τη διατήρηση της σύνδεσης.
- Οι πλευρικοί λοβοί αποτελούν πηγή θορύβου και παρεμβολών, ιδιαίτερα για τις επίγειες κεραίες δορυφόρων που βρίσκονται κοντά σε άλλες κεραίες ή πηγές ισχύος στην ίδια ζώνη συχνοτήτων με τη δορυφορική σύνδεση.



$$G \sim \frac{1}{\theta_1 * \theta_2}$$

θ ($^\circ$)	G (dBi)
1	44.85
0.1	64.85

$$(\eta_A = 0.55)$$

Κάτοπτρα offset

Διάμετρος και Σχεδιασμός Παραβολικού Κατόπτρου

- **Διάμετρος κατόπτρου:** 45 cm - 30 m.
- Ικανοποίηση υψηλών απαιτήσεων για δορυφορική λήψη.

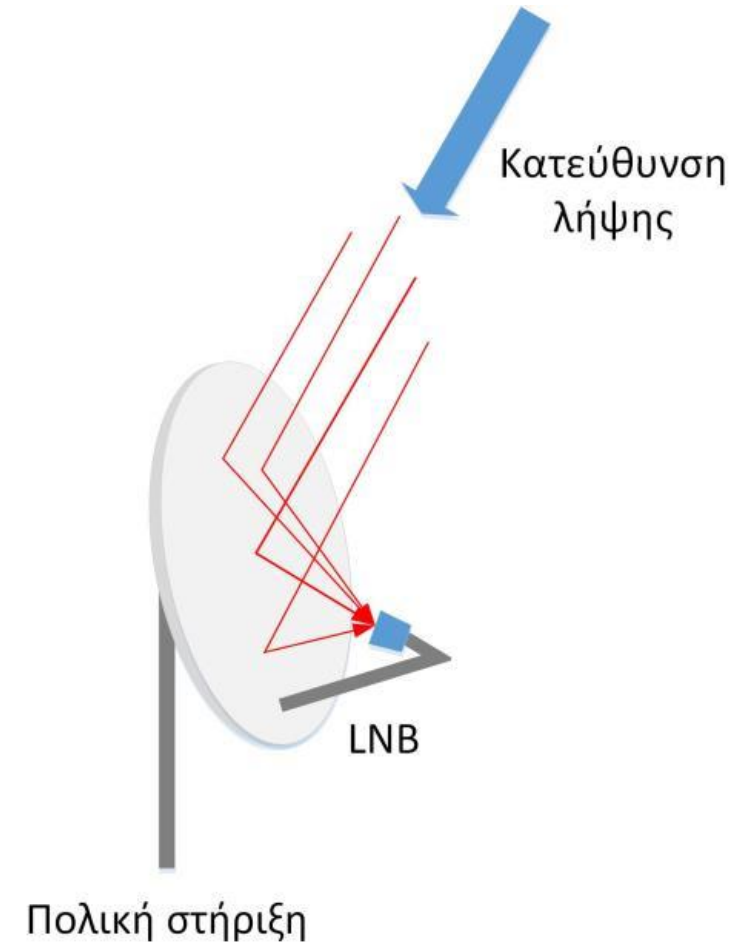
Offset (Μετατοπισμένης Εστίας) Κεραίες:

- **Τροφοδοσία:** Τοποθετημένη έκκεντρα για αποφυγή παρεμβολών.
- **Σχήμα κατόπτρου:** Ελλειψοειδές αντί κυκλικού, με μειωμένο βάθος.
- **LNB (Low Noise Block-down Converter):** Ενσωματωμένο πρώτο στάδιο δέκτη μετά τη χοανοκεραία.

- **Πλεονέκτημα**
- Κάθετη τοποθέτηση αποτρέπει συσσώρευση χιονιού/βροχής.

Μειονεκτήματα Offset Τροφοδοσίας:

- Αυξημένες απαιτήσεις μηχανικής υποστήριξης για αποφυγή παραμορφώσεων.



Κάτοπτρα Cassegrain και Gregorian

Κύρια Χαρακτηριστικά:

•Δομή:

- **Κύριος ανακλαστήρας:** Παραβολικό κάτοπτρο.
- **Υποανακλαστήρας:** Υπερβολοειδές κάτοπτρο με φανταστικό εστιακό σημείο που συμπίπτει με το εστιακό σημείο του κύριου ανακλαστήρα.
- **Τροφοδοσία:** Στο πραγματικό εστιακό σημείο του υποανακλαστήρα.

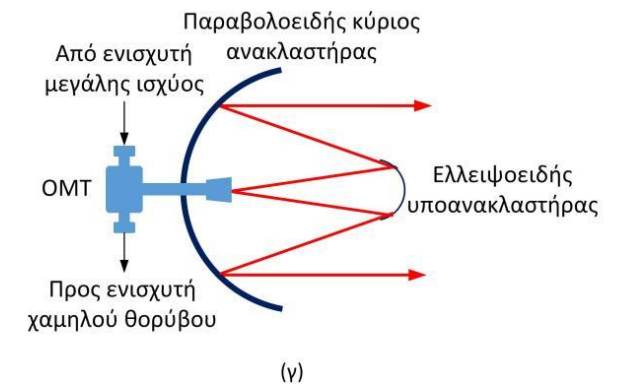
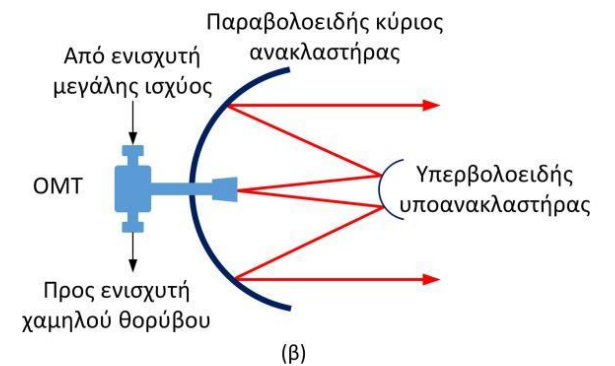
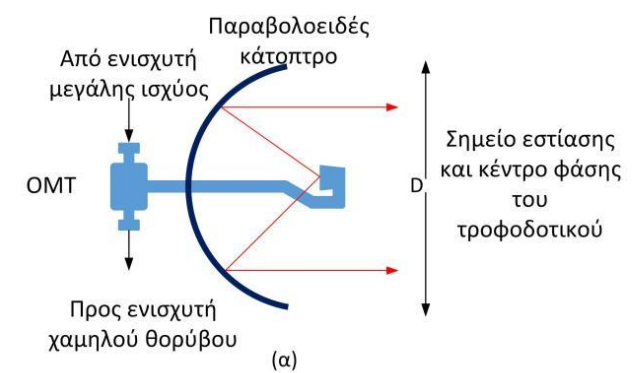
Πλεονεκτήματα:

- **Μείωση θορύβου:** Χαμηλή ισχύς θορύβου εισέρχεται στο σύστημα.
- **Ακρίβεια σκόπευσης:** Υψηλή ακρίβεια για εμπορικά δίκτυα υψηλών προδιαγραφών.
- **Προσβασιμότητα:** Τροφοδοσία και LNA (ενισχυτής χαμηλού θορύβου) τοποθετημένα πίσω από τον κύριο ανακλαστήρα.

Μειονεκτήματα:

- **Σκίαση:** Προκαλείται από τον υποανακλαστήρα.
- **Κόστος:** Υψηλότερο από τα απλά παραβολικά κάτοπτρα.

OMT (orthomode transducer), ο οποίος είναι ένας κυματοδηγός ή διπλέκτης, χρησιμοποιείται είτε για την εκπομπή (άθροισμα δύο ορθογωνικά πολωμένων σημάτων) είτε για τη λήψη (διαχωρισμός των ορθογωνικά πολωμένων σημάτων)



Κεραία παραβολικού κάτοπτρου, (β) τύπου Cassegrain, (γ) τύπου Gregorian

Δέσμες κεραιών

Ορισμός και Παράμετροι Δέσμης Κεραίας

Κύρια Σημεία:

• Δέσμη Κεραίας:

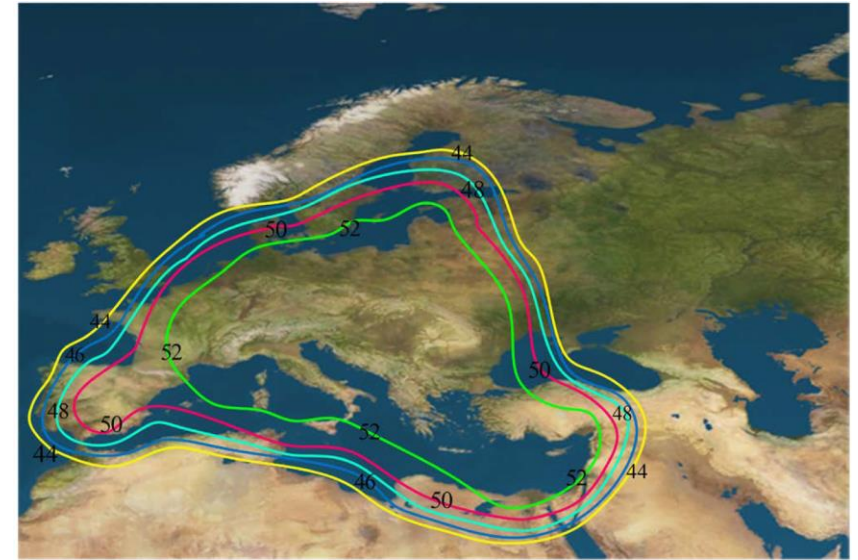
- Εξαρτάται από τον σκοπό του δορυφόρου.
- Βασικές απαιτήσεις:
 - **EIRP**: Εκπομπή με συγκεκριμένη ισχύ.
 - **G/T**: Λήψη με προκαθορισμένο δείκτη ποιότητας.

• Παράγοντες που Επηρεάζουν:

- **Απόσταση & Γωνία Ανύψωσης** των επίγειων σταθμών.
- **Ατμοσφαιρική Εξασθένηση και Απώλειες Ελεύθερου Χώρου.**

• Στόχος:

- Μέγιστο κέρδος στα άκρα της περιοχής κάλυψης.
- Αναπαράσταση δέσμης σε χάρτη: **Ίχνος Δέσμης** (καμπύλες ίσου κέρδους).



