



Πανεπιστήμιο Αιγαίου

# Κινητές και Δορυφορικές Επικοινωνίες

Ανάλυση και Σχεδίαση Δορυφορικών Ζεύξεων

Δημοσθένης Βουγιούκας (dnougiou@aegean.gr)

Αναπληρωτής Καθηγητής

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών & Επικοινωνιακών Συστημάτων



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

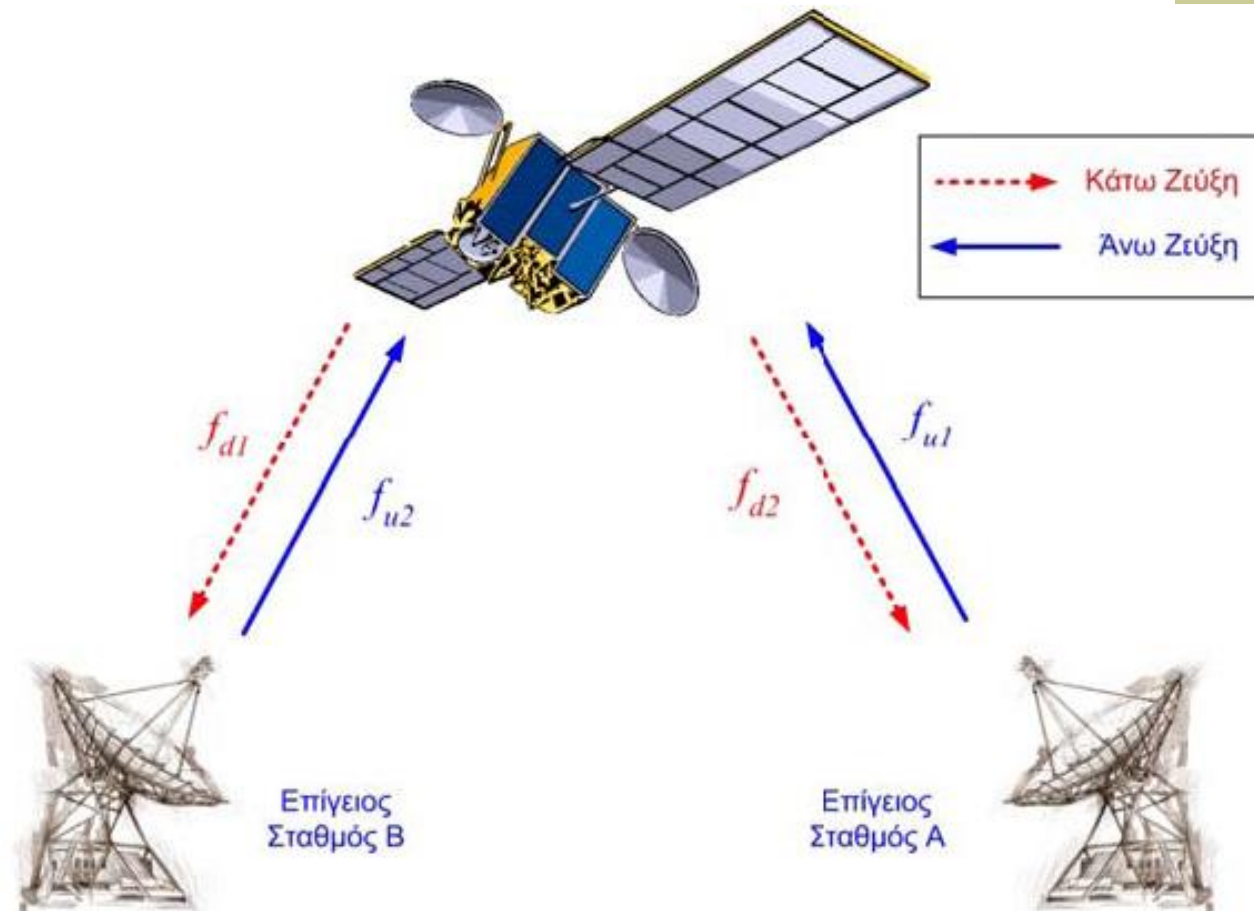


ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



# Βασική Δορυφορική Ζεύξη



# Βασική Δορυφορική Ζεύξη

- ◆ Ο επίγειος σταθμός Α εκπέμπει προς το δορυφόρο ένα φέρον κύμα σε ραδιοσυχνότητα  $f_{u1}$  (π.χ. 5980MHz).
- ◆ Το φέρον είναι διαμορφωμένο είτε από το σήμα βασικής ζώνης ενός χρήστη (**Single Channel per Carrier - SCPC**), είτε από το πολυπλεγμένο σήμα (π.χ. **FDM**).
- ◆ Το ωφέλιμο φορτίο του δορυφόρου λαμβάνει το φέρον, μετατρέπει τη συχνότητά του από  $f_{u1}$  σε  $f_{d1}$  (π.χ. 5980MHz-2225MHz=3755MHz), το ενισχύει και το επανεκπέμπει στην κάτω ζεύξη, όπου και λαμβάνεται από τον Β.

# Βασική Δορυφορική Ζεύξη

- ◆ Λόγω της αμφίδρομης επικοινωνίας, ο Β εκπέμπει ένα φέρον στην άνω ζεύξη σε συχνότητα  $f_{u2}$  (π.χ. 6020MHz) το οποίο τελικά λαμβάνεται από τον Α στην τροποποιημένη συχνότητα  $f_{u1}$  (π.χ. 6020MHz - 2225MHz=3795MHz).
- ◆ Ο λόγος που χρησιμοποιείται διαφορετική συχνότητα στην άνω και κάτω ζεύξη είναι η αποφυγή παρεμβολής από το 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 στο δορυφόρο.

# Βασική Δορυφορική Ζεύξη

- ◆ Έχουμε υποθέσει απλό αναμεταδότη (όχι **On-Board Processing - OBP**).
- ◆ Τα δύο κυκλώματα της αμφίδρομης επικοινωνίας θα μπορούσαν να διέρχονται από διαφορετικό δορυφορικό δίαυλο (transponder).
- ◆ Το πλέον περιοριστικό τμήμα της ζεύξης είναι η κάτω ζεύξη (πάντα στις δορυφορικές).
- ◆ 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 την είσοδο ( $C/N$ ) ενός αποδιαμορφωτή.
- ◆ Άρα σκοπός είναι η μεγιστοποίηση της ισχύος του επιθυμητού σήματος προς εκείνη του θορύβου στην είσοδο του επίγειου δέκτη.

# Βασική Δορυφορική Ζεύξη

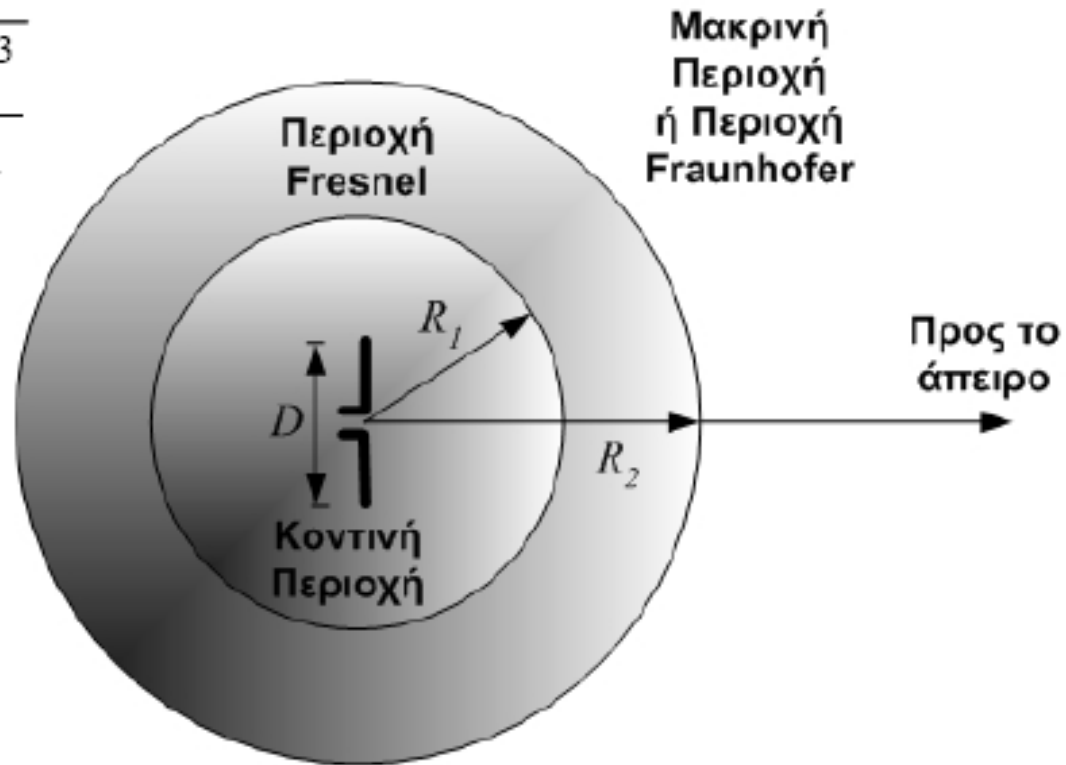
- ◆ Η θεμελιώδης διαδικασία σχεδίασης μιας δορυφορικής ζεύξης είναι ο υπολογισμός και η σύνταξη του προϋπολογισμού της ζεύξης (**link budget**), δηλ. ο υπολογισμός των λόγων  $C/N$ ,  $C/N_0$ , ή  $E_b/N_0$ , σαν συνάρτηση των χαρακτηριστικών :
  - Του δορυφόρου
  - Των επίγειων σταθμών
  - Του τοπικού περιβάλλοντος
  - Των συνθηκών παρεμβολής



# Περιοχές Ακτινοβολίας Κεραιών

$$R_1 = 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$$

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda}$$



# Πόλωση Η/Μ Κυμάτων

- ◆ Το ηλεκτρομαγνητικό (Η/Μ) κύμα αποτελείται από δύο πεδία (ηλεκτρικό και μαγνητικό) τα οποία είναι κάθετα μεταξύ τους, ενώ το επίπεδο στο οποίο βρίσκονται είναι κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης τους.
- ◆ Ορίζεται από τη διεύθυνση του Ηλεκτρικού πεδίου το οποίο είναι κάθετο στην διάδοση του κύματος
- ◆ Η διεύθυνση είναι σταθερή
  - Γραμμική πόλωση
- ◆ Η διεύθυνση δεν είναι σταθερή (περιστρέφεται)
  - Ελλειπτική πόλωση
- ◆ Δύο κύματα είναι πολωμένα ορθογωνικά αν:
  - Έχουν ελλειπτικές πολώσεις με αντίστροφες φορές
  - Έχουν κάθετες μεταξύ τους γραμμικές πολώσεις

# Πόλωση Η/Μ Κυμάτων

- ◆ Το διάνυσμα της έντασης, γενικά, δεν διατηρεί ούτε σταθερή διεύθυνση ούτε σταθερό μήκος. Δηλαδή, και το μέτρο και η διεύθυνση της πόλωσης μεταβάλλονται και το χρόνο και η πιο συνηθισμένη μορφή πόλωσης είναι η **ελλειπτική πόλωση**. Δύο άλλες μορφές πόλωσης είναι, ουσιαστικά, τα δύο όρια της έλλειψης. Δηλαδή:
  - Η **κυκλική πόλωση** (που αντιστοιχεί στο όριο που και οι δύο ακτίνες της έλλειψης έχουν το ίδιο μήκος) και
  - Η **γραμμική πόλωση** (που αντιστοιχεί στο όριο που η μεγάλη ακτίνα της έλλειψης έχει κάποιο συγκεκριμένο μήκος ενώ η μικρή έχει μηδενικό μήκος)

# Πόλωση Η/Μ Κυμάτων

- ◆ Χαρακτηριστικά μεγέθη πόλωσης:
  - **Φορά περιστροφής** κατά τη διάρκεια της διάδοσης. Μπορεί να είναι είτε δεξιόστροφη είτε αριστερόστροφη πόλωση.
  - **Αξονικός λόγος** (Axial Ratio,  $AR$ ) που είναι ίσος με το λόγο του μεγάλου ημιάξονα της ελλειπτικής τροχιάς προς τον μικρό. Οπότε, οριακά, παίρνει την τιμή μονάδα (κυκλική πόλωση) ή την τιμή άπειρο (γραμμική πόλωση).
  - **Κλίση της έλλειψης** ( $\tau$ ), είναι η γωνία που σχηματίζει ο μεγάλος ημιάξονας της έλλειψης με το οριζόντιο επίπεδο.

# Χρήση Πόλωσης

- ◆ Μια κεραία η οποία είναι σχεδιασμένη να εκπέμπει ή να λαμβάνει Η/Μ κύματα σε μια συγκεκριμένη πόλωση **δεν** μπορεί να εκπέμψει ή να λάβει την ορθογωνική πόλωση της πόλωσης λειτουργίας της.
- ◆ Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει τη χρήση της τεχνικής **επαναχρησιμοποίησης συχνότητας** στην ίδια περιοχή και μεταξύ ίδιων σταθμών.
- ◆ Όμως για τη χρήση της τεχνικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας, χωρίς σφάλματα πρέπει τα Η/Μ κύματα που χρησιμοποιούνται να έχουν **ακριβώς** ορθογωνικές πολώσεις.
- ◆ Επειδή όμως και οι κεραίες δεν είναι ιδανικές και το μέσο αποπολώνει το κύμα δημιουργείται το φαινόμενο της **αμοιβαίας παρεμβολής μεταξύ των ραδιοζεύξεων**.

# Κατευθυντικότητα

- ◆ Όσο πιο μικρή είναι η στερεά γωνία δέσμης τόσο πιο μεγάλη είναι η κατευθυντικότητα της κεραίας.
- ◆ Η κατευθυντικότητα της ισοτροπικής είναι η μικρότερη που μπορεί να επιτευχθεί.

$$D \geq 1 \qquad \Omega_A \leq 4\pi$$

$$D \approx \frac{4\pi}{\theta_{3dB} \varphi_{3dB}} \approx \frac{41000}{\theta_{3dB}^{\circ} \varphi_{3dB}^{\circ}}$$

# Κατευθυντικότητα

- ♦ Παράδειγμα για  $\theta_{3dB}^{\circ} = \varphi_{3dB}^{\circ} = 10^{\circ}$

$$D \approx \frac{41000}{100} = 410 = 26,1dB_i$$

- ♦ Σχέση με πυκνότητα ισχύος

$$\left| \vec{P}_{av}(\vec{r}) \right| = \frac{W_{rad}}{4\pi d^2} D_g(\theta, \varphi)$$

# Κέρδος Ισχύος & Μέγιστο Κέρδος

- ◆ Συντελεστής απόδοσης ακτινοβολίας (περιγράφει τις ωμικές απώλειες της κεραίας)

$$W_{rad} = nW_A \quad (0 \leq n \leq 1) \quad W_A: \text{Ισχύς στην είσοδο της κεραίας}$$

- ◆ Πόσο αποδοτικά ακτινοβολεί η κεραία???

$$\begin{aligned} G_g(\theta, \varphi) &= 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{W_A} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{\frac{W_{rad}}{n}} \\ &= n4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{W_{rad}} = nD_g(\theta, \varphi) \end{aligned}$$



# Συλλεκτική Ικανότητα

- ♦ Ορίζεται ως:

$$\varepsilon = \frac{A_e}{A_p}$$

$A_e$ : η ενεργός επιφάνεια της κεραίας  
 $A_p$ : η επιφάνεια της διατομής της κεραίας

- ♦ Για κατοπτρική

$$A_e = \varepsilon A_p = \varepsilon (\pi r^2) = \varepsilon \left( \pi \frac{\Delta^2}{4} \right)$$

$$G_{\max} = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_e = \varepsilon \left( \frac{\pi\Delta}{\lambda} \right)^2 = \varepsilon \left( \frac{\pi\Delta f}{c} \right)^2$$

$$\Delta \uparrow \text{ ή } f \uparrow \Rightarrow G_{\max} \uparrow$$

Διπλασιάζοντας τη διάμετρο τετραπλασιάζουμε το κέρδος (+6dB), ή για δεδομένο κέρδος μπορούμε να υπολογίσουμε τη διάμετρο για δεδομένη συχνότητα.

# Μέγιστο Κέρδος σε Λογαριθμική Κλίμακα

$$\begin{aligned} G_{\max, dBi} &= 10 \log_{10} \left[ \varepsilon \left( \frac{\pi \Delta}{\lambda} \right)^2 \right] = 10 \log_{10} \left[ \varepsilon \left( \frac{\pi \Delta f}{c} \right)^2 \right] \\ &= 20 \log_{10} \left[ \frac{\pi \Delta \sqrt{\varepsilon}}{\lambda} \right] = 20 \log_{10} \left[ \frac{\pi \Delta f \sqrt{\varepsilon}}{c} \right] \end{aligned}$$

Το σύμβολο dBi αναφέρεται σε κέρδος ως προς την ισοτροπική κεραία.

# Συντελεστής Απόδοσης Κεραίας

- ♦ Ο συντελεστής απόδοσης μιας κεραίας είναι το γινόμενο πολλών συντελεστών ως εξής:

$$\varepsilon = \varepsilon_i \times \varepsilon_s \times \varepsilon_f \times \varepsilon_z \times \dots$$

όπου

$\varepsilon_i$  : ο συντελεστής απόδοσης πρόσπτωσης της ακτινοβολίας, για καταπίεση πλευρικών λοβών ( $\approx 90\%$ )

$\varepsilon_s$  : ο συντελεστής απόδοσης διάχυσης ( $\approx 80\%$ ).

$\varepsilon_f$  : ο συντελεστής απόδοσης επιφάνειας ( $\approx 85\%$ ).

$\varepsilon_z$  : ο συντελεστής απόδοσης λόγω ωμικών απωλειών και λόγω κακής προσαρμογής.

- ♦ Συνήθως  $\varepsilon$  :  $\approx 55\%-75\%$ , τυπική τιμή  $60\%$ .

# Γωνιακό Εύρος Δέσμης 3dB - Κατοπτρικές

- ◆ Είναι η γωνία που ορίζεται από τις διευθύνσεις που αντιστοιχούν σε πτώση του κέρδους κατά 3dB ως προς τη μέγιστη τιμή.
- ◆ Σχετίζεται με το λόγο  $\lambda/\Delta$  με ένα συντελεστή που εξαρτάται από την πρόσπτωση ακτινοβολίας. Για ομοιόμορφη πρόσπτωση ο συντελεστής γίνεται  $58,5^\circ$ . Επειδή όμως επιθυμούμε καταπιεσμένους πλευρικούς λοβούς, συνήθως χρησιμοποιούμε μη ομοιόμορφη πρόσπτωση (εξασθένιση στα άκρα του κατόπτρου), η οποία συνεπάγεται αύξηση του εύρους 3dB. Τυπικές εκφράσεις :

$$\theta_{3dB} \approx 70(\text{ή } 65) \frac{\lambda}{\Delta} \approx 70(\text{ή } 65) \frac{c}{\Delta f} \quad (\text{degs})$$

# Κέρδος Συναρτήσεως $\theta_{3dB}$

- ◆ Σε μια οποιαδήποτε μικρή γωνία  $\theta$  ως προς την κατεύθυνση μέγιστου κέρδους, δηλαδή γωνία για την οποία ισχύει

$$0^\circ \leq \theta \leq \frac{\theta_{3dB}}{2}$$

το κέρδος προσεγγιστικά δίνεται από

$$G(\theta)_{dBi} = G_{\max, dBi} - 12 \left( \frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2$$

$$\text{Απώλειες Σκόπευσης} = 12 \left( \frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2$$

# Μέγιστο Κέρδος Συναρτήσει $\theta_{3dB}$

- ♦ Από τις προηγούμενες εξισώσεις προκύπτει μια έκφραση του μέγιστου κέρδους συναρτήσει της γωνίας  $\theta_{3dB}$ , ανεξάρτητη φαινομενικά από τη συχνότητα

$$G_{\max} = \varepsilon \left( \frac{\pi \Delta f}{c} \right)^2 = \varepsilon \left( \frac{70\pi}{\theta_{3dB}} \right)^2$$

- ♦ Για  $\varepsilon=0.6$

$$G_{\max} \approx \frac{29000}{(\theta_{3dB})^2} \quad (\theta_{3dB} \text{ σε μοιρες})$$

$$G_{\max, dBi} \approx 44.6 - 20 \log_{10} \theta_{3dB}$$

$$\theta_{3dB} = \frac{170}{10^{\frac{G_{\max, dBi}}{20}}}$$

# Καθαρότητα Πόλωσης (Polarization Purity)

- ◆ Λόγω κατασκευαστικών ατελειών μια κεραία εκπέμπει εκτός της επιθυμητής (**co-polarized**) συνιστώσας και μια ανεπιθύμητη συνιστώσα (**crosspolarized** ή **X-polar**).
- ◆ Μια κεραία χαρακτηρίζεται από τα διαγράμματα ακτινοβολίας των δύο αυτών συνιστωσών.
- ◆ Η X-polar συνιστώσα είναι συνήθως μηδενική στην κατεύθυνση του μέγιστου κέρδους και το διάγραμμά της παρουσιάζει τον πρώτο λοβό μέγιστου κέρδους -20dB ως προς την κατεύθυνση μέγιστου κέρδους.
- ◆ Η απομόνωση (**XPI**) σε συγκεκριμένη κατεύθυνση ορίζεται ως ο λόγος της co-polar προς την X-polar συνιστώσα πεδίου.

# Καθαρότητα Πόλωσης (Polarization Purity)

$$XPI(dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{E_{co}}{E_x} \right)$$

$$XPI(dB) = 10 \log_{10} G_{co}(\theta) - 10 \log_{10} G_x(\theta)$$

- ♦ Συνήθως απαιτείται

$$XPI \geq 30dB$$

στο 1dB beamwidth



# Απομόνωση & Διαχωρισμός Ορθογωνικής Πόλωσης

- ◆ Απομόνωση λόγω Ορθογωνικής Πόλωσης

$$XPI = \frac{E'_v}{E_{xh}} = \frac{E'_h}{E_{xv}}$$

$$XPI_{dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{E'_v}{E_{xh}} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{E'_h}{E_{xv}} \right)$$

- ◆ Διαχωρισμός λόγω Ορθογωνικής Πόλωσης

$$XPD = \frac{E'_v}{E_{xv}} \quad XPD_{dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{E'_v}{E_{xv}} \right)$$

# Αμοιβαία Παρεμβολή μεταξύ Ραδιοζεύξεων λόγω Αποπόλωσης

## Διαχωρισμός λόγω Ορθογωνικής Πόλωσης (XPD)

- ♦ Για ελλειπτική πόλωση η οποία χαρακτηρίζεται από την τιμή του αξονικού λόγου **AR** ο διαχωρισμός λόγω ορθογωνικής πόλωσης δίνεται από τη σχέση:

$$XPD(dB) = 20 \log \left( \frac{AR + 1}{AR - 1} \right)$$

Και ως συνάρτηση του XPD το AR έχει τη μορφή:

$$AR = \frac{10^{XPD/20} + 1}{10^{XPD/20} - 1}$$

# Παραβολική Κεραία

- ◆ Είναι η κεραία η οποία χρησιμοποιείται συνήθως στις δορυφορικές ζεύξεις.
- ◆ Χαρακτηριστικά:
  - διάμετρος από 0.6m έως 30m ανάλογα με τη χρήση.
  - μικρός αριθμός και ισχύς πλευρικών λοβών
  - μεγάλη κατευθυντικότητα
  - η πηγή τροφοδοσίας τους είναι είτε μια χοανοκεραία ή υποανακλαστήρας
  - ο ανακλαστήρας της κεραίας είναι παραβολικού σχήματος, τελείως αγωγίμος, κατευθύνει την ακτινοβολούμενη ισχύ σε μία δέσμη παράγοντας σχεδόν επίπεδο κύμα.

