

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ



ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΤΕ 10 – Δορυφορικές Επικοινωνίες Χειμερινό Εξάμηνο

Διάλεξη 3^η

Επίκουρος Καθηγητής

Νικόλαος Χ. Σαγιάς

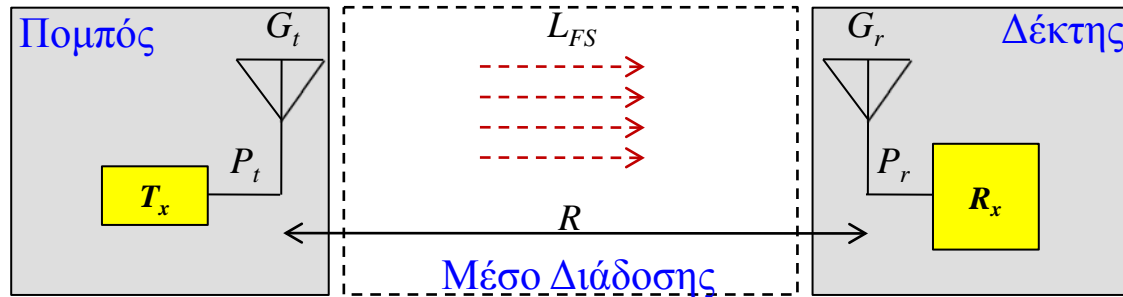
Webpage: <http://eclass.uop.gr/courses/TST207>

e-mail: nsagias@uop.gr

Περιεχόμενα

- Εισαγωγικά
- Τροχιές
- **Ανάλυση ραδιοζεύξεων**
- Τεχνικές εκπομπής/λήψης
- Πολλαπλή πρόσβαση
- Δορυφορικά δίκτυα
- Ειδικά θέματα

Ανάλυση Ραδιοζεύξεων



- Αντικείμενο των ραδιοζεύξεων είναι η μελέτη των επιδόσεων του παραπάνω συστήματος
- Για παράδειγμα, ο προσδιορισμός της λαμβανόμενη ισχύος (νόμος του Friis) είναι

$$P_r = P_t G_t G_r \underbrace{\left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2}_{1/L_{FS}}$$

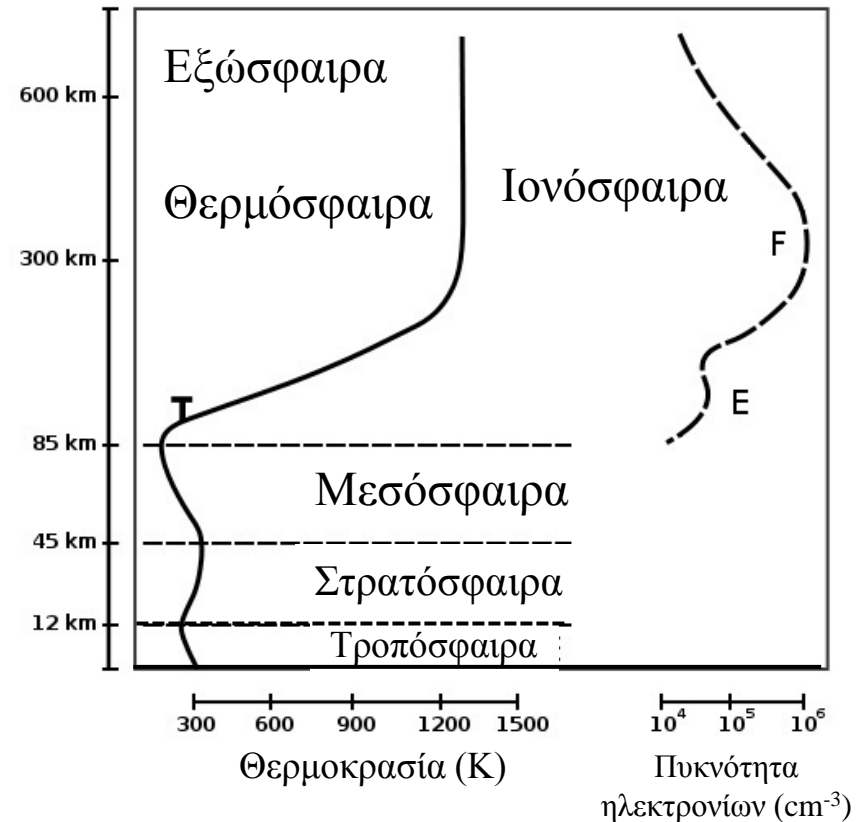
με λ το μήκος κύματος του ραδιοκύματος που εκπέμπεται

- Για μία μελέτη κοντά στην πραγματικότητα, επιπλέον, πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν:
 - Την επίδραση του μέσου διάδοσης (ατμόσφαιρα, ιονόσφαιρα)
 - Ατέλειες του εξοπλισμού εκπομπής και λήψης (π.χ. απώλειες κυματοδηγού, κακή σκόπευση)
 - Το θόρυβο που εισάγεται στο δέκτη

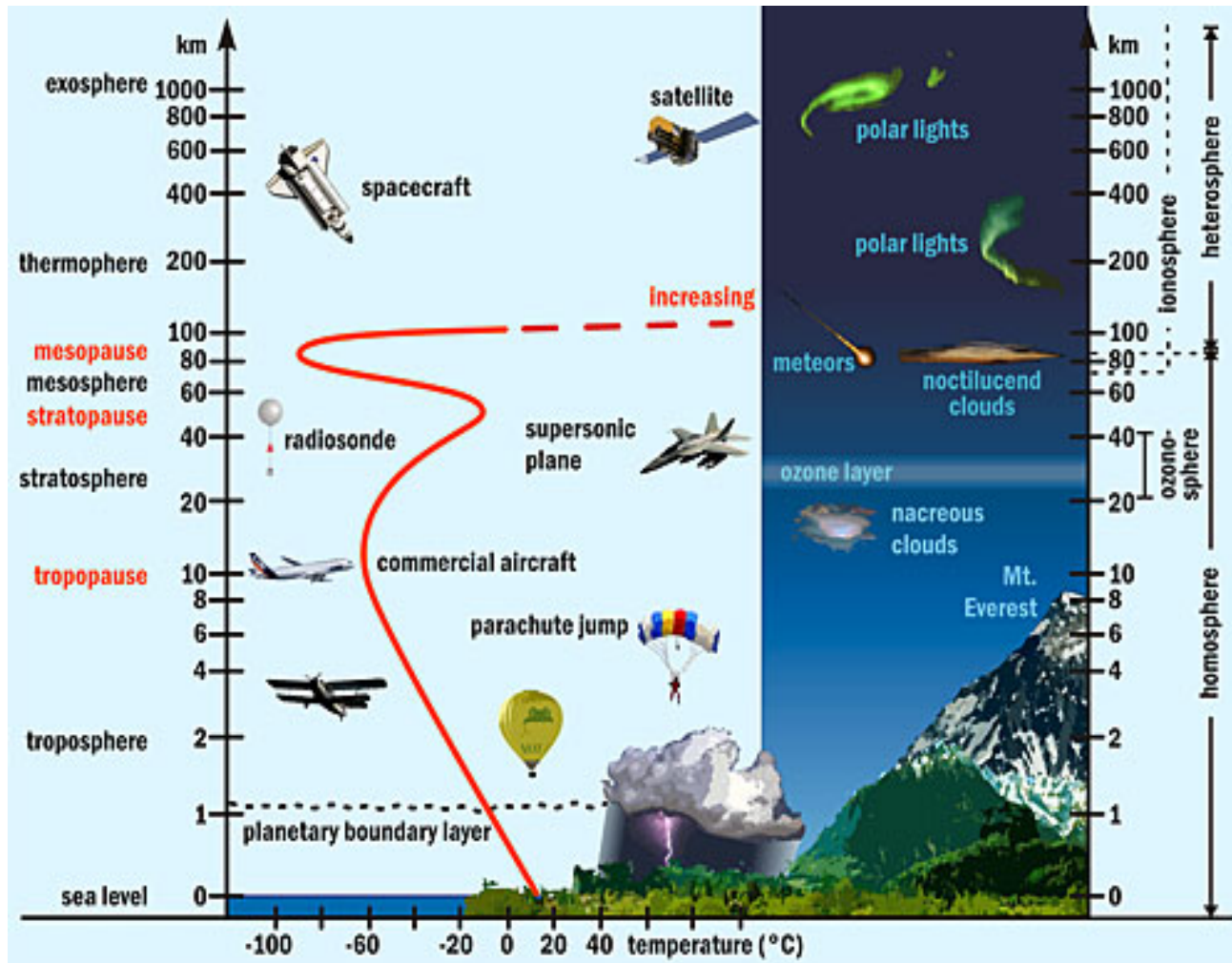
Επίδραση της Ατμόσφαιρας

- Η Γη περιβάλλεται από στοιβάδες μείγματος αερίων, οι οποίες συνθέτουν την ατμόσφαιρα.
- Το μείγμα αερίων, αποτελείται από:
 - Οξυγόνο 21%
 - Άζωτο 78%
 - Άλλα αέρια, CO₂, H₂O, O₃, σκόνη, κλπ
- Η ατμόσφαιρα περιλαμβάνει
 - Τροπόσφαιρα (καιρικά φαινόμενα)
 - Στρατόσφαιρα (όζων)
 - Μεσόσφαιρα
 - Θερμόσφαιρα
 - Εξώσφαιρα

} Ιονόσφαιρα

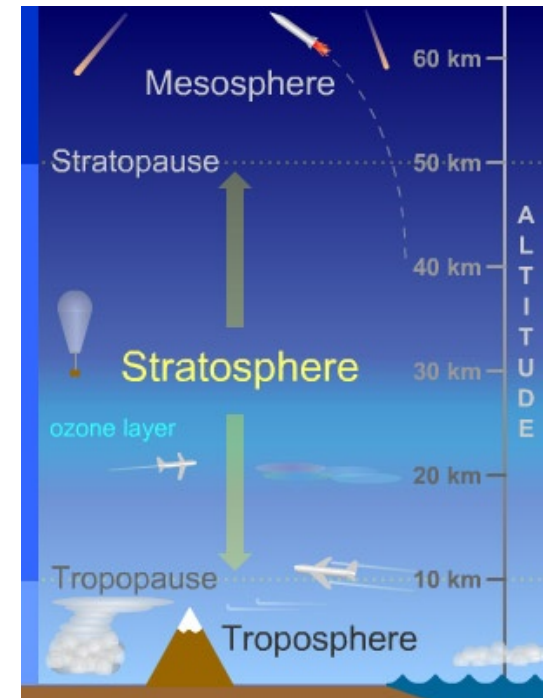


Επίδραση της Ατμόσφαιρας



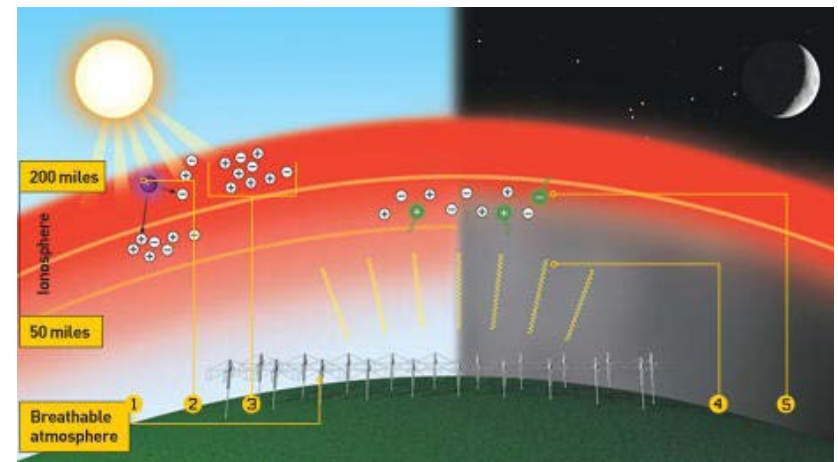
Επίδραση της Ατμόσφαιρας

- Η τροπόσφαιρα είναι το στρώμα με τα πρώτα 4 km από την επιφάνεια της Γης
- Στην τροπόσφαιρα εξελίσσονται τα καιρικά φαινόμενα
- Η τροπόσφαιρα προκαλεί
 - Απώλειες λόγω απορρόφησης σε συχνότητες > 10 GHz
 - Αποπόλωση σε περίπτωση έντονης βροχόπτωσης
 - Σπινθηρισμούς (*scintillations*) που είναι μεταβολές του δείκτη διάθλασης
 - Διαλείψεις πολυδιάθλασης σε χαμηλές γωνίες ανύψωσης $< 10^\circ$