Σχήμα 8.23 Ραδιοκάλυψη εκπομπής (EIRP contours dBW) της δέσμης F1 του δορυφόρου Hellas-Sat-2 για συχνότητα 12,5 GHz (Με την ελεύθερη άδεια για εκμετάλλευση και αναπαραγωγή από την Hellas-Sat)

Δέσμες κεραιών

Τύποι Δεσμών:

•Σημειακές Δέσμες (Spot Beams):

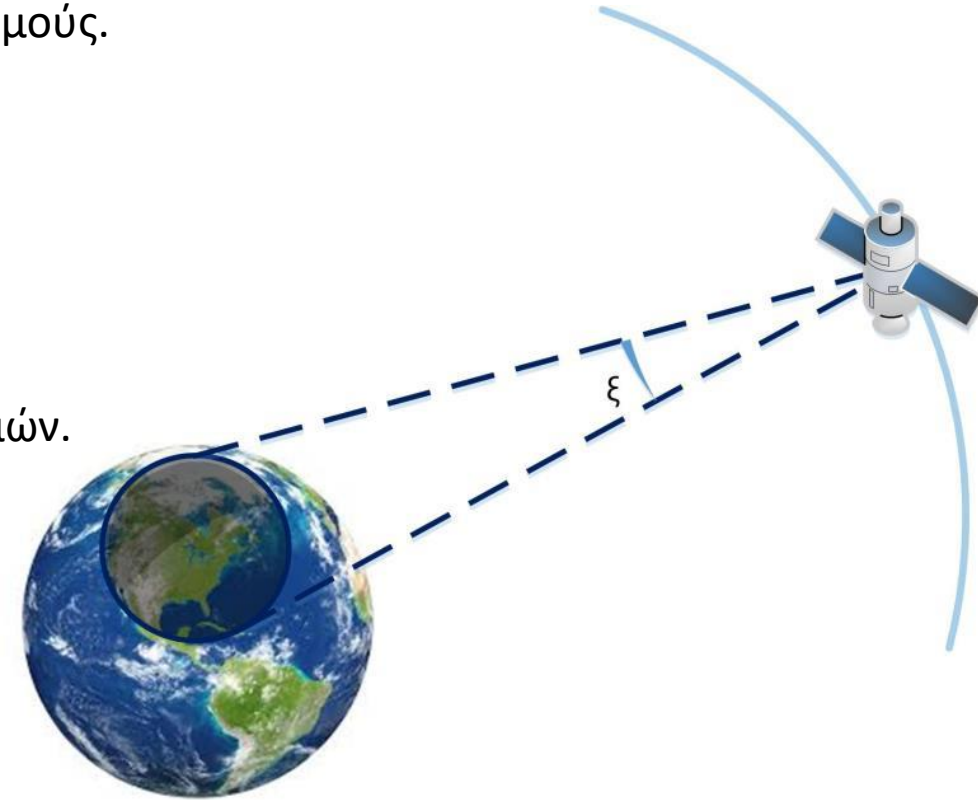
- Καλύπτουν μικρές γεωγραφικές περιοχές.
- Εξασφαλίζουν μέγιστη ισχύ για συγκεκριμένους επίγειους σταθμούς.

•Δέσμες με Κυκλική Διατομή:

- Διατομή ίδια με την ακτινοβολούσα επιφάνεια της κεραίας.
- Συμπίπτει με το γεωμετρικό περίγραμμα.
- Γωνιακό εύρος ορίζεται στα θ_{3dB} .

Σημείωση:

Ο ορισμός της δέσμης δεν ακολουθεί πάντα τέλεια το γεωμετρικό περίγραμμα. Διαφέρει ανάλογα με τη διατομή και τον αριθμό των δεσμών.



Αναπαράσταση δέσμης με κυκλική διατομή

Δέσμες κεραιών

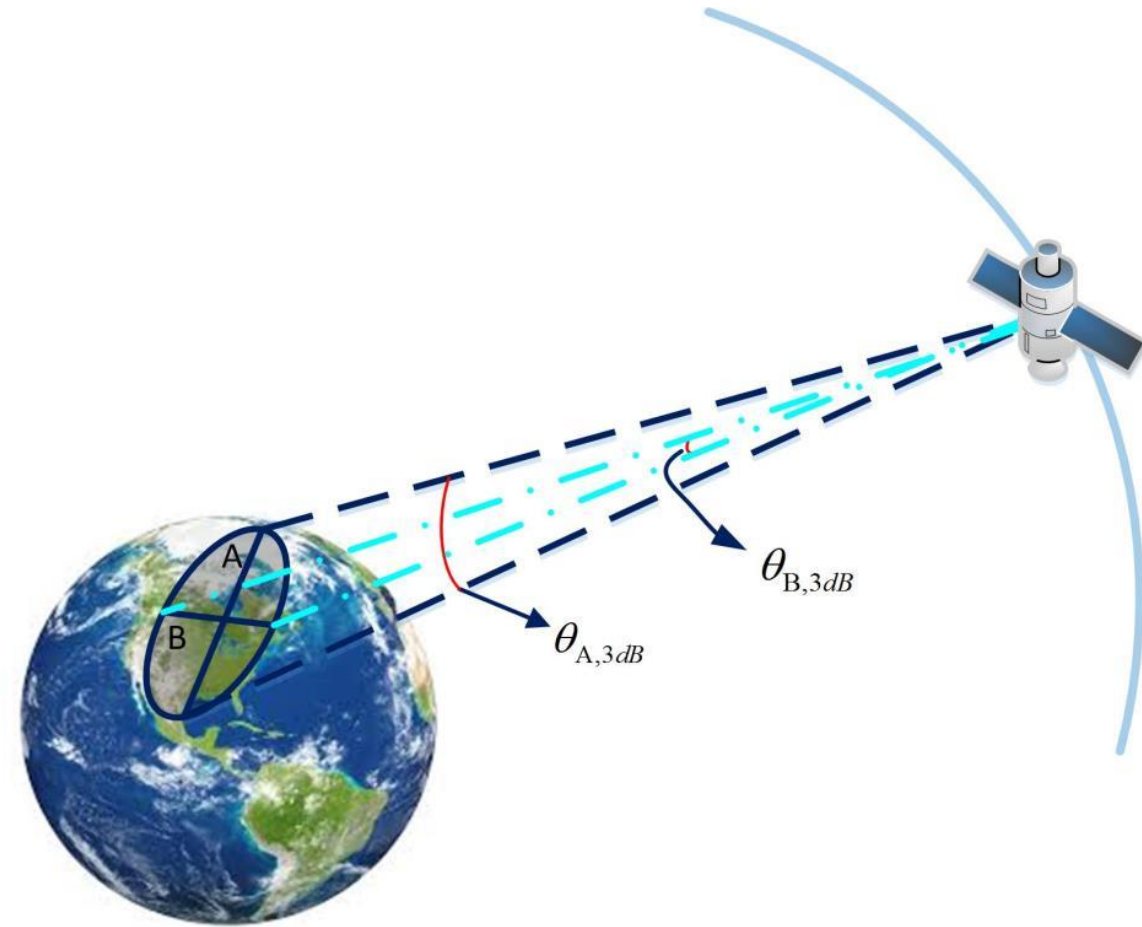
Δέσμες με Ελλειπτική Διατομή

Χαρακτηριστικά:

- Προσαρμόζονται στο γεωμετρικό περίγραμμα με ευελιξία.
- Διαθέτουν δύο γωνιακά εύρη:
 - $\theta_{A,3dB}$: Μεγάλος άξονας (A).
 - $\theta_{B,3dB}$: Μικρός άξονας (B).

Στόχος:

- Μέγιστο κέρδος στα σημεία αναφοράς της περιοχής κάλυψης.
- Χρήση για 3-dB κάλυψη ή άλλη τιμή, ανάλογα με τις ανάγκες.



Αναπαράσταση δέσμης με ελλειπτική διατομή.

Δέσμες κεραιών

Πολλαπλές Δέσμες

Χαρακτηριστικά:

- Αποτελούνται από πολλές ξεχωριστές δέσμες:
 - Κυκλικής ή ελλειπτικής διατομής.
 - Μπορούν να χρησιμοποιούν διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων και πολώσεις.

Τύποι Πολλαπλών Δεσμών:

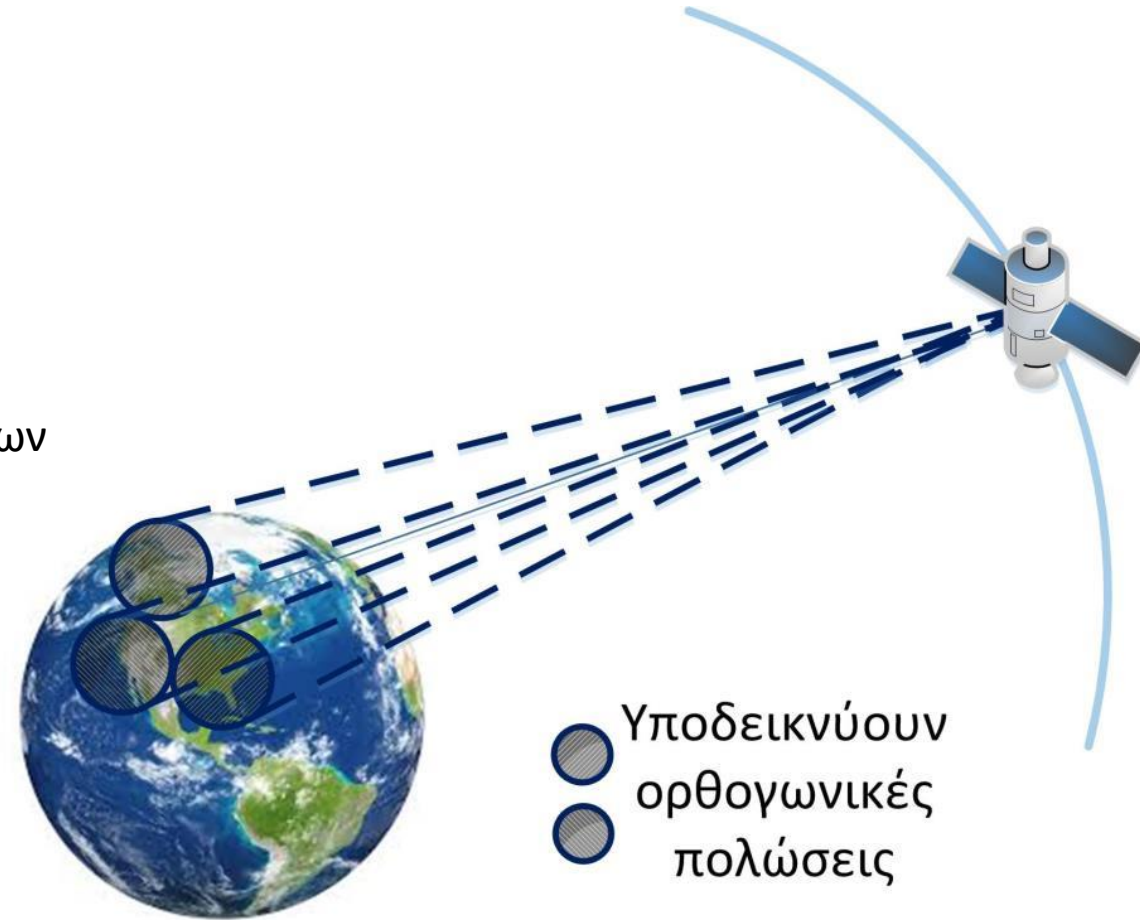
1. Ξεχωριστές (Separate): Χωρισμένες γεωγραφικά ή φασματικά.
2. Συνεχόμενες (Contiguous): Καλύπτουν γειτονικές περιοχές.
3. Πλέγμα Δεσμών (Beam Lattice): Δικτυωμένη διάταξη κάλυψης.

Ζώνη Κάλυψης:

- Διαχωρίζεται σε απλές γεωμετρικές περιοχές που φωτίζονται από στενές δέσμες.
- Ενδείκνυται για αστικές περιοχές με υψηλή ζήτηση χωρητικότητας.

Πλεονεκτήματα:

- Χρήση ίδιων ζωνών συχνοτήτων με γωνιακό διαχωρισμό.
- Απομόνωση μέσω ορθογωνικών πολώσεων για βέλτιστη απόδοση.

