



Πανεπιστήμιο Αιγαίου

Ασύρματες Επικοινωνίες

Ενότητα 5 : Παραδείγματα Κεραιών

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

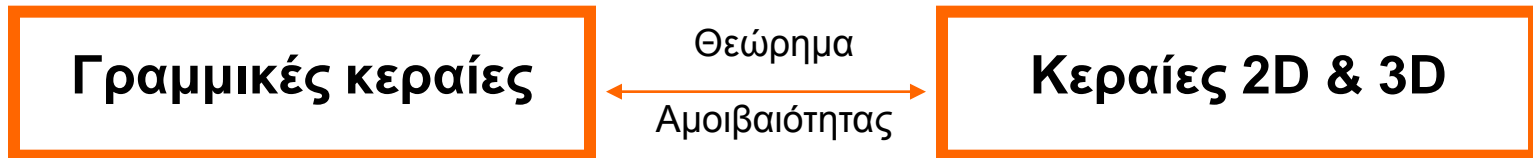
4

- Γραμμικές Κεραίες
 - Δίπολο Hertz
 - Γραμμική διπολική κεραία αυθαίρετου μήκους
 - Δίπολο $\lambda/2$
- Βροχοειδής Κεραίες
 - Μικρό κυκλικό πλαίσιο
 - Κυκλικός Βρόγχος αυθαίρετου μήκους
- Κεραίες υπεράνω εδάφους
- Κεραίες ευρείας ζώνης
- Χοανοκεραίες
- Κεραίες ανακλαστήρα

Τύποι κεραιών

5

α) Αναλυτική μελέτη



β) Τεχνική άποψη

Στοιχειώδεις κεραιές

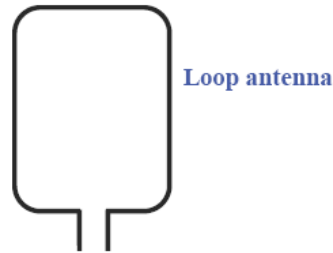
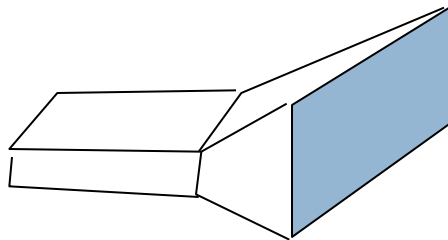
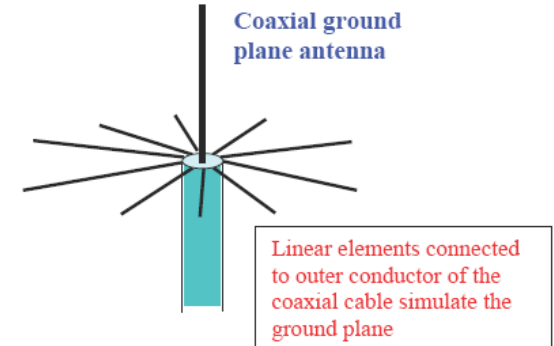
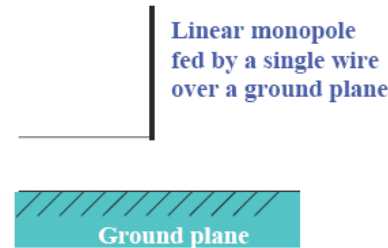
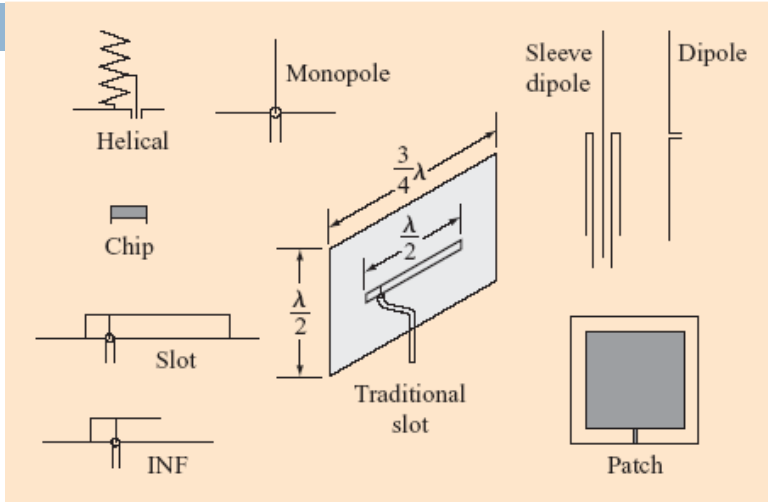
- Dipole, Loop, Helix
- Slot, Horn, Freq. Indep.

Σύνθετες κεραιές

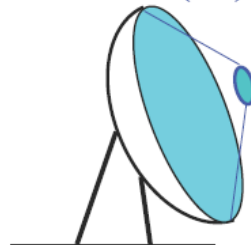
- Arrays (linear, planar, Yagi)
- Reflectors (corner, parab.)

Κεραίες και εφαρμογές

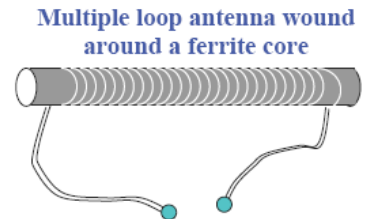
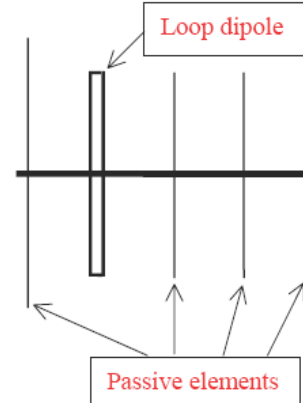
6



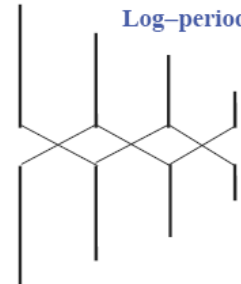
Parabolic (dish) antenna



Uda-Yagi dipole array



Log-periodic array



Ασύρματες Επικοινωνίες

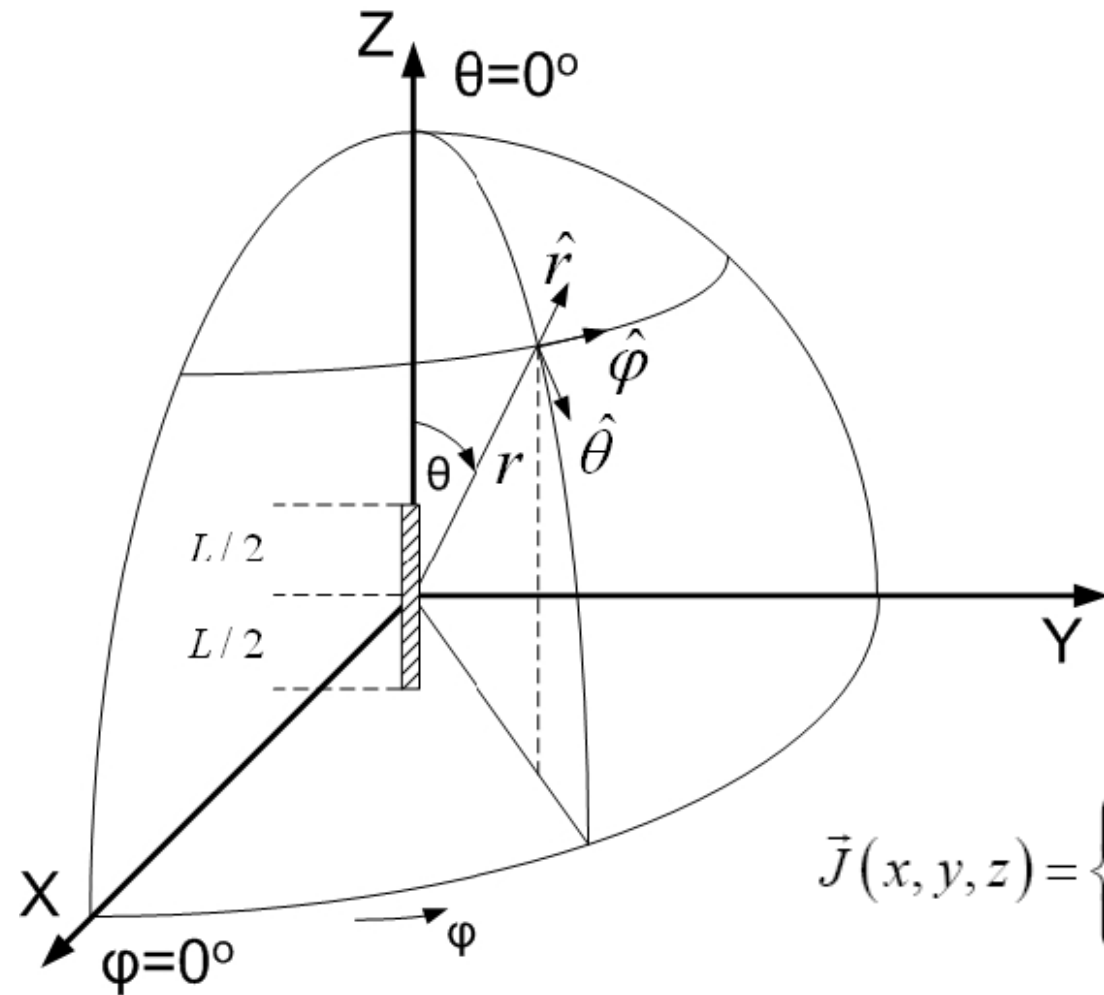
Γραμμικές Κεραίες

7

- Απλές κατασκευές
- Απλή ανάλυση τρόπου λειτουργίας
- Εξάρτηση από το ηλεκτρικό τους μήκος
- Χρήση σε πληθώρα εφαρμογών
 - Απλά στοιχεία
 - Στοιχεία σύνθετων κεραιοδιατάξεων (στοιχειοκεραίες)

Δίπολο Hertz ή Βραχύ Ρευματικό Στοιχείο

8



- Το δίπολο Hertz είναι ένας ευθύγραμμος ακτινοβολητής με μήκος $L \leq \lambda$, δηλαδή το μήκος του είναι τόσο μικρό ώστε το ρεύμα που τον διαρρέει να μπορεί να θεωρηθεί σταθερό σε όλη την έκτασή του.

$$\vec{J}(x, y, z) = \begin{cases} I\delta(x)\delta(y)\hat{z} & -L/2 \leq z \leq L/2 \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases}$$

$$d \ll L$$

Δίπολο Hertz ή Βραχύ Ρευματικό Στοιχείο

9

$$\begin{aligned}\vec{A}(x, y, z) &= \frac{\mu}{4\pi} \int_V \vec{J}(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dV' \\ &= \frac{\mu}{4\pi} \frac{e^{-jkR}}{R} \int_{-L/2}^{L/2} \int_x \int_y [I \delta(x') \delta(y') \hat{z}] dy' dx' dz' \\ &= \frac{\mu I}{4\pi} \frac{e^{-jkR}}{R} \hat{z} \int_{-L/2}^{L/2} dz' = \frac{\mu I L e^{-jkR}}{4\pi R} \hat{z}\end{aligned}$$

Επειδή $r \gg L$ μπορούμε να θεωρήσουμε ότι

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - z')^2} \cong \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = r$$

Αλλαγή
συντεταγμένων

$$\vec{A} = A_z \hat{z} = A_r \hat{r} + A_\theta \hat{\theta} = \frac{\mu I L e^{-jkr}}{4\pi r} \cos(\theta) \hat{r} - \frac{\mu I L e^{-jkr}}{4\pi r} \sin(\theta) \hat{\theta}$$

Δίπολο Hertz ή Βραχύ Ρευματικό Στοιχείο

10

- Το διανυσματικό δυναμικό A καθώς και τα πεδία E , H προκύπτουν ανεξάρτητα της συντεταγμένης φ λόγω της κυκλικής συμμετρίας γύρω από τον άξονα Z .

$$\vec{H}(r, \theta) = \frac{1}{\mu_o} \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad \Rightarrow \quad H_\varphi(r, \theta) = \frac{IL}{4\pi} e^{-jk r} \left(\frac{jk}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \sin(\theta)$$

$$E_r(r, \theta) = \frac{IL}{4\pi} e^{-jk r} \left(\frac{2Z_o}{r^2} + \frac{2}{j\omega\epsilon_o r^3} \right) \cos(\theta)$$

$$E_\theta(r, \theta) = \frac{IL}{4\pi} e^{-jk r} \left(\frac{j\omega\mu_o}{r} + \frac{Z_o}{r^2} + \frac{1}{j\omega\epsilon_o r^3} \right) \sin(\theta)$$

Δίπολο Hertz ή Βραχύ Ρευματικό Στοιχείο

11

- Το πεδίο ακτινοβολίας, δηλαδή στη μακρινή περιοχή της κεραίας προκύπτει για ($r \rightarrow \infty$), όπου μπορούμε πλέον να αμελήσουμε τους όρους ($1/r^3$), ($1/r^2$) και να κρατήσουμε μόνο εκείνους που μεταβάλλονται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση, δηλαδή ($1/r$).

$$H_{\phi}(r, \theta) \cong \frac{jkIL}{4\pi r} e^{-jkr} \sin(\theta)$$

$$E_{\theta}(r, \theta) \cong \frac{j\omega\mu_0 IL}{4\pi r} e^{-jkr} \sin(\theta) = Z_0 \frac{jkIL}{4\pi r} e^{-jkr} \sin(\theta) = Z_0 H_{\phi}(r, \theta)$$

Δίπολο Hertz ή Βραχύ Ρευματικό Στοιχείο

12

$$\begin{aligned}\vec{P}_{av}(\vec{r}) &= \frac{1}{2} \operatorname{Re}[\vec{E}(\vec{r}) \times \vec{H}^*(\vec{r})] \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{Re}[\hat{r} E_\theta(r, \theta) H_\varphi^*(r, \theta)] \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{Re}[\hat{r} Z_o |H_\varphi|^2] \\ &= \frac{Z_o k^2 I^2 L^2}{32\pi^2 r^2} \sin^2(\theta) \hat{r} = P_r(r, \theta) \hat{r} \left(\frac{\text{Watt}}{m^2} \right)\end{aligned}$$

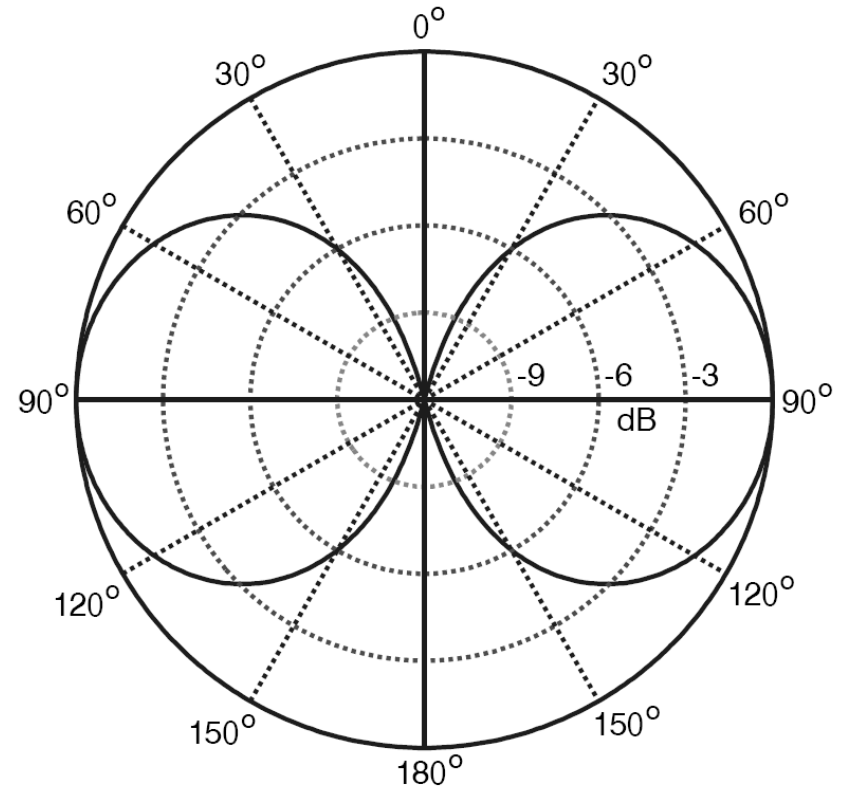
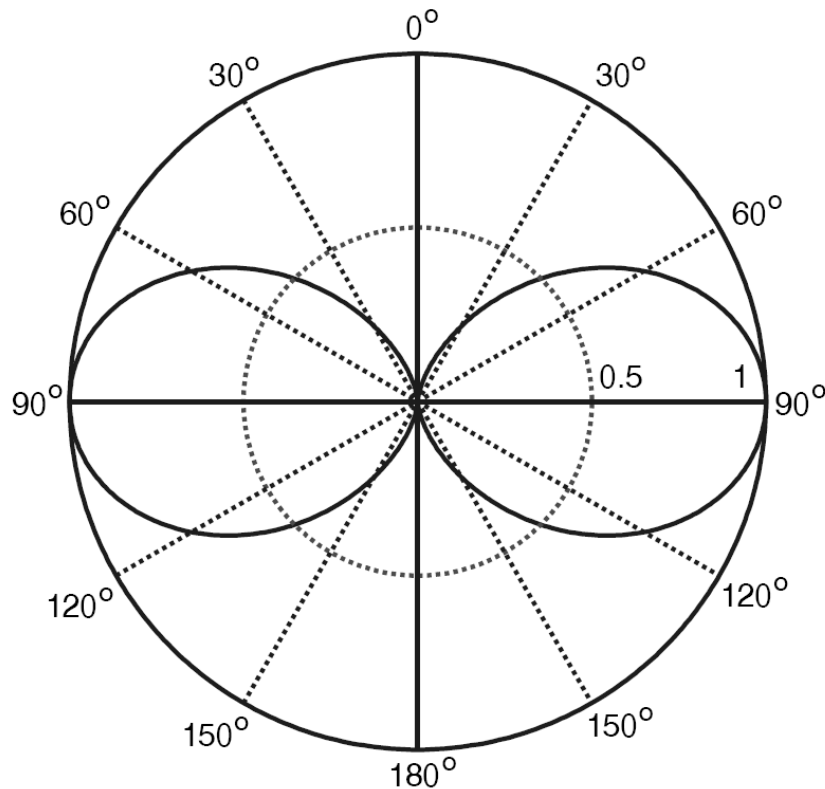
$$U(\theta) = r^2 P_r(r, \theta) = \frac{Z_o k^2 I^2 L^2}{32\pi^2} \sin^2(\theta)$$

Δίπολο Hertz ή Βραχύ Ρευματικό Στοιχείο

13

Κανονικοποιημένο πολικό διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας διπόλου Hertz

$$U(\theta) = r^2 P_r(r, \theta) = \frac{Z_o k^2 I^2 L^2}{32\pi^2} \sin^2(\theta)$$



Ανεξάρτητο της γωνίας ϕ (ομοιοτευθυντικό)

Δίπολο Hertz ή Βραχύ Ρευματικό Στοιχείο

14

$$\begin{aligned}W_{rad} &= \oint_S \vec{P}_{av}(\vec{r}) \cdot d\vec{S} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi P_r(r, \theta) \hat{r} \cdot [\hat{r} r^2 \sin(\theta) d\theta d\varphi] \\&= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi P_r(r, \theta) r^2 \sin(\theta) d\theta = \frac{Z_o k^2 I^2 L^2}{16\pi} \int_0^\pi \sin^3(\theta) d\theta \\&= \frac{Z_o \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 I^2 L^2}{16\pi} \int_0^\pi \sin^3(\theta) d\theta = \frac{Z_o \pi I^2 L^2}{4\lambda^2} \int_{-1}^1 (1-x^2) dx \\&= \frac{Z_o \pi I^2 L^2}{4\lambda^2} \left(2 - \frac{2}{3}\right) = \frac{Z_o \pi I^2 L^2}{4\lambda^2} \frac{4}{3} = \frac{Z_o \pi I^2 L^2}{3\lambda^2} = \frac{40\pi^2 I^2 L^2}{\lambda^2} \quad (Watts)\end{aligned}$$

$$R_{rad} = \frac{W_{rad}}{I_{eff}^2} = \frac{40\pi^2 I^2 L^2}{\lambda^2} = \frac{80\pi^2 L^2}{\lambda^2} \left(\frac{I}{\sqrt{2}}\right)^2$$

Δεν είναι αποδοτικός
ακτινοβολητής
($L \ll \lambda$)

Δίπολο Hertz ή Βραχύ Ρευματικό Στοιχείο

15

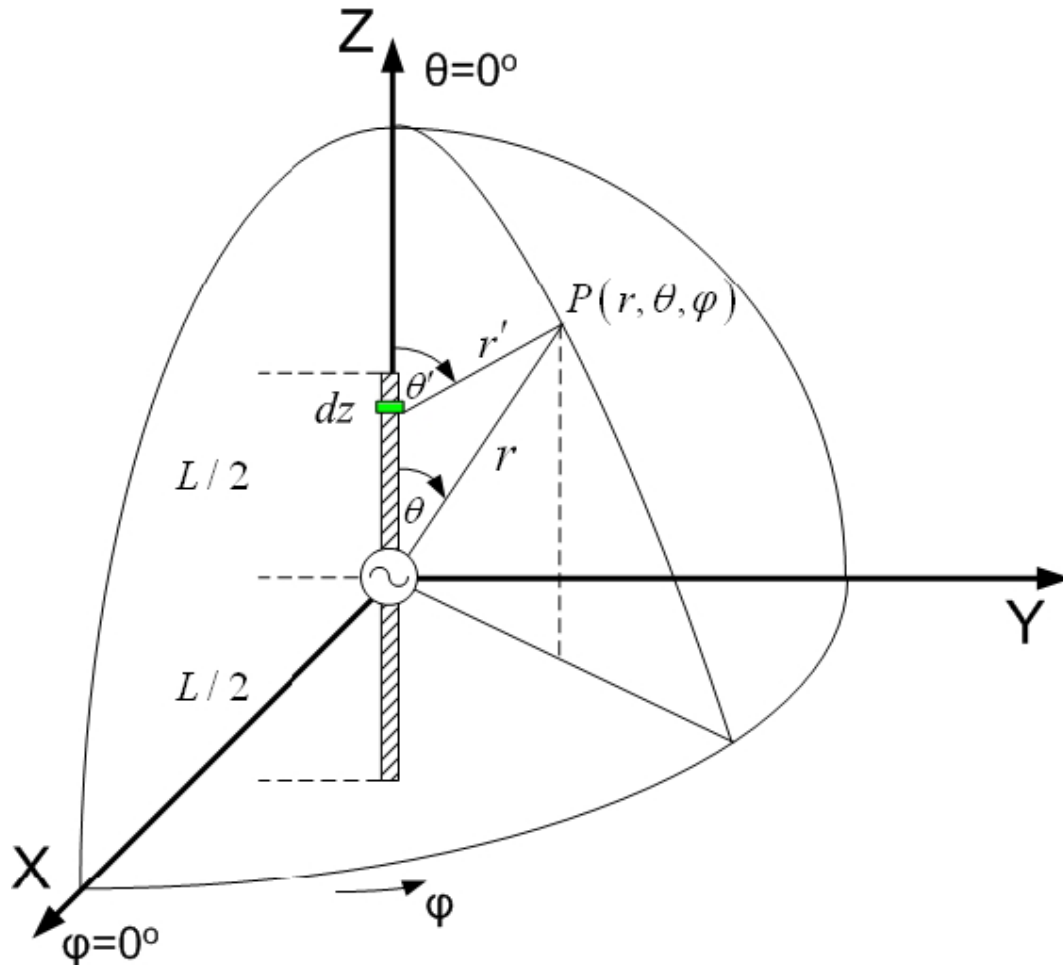
$$D_g(\theta) = 4\pi \frac{U(\theta)}{W_{rad}} = 4\pi \frac{\frac{Z_o k^2 I^2 L^2}{32\pi^2} \sin^2(\theta)}{\frac{40\pi^2 I^2 L^2}{\lambda^2}} = \frac{Z_o \sin^2(\theta)}{80\pi} = \frac{3}{2} \sin^2(\theta)$$

$$D_{Hertz} = D_g(\theta) \Big|_{\max} = \frac{3}{2} \Big|_{\theta=90^\circ} = 1.5 \approx 1.76dB$$

$$A_{eHertz} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D = \frac{3\lambda^2}{8\pi}$$