# Παραβολική Κεραία

- ♦ Για γωνίες  $\varphi$  σε μία περιοχή 6dB γύρω από τη γωνία του μεγίστου η συνάρτηση του κέρδους του παραβολικού κατόπτρου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$G(\varphi) = \varepsilon \left( \frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 e^{-2.76(\varphi/2\varphi_b)^2}$$

$\varepsilon$ : συντελεστής απόδοσης κεραίας

$d$ : διάμετρος κεραίας

$\lambda$ : μήκος κύματος

$$\varphi_b = \frac{\lambda}{d\sqrt{\varepsilon}}$$

- ♦ Μείωση του κέρδους της κεραίας σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις προκαλούν και οι κατασκευαστικές ανωμαλίες που τυχόν παρουσιάζει το κάτοπτρο. Η μείωση αυτή περιγράφεται από τη σχέση:

$$L_r \cong e^{-(4\pi\sigma/\lambda)^2}$$

$e^2$ : μέση τετραγωνική τιμή επιφανειακών ανωμαλιών κατόπτρου

# Παραβολική Κεραία

- ◆ Η ισχύς των πλευρικών λοβών των παραβολικών κεραιών οριοθετούνται από διεθνείς κανόνες.
- ◆ Για παραβολικές κεραιές με διάμετρο μεγαλύτερη από  $100\lambda$  η ισχύς των πλευρικών λοβών δεν πρέπει να ξεπερνάει το όριο:

$$G(\theta) = 29 - 25 \log(\theta) \text{ dB}$$

- ◆ Ενώ για κεραιές με διάμετρο  $d < 100\lambda$  δεν πρέπει να ξεπερνάει το όριο:

$$G(\theta) = 52 - 10 \log\left(\frac{d}{\lambda}\right) - 25 \log(\theta) \text{ dB}$$

# Επαναχρησιμοποίηση Συχνοτήτων

- ◆ Τα έσοδα ενός τηλεπικοινωνιακού δορυφόρου προέρχονται αποκλειστικά από το ωφέλιμο φορτίο και τη δυνατότητα που έχει να εξυπηρετεί περισσότερους χρήστες και να παρέχει περισσότερες υπηρεσίες.
- ◆ Μια πολύ βασική τεχνική αύξησης της διαθέσιμης χωρητικότητας είναι η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων.
- ◆ Υπάρχουν 2 τεχνικές (αμοιβαία συμβατές)
  - Χωρική επαναχρησιμοποίηση (**spatial frequency reuse**) ή διαχωρισμός των δεσμών (**beam separation**)
  - Επαναχρησιμοποίηση με διάκριση πόλωσης (**polarization reuse** ή **dual polarization frequency reuse**)

# Επαναχρησιμοποίηση Συχνοτήτων

- ◆ Χωρική επαναχρησιμοποίηση
  - Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων σε δέσμες που φωτίζουν διαφορετικές περιοχές της γης και οι οποίες τροφοδοτούνται από διαφορετικούς transponders.
- ◆ Με διάκριση πόλωσης
  - Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων στις ίδιες κεραίες οι οποίες όμως τροφοδοτούνται από δύο transponders με ορθογωνικές πολώσεις.
- ◆ Ταυτόχρονη εφαρμογή και των δύο τεχνικών για μέγιστη επαναχρησιμοποίηση του ίδιου φάσματος.

# Επαναχρησιμοποίηση Συχνοτήτων

- ◆ Παράδειγμα : INTELSAT – V
  - Διαθέσιμο εύρος στην 6/4GHz = **500MHz**
    - **375MHz** x 4 = **1500MHz** (χωρική και πόλωσης)
    - **125MHz** x 2 = **250MHz** (πόλωσης σε global beam)
  - Διαθέσιμο εύρος στην 14/11GHz = **420MHz**
    - **420MHz** x 2 = **840MHz** (χωρική)
  - Συνολικά διαθέσιμο εύρος χωρίς επαναχρησιμοποίηση = **920MHz**
  - Συνολικό διαθέσιμο εύρος με επαναχρησιμοποίηση = **2590MHz**



# Το Δορυφορικό Τηλεπικοινωνιακό Κανάλι

- ◆ Μελέτη του καναλιού
  - Ισχύς που εκπέμπεται
  - Ισχύς που φτάνει στον δέκτη
  - Παρεμβολές κατά τη διάδοση του σήματος
  - Σφάλματα
  - Διαμόρφωση του σήματος στον πομπό
  - Αποδιαμόρφωση του στον δέκτη
  - Απόσβεση
  - Αποπόλωση

# Εκπεμπόμενη Ισχύς

- ◆ Ισχύς εκπομπής ανά μονάδα στερεάς γωνίας (W/στερεακτίσιο)

$$\frac{P_T}{4\pi}$$

- ◆ Για μια κατευθυντική κεραία με μέγιστο κέρδος  $G_T$  σε συγκεκριμένη κατεύθυνση (W/στερεακτίσιο)

$$\frac{G_T P_T}{4\pi}$$

- ◆ Το γινόμενο  $P_T G_T$  ονομάζεται Ενεργός Ισοτροπική Ακτινοβολούμενη Ισχύς (EIRP)

# Πυκνότητα Ροής της Ισχύος

- ◆ Η λαμβανόμενη ισχύς σε επιφάνεια  $A_{Reff}$  που βρίσκεται σε απόσταση  $d$  από την κεραία εκπομπής είναι

$$P_R(d) = \left( \frac{P_T G_T}{4\pi} \right) \left( \frac{A_{Reff}}{d^2} \right) = \Phi(d) A_{Reff} \quad (Watt)$$

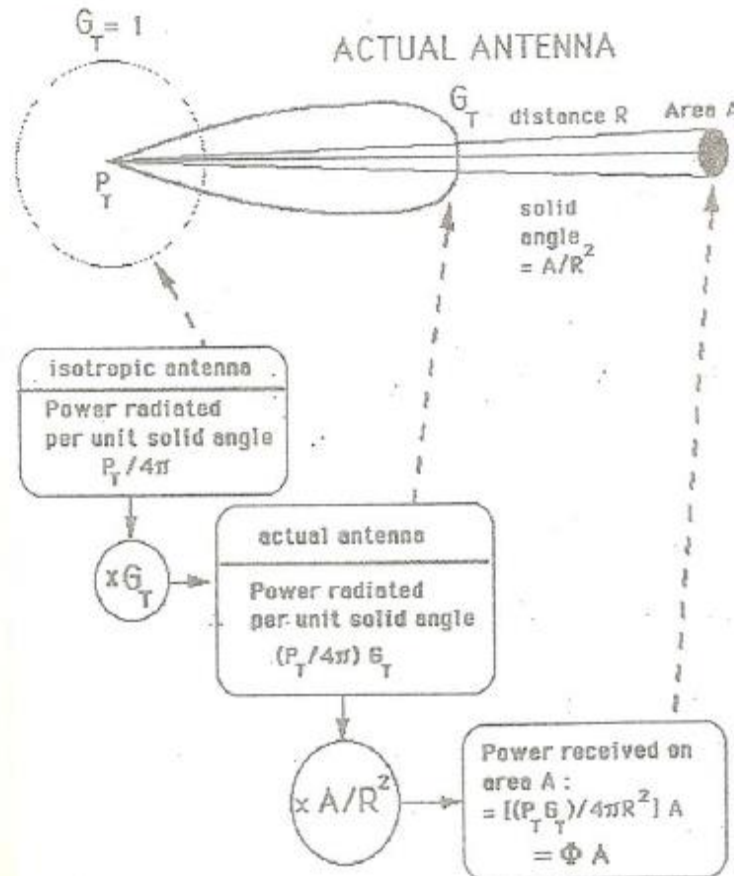
- ◆ Το μέγεθος

$$\Phi(d) = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} \quad (Watt / m^2)$$

καλείται **Πυκνότητα Ροής Ισχύος (Power Flux Density)**

# Πυκνότητα Ροής της Ισχύος

ISOTROPIC ANTENNA



# Ισχύς Λαμβανόμενου Σήματος

- ♦ Μια κεραία-δέκτης με ενεργό επιφάνεια  $A_{Reff}$  τοποθετημένη σε απόσταση  $R$  από τον πομπό, λαμβάνει ισχύ

$$P_R = \Phi A_{Reff} = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2} A_{Reff} \quad (Watt)$$

$$A_{Reff} = \frac{G_R}{4\pi} \frac{\lambda^2}{\lambda^2} \quad (m^2)$$

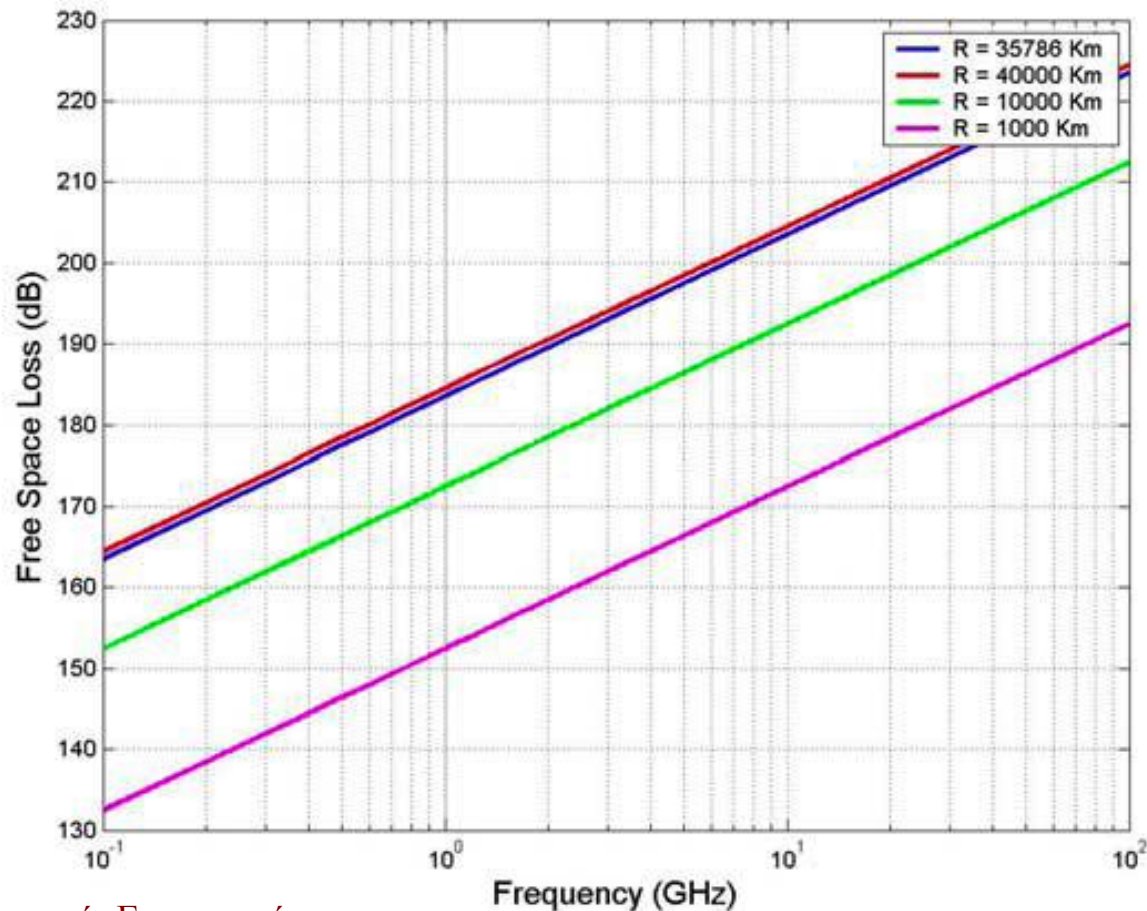
$$P_R = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R = P_T G_T G_R \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2$$

# Απώλειες Ελευθέρου Χώρου

$$L_{FS}(d) = \frac{P_t}{W_r(d)} = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

$$\begin{aligned} PL(dB) &= 10 \log \left( \frac{P_t}{W_r(d)} \right) = 10 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = 20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) \\ &= -10 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = -20 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right) \\ &= -20 \log(\lambda) + 20 \log(4\pi) + 20 \log(d) \\ &= 22 - 20 \log(\lambda) + 20 \log(d) \end{aligned}$$

# Απώλειες Ελευθέρου Χώρου για $R=35786\text{Km}$



# Επιπλέον Απώλειες Διάδοσης

- ◆ Απώλειες λόγω μέσου μετάδοσης στην ατμόσφαιρα
  - αέρια,
  - νερό (βροχή, νέφη, χιόνι, πάγος)
  - ιονόσφαιρα, τροπόσφαιρα
- ◆ Συνολικά οι απώλειες λόγω μέσου μετάδοσης (ελεύθερου χώρου και ατμόσφαιρας)

$$L_p = L_{FS} L_A$$

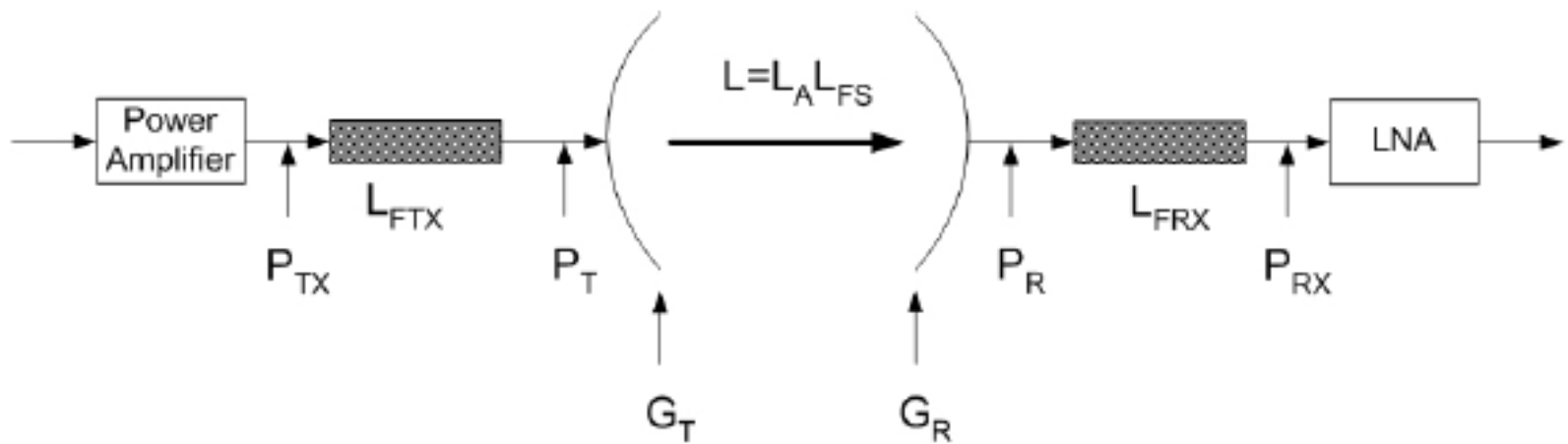
$$L_p (dB) = L_{FS} (dB) + L_A (dB)$$

- ◆ **ΠΡΟΣΟΧΗ** : Τις απώλειες τις θεωρούμε  $>1$ , εννοώντας πόσες φορές υποβιβάζουν το σήμα, και διαιρούμε, ή θετικά dB και τα αφαιρούμε.



# Επιπλέον Απώλειες Διάδοσης

Διάταξη Αναφοράς για τον εντοπισμό των μεγεθών στην αλυσίδα



# Επιπλέον Απώλειες Διάδοσης

- ♦ Μέχρι τώρα μελετούσαμε την ιδανική περίπτωση όπου δεν υπήρχαν απώλειες άλλες, εκτός από αυτές του κενού χώρου. Στα πραγματικά δορυφορικά συστήματα όμως η σχέση:

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 = \frac{G_T G_R}{L_{FS}}$$

Επεκτείνεται και καλύπτει τις περισσότερες, πρακτικά, περιπτώσεις:

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{G_T G_R}{L_p} \quad \text{με} \quad L_p = L_{FS} \prod_{i=1}^6 L_i$$

# Επιπλέον Απώλειες Διάδοσης

- ◆  $L_{FS}$ : κενού χώρου
- ◆  $L_1$ : μεταξύ της εξόδου του πομπού και της κεραίας εκπομπής
- ◆  $L_2$ : της ατμόσφαιράς και της ιονόσφαιρας
- ◆  $L_3$ : λόγω νεφώσεων και βροχόπτωσης
- ◆  $L_4$ : λόγω ασυμφωνίας πόλωσης (αποπόλωση) των H/M κυμάτων
- ◆  $L_5$ : αποπροσανατολισμός κεραιών που δημιουργείται, συνήθως, σε ατελή σταθεροποίηση του γεωστατικού δορυφόρου.
- ◆  $L_6$ : μεταξύ της κεραίας και της εισόδου του δέκτη

# Επιπλέον Απώλειες Διάδοσης

- ◆ Απώλειες στον εξοπλισμό πομπού

$$P_{TX} = P_T L_{FTX} \quad (Watt)$$

$$P_{TX} (dBm) = P_T (dBm) + L_{FTX} (dB)$$

$$EIRP = P_T G_T = \frac{P_{TX}}{L_{FTX}} G_T \quad (Watt)$$

$$\begin{aligned} EIRP (dBm) &= P_T (dBm) + G_T (dB) \\ &= P_{TX} (dBm) - L_{FTX} (dB) + G_T (dB) \end{aligned}$$

# Επιπλέον Απώλειες Διάδοσης

- ◆ Απώλειες στον εξοπλισμό δέκτη

$$P_{RX} = P_R / L_{FRX} \quad (Watt)$$

$$P_{RX} (dBm) = P_R (dBm) - L_{FRX} (dB)$$

- ◆ Απώλειες στη σκόπευση  
κεραιών πομπού  
και δέκτη

$$L_T = 12 \left( \frac{\theta_T}{\theta_{3dB}} \right)^2 \quad (dB)$$

$$L_R = 12 \left( \frac{\theta_R}{\theta_{3dB}} \right)^2 \quad (dB)$$

# Απώλειες στην Πράξη

- ◆ Συνολικά Λαμβανόμενη Ισχύς στην Είσοδο του Δέκτη

$$P_{RX} = \left( \frac{P_T G_{T_{\max}}}{L_T L_{FTX}} \right) \left( \frac{1}{L_{FS} L_A} \right) \left( \frac{G_{R_{\max}}}{L_R L_{FRX} L_{POL}} \right) \quad (Watt)$$

$$P_{RX} = EIRP * \frac{1}{L} * G \quad (Watt)$$

$$P_{RX} (dBm) = EIRP (dBm) - L (dB) + G (dB)$$

$$EIRP (dBm) = P_T (dBm) + G_{T_{\max}} (dB) - L_T (dB) - L_{FTX} (dB)$$

$$L (dB) = L_{FS} (dB) + L_A (dB)$$

$$G (dB) = G_{R_{\max}} (dB) - L_R (dB) - L_{FRX} (dB) - L_{POL} (dB)$$

# Διόρθωση για Θέση Επίγειου Σταθμού

- ♦ Αν Επίγειος Σταθμός έχει θέση με γεωγραφικό μήκος  $L$  και πλάτος  $l$ , ως προς το δορυφόρο, τότε ισχύει

$$\left(\frac{R}{R_o}\right)^2 = 1 + 0.42(1 - \cos l \cos L)$$

$$L_{FS} = \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi R_o}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{R}{R_o}\right)^2$$

$$= L_{FS}(R_o) \left(\frac{R}{R_o}\right)^2 \quad 1 < \left(\frac{R}{R_o}\right)^2 < 1.356 \Rightarrow 0dB \text{ ως } 1.32dB$$

# Παράδειγμα Υπολογισμού Λαμβανόμενης Ισχύος σε Δορυφορική Ζεύξη

- ◆ Δεδομένα Επίγειου Σταθμού
  - Διάμετρος Κεραίας 4m
  - Συντελεστής Απόδοσης 0.6
  - Ισχύς Τροφοδοσίας Κεραίας 100W
  - Συχνότητα uplink 14GHz
  - Συχνότητα downlink 12GHz
- ◆ Δεδομένα Γεωστατικού Δορυφορικού Σταθμού
  - Κεραία Λήψης με εύρος δέσμης  $3\text{dB} = 2^\circ$
  - Κεραία Εκπομπής με εύρος δέσμης  $3\text{dB} = 2^\circ$
  - Συντελεστής Απόδοσης Κεραιών 0.55
  - Ισχύς Τροφοδοσίας Κεραίας Εκπομπής 10W
- ◆ Απόσταση Δορυφόρου-Επίγειου Σταθμού 40.000Km



# Παράδειγμα Υπολογισμού Λαμβανόμενης Ισχύος σε Δορυφορική Ζεύξη

## 2.3.2 Παράδειγμα 1: Το uplink

Θεωρείστε την κεραία εκπομπής ενός επίγειου σταθμού, που είναι εξοπλισμένος με κεραία διαμέτρου  $D = 4 \text{ m}$ . Αυτή η κεραία τροφοδοτείται με μια ισχύ  $P_T = 100 \text{ W}$ , δηλ.  $20 \text{ dBW}$ , σε συχνότητα  $f_U = 14 \text{ GHz}$ . Ακτινοβολεί αυτή την ισχύ προς ένα γεωστατικό δορυφόρο που βρίσκεται σε απόσταση  $40000 \text{ km}$  από το σταθμό, επί του άξονα της κεραίας. Η δέσμη της κεραίας λήψης του δορυφόρου έχει πλάτος  $\theta_{3\text{dB}} = 2^\circ$ . Υποτίθεται ότι ο επίγειος σταθμός βρίσκεται στο κέντρο της περιοχής που καλύπτεται από την κεραία του δορυφόρου, και συνεπώς εκμεταλλεύεται τη μέγιστη απολαβή της κεραίας αυτής. Η απόδοση της κεραίας του δορυφόρου υποτίθεται ότι είναι  $\eta = 0.55$  και εκείνη της κεραίας του επίγειου σταθμού είναι  $\eta = 0.6$ .

Θα υπολογίσουμε την πυκνότητα ροής ισχύος στο δορυφόρο, και την ισχύ η οποία λαμβάνεται από το δορυφόρο.

- Πυκνότητα ροής ισχύος στο δορυφόρο:

$$\Phi = P_T G_{T\text{max}} / 4\pi R^2 \quad (\text{W/m}^2)$$

Απολαβή της κεραίας του επίγειου σταθμού:  
από την Εξ. (2.2), έχουμε:

# Παράδειγμα Υπολογισμού Λαμβανόμενης Ισχύος σε Δορυφορική Ζεύξη

54 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

$$G_{T\max} = \eta(\pi D/\lambda_U)^2 = \eta(\pi D f_U/c)^2 \\ = 0.6(\pi \times 4 \times 14 \times 10^9 / 3 \times 10^8)^2 = 206340 = 53.1 \text{ dBi}$$

Η ενεργός ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύς του επίγειου σταθμού (επί του άξονα) δίνεται από τη σχέση:

$$(EIRP)_{ES} = P_T G_{T\max} = 53.1 \text{ dBi} + 20 \text{ dBW} = 73.1 \text{ dBW}$$

Τότε, η πυκνότητα ροής ισχύος δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi = P_T G_{T\max} / 4\pi R^2 = 73.1 \text{ dBW} - 10 \log(4\pi(4 \times 10^7)^2) \\ = 73.1 - 163 = -89.9 \text{ dBW/m}^2$$

♦ Η ισχύς (σε dBW) που λαμβάνεται από την κεραία του δορυφόρου βρίσκεται χρησιμοποιώντας την Εξ. (2.10):  $P_R = EIRP$  - εξασθένιση του ελεύθερου χώρου + απολαβή της κεραίας λήψης. Η εξασθένιση του ελεύθερου χώρου είναι  $L_{FS} = (4\pi R/\lambda_U)^2 = (4\pi R f_U/c)^2 = 207.4 \text{ dB}$ .