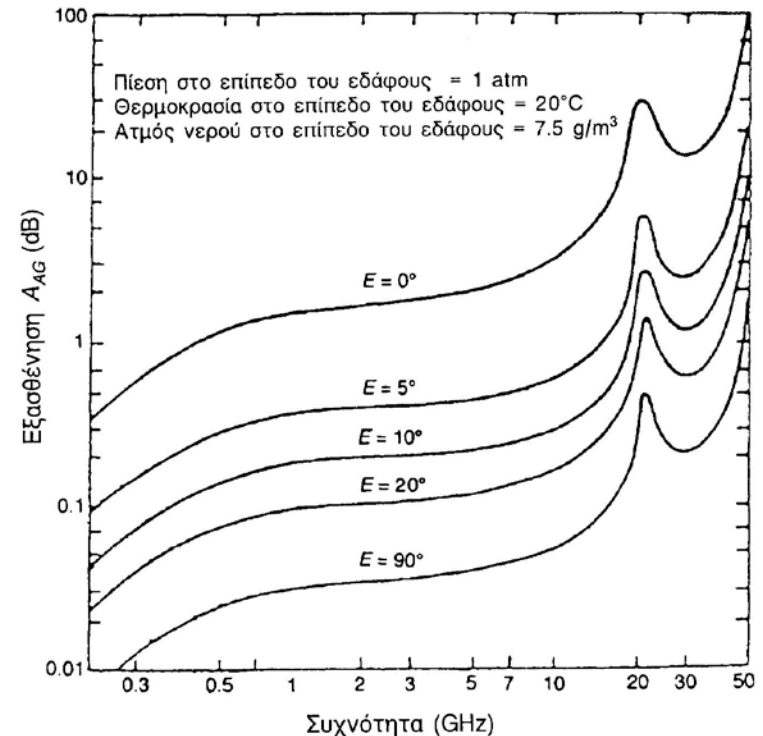
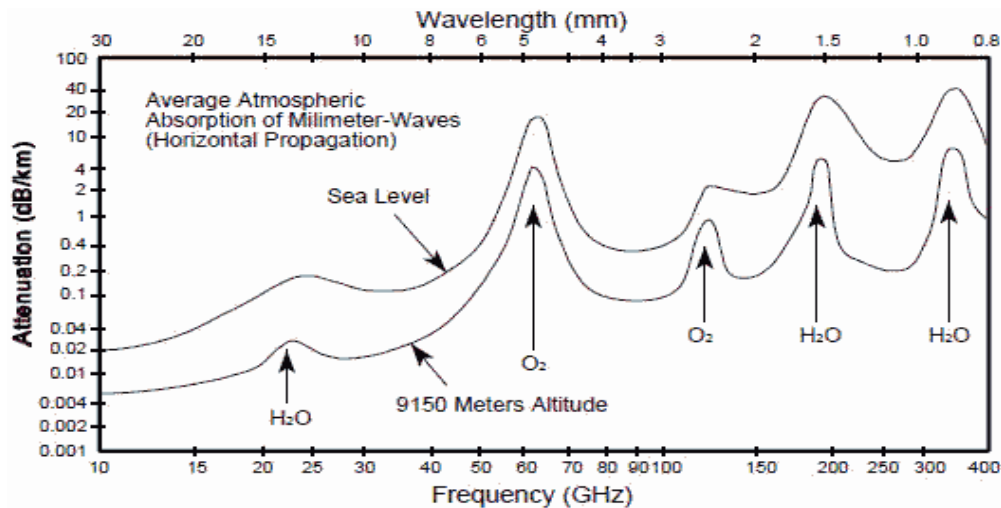
Επίδραση της Ατμόσφαιρας

- Η ιονόσφαιρα αποτελεί την εξωτερική στοιβάδα της ατμόσφαιρας
- Είναι ιονισμένη λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας
- Δεν είναι ομογενής, ενώ περιέχει νέφη κινούμενων ηλεκτρονίων
- Η τροπόσφαιρα προκαλεί
 - Σπινθηρισμούς
 - Απορρόφηση (σε χαμηλές συχνότητες)
 - Διακυμάνσεις στην κατεύθυνση όδευσης (σε χαμηλές συχνότητες)
 - Καθυστέρηση διάδοσης (σε χαμηλές συχνότητες)
 - Διασπορά (σε χαμηλές συχνότητες)
 - Στροφή Faraday (εντονότερη σε χαμηλές συχνότητες, γωνία στροφής αντιστρόφως ανάλογη του f^2)



Επίδραση της Ατμόσφαιρας

- Η ατμοσφαιρική απορρόφηση εξαρτάται από:
 - Τη συχνότητα εκπομπής
 - Τη γωνία ανύψωσης
- Τοπικά μέγιστα:
 - Στη συχνότητα συντονισμού 22.2 GHz του H₂O
 - Στη συχνότητα συντονισμού 60 GHz του O₂



Τροποσφαιρικές Κατακρημνίσεις

Ρυθμός βροχόπτωσης (*rain rate*) ονομάζεται ο ρυθμός με τον οποίο το νερό συσσωρεύεται σε βροχομετρητή ευρισκόμενος στο έδαφος στην περιοχή ενδιαφέροντος (π.χ. εκεί που πρόκειται να εγκατασταθεί επίγειος σταθμός)

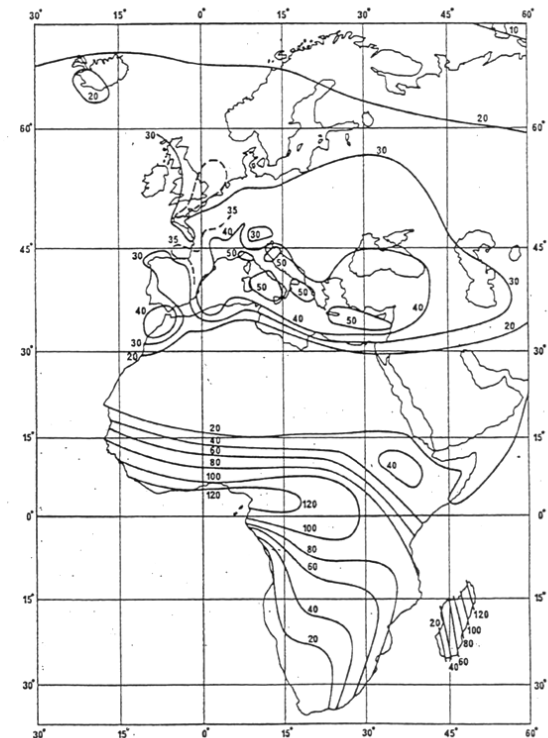
R_e : ο ρυθμός βροχόπτωσης (mm/h) μετράται με βροχόμετρα ή βρίσκεται από πίνακες

e : το ποσοστό του χρόνου που το R_e ξεπερνάει μια δεδομένη τιμή σε 100%/year

π.χ.: $R_{0.001}$ αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια $0.001 \times 365 \text{days} \times 24 \text{h} \times 60 \text{min} \approx 5.3 \text{ min/year}$

CARRIER TRANSMISSION BUDGET
MAPS OF RAINFALL CONTOURS
(MAP 1 out of 3)

Contours of RAINFALL RATE $R_{0.01}$ (mm/h)
exceeded for 0.01% OF AN AVERAGE YEAR :



Τροποσφαιρικές Κατακρημνίσεις

Ειδική εξασθένηση (*specific attenuation*):

Είναι η εξασθένιση της ισχύος του σήματος ανά km μέσα στο στρώμα της βροχής

$$\gamma_R = k R_e^a \text{ [dB/km]}$$

$$k = \frac{1}{2} [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2(E) \cos(2\tau)]$$

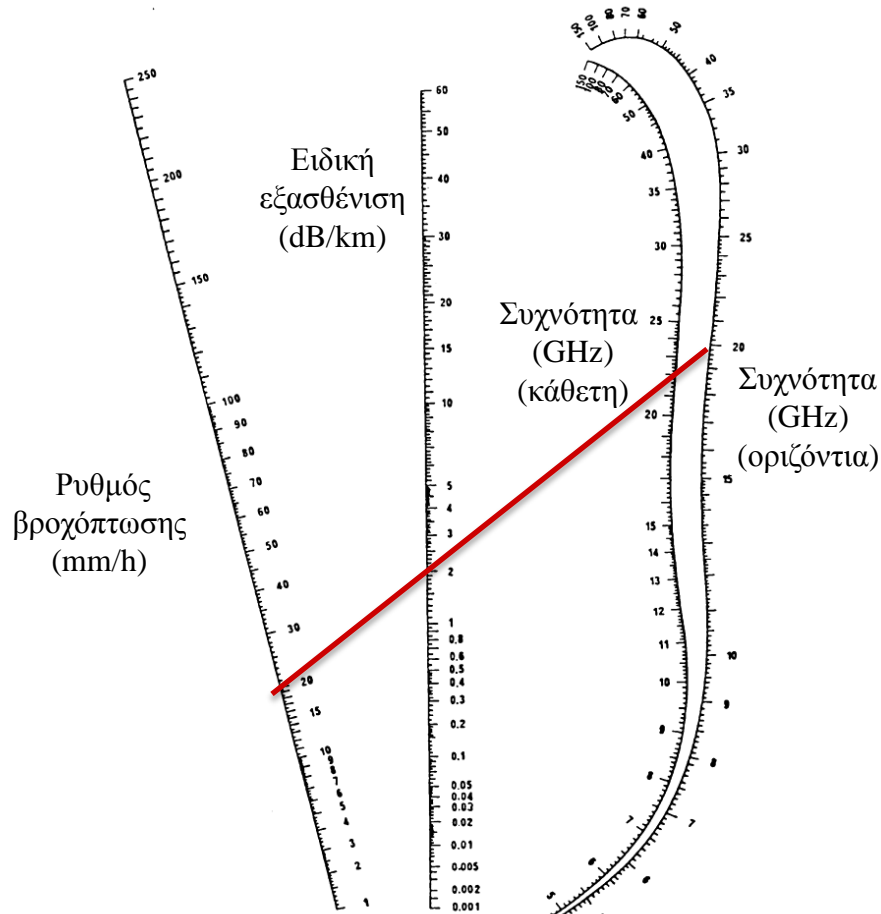
$$a = \frac{1}{2k} [k_H a_H + k_V a_V + (k_H a_H - k_V a_V) \cos^2(E) \cos(2\tau)]$$

k_H, k_V, a_H, a_V : εξαρτώνται από τη συχνότητα και λαμβάνονται από πίνακες

E : η γωνία ανύψωσης

τ : η γωνία κλίσης της πόλωσης (π.χ. για κυκλική πόλωση, $\tau = 45^\circ$)

Τροποσφαιρικές Κατακρημνίσεις

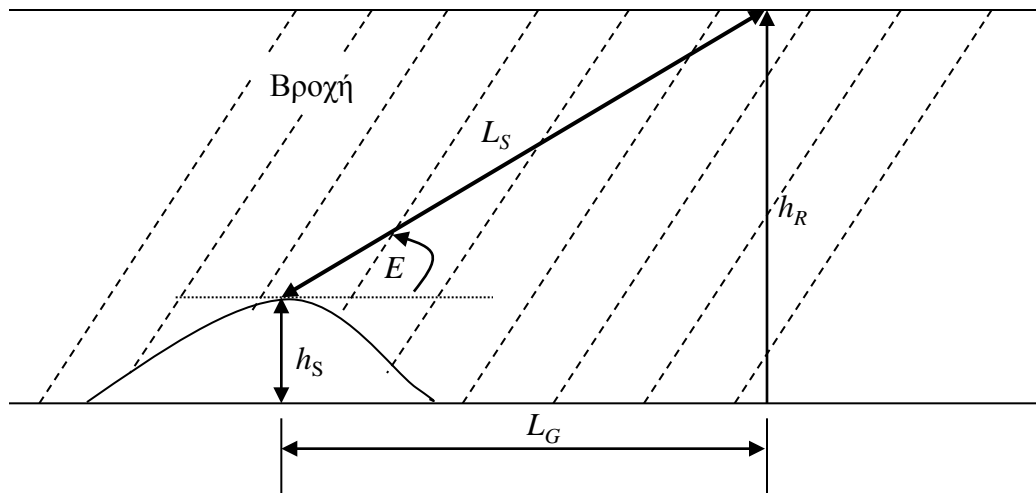


☑ Με κυκλική πόλωση, χρησιμοποιούμε τον αριθμητικό μέσο της εξασθένησης με οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση.