Γραμμική Διπολική Κεραία Αυθαίρετου Μήκους

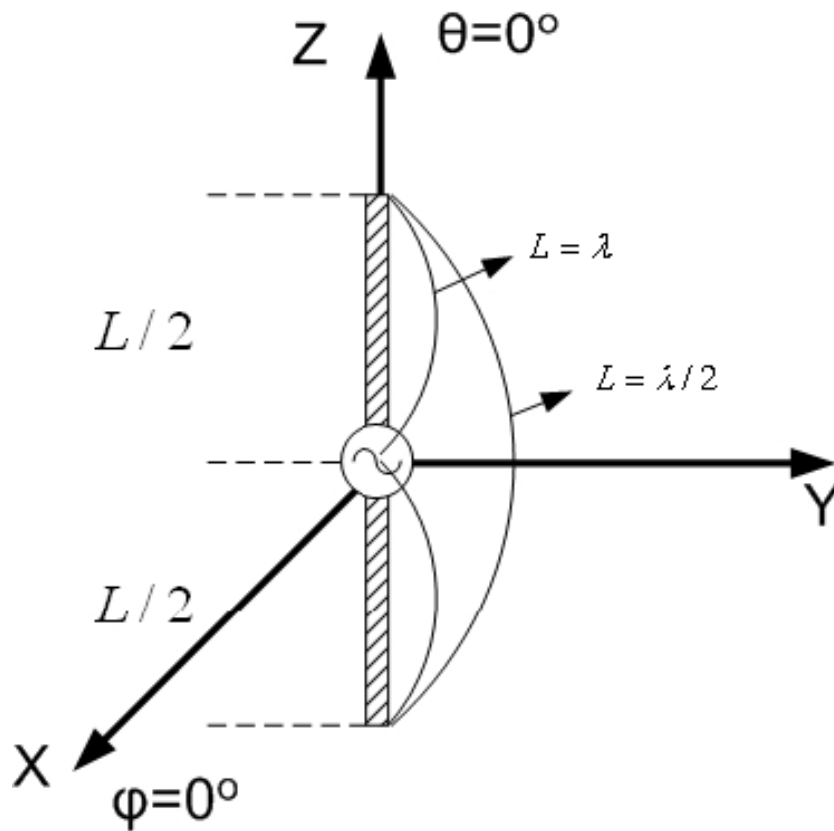
16



- Στις κεραίες αυτές, το ρεύμα δεν μπορεί να θεωρηθεί σταθερό κατά μήκος του διπόλου.
- Η λύση στο πρόβλημα αυτό έρχεται με την εφαρμογή της υπέρθεσης των λύσεων από πολλά στοιχειώδη δίπολα Hertz που υποθέτουμε ότι αποτελούν τη γραμμική διπολική κεραία.

Γραμμική Διπολική Κεραία Αυθαίρετου Μήκους

17



- Για την κατανομή του ρεύματος υποθέτουμε ότι προσεγγίζεται από τη ρευματική κατανομή μιας ανοικτοκυκλωμένης γραμμής μεταφοράς
- Δηλαδή πρόκειται για ένα στάσιμο ημιτονοειδές κύμα με μηδενική τιμή στα άκρα του διπόλου και περίοδο ίση με το μήκος κύματος.

Γραμμική Διπολική Κεραία Αυθαίρετου Μήκους

18

$$I(z) = \begin{cases} I_{\max} \sin \left[k \left(\frac{L}{2} - z \right) \right] & 0 \leq z \leq L/2 \\ I_{\max} \sin \left[k \left(\frac{L}{2} + z \right) \right] & -L/2 \leq z \leq 0 \end{cases}$$

Ρευματική κατανομή
ανοιχτοκυκλωμένης
γραμμής μεταφοράς

$$dE_{\theta}(r, \theta) = Z_o H_{\phi}(r, \theta) \cong Z_o \frac{jkI(z) dz}{4\pi r'} e^{-jk r'} \sin(\theta')$$

μακρινό πεδίο

$$r' \approx r \quad \theta' \approx \theta \quad r' \approx r - z \cos(\theta)$$



$$dE_{\theta}(r, \theta) = Z_o H_{\phi}(r, \theta) \cong Z_o \frac{jkI(z) dz}{4\pi r} \sin(\theta) e^{-jk r} e^{jkz \cos \theta}$$

Γραμμική Διπολική Κεραία Αυθαίρετου Μήκους

$$E_{\theta}(r, \theta) = \int_{-L/2}^{L/2} dE_{\theta}(r, \theta) = Z_o \frac{jkI_{\max}}{4\pi r} \sin(\theta) e^{-jkr} \int_{-L/2}^0 e^{jkz \cos \theta} \sin \left[k \left(\frac{L}{2} + z \right) \right] dz + \\ + Z_o \frac{jkI_{\max}}{4\pi r} \sin(\theta) e^{-jkr} \int_0^{L/2} e^{jkz \cos \theta} \sin \left[k \left(\frac{L}{2} - z \right) \right] dz$$

$$E_{\theta}(r, \theta) = Z_o H_{\phi}(r, \theta) \\ = Z_o \frac{jkI_{\max}}{4\pi r} e^{-jkr} \sin(\theta) \frac{2}{k \sin^2(\theta)} \left[\cos \left(k \frac{L}{2} \cos \theta \right) - \cos \left(k \frac{L}{2} \right) \right] \\ = Z_o \frac{jI_{\max}}{2\pi r} e^{-jkr} \frac{\left[\cos \left(k \frac{L}{2} \cos \theta \right) - \cos \left(k \frac{L}{2} \right) \right]}{\sin(\theta)}$$

Γραμμική Διπολική Κεραία Αυθαίρετου Μήκους

$$P_r(r, \theta) = \frac{Z_o I_{\max}^2}{8\pi^2 r^2} \frac{\left[\cos\left(k \frac{L}{2} \cos \theta\right) - \cos\left(k \frac{L}{2}\right) \right]^2}{\sin^2(\theta)}$$

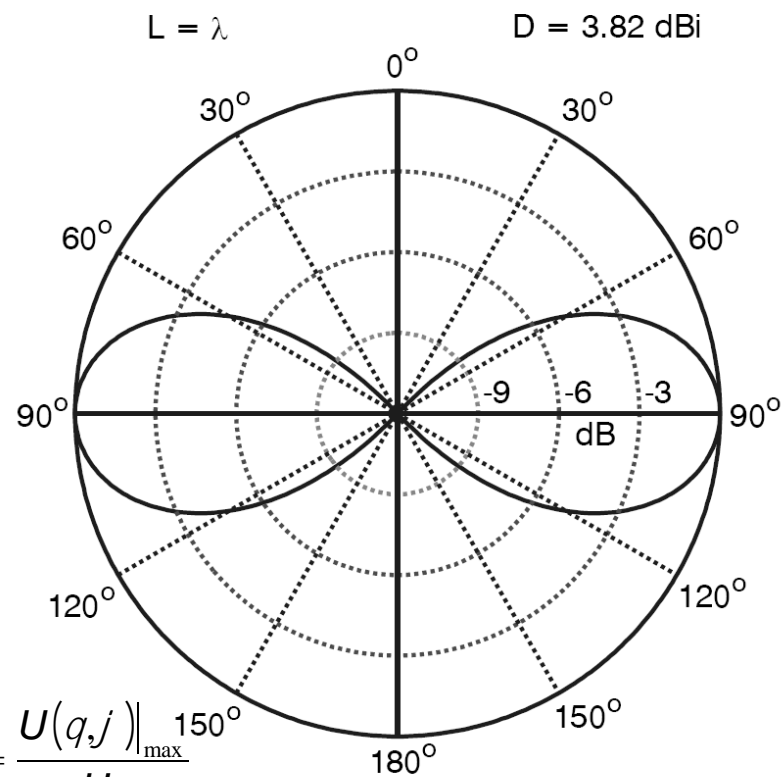
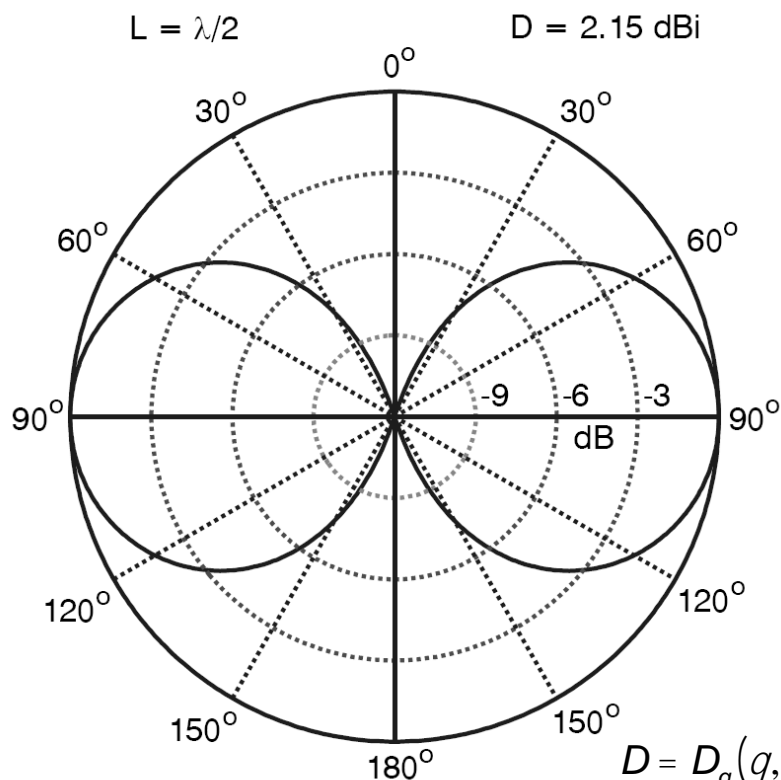
$$U(\theta) = r^2 P_r(\theta, \varphi) = \frac{Z_o I_{\max}^2}{8\pi^2} \frac{\left[\cos\left(k \frac{L}{2} \cos \theta\right) - \cos\left(k \frac{L}{2}\right) \right]^2}{\sin^2(\theta)}$$

Γραμμική Διπολική Κεραία Αυθαίρετου Μήκους

21

Κανονικοποιημένο
Διάγραμμα Ισχύος
Έντασης ακτινοβολίας

$$U(\theta) = r^2 P_r(\theta, \varphi) = \frac{Z_o I_{\max}^2}{8\pi^2} \frac{\left[\cos\left(k \frac{L}{2} \cos \theta\right) - \cos\left(k \frac{L}{2}\right) \right]^2}{\sin^2(\theta)}$$

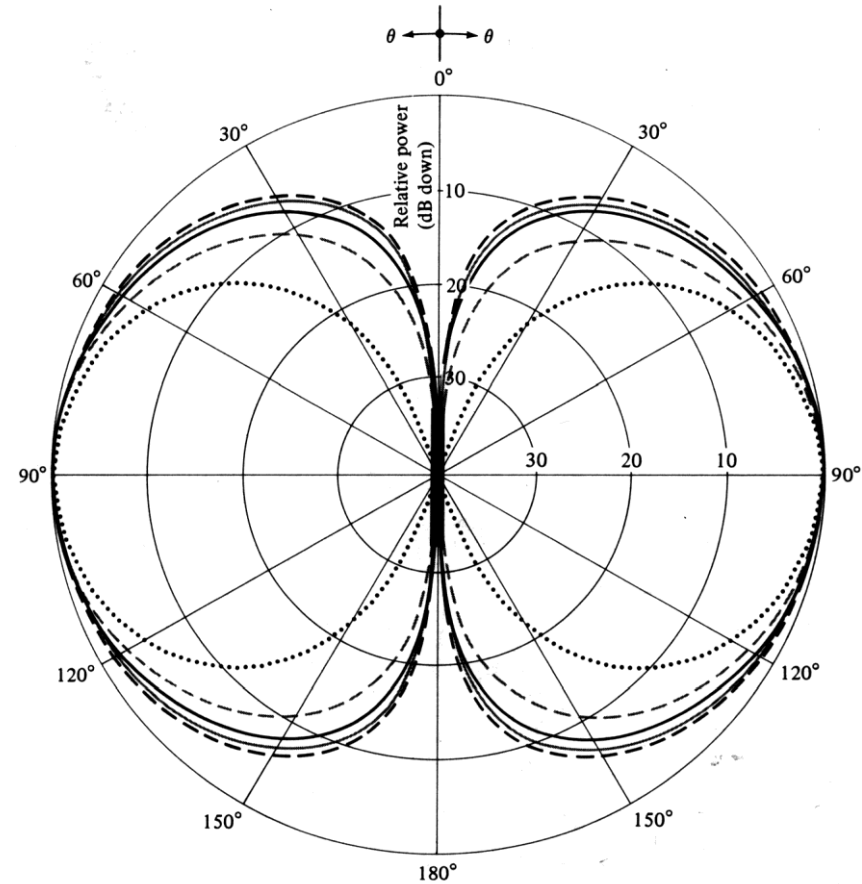


$$D = D_g(q, j) \Big|_{\max} = \frac{U(q, j) \Big|_{\max}}{U_o}$$

Γραμμική Διπολική Κεραία Αυθαίρετου Μήκους

22

Κανονικοποιημένο
Διάγραμμα Ισχύος
Έντασης ακτινοβολίας

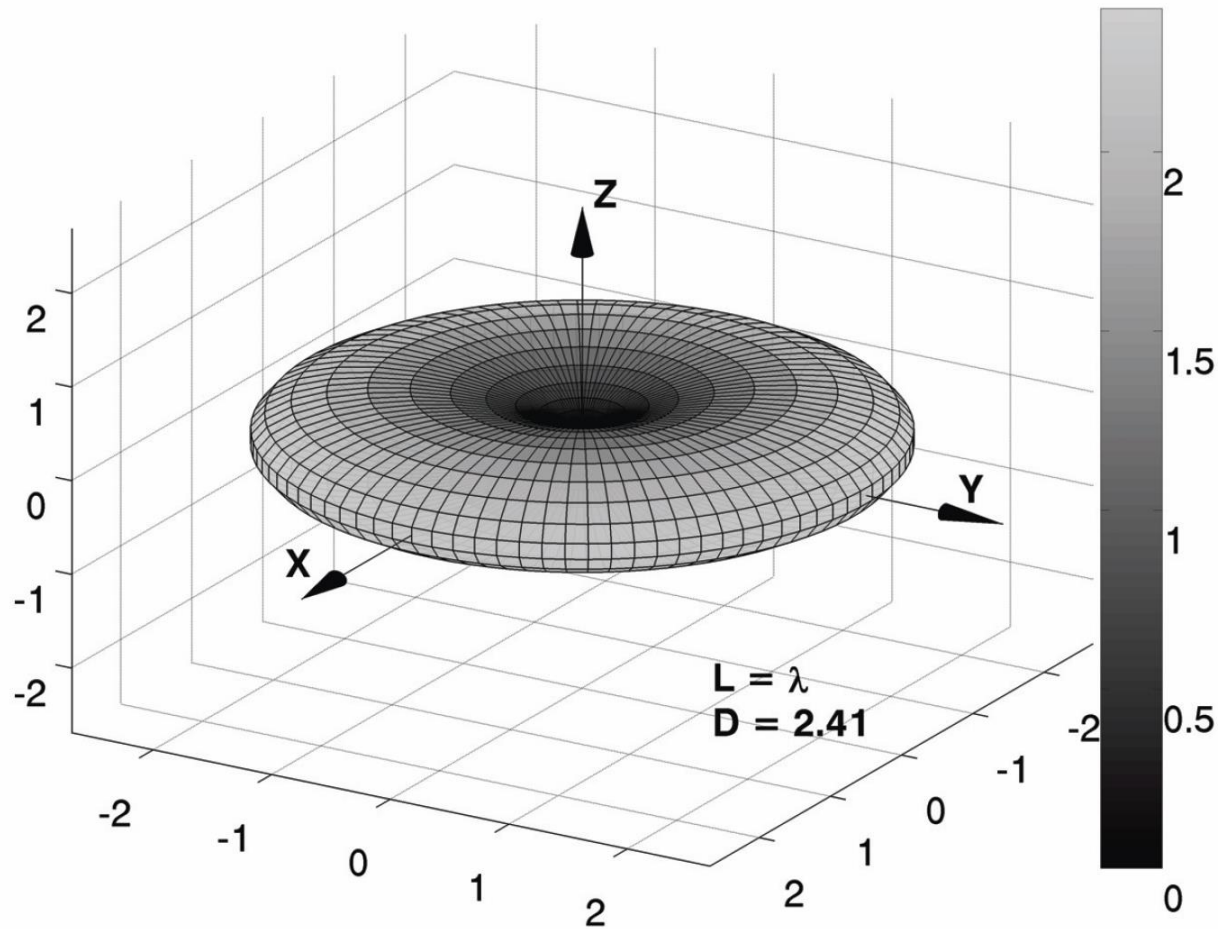


- $l \ll \lambda$
- $l = \lambda/4$
- $l = \lambda/2$
- $l = 3\lambda/4$
- $l = \lambda$

Ασύρματες Επικοινωνίες

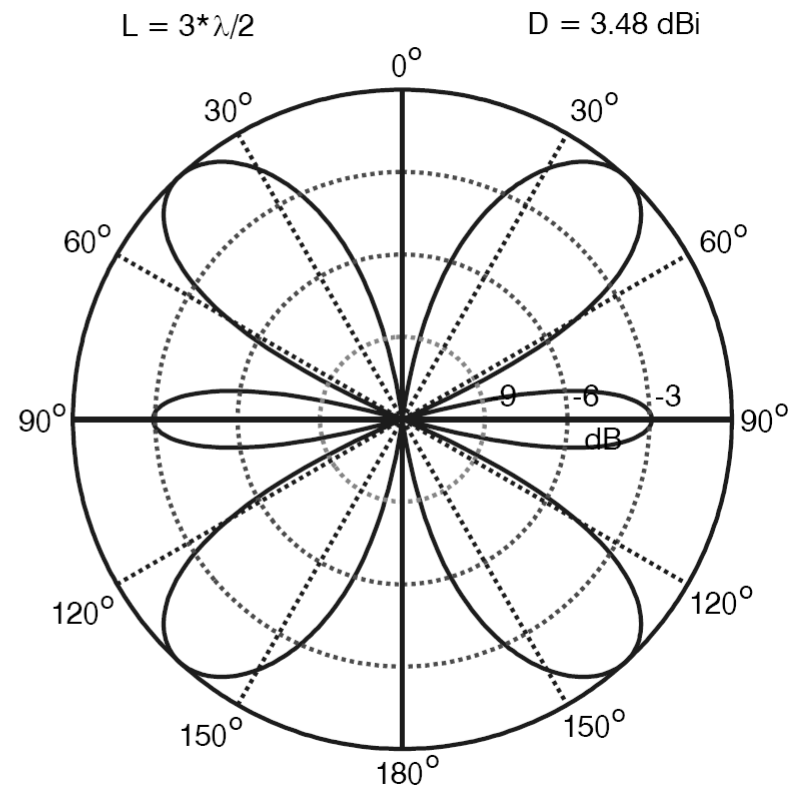
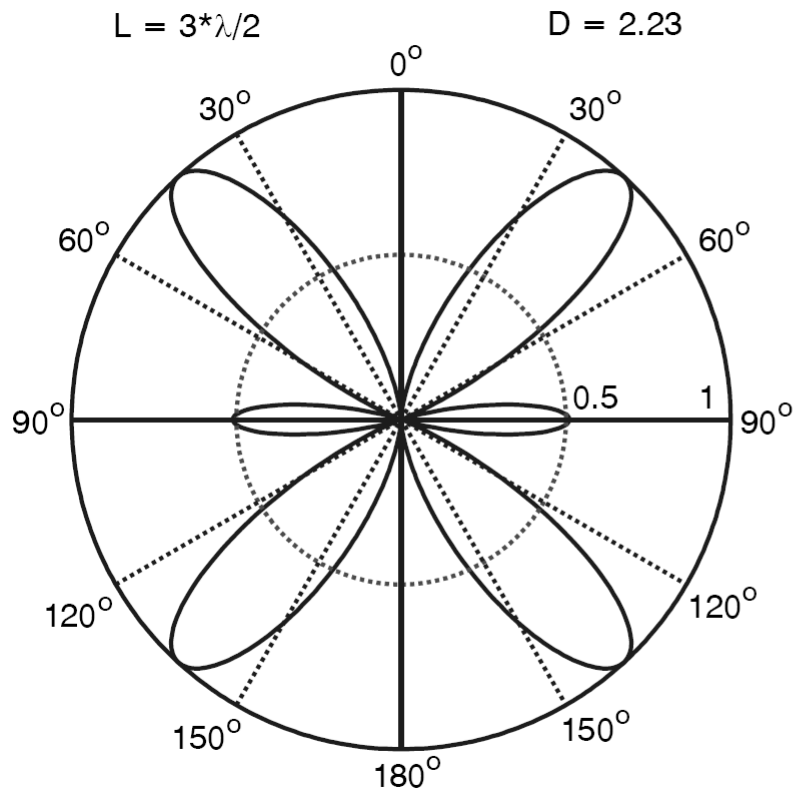
3D Διάγραμμα Ισχύος Διπολικής $L=\lambda$