Η απολαβή της κεραίας λήψης του δορυφόρου είναι  $G_R = G_{R\max}$ , και βρίσκεται χρησιμοποιώντας την Εξ. (2.2):

$$G_{R\max} = \eta(\pi D/\lambda_U)^2$$

Η τιμή του  $D/\lambda_U$  βρίσκεται χρησιμοποιώντας την Εξ. (2.3a), έτσι ώστε  $\theta_{3dB} = 70$  ( $\lambda_U/D$ ), από την οποία έχουμε  $D/\lambda_U = 70/\theta_{3dB}$  και  $G_{R\max} = \eta(70\pi/\theta_{3dB})^2 = 6650 = 38.2 \text{ dBi}$ .

Σημειώστε, ότι η απολαβή της κεραίας δεν εξαρτάται από τη συχνότητα, όταν μας ενδιαφέρει το εύρος δέσμης, και άρα η περιοχή που καλύπτεται από μια δορυφορική κεραία.

Συνολικά, έχουμε:

$$P_R = 73.1 - 207.4 + 38.2 = -96.1 \text{ dBW}, \quad \text{that is } 0.25 \text{ nW or } 250 \text{ pW}$$

# Παράδειγμα Υπολογισμού Λαμβανόμενης Ισχύος σε Δορυφορική Ζεύξη

## 2.3.3 Παράδειγμα 2: Το downlink

Θεωρείστε την κεραία εκπομπής ενός γεωστατικού δορυφόρου, η οποία τροφοδοτείται με μια ισχύ  $P_T$  ίση με 10 W, δηλ. 10 dBW, σε μια συχνότητα  $f_D = 12$  GHz, και ακτινοβολεί αυτή την ισχύ σε μια δέσμη με εύρος  $\theta_{3dB} = 2^\circ$ . Ένας επίγειος σταθμός, που είναι εφοδιασμένος με κεραία διαμέτρου 4 m βρίσκεται επί του άξονα της κεραίας του δορυφόρου σε απόσταση 40000 km από το δορυφόρο. Η απόδοση της δορυφορικής κεραίας υποτίθεται ότι είναι  $\eta = 0.55$  και εκείνη της κεραίας του επίγειου σταθμού είναι  $\eta = 0.6$ . Θα υπολογιστεί η πυκνότητα ροής ισχύος στον επίγειο σταθμό και η ισχύς η οποία λαμβάνεται από αυτόν.

# Παράδειγμα Υπολογισμού Λαμβανόμενης Ισχύος σε Δορυφορική Ζεύξη

ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΑΔΙΟΖΕΥΞΕΩΝ 55

- Πυκνότητα ροής ισχύος στον επίγειο σταθμό:

$$\Phi = P_T G_{T_{\max}} / 4\pi R^2 \quad (\text{W/m}^2)$$

Η απολαβή της κεραίας του δορυφόρου είναι η ίδια τόσο για εκπομπή, όσο και για λήψη, αφού το εύρος δέσμης κατασκευάζεται να είναι το ίδιο και για τις δυο περιπτώσεις (σημειώστε, ότι αυτό απαιτεί δυο ξεχωριστές κεραίες στο δορυφόρο, αφού οι διάμετροι των κεραίων δεν μπορούν να είναι οι ίδιες, αλλά καθορίζονται από το λόγο  $f_U/f_D = 14/12 = 1.17$ ).

Έτσι, έχουμε:

$$(\text{EIRP})_{\text{GL}} = P_T G_{T_{\max}} = 38.2 \text{ dB} + 10 \text{ dBW} = 48.2 \text{ dBW}$$

Η πυκνότητα ροής ισχύος είναι:

$$\begin{aligned} \Phi &= P_T G_{T_{\max}} / 4\pi R^2 = 48.2 \text{ dBW} - 10 \log(4\pi(4 \times 10^7)^2) = 48.2 - 163 \\ &= -114.8 \text{ dBW/m}^2 \end{aligned}$$

- Η ισχύς (σε dBW) που λαμβάνεται από την κεραία του επίγειου σταθμού βρίσκεται χρησιμοποιώντας την έκφραση (2.10):

$P_R = \text{EIRP} - \text{εξασθένιση του ελεύθερου χώρου} + \text{απολαβή της κεραίας λήψης}$

Η εξασθένιση του ελεύθερου χώρου είναι  $L_{FS} = (4\pi R/\lambda_D)^2 = 206.1 \text{ dB}$

Η απολαβή  $G_R = G_{R_{\max}}$  της κεραίας λήψης του επίγειου σταθμού βρίσκεται χρησιμοποιώντας την έκφραση (2.2), ώστε είναι:

$$G_{R_{\max}} = \eta(\pi D/\lambda_D)^2 = 0.6(\pi \times 4/0.025)^2 = 151597 = 51.8 \text{ dB}$$

Συνολικά, έχουμε:

$$P_R = 48.2 - 206.1 + 51.8 = -106.1 \text{ dBW}, \quad \text{that is } 25 \text{ pW}$$

# Ισχύς Θορύβου στην Είσοδο του Δέκτη

- ◆ Θόρυβος είναι ένα σήμα χωρίς περιεχόμενο πληροφορίας που προστίθεται στο χρήσιμο σήμα και μειώνει την ικανότητα του δέκτη να αναπαράγει σωστά την πληροφορία που περιέχεται στο χρήσιμο σήμα.
- ◆ Πηγές Θορύβου
  - Εξωτερικές φυσικές πηγές ακτινοβολίας, εντός της περιοχής λήψης της κεραίας
  - Εξαρτήματα εξοπλισμού λήψης
- ◆ Θόρυβος καλείται και οποιαδήποτε εκπομπή από πομπούς διαφορετικούς του επιθυμητού, ή πολλές φορές καλείται και **Παρεμβολή**.

# Ορισμός του Θορύβου

- ◆ **Λευκός Θόρυβος** : Μοντέλο θορύβου σύμφωνα με το οποίο η φασματική πυκνότητα ισχύος  $N_0$  (W/Hz) είναι σταθερή στην εξεταζόμενη ζώνη συχνοτήτων (θεωρούμε μονόπλευρη ΦΠ).
- ◆ **Υπενθύμιση** : Η φασματική πυκνότητα ισχύος είναι ο μετ/σμός Fourier της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης του σήματος και η ισχύς ενός σήματος υπολογίζεται ως το ολοκλήρωμα της φασματικής πυκνότητας ισχύος σε όλο το εύρος ζώνης που καταλαμβάνει το σήμα, δηλαδή

$$P_x = R_x(0) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}[R_x(\tau)] df = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(f) df$$

# Ορισμός του Θορύβου

- ♦ Η **ισοδύναμη ισχύς θορύβου**  $N$  (*Watt*) που λαμβάνεται από ένα δέκτη με ισοδύναμο εύρος ζώνης θορύβου  $B_N$  είναι

$$N = N_o B_N \quad (\text{Watt})$$

$$N(\text{dbm}) = N_o(\text{dbm / Hz}) + B_N(\text{dBHz})$$

- ♦ Οι πραγματικές πηγές θορύβου δεν έχουν πάντα σταθερή φασματική πυκνότητα ισχύος, αλλά ο λευκός θόρυβος είναι χρήσιμος για την αναπαράσταση του θορύβου που παρατηρείται σε μικρό εύρος ζώνης.

# Δίθυρη Πηγή Θορύβου

- ◆ Θεωρούμε πηγή θορύβου που αποδίδει ισχύ θορύβου  $N$ . Η θερμοκρασία θορύβου είναι

$$T = \frac{N}{kB} = \frac{N_o}{k} \quad (\text{Kelvin})$$

όπου  $k$  η σταθερά του Boltzmann

$$k = 1.379 * 10^{-23} = -228.6 \text{ dBW} / \text{Hz K}$$

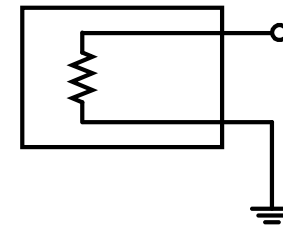
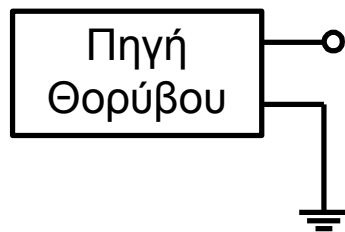
- ◆ Η θερμοκρασία θορύβου αναπαριστά τη θερμοδυναμική θερμοκρασία μιας αντίστασης η οποία αποδίδει την ίδια διαθέσιμη ισχύ θορύβου με εκείνη της υπό εξέταση πηγής.



# Δίθυρη Πηγή Θορύβου

Θερμοδυναμική  
Θερμοκρασία

$$T = \frac{N}{kB} = \frac{N_0}{k}$$



Τυχαία Θερμοκρασία

Θερμοκρασία  $T$

$$N = kTB \text{ Ίδια Διαθέσιμη Ισχύς}$$

# Δίθυρη Πηγή Θορύβου

- ♦ Για τη διαθέσιμη ισχύ θορύβου ισχύει λοιπόν

$$N = kTB \quad (\text{Watt})$$

$$N(\text{dBW}) = -228.6(\text{dBW} / \text{Hz K}) + T(\text{dBK}) + B(\text{dBHz})$$

- ♦ Υπενθύμιση :

$$B(\text{dBHz}) = 10 \log_{10} (B(\text{Hz}))$$

$$\text{π.χ. } 27\text{MHz} = 10 \log(2.7 \cdot 10^7) \text{ dBHz} = 74.3 \text{ dBHz}$$

$$T(\text{dBK}) = 10 \log_{10} (T(\text{Kelvin}))$$

$$\text{π.χ. } T = 290\text{K} = 19 \text{ dBK}$$

# Ενεργός Θερμοκρασία Θορύβου

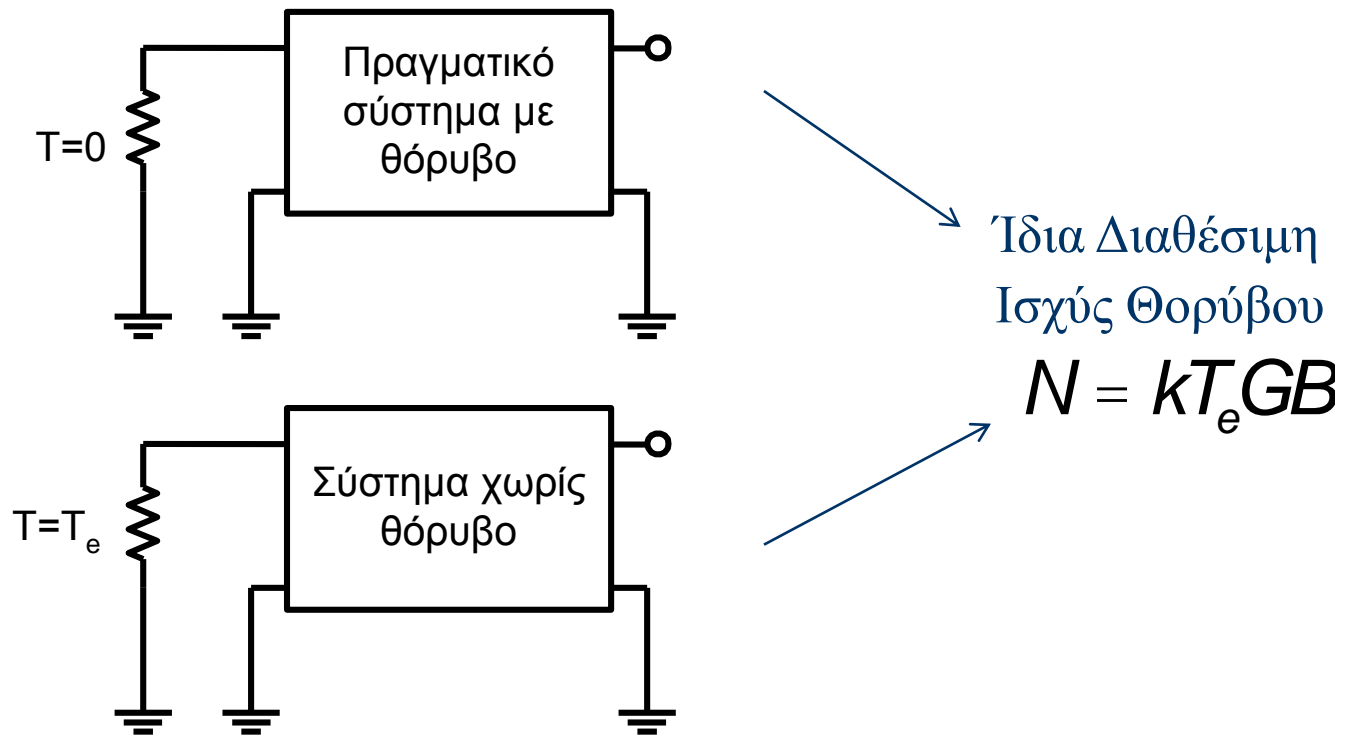
- ♦ Η ενεργός θερμοκρασία θορύβου (ή θερμοκρασία θορύβου του συστήματος)  $T_e$  στην είσοδο ενός συστήματος είναι η θερμοδυναμική θερμοκρασία μιας αντίστασης η οποία όταν τοποθετηθεί στην είσοδο του συστήματος (που θεωρείται ότι δεν παράγει θόρυβο) παρέχει την ίδια διαθέσιμη ισχύ θορύβου στην έξοδο του συστήματος με αυτή του εσωτερικού θορύβου του πραγματικού συστήματος

$$N = kT_eGB \quad (\text{Watt})$$

όπου  $G$  το κέρδος ισχύος του συστήματος

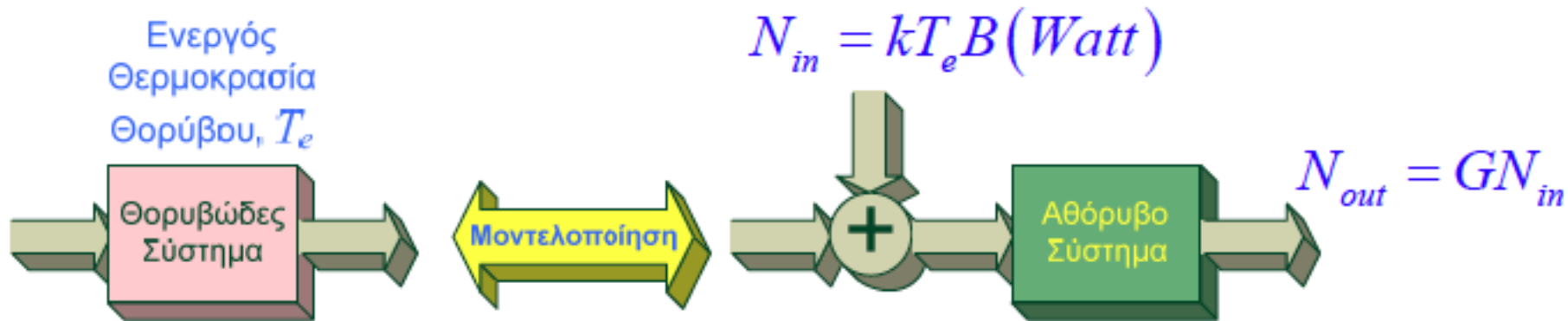
- ♦ Είναι συνεπώς ένα μέτρο του θορύβου που παράγεται από τα εσωτερικά στοιχεία του συστήματος.

# Ενεργός Θερμοκρασία Θορύβου Τετραθύρου



# Ενεργός Θερμοκρασία Θορύβου Τετραθύρου

- ◆ Σχέση ενεργού θερμοκρασίας θορύβου και ισχύος θορύβου.



# Συντελεστής Θορύβου (Noise Figure)

- ♦ Ορίζεται ως ο λόγος της ολικής διαθέσιμης ισχύος θορύβου στην έξοδο του στοιχείου προς τη συνιστώσα (κλάσμα, ποσοστό) της ισχύος θορύβου στην έξοδο που παράγεται από μια πηγή στην είσοδο με θερμοκρασία θορύβου  $T_o = 290^\circ K$ .
- ♦ Θεωρούμε σύστημα με κέρδος ισχύος  $G$ , εύρος ζώνης  $B$ , και ότι συνδέεται με πηγή θορύβου  $T_o$ .
- ♦ Η ολική ισχύς θορύβου στην έξοδο είναι

$$Gk(T_e + T_o)B$$

- ♦ Η συνιστώσα από την πηγή θορύβου είναι  $GkT_oB$

# Συντελεστής Θορύβου (Noise Figure)

- ♦ Άρα ο συντελεστής θορύβου είναι

$$F = \frac{Gk(T_e + T_o)B}{GkT_oB} = \frac{T_e + T_o}{T_o} = 1 + \frac{T_e}{T_o}$$

$$F(dB) = 10 \log \left( 1 + \frac{T_e}{T_o} \right)$$

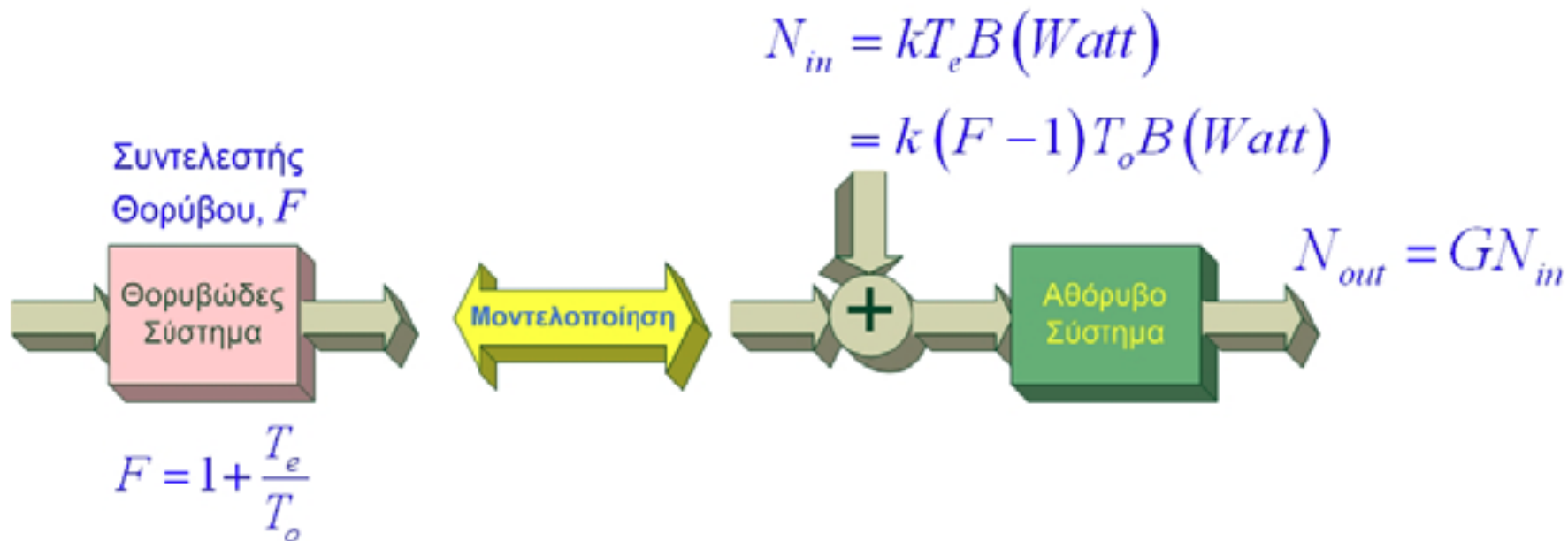
- ♦ Και

$$T_e = (F - 1)T_o \quad (\text{Kelvin})$$

OXI σε dB

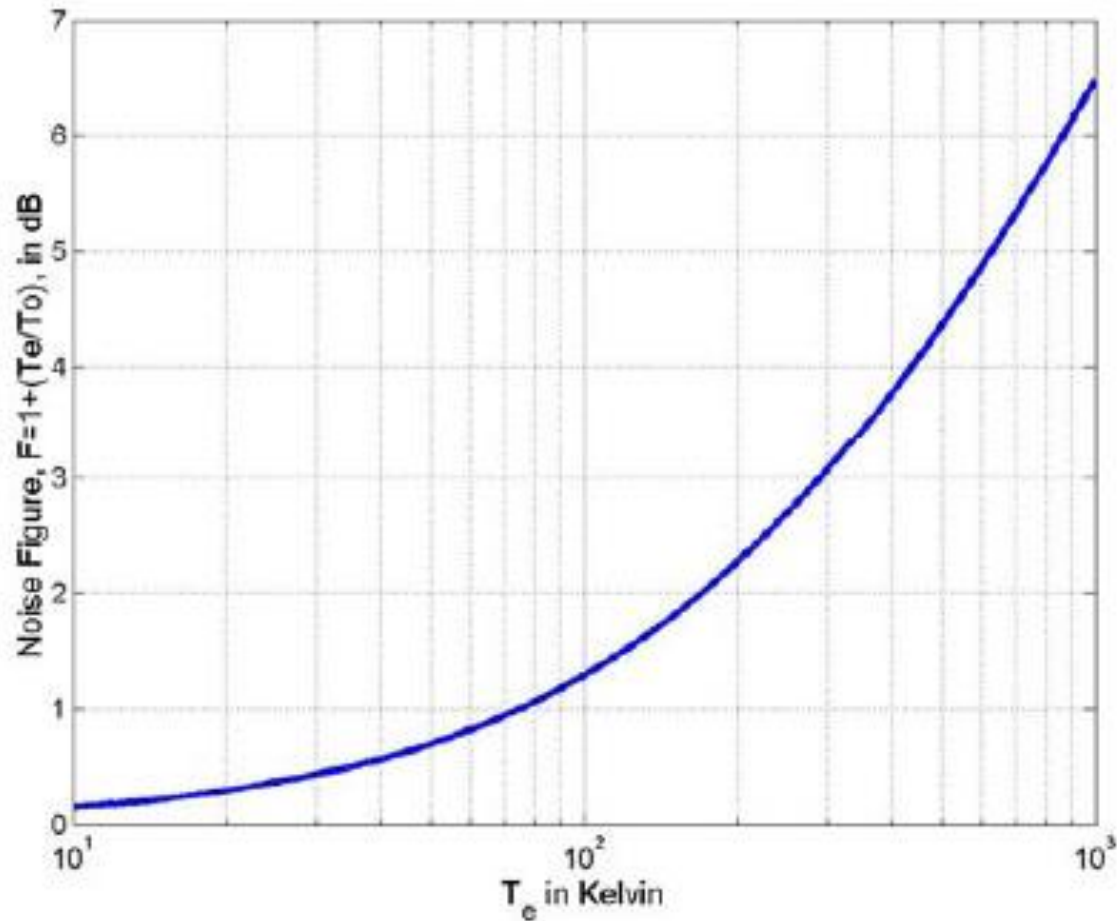
# Συντελεστής Θορύβου (Noise Figure)

- ◆ Σχέση ενεργού θερμοκρασίας θορύβου, συντελεστή θορύβου και ισχύος θορύβου.