Τροποσφαιρικές Κατακρημνίσεις

Ολική εξασθένιση (total attenuation): $A_{\text{RAIN}} = \gamma_R L_e$ [dB]

L_e : το ενεργό μήκος της διαδρομής (effective path length) του σήματος διαμέσου της βροχής



L_S : το γεωμετρικό μήκος της διαδρομής του σήματος διαμέσου της βροχής, $L_S = (h_R - h_S)/\sin(E)$

$$h_R = \begin{cases} 3 + 0.028 (\text{γεωγρ. πλ.}) [\text{km}], & \text{αν } 0^\circ < \text{γεωγρ. πλ.} < 36^\circ \\ 4 - 0,075 (\text{γεωγρ. πλ.} - 36^\circ) [\text{km}], & \text{αν γεωγρ. πλ.} \geq 36^\circ \end{cases}$$

Τροποσφαιρικές Κατακρημνίσεις

Ενεργό μήκος της διαδρομής: $L_e = L_S r_e$

r_e : ο συντελεστής ελάττωσης (*reduction factor*),
εξαρτάται από e και $L_G = L_S \cos(E)$

e (%)	r_e
0.001	$10 / (10 + L_G)$
0.01	$90 / (90 + 4 L_G)$
0.1	$180 / (180 + L_G)$
1	1

Μεθοδολογία προσδιορισμού A_{RAIN} :

- Καθορισμός ρυθμού βροχόπτωσης από πίνακες R_e
- Υπολογισμός ύψους βροχής h_R
- Υπολογισμός γεωμετρικού μήκους διαδρομής h_S
- Υπολογισμός του συντελεστή ελάττωσης r_e
- Υπολογισμός ενεργού μήκους διαδρομής L_e
- Υπολογισμός ειδικής εξασθένησης γ_R
- Υπολογισμός A_{RAIN}

Τροποσφαιρικές Κατακρημνίσεις

- Εξασθένηση λόγω νέφωσης ή ομίχλης

Ειδική εξασθένηση λόγω νέφωσης ή ομίχλης:

$$\gamma_c = K M \text{ [dB/km]}$$

$K = 1.1 \times 10^{-3} F^{1.8}$ [(dB/km) / (g/m³)], με F τη φέρουσα συχνότητα σε GHz

M : η συγκέντρωση του νερού στα σύννεφα ή στην ομίχλη σε g/m³

- Εξασθένηση λόγω νέφωσης πάγου
 - Μικρές απώλειες
 - Πρόβλημα από συσσώρευση πάγου στον ανακλαστήρα της κεραίας
- Εξασθένηση που οφείλεται σε αμμοθύελλες

Επίδραση της Ατμόσφαιρας στην Πόλωση

- Αποπόλωση λόγω ιονόσφαιρας
- Αποπόλωση λόγω βροχής
- Αποπόλωση λόγω πάγου

Διαχωρισμός λόγω ορθογωνικής πόλωσης για ποσοστό χρόνου $p\%$:

$$\text{XPD}(p) = \text{XPD}_{\text{rain}} - C_{\text{ice}} \text{ [dB]}$$

$$\text{XPD}_{\text{rain}} = C_f - C_A + C_\tau + C_\theta + C_\sigma \text{ [dB]}$$

$$C_{\text{ice}} = \frac{1}{2} \text{XPD}_{\text{rain}} [0.3 + 0.1 \log(p)] \text{ [dB]}$$

$$C_f = 30 \log(f) \text{ [dB]}$$

$$C_A = V(f) \log[A_{\text{rain}}(p)] \text{ [dB]}$$

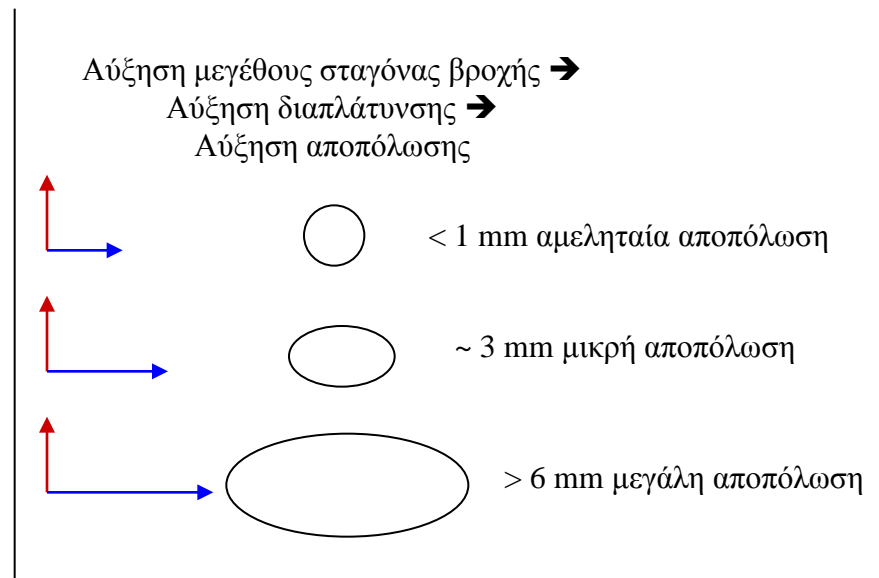
$$V(f) = \begin{cases} 12.8 f^{0.19} \text{ [dB]}, & 8 \text{ GHz} \leq f < 20 \text{ GHz} \\ 22.6 \text{ dB}, & 20 \text{ GHz} \leq f \leq 35 \text{ GHz} \end{cases}$$

$$C_\tau = -10 \log \{ 1 - 0.484 [1 + \cos(4\tau)] \} \text{ [dB]}$$

$$C_\theta = -40 \log [\cos(E)] \text{ [dB]}, \quad E \leq 60^\circ$$

$$C_\sigma = 0.0052 \sigma^2 \text{ [dB]}$$

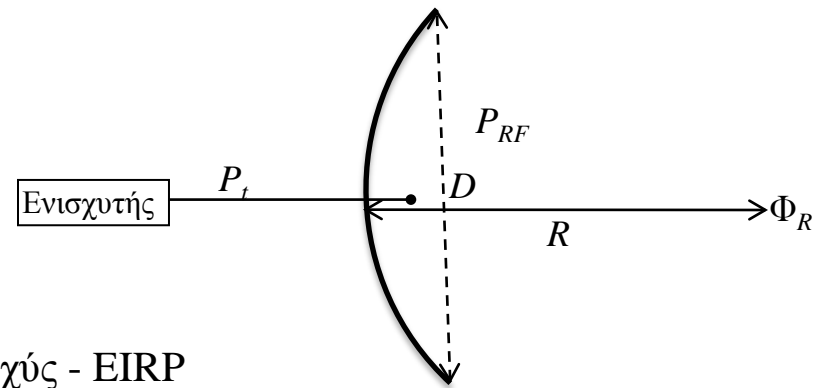
f : συχνότητα σε GHz
 E : γωνία ανύψωσης
 τ : έγκλιση της έλλειψης



σ	0°	5°	10°	15°
p	1%	0.1%	0.01%	0.01%

Κεραίες

- Απολαβή (*gain*) $G = P_{RF} / P_t$



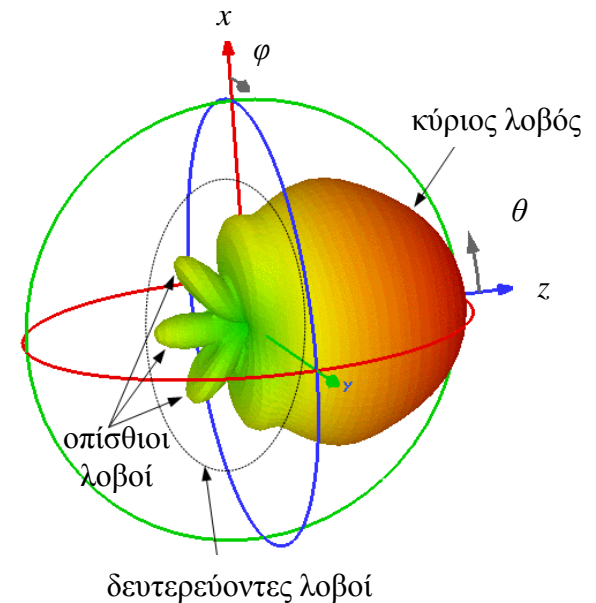
- Ενεργός ιστροπική ακτινοβλούμενη ισχύς - EIRP (*equivalent isotropically radiated power*)

$$EIRP = P_t G$$

- Πυκνότητα ροής ισχύος

$$\Phi_R = \frac{EIRP}{4\pi R^2}$$

- Διάγραμμα ακτινοβολίας (*radiation pattern*)



Κεραίες

- Γωνιακό εύρος δέσμης (*angular beamwidth*)

π.χ. για παραβολική κεραία, $\theta_{3dB} = 70 \frac{\lambda}{D}$ μοίρες

- Ενεργό άνοιγμα (*effective aperture*)

$$A_{eff} = \eta A$$

A: γεωμετρική επιφάνεια,

π.χ. για παραβολική κεραία, $A = \pi D^2 / 4$

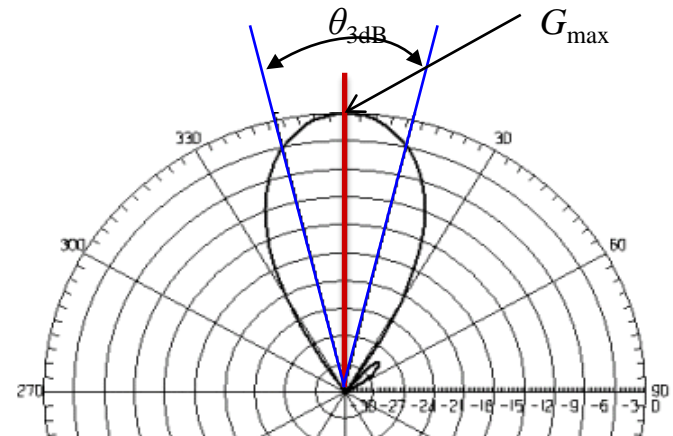
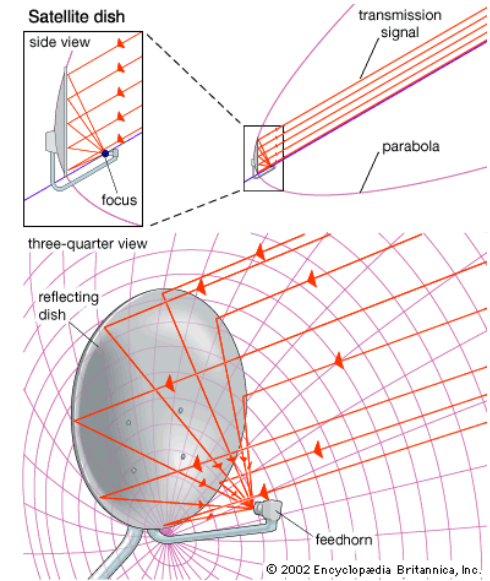
η : απόδοση, σχετίζεται με ατέλειες της κεραίας
τυπικές τιμές είναι μεταξύ 55% και 75%

- Η μέγιστη απολαβή συνδέεται με το ενεργό άνοιγμα

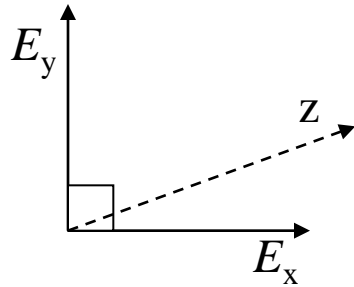
$$G_{max} = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{eff}$$

Άρα, για παραβολική κεραία διαμέτρου D

$$G_{max} = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 = \eta \left(\frac{70\pi}{\theta_{3dB}} \right)^2$$



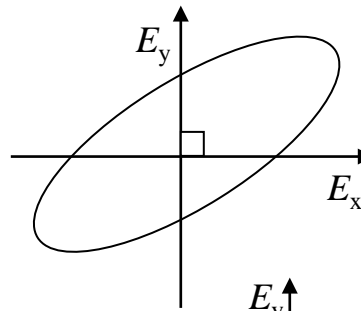
Πόλωση



$$E_x = E_1 \cos(\omega t)$$

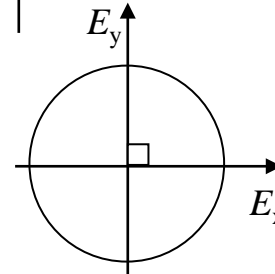
$$E_y = E_2 \sin(\omega t + \varphi)$$

- Ο γεωμετρικός τόπος (γ.τ.) των σημείων στο επίπεδο E_x, E_y είναι έλλειψη (ελλειπτική πόλωση)