23



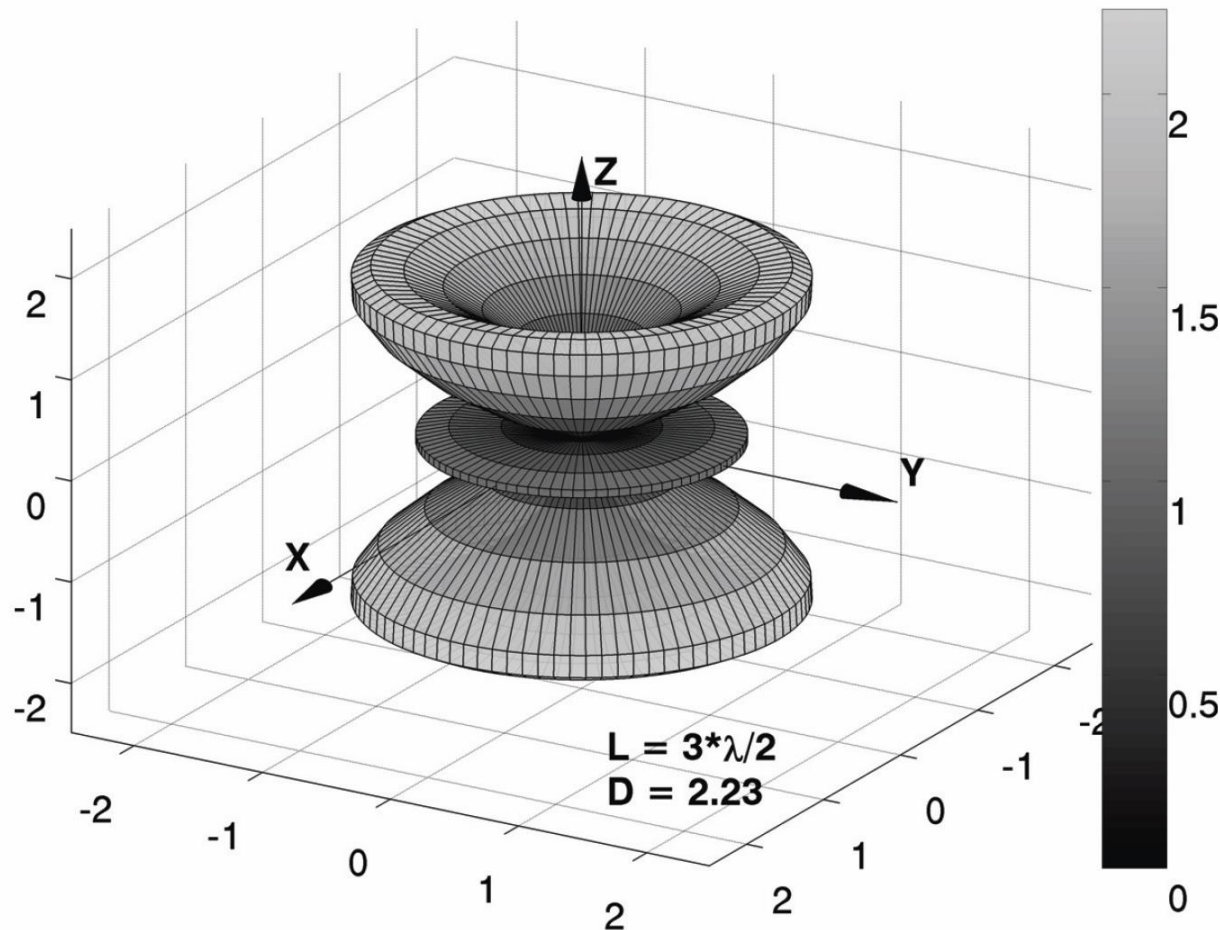
Διάγραμμα Ισχύος Διπολικής $L=3\lambda/2$

24



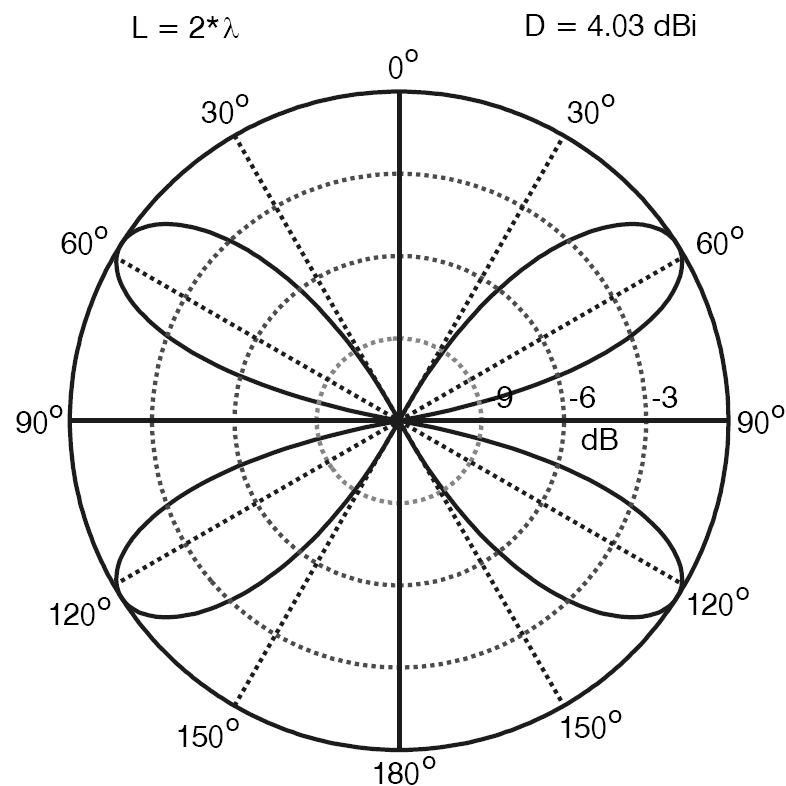
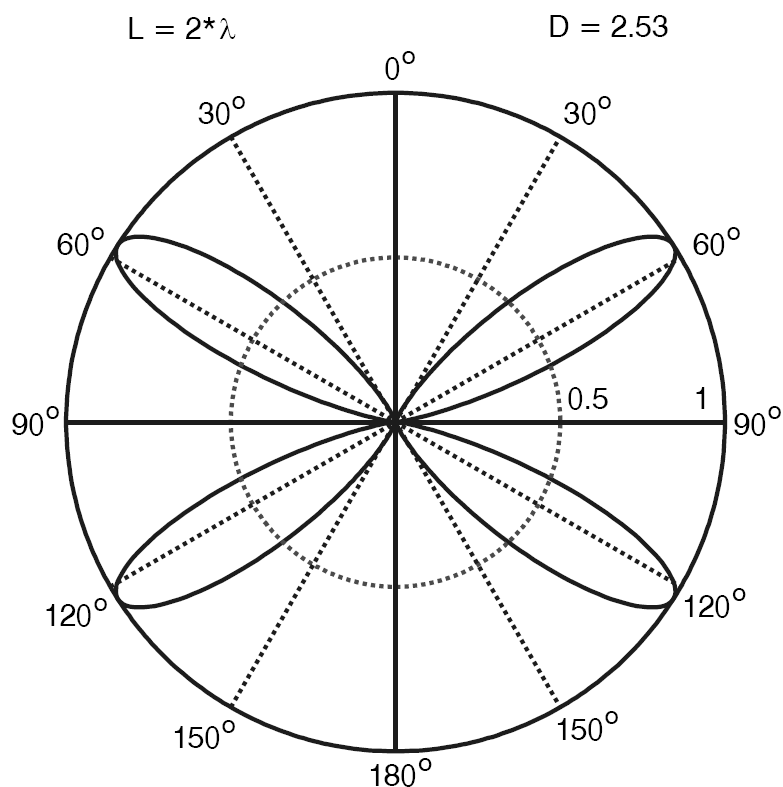
3D Διάγραμμα Ισχύος Διπολικής $L=3\lambda/2$

25



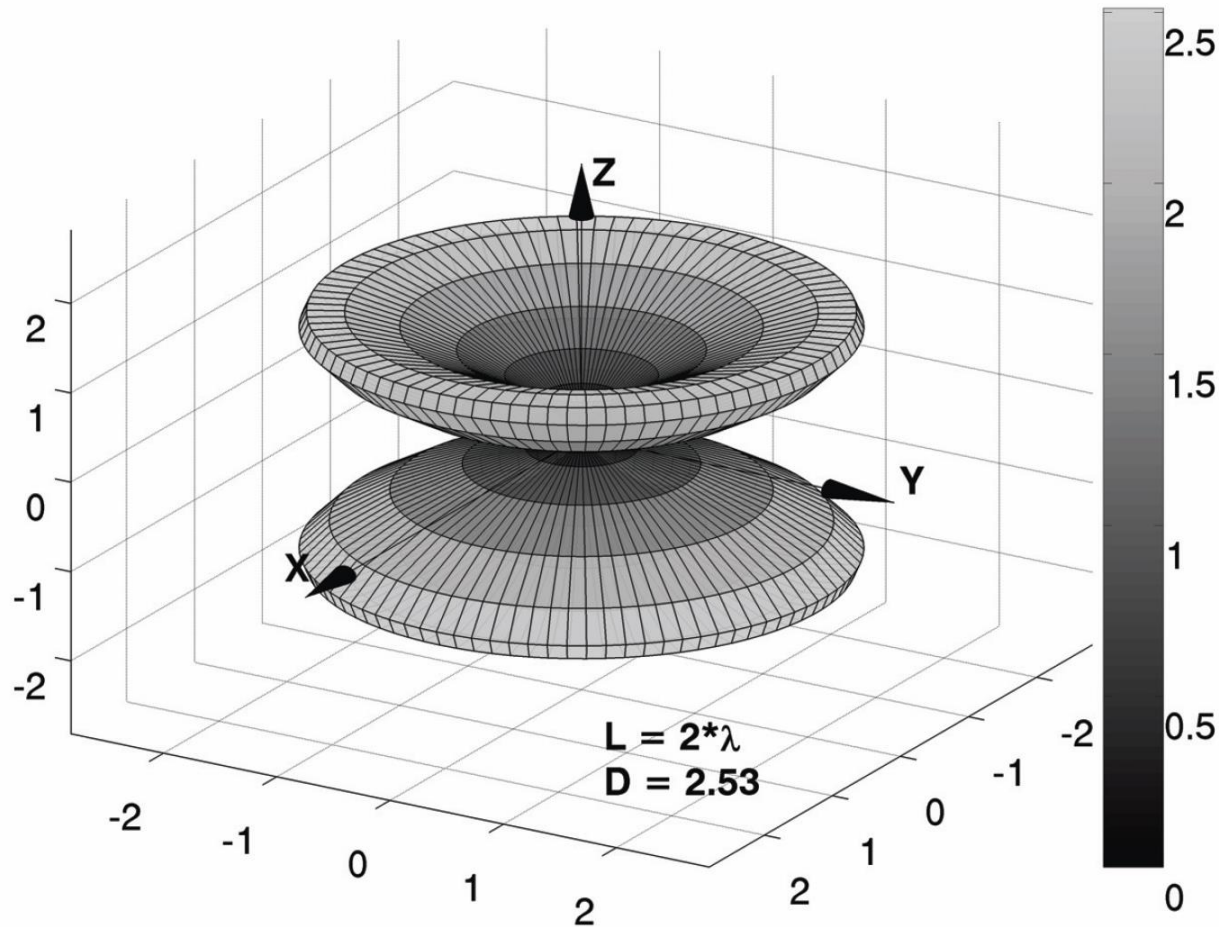
Διάγραμμα Ισχύος Διπολικής $L=2\lambda$

26



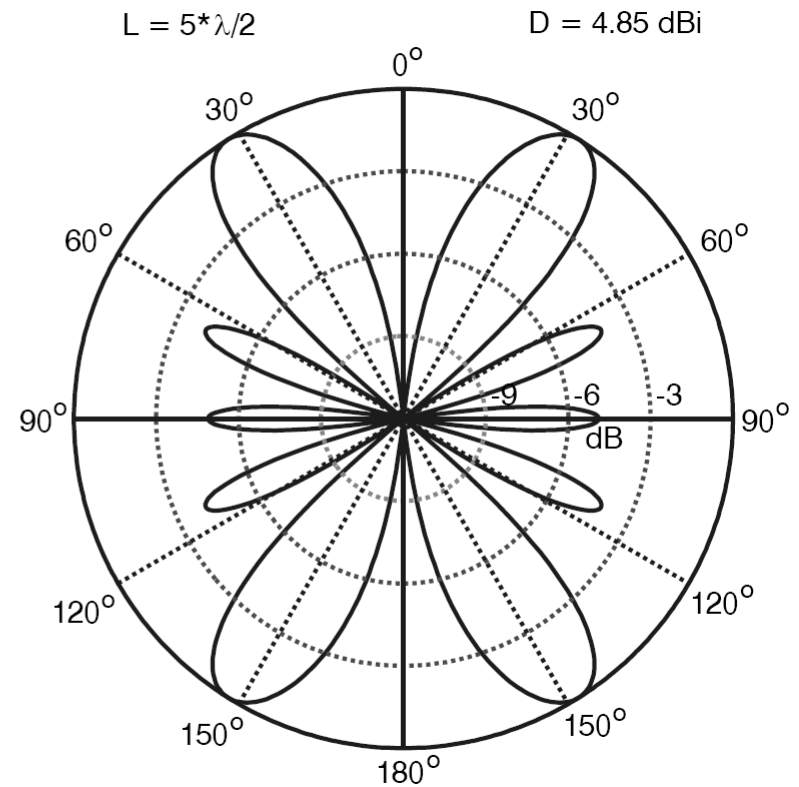
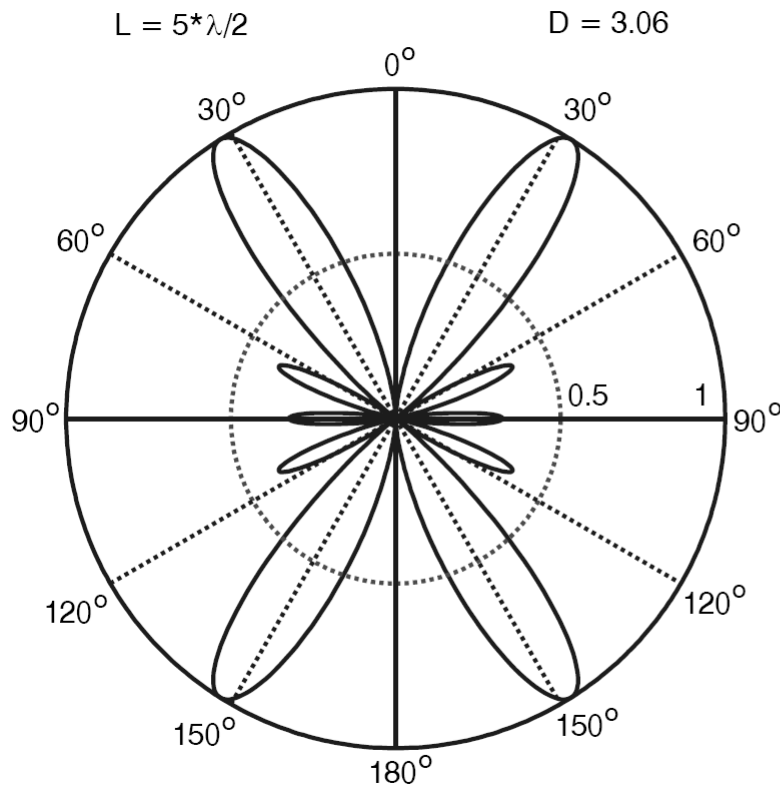
3D Διάγραμμα Ισχύος Διπολικής $L=2\lambda$

27



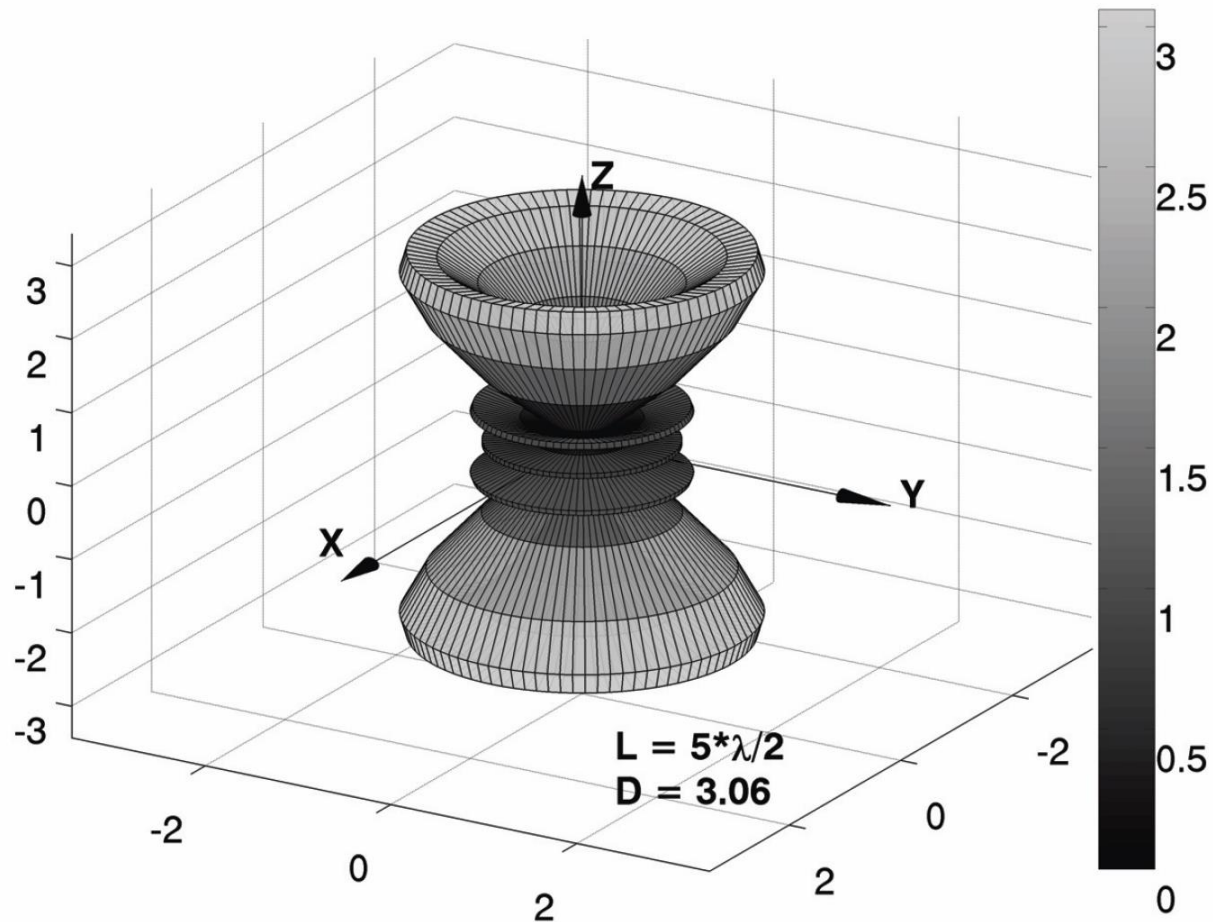
Διάγραμμα Ισχύος Διπολικής $L=5\lambda/2$

28



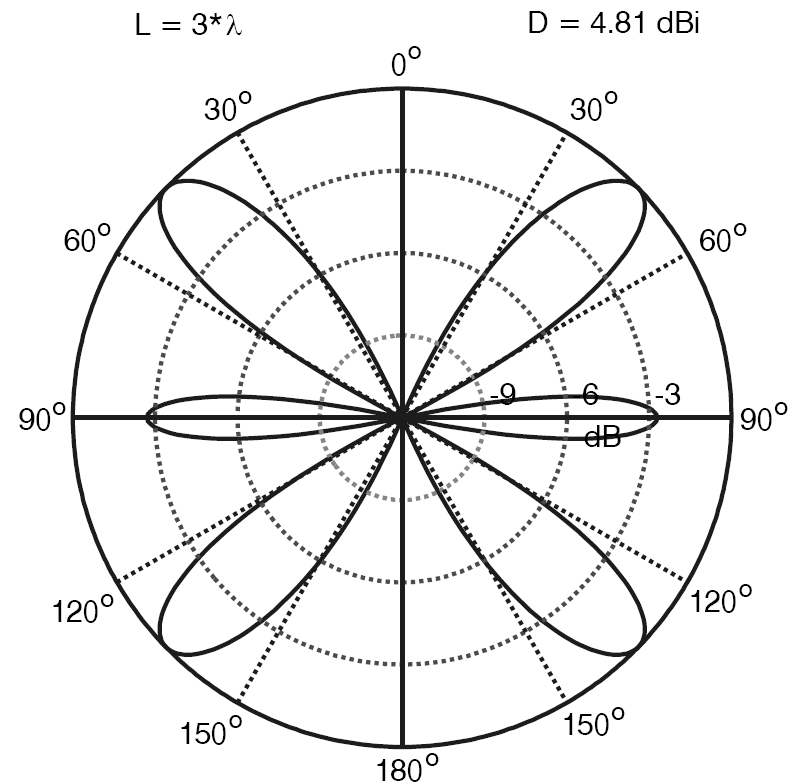
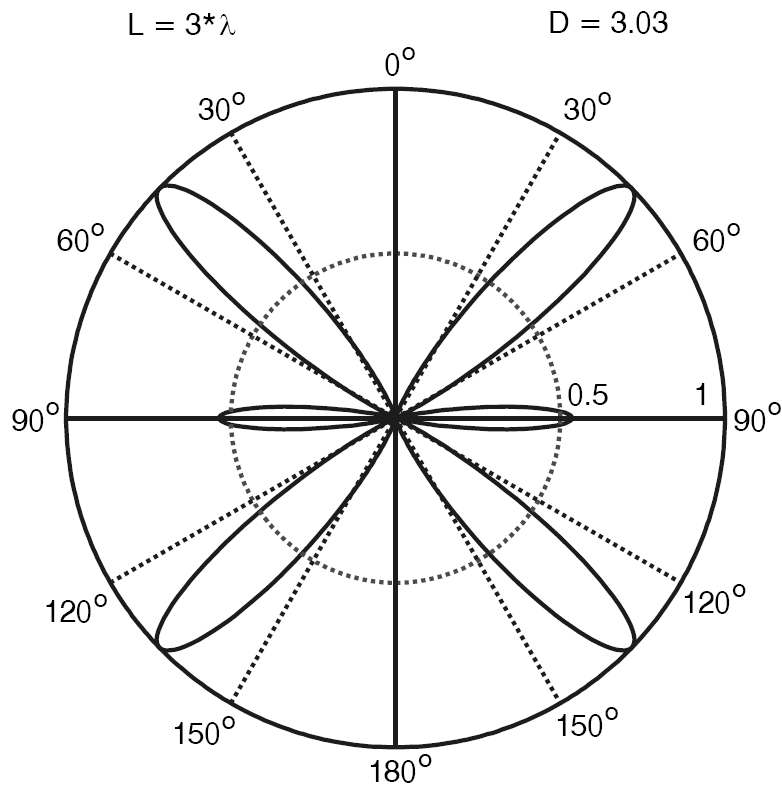
3D Διάγραμμα Ισχύος Διπολικής $L=5\lambda/2$

