



Πανεπιστήμιο Αιγαίου

Ασύρματες Επικοινωνίες

Ενότητα 6 : Στοιχεία Διάδοσης Η/Μ Κυμάτων

Δημοσθένης Βουγιούκας (dnougiou@aegean.gr)

Μόνιμος Επίκουρος 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



Περιεχόμενα

4

- Ζώνες Συχνοτήτων & Εφαρμογές
- Κατηγοριοποίηση Κυμάτων
- Διάδοση στον Ελεύθερο Χώρο
- Εξίσωση Radar
- Ανάκλαση & Μετάδοση (Εξισώσεις Fresnel)
- Μοντέλο Επίπεδης Γης

Ζώνες Συχνοτήτων

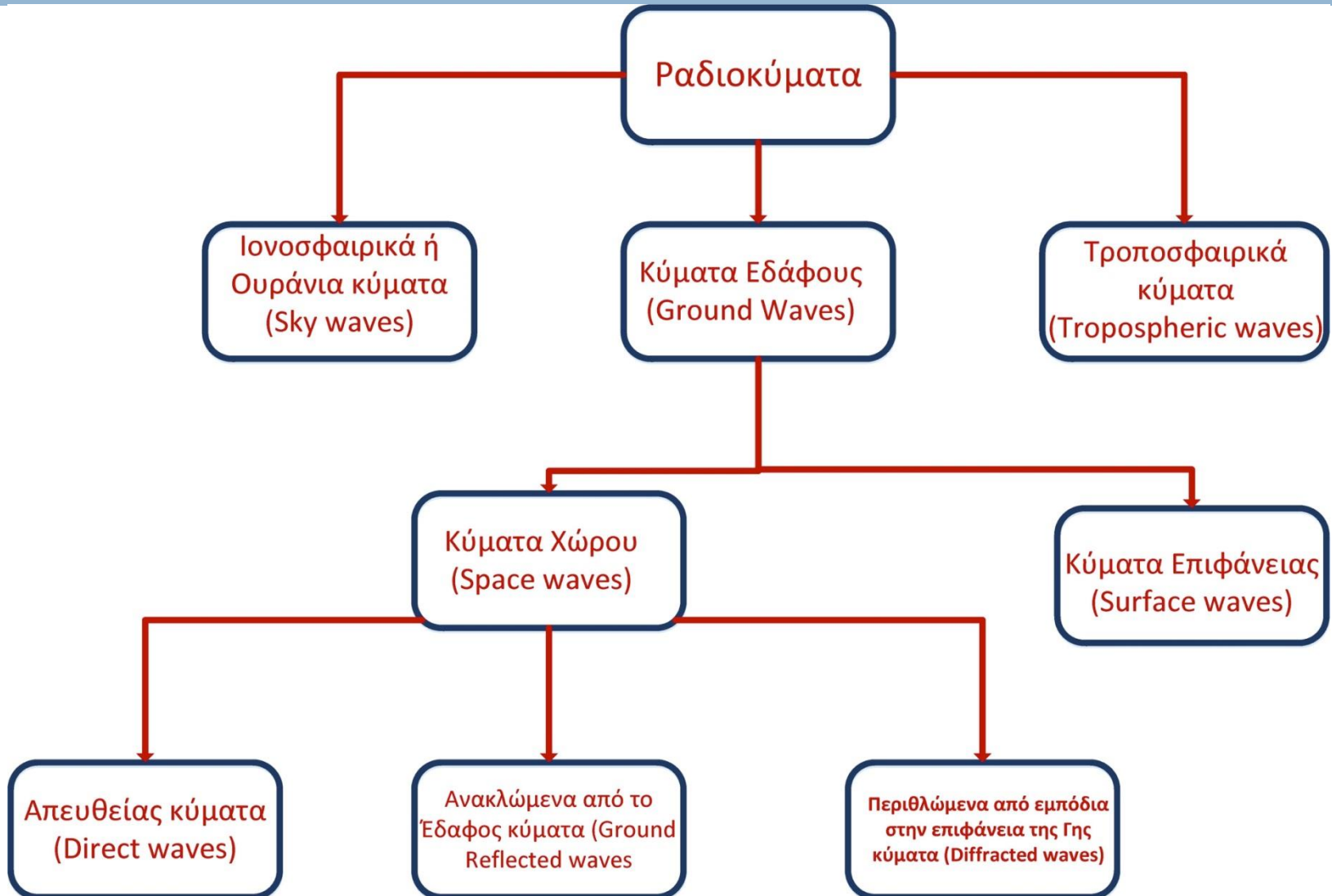
5

Περιοχή συχνοτήτων	Συχνότητα	Μήκος κύματος στον αέρα	Πηγές εκπομπής
Εξαιρετικά χαμηλές συχνότητες (ELF)	0 – 300Hz	>1000Km	Γραμμές Ηλ. Ενέργειας, ακουστικές συχνότητες, υποβρύχιες επικοινωνίες
Ακουστικές Συχνότητες (VF)	0,3 – 3kHz	~100Km	Φωνή, ακουστικές συχνότητες
Πολύ χαμηλές συχνότητες (VLF)	3 – 30kHz	~10Km	Ακουστικές συχνότητες
Χαμηλές Συχνότητες (LF)	30 – 300kHz	~1Km	Ραδιοεπικοινωνία Ναυσιπλοΐας
Μεσαίες Συχνότητες (MF)	0,3 – 3MHz	~0,1Km	Ραδιοεπικοινωνία ναυσιπλοΐας, ερασιτεχνικοί ραδιοσταθμοί
Υψηλές Συχνότητες (HF)	3 – 30MHz	~10m	Ερασιτεχνικοί σταθμοί διεθνείς επικοινωνίες, έλεγχος αεροπλοΐας
Πολύ υψηλές συχνότητες (VHF)	30 – 300MHz	~1m	Αστυνομία, σταθμοί FM VHF-TV, Έλεγχος αεροπλοΐας και ναυσιπλοΐας.
Πάρα πολύ υψηλές συχνότητες (UHF)	0,3 – 3GHz	1 – 0,1m	Επικοινωνία ταξί, Αστυνομία, UHF-TV, φούρνοι μικροκυμάτων, ιατρική διαθερμία
Υπερυψηλές Συχνότητες (SHF)	3 – 30GHz	~1cm	PANTAP, δορυφορικές επικοινωνίες
Εξαιρετικά υψηλές συχνότητες (EHF)	30 – 300GHz	1 – 0,1cm	PANTAP, δορυφορικές επικοινωνίες
Υπεύθυνη ακτινοβολία (IR)	300GHz – 300THz	1mm – 0,001mm	Εποπτεία, ηλεκτρονικός πόλεμος