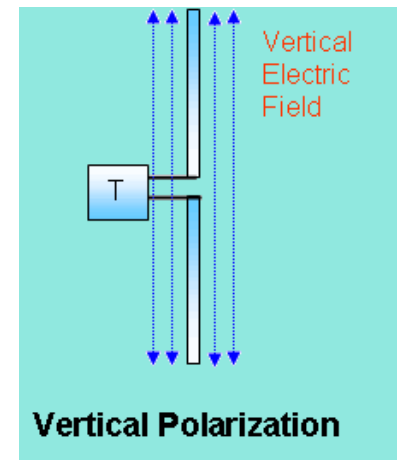
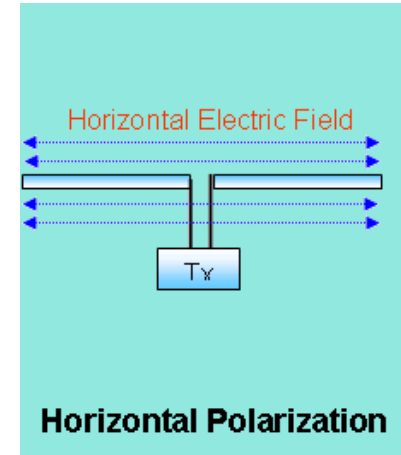
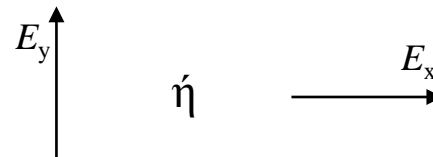


- Αν $\varphi = 0$ και $E_1 = E_2 = E$, ο γ.τ. είναι κύκλος (κυκλική πόλωση)

$$E_x^2 + E_y^2 = E^2$$



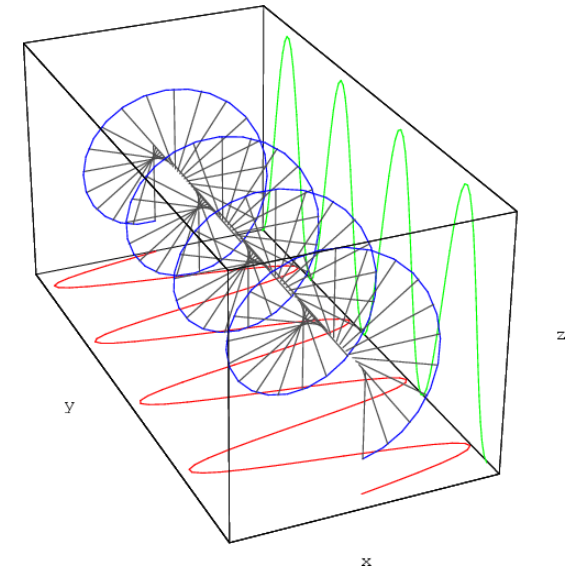
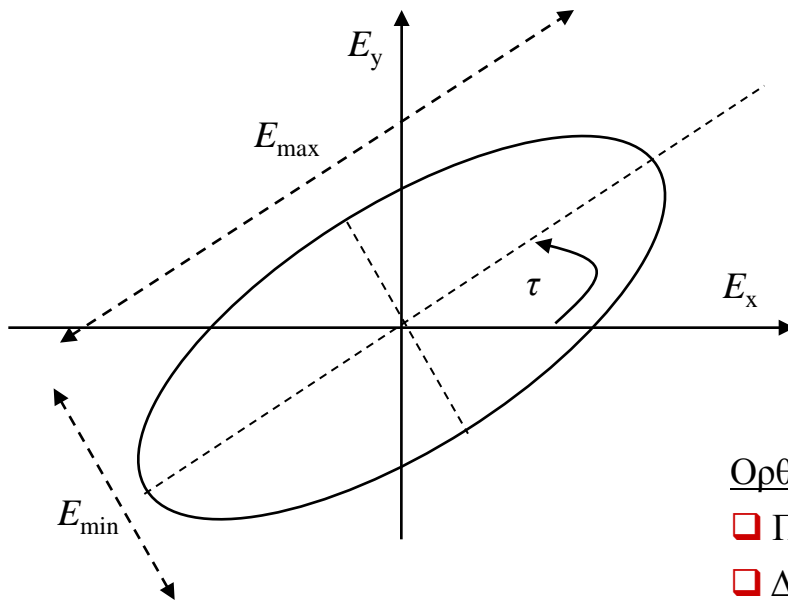
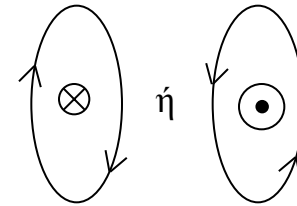
- Αν $E_1 = 0$ ή $E_2 = 0$, ο γ.τ. είναι γραμμή (γραμμική πόλωση)



Πόλωση

Η πόλωση χαρακτηρίζεται από:

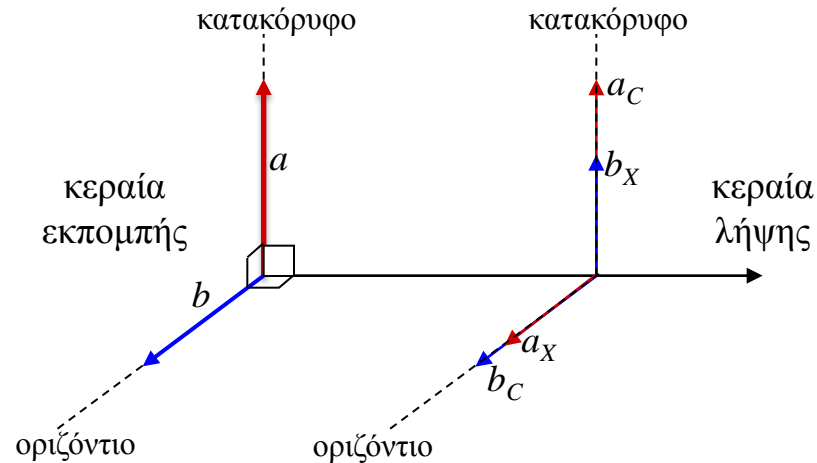
- Τη φορά περιστροφής (δεξιόστροφη ή αριστερόστροφη)
- Τον αξονικό λόγο $AR = E_{\max} / E_{\min}$
- Την έγκλιση τ της έλλειψης



Ορθογώνιες πολώσεις:

- ❑ Πανομοιότυπες ελλείψεις σε αντίθετες φορές
- ❑ Δεξιόστροφες & αριστερόστροφες κυκλικές πολώσεις
- ❑ Δύο κάθετες γραμμικές πολώσεις ορθογώνια & κάθετη

Πόλωση



- Απομόνωση λόγω ορθογωνικής πόλωσης (*cross-polar isolation*)

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

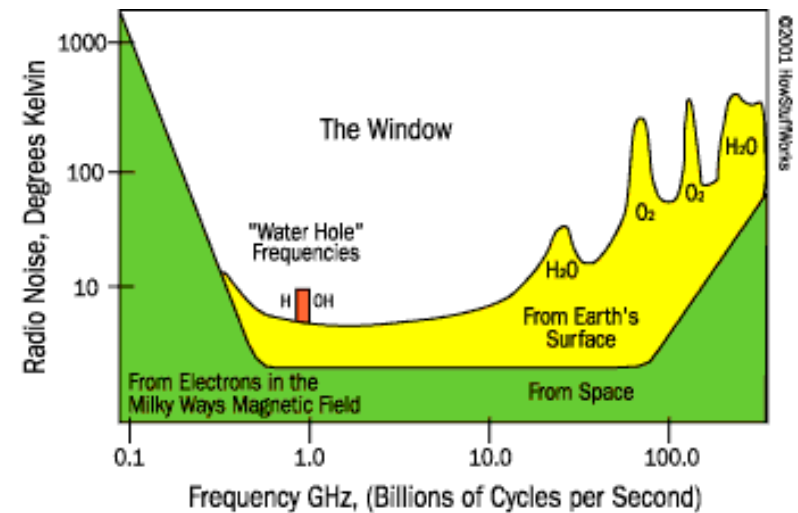
- Διαχωρισμός λόγω ορθογωνικής πόλωσης (*cross-polar discrimination*)

$$XPD = 20 \log \left(\frac{a_c}{a_x} \right) [\text{dB}]$$

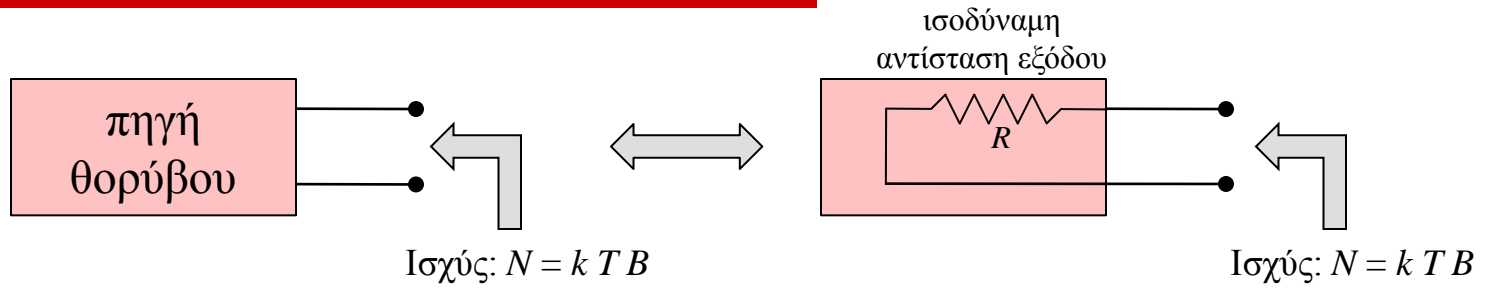
- Επιθυμούμε XPD, XPI > 30 dB

Θόρυβος

- Ως θόρυβο γενικά εννοούμε ανεπιθύμητα σήματα που προστίθενται στο σήμα λήψης
- Είδη θορύβου
 - Θερμικός θόρυβος: Λόγω άτακτης κίνησης ελεύθερων ηλεκτρονίων στις ηλεκτρονικές διατάξεις
 - Φυσικές πηγές ακτινοβολίας εντός της περιοχής λήψης της κεραίας (ηλιακή ακτινοβολία, κοσμική ακτινοβολία, κλπ)



Θόρυβος



- Ισχύς θερμικού θορύβου

$$N = N_0 B = k T B$$

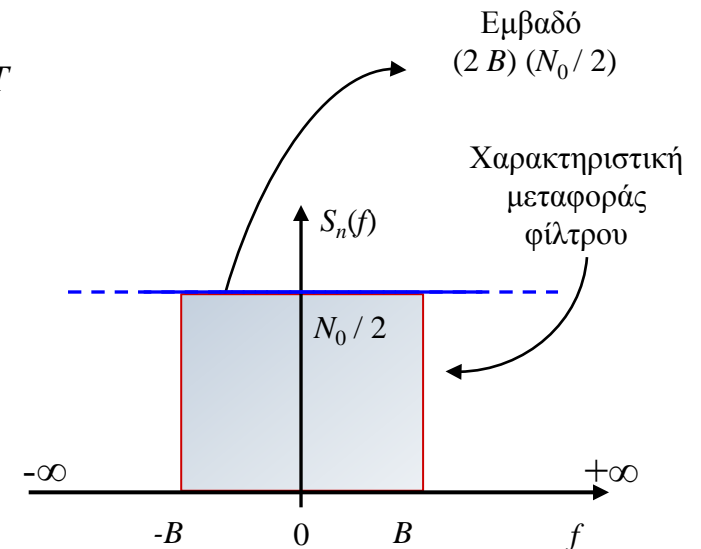
N_0 : φασματική πυκνότητα ισχύος θερμικού θορύβου, $N_0 = k T$