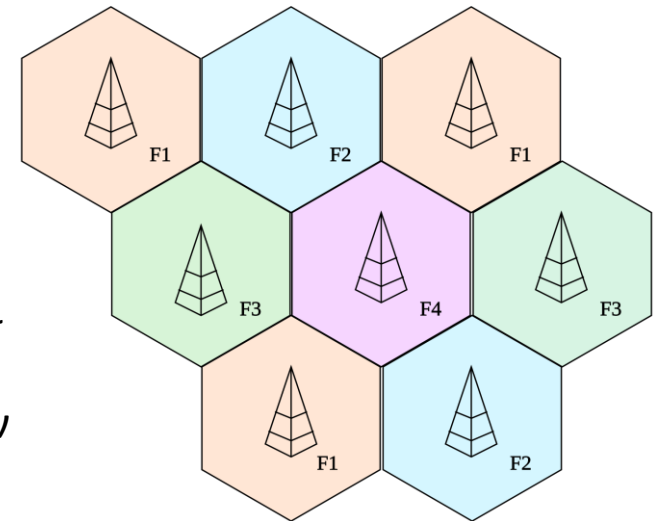
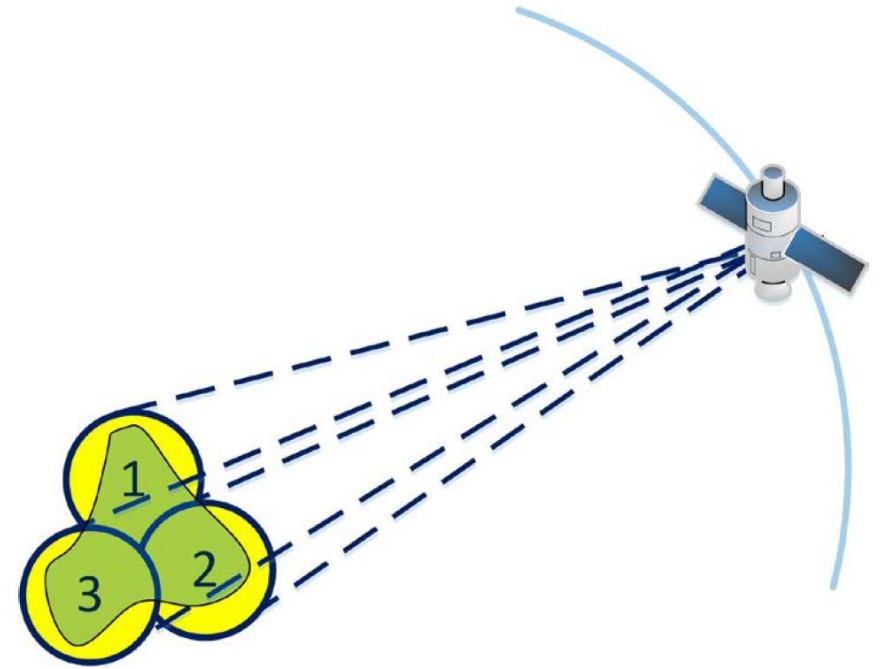


Υποδεικνύουν
ορθογωνικές
πολώσεις

Δέσμες κεραιών

Συνεχόμενες Δέσμες (Contiguous Beams)

- Η ζώνη κάλυψης και παροχής των υπηρεσιών αποτελείται από ένα σύνολο των γεωγραφικών περιοχών, οι οποίες διαχωρίζονται μεταξύ τους. Οι περιοχές αυτές είναι απλής γεωμετρικής μορφής και «φωτίζονται» από δέσμες στενής κυκλικής διατομής. Οι δέσμες μπορούν να μοιράζονται τις ίδιες ζώνες συχνοτήτων, όταν ο γωνιακός διαχωρισμός τους είναι επαρκής.
- Δεδομένου ότι κάθε μία από τις δέσμες **είναι στενότερη** σε σχέση με μία δέσμη, η οποία θα καλύπτει το σύνολο της περιοχής που πρέπει να εξυπηρετηθεί, **το αντίστοιχο περιθώριο κέρδους είναι υψηλότερο**. Επομένως, επιτρέπεται η χρήση επίγειων σταθμών με κεραιές μικρής διαμέτρου
- Οι δέσμες επικαλύπτονται εν μέρει, άρα οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται πρέπει να διαφέρουν από τη μία δέσμη στην άλλη, **όμως μόνο για τις γειτονικές δέσμες**.
- Ένα μειονέκτημα είναι ότι η χωρητικότητα ανά δέσμη είναι περιορισμένη, ειδικά όταν ο αριθμός των δεσμών είναι μεγάλος.



Απώλειες ελεύθερου χώρου (*Free space path loss*)

Η απώλειες ελεύθερου χώρου (l_{FS}) υπάρχουν για όλα τα ραδιοκύματα που διαδίδονται στον ελεύθερο χώρο ή σε περιοχές των οποίων τα χαρακτηριστικά προσεγγίζουν την ομοιομορφία του ελεύθερου χώρου, όπως η ατμόσφαιρα της Γης.

Η ισχύς σε έναν απλοϊκό δέκτη είναι: $p_r = p_t g_t g_r A = \frac{p_t g_t A}{4\pi r^2}$ ενώ $g = \frac{4\pi A}{\lambda^2}$

Άρα έχουμε: $p_r = p_t g_t g_r \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2$ όπου μπορούμε να ορίσουμε το l_{fs} ως: $l_{FS} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2$
Έτσι, το l_{fs} θα είναι στον παρονομαστή ως $p_r = \frac{p_t g_t g_r}{l_{FS}}$

Αντικαθιστώντας τη συχνότητα σε GHz, την απόσταση σε χιλιόμετρα και το $\lambda=c/f$:

$$l_{FS} = \left(\frac{4\pi r f}{c}\right)^2 = \left(4\pi \times r \times 1000 \times f \times \frac{10^9}{3 \times 10^8}\right)^2 = (40000\pi r f / 3)^2$$

$$L_{FS} = 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(r) + 92.44$$

- ❖ Αύξηση απωλειών ελεύθερου χώρου με την αύξηση της συχνότητας, αύξηση όμως και του κέρδους των κεραιών δεδομένης διαμέτρου με την αύξηση της συχνότητας.

r (km)	f (GHz)	L_{FS} (dB)
100	2	138
	6	148
	12	154
	24	160
1000	2	158
	6	168
	12	174
	24	181
35 900	6	199
	12	205
	20	209
	30	213
	44	216

Άλλες απώλειες

Απώλειες αποπόλωσης

Κατά τη διάδοση 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 πόλωσης του. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως αποπόλωση και συμβαίνει κυρίως παρουσία βροχής ή γενικότερων ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων.

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.

Απώλειες σκόπευσης

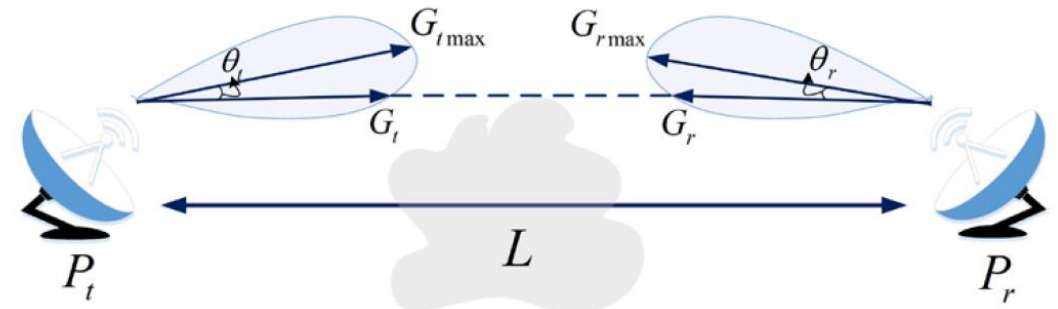
Απώλειες σκόπευσης παρατηρούνται, όταν οι κεραίες εκπομπής και λήψης δεν είναι πλήρως ευθυγραμμισμένες μεταξύ τους. Στα επίγεια συστήματα λήψης υπάρχει συνεχής έλεγχος της τροχιάς του δορυφορικού αναμεταδότη, έτσι ώστε να γίνεται αναπροσαρμογή της κατεύθυνσης της κεραίας, για να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες σκόπευσης.

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.

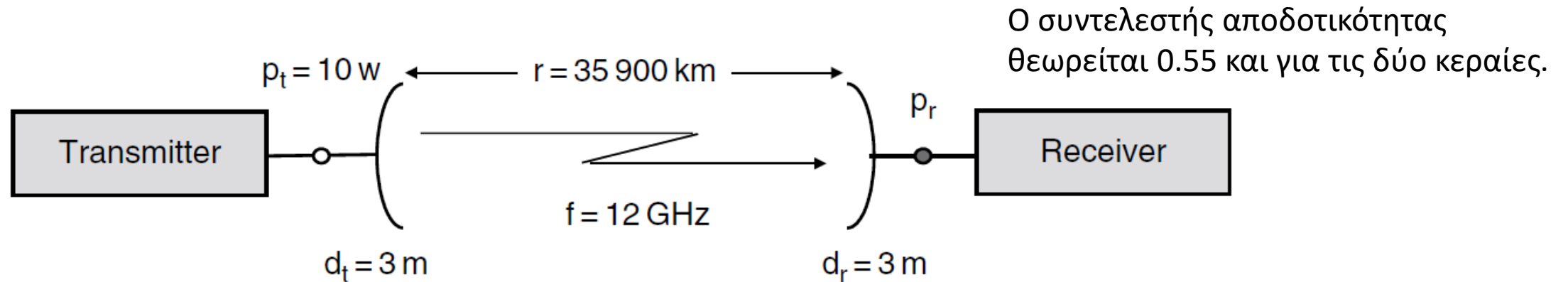
Απώλειες ιονόσφαιρας και τροπόσφαιρας

Απορρόφηση αερίων και αλλαγή του δείκτη διάθλασης.



Βασική εξίσωση προϋπολογισμού ισχύος ζεύξης

$$P_r(dB) = eirp + G_r - L_{FS} \quad \text{Link Power Budget Equation}$$



Τυπικές παράμετροι σε ιδιωτικά δίκτυα VSAT (Very Small Aperture Terminal). Αυτά είναι δορυφορικά συστήματα επικοινωνίας που χρησιμοποιούν μικρές παραβολικές κεραίες για την παροχή σύνδεσης τηλεφωνίας και μετάδοσης δεδομένων σε απομακρυσμένες περιοχές με χρήση του φτηνότερου εξοπλισμού και μικρών κεραιών.

Προϋπολογισμός ισχύος ζεύξης - Παράδειγμα

Κέρδος κεραίας $G = 10\log_{10}(109.66 f^2 d^2 \eta)$

$$G_t = Gr = 10\log_{10}(109.66 \times 12^2 \times 3^2 \times 0.55) = 48.93 \text{ dBi}$$

$$EIRP = Pt + Gt = 10\log_{10}(10) + 48.93 = 58.93 \text{ dBw}$$

Απώλειες
ελεύθερου χώρου $L_{FS} = 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(r) + 92.44 = 20\log_{10}(12) + 20\log_{10}(35900) + 92.44$
 $= 21.58 + 91.1 + 92.44 = 205.12 \text{ dB}$

$$P_{r(dB)} = EIRP + Gr - L_{FS} = 58.93 + 48.93 - 205.12 = -97.26 \text{ dBw}$$

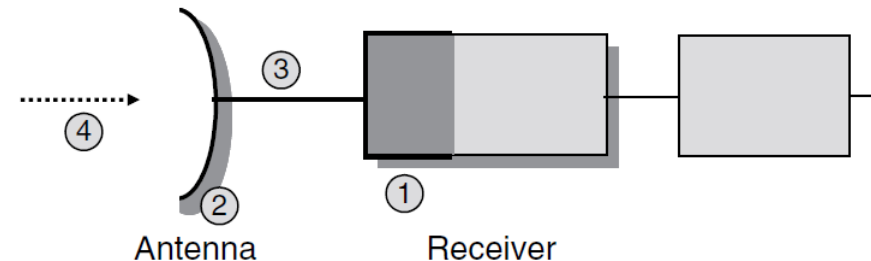
$$p_r = 10^{-\frac{97.24}{10}} = 1.89 \cdot 10^{-10} \text{ Watt}$$

Παρατηρούμε ότι σε αυτό το ρεαλιστικό παράδειγμα η λαμβανόμενη ισχύς είναι εξαιρετικά ασθενής. Σε αυτήν θα πρέπει να συνυπολογιστεί αργότερα και η επίδραση του θορύβου.