Ασύρματες Επικοινωνίες

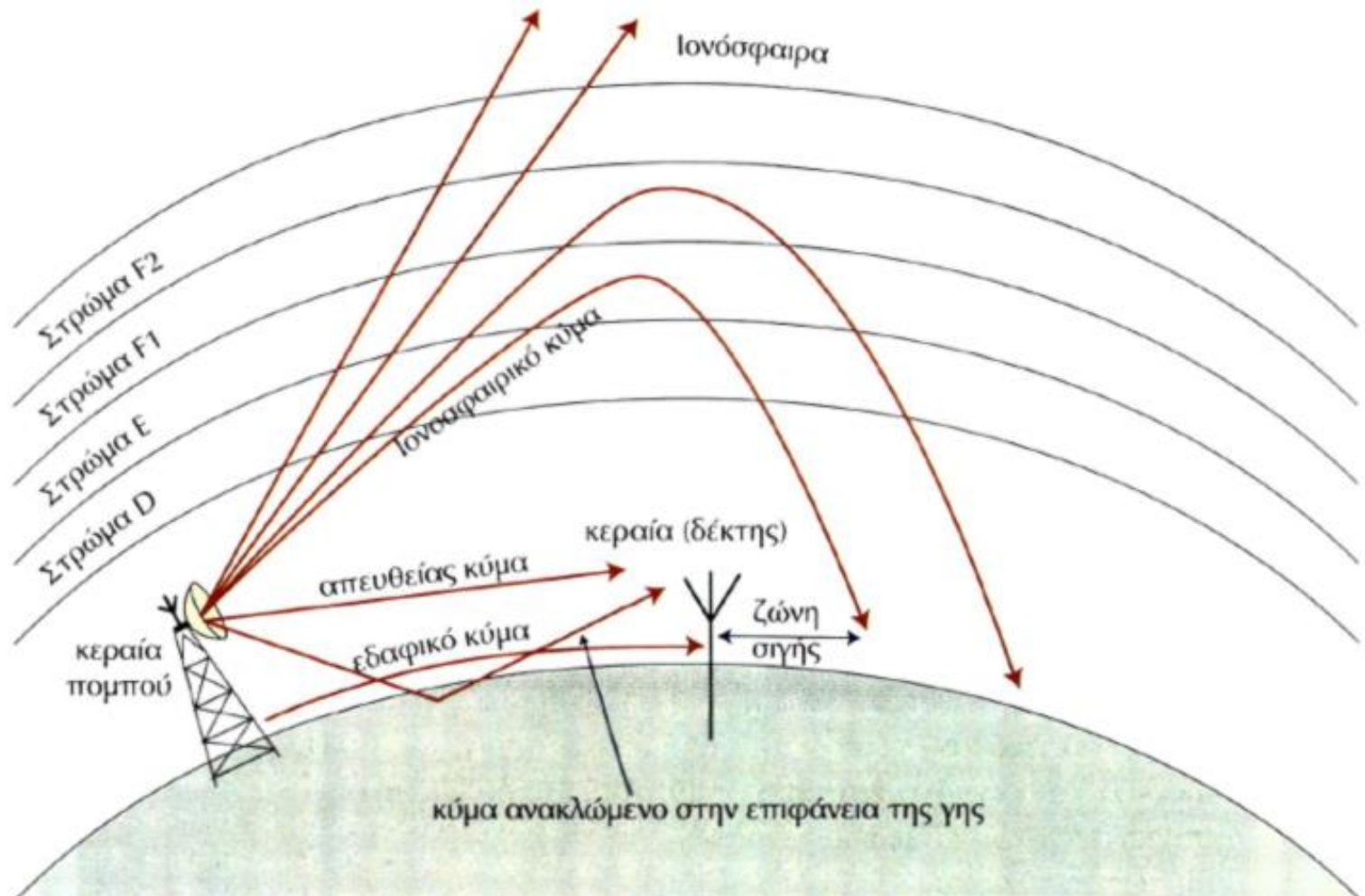
Κατηγοριοποίηση Κυμάτων

6



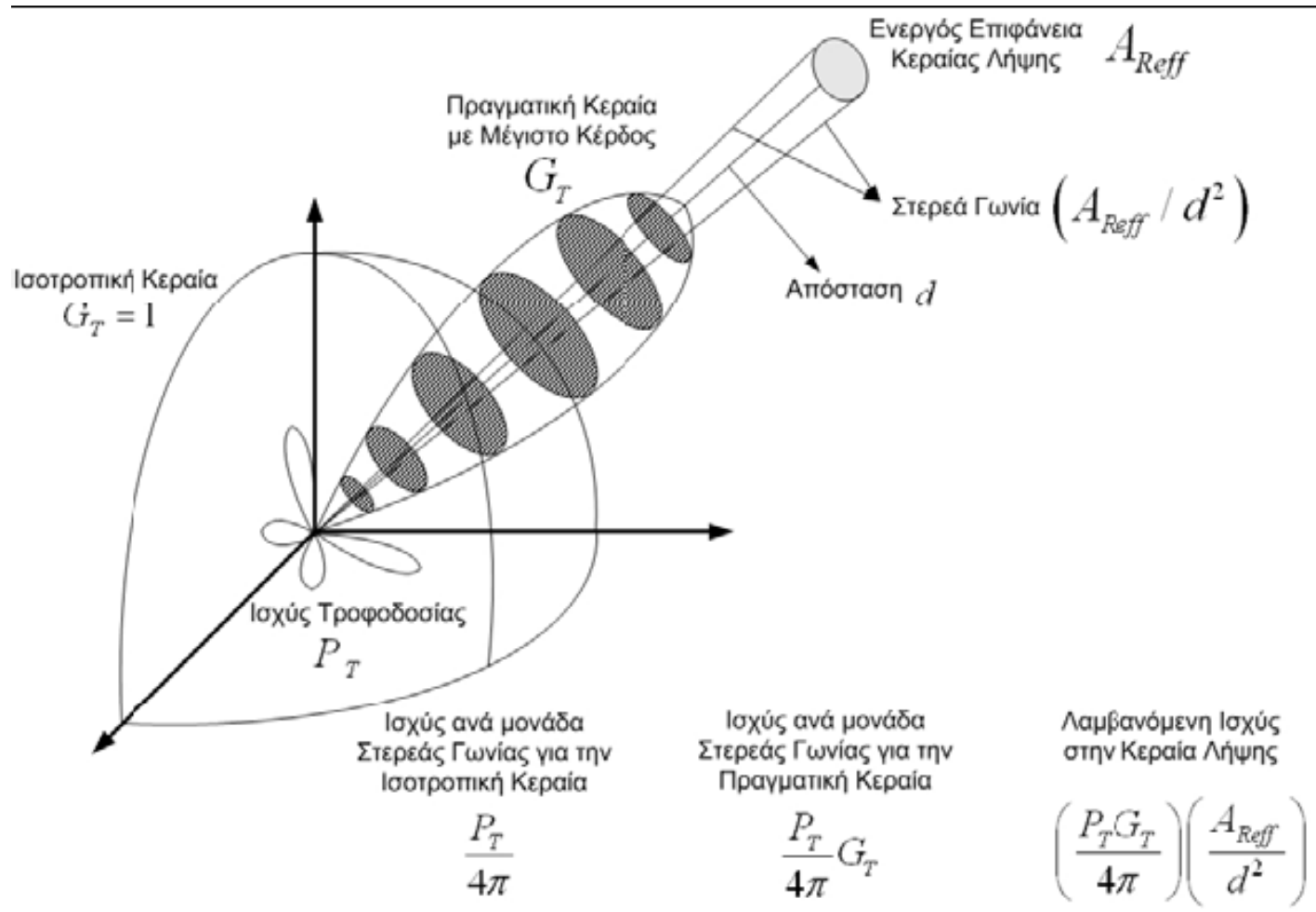
Κατηγοριοποίηση Κυμάτων

7



Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

8



Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

$$\Omega(d) = \left(\frac{P_t G_t}{4\pi} \right) \left(\frac{A_{Reff}}{d^2} \right) \text{ Watts}$$

Πυκνότητα Ροής Ισχύος: $\Phi(d) = |\vec{P}_{av}(d)| = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \text{ (Watt / m}^2\text{)}$

Εξίσωση Η. Friis:
$$\begin{aligned} \Omega(d) &= \Phi(d) A_{Reff} = \left(\frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \right) \left(\frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \right) \\ &= P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \end{aligned}$$

Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

10

$$G_t = G_r = 1$$

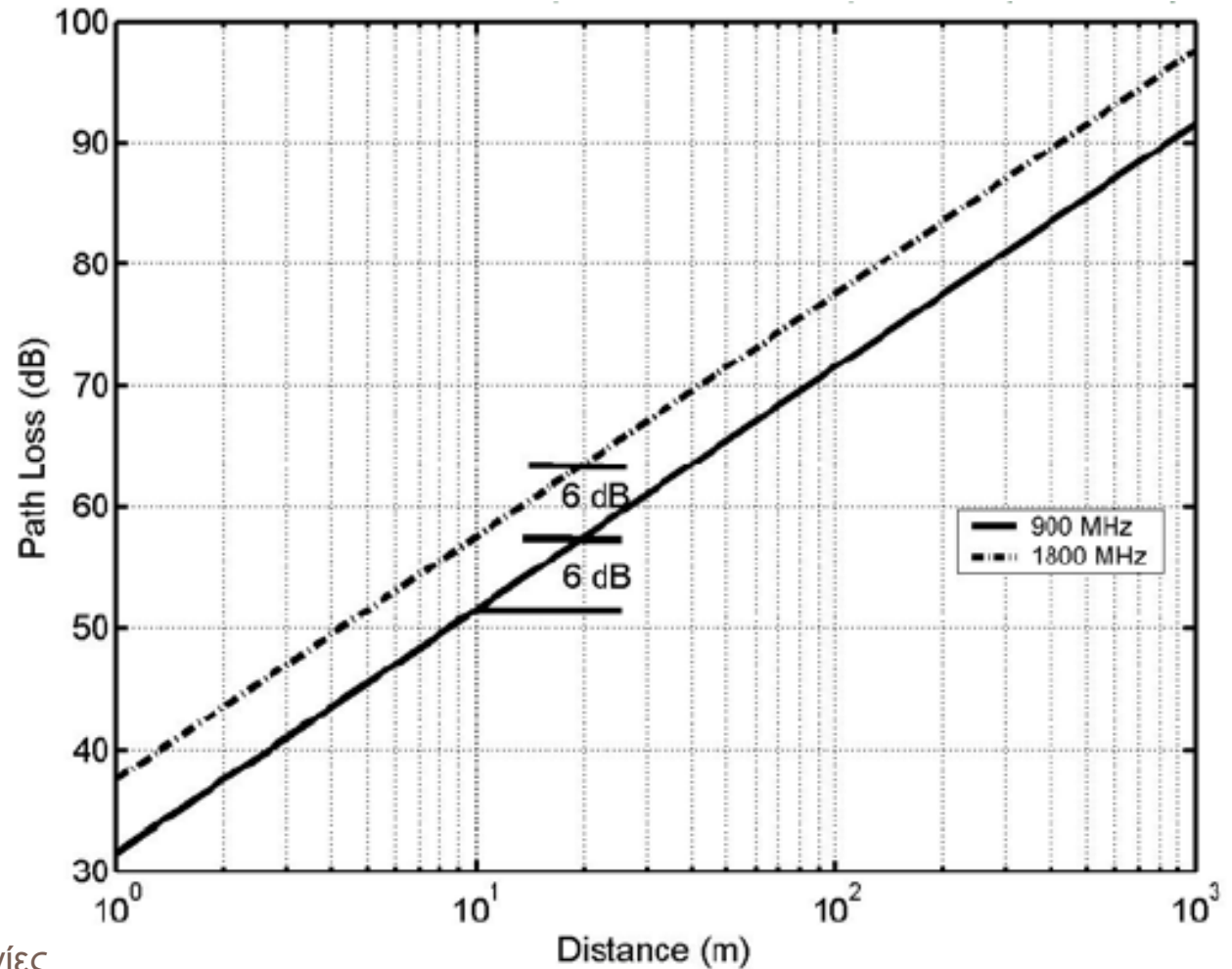
$$L_{FS}(d) = \frac{P_t}{\Omega(d)} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2$$