B : εύρος ζώνης της πηγής

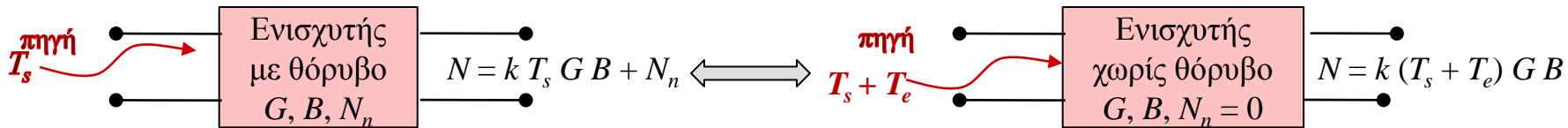
- Θερμοδυναμική θερμοκρασία θορύβου (σε Kelvin)

$$T = N / (k B) = N_0 / k$$

k : σταθερά Boltzmann, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K



Θόρυβος



Ενεργός θερμοκρασία θορύβου

ονομάζεται η θερμοκρασία T_e μιας θερμικής πηγής θορύβου, την οποία θα έπρεπε να βάλουμε στην είσοδο του ενισχυτή αν ήταν “αθόρυβος”, ώστε να μας δώσει στην έξοδο ισχύ ίση με την πρόσθετη ισχύ N_n του πραγματικού ενισχυτή

G : το κέρδος του ενισχυτή

B : εύρος ζώνης του ενισχυτή

k : σταθερά Boltzmann, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K

Εικόνα θορύβου (*noise figure*)

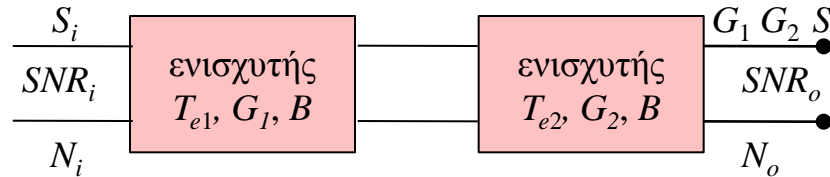
ονομάζεται ο λόγος των SNR της εισόδου προς το SNR της εξόδου για θερμοκρασία δωματίου, $T_s = T_0 = 290$ K (17° C)

$$T_e = T_0 (F - 1)$$

$$F = \frac{SNR_i}{SNR_o} = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} = \frac{S_i/(k T_0 B)}{G S_i/[k (T_0 + T_e) G B]} = 1 + \frac{T_e}{T_0}$$

Θόρυβος

- Ενεργός θερμοκρασία και εικόνα θορύβου δύο ενισχυτών σε σειρά



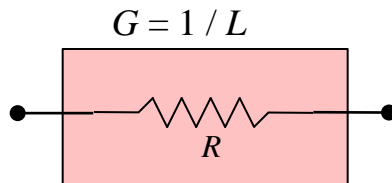
Ολική ενίσχυση: $G_T = G_1 G_2$, άρα

$$T_e = \frac{N_o}{k B G_T} = \frac{k B G_1 G_2 T_{e1} + k B G_2 T_{e2}}{k B G_1 G_2} = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1}$$

Εικόνα θορύβου

$$F = \frac{SNR_i}{SNR_o} = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} = \frac{S_i/(k T_0 B)}{G_1 G_2 S_i / [k (T_0 + T_{e1}) G_1 G_2 B + k T_{e2} G_2 B]} = 1 + \frac{T_{e1}}{T_0} + \frac{T_{e2}}{G_1 T_0} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1}$$

- Ενεργός θερμοκρασία και εικόνα θορύβου εξασθενητή

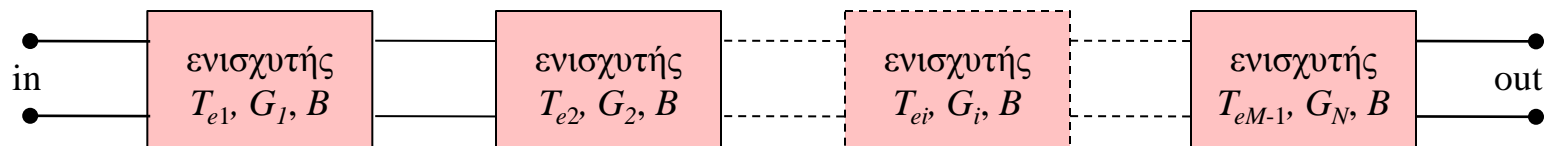


$$T_e = T(L-1)$$

Για θερμοκρασία $T = T_0 = 290$ K, προκύπτει $F = L$

Θόρυβος

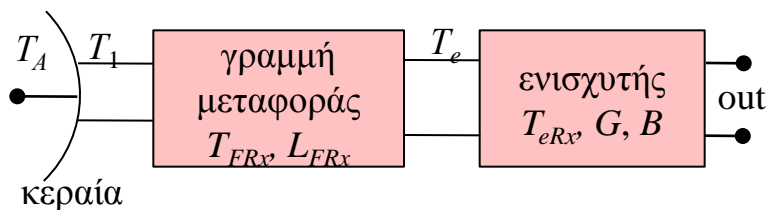
- Ενεργός θερμοκρασία και εικόνα θορύβου N ενισχυτών σε σειρά



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

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

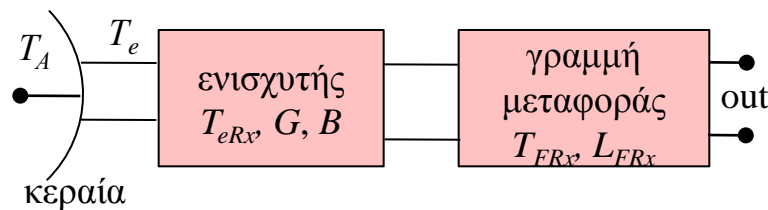
- Θερμοκρασία συστήματος



$$T_1 = T_A + T_{FRx} (L_{FRx} - 1) + L_{FRx} T_{eRx}$$

$$T_e = \frac{T_1}{L_{FRx}} = \frac{T_A}{L_{FRx}} + T_{FRx} \left(1 - \frac{1}{L_{FRx}} \right) + T_{eRx}$$

Μη προτιμώμενη διάταξη

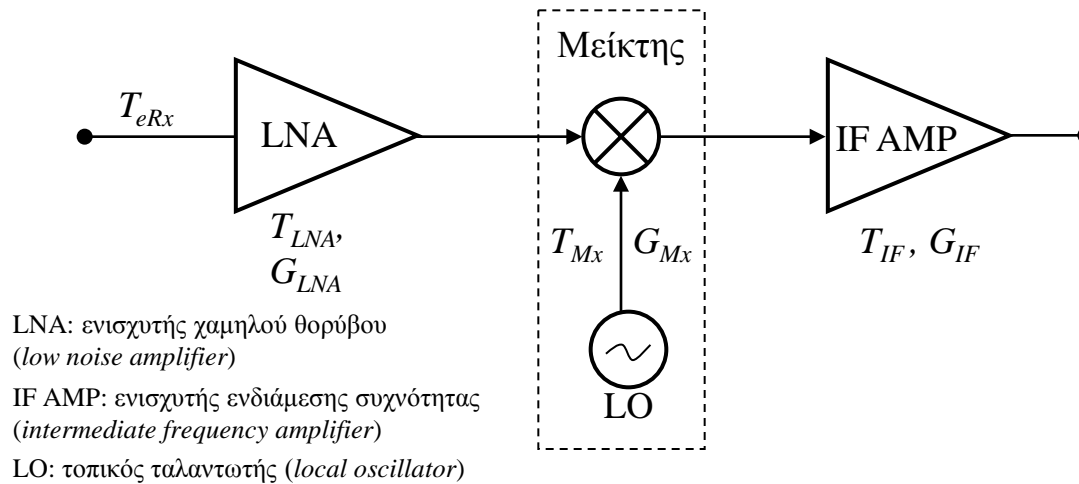


$$T_e = T_A + T_{eRx} + \frac{T_{FRx} (L_{FRx} - 1)}{G}$$

Προτιμώμενη διάταξη

Θόρυβος στην Είσοδο Δέκτη

Ενεργός θερμοκρασία θορύβου στην είσοδο δέκτη

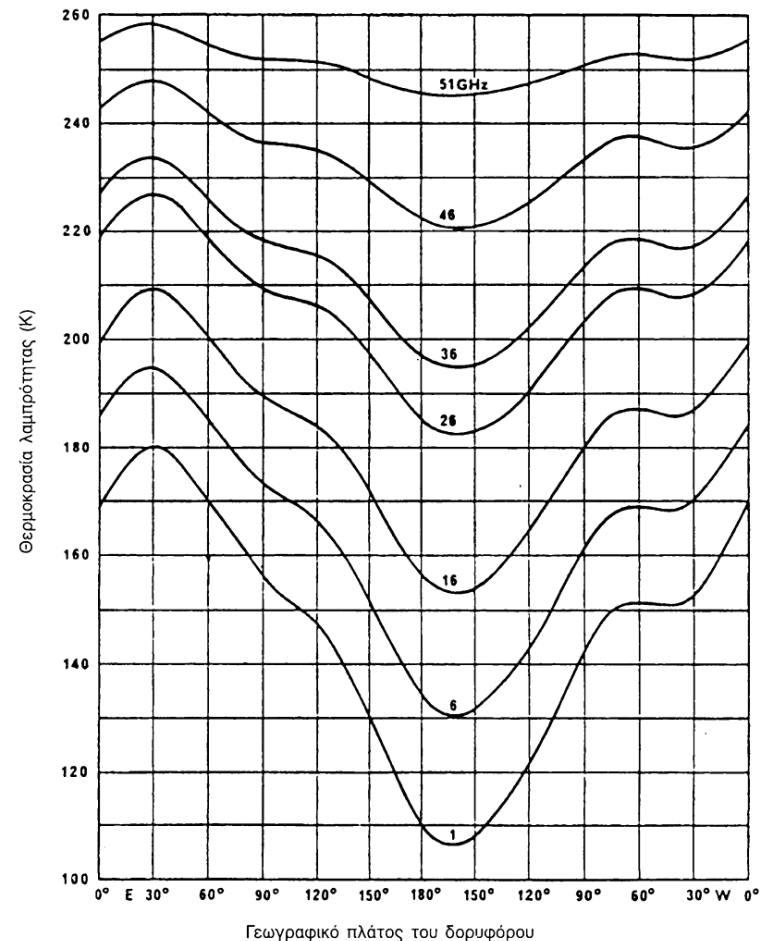


$$T_{eRx} = T_{LNA} + \frac{T_{Mx}}{G_{LNA}} + \frac{T_{IF}}{G_{LNA} G_{MX}}$$

Θόρυβος Κεραίας

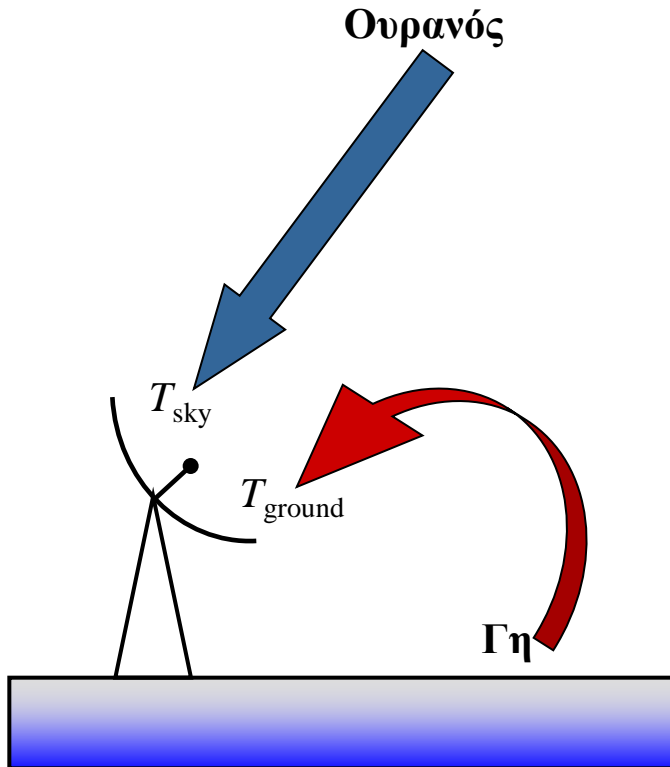
- Ο θόρυβος στην κεραία προέρχεται από:
 - Απώλειες
 - Τον ουρανό
- Ο θόρυβος στην κεραία εξαρτάται από:
 - Συχνότητα
 - Γωνία ανύψωσης
 - Ατμοσφαιρικές συνθήκες
- Κατηγορίες κεραιών
 - Δορυφόρου
 - Επίγειου σταθμού