Θόρυβος στο σύστημα - Θερμοκρασία θορύβου

- Υπάρχουν πολλές πηγές θορύβου σε ένα σύστημα επικοινωνιών. Κάθε ενισχυτής στο σύστημα λήψης παράγει θόρυβο στο εύρος ζώνης λειτουργίας του και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της απόδοσης της σύνδεσης. Άλλες πηγές περιλαμβάνουν τους μείκτες, μετατροπείς, διακόπτες, συνδυαστές και πολυπλέκτες.
- Ο θόρυβος του συστήματος που παράγεται από αυτά τα στοιχεία προστίθεται στον θόρυβο που παράγεται στη διαδρομή μετάδοσης από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. **Ωστόσο, ο θόρυβος που εισάγεται στο σύστημα επικοινωνιών στο μπροστινό μέρος του δέκτη (receiver front-end) είναι ο πιο σημαντικός, επειδή εκεί το επίπεδο του επιθυμητού σήματος είναι το χαμηλότερο.**

- 1) Front end του δέκτη
- 2) Κεραία του δέκτη
- 3) Η μεταξύ τους σύνδεση
- 4) Θόρυβος μετάδοσης (*radio noise*)



- Ο κύριος παράγοντας που συμβάλλει στο θόρυβο στις ραδιοσυχνότητες είναι ο θερμικός θόρυβος του δέκτη (τόσο στις ενεργές όσο και στις παθητικές συσκευές). Έτσι, είναι βοηθητικό ο θόρυβος που προκαλείται από κάθε συσκευή στο σύστημα να ποσοτικοποιείται με την εισαγωγή μιας ισοδύναμης θερμοκρασίας θορύβου.
- Η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου, T_e , ορίζεται ως η θερμοκρασία ενός παθητικού αντιστάτη που παράγει ισχύ θορύβου ανά μονάδα εύρους ζώνης ίση με εκείνη που παράγεται από τη συσκευή.

Θόρυβος στο σύστημα - Θερμοκρασία θορύβου

- Δέκτης χαμηλού θορύβου (C, Ku, ka band): 100 -500 K
- 1 dB απώλεια καλωδίου: 60 K
- 3 dB απώλεια καλωδίου; 133 K;
- ψυχόμενος παραμετρικός ενισχυτής (NASA Deep Space Network): 15 to 30 K.

Σχέση του Nyquist

$$n_N = k t_e b_N$$

Η σχέση του Nyquist δείχνει ότι το n_N είναι ανεξάρτητο από τη συχνότητα, δηλαδή η ισχύς του θορύβου κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το εύρος ζώνης. Για υψηλότερες συχνότητες, πάνω από το φάσμα των ραδιοεπικοινωνιών, θα κυριαρχεί ο κβαντικός θόρυβος και όχι ο θερμικός θόρυβος και πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο κβαντικός τύπος για την ισχύ του θορύβου. Η συχνότητα μετάβασης μεταξύ θερμικού και κβαντικού θορύβου συμβαίνει όταν:

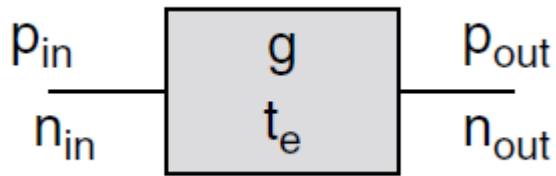
$$f \approx 21t_e \quad \text{Π.χ για } f=50 \text{ GHz} \rightarrow t_e=2.5 \text{ K}$$

Δεδομένου ότι ο θερμικός θόρυβος είναι ανεξάρτητος από τη συχνότητα λειτουργίας, είναι συχνά χρήσιμο να εκφράζεται η ισχύς του θορύβου ως πυκνότητα ισχύος θορύβου (ή φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου), n_0 .

$$n_0 = \frac{n_N}{b_N} = \frac{k t_e b_N}{b_N} = k t_e \left(\frac{W}{\text{Hz}} \right)$$

Εικόνα θορύβου (Noise Figure)

Ένας άλλος βολικός τρόπος ποσοτικοποίησης του θορύβου που παράγεται από έναν ενισχυτή ή άλλη συσκευή είναι ο συντελεστής (εικόνα) θορύβου, n_f . Ο συντελεστής θορύβου ορίζεται λαμβάνοντας υπόψη την αναλογία της ισχύος του επιθυμητού σήματος προς την ισχύ του θορύβου στην είσοδο της συσκευής, προς την αναλογία της ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου στην έξοδο της συσκευής.



$$n_f = \frac{\frac{p_{in}}{n_{in}}}{\frac{p_{out}}{n_{out}}} = \frac{\frac{p_{in}}{k t_0 b}}{\frac{g p_{in}}{g k (t_0 + t_e) b}}$$

$$NF = 10 \log_{10} \left(1 + \frac{t_e}{t_0} \right)$$

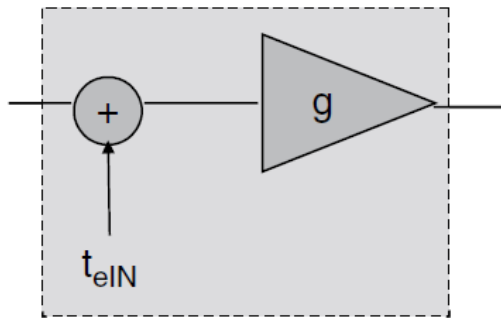
$$t_e = t_0 (n_f - 1)$$

t_e (K)	NF(dB)
30	0.4
100	1.3
290	3
1000	6.5
10 000	15.5

Το t_0 είναι η συνήθης θερμοκρασία εισόδου που λαμβάνεται ως αναφορά, συνήθως επιλέγονται οι 290 K

Θερμοκρασία θορύβου σε ενεργές και παθητικές διατάξεις

Παραδείγματα άλλων ενεργών συσκευών εκτός από τον ενισχυτή περιλαμβάνουν ανυψωτές, υποβιβαστές, μίκτες, ενεργά φίλτρα, διαμορφωτές, αποδιαμορφωτές και ορισμένες μορφές ενεργών συνδυαστών και πολυπλεκτών.



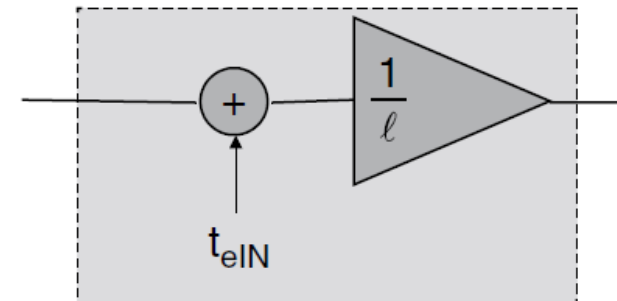
$$t_{e\,in} = 290(nf - 1)$$

$$t_{e\,in} = 290(10^{\frac{NF}{10}} - 1)$$

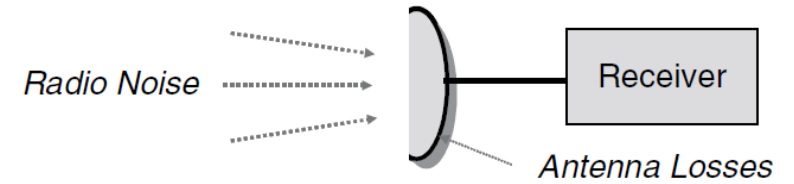
Οι κυματοδηγοί, οι καλωδιακές διαδρομές, οι διπλέκτες, τα φίλτρα και οι διακόπτες είναι παραδείγματα παθητικών συσκευών που μειώνουν το επίπεδο της ισχύος που διέρχεται από τη συσκευή.

$$A(dB) = 10 \log_{10}(l) \quad \text{Απώλεια στοιχείου}$$

$$t_{e\,in} = 290(l - 1) = 290 \left(10^{\frac{A(dB)}{10}} - 1 \right)$$



Θερμοκρασία θορύβου κεραίας



- Ο θόρυβος μπορεί να προκληθεί από απώλειες της κεραίας και από τη διαδρομή του ραδιοσήματος (radio or sky noise).
- Η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου της κεραίας κυμαίνεται από 10 έως 20 βαθμούς Κελσίου (απώλεια 0.5 έως 1 dB).
- Η απώλεια της κεραίας συνήθως περιλαμβάνεται ως μέρος της απόδοσης της κεραίας και δεν χρειάζεται να συμπεριλαμβάνεται άμεσα στους υπολογισμούς του προϋπολογισμού ισχύος της σύνδεσης.

Ο ραδιοφωνικός θόρυβος μπορεί να εισέλθει στη διαδρομή μετάδοσης τόσο από φυσικές όσο και από ανθρωπογενείς πηγές. Αυτή η ισχύς θορύβου θα προστεθεί στον θόρυβο του συστήματος μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας της κεραίας του δέκτη. Για δέκτες πολύ χαμηλού θορύβου, ο ραδιοφωνικός θόρυβος μπορεί να είναι ο περιοριστικός παράγοντας στο σχεδιασμό και την απόδοση του συστήματος επικοινωνιών.

Οι κύριες πηγές ραδιοφωνικού θορύβου σε μια δορυφορική σύνδεση είναι:

- Γαλαξιακός θόρυβος: $\sim 2.4\text{K}$ για συχνότητες άνω του 1 GHz.
- Ατμοσφαιρικά συστατικά: οποιοδήποτε συστατικό που απορροφά τα ραδιοκύματα εκπέμπει ενέργεια με τη μορφή θορύβου. Τα κύρια ατμοσφαιρικά συστατικά που επηρεάζουν τις δορυφορικές επικοινωνιακές συνδέσεις είναι το οξυγόνο, οι υδρατμοί, τα σύννεφα και η βροχή (μεγαλύτερη επίδραση για συχνότητες άνω των 10 GHz).
- Εξωγήινες πηγές, συμπεριλαμβανομένης της Σελήνης, του Ήλιου και των πλανητών.