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

Ρυθμός πτώσης ισχύος : 20dB/decade

Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

11



Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

12

$$\begin{aligned} PL(dB) &= 22 - 20 \log(\lambda) + 20 \log(d) \\ &= 22 - 20 \log\left(\frac{300}{f_{MHz}}\right) + 20 \log(d_{Km} * 1000) \\ &= 20 \log(f_{MHz}) + 20 \log(d_{Km}) + 32.45 \end{aligned}$$

Στη βιβλιογραφία θα βρείτε και άλλες εκφράσεις ανάλογα με τις μονάδες των μεγεθών συχνότητας και απόστασης

Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

13

$$|P_{avt}(\theta_t, \varphi_t, d)| = \frac{W_{radt}}{4\pi d^2} D_{gt}(\theta_t, \varphi_t), \quad W_{radt} = n_t W_{At} = n_t (1 - |\rho_t|^2) P_t$$

$$|P_{avt}(\theta_t, \varphi_t, d)| = \frac{n_t (1 - |\rho_t|^2) P_t}{4\pi d^2} D_{gt}(\theta_t, \varphi_t)$$

$$W_{Ar} = |P_{avt}(\theta_t, \varphi_t, d)| A_{er}(\theta_r, \varphi_r) \cos^2(\psi_p)$$

$$= |P_{avt}(\theta_t, \varphi_t, d)| \frac{\lambda^2}{4\pi} n_r D_{gr}(\theta_r, \varphi_r) \cos^2(\psi_p)$$

$$= \frac{n_t (1 - |\rho_t|^2) P_t}{4\pi d^2} D_{gt}(\theta_t, \varphi_t) \frac{\lambda^2}{4\pi} n_r D_{gr}(\theta_r, \varphi_r) \cos^2(\psi_p)$$

Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

14

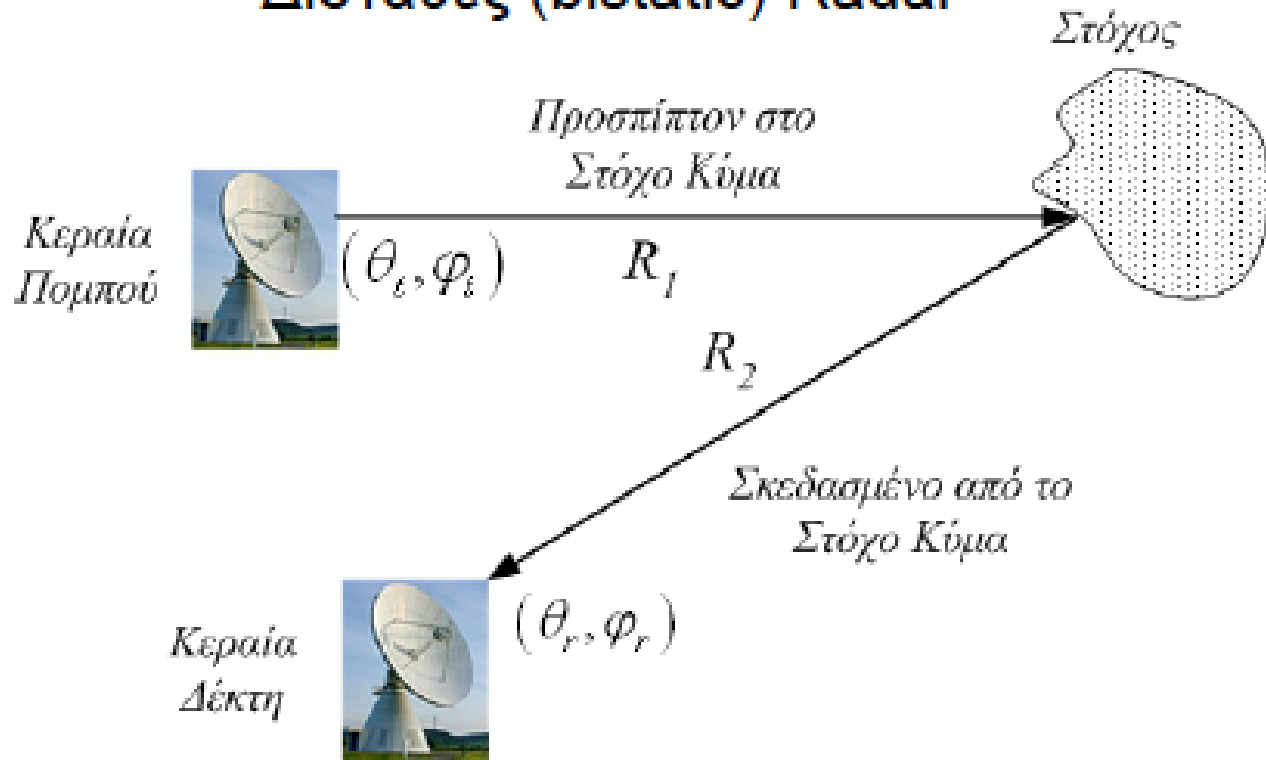
Εξίσωση για κατευθυντικές κεραιές και υπολογισμό όλων των επιμέρους απωλειών

$$\begin{aligned}W_r &= W_{Ar} \left(1 - |\rho_r|^2\right) \\&= \frac{n_t \left(1 - |\rho_t|^2\right) P_t}{4\pi d^2} D_{gt}(\theta_t, \varphi_t) \frac{\lambda^2}{4\pi} n_r D_{gr}(\theta_r, \varphi_r) \cos^2(\psi_p) \left(1 - |\rho_r|^2\right) \\&= n_t n_r \left(1 - |\rho_t|^2\right) \left(1 - |\rho_r|^2\right) D_{gt}(\theta_t, \varphi_t) D_{gr}(\theta_r, \varphi_r) \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \cos^2(\psi_p) P_t \\&= \left(1 - |\rho_t|^2\right) \left(1 - |\rho_r|^2\right) G_{gt}(\theta_t, \varphi_t) G_{gr}(\theta_r, \varphi_r) \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \cos^2(\psi_p) P_t\end{aligned}$$

Εξίσωση Radar

15

Δισταθές (bistatic) Radar



Για μονοσταθή (monostatic) ή επανασκέδασης (backscattering) Radar, η θέση πομπού και δέκτη ταυτίζονται

Εξίσωση Radar

16

Ενεργός Διατομή Radar ή Επιφάνεια Σκέδασης (Radar Cross-Section)

$$\sigma_{RCS} = \frac{\text{Ισχύς που επανακτινοβολείται στην κατεύθυνση του δέκτη}}{\text{Προσπίπτουσα στο στόχο Πυκνότητα Ισχύος}} \quad (m^2)$$

Ισχύς που συλλέγεται από το δέκτη

$$W_{Ar} = \left| \vec{P}_{av}^s(R_2) \right| A_{er}(\theta_r, \varphi_r) = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{gr}(\theta_r, \varphi_r) \sigma_{RCS} \frac{P_t G_{gt}(\theta_t, \varphi_t)}{(4\pi R_1 R_2)^2}$$

Εξίσωση Radar

17

$$W_{Ar} (dBW) = P_t (dBW) + G_{gt} (dBW) + G_{gr} (dBW) + 20 \log(\lambda) \\ - 30 \log(4\pi) - 20 \log(R_1) - 20 \log(R_2) + 10 \log(\sigma_{RCS})$$