29



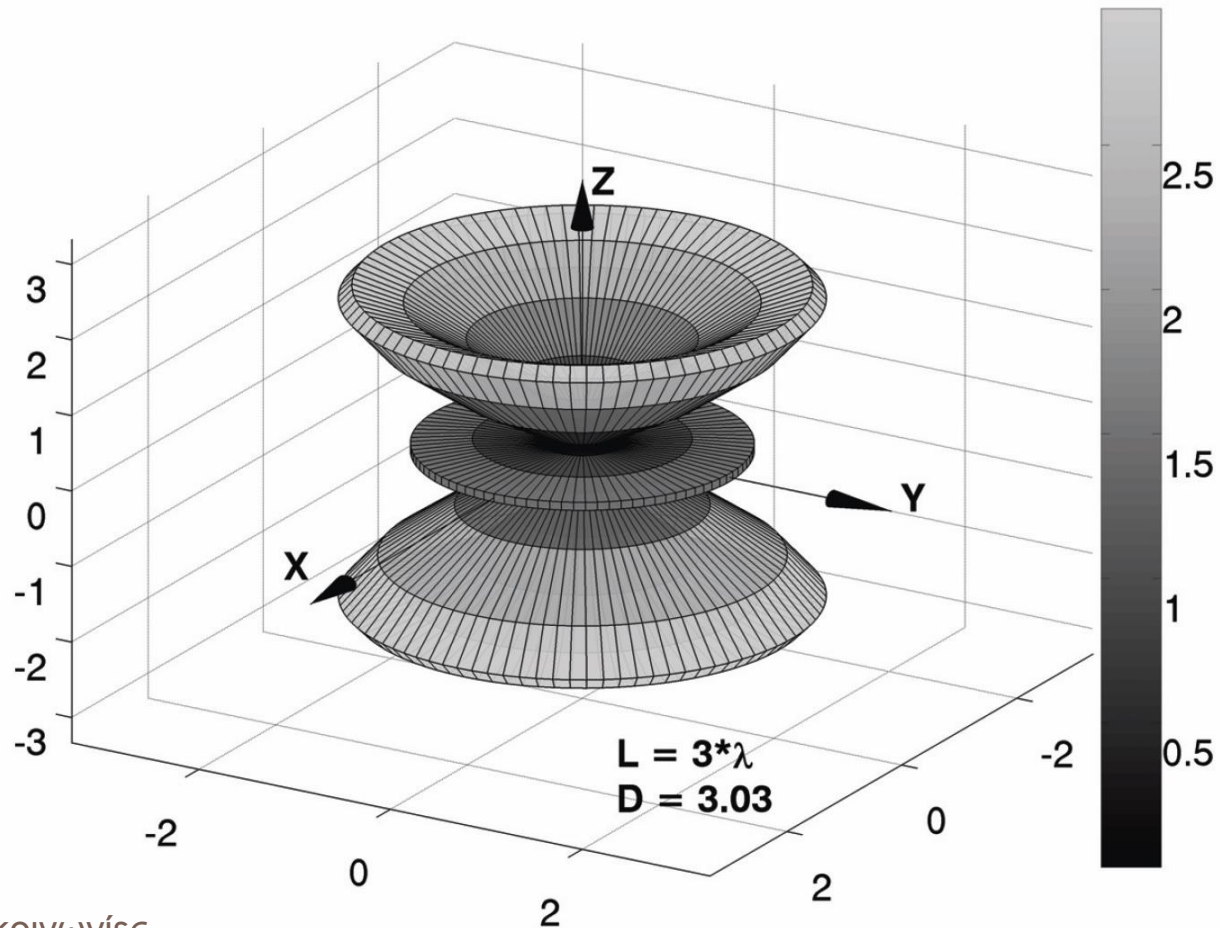
Διάγραμμα Ισχύος Διπολικής $L=3\lambda$

30



3D Διάγραμμα Ισχύος Διπολικής $L=3\lambda$

31



Γραμμική Διπολική Κεραία Αυθαίρετου Μήκους

32

$$\begin{aligned} W_{rad} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta) \sin(\theta) d\theta d\varphi \\ &= \frac{Z_o I_{\max}^2}{4\pi} \int_0^{\pi} \frac{\left[\cos\left(k \frac{L}{2} \cos \theta\right) - \cos\left(k \frac{L}{2}\right) \right]^2}{\sin(\theta)} d\theta \\ R_{rad} &= \frac{W_{rad}}{\frac{I_{\max}^2}{2}} = \frac{Z_o}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{\left[\cos\left(k \frac{L}{2} \cos \theta\right) - \cos\left(k \frac{L}{2}\right) \right]^2}{\sin(\theta)} d\theta \end{aligned}$$

Γραμμική Διπολική Κεραία Αυθαίρετου Μήκους

33

$$Si(x) = \int_0^x \frac{\sin(t)}{t} dt = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n+1}}{(2n+1)!(2n+1)}$$

Ολοκληρωτικό Ημίτονο

$$Ci(x) = -\int_x^{\infty} \frac{\cos(t)}{t} dt = C + \ln(x) - C_{in}(x)$$

Ολοκληρωτικό Συνημίτονο

όπου $C = 0,5772157$, η σταθερά του **Euler** και

$$C_{in}(x) = \int_0^x \frac{1 - \cos(t)}{t} dt = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} x^{2n}}{(2n)!(2n)}$$

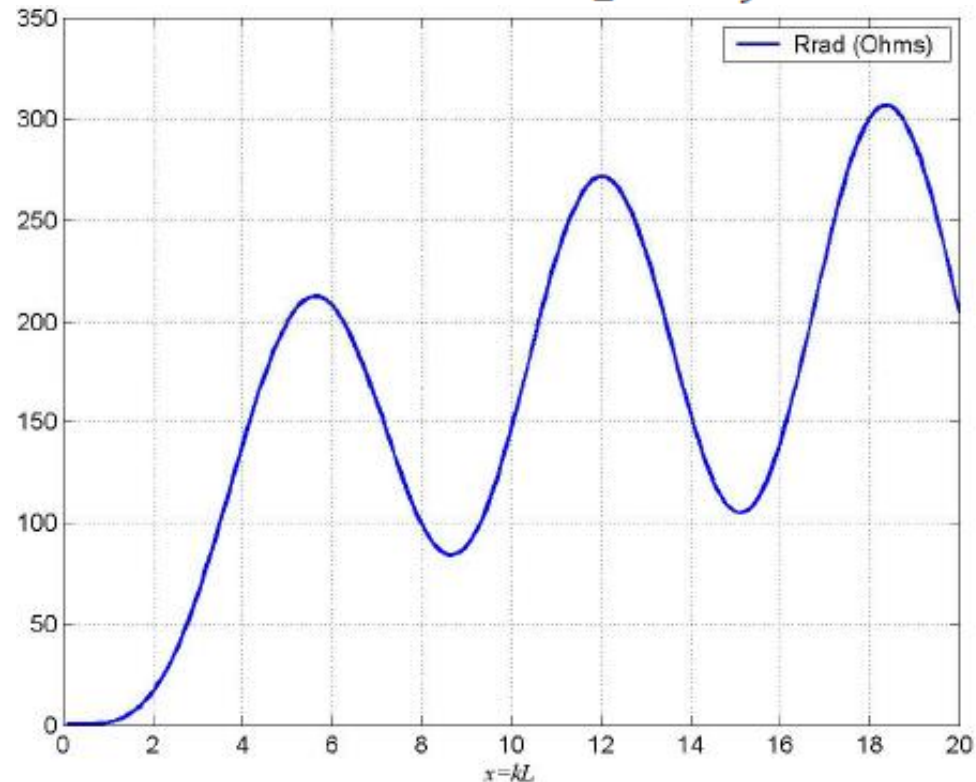
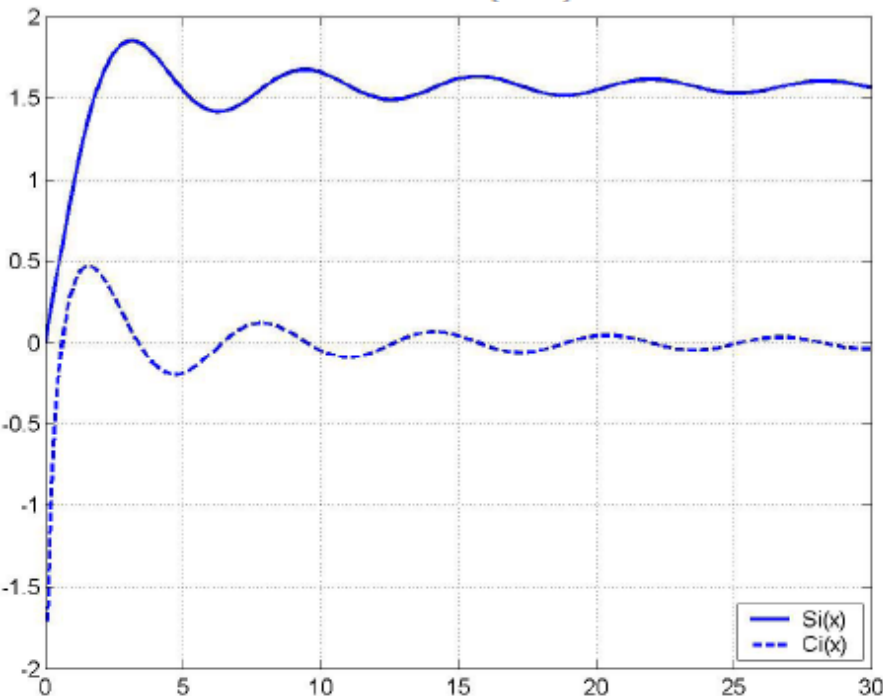
Γραμμική Διπολική Κεραία Αυθαίρετου Μήκους

34

Αντίσταση
Ακτινοβολίας

$$R_{rad} = 60 \left\{ \begin{aligned} & C + \ln(kL) - Ci(kL) + \frac{1}{2} \sin(kL) [Si(2kL) - 2Si(kL)] + \\ & + \frac{1}{2} \cos(kL) \left[C + \ln\left(\frac{kL}{2}\right) + Ci(2kL) - 2Ci(kL) \right] \end{aligned} \right\}$$

$$= 60Q(kL)$$



Δίπολο $\lambda/2$

35

- Το συμμετρικό δίπολο $\lambda/2$ αποτελεί ειδική περίπτωση της γραμμικής κεραίας, που βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην πράξη λόγω της αντίστασης εισόδου που παρουσιάζει.
- Επειδή το δίπολο $\lambda/2$ είναι συντονισμένο, η αντίσταση εισόδου της κεραίας είναι σχεδόν ίση με την αντίσταση ακτινοβολίας η οποία παίρνει τιμές κοντά στα 75Ω .
- Λόγω του ότι πολλές γραμμές μεταφοράς έχουν χαρακτηριστική αντίσταση 75Ω , το δίπολο $\lambda/2$ χρησιμοποιείται για την επίτευξη προσαρμογής.
- Πρόκειται για διπολική κεραία με $L = \lambda/2$ και $(kL = \pi)$.

Δίπολο $\lambda/2$

36

$$I(z) = \begin{cases} I_{\max} \sin\left(\frac{\pi}{2} - kz\right) & 0 \leq z \leq L/2 \\ I_{\max} \sin\left(\frac{\pi}{2} + kz\right) & -L/2 \leq z \leq 0 \end{cases}$$
$$= I_{\max} \cos(kz)$$

$$E_{\theta}(r, \theta) = Z_0 H_{\phi}(r, \theta) = \frac{j60I_{\max}}{r} e^{-jk r} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos(\theta)\right)}{\sin(\theta)}$$

Δίπολο $\lambda/2$

37

$$P_r(r, \theta) = \frac{15I_{\max}^2}{\pi r^2} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos(\theta)\right)}{\sin(\theta)} \right]^2$$

$$U(\theta) = \frac{15I_{\max}^2}{\pi} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos(\theta)\right)}{\sin(\theta)} \right]^2$$

$$R_{\text{rad}} \approx 73.09 \text{ Ohms}$$

$$W_{\text{rad}} \approx \frac{I_{\max}^2}{2} 73,09 \text{ Watts}$$

Δίπολο $\lambda/2$

38

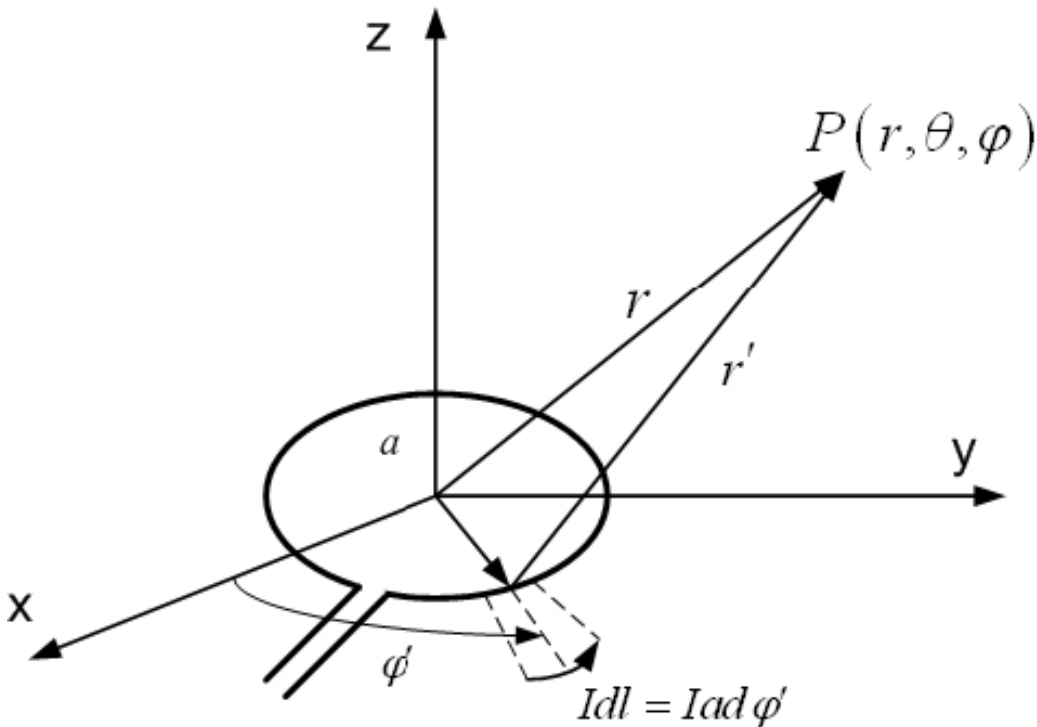
$$D_g(\theta) = 4\pi \frac{U(\theta)}{W_{rad}} \approx 4\pi \frac{\frac{15I_{max}^2}{\pi} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos(\theta)\right)}{\sin(\theta)} \right]^2}{\frac{I_{max}^2}{2} 73,09} \approx 1.64 \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos(\theta)\right)}{\sin(\theta)} \right]^2$$

- Επειδή η μέγιστη τιμή της έντασης ακτινοβολίας προκύπτει για $\theta = 90^\circ$, η κατευθυντικότητα θα είναι

$$D_m = 1.64 = 2.15 \text{ dBi}$$

Μικρό Κυκλικό Πλαίσιο (Βροχοκεραία)

39



- Οι βροχοκεραίες ή κεραίες μαγνητικού πεδίου είναι μαγνητικά δίπολα που σχηματίζονται από βρόχους κυκλικής ή και τετραγωνικής μορφής.
- Μικρά κυκλικά πλαίσια, είναι τα πλαίσια των οποίων το μήκος είναι **μικρότερο του 0.1λ** .
- Επειδή η αντίσταση ακτινοβολίας τους είναι πολύ μικρή συνήθως χρησιμοποιούνται ως δέκτες.
- Τα χαρακτηριστικά της βροχοκεραίας θα υπολογιστούν ως υπέρθεση στοιχειωδών ρευμάτων επί του βρόχου.

Μικρό Κυκλικό Πλαίσιο (Βροχοκεραία)

40

$$d\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{e^{-jk r'}}{r'} I a d\varphi' \hat{\varphi}' = \frac{\mu}{4\pi} \frac{e^{-jk r'}}{r'} I a d\varphi' (-\hat{x} \sin(\varphi') + \hat{y} \cos(\varphi'))$$

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} I a \int_0^{2\pi} \frac{e^{-jk r'}}{r'} (-\hat{x} \sin(\varphi') + \hat{y} \cos(\varphi')) d\varphi'$$

$$= \frac{\mu}{4\pi} I a \int_0^{2\pi} \frac{e^{-jk \sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \sin(\theta) \cos(\varphi - \varphi')}}}{\sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \sin(\theta) \cos(\varphi - \varphi')}} (-\hat{x} \sin(\varphi') + \hat{y} \cos(\varphi')) d\varphi'$$

$$\text{Για } \varphi = 0 : \begin{cases} A_r = 0 \\ A_\theta = 0 \\ A_\varphi = \frac{jka^2 I \mu}{4} \sin(\theta) \left(1 + \frac{1}{jkr} \right) \frac{e^{-jkr}}{r} \end{cases}$$

Μικρό Κυκλικό Πλαίσιο (Βροχοκεραία)

41

$$E_r = E_\theta = H_\varphi = 0$$

$$E_\varphi = Z_o \frac{k^2 a^2 I}{4} \left(1 + \frac{1}{jkr} \right) \sin(\theta) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

$$H_r = \frac{jka^2 I}{2r} \left(1 + \frac{1}{jkr} \right) \cos(\theta) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

$$H_\theta = -\frac{k^2 a^2 I}{4} \left(1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{k^2 r^2} \right) \sin(\theta) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

$$E_r = E_\theta = H_r = H_\varphi = 0$$

$$E_\varphi = Z_o \frac{k^2 a^2 I}{4} \sin(\theta) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

$$H_\theta = -\frac{k^2 a^2 I}{4} \sin(\theta) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

Μακρινό Πεδίο ($\sim 1/r$)

Μικρό Κυκλικό Πλαίσιο (Βροχοκεραία)

42

$$P_r(r, \theta) = Z_o \frac{(k\alpha)^4}{32} |I|^2 \frac{\sin^2 \theta}{r^2} \quad U(\theta) = Z_o \frac{k^4 a^4 I^2}{32} \sin^2(\theta)$$

$$W_{rad} = Z_o \frac{\pi k^4 a^4 I^2}{12} = 10\pi^2 k^4 a^4 I^2$$

$$R_{rad} = Z_o \frac{\pi k^4 a^4}{6} = 20\pi^2 k^4 a^4$$

$$D_m = 4\pi \frac{U(\theta)|_{\max}}{W_{rad}} = \frac{3}{2} \quad (\text{Ίδια με δίπολο Hertz})$$

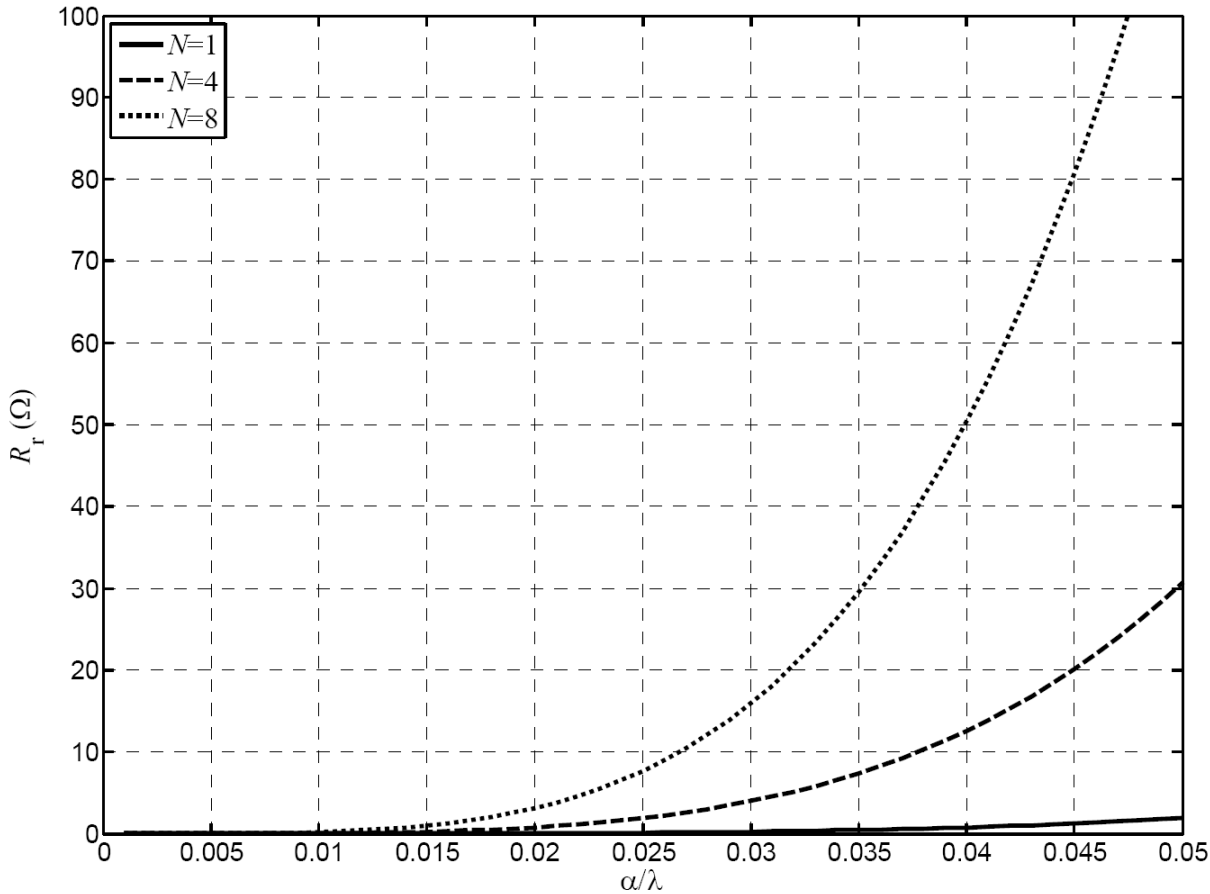
$$R_r = \frac{2W_{rad}}{|I|^2} = Z_o \frac{\pi}{6} (k\alpha)^4 = Z_o \frac{2\pi}{3} \left(k \frac{S}{\lambda} \right)^2 = 20\pi^2 \left(\frac{C}{\lambda} \right)^4$$

Ασύρματες Επικοινωνίες

$C=2\pi a$ περίμετρος

Μικρή αντίσταση → μη αποδοτικός ακτινοβολητής

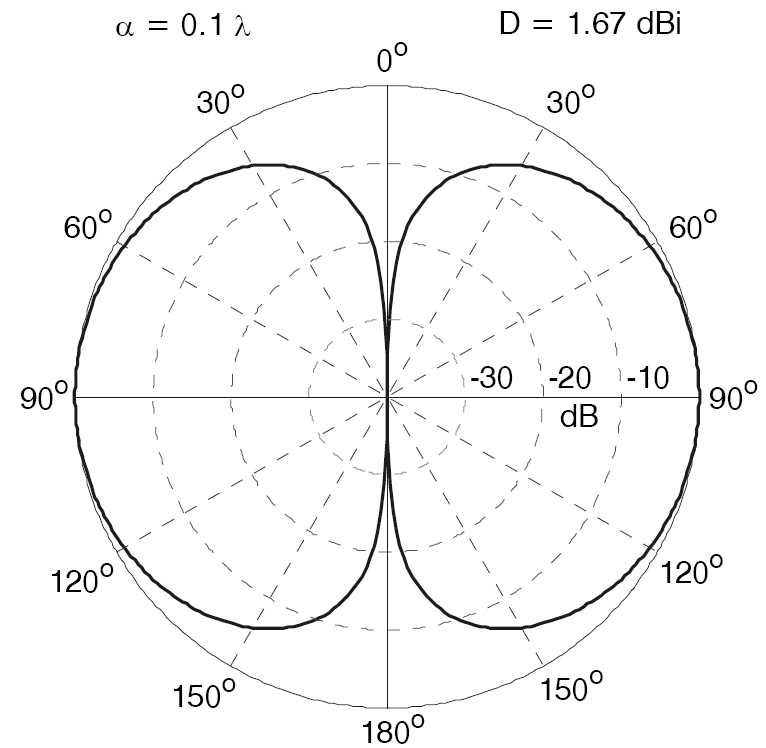
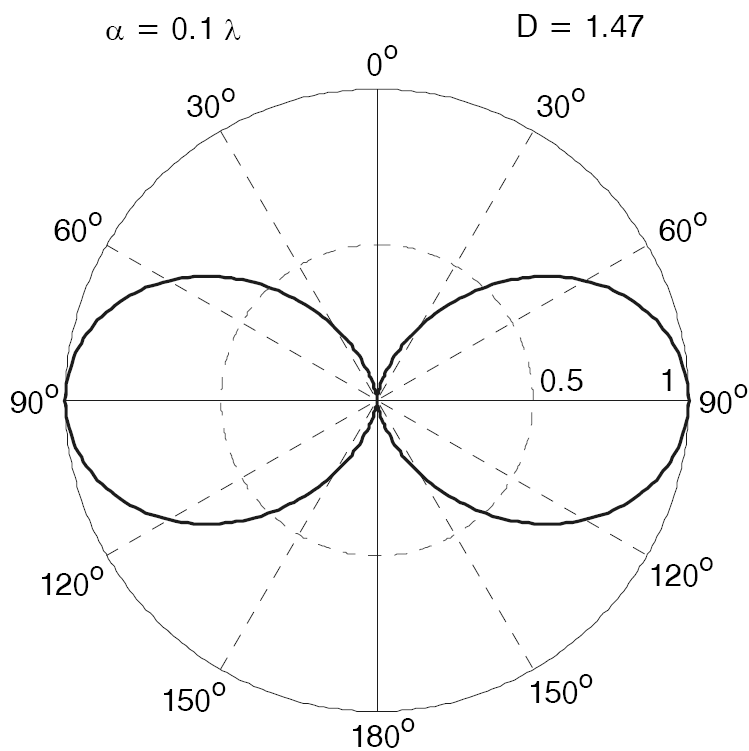
Μικρό Κυκλικό Πλαίσιο (Βροχοκεραία)