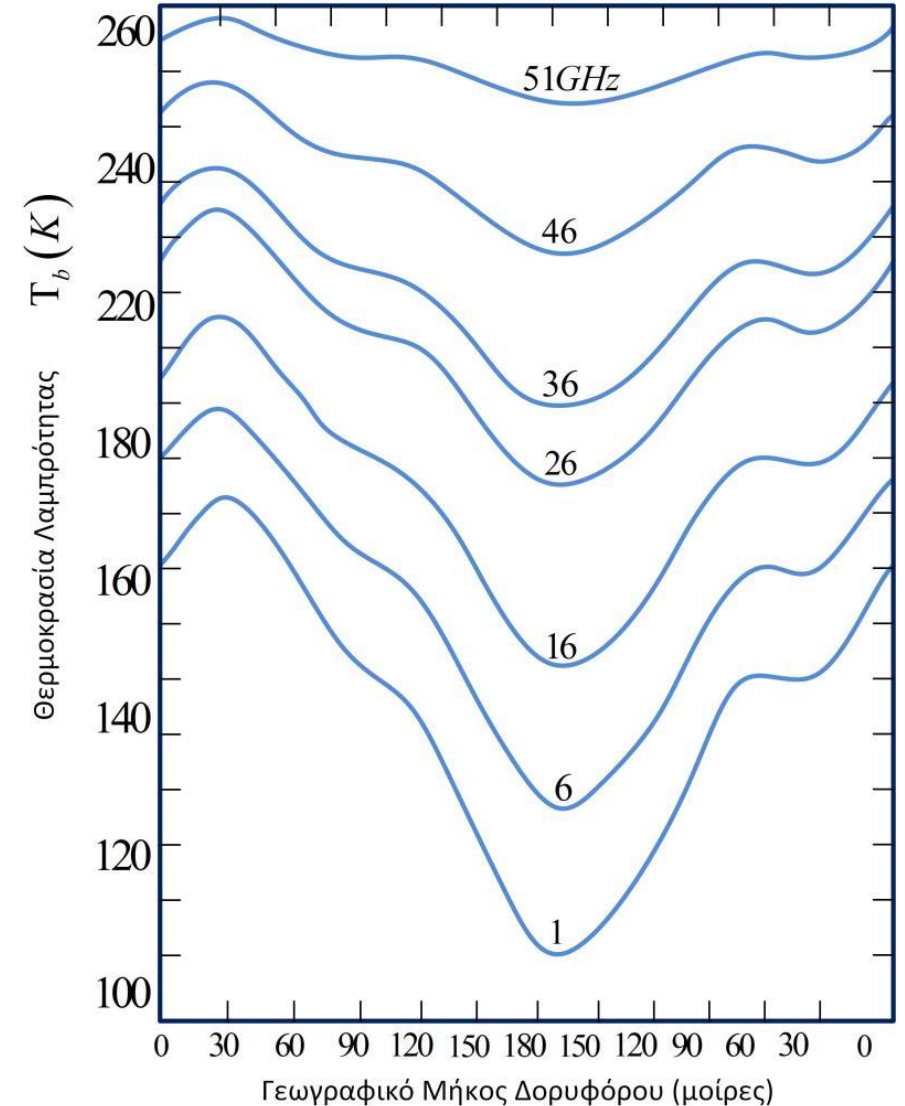
Θερμοκρασία θορύβου κεραίας δορυφόρου

Πηγές Θορύβου:

- 1.Γη:** Κύρια συνεισφορά στη θερμοκρασία θορύβου, λόγω ακτινοβολίας από ηπειρωτικές περιοχές και ωκεανούς.
- 2.Διάστημα:** Συνεισφέρει σε μικρότερο βαθμό.

Εξαρτήσεις Θερμοκρασίας Θορύβου:

- Τροχιακή θέση δορυφόρου.
- Εύρος δέσμης κεραίας:
 - Για γεωστατικούς δορυφόρους (17.5°), εξαρτάται (η θερμ. θορύβου) από:
 - Συχνότητα λειτουργίας.
 - Περιοχή κάλυψης.



Θερμοκρασία θορύβου κεραίας για δορυφόρους GEO

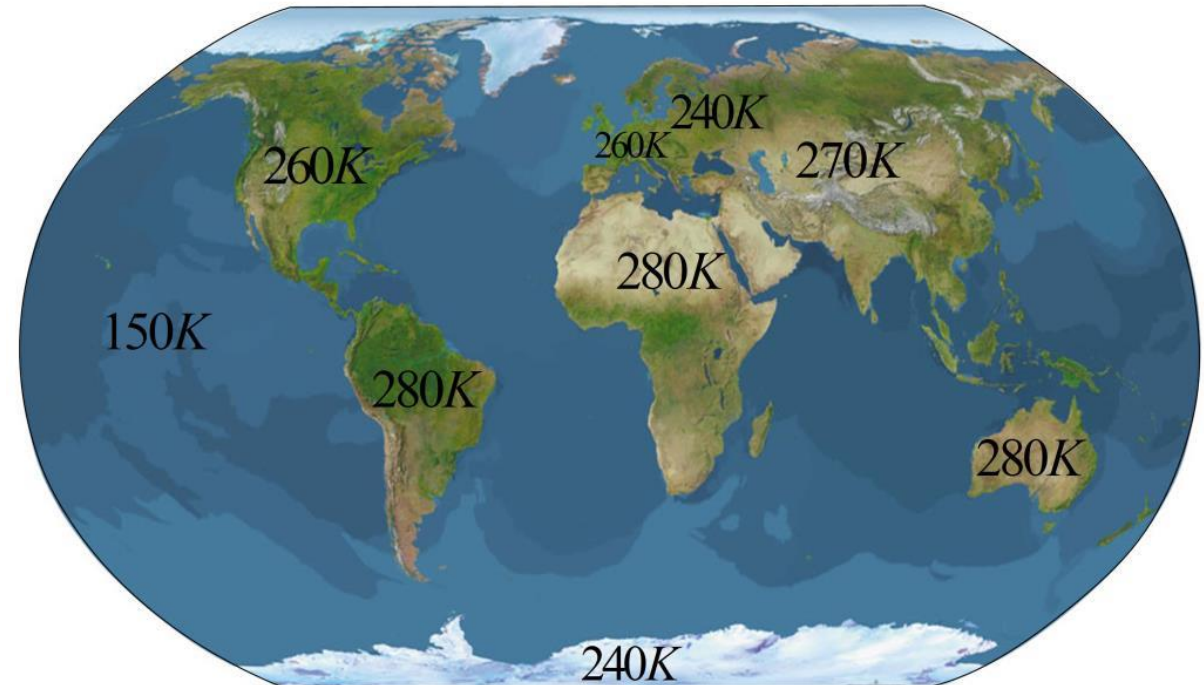
Θερμοκρασία θορύβου κεραίας δορυφόρου

Χαρακτηριστικά Θορύβου:

- **Ηπειρωτικές περιοχές:** Εκπέμπουν περισσότερο θόρυβο.
- **Ωκεανοί:** Εκπέμπουν λιγότερο θόρυβο.

Προσεγγίσεις:

- Αν δεν υπάρχουν ακριβείς υπολογισμοί, θεωρείται περίπου $T_A = 290K$
- Διαφορετικές ζώνες συχνότητων, όπως η Ku-ζώνη, απαιτούν ειδικούς υπολογισμούς βάσει περιοχής και γεωγραφικού μήκους.



Θερμοκρασία θορύβου κεραίας επίγειου σταθμού

Πηγές Θορύβου:

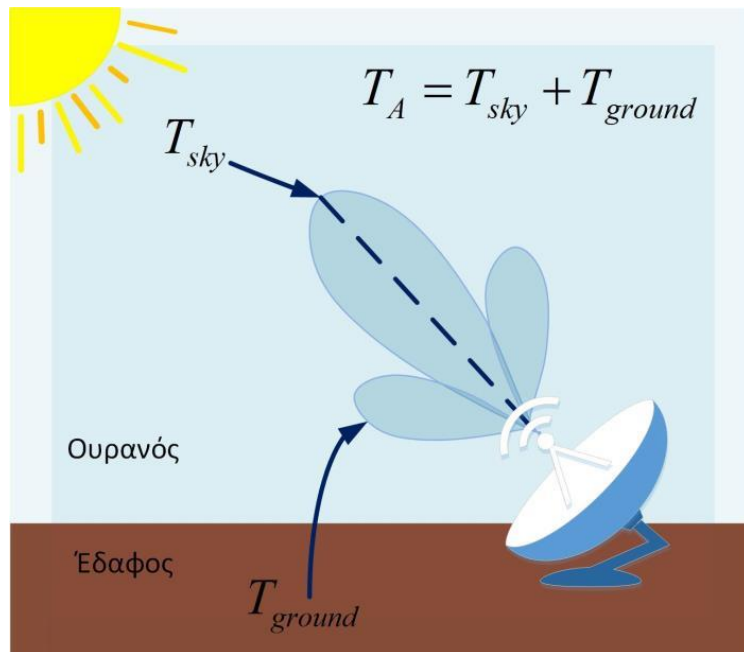
•Θόρυβος από τον ουρανό (T_{sky}):

- Προέρχεται από το μη ιονισμένο τμήμα της ατμόσφαιρας και τον κοσμικό θόρυβο.

•Θόρυβος από τη Γη (T_{ground}):

- Οφείλεται στους δευτερεύοντες λοβούς του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας.

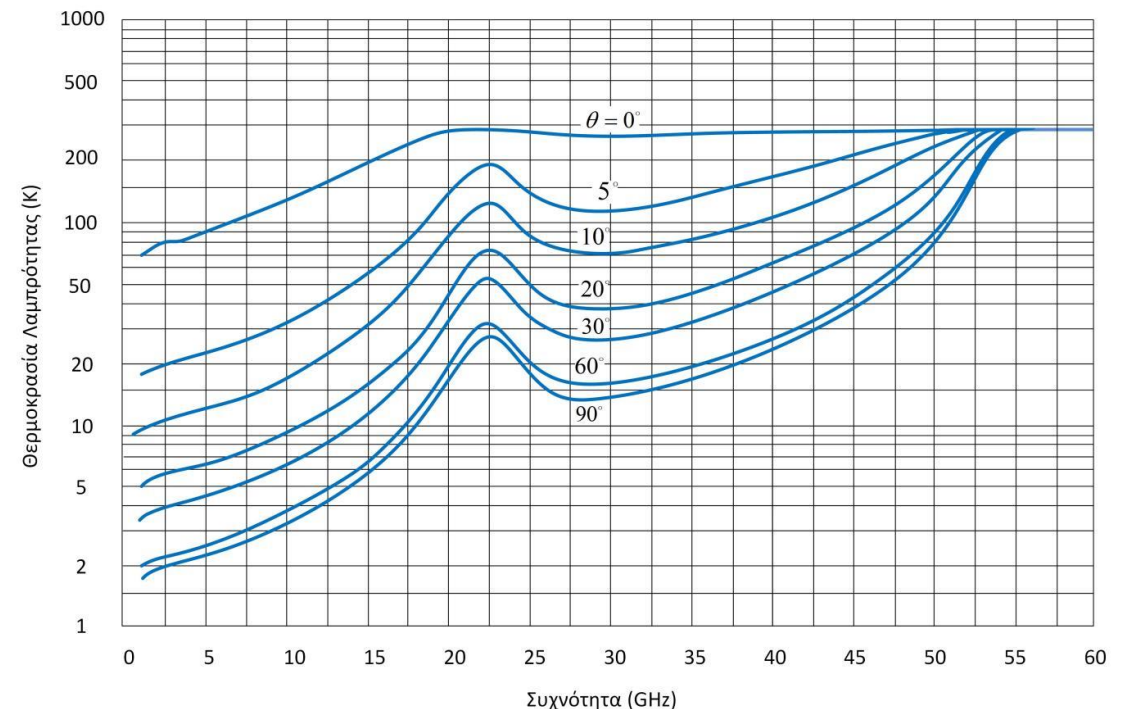
Υπολογισμός Θερμοκρασίας Θορύβου Κεραίας



• T_{sky} : Υπολογίζεται συναρτήσει:

- Συχνότητας λειτουργίας.
- Γωνίας ανύψωσης της κεραίας.