όπου $10 \log(\sigma_{RCS}) = RCS (dBm^2)$

Για μονοσταθές radar: $R_1 = R_2 = R$

$$G_{gt}(\theta_t, \varphi_t) = G_{gr}(\theta_r, \varphi_r)$$

$$10 \log(\sigma_{RCS}) = RCS (dBm^2)$$

Εξίσωση Radar

18

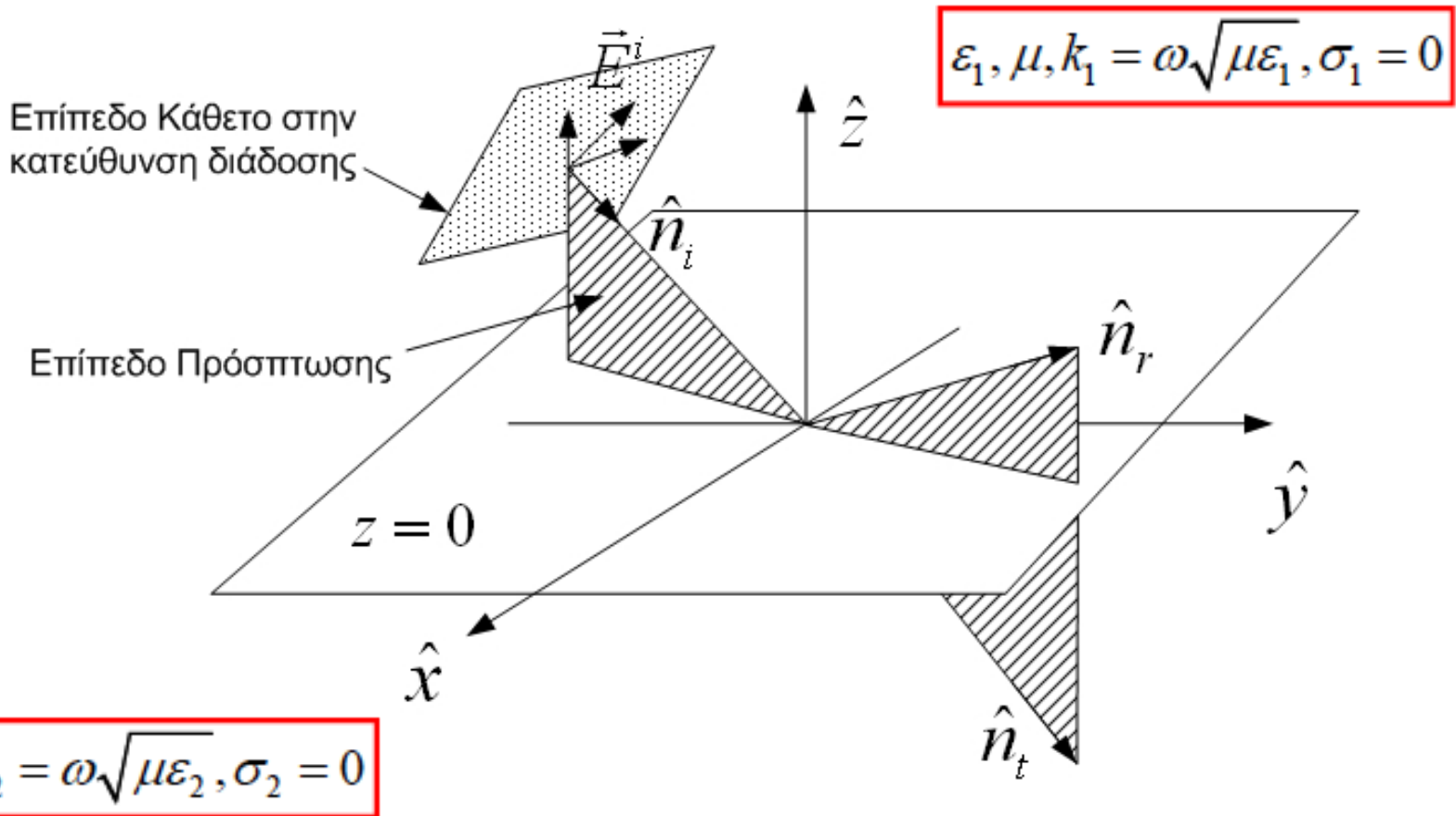
□ Μέγιστη Εμβέλεια

$$R_{\max} = \left(\frac{P_t}{W_{Ar \min}} \frac{G_{gt}^2(\theta_t, \varphi_t) \sigma_{RCS} \lambda^2}{(4\pi)^3} \right)^{1/4}$$

Υπάρχουν μετρημένες τιμές για το RCS για διάφορους σκεδαστές, κυρίως κτίρια, σε τέσσερις Ευρωπαϊκές πόλεις. Οι τιμές που δίνονται κυμαίνονται από αρνητικές τιμές του RCS σε dBm^2 , ως 55.7 dBm^2 .

Ανάκλαση Επίπεδων Κυμάτων με Πλάγια Πρόσπτωση

19



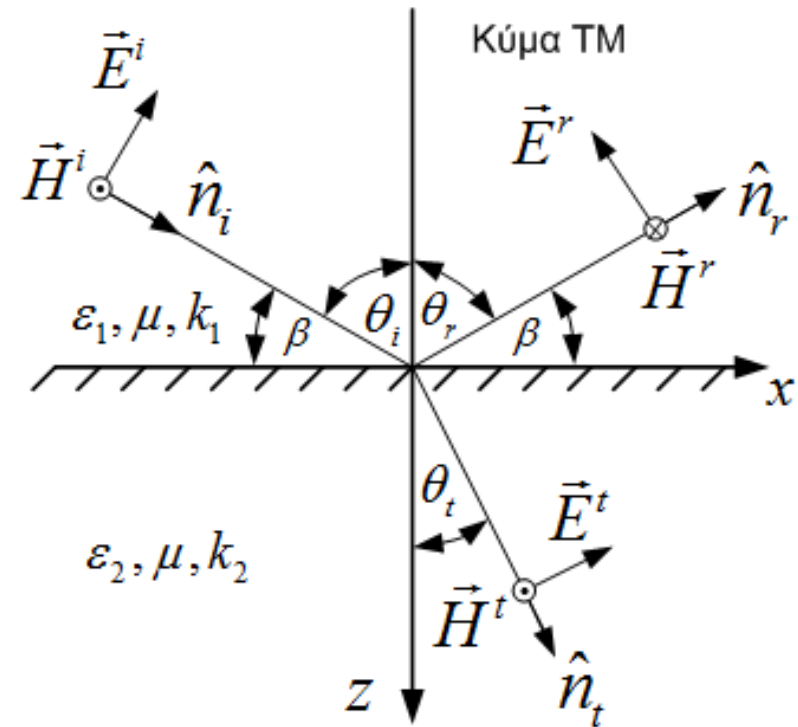
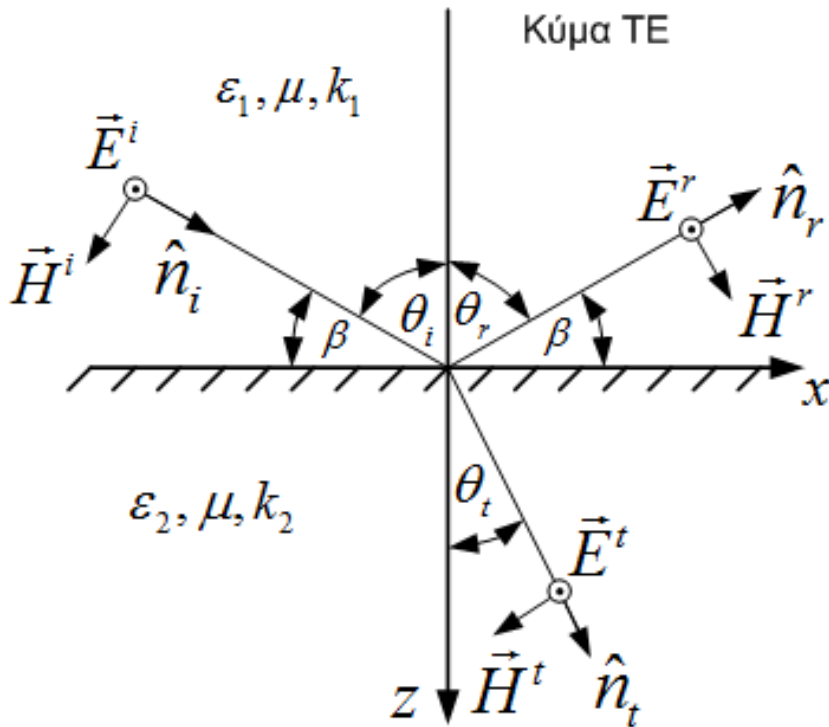
Ανάκλαση Επίπεδων Κυμάτων με Πλάγια Πρόσπτωση

20

- Οι κατευθύνσεις διάδοσης του ανακλώμενου και του μεταδιδόμενου κύματος βρίσκονται επίσης στο επίπεδο πρόσπτωσης.
- Μπορούμε να αναλύσουμε το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου σε δύο συνιστώσες, μία κάθετη στο επίπεδο πρόσπτωσης, η οποία καλείται **κάθετη πόλωση (perpendicular polarization)** και μία που βρίσκεται στο επίπεδο πρόσπτωσης και καλείται **παράλληλη πόλωση (parallel polarization)**.
- Θεωρούμε ότι το επίπεδο πρόσπτωσης συμπίπτει με το επίπεδο xz , ώστε να είναι εύκολη η απεικόνιση