Αντίσταση
Ακτινοβολίας

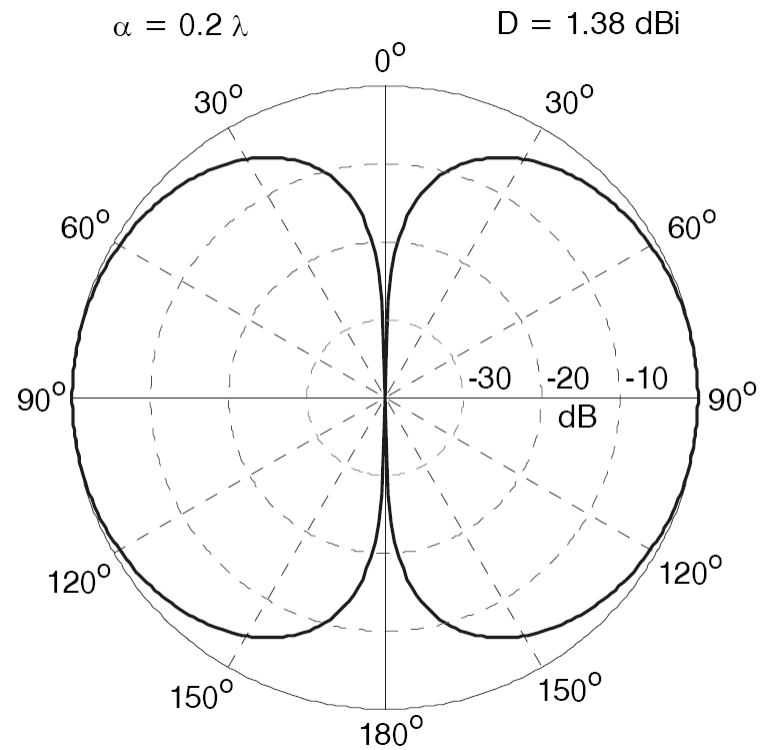
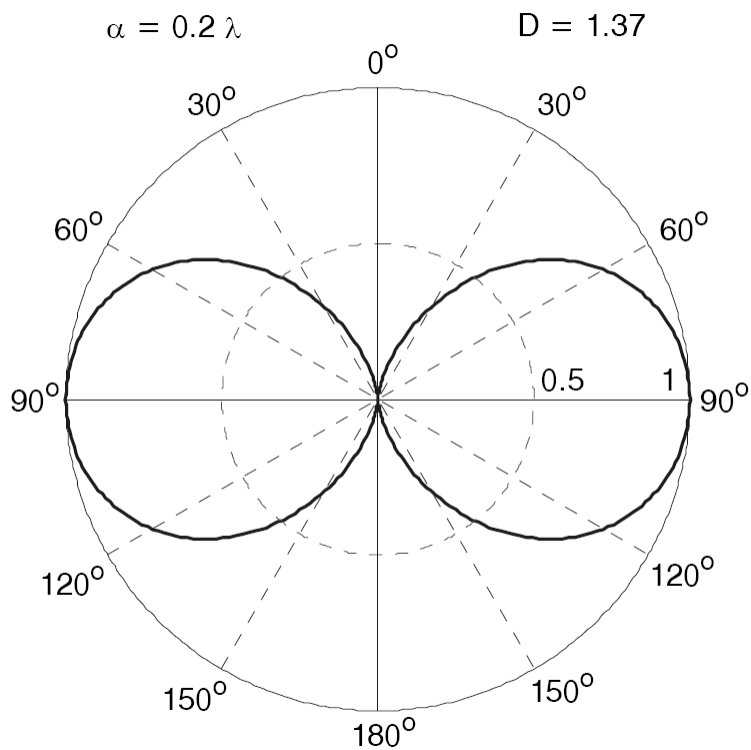
Κατευθυντικό Κέρδος Κυκλικού Βρόχου

44



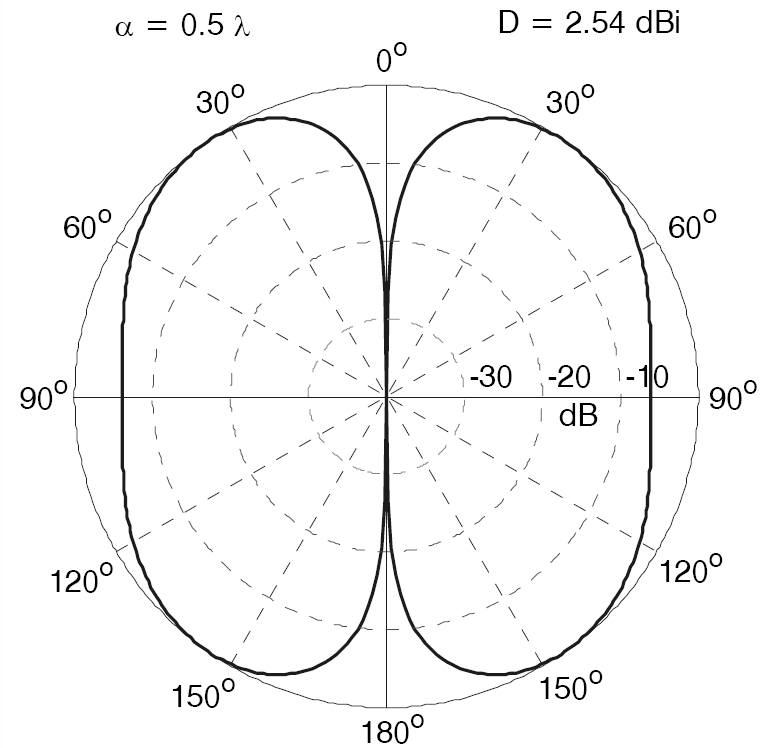
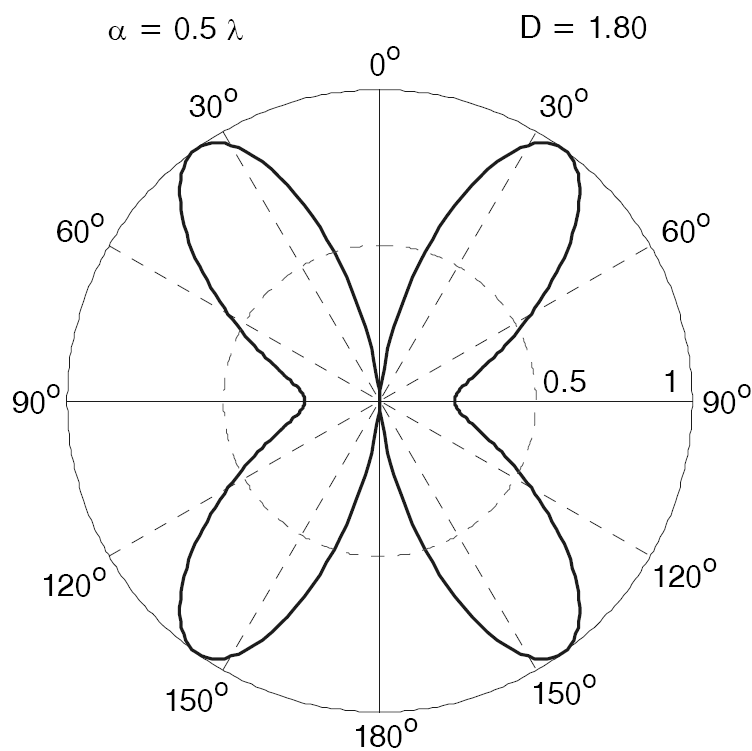
Κατευθυντικό Κέρδος Κυκλικού Βρόχου

45



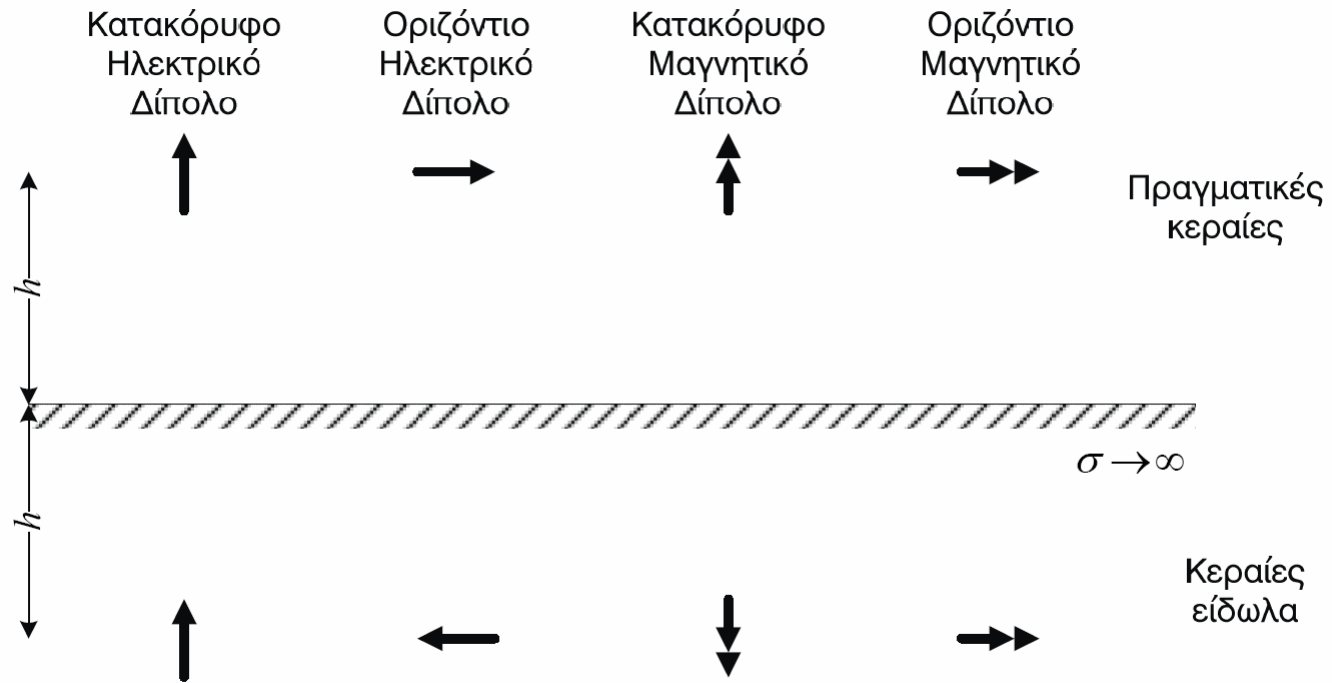
Κατευθυντικό Κέρδος Κυκλικού Βρόχου

46



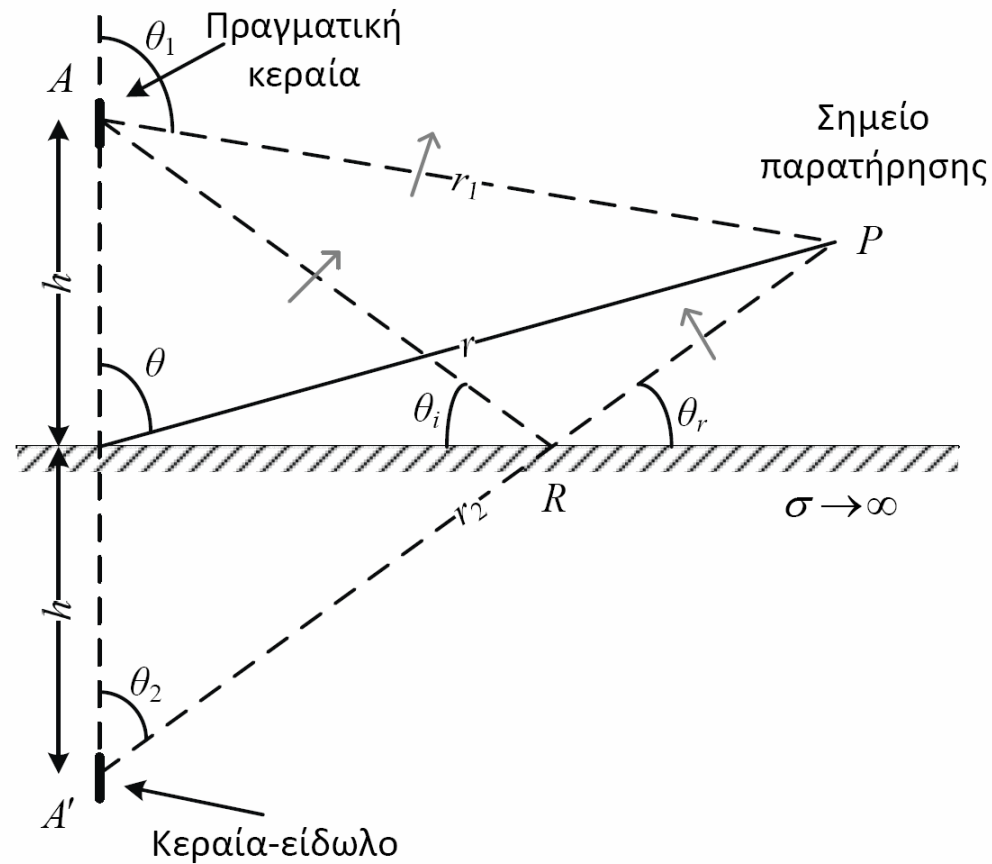
Τα Δίπολα και τα Είdwλά τους

47



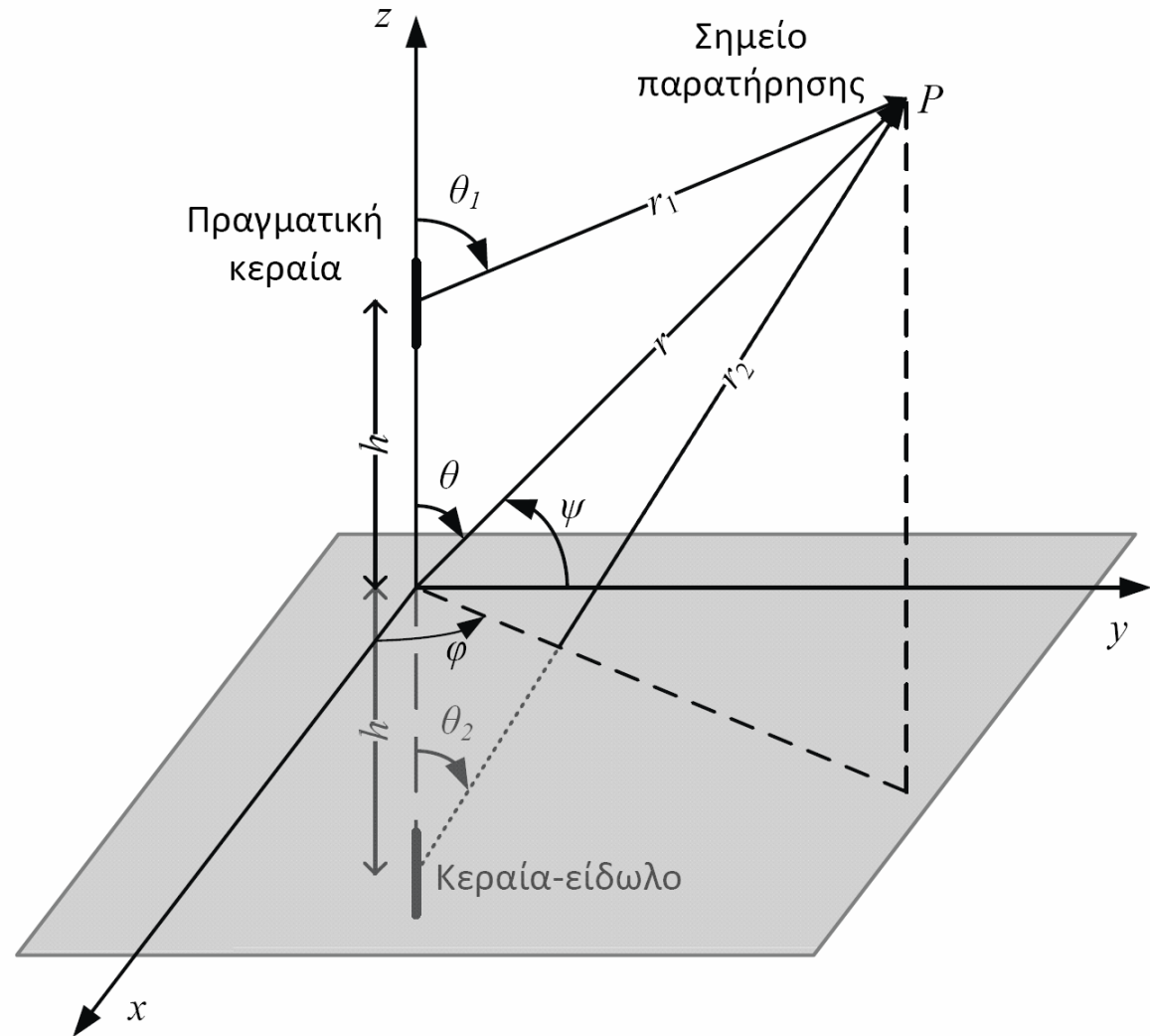
Κατακόρυφο Δίπολο Υπεράνω Εδάφους

48



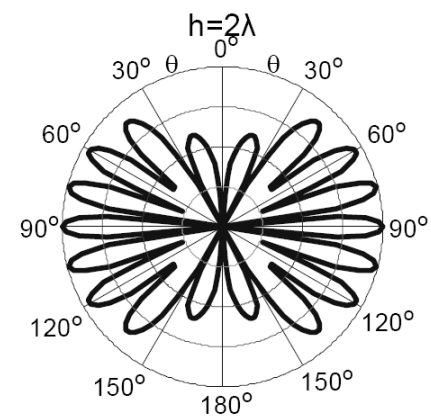
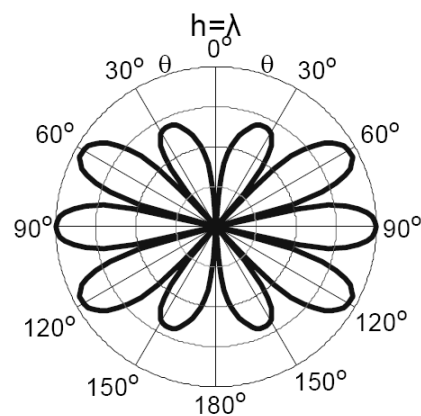
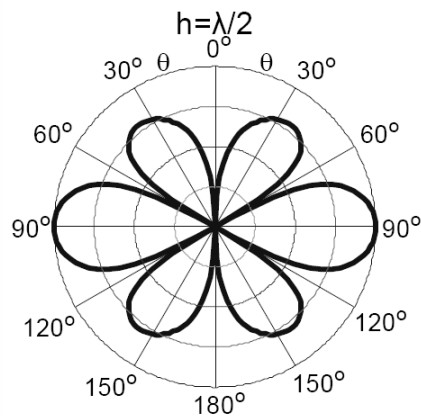
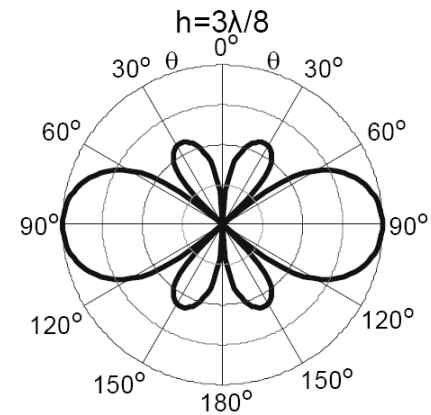
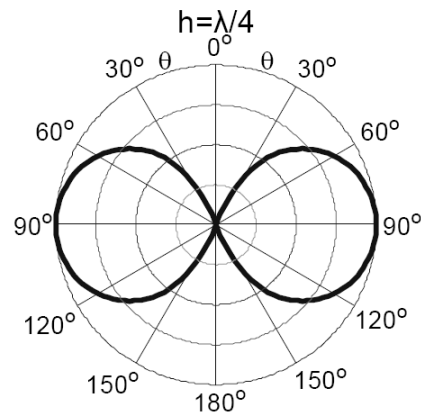
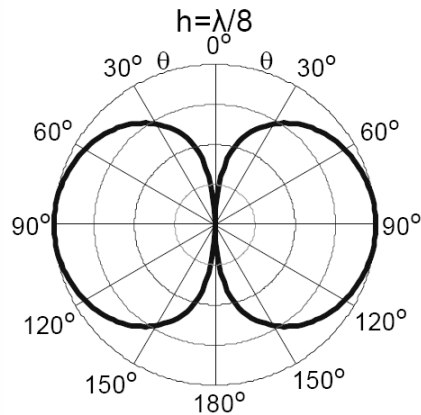
Κατακόρυφο Δίπολο Υπεράνω Εδάφους