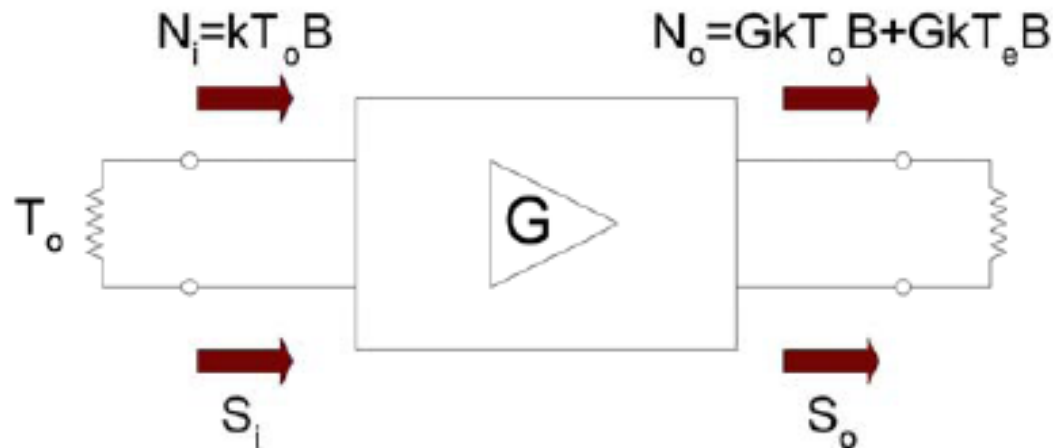


# Συντελεστής Θορύβου, F



# Συντελεστής Θορύβου (Noise Figure)

- ◆ Πολλές φορές ο συντελεστής θορύβου ενός ενισχυτή ορίζεται ως ο λόγος του σηματοθορυβικού λόγου εισόδου προς τον σηματοθορυβικό λόγο εξόδου, για τερματισμένη πηγή εισόδου σε θερμοκρασία  $T_o=290^\circ\text{K}$ , δηλαδή θερμοκρασία δωματίου.



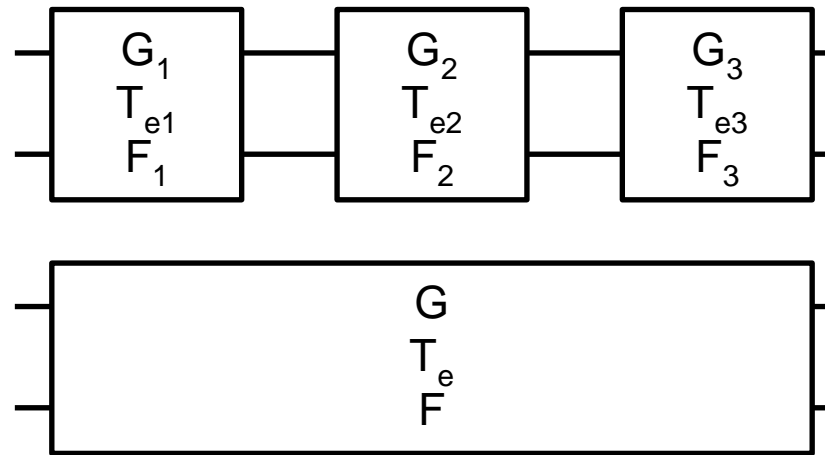
# Συντελεστής Θορύβου (Noise Figure)

Άρα μπορούμε να γράψουμε

$$F = \frac{S_i / N_i}{S_o / N_o} = \frac{S_i}{S_o} \frac{N_o}{N_i} = \frac{1}{G} \frac{Gk(T_o + T_e)B}{kT_o B}$$
$$= \frac{(T_o + T_e)}{T_o} = 1 + \frac{T_e}{T_o}$$

όπου  $G = \frac{S_o}{S_i}$

# Δίθυρα συνδεδεμένα στη σειρά

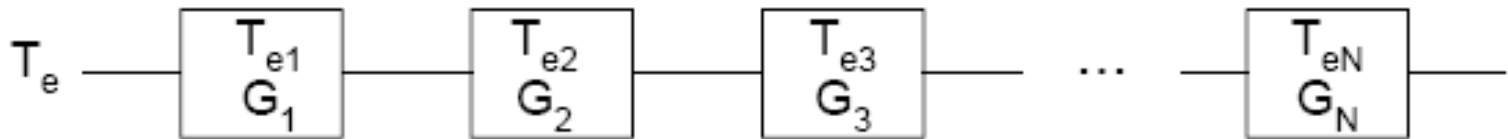


$$T_e = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} + \frac{T_{e3}}{G_1 G_2}$$

$$F = F_1 + \frac{F_2}{G_1} + \frac{F_3}{G_1 G_2}$$

# Αλυσίδα Στοιχείων

- ◆ Θεωρούμε αλυσίδα  $N$  στοιχείων σε σειρά όπου κάθε στοιχείο  $j$  έχει κέρδος  $G_j$  ( $j=1,2,\dots,N$ ), και ενεργό θερμοκρασία θορύβου στην είσοδο ίση με  $T_{ej}$ .



- ◆ Η συνολική ενεργός θερμοκρασία θορύβου στην είσοδο της αλυσίδας είναι

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

# Αλυσίδα Στοιχείων

- ◆ Ο συντελεστής θορύβου της αλυσίδας είναι

$$F = F_1 + \frac{(F_2 - 1)}{G_1} + \frac{(F_3 - 1)}{G_1 G_2} + \dots + \frac{(F_N - 1)}{G_1 G_2 \dots G_{N-1}}$$

- ◆ Μπορούμε να υπολογίσουμε και το σηματοθορυβικό λόγο σε κάθε σημείο της αλυσίδας.
  - Αν αναφερόμαστε στην ενεργό θερμοκρασία θορύβου της αλυσίδας τότε ο λόγος είναι σταθερός όπου και αν υπολογιστεί.
  - Αν αναφερόμαστε στη θερμοκρασία των στοιχείων που προηγούνται τότε ο λόγος μειώνεται μέχρι την τιμή που υπολογίσαμε με τον προηγούμενο τρόπο.

# Θερμοκρασία Θορύβου Εξασθενητή

- ◆ Ένας εξασθενητής μειώνει τόσο το σήμα εισόδου όσο και το θόρυβο εισόδου. Εισάγει όμως το δικό του θόρυβο. Αποτελείται μόνο από παθητικά στοιχεία, όλα σε θερμοκρασία  $T_{ATT}$ .
- ◆ Αν  $L_{ATT}$  είναι η εξασθένιση που εισάγει, τότε η ενεργός θερμοκρασία **εισόδου** του εξασθενητή είναι

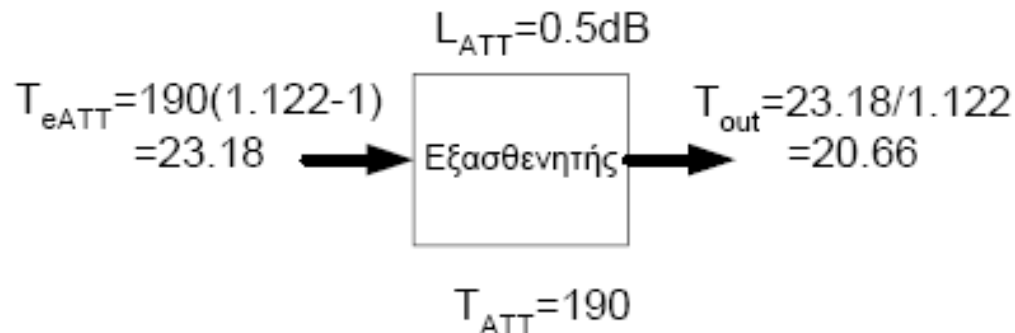
$$T_{eATT} = (L_{ATT} - 1)T_{ATT} \quad (Kelvin)$$

- ◆ Συνήθως  $T_{ATT} = T_o$ , οπότε

# Θερμοκρασία Θορύβου Εξόδου Εξασθενητή

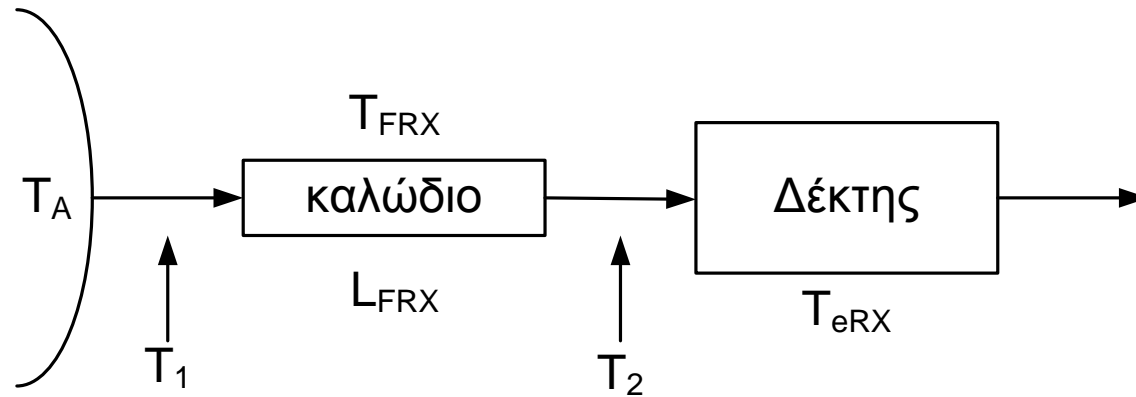
- ♦ Αν ένας εξασθενητής έχει ενεργό θερμοκρασία εισόδου  $T_e$  και εισάγει απώλειες  $L_{ATT}$ , τότε στην έξοδό του η θερμοκρασία θορύβου θα είναι

$$T_{out} = \frac{T_{ATT} (L_{ATT} - 1)}{L_{ATT}} = T_{ATT} \left( 1 - \frac{1}{L_{ATT}} \right) = \frac{T_{eATT}}{L_{ATT}}$$





# Θερμοκρασία Θορύβου Συστήματος



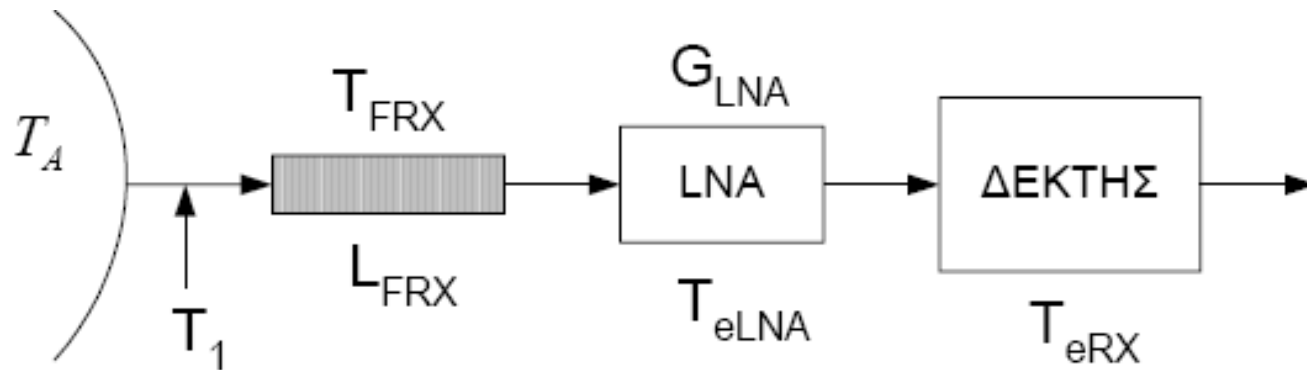
$$T_1 = T_A + (L_{FRX} - 1)T_{FRX} + \frac{T_{eRX}}{G_{FRX}}$$

$$T_2 = T_1 G_{FRX} = \frac{T_1}{L_{FRX}} = \frac{T_A}{L_{FRX}} + T_{FRX} \left(1 - \frac{1}{L_{FRX}}\right) + T_{eRX}$$

# Θερμοκρασία Θορύβου Συστήματος

- ◆ Παρατηρήστε τα εξής :
  - Η θερμοκρασία θορύβου του συστήματος  $T_2$  λαμβάνει υπόψη το θόρυβο της κεραίας, της γραμμής μεταφοράς και το θόρυβο του δέκτη.
  - Η γραμμή μεταφοράς μειώνει το θόρυβο από την κεραία, αλλά συνεισφέρει επίσης στο θόρυβο, και τελικά αυξάνει τη θερμοκρασία θορύβου του συστήματος.
  - Κάθε 0.1dB απώλειας συνεισφέρει  $290(1 - 10^{-0.01}) = 6.6\text{K}$  στη θερμοκρασία του συστήματος.

# Θερμοκρασία Θορύβου Συστήματος



$$T_1 = T_A + T_{FRX} (L_{FRX} - 1) + T_{eLNA} L_{FRX} + \frac{T_{eRX}}{G_{FRX} G_{LNA}}$$

$$T_A = 25$$

$$L_{FRX} = 0.5 \text{ dB} = 1.122$$

$$T_{FRX} = 190$$

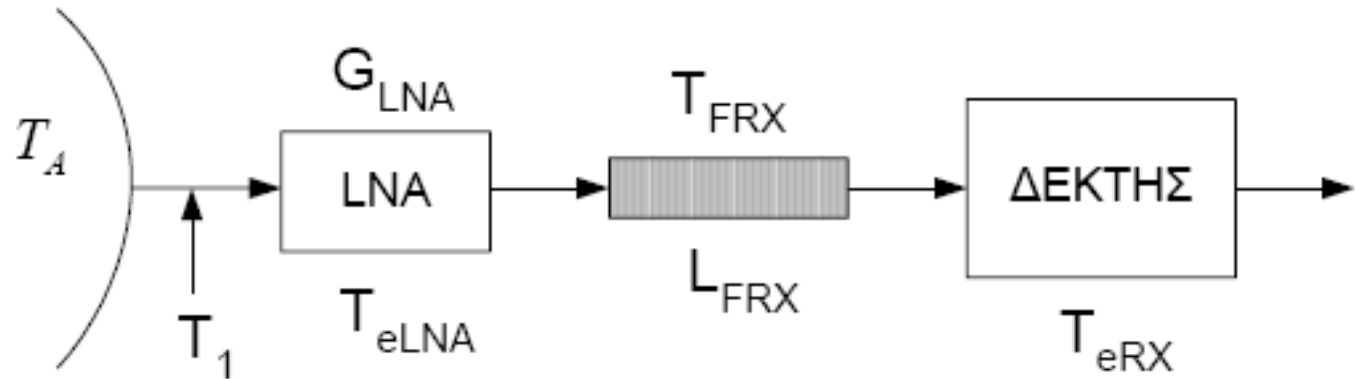
$$T_{eRX} = 50$$

$$G_{LNA} = 20 \text{ dB} = 100$$

$$T_{eLNA} = 5$$

$$T_1 = 54.35$$

# Θερμοκρασία Θορύβου Συστήματος

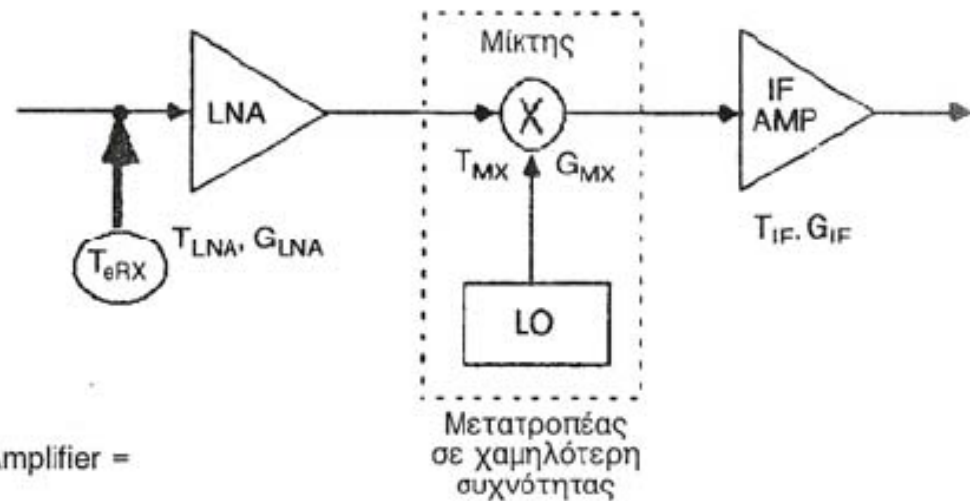


$$T_1 = T_A + T_{eLNA} + \frac{T_{FRX} (L_{FRX} - 1)}{G_{LNA}} + \frac{T_{eRX}}{G_{FRX} G_{LNA}}$$

$$T_1 = 30.79$$

# Ενεργός Θερμοκρασία Θορύβου Δέκτη

- ♦ Μια τυπική διάταξη δέκτη φαίνεται στο σχήμα



LNA = Low Noise Amplifier =  
Ενισχυτής χαμηλού θορύβου

IF AMP = Intermediate Frequency Amplifier =  
Ενισχυτής ενδιάμεσης συχνότητας

$$T_{eRX} = T_{LNA} + \frac{T_{MX}}{G_{LNA}} + \frac{T_{IF}}{G_{LNA} G_{MX}}$$

# Θερμοκρασία Θορύβου Κεραίας

- ◆ Η κεραία θεωρείται σαν μια πηγή θορύβου που χαρακτηρίζεται από μια ενεργό θερμοκρασία θορύβου  $T_A$  (Kelvin).
- ◆ Συνήθως η κεραία συλλέγει θόρυβο από ακτινοβολούντα σώματα το οποία βρίσκονται "μέσα" στο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας. Αν  $T_b(\theta, \phi)$ , είναι η θερμοκρασία λαμπρότητας ενός ακτινοβολούντος σώματος, τότε

$$T_A = \frac{1}{4\pi} \iint T_b(\theta, \phi) G(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi$$

# Θερμοκρασία Θορύβου Κεραίας

- ◆ Η κεραία εισάγει θόρυβο λόγω του ότι συλλέγει και άλλα σήματα εκτός από αυτό που περιέχει την πληροφορία. Ο θόρυβος που προκαλούν αυτά τα σήματα παρεμβολής εξαρτώνται από την γωνία με την οποία προσπίπτουν στην κεραία και με το κέρδος της σε κάθε περιοχή. Η πυκνότητα θορύβου της κεραίας θα δίνεται από τη σχέση:

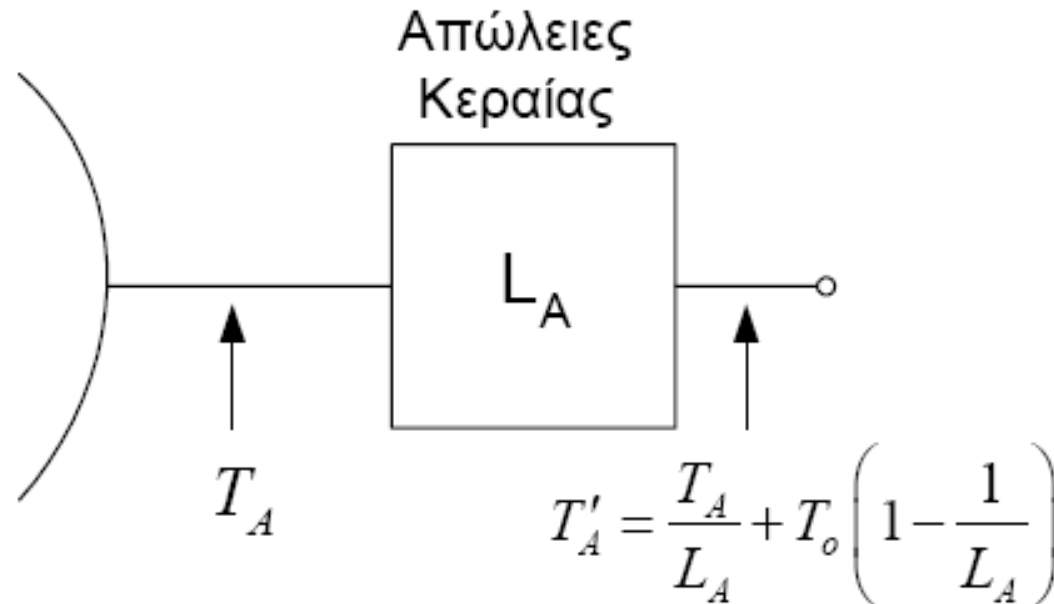
$$N_0 = kT_{ANT}$$

- ◆ Και η ισχύς θορύβου που εισάγει:

$$N = kBT_{ANT}$$

# Θερμοκρασία Θορύβου Κεραίας

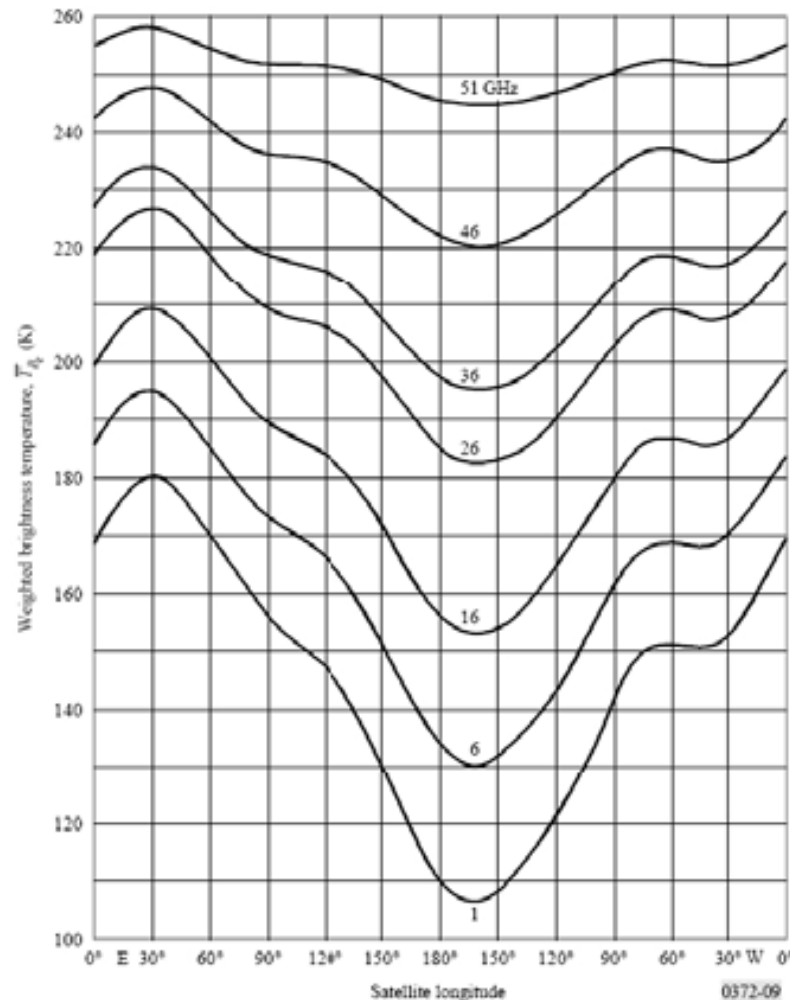
- ♦ Αν η κεραία χαρακτηρίζεται από απώλειες  $L_A$