Κάθετη & Παράλληλη Πόλωση

21



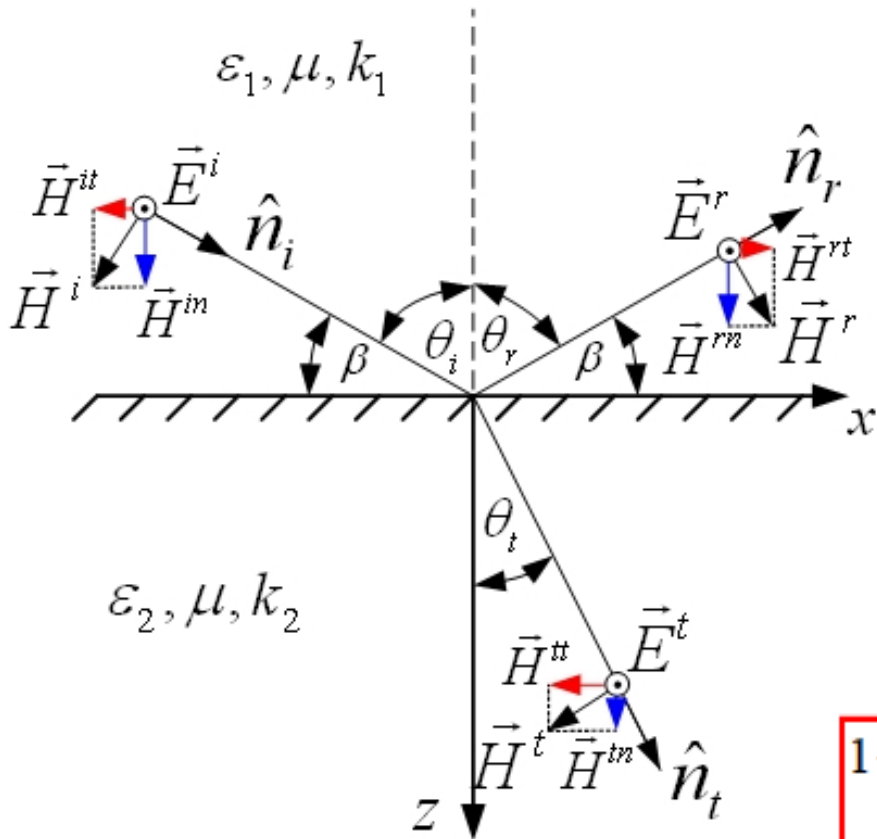
Αν το επίπεδο $z=0$ είναι οριζόντιο

Κάθετη (perpendicular) = Οριζόντια (horizontal)

Παράλληλη (parallel) = Κατακόρυφη (vertical)

Κάθετη (Οριζόντια) Πόλωση

22



$$\theta_r = \theta_i$$

$$\sin(\theta_t) = \frac{k_1}{k_2} \sin(\theta_i) = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} \sin(\theta_i)$$

$$R_{\perp} = \frac{E^r}{E^i} \quad T_{\perp} = \frac{E^t}{E^i}$$

$$1 + R_{\perp} = T_{\perp}$$

$$1 - R_{\perp} = \frac{Z_1 \cos(\theta_t)}{Z_2 \cos(\theta_i)} T_{\perp} = \sqrt{\frac{\epsilon_2 \cos(\theta_t)}{\epsilon_1 \cos(\theta_i)}} T_{\perp}$$

Κάθετη (Οριζόντια) Πόλωση

23

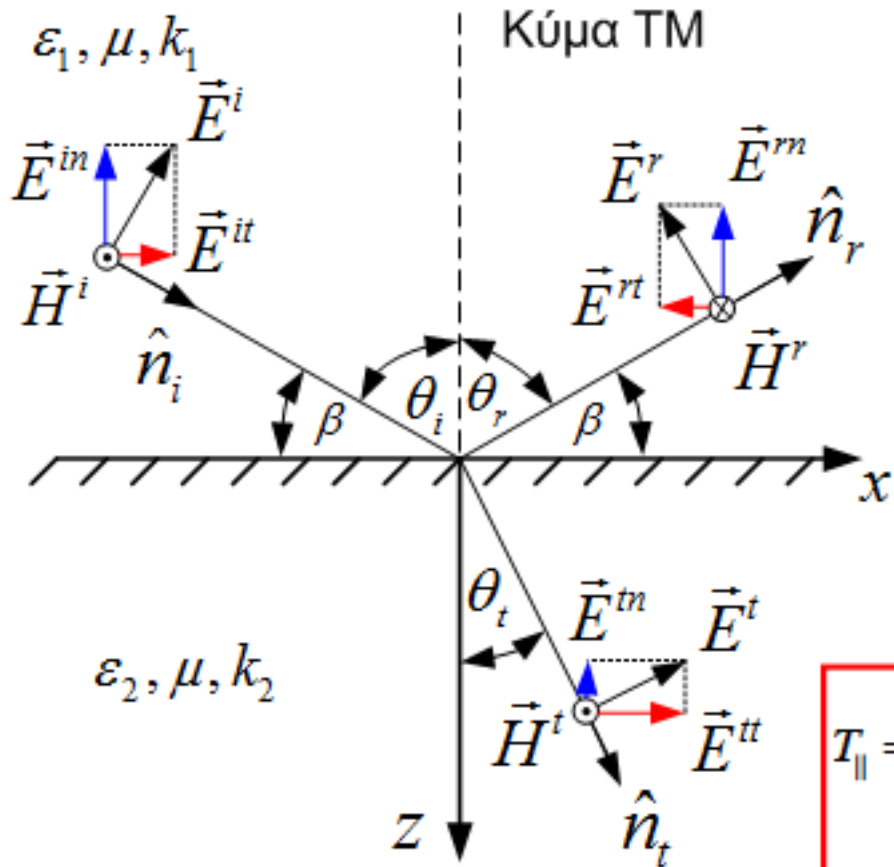
$$T_{\perp} = \frac{2 \cos(\theta_i)}{\cos(\theta_i) + \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_1} \cos(\theta_t)} \quad R_{\perp} = \frac{\cos(\theta_i) - \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_1} \cos(\theta_t)}{\cos(\theta_i) + \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_1} \cos(\theta_t)}$$

$$T_{\perp} = \frac{2 \cos(\theta_i)}{\cos(\theta_i) + \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_1 - \sin^2(\theta_i)}} \\ R_{\perp} = \frac{\cos(\theta_i) - \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_1 - \sin^2(\theta_i)}}{\cos(\theta_i) + \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_1 - \sin^2(\theta_i)}}$$

$$T_{\perp} = \frac{2 \sin(\beta)}{\sin(\beta) + \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_1 - \cos^2(\beta)}} \quad R_{\perp} = \frac{\sin(\beta) - \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_1 - \cos^2(\beta)}}{\sin(\beta) + \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_1 - \cos^2(\beta)}}$$

Παράλληλη (Κατακόρυφη) Πόλωση

24



$$T_{\parallel} = \frac{E^t}{E^i} = (1 - R_{\parallel}) \frac{\cos(\theta_i)}{\cos(\theta_t)}$$

$$R_{\parallel} = \frac{E^r}{E^i} = \frac{(\varepsilon_2 / \varepsilon_1) \cos(\theta_i) - \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_1 - \sin^2(\theta_i)}}{(\varepsilon_2 / \varepsilon_1) \cos(\theta_i) + \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_1 - \sin^2(\theta_i)}}$$