Θερμοκρασία θορύβου κεραίας δορυφόρου



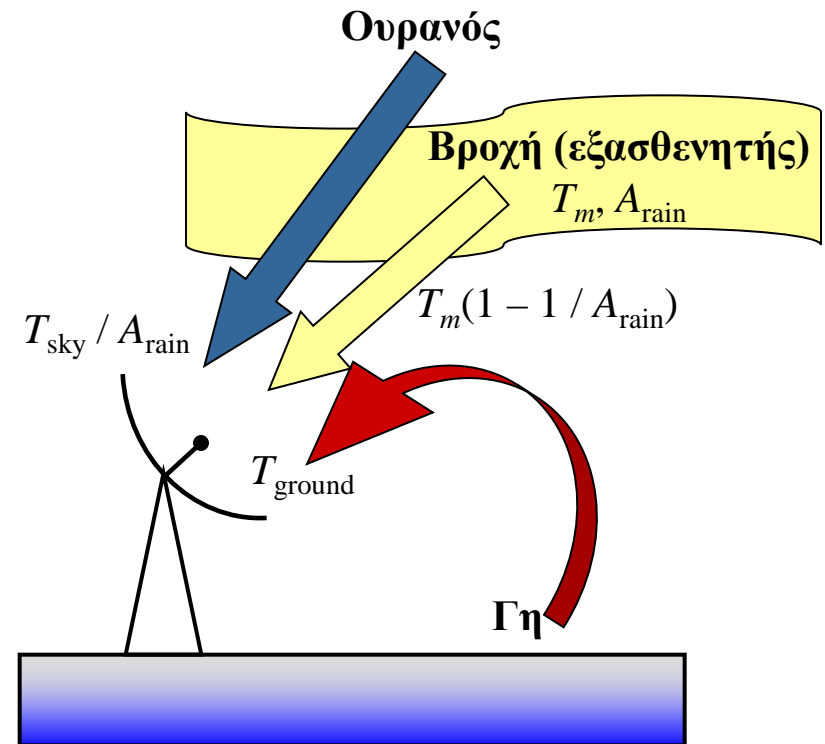
Θόρυβος Κεραίας

Θερμοκρασία θορύβου κεραίας επίγειου σταθμού



Συνθήκες “καθαρού ουρανού”

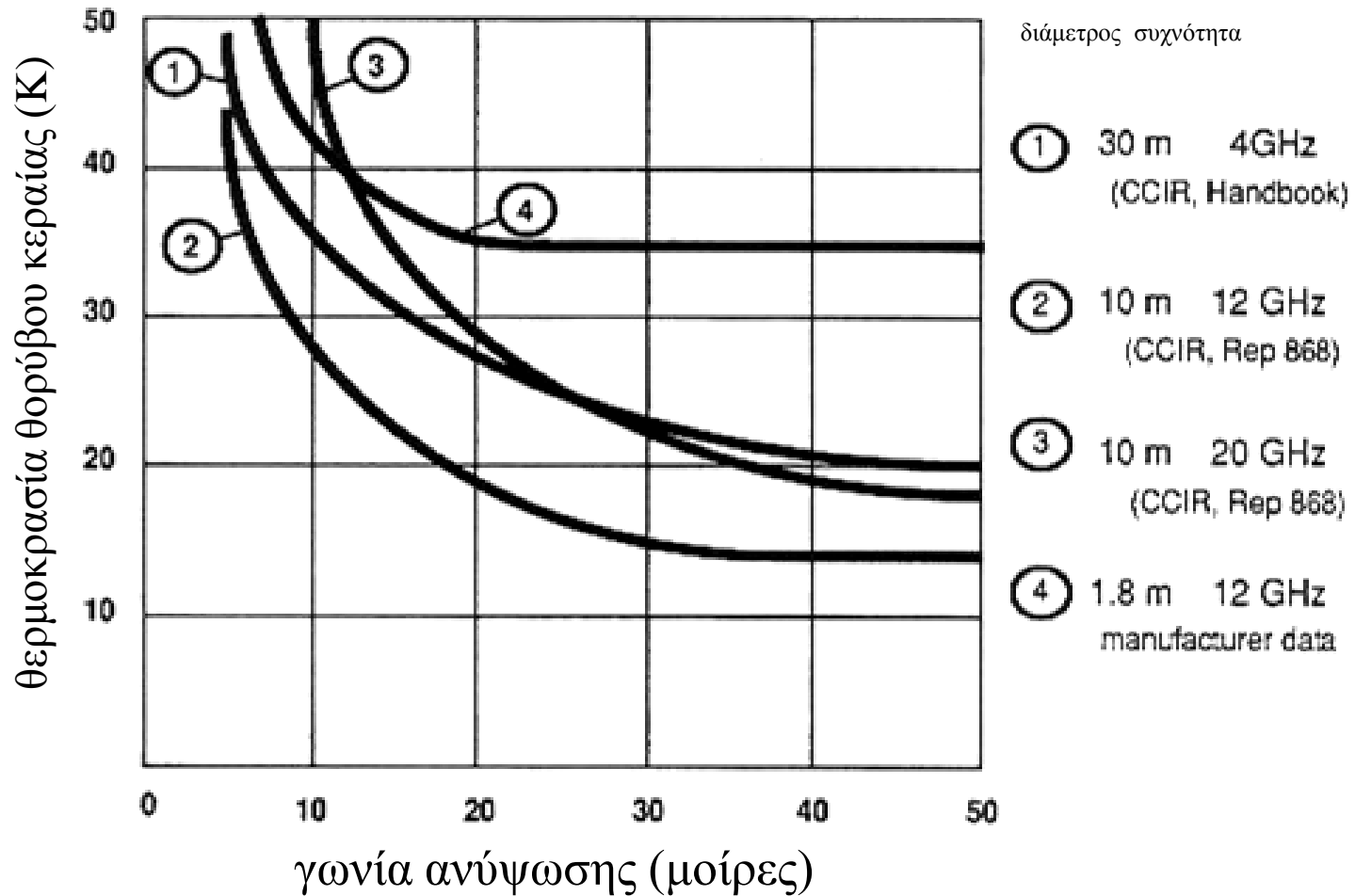
$$T_A = T_{\text{sky}} + T_{\text{ground}}$$



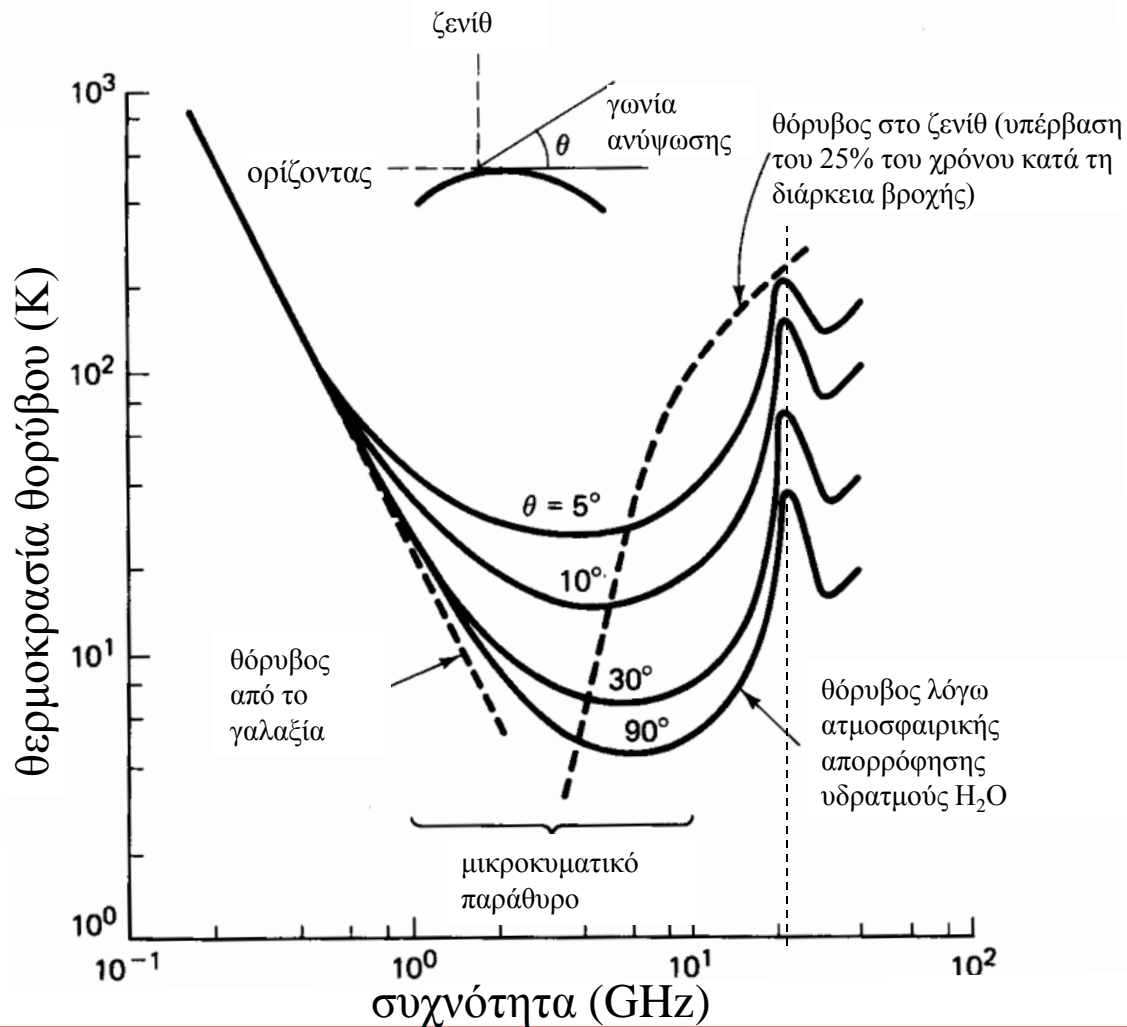
Συνθήκες βροχής

$$T_A = T_{\text{sky}} / A_{\text{rain}} + T_m(1 - 1 / A_{\text{rain}}) + T_{\text{ground}}$$

Θόρυβος Κεραίας



Θόρυβος Κεραίας



Προϋπολογισμός Ισχύος Ζεύξης

- Ενεργός ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύς
(*effective isotropic radiated power*–EIRP)

$$\text{EIRP} = P_T G_T$$

- Εξίσωση μετάδοσης του Friis

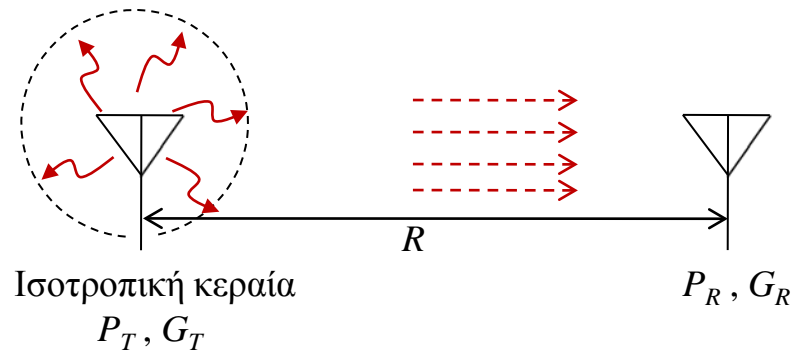
$$P_R = \Phi A_{eff} = \left(\frac{\text{EIRP}}{4\pi R^2} \right) \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} G_R \right) \Rightarrow$$

$$P_R = G_T G_R \underbrace{\left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2}_{1/L_{FS}} P_T$$

- Απώλειες ελευθέρου χώρου

$$L_{FS} = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{c/f} \right) [\text{dB}]$$

π.χ. για $f = 10 \text{ GHz}$ και ύψος δορυφόρου $R = (\text{TS}) = 35786 \text{ km}$, $L_{FS} = 203.5 \text{ dB}$



$$A_{eff} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R$$

$$\Phi = \frac{\text{EIRP}}{4\pi R^2}$$

Προϋπολογισμός Ισχύος Ζεύξης

- Απώλειες ελευθέρου χώρου

$$L_{FS} = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) [\text{dB}] = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{c/f} \right) [\text{dB}]$$