Συνεισφορά για τη θερμοκρασία λαμπρότητας καθαρού ουρανού, για μέση ατμοσφαιρική υγρασία (7.5gr/cm^3 στο επίπεδο του εδάφους) και πρότυπες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης στο επίπεδο του εδάφους



Θερμοκρασία θορύβου κεραίας επίγειου σταθμού

• T_{ground} : Υπολογίζεται από την ακτινοβολία του εδάφους, κυρίως μέσω πλευρικών λοβών:

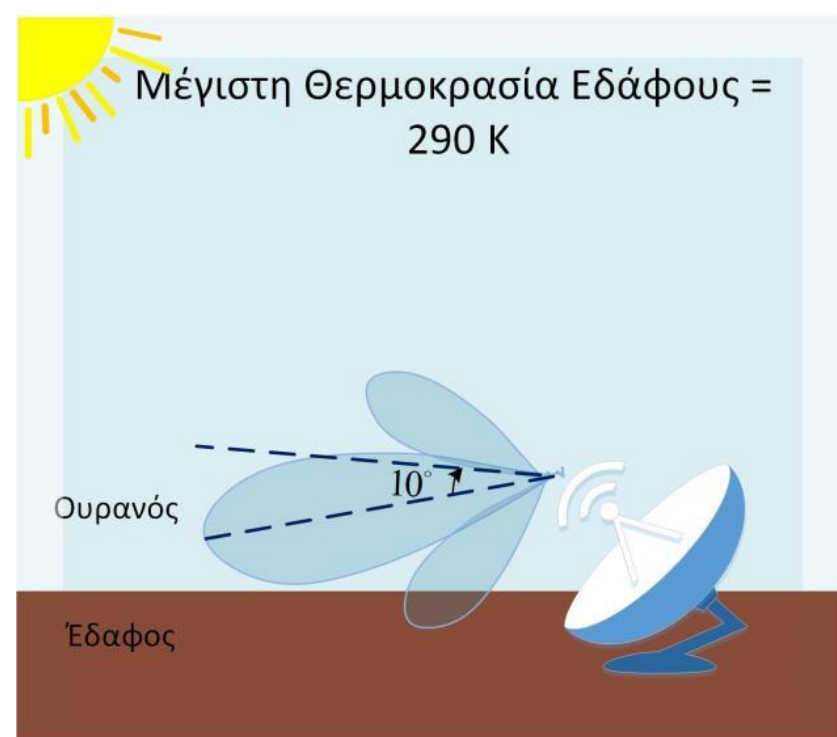
$$T_{ground} = 290K, E < -10^\circ$$

$$T_{ground} = 150K, -10^\circ < E < 0^\circ$$

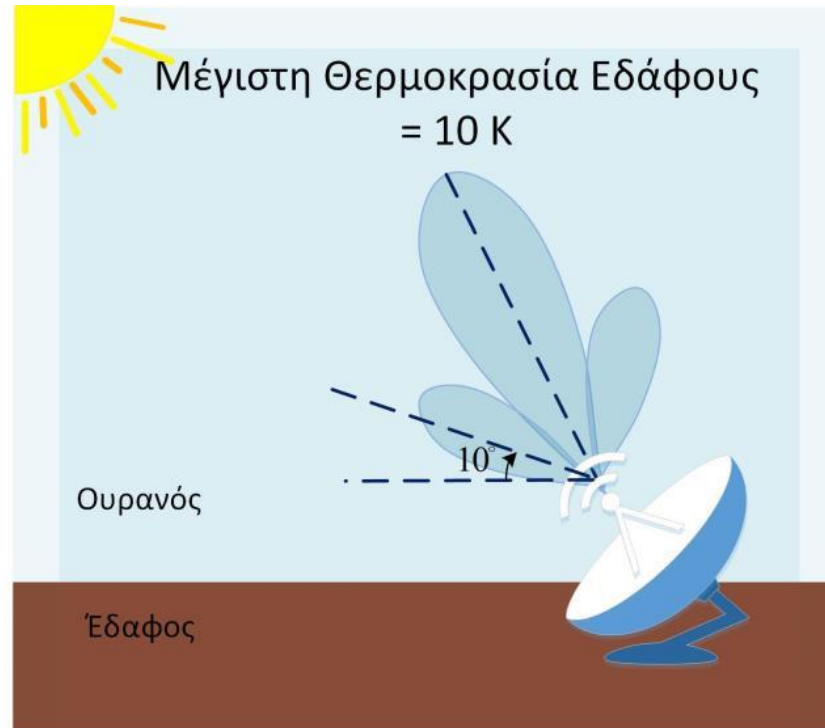
$$T_{ground} = 50K, 0^\circ < E < 10^\circ$$

$$T_{ground} = 10K, 10^\circ < E < 90^\circ$$

όπου E είναι η γωνία ανύψωσης του κεντρικού λοβού σε σχέση με το έδαφος



(α)



(β)

Θερμοκρασία εδάφους για γωνίες ανύψωσης (α) μικρότερες από -10° και (β) μεγαλύτερες από 10°

Μια κεραία που στοχεύει στον ήλιο, έχει θερμοκρασία $T_A = 12.000f^{-0.75}K$, όπου f είναι η συχνότητα σε GHz, ενώ, αν κοιτάζει στη Γη, η θερμοκρασία θορύβου πλησιάζει τη θερμοκρασία της Γης, δηλαδή 290K

Θερμοκρασία θορύβου κεραίας επίγειου σταθμού

Επίδραση Βροχής:

• Δράση βροχής:

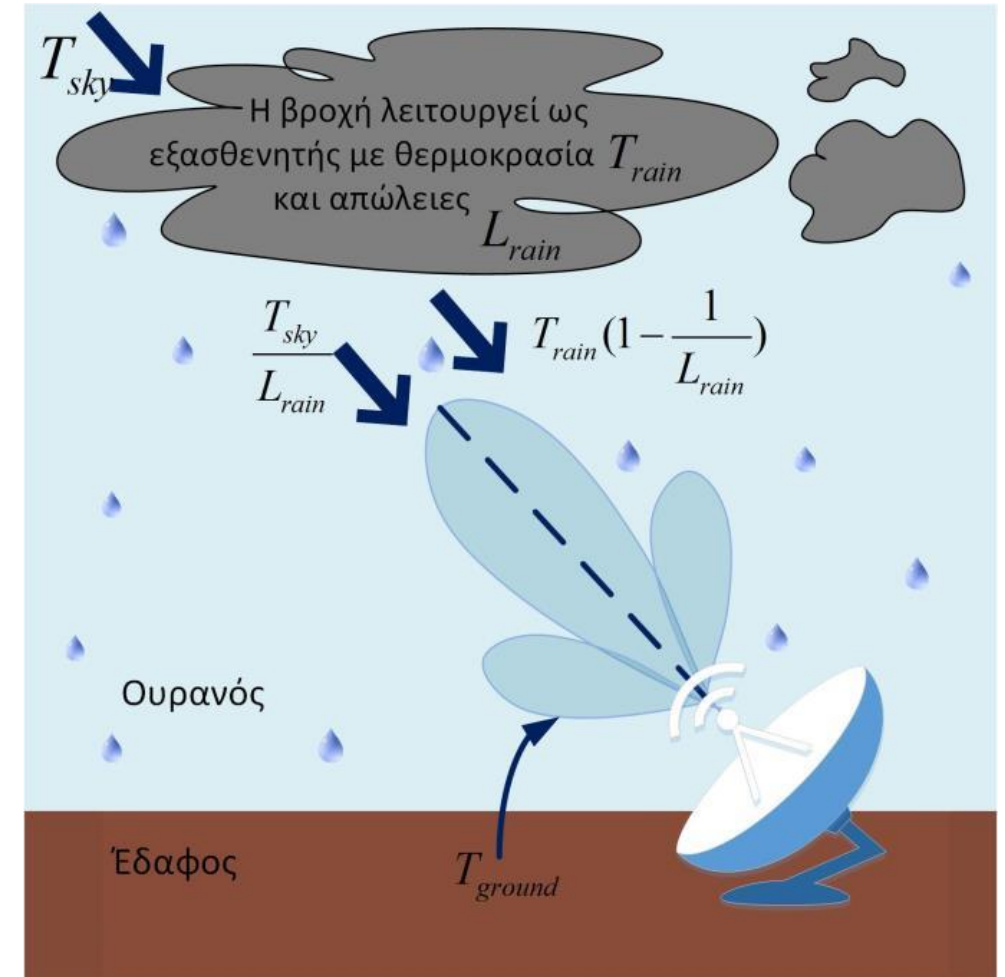
- Εξασθένιση L_{rain} .
- Θερμοδυναμική θερμοκρασία T_{rain} (τυπικά 275K).

• Εξίσωση Θορύβου με Βροχή:

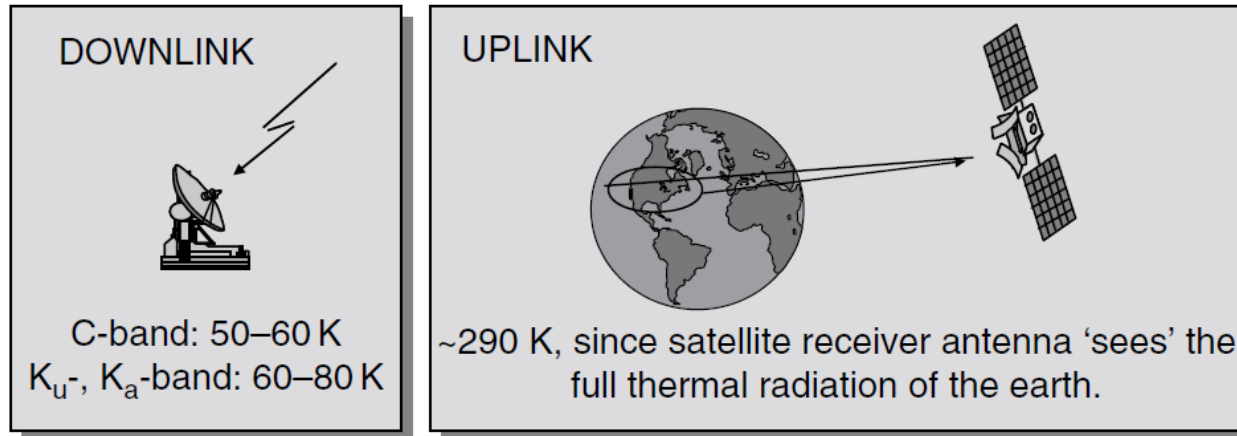
$$T_A = \frac{T_{sky}}{L_{rain}} + T_{rain} \left(1 - \frac{1}{L_{rain}} \right) + T_{ground}$$

Συνεισφορές Θερμοκρασίας Θορύβου:

- Η βροχή μειώνει τη συνεισφορά του T_{sky} αλλά παράγει επιπλέον θόρυβο λόγω θερμοκρασίας T_{rain} .
- Η συνεισφορά του T_{ground} παραμένει σταθερή.