Παράλληλη (Κατακόρυφη) Πόλωση

25

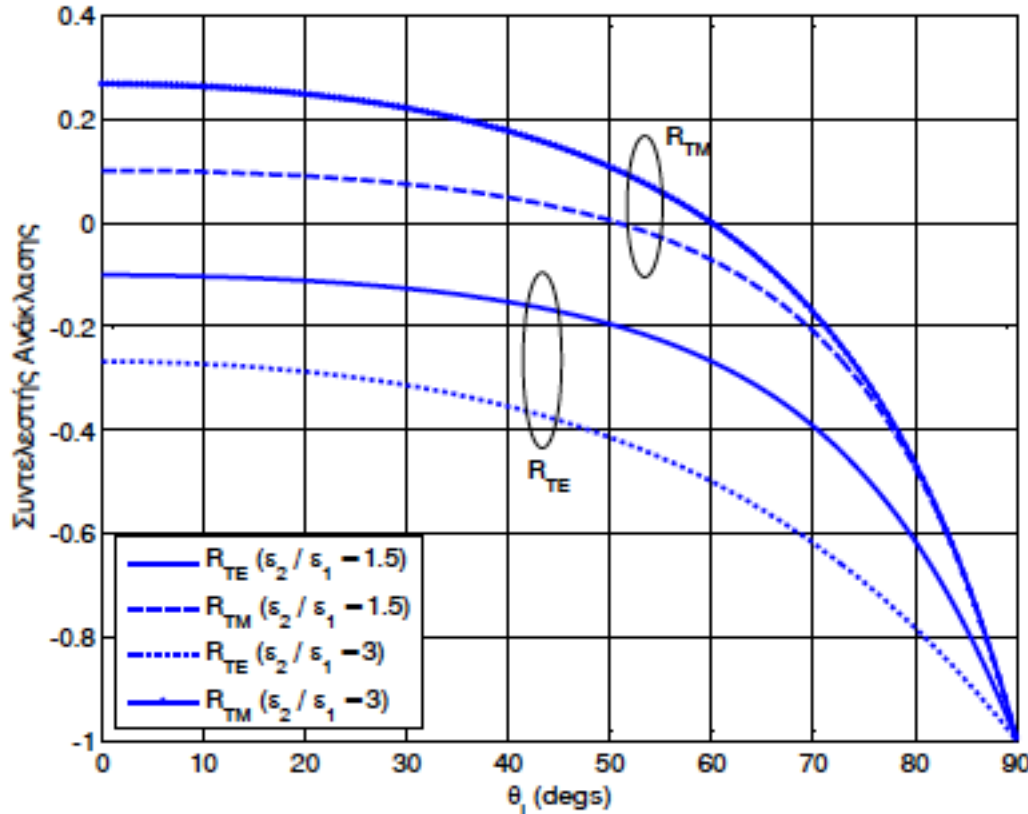
$$T_{\parallel} = \frac{2\sqrt{(\varepsilon_2 / \varepsilon_1)} \sin(\beta)}{(\varepsilon_2 / \varepsilon_1) \sin(\beta) + \sqrt{(\varepsilon_2 / \varepsilon_1) - \cos^2(\beta)}}$$
$$R_{\parallel} = \frac{(\varepsilon_2 / \varepsilon_1) \sin(\beta) - \sqrt{(\varepsilon_2 / \varepsilon_1) - \cos^2(\beta)}}{(\varepsilon_2 / \varepsilon_1) \sin(\beta) + \sqrt{(\varepsilon_2 / \varepsilon_1) - \cos^2(\beta)}}$$

$$\theta_i = 90^\circ \quad R_{\perp} = R_{\parallel} = -1$$

$$\theta_i = 0^\circ \quad R_{\perp} = R_{\parallel} = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_1}}{1 + \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_1}}$$

Παράλληλη (Κατακόρυφη) Πόλωση

26



Γωνία Brewster ή
Γωνία Πόλωσης

$$R_{\parallel} = 0$$

Αν ένα κυκλικά ή ελλειπτικά πολωμένο επίπεδο κύμα προσπίπτει με τη γωνία Brewster, τότε το ανακλώμενο κύμα έχει μόνο γραμμική (κάθετη) πόλωση.

$$\sin^2(\theta_B) = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}$$

$$\cos^2(\theta_B) = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2}$$

$$\tan(\theta_B) = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}$$

Ανάκλαση από Έδαφος

27

- Για το έδαφος $\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \frac{\epsilon'}{\epsilon_o} = \epsilon_{rc} = \epsilon_r - j\sigma_r$

$$R_{\perp} = \frac{\sin(\beta) - \sqrt{\epsilon_{rc} - \cos^2(\beta)}}{\sin(\beta) + \sqrt{\epsilon_{rc} - \cos^2(\beta)}}$$

$$R_{\parallel} = \frac{\epsilon_{rc} \sin(\beta) - \sqrt{\epsilon_{rc} - \cos^2(\beta)}}{\epsilon_{rc} \sin(\beta) + \sqrt{\epsilon_{rc} - \cos^2(\beta)}}$$

- Οι συντελεστές είναι μιγαδικοί και το ανακλώμενο κύμα διαφέρει όχι μόνο κατά πλάτος αλλά και κατά φάση από το προσπίπτον.
- Αν ένας δέκτης κινείται στο χώρο και λαμβάνει μια συνιστώσα ως ανάκλαση από γωνία Brewster, τότε με την κίνηση του δέκτη η συνεισφορά της συνιστώσας αυτής θα μεταβάλλεται γρήγορα εξαιτίας της γρήγορης μεταβολής πλάτους και φάσης.
- Άρα τόσο πιο γρήγορη θα είναι και η μεταβολή του πλάτους του λαμβανόμενου σήματος (διαλείψεις) αλλά και της ολίσθησης Doppler.

Ανάκλαση από Έδαφος

28

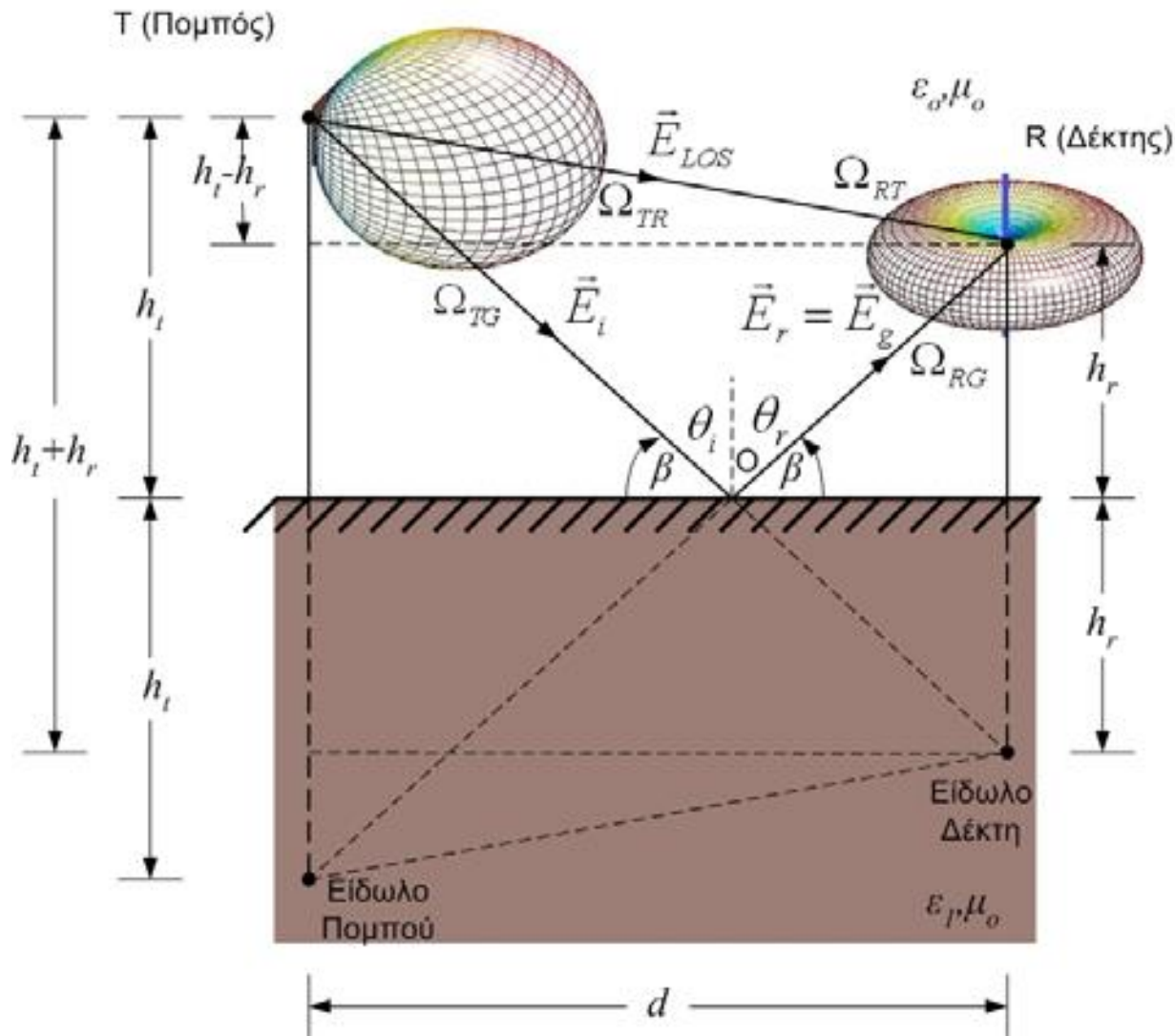
- Αν το προσπίπτον είναι κυκλικά πολωμένο και η γωνία πρόσπτωσης είναι μικρότερη από τη γωνία Brewster, τότε το ανακλώμενο είναι κυκλικά πολωμένο με αντεστραμμένη τη φορά περιστροφής του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου.
- Αν η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη από τη γωνία Brewster, τότε η φορά περιστροφής διατηρείται.
- Αν η γωνία είναι ίση με τη γωνία Brewster τότε η πόλωση μετατρέπεται σε γραμμική εξαιτίας του μηδενισμού του συντελεστή ανάκλασης για τη συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην παράλληλη πόλωση.