49



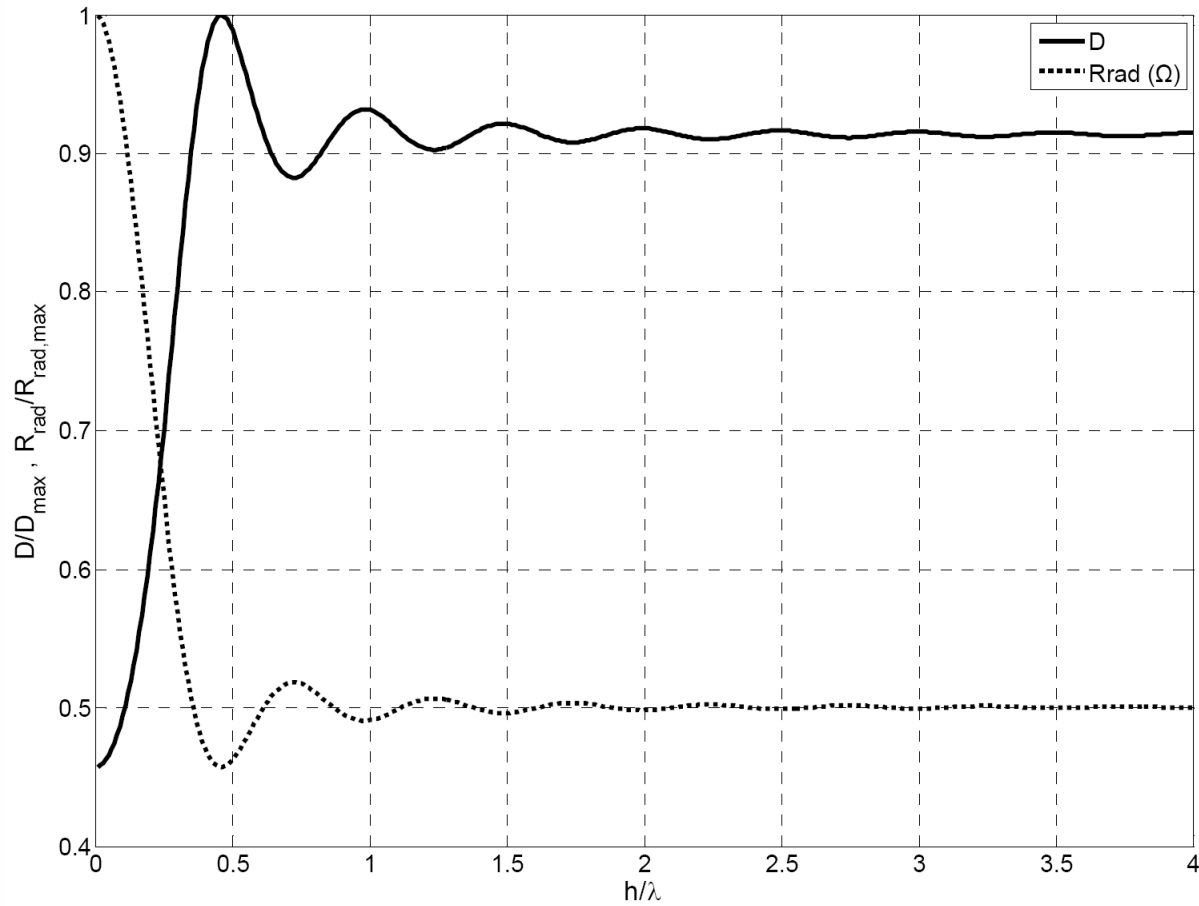
Διαγράμματα Ακτινοβολίας για Κατακόρυφο Δίπολο Υπεράνω Εδάφους

50



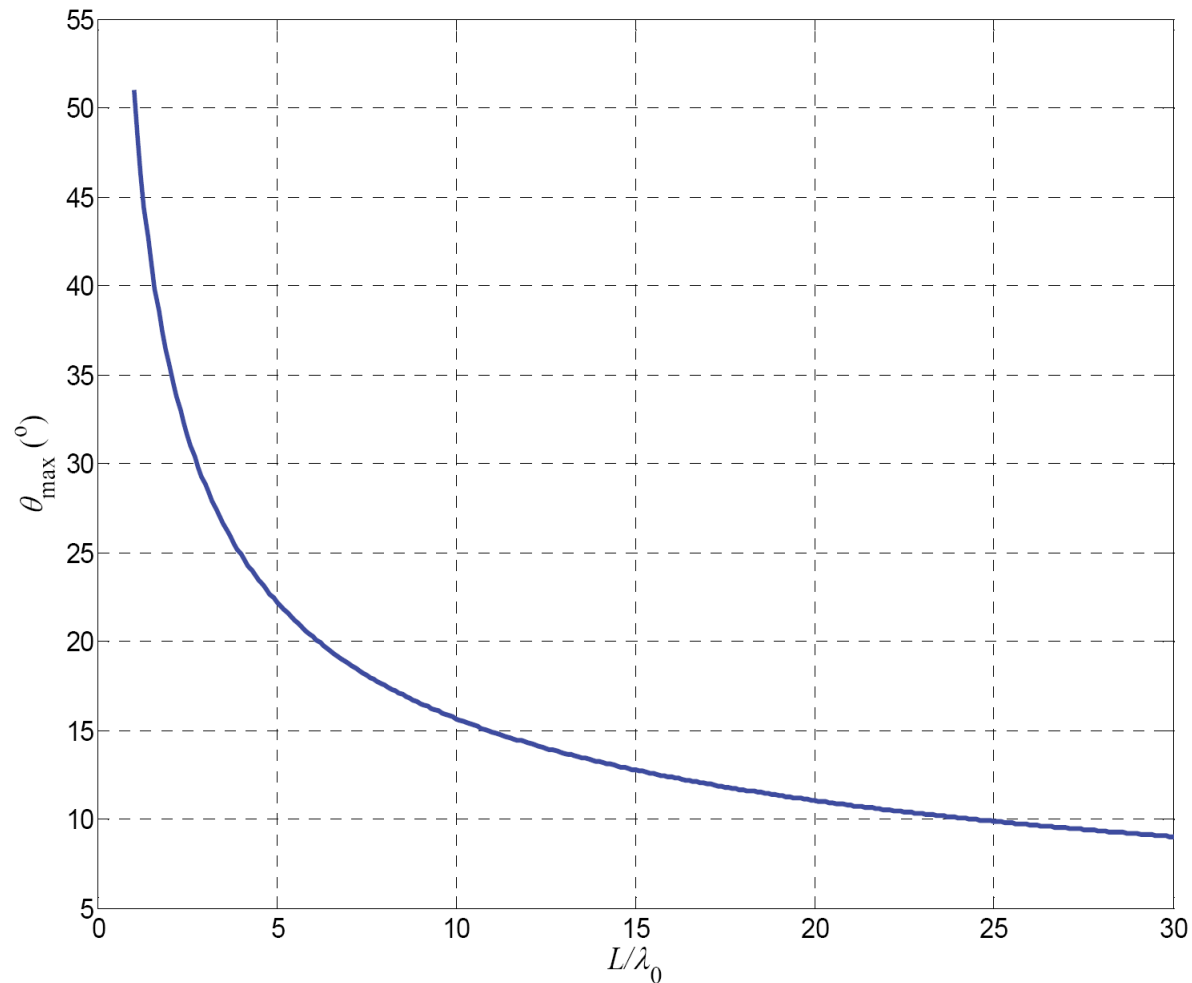
Κατευθυντικότητα και Αντίσταση Ακτινοβολίας για Κατακόρυφο Δίπολο Υπεράνω Εδάφους

51



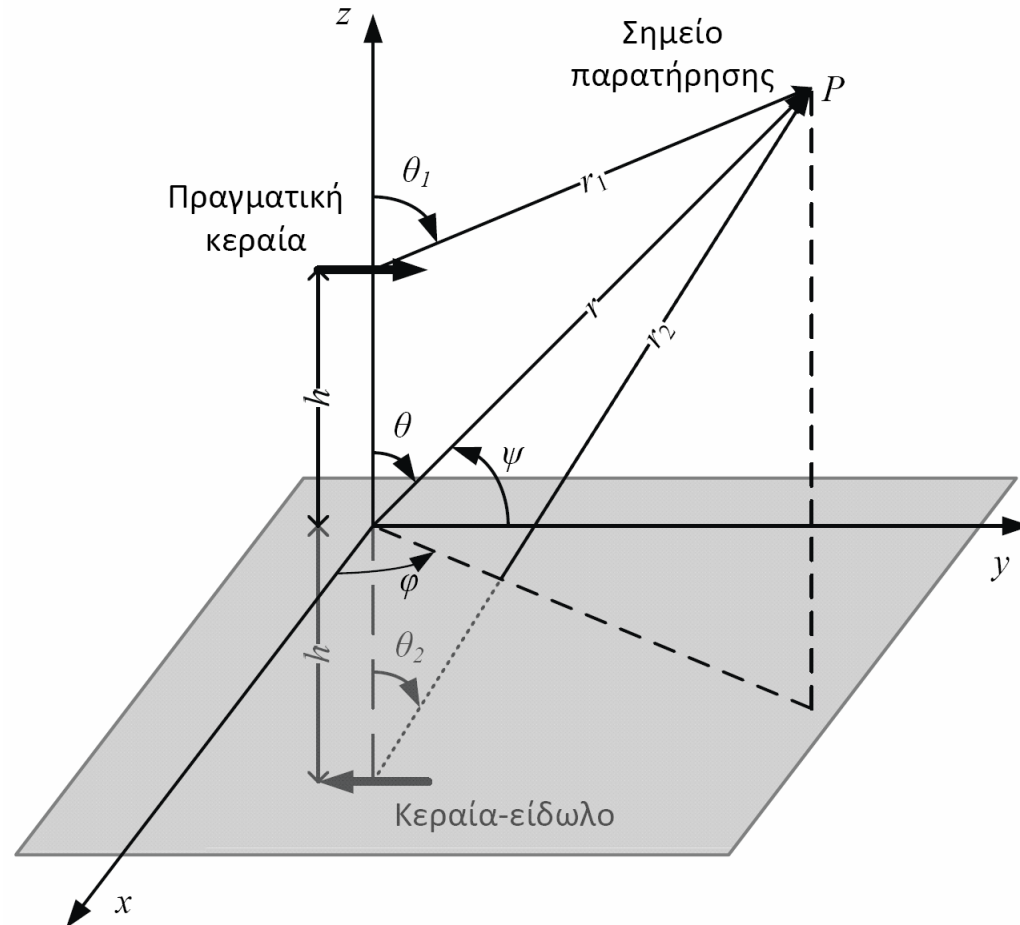
Οριζόντιο Δίπολο Υπεράνω Εδάφους

52



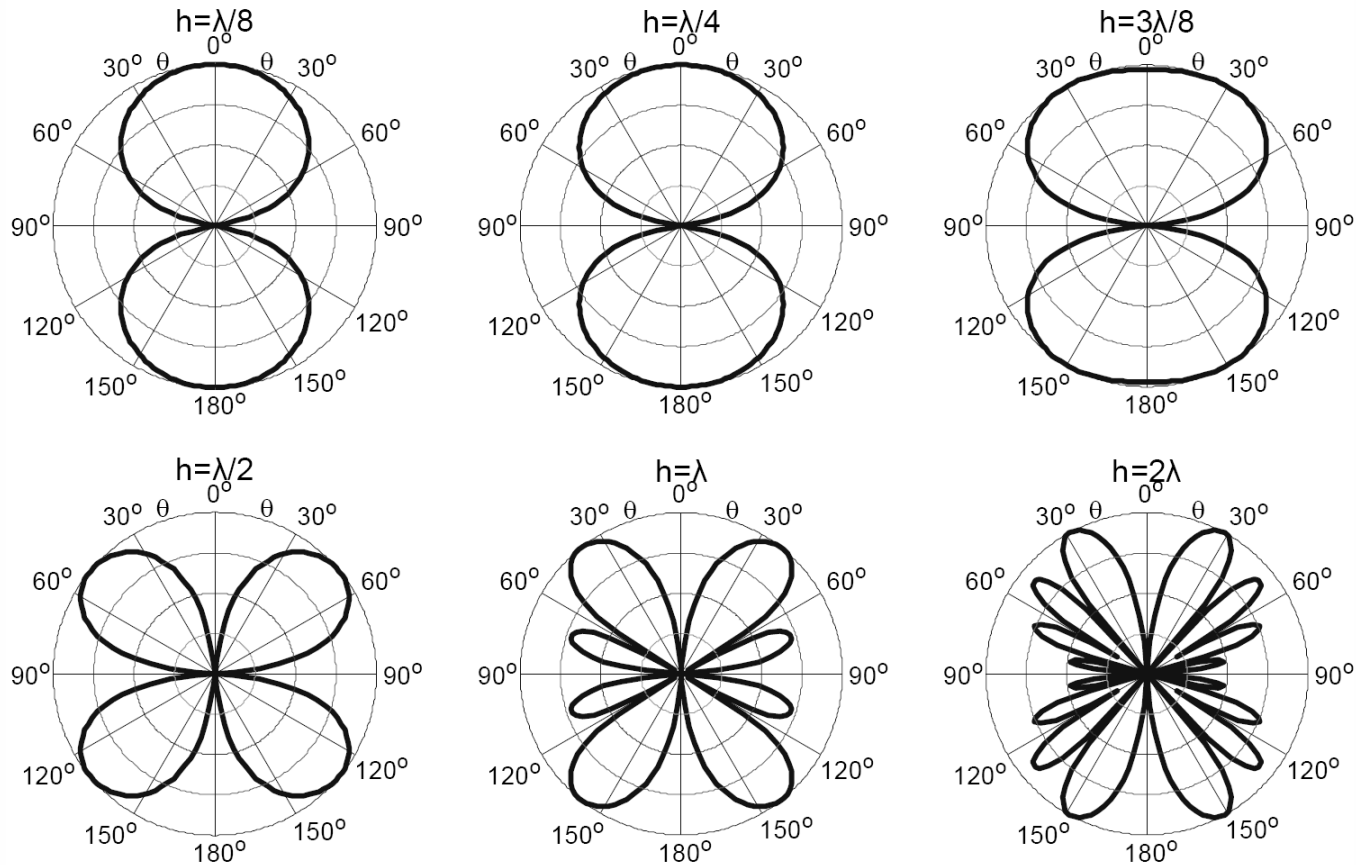
Οριζόντιο Δίπολο Υπεράνω Εδάφους

53



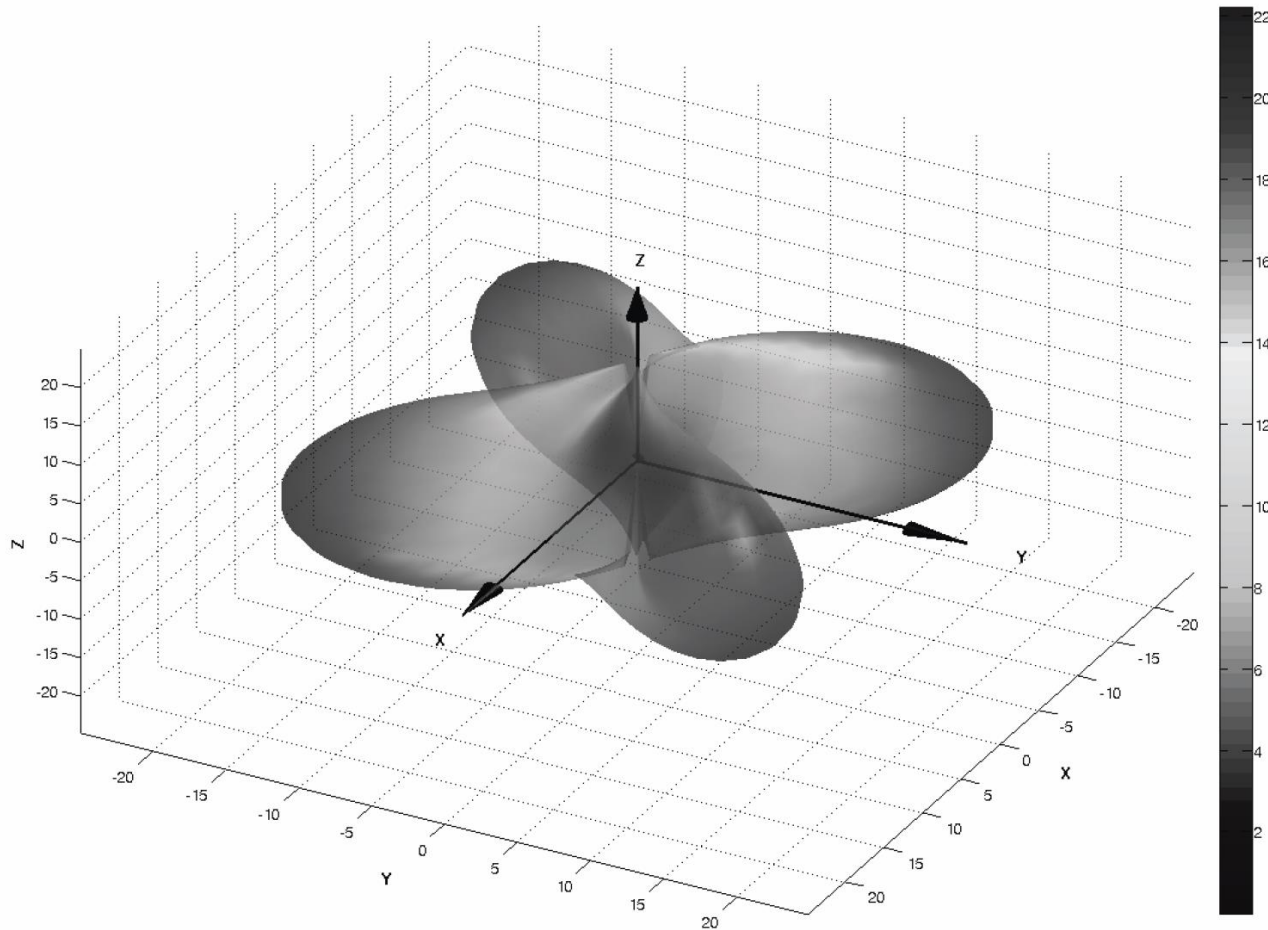
Διαγράμματα Ακτινοβολίας για Οριζόντιο Δίπολο Υπεράνω Εδάφους

54



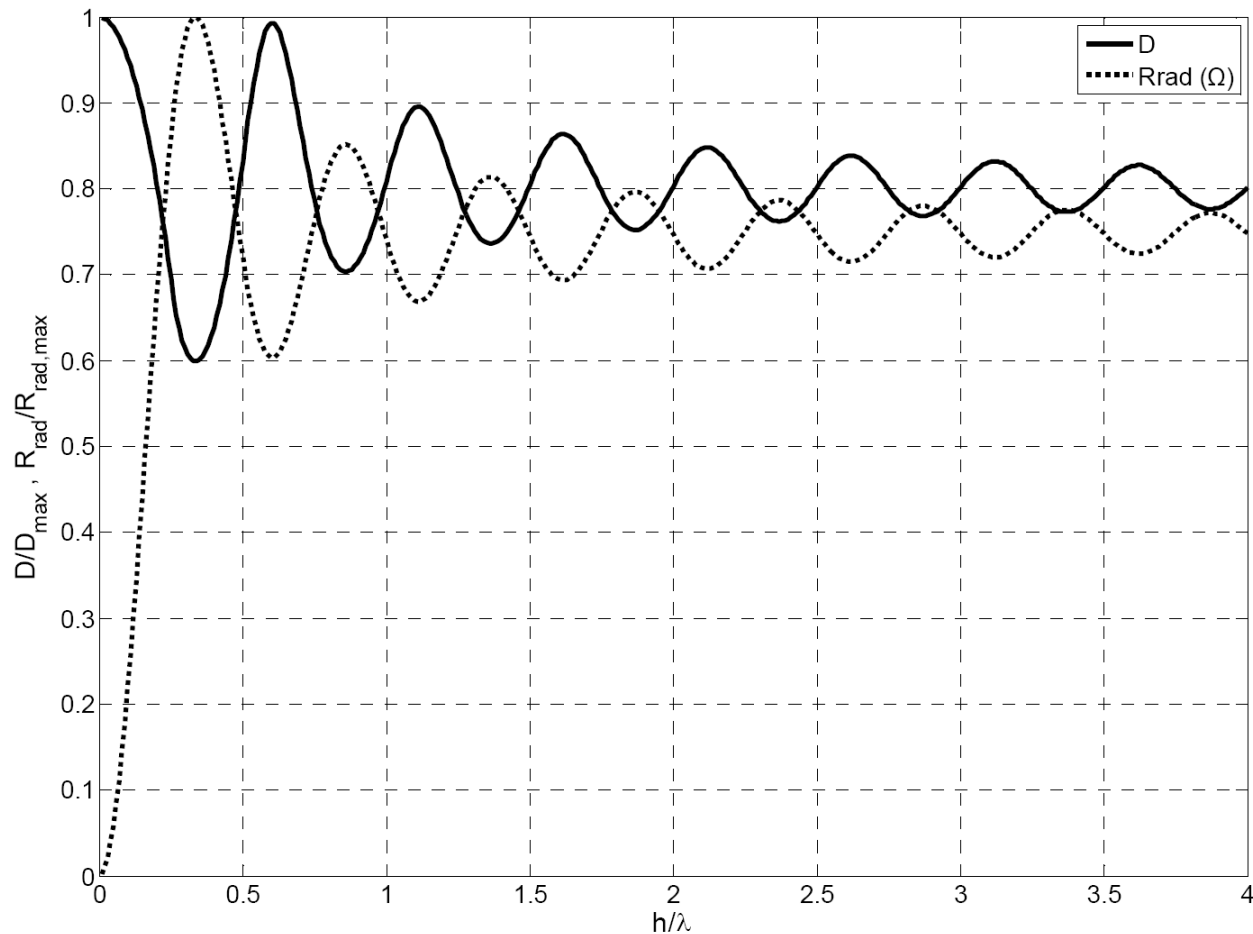
3D Διάγραμμα Ακτινοβολίας για Οριζόντιο Δίπολο Υπεράνω Εδάφους

55



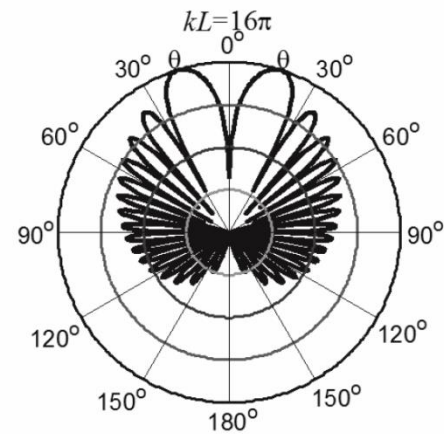
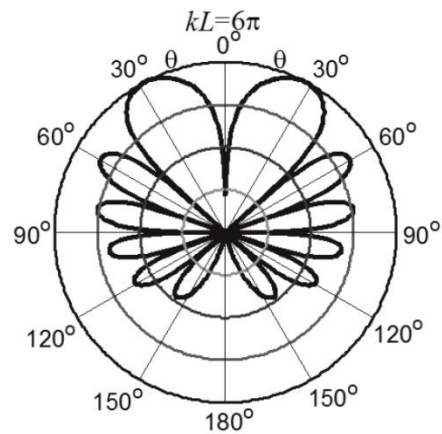
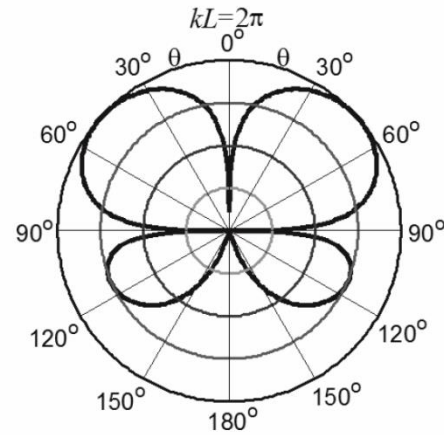
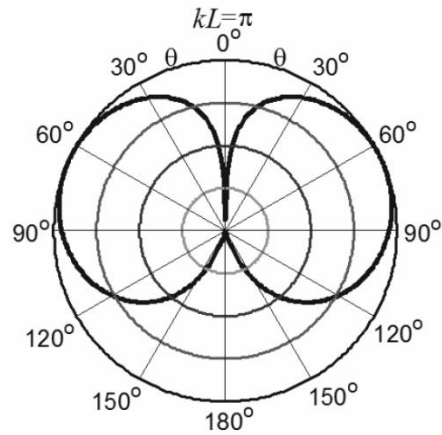
Κατευθυντικότητα και Αντίσταση Ακτινοβολίας για Οριζόντιο Δίπολο Υπεράνω Εδάφους