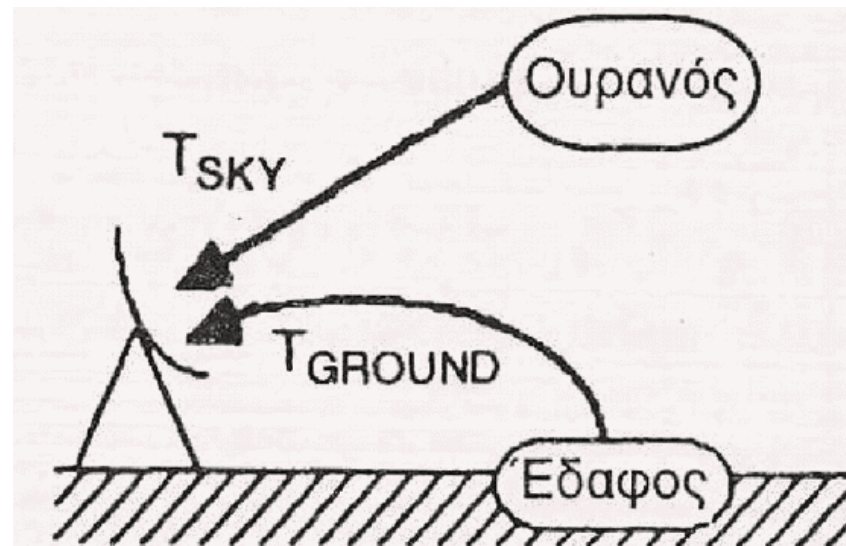
# Θερμοκρασία Θορύβου Κεραίας GEO

Κεραία  
λήψης  
δορυφόρου  
(uplink)



# Θερμοκρασία Θορύβου Κεραίας Επίγειου Σταθμού

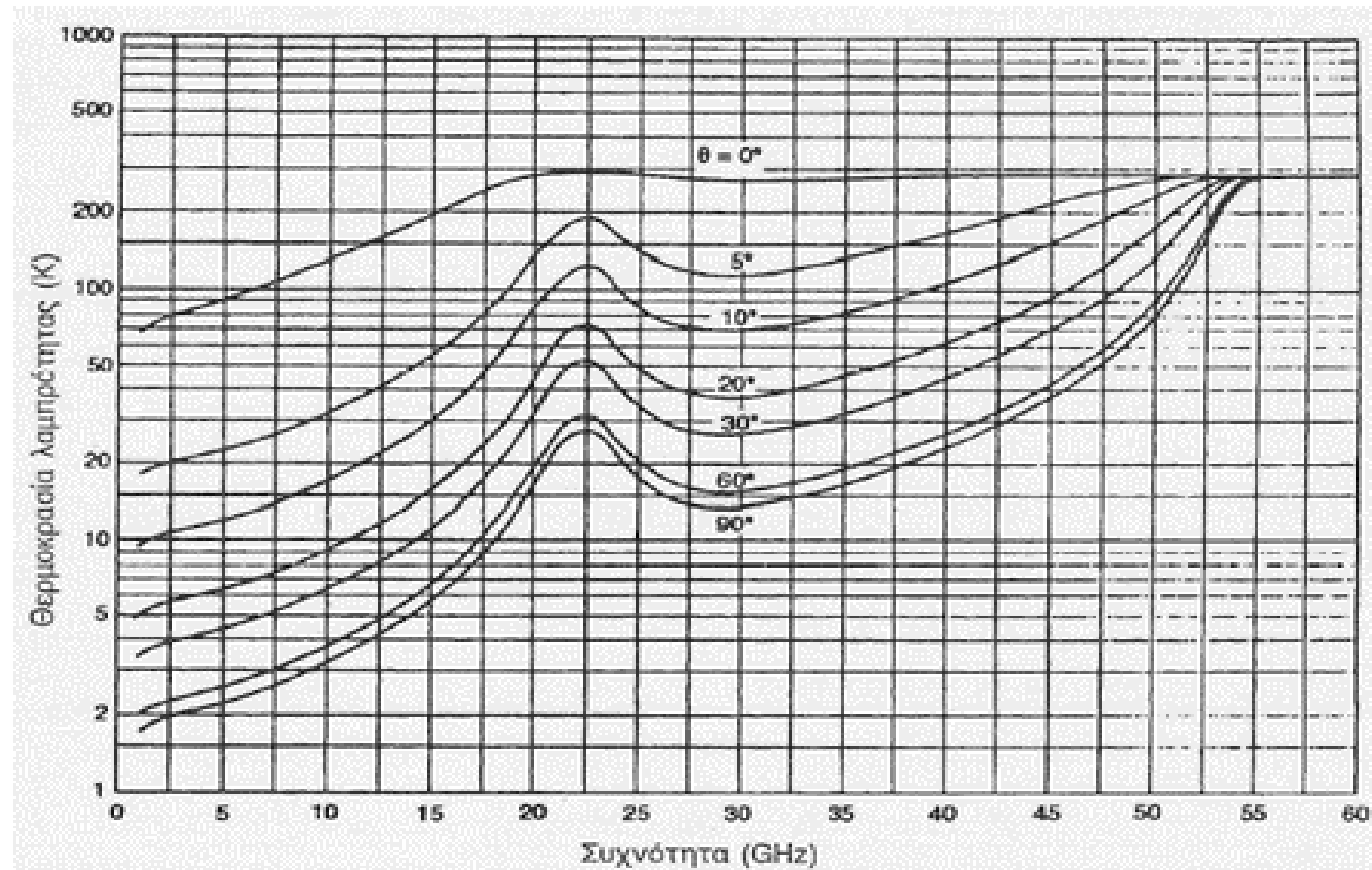
- ◆ Συνθήκες Καθαρού Ουρανού



$$T_A = T_{SKY} + T_{GROUND}$$

# Θερμοκρασία Λαμπρότητας Καθαρού Ουρανού

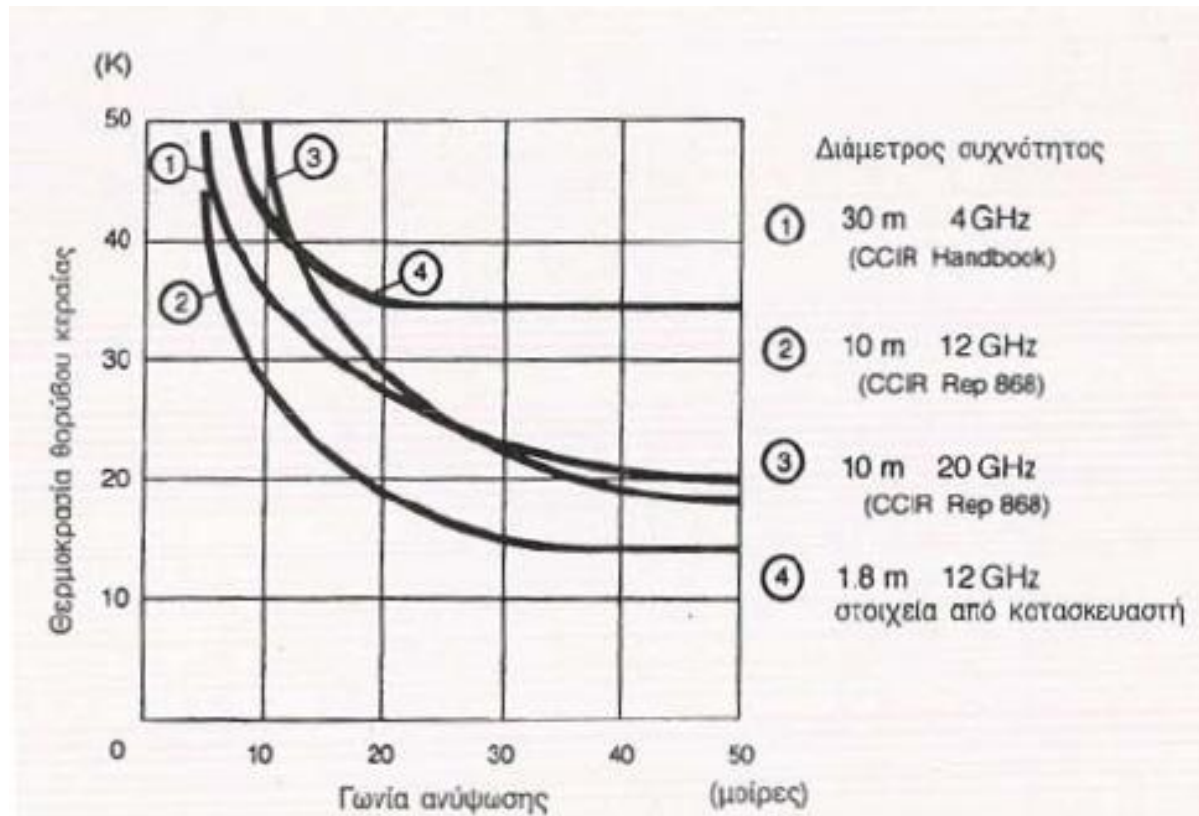
$T_{\text{SKY}}$ :  
Συνάρτηση της  
συχνότητας και  
της γωνίας  
ανύψωσης  
(λόγω μεγάλης  
κατευθυντικό-  
τητας)



# Θερμοκρασία Εδάφους για Επίγειο Σταθμό

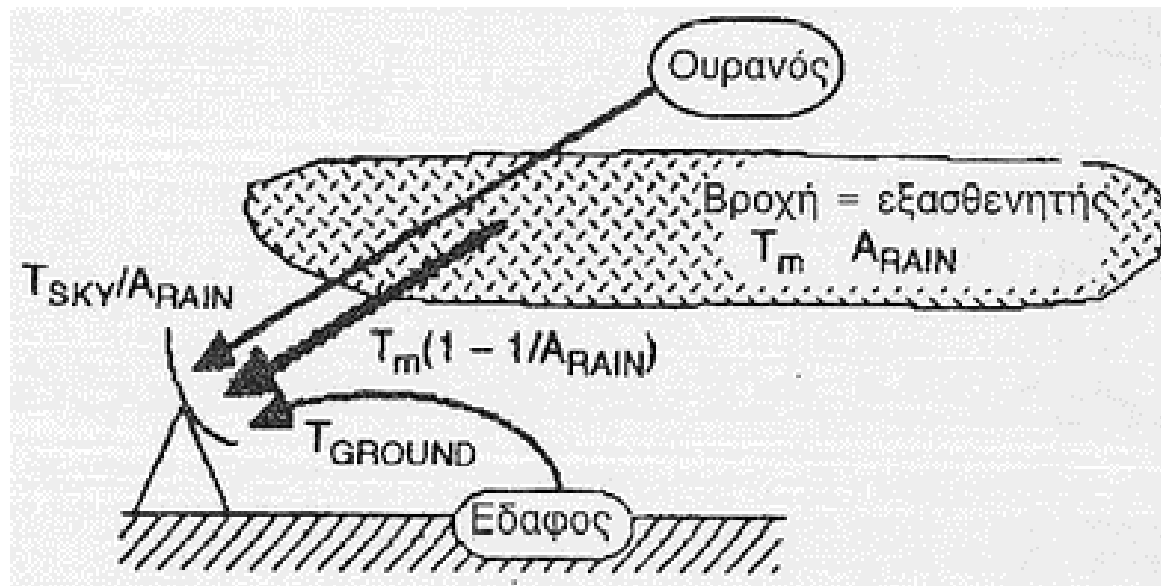
- ◆ Ακτινοβολία από το έδαφος που λαμβάνεται από τους πλευρικούς λοβούς του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας και εν μέρει από τον κύριο λοβό, για μικρές γωνίες ανύψωσης.
- ◆ Γενικά
  - $T_{\text{GROUND}}=290 \text{ K}$  για γωνία ανύψωσης  $E < -10^\circ$
  - $T_{\text{GROUND}}=150 \text{ K}$  για  $-10^\circ < E < 0^\circ$
  - $T_{\text{GROUND}}=50 \text{ K}$  για  $0^\circ < E < 10^\circ$
  - $T_{\text{GROUND}}=10 \text{ K}$  για  $10^\circ < E < 90^\circ$

# Τυπικές Τιμές Θερμοκρασίας Θορύβου Κεραίας Επίγειων Σταθμών



# Θερμοκρασίας Θορύβου Κεραίας Επίγειου Σταθμού

Συνθήκες Βροχής: 
$$T_A = \frac{T_{SKY}}{L_{RAIN}} + T_{RAIN} \left(1 - \frac{1}{L_{RAIN}}\right) + T_{GROUND}$$



Συνήθως:  $T_{RAIN} = 275K$

# Σηματοθορυβικός Λόγος στο Δέκτη

- ◆ Με τον όρο σήμα εδώ εννοούμε το Διαμορφωμένο Φέρον (Modulated Carrier, C).
- ◆ Ο σηματοθορυβικός λόγος στην είσοδο ενός δέκτη, μπορεί να εκφραστεί ως εξής:
  - $C/N$ , όπου  $C$  η ισχύς του φέροντος και  $N$  η ισχύς του θορύβου. Αδιάστατο μέγεθος.
  - $C/N_o$ , όπου  $N_o$  η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου. Διαστάσεις  $Hz$ .
  - $C/T$ , όπου  $T$  η θερμοκρασία θορύβου, που υπολογίζεται διαιρώντας την  $N_o$  με την σταθερά  $k$ . Διαστάσεις  $Watt/Kelvin$

# Ο Λόγος C/N<sub>o</sub>

- ♦ Ο λόγος αυτός έχει το πλεονέκτημα ότι δεν προϋποθέτει γνώση του εύρους ζώνης του σήματος.
- ♦ Διευκολύνει τον προσδιορισμό ποιότητας μιας ζεύξης χωρίς τον ακριβή καθορισμό του σήματος.
- ♦ Υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{RX} = \left( \frac{P_T G_{Tmax}}{L_T L_{FTX}} \right) \left( \frac{1}{L_{FS} L_A} \right) \left( \frac{G_{Rmax}}{L_R L_{FRX} L_{POL}} \right) \quad (Watt)$$

$$N_o = kT_e$$

όπου  $T_e$  η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου του συστήματος στην είσοδο του δέκτη.



# Ο Λόγος C/N<sub>0</sub>

EIRP πομπού

1/απώλεια  
διάδοσης

Σύνθετη  
απολαβή δέκτη

$$\frac{C}{N_0} = \frac{P_{RX}}{N_0} = \frac{P_{TX} G_{T \max}}{L_T L_{FTX}} \frac{1}{L_{FS} L_A} \frac{G_{R \max}}{L_R L_{FRX} L_{POL}}$$

$$\left[ \frac{T_A}{L_{FRX}} + T_{FRX} \left( 1 - \frac{1}{L_{FRX}} \right) + T_{eRX} \right] k$$

Θερμοκρασία  
θορύβου

# Ο Λόγος C/N<sub>0</sub>

$$\begin{aligned}\frac{C}{N_0} &= \frac{P_{TX} G_{T \max}}{L_T L_{FTX}} \times \frac{1}{L_{FS} L_A} \times \frac{1}{k} \times \frac{G_{R \max}}{L_R L_{FRX} L_{POL}} \times \frac{1}{\left[ \frac{T_A}{L_{FRX}} + T_{FRX} \left( 1 - \frac{1}{L_{FRX}} \right) + T_{eRX} \right]} \\ &= EIRP \times \frac{1}{L} \times \frac{1}{k} \times \frac{G_{R \max}}{L_R L_{FRX} L_{POL}} \times \frac{1}{\left[ \frac{T_A}{L_{FRX}} + T_{FRX} \left( 1 - \frac{1}{L_{FRX}} \right) + T_{eRX} \right]}\end{aligned}$$

$$\frac{C}{N_0} = EIRP \times \frac{1}{L} \times \frac{1}{k} \times \frac{G}{T}$$

**ΠΡΟΣΟΧΗ:**  
δεν υπάρχει LNA

# Ο Δείκτης Ποιότητας Εξοπλισμού Λήψης

- ◆ Ο δείκτης ποιότητας του εξοπλισμού λήψης είναι ο λόγος  $G/T$ .
- ◆ Έχει μονάδες  $1/Kelvin$ , ή  $dBK^{-1}$ .
- ◆ Εξαρτάται από το μέγιστο κέρδος της κεραίας, αλλά κυρίως από τη θερμοκρασία θορύβου της κεραίας και την ενεργό θερμοκρασία στην είσοδο του δέκτη.
- ◆ Στους Επίγειους Σταθμούς απαιτείται βέλτιστος λόγος  $G/T$ , δηλαδή μεγιστοποίησή του, ώστε να προκύψει μεγιστοποίηση του σηματοθορυβικού λόγου.

$$G/T = \frac{G_{Rmax}}{L_R L_{FRX} L_{POL} \left[ \frac{T_A}{L_{FRX}} + T_{FRX} \left( 1 - \frac{1}{L_{FRX}} \right) + T_{eRX} \right]}$$

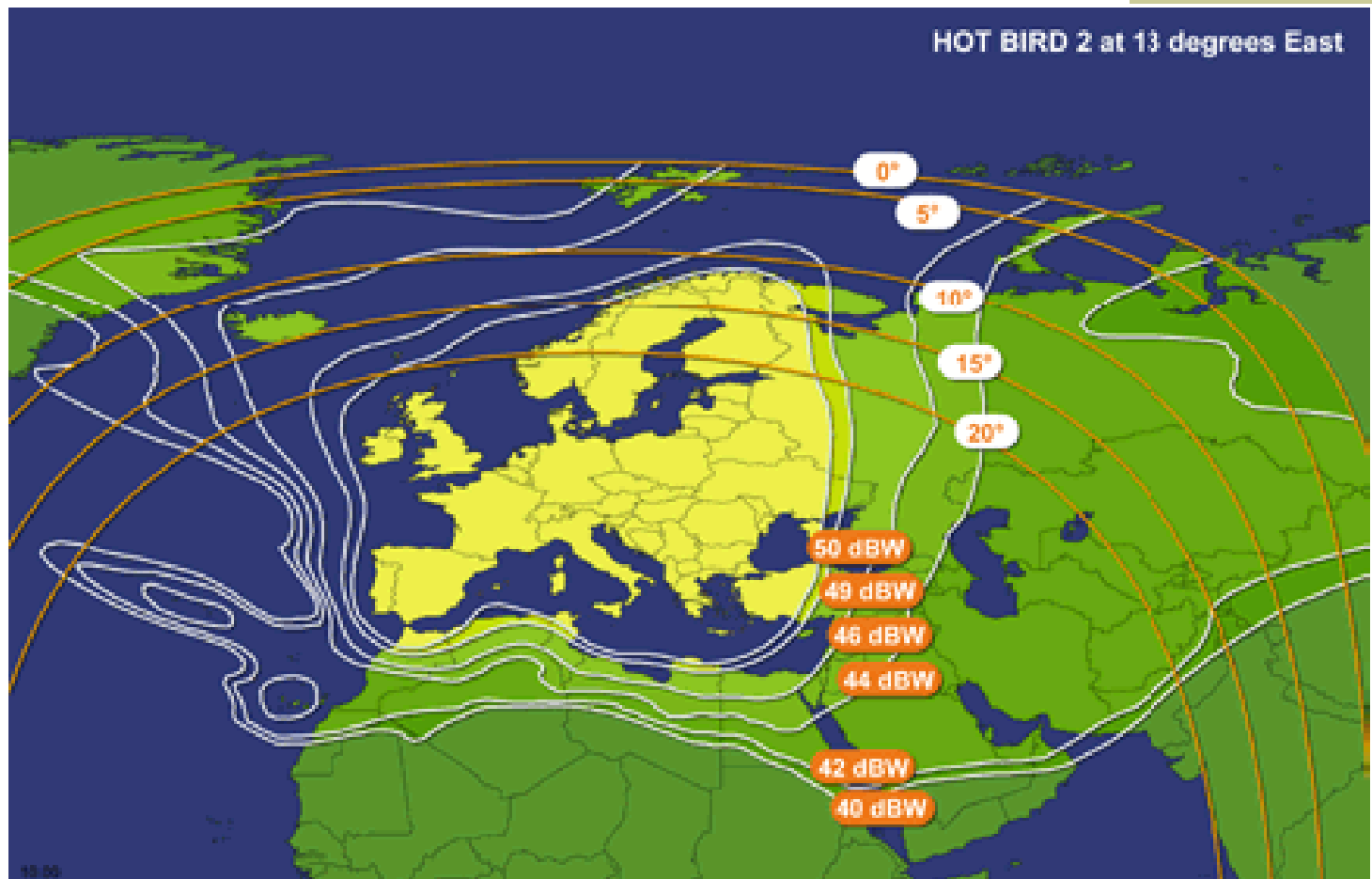
# Έκφραση για το Λόγο $(C/N_0)_T$

- Ο συνολικός λόγος  $C/N_0$  για όλη τη ζεύξη είναι:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_T^{-1} = \left(\frac{C}{N_0}\right)_U^{-1} + \left(\frac{C}{N_0}\right)_D^{-1} \quad (Hz)$$

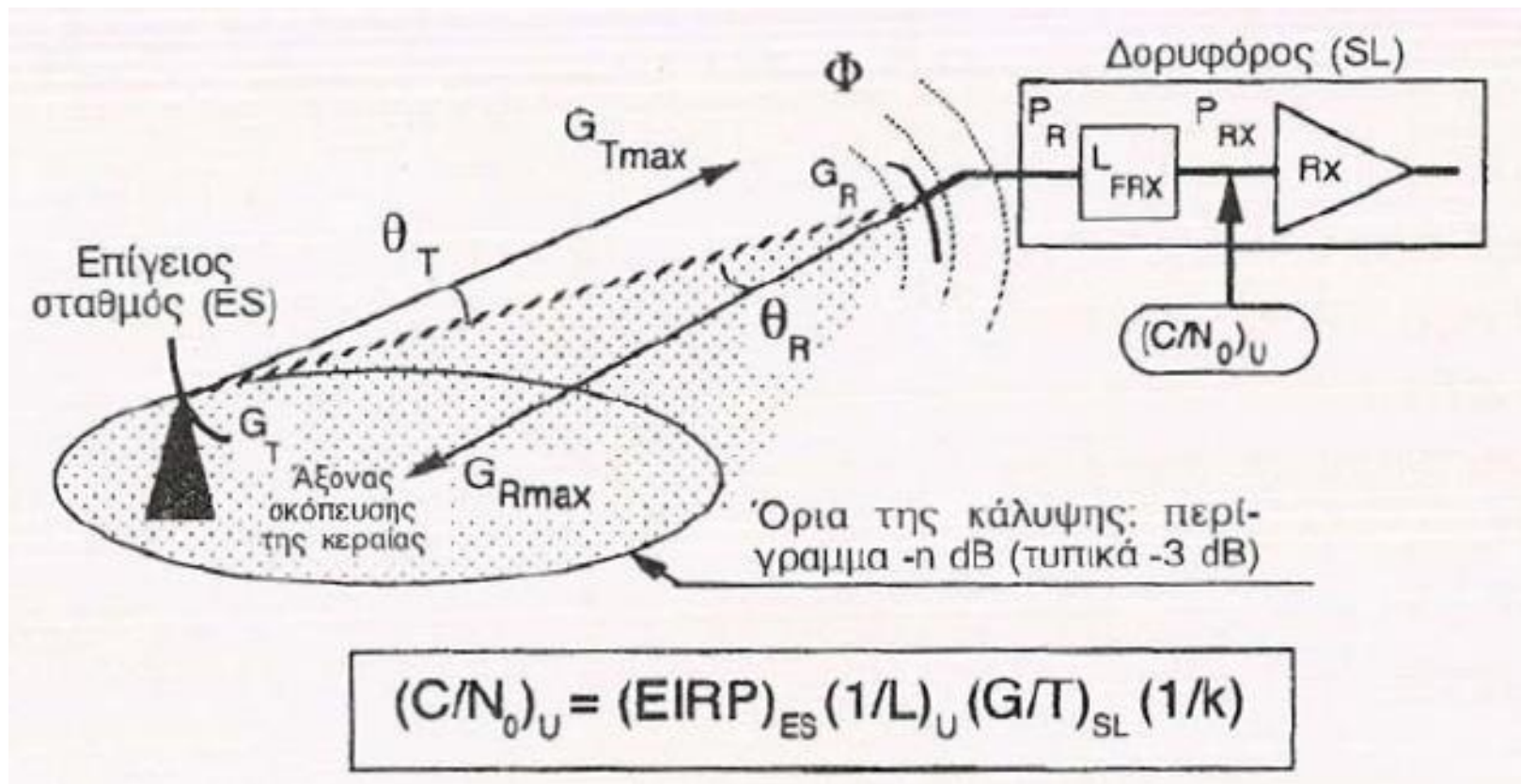
- Ο συνολικός λόγος  $C/N$  θα είναι καθαρός αριθμός, αφού  $N=N_0B$  (Watt)

# Iso-EIRP Contours (downlink)





# Παράδειγμα Uplink (Καθαρός Ουρανός)



# Παράδειγμα Uplink (Καθαρός Ουρανός)

- ◆ Δεδομένα για Επίγειο Σταθμό
  - $P_{TX}=100W$ ,  $f_u=14GHz$ ,  $L_{FTX}=0.5dB$ ,  $D=4m$ ,  $n=0.6$ ,  
 $\theta_T=0.1^\circ$ ,  $R=40000Km$ ,  $L_A=0.3dB$
- ◆ Δεδομένα για Δορυφόρο
  - $\theta_{3dB}=2^\circ$ ,  $n=0.55$ ,  $L_{FRX}=1dB$ ,  $T_{FRX}=290K$ ,  $T_A=290K$
  - $F_{Rx}=3dB$
- ◆ Ο Επίγειος Σταθμός βρίσκεται στο άκρο κάλυψης 3dB της κεραίας λήψης του δορυφόρου.
- ◆ Υποθέστε ότι  $L_{POL}=0dB$ .