Ανάκλαση από Έδαφος

- Αν η επιφάνεια ανάκλασης είναι ένας καλός αγωγός, τότε η σχέση πλατών των δύο συνιστωσών του πεδίου παραμένει η ίδια, οπότε αν είχαμε κυκλική πόλωση αυτή θα διατηρηθεί και μετά την ανάκλαση.
- Αν το μέσο ανάκλασης είναι διηλεκτρικό, η σχέση των πλατών αλλάζει επειδή είναι διαφορετικές οι τιμές των συντελεστών ανάκλασης στις δύο πολώσεις, οπότε η κυκλική πόλωση θα μετατραπεί σε ελλειπτική.
- Στην περίπτωση που το προσπίπτον έχει ελλειπτική πόλωση πρέπει να σημειώσουμε ότι στη γενική περίπτωση το ανακλώμενο αλλά και το μεταδιδόμενο κύμα θα έχει ελλειπτική πόλωση με φορά περιστροφής την ίδια ή και διαφορετική ανάλογα με τις σχέσεις των πλατών και των φάσεων των δύο συνιστωσών.

Μοντέλο Επίπεδης Γης

30



- Το κυριότερο πραγματικό πρόβλημα που εισάγεται στο μοντέλο των δύο ακτίνων είναι η διαφορά φάσης των δύο ακτίνων.
- Για να γίνει αυτό πρέπει να μελετηθεί το Η/Μ πεδίο ως προς την ένταση και όχι προς την ισχύ του.
- Αυτό γιατί η ένταση του καθορίζει τάση κατά μέτρο και φάση στην κεραία λήψης.

$$\vec{E}_{total} = \vec{E}_{LOS} + \vec{E}_g$$

Μοντέλο Επίπεδης Γης

31

$$E_{total}(d) = E(d_{LOS}, \Omega_{TR}) e^{-jkd_{LOS}} + R \cdot E(d_r, \Omega_{TG}) e^{-jkd_r}$$

$$E_r = E_g = R \cdot E_i = |R| e^{j\phi} E_i$$

$$\begin{aligned} h_t - h_r &\ll d & \frac{1}{d_{LOS}} &\approx \frac{1}{d_r} \approx \frac{1}{d} \\ h_t + h_r &\ll d & & \end{aligned}$$

$$E(d_{LOS}, \Omega_T) \approx E(d_r, \Omega_T) \approx E(d, \Omega_T)$$

$$E_{total}(d, \Omega_T) = E(d, \Omega_T) (e^{-jkd_{LOS}} + R e^{-jkd_r}) = E(d, \Omega_T) e^{-jkd_{LOS}} (1 + R e^{-jk\Delta})$$

Μοντέλο Επίπεδης Γης

32

$$\Delta \approx 2 \frac{h_t h_r}{d} \quad k\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{2h_t h_r}{d} = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d}$$

$$\begin{aligned} |E_{total}(d, \Omega_T)| &= |E(d, \Omega_T) e^{-jkd_{LOS}} (1 + |R| e^{j\phi} e^{-jk\Delta})| \\ &= |E_{LOS}(d, \Omega_T)| \sqrt{1 + |R|^2 + 2|R| \cos(k\Delta - \phi)} \end{aligned}$$

Για μικρές γωνίες
πρόσπτωσης

$$R = -1 = 1e^{j180}$$

$$\begin{aligned} |E_{total}(d, \Omega_T)| &= |E(d, \Omega_T) e^{-jkd_{LOS}} (1 - e^{-jk\Delta})| \\ &= |E_{LOS}(d, \Omega_T)| \sqrt{2 - 2\cos(k\Delta)} \\ &= 2 |E_{LOS}(d, \Omega_T)| \left| \sin\left(\frac{k\Delta}{2}\right) \right| \end{aligned}$$

Μοντέλο Επίπεδης Γης

33

Όταν $d > \frac{21h_t h_r}{\lambda}$ δηλαδή $\frac{k\Delta}{2} < 0.3rad$

$$\sin\left(\frac{k\Delta}{2}\right) \approx \frac{k\Delta}{2}$$

$$|E_{total}(d, \Omega_T)| \approx 2|E_{LOS}(d, \Omega_T)| \left(\frac{k\Delta}{2}\right) = 2|E_{LOS}(d, \Omega_T)| \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d}$$

$$P_r(d) = \frac{|E_{total,eff}(d, \theta, \varphi_t)|^2}{120\pi} A_{eff}(\theta_r, \varphi_r) = P_t \cdot G_t(\theta_t, \varphi_t) \cdot G_r(\theta_r, \varphi_r) \frac{(h_t h_r)^2}{d^4}$$

$$PL(dB) = 40\log(d) - 10\log G_t(\theta_t, \varphi_t) - 10\log G_r(\theta_r, \varphi_r) - 20\log h_t - 20\log h_r$$

Ρυθμός πτώσης ισχύος : 40dB/decade

Μοντέλο Επίπεδης Γης

34

- Αν δεν εφαρμόσουμε την προσέγγιση $\sin\left(\frac{k\Delta}{2}\right) \approx \frac{k\Delta}{2}$

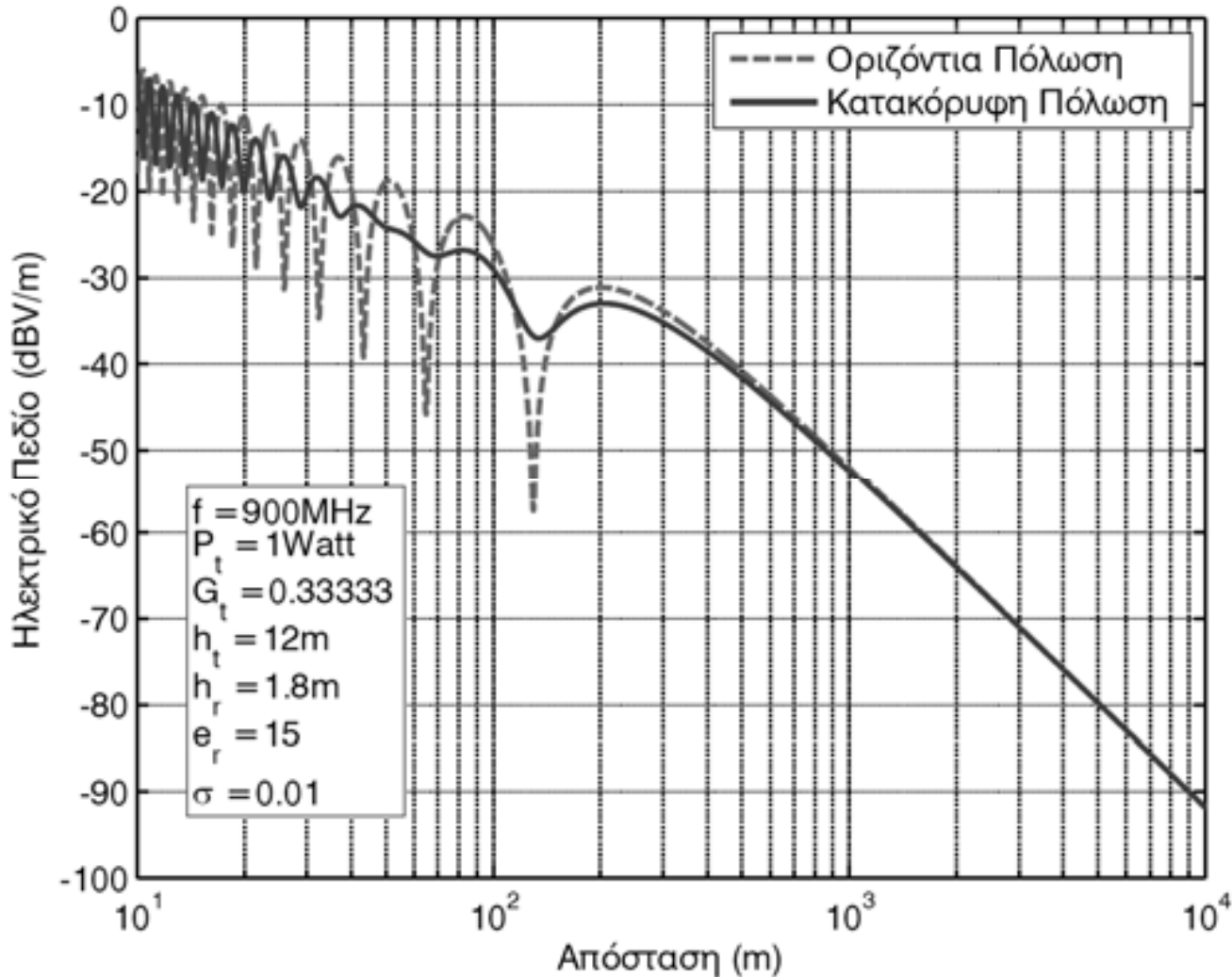
$$P_r(d) = P_t \cdot G_t(\theta_t, \varphi_t) \cdot G_r(\theta_r, \varphi_r) \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \cdot 4 \sin^2\left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d}\right)$$