Θερμοκρασία θορύβου κεραίας



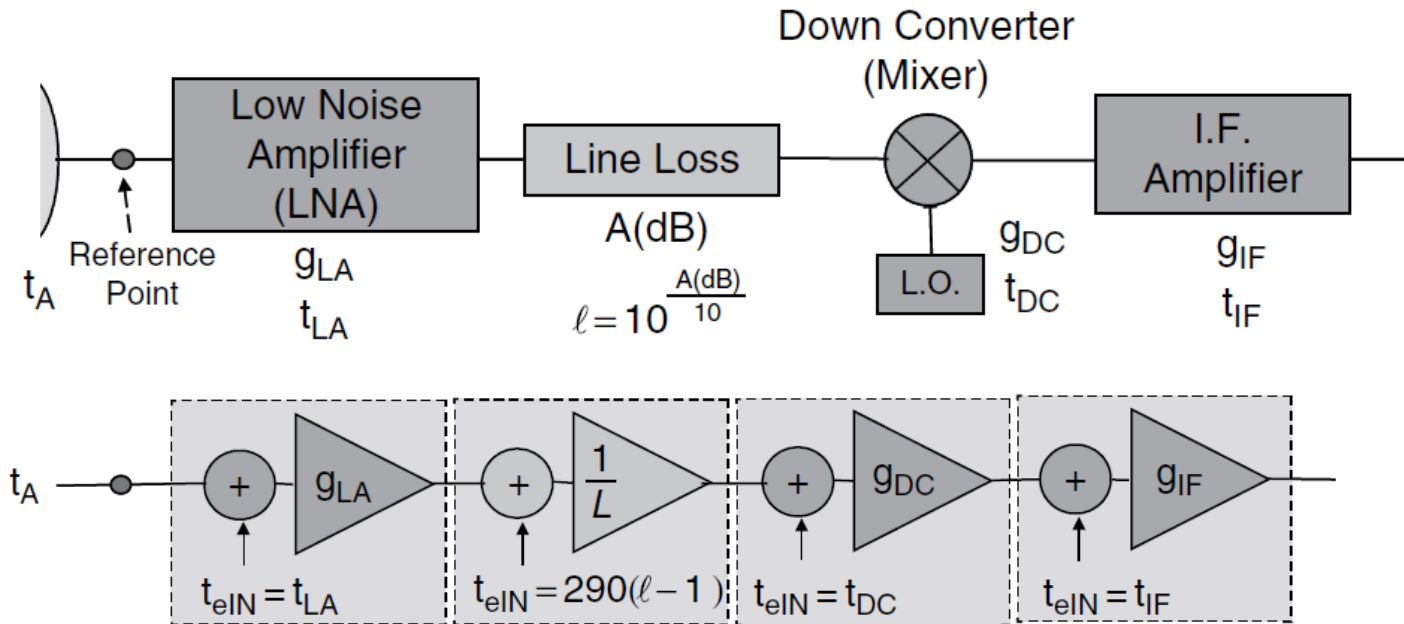
Rain Fade Level (dB)	1	3	10	20	30
Noise Temperature (°K)	56	135	243	267	270

Οι ανθρώπινες πηγές ραδιοθορύβου αποτελούνται από θόρυβο παρεμβολών στο ίδιο εύρος ζώνης πληροφοριών που προκαλείται από:

- συνδέσεις επικοινωνιών, τόσο δορυφορικές όσο και επίγειες,
- μηχανήματα,
- άλλες ηλεκτρονικές συσκευές που ενδέχεται να βρίσκονται κοντά στον επίγειο τερματικό σταθμό.

Συχνά, ο θόρυβος παρεμβολών εισέρχεται στο σύστημα μέσω των πλευρικών λοβών ή των οπίσθιων λοβών της κεραίας του επίγειου δέκτη.

Συνολική θερμοκρασία θορύβου



Σχέση του Friis για το θόρυβο:

$$F_{tot} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots$$

$$T_e = T_{e1} + \frac{T_{e2} - 1}{G_1} + \frac{T_{e3} - 1}{G_1 G_2} + \dots$$

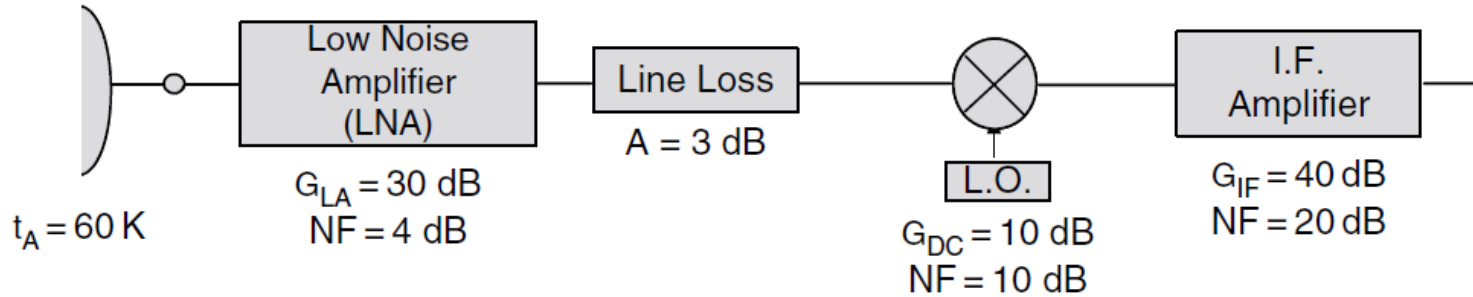
$$t_s = t_A + t_{LA} + \frac{290(\ell - 1)}{g_{LA}} + \frac{t_{DC}}{\left(\frac{1}{\ell}\right) g_{LA}} + \frac{t_{IF}}{g_{DC} \left(\frac{1}{\ell}\right) g_{LA}}$$

Οι συνεισφορές θορύβου υπόλογίζονται ως προς ένα κοινό σημείο αναφοράς. Συνήθως, αυτό είναι τα τερματικά της κεραίας του δέκτη, επειδή εκεί είναι το επιθυμητό επίπεδο σήματος χαμηλότερο και άρα ο θόρυβος έχει τη μεγαλύτερη επίδραση.

- ❖ Ξεκινάμε με το αριστερότερο στοιχείο, στη συνέχεια προχωράμε προς τα δεξιά, προσθέτοντας τη συνεισφορά της θερμοκρασίας θορύβου σε σχέση με το σημείο αναφοράς. Το άθροισμα των συνεισφορών της θερμοκρασίας θορύβου σε σχέση με το σημείο αναφοράς θα είναι η θερμοκρασία θορύβου του συστήματος, t_s .

Συνολική θερμοκρασία θορύβου

Θερμοκρασία θορύβου αναφοράς $\rightarrow 290\text{ K}$



$$t_{ein} = 290(10^{\frac{NF}{10}} - 1)$$

$$t_{LA} = 290(10^{\frac{4}{10}} - 1) = 438\text{ K}$$

$$t_{ein} = 290(l - 1) = 290(10^{\frac{3}{10}} - 1) = 289\text{ K}$$

$$t_{DC} = 290(10^{\frac{10}{10}} - 1) = 2610\text{ K}$$

$$t_{IF} = 290(10^{\frac{20}{10}} - 1) = 28710\text{ K}$$

$$g_{LA} = 10^{\frac{30}{10}} = 1000$$

$$g_{IF} = 10^{\frac{40}{10}} = 10000$$

$$\frac{1}{l} = 1/10^{\frac{3}{10}} = \frac{1}{2}$$

$$g_{DC} = 10^{\frac{10}{10}} = 10$$

$$t_s = t_A + t_{LA} + \frac{290(l - 1)}{g_{LA}} + \frac{t_{dc}}{(1/l) g_{LA}} + \frac{t_{IF}}{g_{DC} g_{LA} (1/l)} = 60 + 438 + \frac{289}{1000} + \frac{2610}{1000 * 1/2} + \frac{28710}{\frac{1}{2} 10 * 1000}$$

$$= \textcircled{60 + 438} + 0.29 + 5.22 + 5.74 = 509.3\text{ K}$$

Σημαντικές συνεισφορές

Figure of merit

$$M = \left(\frac{G}{T} \right) = G_r - T_s = G_r - 10 \log_{10}(ts)$$

Η ποιότητα ή η αποδοτικότητα των τμημάτων του δέκτη μιας δορυφορικής επικοινωνιακής σύνδεσης συχνά προσδιορίζεται από έναν δείκτη απόδοσης. Ο δείκτης G/T είναι μια ενιαία παράμετρος μέτρησης της απόδοσης του δέκτη και είναι ανάλογος με το $eirp$ ως παράμετρος μέτρησης της απόδοσης του πομπού της σύνδεσης.

Για παράδειγμα, σε μια αντιπροσωπευτική σύνδεση 12 GHz με κεραία δέκτη 1 m, συντελεστή θορύβου δέκτη 3 dB και θερμοκρασία θορύβου κεραίας 30 K.

$$G_r = 10 \log_{10}(109.66 \times 12^2 \times 1^2 \times 0.55) = 39.4 \text{ dBi}$$

$$t_s = 30 + 290 \left(10^{\frac{3}{10}} - 1 \right) = 30 + 290 = 320 \text{ K}$$

$$M = G_r - T_s = 39.4 - 10 \log_{10}(320) = 14.4 \text{ dB/K}$$

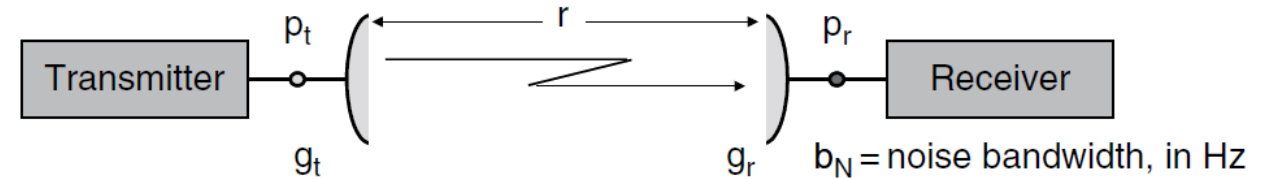
Οι λειτουργικές δορυφορικές συνδέσεις μπορούν να έχουν τιμές G/T από 20 dB/K έως και -3 dB/K. Οι χαμηλότερες τιμές συναντώνται συνήθως σε δορυφορικούς δέκτες (uplinks) με κεραίες ευρείας δέσμης, όπου το κέρδος μπορεί να είναι χαμηλότερο από τη θερμοκρασία θορύβου του συστήματος που εκφράζεται σε dB.

Carrier-to-Noise Ratio

$$\frac{c}{n} = \frac{p_r}{n_r}$$

- Το c/n είναι η κύρια παράμετρος που ενδιαφέρει για τον καθορισμό της συνολικής απόδοσης ενός συστήματος ασύρματων επικοινωνιών. Μπορεί να καθοριστεί σε οποιοδήποτε σημείο της σύνδεσης, όπως στους ακροδέκτες της κεραίας του δέκτη ή στην είσοδο του αποδιαμορφωτή.
- Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος c/n , τόσο καλύτερη είναι η απόδοση της σύνδεσης. Οι τυπικές επικοινωνιακές συνδέσεις απαιτούν ελάχιστες τιμές από 6 έως 10 dB για αποδεκτή απόδοση. Ορισμένα σύγχρονα επικοινωνιακά συστήματα που χρησιμοποιούν πιο ισχυρή κωδικοποίηση μπορούν να λειτουργούν με χαμηλότερες τιμές.

$$\frac{c}{n} = \frac{p_r}{n_r} = \frac{p_t g_t g_r \left(\frac{1}{l_{FS} l_o} \right)}{k t_s b_N}$$



$$\frac{c}{n} = \frac{eirp}{k b_N} \frac{g_r}{t_s} \frac{1}{l_{FS} l_o}$$

$$\frac{C}{N} = EIRP + \frac{G}{T} - L_{FS} + \sum L_o - 228.6 - B_N$$

$$k = -228.6 \frac{dBw}{KHz}$$

Carrier-to-Noise Density

Energy-Per-Bit to Noise Density

Q function, BER και link margin

$$\frac{c}{n_0} = \frac{c}{n} b_N$$

$$\frac{C}{N_0} = \frac{C}{N} + B_N \text{ (dBHz)}$$

Ο λόγος C/N_0 παίρνει αρκετά μεγαλύτερες τιμές από τον C/N λόγω των μεγάλων B που χρησιμοποιούμε στις σύγχρονες επικοινωνίες.

Για σήματα BPSK και QPSK το BER ή P_b συνδέεται με το E_b/N_0 με τη σχέση:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

όπου Q είναι μια μαθηματική συνάρτηση.