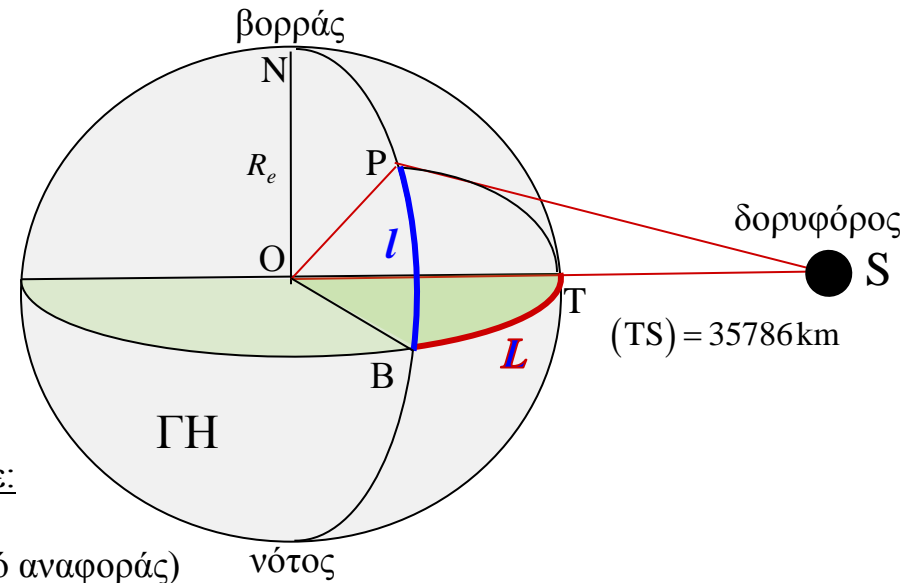
- Απώλειες ελευθέρου χώρου γεωστατικού δορυφόρου

Γεωστατικός δορυφόρος στη θέση S βρίσκεται σε:

- ❖ φ : γεωγραφικό πλάτος, $\varphi = 0^\circ$
- ❖ λ : γεωγραφικό μήκος (σε σχέση με μεσημβρινό αναφοράς)

Επίγειος παρατηρητής στο σημείο P βρίσκεται σε:

- ❖ l : γεωγραφικό πλάτος
- ❖ ψ : γεωγραφικό μήκος (σε σχέση με μεσημβρινό αναφοράς)



L : σχετικό γεωγραφικό μήκος, $L = \psi - \lambda$

$$L_{FS} = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) [\text{dB}] = 20 \log \left[\frac{4\pi (TS)}{\lambda} \right] + 10 \log \left\{ 1 + 0.42 [1 - \cos(L) \cos(l)] \right\} [\text{dB}]$$

Προϋπολογισμός Ισχύος Ζεύξης

- Απώλειες ελευθέρου χώρου, L_{FS}

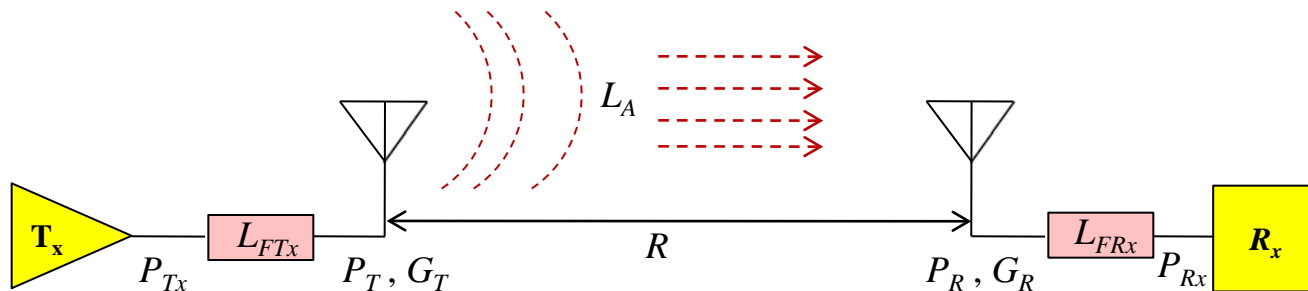
$$L_{FS} = \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2$$

- Ατμοσφαιρική εξασθένιση, L_A

- Απώλειες λόγω ατμοσφαιρικής απορρόφησης
- Επίδραση της ιονόσφαιρας
- Εξασθένηση λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων
- Άλλα προβλήματα διάδοσης

- Απώλειες λόγω εξοπλισμού εκπομπής και λήψης, L_{FTx} και L_{FRx}

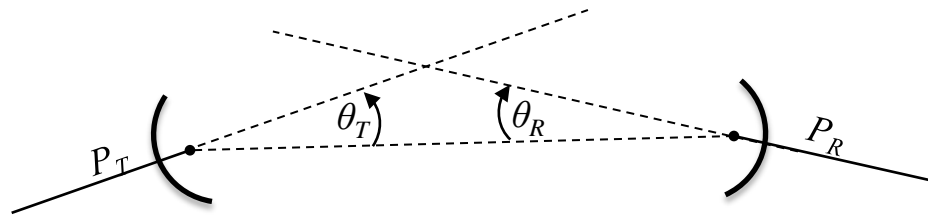
$$P_T = \frac{P_{Tx}}{L_{FTx}} \quad \text{και} \quad P_{Rx} = \frac{P_R}{L_{FRx}}$$



Προϋπολογισμός Ισχύος Ζεύξης

- Απώλειες λόγω κακής ευθυγράμμισης μεταξύ των κεραιών, L_T και L_R

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



- Απώλειες λόγω ασυμφωνίας πολώσεων, L_{POL}

- Γραμμική πόλωση στην εκπομπή και λήψη και στροφή ψ μεταξύ τους

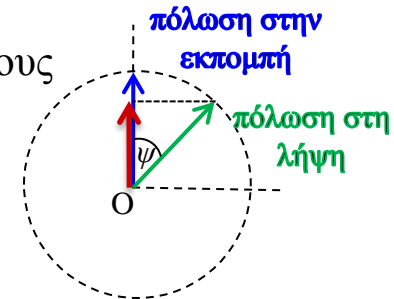
$$L_{POL} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{T \text{ rms}}}{P_{R \text{ rms}}} \right) [\text{dB}] = 10 \log_{10} \left\{ \frac{E^2/2}{[E \cos(\psi)]^2/2} \right\} [\text{dB}] = -20 \log_{10} [\cos(\psi)] [\text{dB}]$$

π.χ. αν $\psi \rightarrow 90^\circ$, $L_{POL} \rightarrow -\infty$ dB, δηλ. το λαμβανόμενο σήμα μηδενίζεται

- Κυκλική πόλωση στην εκπομπή και γραμμική πόλωση στη λήψη

$$L_{POL} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{T \text{ rms}}}{P_{R \text{ rms}}} \right) [\text{dB}] = 10 \log_{10} \left(\frac{E^2/2 + E^2/2}{E^2/2} \right) \text{dB} = 3 \text{ dB}$$

$P_{T \text{ rms}}$ και $P_{R \text{ rms}}$: οι rms ισχύεις των σημάτων κατά την εκπομπή και λήψη, αντίστοιχα



Προϋπολογισμός Ισχύος Ζεύξης

- Απολαβές
 - Κεραία εκπομπής, EIRP
 - Κεραία λήψης, G_{Rmax}
- Απώλειες
 - Ελευθέρου χώρου, L_{FS}
 - Ατμοσφαιρική εξασθένιση, L_A
 - Εξοπλισμού εκπομπής και λήψης, L_{FTx} και L_{FRx}
 - Κακής ευθυγράμμισης μεταξύ των κεραιών, L_T και L_R
 - Ασυμφωνίας πολώσεων, L_{POL}

$$\text{Λαμβανόμενη ισχύς : } P_{Rx} = \underbrace{(\text{EIRP})}_{\text{κεραία εκπομπής}} \underbrace{\left(\frac{1}{L_{FS} L_A} \right)}_{\text{μέσο διάδοσης}} \underbrace{\left(\frac{G_{Rmax}}{L_R L_{FRx} L_{POL}} \right)}_{\text{κεραία λήψης}} \quad \text{με} \quad \text{EIRP} = \frac{P_{Tx} G_T}{L_T L_{FTx}}$$

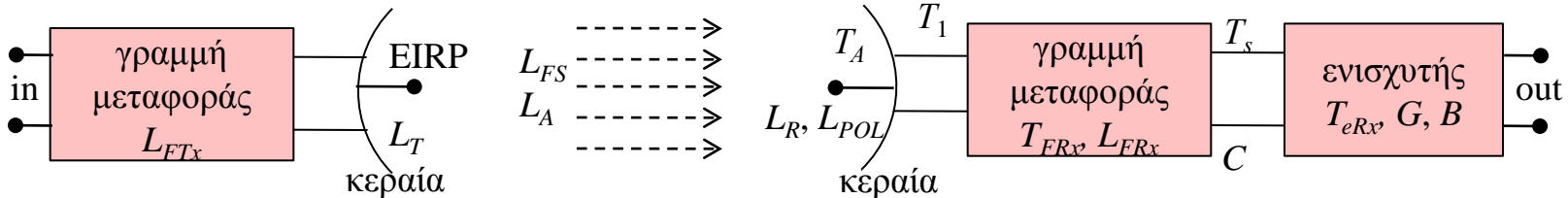
Θέτοντας όλες τις παραπάνω ποσότητες σε dB, π.χ. $[\text{EIRP}] = 10 \log_{10}(\text{EIRP})$, η ισχύς του σήματος λήψης γράφεται:

$$[P_{Rx}] = \underbrace{[\text{EIRP}]}_{\text{κεραία εκπομπής}} + \underbrace{[G_R] - [L_{FRx}] - [L_R] - [L_{POL}]}_{\text{κεραία λήψης}} - \underbrace{[L_A] - [L_{FS}]}_{\text{μέσο διάδοσης}}$$

Προϋπολογισμός Ισχύος Ζεύξης

Δείκτες ποιότητας:

- Ο λόγος της ισχύος του φέροντος C προς την ισχύ του θορύβου N
- Ο λόγος της ισχύος του φέροντος C προς τη θερμοκρασία θορύβου T
- Ο λόγος της ισχύος του φέροντος C προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου N_0



$$C = \underbrace{(\text{EIRP})}_{\text{πομπός}} \underbrace{\left(\frac{1}{L_{FS} L_A} \right)}_{\text{μέσο διάδοσης}} \underbrace{\left(\frac{G_{R_{\max}}}{L_R L_{FRx} L_{POL}} \right)}_{\text{δέκτης}}$$

$$T_s = \frac{T_1}{L_{FRx}} = \frac{T_A}{L_{FRx}} + T_{FRx} \left(1 - \frac{1}{L_{FRx}} \right) + T_{eRx}$$

$$\frac{C}{N_0} = \frac{C}{kT_e} = \frac{1}{k} \underbrace{(\text{EIRP})}_{\text{απολαβή εκπομπής}} \underbrace{\left(\frac{1}{L_{FS} L_A} \right)}_{1/\text{απώλειες διάδοσης}} \underbrace{\left(\frac{G_{R_{\max}}}{L_R L_{FRx} L_{POL}} \right)}_{\text{απολαβή λήψης / ενεργός θερμοκρασία θορύβου: } G/T} \left[\frac{T_A}{L_{FRx}} + T_{FRx} \left(1 - \frac{1}{L_{FRx}} \right) + T_{eRx} \right]^{-1}$$

Προϋπολογισμός Ισχύος Ζεύξης

Επίδραση βροχής στο C/N_0 :

- Uplink: Ελαττώνει την ισχύ του φέροντος

$$\Delta\left(\frac{C}{N_0}\right)_U = \Delta C_U = (A_{\text{RAIN}})_U \text{ [dB]}$$

- Downlink: Ελαττώνει την ισχύ του φέροντος και αυξάνει τη θερμοκρασία θορύβου

$$\Delta\left(\frac{C}{N_0}\right)_D = \Delta C_D - \Delta\left(\frac{G}{T}\right) = (A_{\text{RAIN}})_D + \Delta T \text{ [dB]}$$