# Παράδειγμα Uplink (Καθαρός Ουρανός)

## 2.5.6 Example 1: Uplink (clear sky)

Figure 2.19 shows the geometry of the uplink. It is assumed that the transmitting earth station is on the edge of the 3 dB coverage of the satellite receiving antenna. The data are as follows:

- Frequency:  $f_U = 14 \text{ GHz}$
- For the earth station (ES):
  - Transmitting amplifier power:  $P_{TX} = 100 \text{ W}$
  - Loss between amplifier and antenna:  $L_{FTX} = 0.5 \text{ dB}$
  - Antenna diameter:  $D = 4 \text{ m}$
  - Antenna efficiency:  $\eta = 0.6$
  - Maximum pointing error:  $\theta_T = 0.1^\circ$
- Earth station–satellite distance:  $R = 40\,000 \text{ km}$

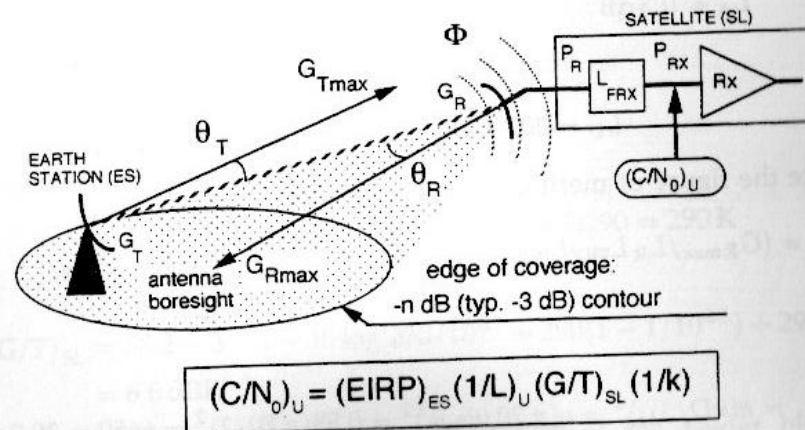


Figure 2.19 The geometry of an uplink.

# Παράδειγμα Uplink (Καθαρός Ουρανός)

40

## Link analysis

- Atmospheric attenuation:  $L_A = 0.3$  dB (typical value for attenuation by atmospheric gases at this frequency for an elevation angle of  $10^\circ$ )
- For the satellite (SL):
  - Receiving beam half power angular width:  $\theta_{3\text{dB}} = 2^\circ$
  - Antenna efficiency:  $\eta = 0.55$
  - Receiver noise figure:  $F = 3$  dB
  - Loss between antenna and receiver:  $L_{\text{FRX}} = 1$  dB
  - Thermodynamic temperature of the connection:  $T_F = 290$  K
  - Antenna noise temperature:  $T_A = 290$  K

To calculate the EIRP of the earth station:

$$(\text{EIRP})_{\text{ES}} = (P_{\text{TX}} G_{\text{Tmax}} / L_{\text{T}} L_{\text{FTX}}) \quad (\text{W}) \quad (2.33)$$

with:

$$P_{\text{TX}} = 100 \text{ W} = 20 \text{ dBW}$$

$$G_{\text{Tmax}} = \eta(\pi D / \lambda_U)^2 = \eta(\pi D f_U / c)^2 = 0.6[\pi \times 4 \times (14 \times 10^9) / (3 \times 10^8)]^2 = 206340 \\ = 53.1 \text{ dBi}$$

$$L_{\text{T}}(\text{dB}) = 12(\theta_{\text{T}} / \theta_{3\text{dB}})^2 = 12(\theta_{\text{T}} D f_U / 70c)^2 = 0.9 \text{ dB}$$

$$L_{\text{FTX}} = 0.5 \text{ dB}$$

Hence:

$$(\text{EIRP})_{\text{ES}} = 20 \text{ dBW} + 53.1 \text{ dB} - 0.9 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} = 71.7 \text{ dBW}$$

# Παράδειγμα Uplink (Καθαρός Ουρανός)

To calculate the attenuation on the upward path (U):

$$L_U = L_{FS} L_A \quad (2.34)$$

with:

$$L_{FS} = (4\pi R/\lambda_U)^2 = (4\pi R f_U/c)^2 = 5.5 \times 10^{20} = 207.4 \text{ dB}$$

$$L_A = 0.3 \text{ dB}$$

Hence:

$$L_U = 207.4 \text{ dB} + 0.3 \text{ dB} = 207.7 \text{ dB}$$

To calculate the figure of merit  $G/T$  of the satellite:

$$(G/T)_{SL} = (G_{R\max}/L_R L_{FRX} L_{POL})/[T_A/L_{FRX} + T_F(1 - 1/L_{FRX}) + T_{eRX}] \quad (\text{K}^{-1}) \quad (2.35)$$

with:

$$G_{R\max} = \eta(\pi D/\lambda_U)^2 = \eta(\pi \cdot 70/\theta_{3\text{dB}})^2 = 0.55(\pi \cdot 70/2)^2 = 6650 = 38.2 \text{ dBi}$$

$$L_R = 12(\theta_R/\theta_{3\text{dB}})^2$$

# Παράδειγμα Uplink (Καθαρός Ουρανός)

As the earth station is on the edge of the 3 dB coverage area,  $\theta_R = \theta_{3\text{dB}}/2$  and  
 $L_R = 3\text{ dB}$

Assume  $L_{\text{POL}} = 0\text{ dB}$

$L_{\text{FRX}} = 1\text{ dB}$

Given  $T_A = 290\text{ K}$

$T_F = 290\text{ K}$

$T_{\text{eRX}} = (F - 1)T_0 = (10^{0.3} - 1)290 = 290\text{ K}$

Hence:

$$\begin{aligned} (G/T)_{\text{SL}} &= 38.2 - 3 - 1 - 10 \log[290/10^{0.1} + 290(1 - 1/10^{0.1}) + 290] \\ &= 6.6\text{ dBK}^{-1} \end{aligned}$$

Notice that when the thermodynamic temperature of the feeder between antenna and the satellite receiver is close to the antenna noise temperature, which is the case in practice, the uplink system noise temperature at the receiver input is  $T_U \approx T_F + T_{\text{eRX}} \approx 290 + T_{\text{eRX}}$ . It is, therefore, needlessly costly to install a receiver with a very low noise figure on board a satellite.

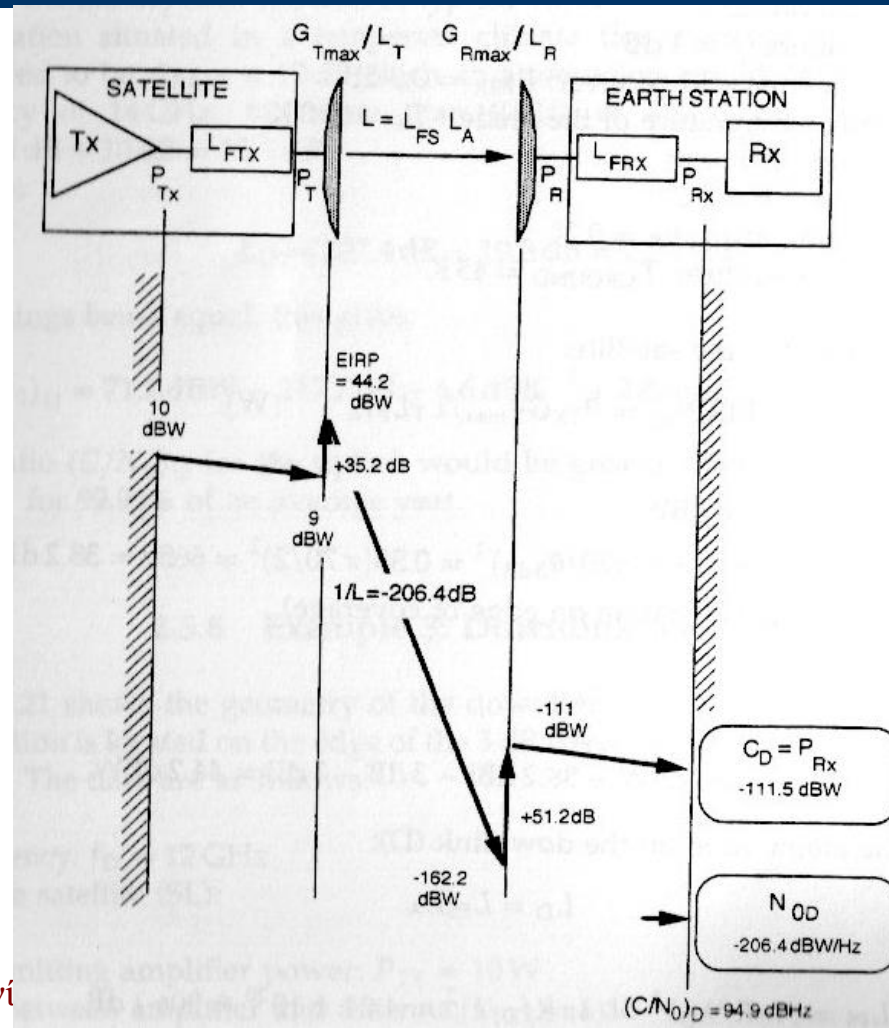
To calculate the ratio  $C/N_0$  for the uplink:

$$(C/N_0)_U = (\text{EIRP})_{\text{ES}}(1/L_U)(G/T)_{\text{SL}}(1/k) \quad (\text{Hz}) \quad (2.36)$$

Hence:

$$(C/N_0)_U = 71.7\text{ dBW} - 207.7\text{ dB} + 6.6\text{ dBK}^{-1} + 228.6\text{ dBW/Hz K} = 99.2\text{ dBHz}$$

# Διάγραμμα Επιπέδων Ισχύος Παραδείγματος Uplink



# Παράδειγμα Uplink (Με Βροχή)

## 2.5.7 Example 2: Uplink (with rain)

In the presence of rain, propagation attenuation is greater due to the attenuation  $A_{\text{RAIN}}$  caused by rain in the atmosphere. This is in addition to the attenuation due to gases in the atmosphere (0.3 dB). A typical value of attenuation due to rain for an earth station situated in a temperate climate (for example in Europe) can be considered to be  $A_{\text{RAIN}} = 10$  dB. Such an attenuation would not be exceeded, at a frequency of 14 GHz, for more than 0.01% of an average year. This gives  $L_A = 0.3$  dB + 10 dB = 10.3 dB.

Hence:

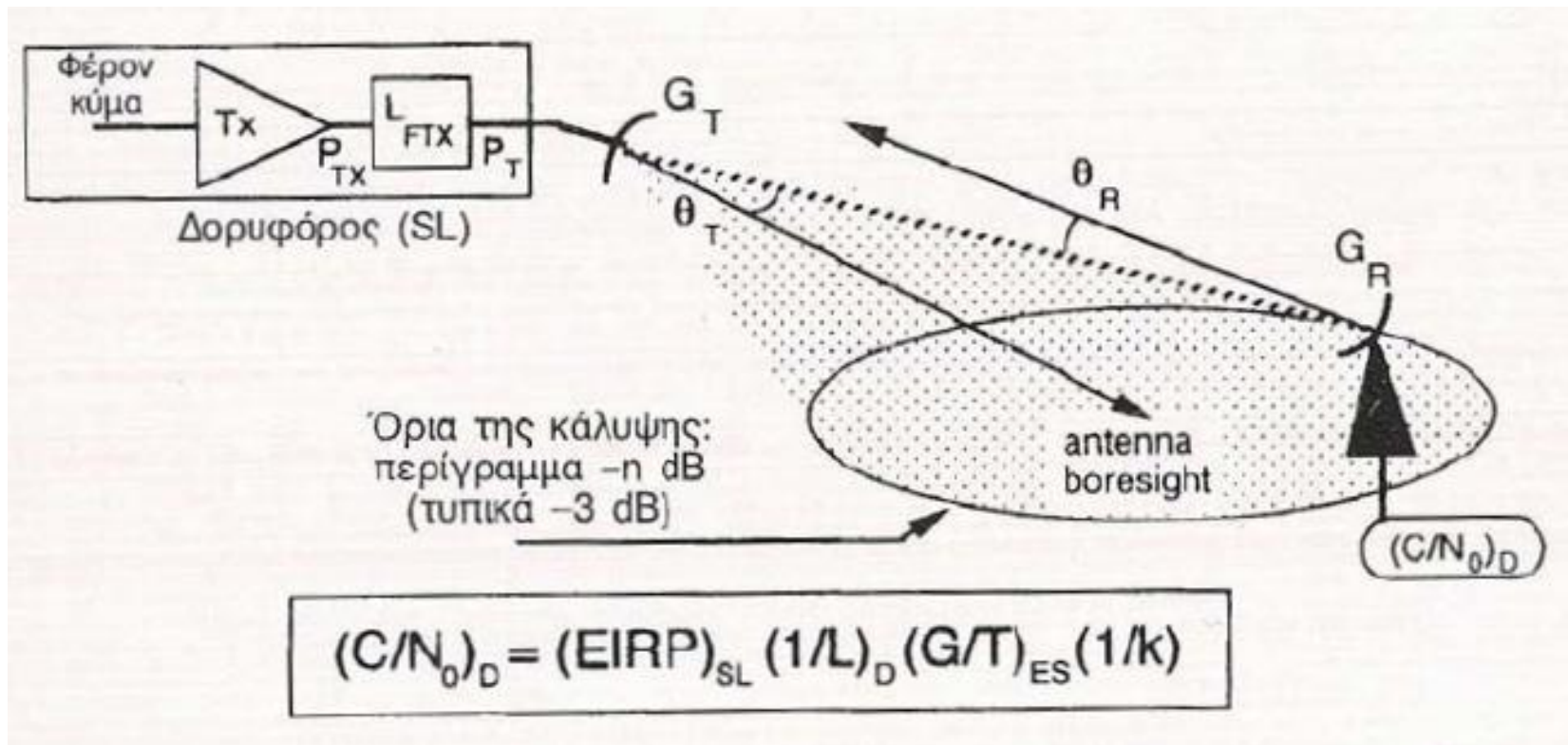
$$L_U = 207.4 \text{ dB} + 10.3 \text{ dB} = 217.7 \text{ dB}$$

Other things being equal, this gives:

$$(C/N_0)_U = 71.7 \text{ dBW} - 217.7 \text{ dB} + 6.6 \text{ dBK}^{-1} + 228.6 \text{ dBW/HzK} = 89.2 \text{ dBHz}$$

The ratio  $(C/N_0)_U$  for the uplink would be greater than the value calculated in this way for 99.99% of an average year.

# Παράδειγμα Downlink (Καθαρός Ουρανός)



# Παράδειγμα Downlink (Καθαρός Ουρανός)

- ◆ Δεδομένα για Επίγειο Σταθμό
  - $f_d=12\text{GHz}$ ,  $L_{FRX}=0.5\text{dB}$ ,  $F=1\text{dB}$ ,  $D=4\text{m}$ ,  $n=0.6$ ,  $\theta_R=0.1^\circ$ ,  
 $R=40000\text{Km}$ ,  $L_A=0.3\text{dB}$ ,  $T_{FRX}=290\text{K}$ ,  $T_{GROUND}=45\text{K}$
- ◆ Δεδομένα για Δορυφόρο
  - $P_{TX}=10\text{W}$ ,  $\theta_{3\text{dB}}=2^\circ$ ,  $n=0.55$ ,  $L_{FTX}=1\text{dB}$
- ◆ Ο Επίγειος Σταθμός βρίσκεται στο άκρο κάλυψης 3dB της κεραίας λήψης του δορυφόρου.
- ◆ Υποθέστε ότι  $L_{POL}=0\text{dB}$ .



# Παράδειγμα Downlink (Καθαρός Ουρανός)

To calculate the EIRP of the satellite:

$$(EIRP)_{SL} = P_{TX} G_{Tmax} / L_T L_{FTX} \quad (W) \quad (2.37)$$

with:

$$P_{TX} = 10 W = 10 \text{ dBW}$$

$$G_{Tmax} = \eta (\pi D / \lambda_D)^2 = \eta (\pi 70 / \theta_{3dB})^2 = 0.55 (\pi 70 / 2)^2 = 6650 = 38.2 \text{ dBi}$$

$$L_T (\text{dB}) = 3 \text{ dB (earth station on edge of coverage)}$$

$$L_{FTX} = 1 \text{ dB}$$

Hence:

$$(EIRP)_{SL} = 10 \text{ dBW} + 38.2 \text{ dBi} - 3 \text{ dB} - 1 \text{ dB} = 44.2 \text{ dBW}$$

To calculate the attenuation on the downlink (D):

$$L_D = L_{FS} L_A \quad (2.38)$$

with:

$$L_{FS} = (4\pi R / \lambda_D)^2 = (4\pi R f_D / c)^2 = 4.04 \times 10^{20} = 206.1 \text{ dB}$$

$$L_A = 0.3 \text{ dB}$$

# Παράδειγμα Downlink (Καθαρός Ουρανός)

Hence:

$$L_D = 206.1 \text{ dB} + 0.3 \text{ dB} = 206.4 \text{ dB}$$

To calculate the figure of merit  $G/T$  of the earth station:

$$(G/T)_{ES} = (G_{R\max}/L_R L_{FRX} L_{POL})/T_D \quad (\text{K}^{-1})$$

$T_D$  is the downlink system noise temperature at the receiver input given by:

$$T_D = T_A/L_{FRX} + T_F(1 - 1/L_{FRX}) + T_{eRX}$$

and:

$$\begin{aligned} G_{R\max} &= \eta(\pi D/\lambda_D)^2 = \eta(\pi D f_D/c)^2 = 0.6(\pi \times 4 \times 12 \times 10^9/3 \times 10^8)^2 \\ &= 151\,597 = 51.8 \text{ dBi} \end{aligned}$$

$$L_R(\text{dB}) = 12(\theta_R/\theta_{3\text{dB}})^2 = 12(\theta_R D f_D/70c)^2 = 0.6 \text{ dB}$$

$$L_{FRX} = 0.5 \text{ dB}$$

$$L_{POL} = 0 \text{ dB}$$

# Παράδειγμα Downlink (Καθαρός Ουρανός)

$T_A = T_{\text{SKY}} + T_{\text{GROUND}}$  with  $T_{\text{SKY}} = 20 \text{ K}$  (see Figure 2.14 for  $f = 12 \text{ GHz}$  and  $E = 10^\circ$ ) and  $T_{\text{GROUND}} = 45 \text{ K}$  from which  $T_A = 65 \text{ K}$

$$T_F = 290 \text{ K}$$

$$T_{\text{eRX}} = (F - 1)T_0 = (10^{0.1} - 1)290 = 75 \text{ K}$$

Hence:

$$T_D = 65/10^{0.05} + 290(1 - 1/10^{0.05}) + 75 = 164.5 \text{ K}$$

then:

$$\begin{aligned} (G/T)_{\text{ES}} &= 51.8 - 0.6 - 0.5 - 10 \log[65/10^{0.05} + 290(1 - 1/10^{0.05}) + 75] \\ &= 28.5 \text{ dBK}^{-1} \end{aligned}$$

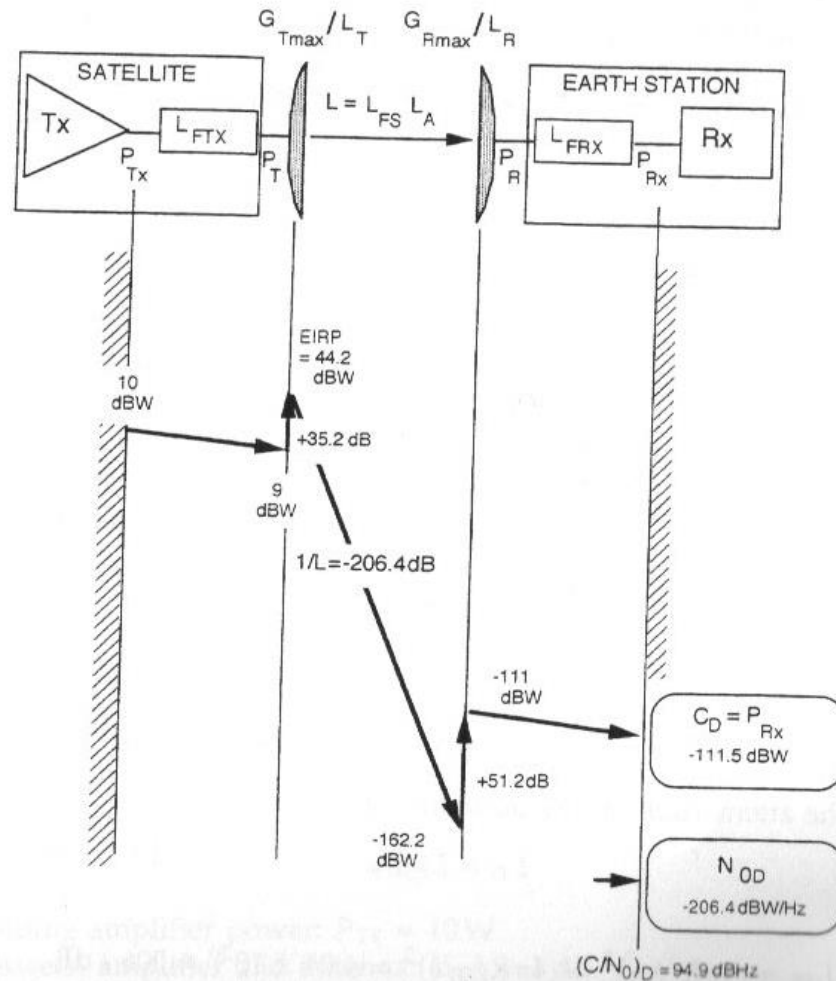
To calculate the ratio  $C/N_0$  for the downlink:

$$(C/N_0)_D = (\text{EIRP})_{\text{SL}}(1/L_D)(G/T)_{\text{ES}}(1/k) \quad (\text{Hz}) \quad (2.39)$$

Hence:

$$\begin{aligned} (C/N_0)_D &= 44.2 \text{ dBW} - 206.4 \text{ dB} + 28.5 \text{ dBK}^{-1} + 228.6 \text{ dBW/Hz K} \\ &= 94.9 \text{ dBHz} \end{aligned}$$

# Διάγραμμα Επιπέδων Ισχύος Παραδείγματος Downlink



# Παράδειγμα Downlink (Με Βροχή)

$A_{\text{RAIN}} = 7 \text{ dB}$  will be taken as the typical value of attenuation due to rain for an earth station situated in a temperate climate (for example in Europe) which will not be exceeded, at a frequency of 12 GHz, for more than 0.01% of an average year; this gives  $L_A = 0.3 \text{ dB} + 7 \text{ dB} = 7.3 \text{ dB}$ . Hence:  $L_D = 206.1 + 7.3 \text{ dB} = 213.4 \text{ dB}$ . The antenna noise temperature is given by:

$$T_A = T_{\text{SKY}}/A_{\text{RAIN}} + T_m(1 - 1/A_{\text{RAIN}}) + T_{\text{GROUND}} \quad (\text{K}) \quad (2.40)$$

Taking

$$T_m = 275 \text{ K}$$

$$T_A = 20/10^{0.7} + 275(1 - 1/10^{0.7}) + 45 = 269 \text{ K}$$

$$T_D = 269/10^{0.05} + 290(1 - 1/10^{0.05}) + 75 = 346 \text{ K}$$

Hence

$$\begin{aligned} (G/T)_{\text{ES}} &= 51.8 - 0.6 - 0.5 - 10 \log[269/10^{0.05} + 290(1 - 1/10^{0.05}) + 75] \\ &= 25.3 \text{ dBK}^{-1} \end{aligned}$$

To calculate the ratio  $C/N_0$  for the downlink:

$$(C/N_0)_D = (\text{EIRP})_{\text{SL}}(1/L_D)(G/T)_{\text{ES}}(1/k) \quad (\text{Hz})$$

# Παράδειγμα Downlink (Με Βροχή)

Hence:

$$(C/N_0)_D = 44.2 \text{ dBW} - 213.4 \text{ dB} + 25.3 \text{ dBK}^{-1} + 228.6 \text{ dBW/Hz K} = 84.7 \text{ dBHz}$$

The ratio  $(C/N_0)_D$  for the downlink will be greater than the value calculated in this way for 99.99% of an average year.