Ενέργεια ανα bit

$e_b = c T_b$, όπου c είναι η ισχύς του carrier και T_b η διάρκεια του bit σε s.

Ο λόγος της **ενέργειας ανά bit προς πυκνότητα θορύβου**, e_b/n_0 , είναι η παράμετρος που χρησιμοποιείται πιο συχνά για να περιγράψει την απόδοση των ψηφιακών επικοινωνιακών συνδέσεων.

$$\frac{e_b}{n_0} = T_b \left(\frac{c}{n_0} \right) = \frac{1}{R_b} \left(\frac{c}{n_0} \right) = \frac{b_N}{R_b} \left(\frac{c}{n} \right)$$

- Σε πρακτικές εφαρμογές το link πρέπει να διατηρήσει μια συγκεκριμένη ελάχιστη επίδοση ανεξαρτήτως συνθηκών. Έτσι, ορίζεται ένα περιθώριο ασφαλείας ή link margin (σε dB) το οποίο είναι η διαφορά μεταξύ του πραγματικού E_b/N_0 (ή SNR) και του ελάχιστου απαιτούμενου E_b/N_0 για την επίτευξη ενός BER.

Άσκηση 1

Υπολογίστε τις ακόλουθες παραμέτρους της κεραίας:

(α) το κέρδος σε dBi μιας παραβολικής κεραίας ανακλαστήρα 3 m σε συχνότητες 6 GHz και 14 GHz

(β) το κέρδος σε dBi και την αποτελεσματική επιφάνεια μιας παραβολικής κεραίας 30 m στα 4 GHz

(γ) την αποτελεσματική επιφάνεια μιας κεραίας με κέρδος 46 dBi στα 12 GHz.

Μπορεί να υποτεθεί συντελεστής απόδοσης 0.55.

$$G = 10 \log_{10}(109.66 f^2 d^2 \eta)$$

$$G = 10 \log_{10}(109.66 6^2 3^2 0.55) = 10 \log_{10}(19541.4) = 42.91 \text{ dBi}$$

$$G = 10 \log_{10}(109.66 14^2 3^2 0.55) = 10 \log_{10}(106392.1) = 50.26 \text{ dBi}$$

$$G = 10 \log_{10}(109.66 4^2 30^2 0.55) = 10 \log_{10}(868507.2) = 59.39 \text{ dBi}$$

$$109.66 12^2 d^2 0.55 = 10^{\frac{46}{10}} = 39810.7 \rightarrow d = \sqrt{4.58} = 2.14$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{4.58\pi}{4} = 3.597 \text{ m}^2$$

Άσκηση 2

Προσδιορίστε την απώλεια διαδρομής ελεύθερου χώρου για τις ακόλουθες δορυφορικές συνδέσεις:

A) Μια σύνδεση GSO που λειτουργεί στα 12 GHz με έναν επίγειο σταθμό με γωνία ανύψωσης 30° (38609 km).

B) Η σύνδεση μεταξύ ενός δορυφόρου Iridium που βρίσκεται σε υψόμετρο 780 km και μιας επίγειας θέσης με γωνία ανύψωσης 70° (824 km). Οι συχνότητες σύνδεσης είναι 29 GHz για την ανερχόμενη ζεύξη και 20 GHz για την κατερχόμενη ζεύξη.

$$L_{FS} = 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(r) + 92.44$$

$$L_{FS} = 20\log_{10}(12) + 20\log_{10}(38609) + 92.44 = 21.58 + 91.73 + 92.44 = 205.64 \text{ dB}$$

$$L_{FS} = 20\log_{10}(29) + 20\log_{10}(824) + 92.44 = 29.24 + 58.31 + 92.44 = 179.99 \text{ dB}$$

$$L_{FS} = 20\log_{10}(19) + 20\log_{10}(824) + 92.44 = 25.57 + 58.31 + 92.44 = 176.32 \text{ dB}$$

Άσκηση 3

Ένας δέκτης VSAT αποτελείται από μια κεραία διαμέτρου 0.66 m, συνδεδεμένη με έναν LNA με συντελεστή θορύβου 4 dB μέσω ενός καλωδίου με απώλεια γραμμής 1.5 dB. Ο LNA συνδέεται απευθείας με έναν downconverter με κέρδος 10 dB και θερμοκρασία θορύβου 2800° K. Ο ενισχυτής I.F. που ακολουθεί τον μετατροπέα συχνότητας έχει συντελεστή θορύβου 20 dB. Ο LNA έχει κέρδος 35 dB. Η θερμοκρασία της κεραίας για τον δέκτη μετρήθηκε ως 65° K.

(α) Υπολογίστε τη θερμοκρασία θορύβου του συστήματος και τον συντελεστή θορύβου του συστήματος στους ακροδέκτες της κεραίας του δέκτη.

(β) Ο δέκτης λειτουργεί στα 12.5 GHz. Ποιο είναι το G/T για τον δέκτη, υποθέτοντας απόδοση κεραίας 55%;

Καλώδιο

$$L = 10^{\frac{1.5}{10}} = 10^{0.15} = 1.4125$$

$$G_1 = 1/L = 0.7079$$

$$T_1 = (L - 1)T_0 = (1.4125 - 0.7079) \times 290 = 119.6 \text{ K}$$

Downconverter

$$G_3 = 10^{\frac{10}{10}} = 10$$

$$T_3 = 2800 \text{ K}$$

LNA

$$nf_2 = 10^{\frac{4}{10}} = 10^{0.4} = 2.5119$$

$$G_2 = 10^{\frac{35}{10}} = 10^{3.5} = 3162.28$$

$$T_2 = (nf_2 - 1)T_0 = (2.5119 - 1) \times 290 = 438.45 \text{ K}$$

IF Amp

$$nf_4 = 10^{\frac{20}{10}} = 10^2 = 100$$

$$T_4 = (nf_4 - 1)T_0 = (100 - 1) \times 290 = 28710 \text{ K}$$

Άσκηση 3

Η θερμοκρασία θορύβου ως προς το τερματικό της κεραίας είναι $T_{\text{system}} = T_{\text{antenna}} + T_{\text{receiver}}$

$$T_{\text{receiver}} = T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_1 G_2} + \frac{T_4}{G_1 G_2 G_3}$$

$$T_{\text{receiver}} = 119.6 + \frac{438.45}{0.7079} + \frac{2800}{0.7079 \times 3162.28} + \frac{28710}{0.7079 \times 3162.28 \times 10} = 119.63 + 619.33 + 1.25 + 1.28 = 741.49 \text{ K}$$

$$T_{\text{system}} = T_{\text{receiver}} + 65 = 806.5 \text{ K}$$

$$F_{\text{system}} = 1 + \frac{T_{\text{receiver}}}{T_o} = 1 + \frac{741.49}{290} = 3.557$$

$$NF_{\text{system}} = 10 \log_{10}(3.557) = 5.51 \text{ dB}$$

$$G = 10 \log_{10}(109.66 \cdot 12.5^2 \cdot 0.66^2 \cdot 0.55) = 4105.1$$

$$\frac{G}{T} = \frac{4105.1}{806.5} = 5.091$$

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(5.091) = 7.07 \text{ dB/K}$$

Άσκηση 4

Ο ρυθμός μετάδοσης του downlink για μια δορυφορική ζεύξη με διαμόρφωση QPSK είναι 60 Mbps. Το E_b/N_0 στον δέκτη του επίγειου σταθμού είναι 9.5 dB.

(α) Υπολογίστε το C/N_0 για τη ζεύξη.

(β) Υποθέτοντας ότι η συμβολή του θορύβου από το uplink στο downlink είναι 1.5 dB, προσδιορίστε το προκύπτον BER για τη ζεύξη.

$$\frac{c}{n_o} = Rb \frac{e_b}{n_o} \quad \eta \quad \frac{C}{N_o} = Rb + \frac{E_b}{N_o} = 10 \log_{10}(60 \times 10^6 \text{ bps}) + 9.5 \text{ dB} = 77.78 + 9.5 = 87.28 \text{ dBHz}$$

Αφού ο θόρυβος του uplink επιδεινώνει το E_b/N_0 κατά 1.5 dB:

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{total, \text{ dB}} = 9.5 - 1.5 = 8 \text{ dB}$$

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{total} = 10^{\frac{8}{10}} = 6.3$$

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_o}}\right)$$

$$P_b = Q(\sqrt{2 \cdot 6.31}) = Q(3.55) = 1.9 \times 10^{-4}$$

Άσκηση 5

Μια δορυφορική ζεύξη που χρησιμοποιεί διαμόρφωση BPSK πρέπει να λειτουργεί με BER όχι μεγαλύτερο από 1×10^{-5} . Το περιθώριο ασφαλείας (link margin) για το σύστημα ορίζεται σε 2 dB. Προσδιορίστε το E_b/N_0 που απαιτείται για τη διατήρηση της απαιτούμενης απόδοσης.

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) = 10^{-5}$$

$$Q^{-1}(10^{-5}) = \sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} = 4.265$$

$$\frac{e_b}{n_0} = \frac{4.265^2}{2} = 9.095 \rightarrow \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{dB}} = 10\log_{10}(9.095) = 9.59 \text{ dB}$$

Το link margin θα εξασφαλίσει ότι το link θα διατηρήσει την αποδεκτή απόδοση ακόμα και όταν δημιουργηθούν απώλειες από έκτακτες καταστάσεις, οι οποίες όμως δεν θα ξεπερνάνε τα 2 dB. Άρα το πραγματικό E_b/N_0 θα είναι 2 dB μεγαλύτερο από το θεωρητικό.

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{dB, required}} = 11.59 \text{ dB}$$

Συνάρτηση Q

x	Q(x)				
0.00	5.00000000e-01	1.60	5.47992917e-02	3.10	9.67603516e-04
0.10	4.60172163e-01	1.70	4.45654638e-02	3.20	6.87137823e-04
0.20	4.20740268e-01	1.80	3.59303191e-02	3.30	4.83424217e-04
0.30	3.82088576e-01	1.90	2.87165598e-02	3.40	3.36929198e-04
0.40	3.44578258e-01	2.00	2.27501319e-02	3.50	2.32629046e-04
0.50	3.08537539e-01	2.10	1.78644152e-02	3.60	1.59108666e-04
0.60	2.74253123e-01	2.20	1.39034475e-02	3.70	1.07799707e-04
0.70	2.41963709e-01	2.30	1.07241123e-02	3.80	7.23480557e-05
0.80	2.11855319e-01	2.40	8.19753592e-03	3.90	4.80963374e-05
0.90	1.84060133e-01	2.50	6.20966533e-03	4.00	3.16712418e-05
1.00	1.58655254e-01	2.60	4.66118802e-03	4.10	2.06575208e-05
1.10	1.35666061e-01	2.70	3.46697330e-03	4.20	1.33457601e-05
1.20	1.15069670e-01	2.80	2.55513033e-03	4.30	8.53989099e-06
1.30	9.68004846e-02	2.90	1.86581327e-03	4.40	5.41254204e-06
1.40	8.07566592e-02	3.00	1.34989803e-03	4.50	3.39767312e-06
1.50	6.68072013e-02			4.60	2.11245470e-06
				4.70	1.30080929e-06
				4.80	7.93327400e-07
				4.90	4.79180057e-07

Θέματα για εργασίες

1. Software defined satellite links
2. IoT and satcom
3. UAV and satcom
4. Security in satcom (x2)
5. Satellite constellation designs for satcom
6. Modulation formats for satcom
7. Antenna designs for satcom
8. Inter satellite links
9. Satellite mobile internet (x2)
10. Satellite computing
11. AI for satcom (x2-3)