- Παράγοντας Διάδοσης: $F = \left| \frac{E_{total}}{E_{LOS}} \right|$

- Για το Μοντέλο Επίπεδης Γης: $F = \left| 1 + \text{Re}^{-jk\Delta} \right|$

Μοντέλο Επίπεδης Γης

35



Breakpoint

$$d = \frac{4h_t h_r}{\lambda}$$

Μοντέλο Επίπεδης Γης

36

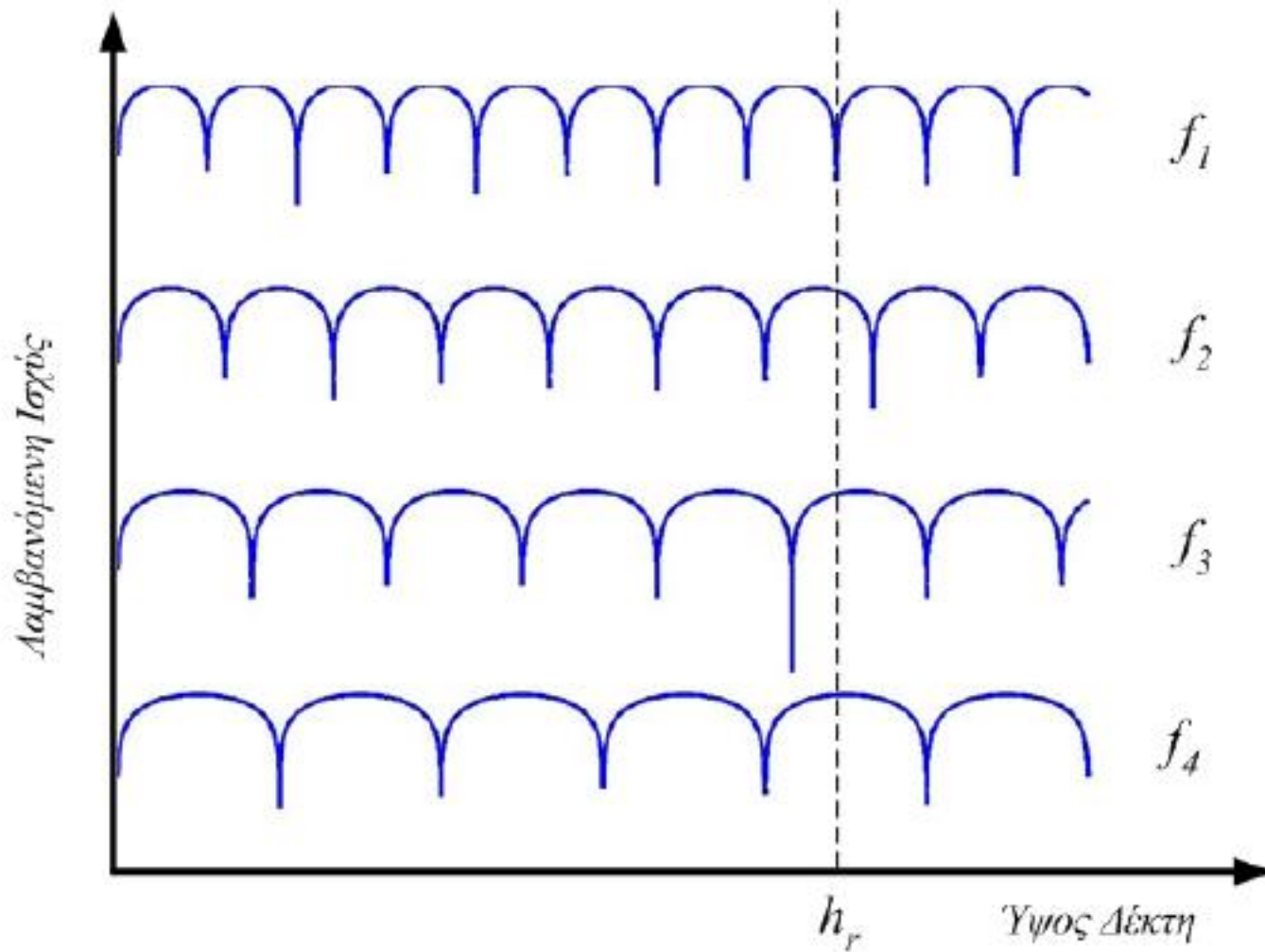
- Η λαμβανόμενη ισχύς παρουσιάζει μέγιστα και ελάχιστα

$$\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} = \frac{k\pi}{2} = \begin{cases} k = 2\nu + 1 = 1, 3, 5, \dots, \text{max} \\ k = 2\nu = 2, 4, 6, \dots, \text{min} \end{cases}$$

- Πρώτο Μέγιστο προς πομπό $d = \frac{4h_t h_r}{\lambda}$
- Πρώτο Ελάχιστο προς πομπό $d = \frac{2h_t h_r}{\lambda}$

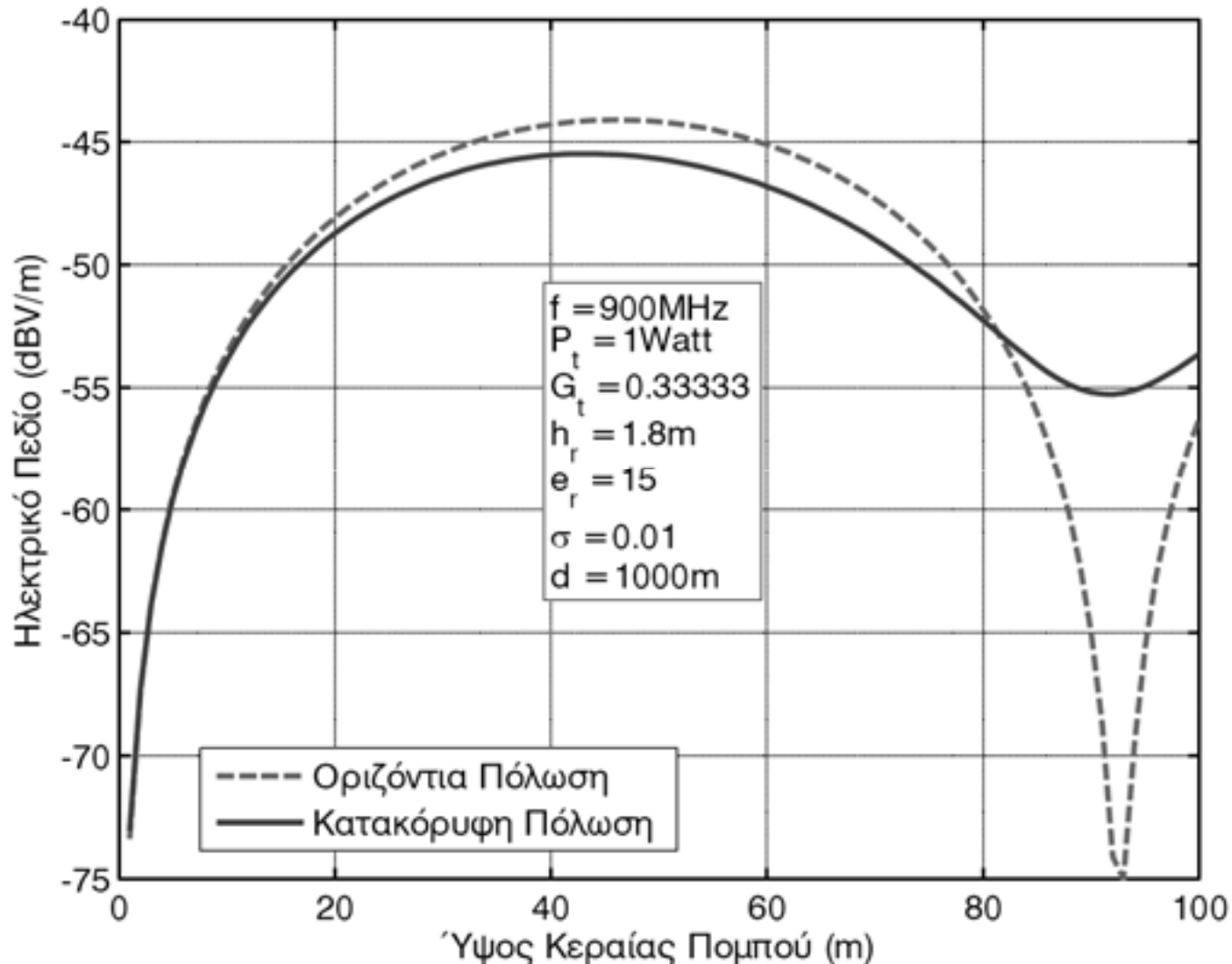
Μοντέλο Επίπεδης Γης

37



Μοντέλο Επίπεδης Γης

38



Κέρδος Ύψους
κεραίας
(6dB για κάθε
διπλασιασμό
του ύψους)