56



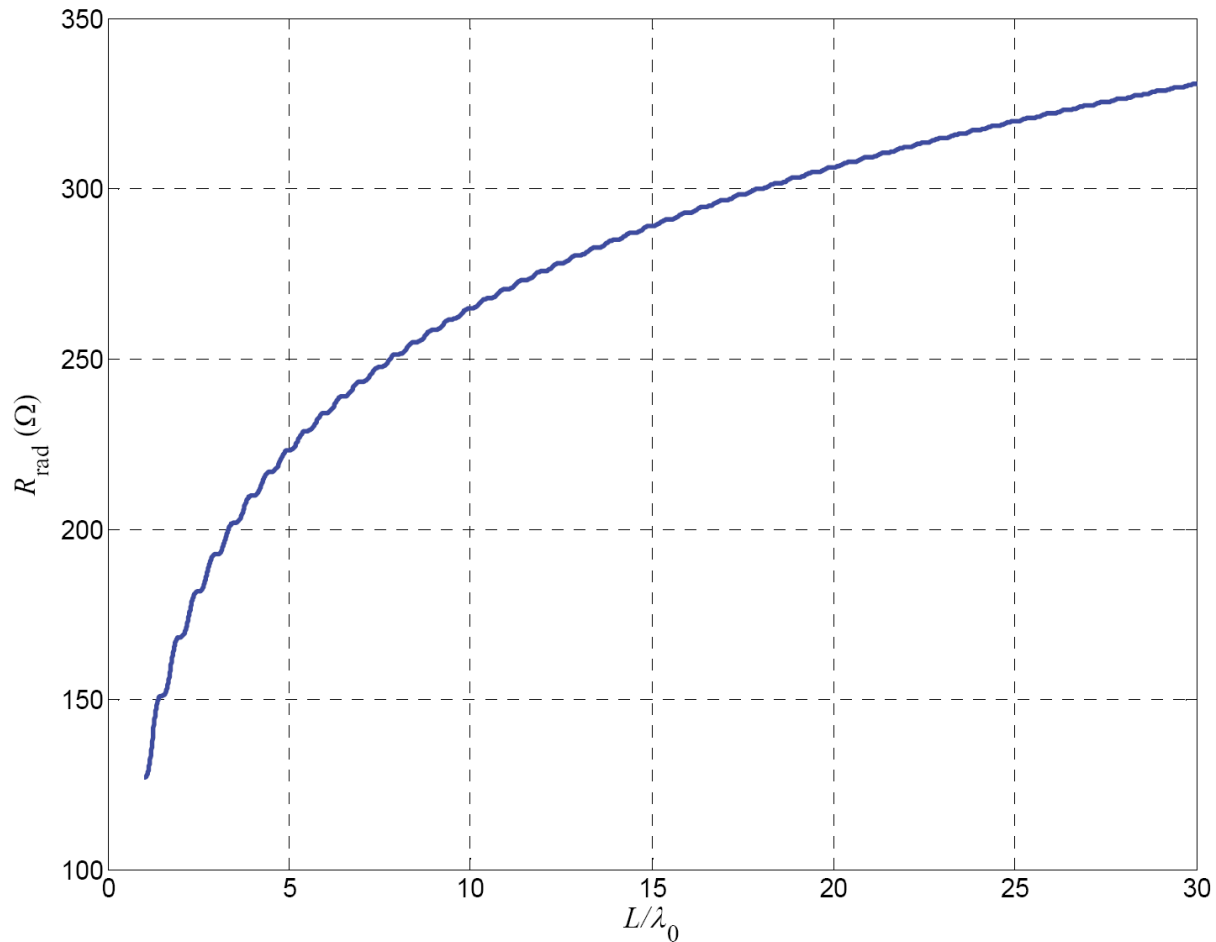
Διαγράμματα Κεραιών Οδεύοντος Κύματος

57



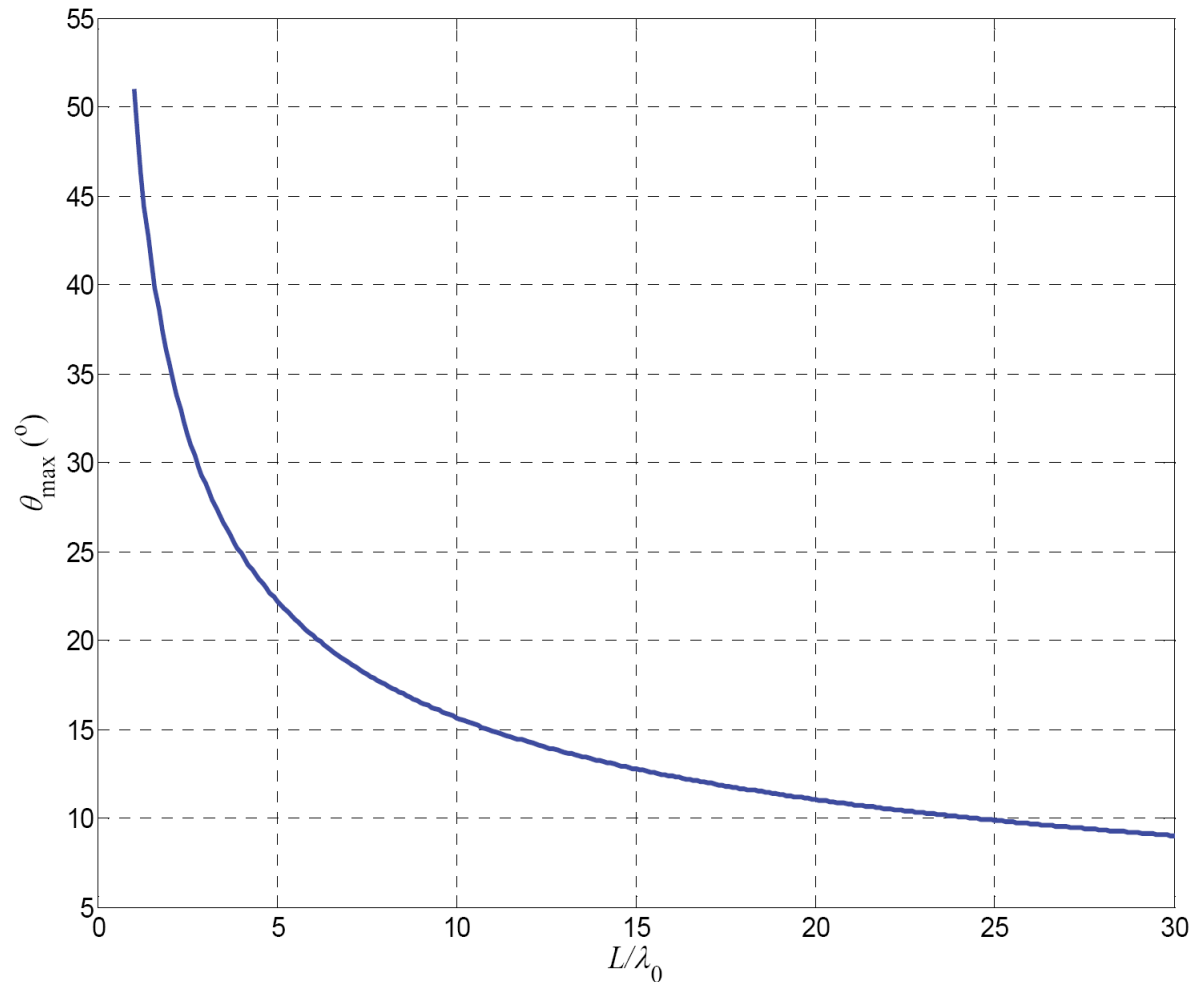
Αντίσταση Ακτινοβολίας Κεραίας Οδεύοντος Κύματος

58



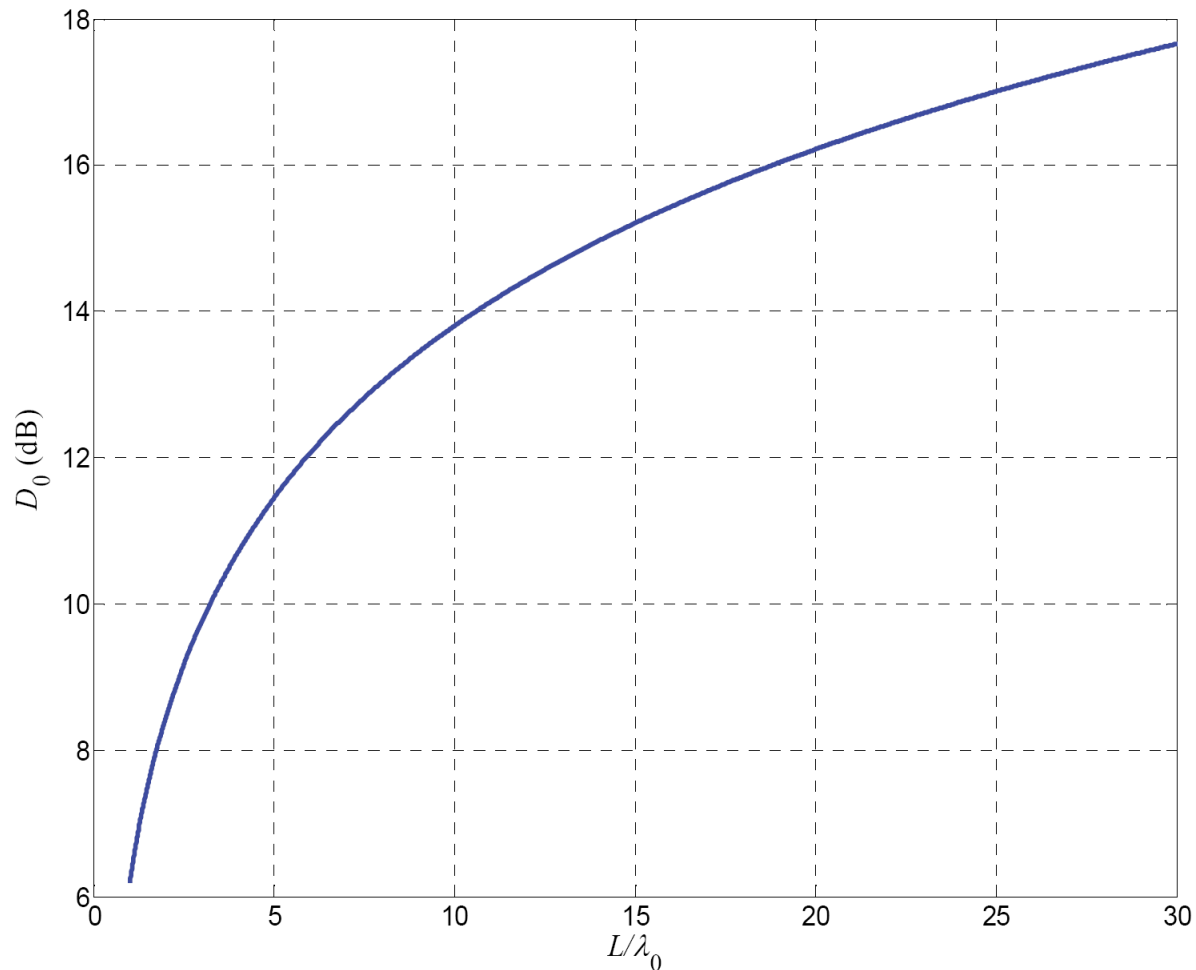
Κατεύθυνση Μέγιστης Ακτινοβολίας Κεραίας Οδεύοντος Κύματος

59



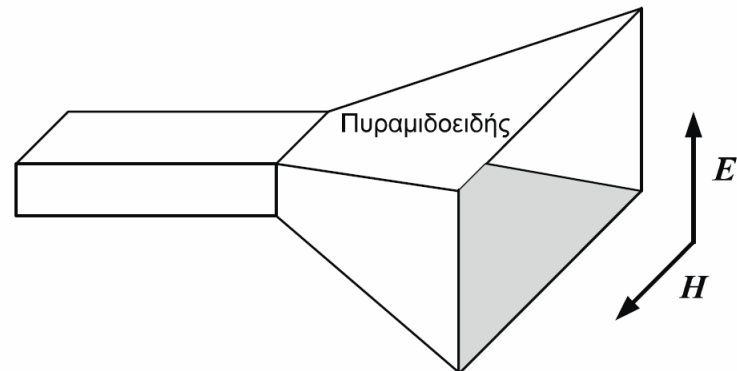
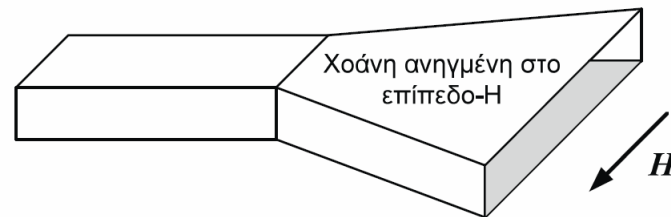
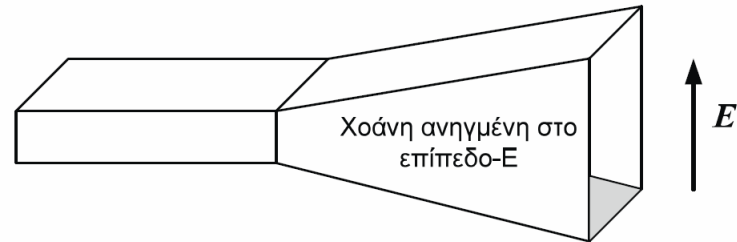
Κατευθυντικότητα Κεραίας Οδεύοντος Κύματος