## 2.5.10 Conclusion

The quality of the link between a transmitter and a receiver can be characterised by the ratio of the carrier power to the noise power spectral density  $C/N_0$ . This is a function of the transmitter EIRP, the receiver figure of merit  $G/T$  and the properties of the transmission medium. In a satellite link between two earth stations, two links must be considered—the uplink characterised by the ratio  $(C/N_0)_U$  and the downlink characterised by the ratio  $(C/N_0)_D$ . The propagation conditions in the atmosphere affect the uplink and downlink differently; rain reduces the value of the ratio  $(C/N_0)_U$  by decreasing the value of received power  $C_U$  while it reduces the value of  $(C/N_0)_D$  by reducing the value of received power  $C_D$  and increasing the downlink system noise temperature. Denoting the resulting degradation by  $\Delta(C/N_0)$  gives:

$$\Delta(C/N_0)_U = \Delta C_U = (A_{\text{RAIN}})_U \quad (\text{dB}) \quad (2.41)$$

$$\Delta(C/N_0)_D = \Delta C_D - \Delta(G/T) = (A_{\text{RAIN}})_D + \Delta T \quad (\text{dB}) \quad (2.42)$$

# Επιδράσεις Μέσου Μετάδοσης

- ◆ Σε Η/Μ κύματα συχνότητας 1GHz-30GHz οι σημαντικές επιπτώσεις στη διάδοση προέρχονται από δύο περιοχές της ατμόσφαιρας
  - Τροπόσφαιρα (έδαφος – 15Km), κυρίως κοντά στο έδαφος
  - Ιονόσφαιρα (70Km – 1000Km), κυρίως κοντά στα 400Km.
- ◆ Τα σημαντικότερα φαινόμενα είναι
  - της απορρόφησης
  - και της αποπόλωσης

και τα δύο λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων (βροχή και χιόνι) και είναι έντονα για συχνότητες πάνω από 10GHz.

- ◆ Οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις χαρακτηρίζονται από το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο ξεπερνούν ένα δεδομένο επίπεδο έντασης.

# Ατμοσφαιρικές Κατακρημνίσεις

- ◆ **Συνθήκες Καθαρού Ουρανού** : Μικρές εντάσεις των κατακρημνίσεων, και άρα με αμελητέα επίδραση, αντιστοιχούν σε μεγάλα ποσοστά του χρόνου (συνήθως 20%).
- ◆ **Συνθήκες Βροχής** : Μεγάλες εντάσεις με σημαντική επίδραση στη μετάδοση των ραδιοκυμάτων, αντιστοιχούν σε μικρά ποσοστά χρόνου (συνήθως 0.01%).
- ◆ Η διαθεσιμότητα μιας ραδιοζεύξης εξαρτάται από τα στατιστικά δεδομένα της χρονικής διάρκειας των κατακρημνίσεων.



# Ατμοσφαιρικές Κατακρημνίσεις

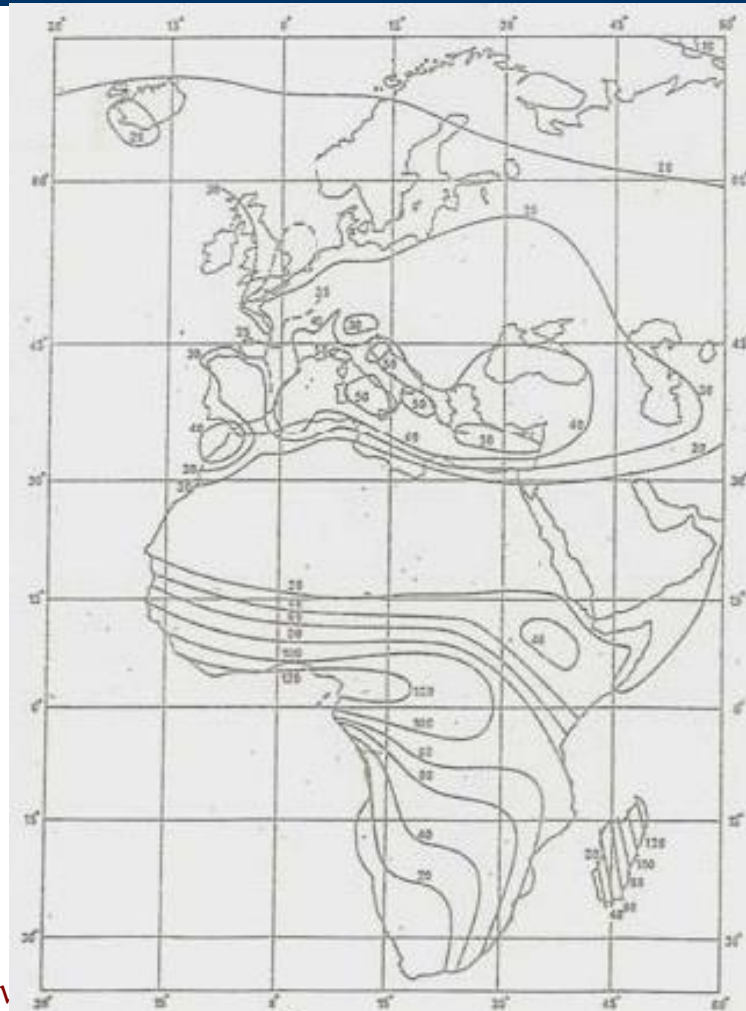
- ♦ Η ένταση των κατακρημνίσεων μετράται με την **ένταση της βροχόπτωσης**, δηλαδή σε **mm/h**.
- ♦ Για κάθε τοποθεσία υπάρχουν στατιστικά δεδομένα που προσδιορίζουν την αθροιστική συνάρτηση κατανομής της βροχόπτωσης, δηλαδή το ετήσιο ποσοστό του χρόνου  $p$  (%) για το οποίο η βροχόπτωση υπερβαίνει μια τιμή  $R_p$  (mm/h).
- ♦ Αν δεν έχουμε ακριβή στοιχεία για την περιοχή ενδιαφέροντος, χρησιμοποιούμε τους πίνακες της ITU-R όπως δίνονται στο PN837.
- ♦ Συνήθως για την Ευρώπη χρησιμοποιείται  **$R_{0.01}=30\text{mm/h}$** , ή  **$50\text{mm/h}$**  ( $p=0.01\%$  αντιστοιχεί σε 53 λεπτά το χρόνο).

# Κλιματικές Ζώνες Βροχής (ITU-R)

Ποσοστό του χρό- νου (%)	Κλιματική ζώνη επί του χάρτη														
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q
1.0	< 0.1	0.5	0.7	2.1	0.6	1.7	3	2	8	1.5	2	4	5	12	24
0.3	0.8	2	2.8	4.5	2.4	4.5	7	4	13	4.2	7	11	15	34	49
0.1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65	72
0.03	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105	96
0.01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145	115
0.003	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200	142
0.001	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250	170

Πηγή: [Rec. ITU-R. PN837]

# Κλιματικές Ζώνες Βροχής (ITU-R)



# Εξασθένηση Λόγω Βροχόπτωσης

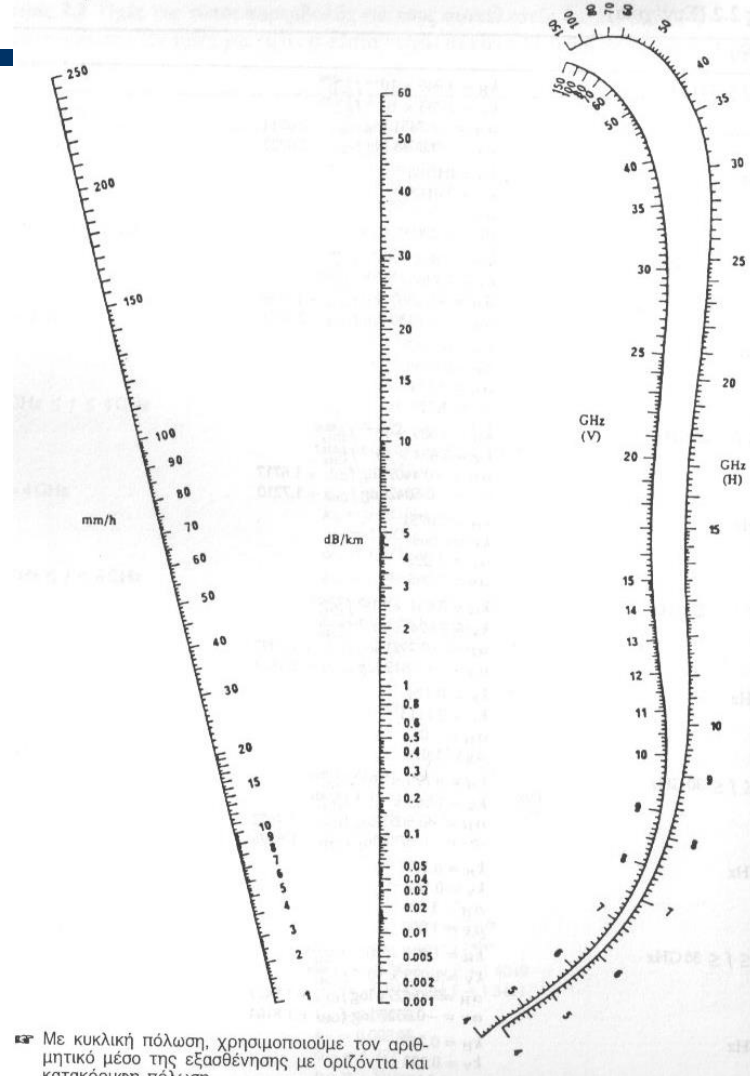
- ◆ Η εξασθένηση  $A_{RAIN}$  λόγω βροχόπτωσης είναι

$$A_{RAIN} = \gamma_R L_e \quad (dB)$$

όπου  $\gamma_R$  (dB/Km) η ειδική εξασθένηση και  $L_e$  (Km) το ενεργό μήκος της διαδρομής υπό βροχή.

- ◆ Η ειδική εξασθένηση  $\gamma_R$  εξαρτάται από τη συχνότητα και την ένταση βροχόπτωσης  $R_p$  (mm/h). Άρα η εξασθένηση  $A_{RAIN}$  αναφέρεται σε ποσοστό χρόνου 100-p (%).
- ◆ Η ειδική εξασθένηση  $\gamma_R$  υπολογίζεται από το νομόγραμμα της επόμενης διαφάνειας.

# Προσδιορισμός $\gamma_R$ μέσω νομογράμματος



# Αλγόριθμος Υπολογισμού $A_{RAIN}$

1. Υπολογισμός της έντασης βροχόπτωσης  $R_{0.01}$
2. Υπολογισμός του ύψους της βροχής  $h_R$  (Km)

$$h_R \text{ (Km)} = 3 + 0.028(\textit{latitude}) \quad 0 < \textit{latitude} < 36^\circ$$
$$= 4 - 0.075(\textit{latitude} - 36) \quad \textit{latitude} \geq 36^\circ$$

3. Υπολογισμός του μήκους της κεκλιμένης διαδρομής στη βροχή

$$L_s = \frac{h_R - h_s}{\sin E} \quad (E > 5^\circ)$$

όπου  $h_s$  το ύψος του επίγειου σταθμού πάνω από το μέσο επίπεδο θάλασσας (Km).

# Αλγόριθμος Υπολογισμού $A_{RAIN}$

4. Υπολογισμός του συντελεστή μείωσης  $r_{0.01}$  (για το 0.01% του χρόνου), που λαμβάνει υπόψη την ανομοιογένεια της βροχής.

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + \left( \frac{L_s \cos E}{L_o} \right)}$$

$$L_o (Km) = 35 \cdot \exp(-0.015 \cdot R_{0.01})$$

5. Υπολογισμός της  $L_e$

$$L_e = L_s r_{0.01} (Km)$$

# Αλγόριθμος Υπολογισμού $A_{RAIN}$

6. Υπολογισμός της ειδικής εξασθένησης  $\gamma_R$  από το νομόγραμμα (δίνεται και μια ακόμη μέθοδος στο βιβλίο)
7. Υπολογισμός της εξασθένησης  $A_{RAIN}$

$$A_{RAIN}(p = 0.01) = \gamma_R L_e \quad (dB)$$

8. Η τιμή της εξασθένησης για άλλα ποσοστά  $p$  μεταξύ 0.001% και 1% υπολογίζεται ως εξής :

$$A_{RAIN}(p) = A_{RAIN}(p = 0.01) \cdot 0.12 p^{-(0.546 + 0.043 \log p)} \quad (dB)$$



# Αλγόριθμος Υπολογισμού $A_{RAIN}$

- ◆ Πολλές φορές χρησιμοποιούμε το ποσοστό του χρόνου το χειρότερο μήνα του έτους  $p_w$  για το οποίο η εξασθένηση θα ξεπεραστεί

$$p = 0.3(p_w)^{1.15} \quad (\%)$$

- ◆ Χρήσιμες τιμές είναι  $p_w = 0.3\%$  (περίπου 2 ώρες/μήνα) δηλαδή  $p = 0.075\%$ .
- ◆ Η παραπάνω διαδικασία δίνει τυπικές τιμές εξασθένησης (για  $R_{0.01}$  από 30 ως 50 mm/h και  $p = 0.01\%$ )
  - 0.1dB στα 4GHz
  - 5dB ως 10dB στα 12GHz
  - 10dB ως 20dB στα 20GHz
  - 25dB ως 40dB στα 30GHz

# Εξασθένηση Λόγω Νεφώσεων

- ◆ Υπολογίζεται με την ίδια διαδικασία. Η ειδική εξασθένιση  $\gamma_c$  δίνεται ως εξής

$$\gamma_c = KM \quad (dB / Km)$$

$$K = 1.1 \cdot 10^{-3} f^{1.8} \quad (f \text{ σε GHz})$$

$$K \text{ σε } (dB / Km) / (g / m^3)$$

όπου M η συγκέντρωση νερού στο νέφος ( $g/m^3$ )

- ◆ Η εξασθένηση αυτή είναι μικρή σε σχέση με εκείνη της βροχής, εκτός και αν η συγκέντρωση του νερού είναι μεγάλη. Παρατηρείται όμως για μεγαλύτερο διάστημα.
- ◆ Τυπικές τιμές για γωνία ανύψωσης  $E=20^\circ$ , είναι
  - 0.5 ως 1.5dB στα 15GHz
  - 2 ως 4.5dB στα 30GHz

# Εξασθένιση από Ατμοσφαιρικά Αέρια

- ◆ Η εξασθένιση αυτή εξαρτάται από
  - Συχνότητα
  - Υψόμετρο επίγειου σταθμού
  - Συγκέντρωση των ατμών του νερού
- ◆ Η εξασθένιση είναι γενικά αμελητέα σε συχνότητες μικρότερες των 10GHz και δεν υπερβαίνει τα 1 ως 2dB στα 22GHz.

# Περιθώριο Ασφάλειας

- ◆ Πολλές φορές λόγω της βροχής πρέπει να συμπεριλαμβάνουμε ένα περιθώριο ασφάλειας στους υπολογισμούς, ώστε ο σηματοθορυβικός λόγος στην άνω και στην κάτω ζεύξη να υπερβαίνει μια τιμή κατωφλίου, δηλαδή

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{Urain} = \left(\frac{C}{N_o}\right)_{Uclearsky} - A_{RAIN} \quad (dBHz)$$

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{Drain} = \left(\frac{C}{N_o}\right)_{Dclearsky} - A_{RAIN} - \Delta\left(\frac{G}{T}\right) \quad (dBHz)$$

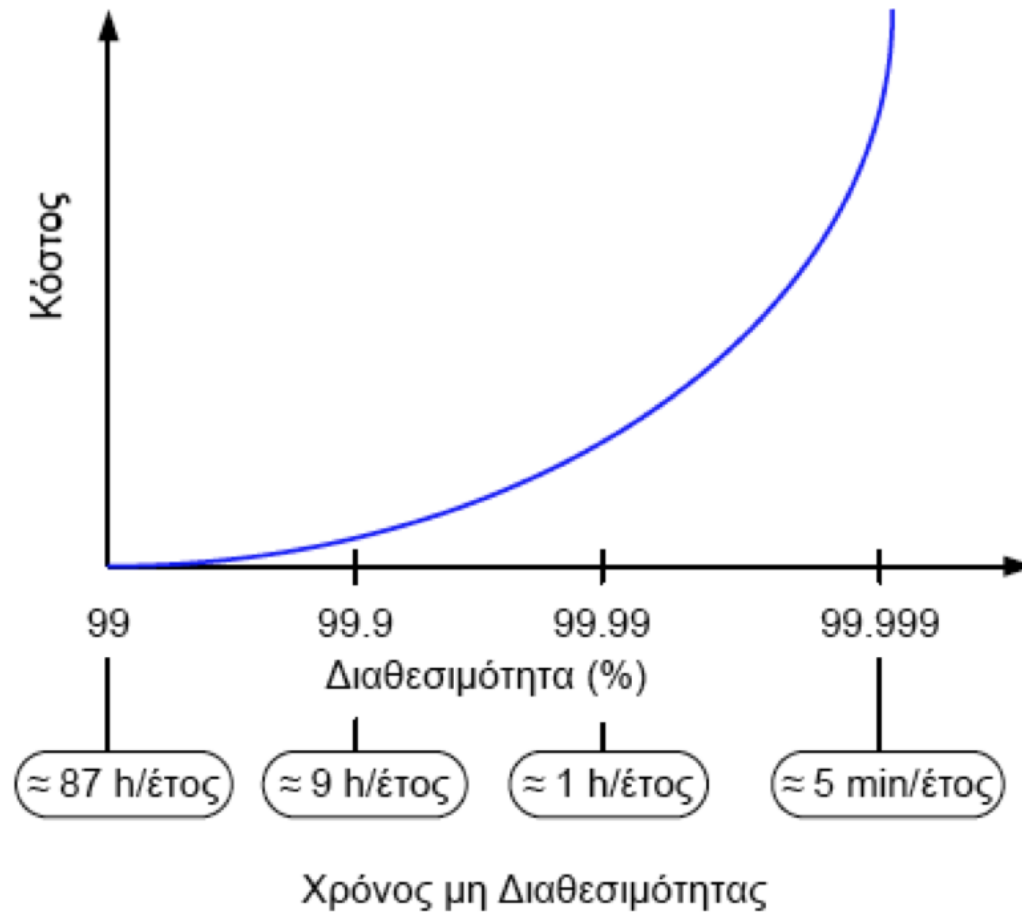
$$\Delta\left(\frac{G}{T}\right) = \left(\frac{G}{T}\right)_{clearsky} - \left(\frac{G}{T}\right)_{rain}$$

# Περιθώριο Ασφάλειας

$$\begin{aligned} M(p) &= \left( \frac{C}{N_o} \right)_{clearsky} - \left( \frac{C}{N_o} \right)_{required} \\ &= \left( \frac{C}{N_o} \right)_{clearsky} - \left( \frac{C}{N_o} \right)_{rain} \quad (dB) \end{aligned}$$

- ◆ Το περιθώριο αυτό σημαίνει αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος. Αν αυτή η λύση δεν είναι εφικτή, τότε είτε χρησιμοποιείται επίγειος σταθμός σε άλλη τοποθεσία, είτε μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά της ζεύξης για όσο διάστημα διαρκεί το φαινόμενο που υποβαθμίζει τη ζεύξη.

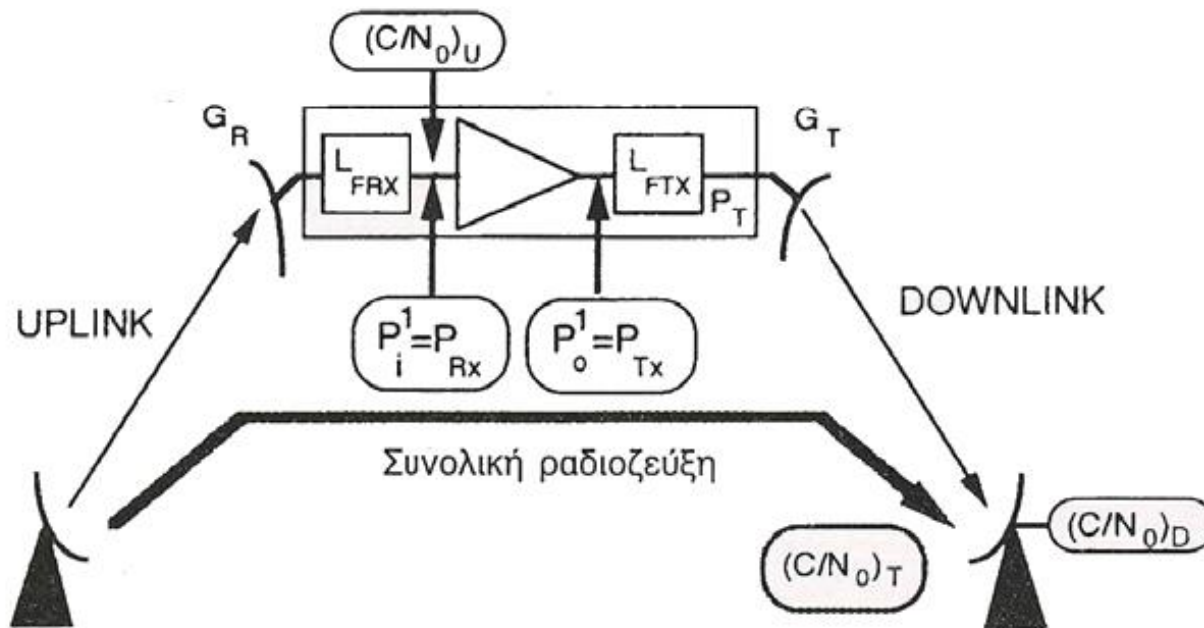
# Σχέση Κόστους και Διαθεσιμότητας



# Συνολικός Σηματοθορυβικός Λόγος

- ◆ Θεωρούμε ζεύξη από σταθμό σε σταθμό, και χρήση επαναλήπτη που εκτελεί δύο βασικές λειτουργίες
  - Ενίσχυση του λαμβανόμενου σήματος
  - Αλλαγή της συχνότητας του φέροντος
- ◆ Δύο υποθέσεις γίνονται για τον επαναλήπτη
  - Είναι διαφανής (δεν εκτελεί λειτουργίες αναγέννησης, δηλαδή αποδιαμόρφωση και επεξεργασία)
  - Υποστηρίζει μόνο ένα φέρον
- ◆ Και οι δύο υποθέσεις απλουστεύουν τον υπολογισμό του συνολικού σηματοθορυβικού λόγου.