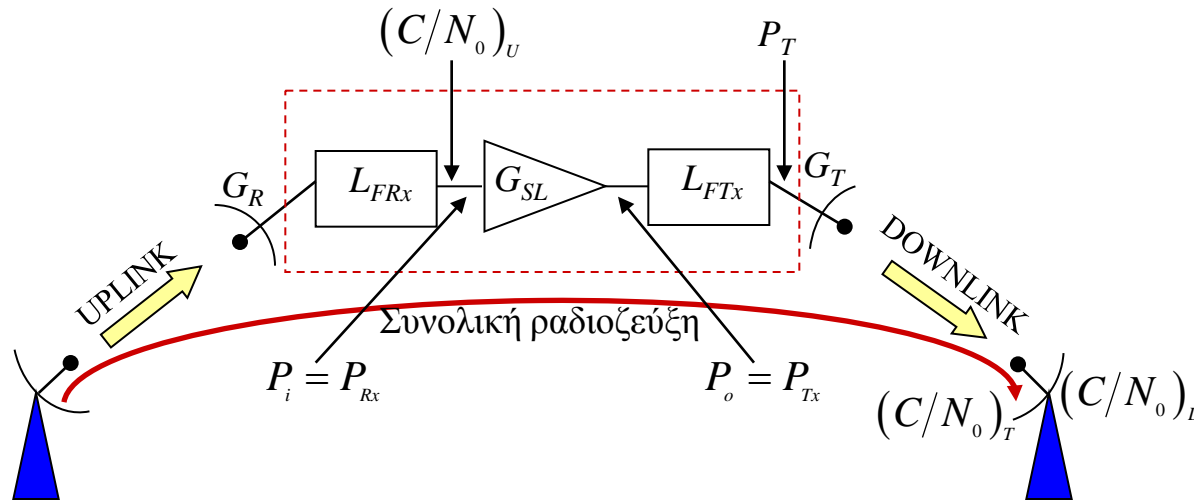
Προϋπολογισμός Ισχύος Ζεύξης

Ρόλος διαφανούς επαναλήπτη:

- Ενισχύει το λαμβανόμενο σήμα
- Αλλάζει τη συχνότητα του φέροντος

Τύποι λειτουργίας επαναλήπτη:

- Γραμμική επαναλήπτης, $P_o = P_i + G$
- Μη γραμμική, $P_o = P_i + G - \Delta G$
- Αναγεννητικός, $P_o = \text{σταθερή}$



Προϋπολογισμός Ισχύος Ζεύξης

Χαρακτηριστικά επαναλήπτη:

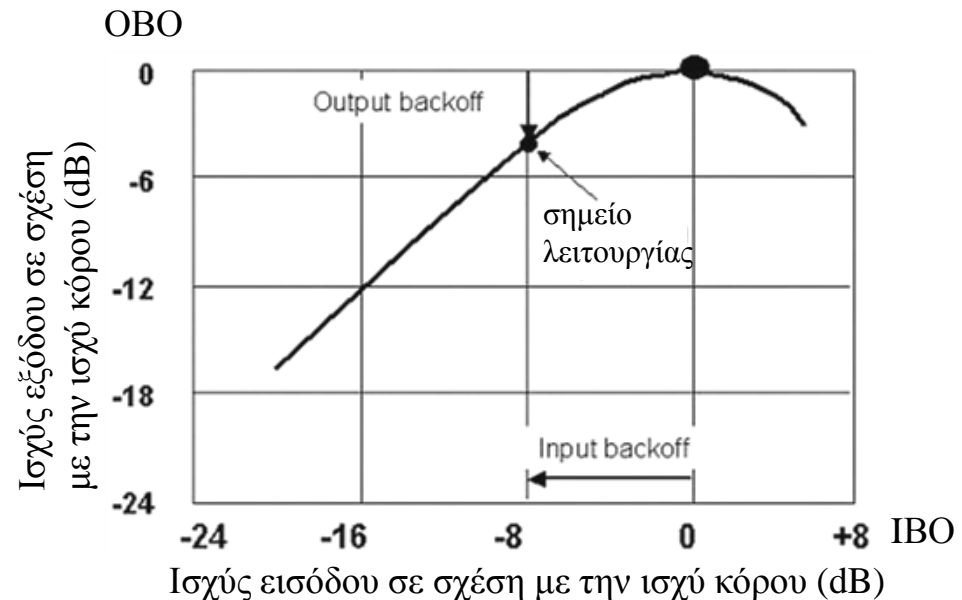
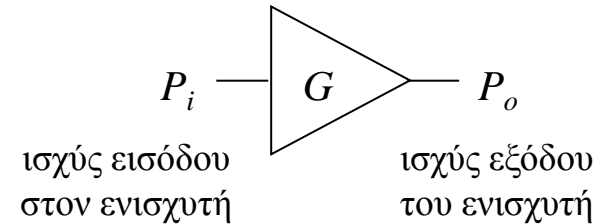
- Αναδίπλωση ισχύος εισόδου
(*input back off*)

$$IBO = \frac{P_i}{P_{i,sat}}$$

- Αναδίπλωση ισχύος εξόδου
(*output back off*)

$$OBO = \frac{P_o}{P_{o,sat}}$$

- Χαρακτηριστική μεταφοράς



Προϋπολογισμός Ισχύος Ζεύξης

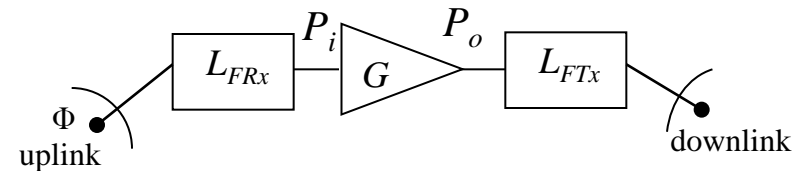
Χαρακτηριστικά επαναλήπτη (συνέχεια):

- Απολαβή ισχύος $G = \frac{P_o}{P_i} = \frac{\text{OBO } P_{o,sat}}{\text{IBO } P_{i,sat}} = \frac{\text{OBO}}{\text{IBO}} G_{sat}$

Απολαβή ισχύος στον κόρο: $G_{sat} = \frac{P_{o,sat}}{P_{i,sat}}$

- EIRP στον κόρο

$$\text{EIRP}_{sat} = P_{o,sat} \frac{G_{T_{max}}}{L_T L_{FTx}}$$



- Πυκνότητας ροής ισχύος στον κόρο

$$\Phi_{sat} = P_{i,sat} L_{FRx} L_R L_{POL} \frac{4\pi}{\lambda_u^2} \frac{1}{G_{R_{max}}}$$

- Σχέση απολαβής ισχύος, EIRP και πυκνότητας ροής ισχύος στον κόρο

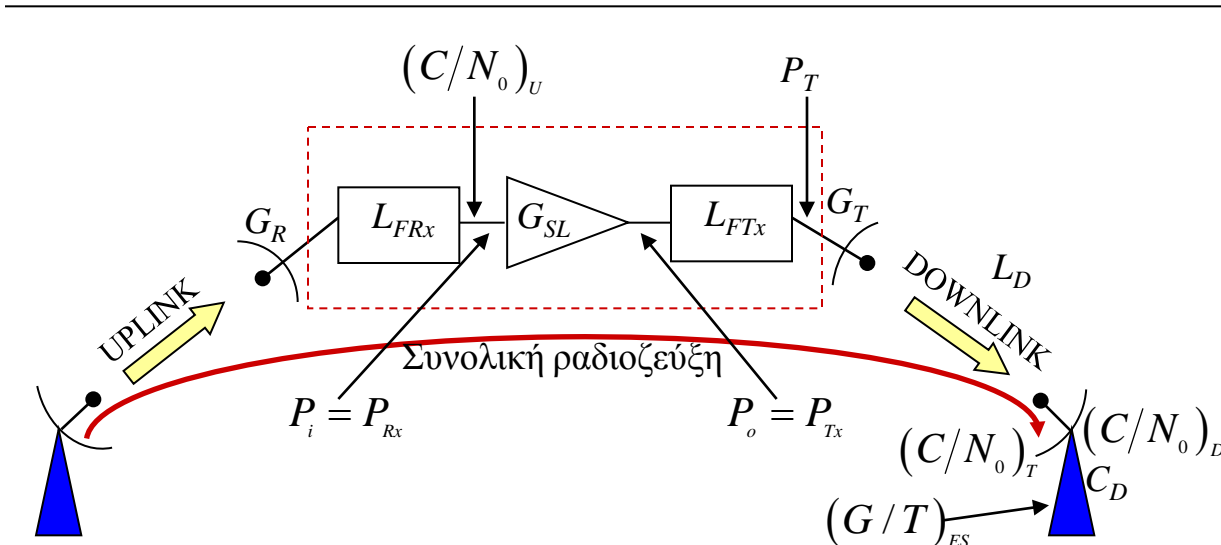
$$G_{sat} = \frac{P_{o,sat}}{P_{i,sat}} = \left(\frac{L_T L_{FTx} L_{FRx} L_R L_{POL}}{G_{T_{max}} G_{R_{max}}} \right) \left(\frac{4\pi}{\lambda_u^2} \right) \left[\frac{\text{EIRP}_{sat}}{\Phi_{sat}} \right]$$

Προϋπολογισμός Ισχύος Ζεύξης

Θόρυβος στην είσοδο του επίγειου σταθμού: $(N_0)_T = (N_0)_D + G (N_0)_U$

- Θόρυβος από το downlink $(N_0)_D$
- Θόρυβος από το uplink που ενισχύεται $G (N_0)_U$

Ολικό C/N_0 : $\left(\frac{C}{N_0}\right)_T^{-1} = \frac{(N_0)_T}{C_D} = \frac{(N_0)_D + G(N_0)_U}{C_D} \Leftrightarrow \left(\frac{C}{N_0}\right)_T = \left(\frac{C}{N_0}\right)_U + \left(\frac{C}{N_0}\right)_D$



$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_U = \frac{P_i}{(N_0)_U} = \text{IBO} \frac{P_{i,sat}}{(N_0)_U} = \text{IBO} \frac{P_{o,sat}}{G_{sat} (N_0)_U} = \text{IBO} \left(\frac{C}{N_0}\right)_{U,sat}$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_D = \text{OBO} \frac{\text{EIRP}_{sat}}{k L_D} \left(\frac{G}{T}\right)_{ES} = \text{OBO} \left(\frac{C}{N_0}\right)_{D,sat}$$

Προϋπολογισμός Ισχύος Ζεύξης

Παρεμβολές: $N_0 = (N_0)_{\text{χωρίς I}} + (N_0)_I$

- Στην είσοδο του δέκτη του επίγειου σταθμού στο downlink
- Στην είσοδο του δέκτη του δορυφόρου στο uplink

$$\text{Uplink: } \left(\frac{C}{N_0}\right)_U^{-1} = \left(\frac{C}{N_0}\right)_U^{-1} + \left(\frac{C}{N_0}\right)_{I,U}^{-1} \quad \text{Downlink: } \left(\frac{C}{N_0}\right)_D^{-1} = \left(\frac{C}{N_0}\right)_D^{-1} + \left(\frac{C}{N_0}\right)_{I,D}^{-1}$$

Ολικό C/N_0 :

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

με τους επιμέρους όρους:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_U = \text{IBO} \left(\frac{C}{N_0}\right)_{U,\text{sat}} \quad \left(\frac{C}{N_0}\right)_D = \text{OBO} \left(\frac{C}{N_0}\right)_{D,\text{sat}} \quad \left(\frac{C}{N_0}\right)_I^{-1} = \left(\frac{C}{N_0}\right)_{I,U}^{-1} + \left(\frac{C}{N_0}\right)_{I,D}^{-1}$$

Προϋπολογισμός Ισχύος Ζεύξης

Αντιστάθμιση επιδράσεων του μέσου διάδοσης

- Ασυμφωνία πόλωσης
 - Uplink: Διόρθωση πόλωσης κεραίας εκπομπής
 - Downlink: Προσαρμόζουμε την πόλωση της κεραίας λήψης στο σήμα
- Εξασθένηση
 - Προσθήκη περιθωρίου ασφαλείας στον προϋπολογισμό ισχύος
 - Γεωγραφική κατανομή επίγειων σταθμών
 - Προσαρμογή κυκλώματος ραδιοζεύξης
 - Αύξηση χρόνου εκπομπής
 - Χρήση χαμηλότερης ζώνης συχνοτήτων
 - Αύξηση EIRP στο uplink
 - Ελάττωση ρυθμού μετάδοσης και προστασία με κώδικες σφάλματος

Προϋπολογισμός Ισχύος Ζεύξης

Περιορισμοί στην επιλογή παραμέτρων:

- Λειτουργικοί περιορισμοί
- Περιορισμοί λόγω συνθηκών του μέσου διάδοσης
- Περιορισμοί λόγω κανονισμών
 - Περιορισμούς στο σχεδιασμό
 - Πυκνότητα ροής ισχύος στην επιφάνεια της Γης
 - Περιορισμός της EIRP από επίγειους σταθμούς
 - κλπ
 - Περιορισμούς στη λειτουργία
 - Στο δείκτη C/N_0 για χρόνο μεγαλύτερο από προκαθορισμένη τιμή
 - Στο διάγραμμα ακτινοβολίας
 - κλπ