# Συνολικός Σηματοθρομβικός Λόγος

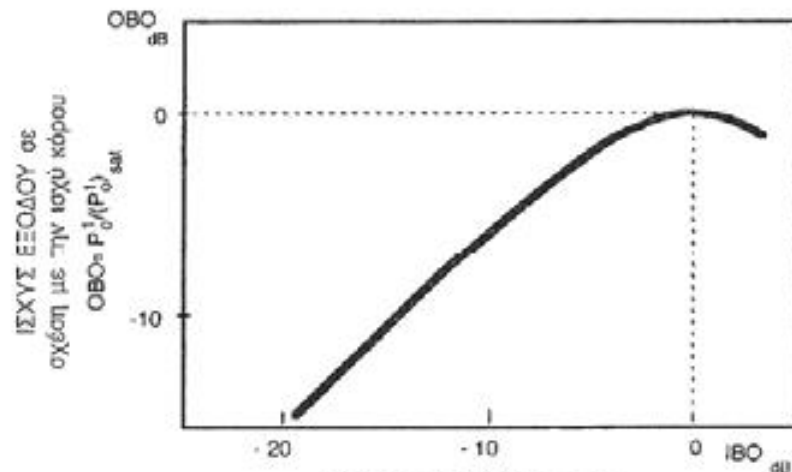


- ♦ Από ενεργειακή άποψη η μετατροπή συχνότητας είναι «διαφανής», οπότε θεωρούμε απλά τον ενισχυτή.



# Χαρακτηριστική Μεταφοράς Επαναλήπτη

- Ο δείκτης  $i$  δηλώνει την είσοδο.
- Ο δείκτης  $o$  δηλώνει την έξοδο.
- Ο δείκτης  $1$  δηλώνει 1 φέρον.

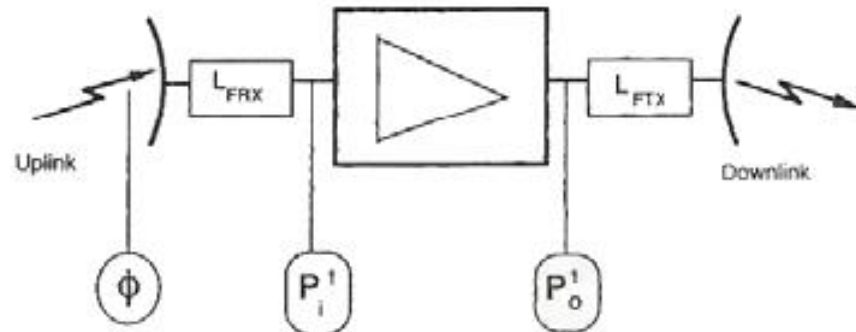


ΙΣΧΥΣ ΕΙΣΟΔΟΥ σε σχέση με την ισχύ κόρου

$$OBO = P_o^1 / (P_i^1)_{sat}$$

ΙΣΧΥΣ ΕΙΣΟΔΟΥ σε σχέση με την ισχύ κόρου

$$IBO = P_i^1 / (P_i^1)_{sat} = (\phi)_{SL} / (\phi_{sat})_{SL}$$



# Αναδίπλωση Ισχύος Εισόδου - Εξόδου

$$IBO = \frac{P_i^1}{(P_i^1)_{sat}} \quad OBO = \frac{P_o^1}{(P_o^1)_{sat}}$$

Το κέρδος κορεσμού του επαναλήπτη και το κέρδος σε οποιοδήποτε σημείο λειτουργίας είναι

$$(G_{sat})_{SL} = \frac{(P_o^1)_{sat}}{(P_i^1)_{sat}}$$
$$G_{SL} = \frac{P_o^1}{P_i^1} = \frac{OBO (P_o^1)_{sat}}{IBO (P_i^1)_{sat}} = \frac{OBO}{IBO} (G_{sat})_{SL}$$

# Σχέση Κέρδους, EIRP, και Πυκνότητας Ροής Ισχύος στον Κορεσμό

- ◆ Η EIRP κορεσμού είναι

$$\left( EIRP_{sat} \right)_{SL} = \frac{\left( P_o^1 \right)_{sat} G_{T \max}}{L_T L_{FTX}}$$

- ◆ Η απαιτούμενη πυκνότητα ισχύος για να προκαλέσει κορεσμό είναι

$$\left( \Phi_{sat} \right)_{SL} = \frac{P_R}{A_{Reff}} = \frac{\left( P_i^1 \right)_{sat} L_{FRX} L_R L_{POL}}{\frac{G_{R \max}}{\left( \frac{4\pi}{\lambda_u^2} \right)}} \quad \left( W / m^2 \right)$$

# Σχέση Κέρδους, EIRP, και Πυκνότητας Ροής Ισχύος στον Κορεσμό

- ♦ Το κέρδος κορεσμού του επαναλήπτη δίνεται από την εξίσωση

$$(G_{sat})_{SL} = \frac{(P_o^1)_{sat}}{(P_i^1)_{sat}} = \frac{L_T L_{FTX} L_{FRX} L_R L_{POL}}{G_{T \max} G_{R \max}} \frac{4\pi}{\lambda_u^2} \frac{(EIRP_{sat})_{SL}}{(\Phi_{sat})_{SL}}$$

- ♦ Επίσης μπορούμε να εκφράσουμε την αναδίπλωση της ισχύος εισόδου συναρτήσει της πυκνότητας ισχύος ως εξής

$$IBO = \frac{(P_i^1)}{(P_i^1)_{sat}} = \frac{\Phi_{SL}}{(\Phi_{sat})_{SL}}$$

# Έκφραση για το Λόγο $(C/N_o)_T$

## ◆ Περίπτωση Χωρίς Παρεμβολές

- Η λαμβανόμενη ισχύς στην είσοδο του δέκτη του Επίγειου Σταθμού είναι  $C_D$ .
- Ο θόρυβος στην είσοδο του δέκτη του επίγειου σταθμού αποτελείται από το άθροισμα δύο συνιστωσών
  - Τον θόρυβο στην κάτω ζεύξη που καθορίζει το λόγο  $(C/N_o)_D$  και υπολογίζεται ως εξής

$$(N_o)_D = kT_D$$

- Το θόρυβο στην άνω ζεύξη που επανεκπέμπεται από το δορυφόρο
- Άρα ο συνολικός θόρυβος είναι

$$(N_o)_T = (N_o)_D + G(N_o)_U \quad (W / Hz)$$

# Έκφραση για το Λόγο $(C/N_o)_T$

- Όπου 
$$G = \frac{G_{SL} G_T G_R}{L_{FTX} L_{FRX} L_D}$$

είναι το ολικό κέρδος ισχύος μεταξύ της εισόδου του δέκτη του δορυφόρου και της εισόδου του δέκτη του επίγειου σταθμού.

- Άρα θα ισχύει 
$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_T^{-1} = \frac{(N_o)_T}{C_D} = \frac{(N_o)_D + G(N_o)_U}{C_D}$$
$$= \frac{(N_o)_D}{C_D} + \frac{(N_o)_U}{C_D G^{-1}}$$

όπου  $C_D G^{-1}$  η ισχύς του σήματος στην είσοδο του δορυφορικού δέκτη.

# Έκφραση για το Λόγο $(C/N_0)_T$

- Άρα:

$$\frac{(N_0)_U}{C_D G^{-1}} = \left( \frac{C}{N_0} \right)_U^{-1}$$

$$\left( \frac{C}{N_0} \right)_T^{-1} = \left( \frac{C}{N_0} \right)_U^{-1} + \left( \frac{C}{N_0} \right)_D^{-1} \quad (Hz)$$

# Έκφραση για το Λόγο $(C/N_0)_T$

- Εισάγοντας τις τιμές του κορεσμού έχουμε

$$\begin{aligned}\left(\frac{C}{N_0}\right)_U &= \frac{P_i^1}{(N_0)_U} = \frac{IBO \times (P_i^1)_{sat}}{(N_0)_U} = \\ &= IBO \frac{(P_o^1)_{sat}}{(G_{sat})_{SL} \times (N_0)_U} = IBO \left(\frac{C}{N_0}\right)_{U,sat} \quad (Hz)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\left(\frac{C}{N_0}\right)_D &= OBO \times (EIRP_{sat})_{SL} \frac{1}{L_D} \frac{1}{k} \left(\frac{G}{T}\right)_{ES} = \\ &= OBO \times \left(\frac{C}{N_0}\right)_{D,sat} \quad (Hz)\end{aligned}$$



# Έκφραση για το Λόγο $(C/N_o)_T$

## ◆ Περίπτωση Με Παρεμβολές

- Η υπέρθεση των παρεμβολών στο χρήσιμο σήμα της ζεύξης από σταθμό σε σταθμό γίνεται σε δύο επίπεδα
  - Στην είσοδο του επαναλήπτη στην άνω ζεύξη
  - Στην είσοδο του δέκτη του επίγειου σταθμού στην κάτω ζεύξη
- Το φαινόμενο είναι παρόμοιο με την αύξηση του θερμικού θορύβου στη ζεύξη

$$(N_o) = (N_o)_{\text{χωρίς παρεμβολές}} + (N_o)_I \quad (W / Hz)$$

# Έκφραση για το Λόγο $(C/N_o)_T$

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_D^{-1} = \left(\frac{C}{N_o}\right)_{\text{χωρις παρεμβολες } D}^{-1} + \left(\frac{C}{N_o}\right)_{I,D}^{-1} \quad (Hz^{-1})$$

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_U^{-1} = \left(\frac{C}{N_o}\right)_{\text{χωρις παρεμβολες } U}^{-1} + \left(\frac{C}{N_o}\right)_{I,U}^{-1} \quad (Hz^{-1})$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{C}{N_o}\right)_T^{-1} &= \left(\frac{C}{N_o}\right)_{\chi\pi U}^{-1} + \left(\frac{C}{N_o}\right)_{\chi\pi D}^{-1} + \left(\frac{C}{N_o}\right)_I^{-1} \quad (Hz^{-1}) \\ &= \left(\frac{C}{N_o}\right)_{\chi\pi U}^{-1} + \left(\frac{C}{N_o}\right)_{\chi\pi D}^{-1} + \left(\frac{C}{N_o}\right)_{I,U}^{-1} + \left(\frac{C}{N_o}\right)_{I,D}^{-1} \end{aligned}$$

# Έκφραση για το Λόγο $(C/N_o)_T$

## ◆ Πιθανές αιτίες παρεμβολής είναι

### ■ Uplink

- Ανεπιθύμητη ισχύς στην είσοδο του δορυφόρου από ES που στοχεύει σε γειτονικό δορυφόρο.
- Ανεπιθύμητη ισχύς στην είσοδο του δορυφόρου από ISL με γειτονικό δορυφόρο.
- Ανεπιθύμητη ισχύς στην είσοδο του δορυφόρου από προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης στο HPA του ES.
- Ανεπιθύμητη ισχύς στην είσοδο του δορυφόρου από την εκπομπή ορθογωνικής πόλωσης από το ES.

# Έκφραση για το Λόγο $(C/N_o)_T$

## ◆ Πιθανές αιτίες παρεμβολής είναι

### ■ Downlink

- Ανεπιθύμητη ισχύς στην είσοδο ES από γειτονικό δορυφόρο.
- Ανεπιθύμητη ισχύς στην είσοδο του ES από προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης στο HPA του δορυφόρου.
- Ανεπιθύμητη ισχύς στην είσοδο του ES από την εκπομπή ορθογωνικής πόλωσης από το δορυφόρο.
- Ανεπιθύμητη ισχύς στην είσοδο του ES από την εκπομπή άλλων επίγειων συστημάτων που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα και βρίσκονται κοντά στο ES.

# Έκφραση για το Λόγο $(C/N_o)_T$

- ◆ Τελικά ο συνολικός λόγος μπορεί να γραφεί

$$\left(\frac{C}{N}\right)_T = \left[ \frac{N_U}{C} + \frac{N_D}{C} + \frac{I_{intermod}}{C} + \frac{I_{crosspol}}{C} + \frac{I_{adjsat}}{C} + \frac{I_{terrestrial}}{C} \right]^{-1}$$

- ◆ Όπου οι τρεις πρώτοι όροι της παρεμβολής εμπεριέχουν τις επιδράσεις στο uplink και στο downlink.

# Παράδειγμα

## 2.10 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Πρόκειται να λειτουργήσει μια ραδιοζεύξη μέσω δορυφόρου μεταξύ δυο επίγειων σταθμών (Σχ. 2.29). Τα δεδομένα έχουν ως εξής:

- Συχνότητα uplink:  $f_U = 14$  GHz
- Συχνότητα downlink:  $f_D = 12$  GHz
- Απώλεια διαδρομής downlink:  $L_D = 206$  dB
- Για το δορυφόρο (SL):
- Η πυκνότητα ροής ισχύος, η οποία απαιτείται για τον κορεσμό του επαναλήπτη, είναι:

$$(\Phi_{\text{sat}})_{\text{SL}} = -90 \text{ dBW/m}^2$$

- Απολαβή επί του άξονα της κεραίας λήψης:  $G_{R_{\text{max}}} = 30$  dB
- Δείκτης ποιότητας:  $(G/T)_{\text{SL}} = 3.4 \text{ dBK}^{-1}$
- Χαρακτηριστική του επαναλήπτη (για λειτουργία με απλό φέρον), η οποία μοντελοποιείται από τη σχέση:

$$\text{OBO (dB)} = \text{IBO (dB)} + 6 - 6 \exp[\text{IBO (dB)}/6]$$

- Ισοδύναμη ιστροπική εκπεμπόμενη ισχύς στον κόρο:

$$(\text{EIRP}_{\text{sat}})_{\text{SL}} = 50 \text{ dBW}$$

- Απολαβή επί του άξονα της κεραίας εκπομπής:  $G_{T_{\text{max}}} = 40$  dBi

Θα αγνοηθούν οι ακόλουθες απώλειες:

- Στην εκπομπή και λήψη:  $L_{FRX} = L_{FTX} = 0$  dB
- Ασυμφωνία πόλωσης:  $L_{POL} = 0$  dB
- Απώλειες λόγω μη ευθυγράμμισης:  $L_T = L_R = 0$  dB
- Για τον επίγειο σταθμό (ES):
- Δείκτης ποιότητας:  $(G/T)_{\text{ES}} = 25 \text{ dBK}^{-1}$

Υποτίθεται ότι δεν υπάρχει παρεμβολή άλλων σημάτων.

# Παράδειγμα

## 2.10.1 Υπολογισμός της απολαβής του επαναλήπτη στον κόρο $(G_{SAT})_{SL}$

$$(G_{sat})_{SL} = (P_o^1)_{sat} / (P_i^1)_{sat}$$

Από τη σχέση (2.55), έχουμε:

$$(P_o^1)_{sat} = (EIRP_{sat})_{SL} L_T L_{FTX} / G_{Tmax} \quad (W)$$

Έτσι, είναι:

$$(P_o^1)_{sat} = 50 \text{ dBW} - 40 \text{ dB} = 10 \text{ dBW} = 10 \text{ W}$$

Από τη σχέση (2.56), έχουμε:

$$(P_i^1)_{sat} = (\Phi_{sat})_{SL} G_{Rmax} / L_{FRX} L_R L_{POL} (4\pi / \lambda_U^2) \quad (W)$$

Έτσι, είναι:

$$(P_i^1)_{sat} = -90 \text{ dBW/m}^2 + 30 \text{ dB} - 44.4 \text{ dBm}^2 = -104.4 \text{ dBW} = 36 \mu\text{W}$$
$$(G_{sat})_{SL} = (P_o^1)_{sat} / (P_i^1)_{sat} = 10 \text{ dBW} - (-104.4 \text{ dBW}) = 114.4 \text{ dB}$$

# Παράδειγμα

2.10.2 Υπολογισμός του λόγου  $C/N_0$  για το uplink και το downlink και τη συνολική ζεύξη, όταν ο επαναλήπτης λειτουργεί στον κόρο.

Από τη σχέση (2.61), έχουμε:

Sat: separation by axis satellite!!

$$(C/N_0)_{U,sat} = (P_i^1)_{sat}/kT_U = (P_i^1)_{sat}(G/T)_{SL}/kG_{Rmax}$$

$$(C/N_0)_{U,sat} = -104.4 + 3.4 - (-228.6) - 30 = \underline{97.6 \text{ dBHz}}$$

$$(C/N_0)_{D,sat} = (EIRP_{sat})_{SL}(1/L_D)(G/T)_{ES}(1/k) \quad (\text{Hz})$$

$$(C/N_0)_{D,sat} = 50 - 206 + 25 - (-228.6) = 97.6 \text{ dBHz}$$

$$(C/N_0)_{T,sat}^{-1} = (C/N_0)_{U,sat}^{-1} + (C/N_0)_{D,sat}^{-1} \quad (\text{Hz}^{-1})$$

$$(C/N_0)_{T,sat} = 94.6 \text{ dBHz}$$



# Παράδειγμα

2.10.3 Υπολογισμός της αναδίπλωσης ισχύος εισόδου IBO και της αναδίπλωσης ισχύος εξόδου OBO για την επίτευξη  $(C/N_0)_T = 80$  dBHz και αντιστοίχων τιμών των  $(C/N_0)_U$  και  $(C/N_0)_D$ .

Πρέπει να ισχύει:

$$(C/N_0)_U^{-1} + (C/N_0)_D^{-1} = 10^{-8} \text{ Hz}^{-1}$$

Έτσι, είναι:

$$(C/N_0)_T = 74.2 \text{ dBHz} \quad \text{IBO}^{-1} (C/N_0)_{U,\text{sat}}^{-1} + \text{OBO}^{-1} (C/N_0)_{D,\text{sat}}^{-1} = 10^{-8} \text{ Hz}^{-1}$$

Αυτό μας δίνει:

$$10^{-\text{IBO}(\text{dB})/10} + 10^{-\text{OBO}(\text{dB})/10} = 10^{1.76} = \underline{\underline{39.6}} \quad \left[ (C/N_0)_{U,\text{sat}} = 97.6 \text{ dBHz} \right]$$

με:

$$\text{OBO}(\text{dB}) = \text{IBO}(\text{dB}) + 6 - 6 \exp(\text{IBO}(\text{dB})/6)$$

Η αριθμητική λύση μας δίνει:

$$\text{IBO} = -16.4 \text{ dB}$$

$$\text{OBO} = -10.8 \text{ dB}$$

Έτσι, είναι:

$$(C/N_0)_U = \text{IBO}(C/N_0)_{U,\text{sat}} = -16.4 \text{ dB} + 97.6 \text{ dBHz} = 81.2 \text{ dBHz}$$

$$(C/N_0)_D = \text{OBO}(C/N_0)_{D,\text{sat}} = -10.8 \text{ dB} + 97.6 \text{ dBHz} = 86.8 \text{ dBHz}$$

# Παράδειγμα

2.10.4 Η τιμή του  $(C/N_0)_T$  που παράγεται υπό την επίδραση βροχής, η οποία προκαλεί εξασθένηση 6 dB στο uplink

Η εξασθένηση των 6 dB στο uplink ελαττώνει την αναδίπλωση ισχύος στην είσοδο κατά 6 dB. Η νέα τιμή της IBO γίνεται:

$$IBO \text{ (dB)} = -16.4 \text{ dB} - 6 \text{ dB} = -22.4 \text{ dB}$$

Η νέα τιμή της αναδίπλωσης της ισχύος εξόδου, η οποία αντιστοιχεί στην τιμή αυτή, είναι:

$$OBO \text{ (dB)} = IBO \text{ (dB)} + 6 - 6 \exp(IBO \text{ (dB)}/6) = -16.5 \text{ dB}$$

Έτσι, έχουμε:

$$\begin{aligned}(C/N_0)_U &= IBO(C/N_0)_{U,sat} = -22.4 \text{ dB} + 97.6 \text{ dBHz} = 75.2 \text{ dBHz} \\(C/N_0)_D &= OBO(C/N_0)_{D,sat} = -16.5 \text{ dB} + 97.6 \text{ dBHz} = 81.1 \text{ dBHz}\end{aligned}$$

και, από τη σχέση (2.61):

$$(C/N_0)_T = 74.2 \text{ dBHz}$$

Για να επιτευχθεί και πάλι η απαιτούμενη τιμή του λόγου  $(C/N_0)_T = 80 \text{ dBHz}$ , είναι απαραίτητο να αυξηθεί η ισχύς  $(EIRP)_{ES}$  του επίγειου σταθμού εκπομπής κατά 6 dB.

# Παράδειγμα

2.10.5 Η τιμή του  $(C/N_0)_T$  που παράγεται υπό την επίδραση βροχής, η οποία προκαλεί εξασθένηση 6 dB στο downlink, με ελάττωση 2 dB στο δείκτη ποιότητας του επίγειου σταθμού, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας θορύβου της κεραίας

Η τιμή του  $(C/N_0)_D$  ελαττώνεται κατά 8 dB, έτσι ώστε είναι:  $(C/N_0)_D = 86.8 \text{ dBHz} - 8 \text{ dB} = 78.8 \text{ dBHz}$ . Από αυτά, έχουμε:  $(C/N_0)_T = 76.8 \text{ dBHz}$ .

Για να επιτευχθεί και πάλι η απαιτούμενη τιμή  $(C/N_0)_T = 80 \text{ dBHz}$ , είναι απαραίτητο να αυξήσουμε την  $(EIRP)_{ES}$  του επίγειου σταθμού εκπομπής κατά τέτοιο τρόπο ώστε η τιμή της IBO να ικανοποιεί την εξίσωση:

$$IBO^{-1}(C/N_0)_{U,sat}^{-1} + OBO^{-1}(C/N_0)_{D,sat}^{-1} = 10^{-8} \text{ Hz}^{-1}$$

στην οποία είναι:

$$(C/N_0)_{U,sat} = 97.6 \text{ dBHz}$$

$$(C/N_0)_{D,sat} = 97.6 \text{ dBHz} - 8 \text{ dB} = 89.6 \text{ dBHz}$$

Αυτά μας δίνουν:

$$IBO = -13 \text{ dB}$$

$$OBO = -7.7 \text{ dB}$$

Έτσι, είναι απαραίτητο να αυξήσουμε την  $(EIRP)_{ES}$  της εκπομπής του επίγειου σταθμού κατά  $(-13 \text{ dB}) - (-16.4 \text{ dB}) = 3.4 \text{ dB}$ .

Άρα, έχουμε:

$$(C/N_0)_U = IBO(C/N_0)_{U,sat} = -13 \text{ dB} + 97.6 \text{ dBHz} = 84.6 \text{ dBHz}$$

$$(C/N_0)_D = OBO(C/N_0)_{D,sat} = -7.7 \text{ dB} + 89.6 \text{ dBHz} = 81.9 \text{ dBHz}$$