60



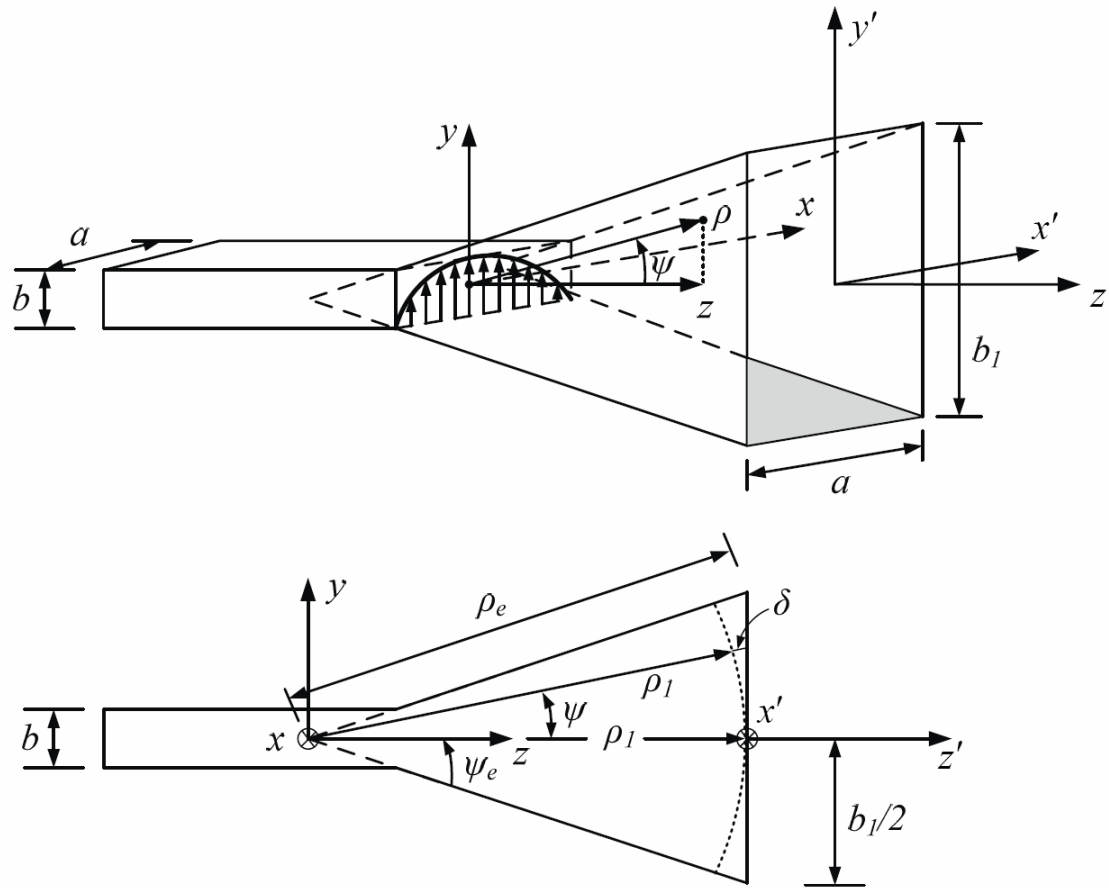
Είδη Χοανοκεραιών

61



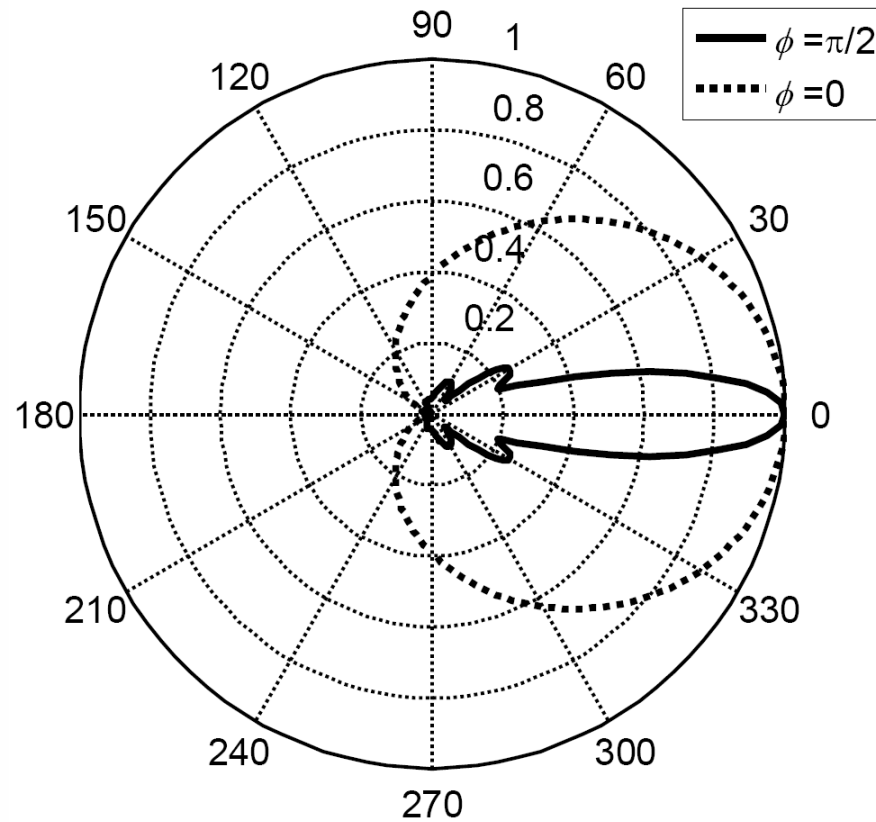
Χοάνη Ανηγγμένη στο Επίπεδο E

62



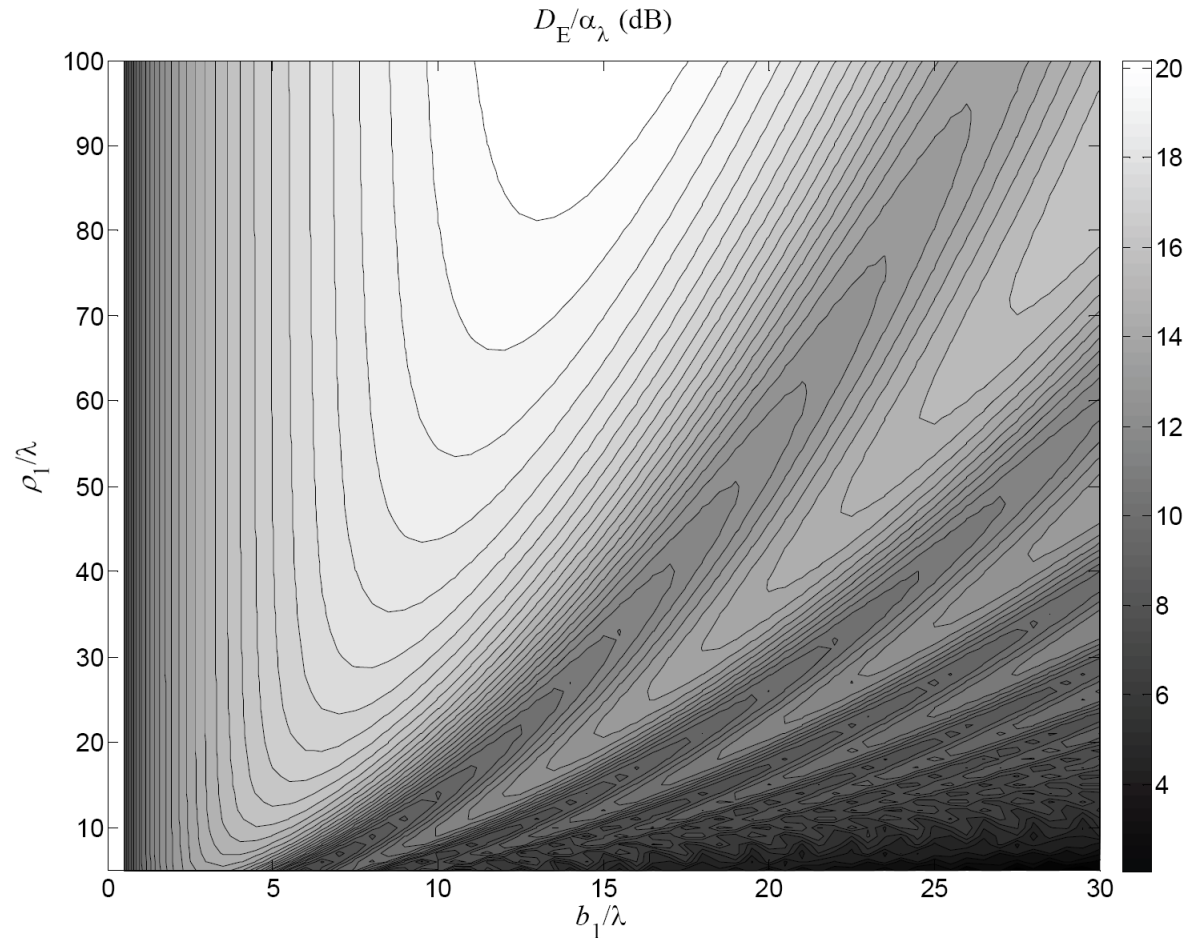
Διάγραμμα Ακτινοβολίας Χοάνης E-plane

63



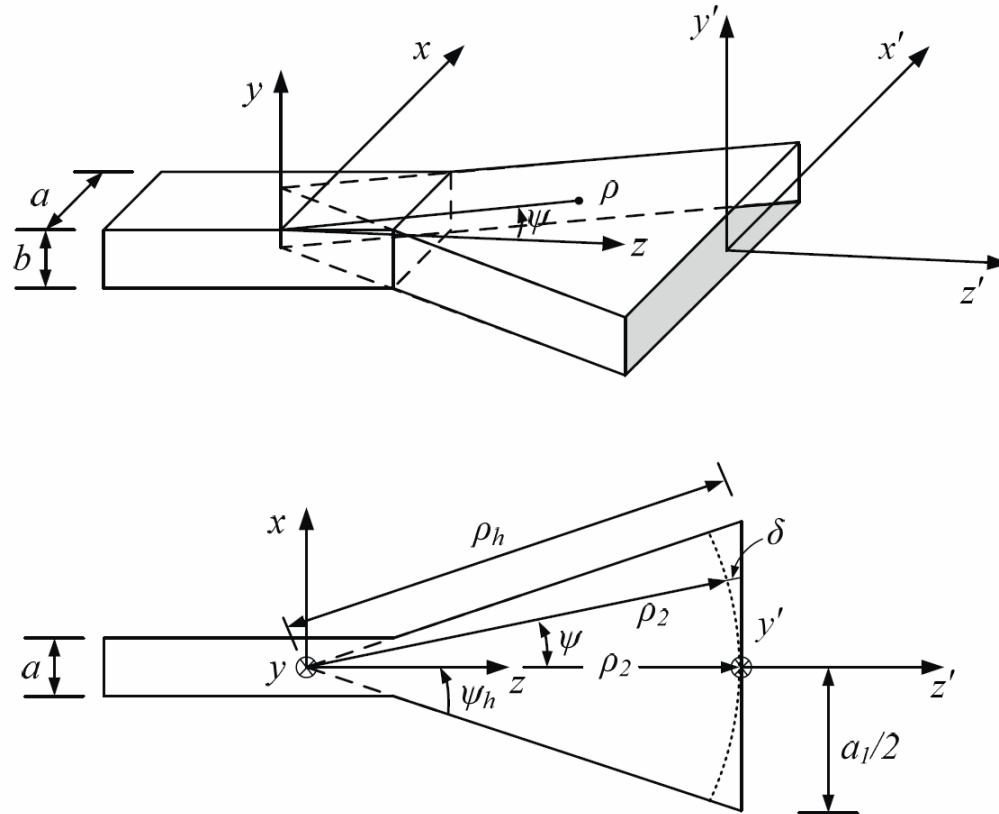
Κατευθυντικότητα Χοανοκεραίας E-plane

64



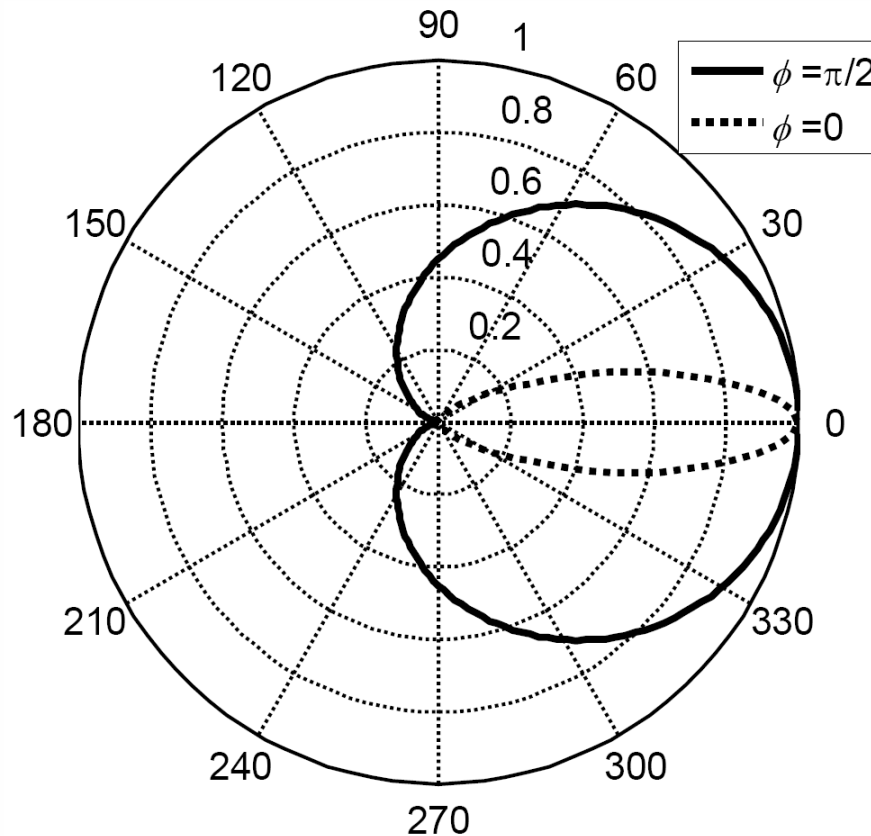
Χοάνη Ανηγγμένη στο Επίπεδο Η

65



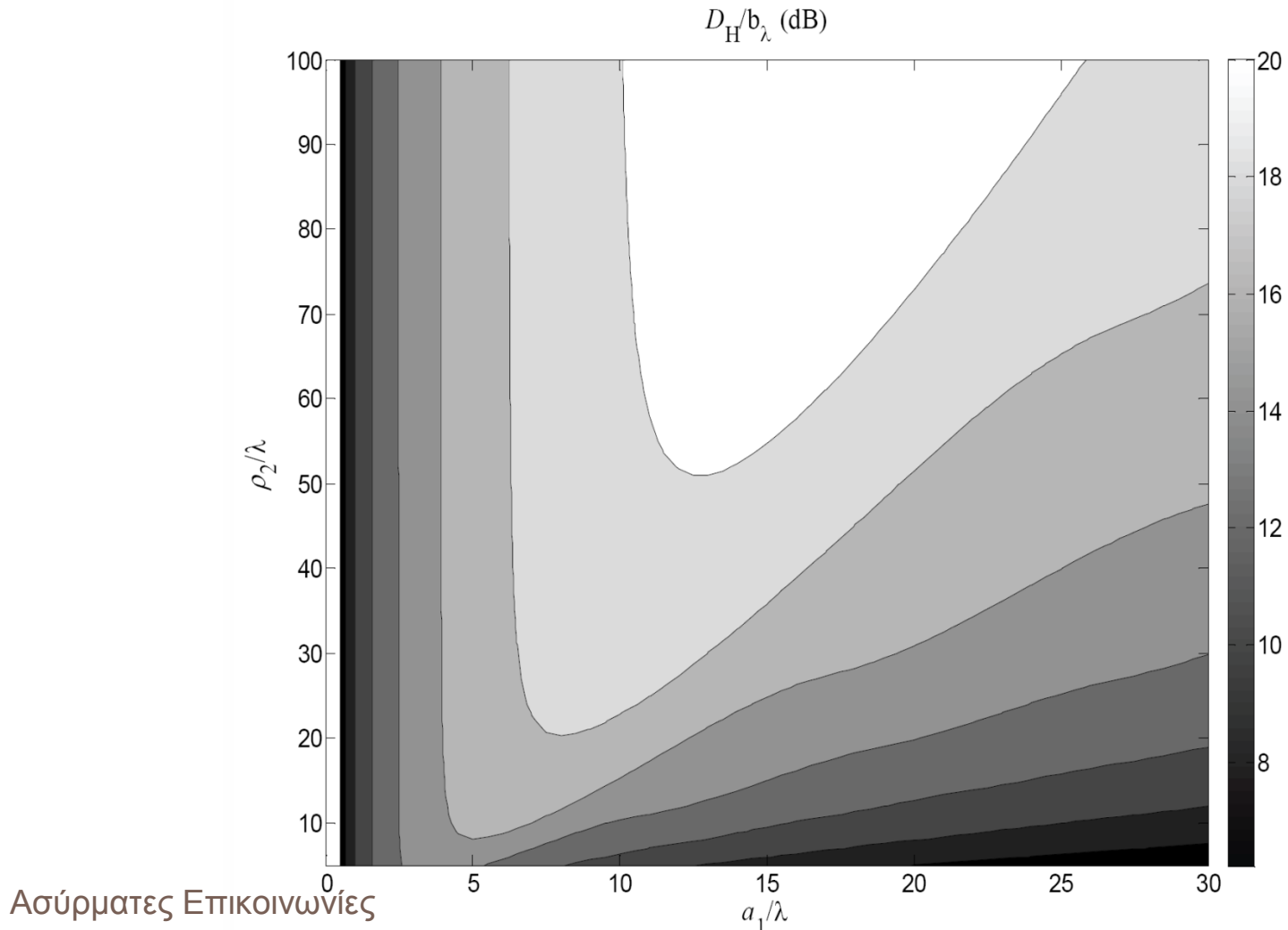
Διάγραμμα Ακτινοβολίας Χοάνης H-plane

66



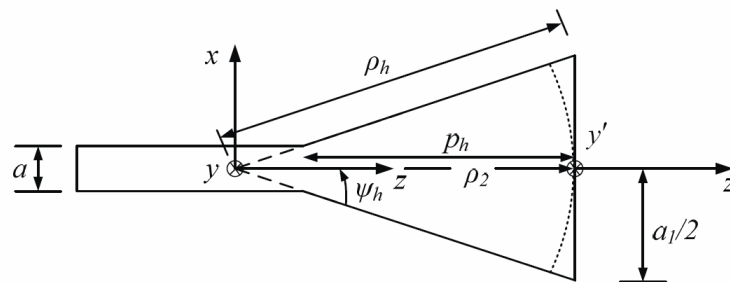
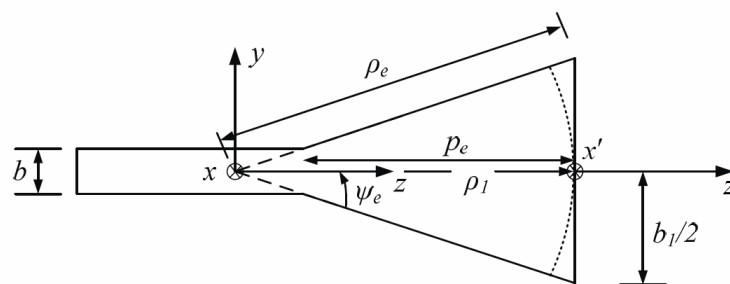
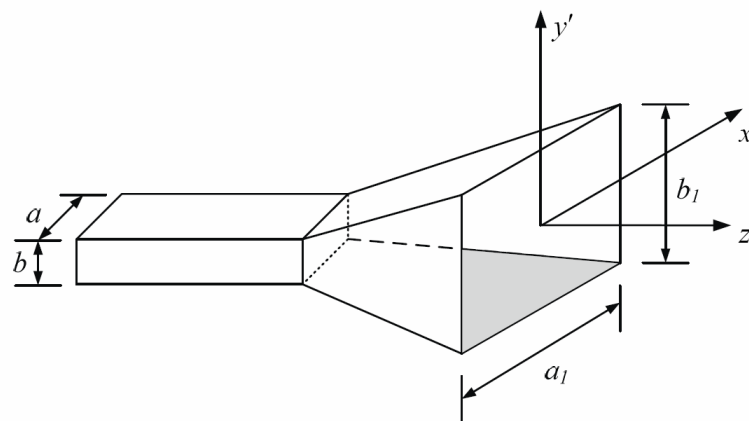
Κατευθυντικότητα Χοανοκεραίας H-plane

67



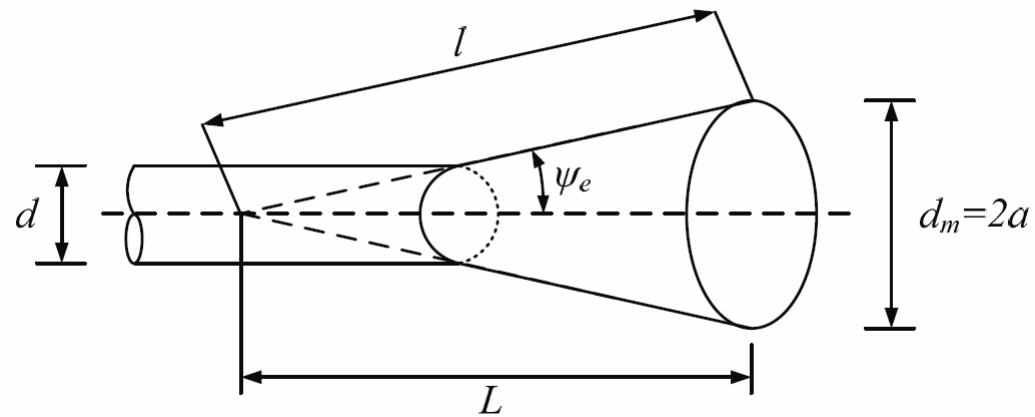
Πυραμιδοειδής Χοανοκεραία

68



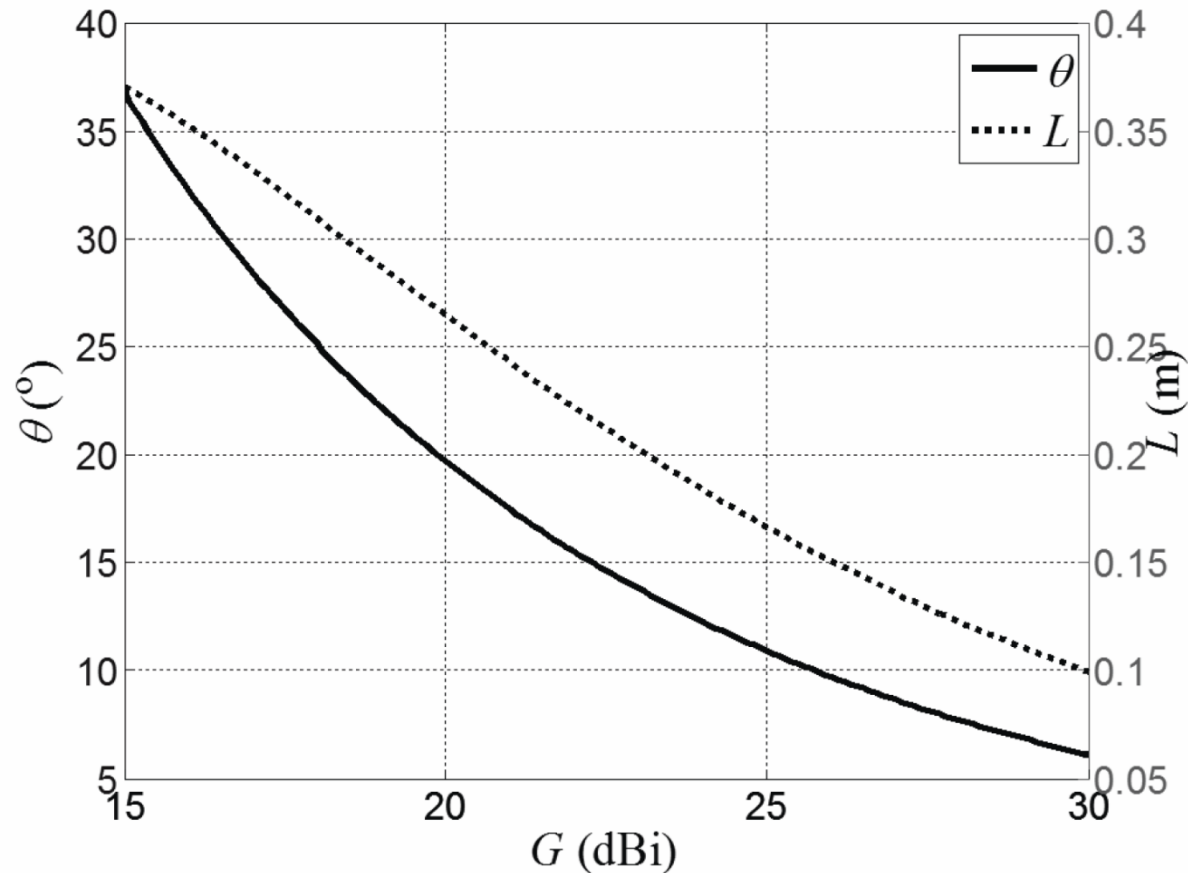
Κωνική Χοανοκεραία

69



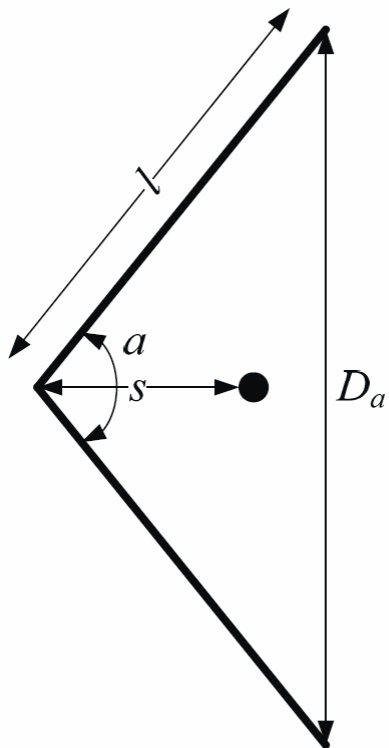
Μήκος και Γωνία Ανοίγματος Κωνικής Χοανοκεραίας Συναρτήσεις του Κέρδους

70



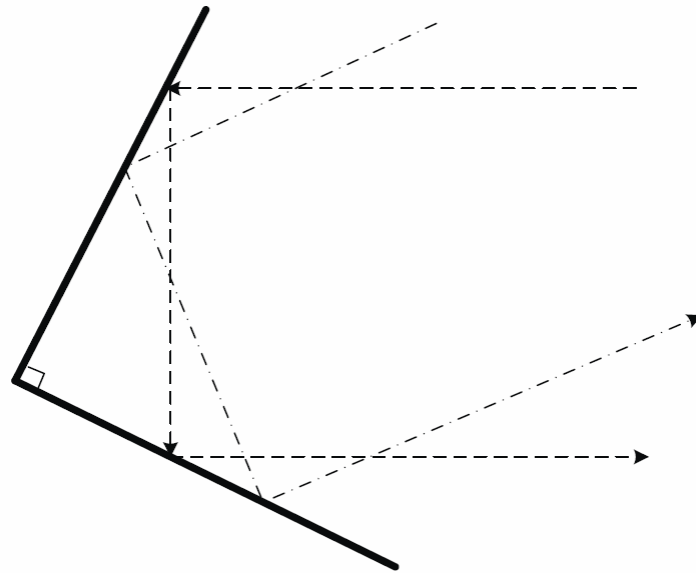
Κεραία Γωνιακού Ανακλαστήρα

71



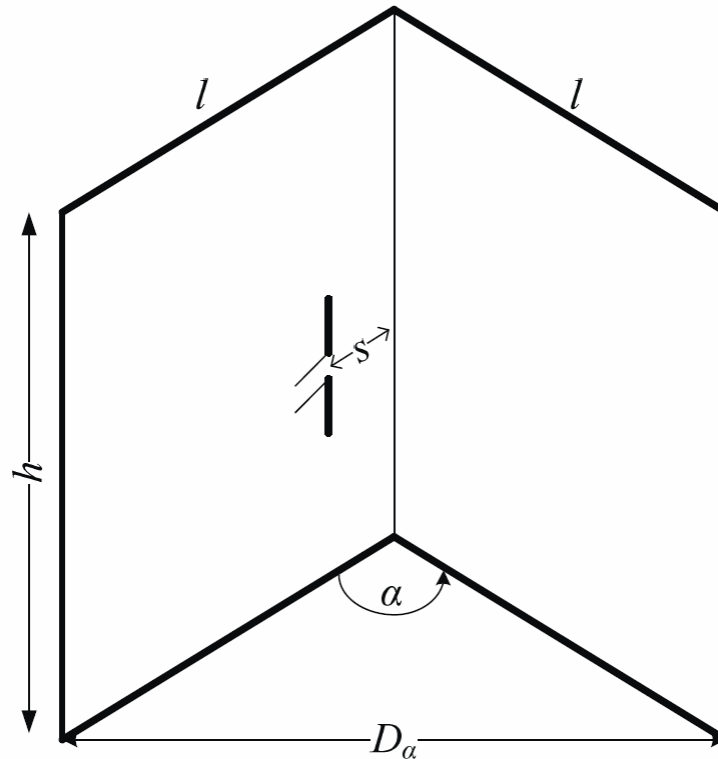
Ορθογωνικός Ανακλαστήρας

72



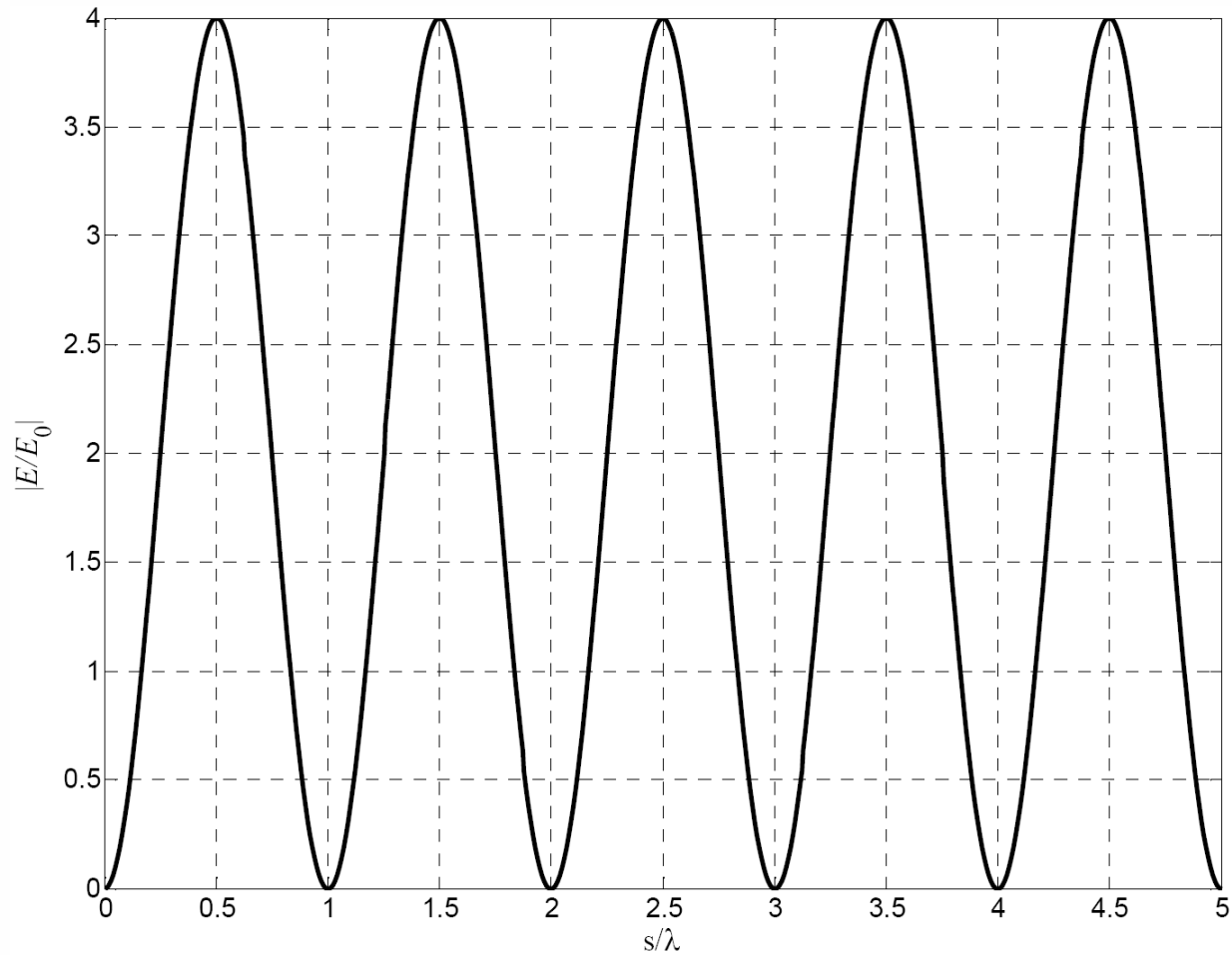
Γωνιακός Ανακλαστήρας Τροφοδοτούμενος Από Δίπολο

73



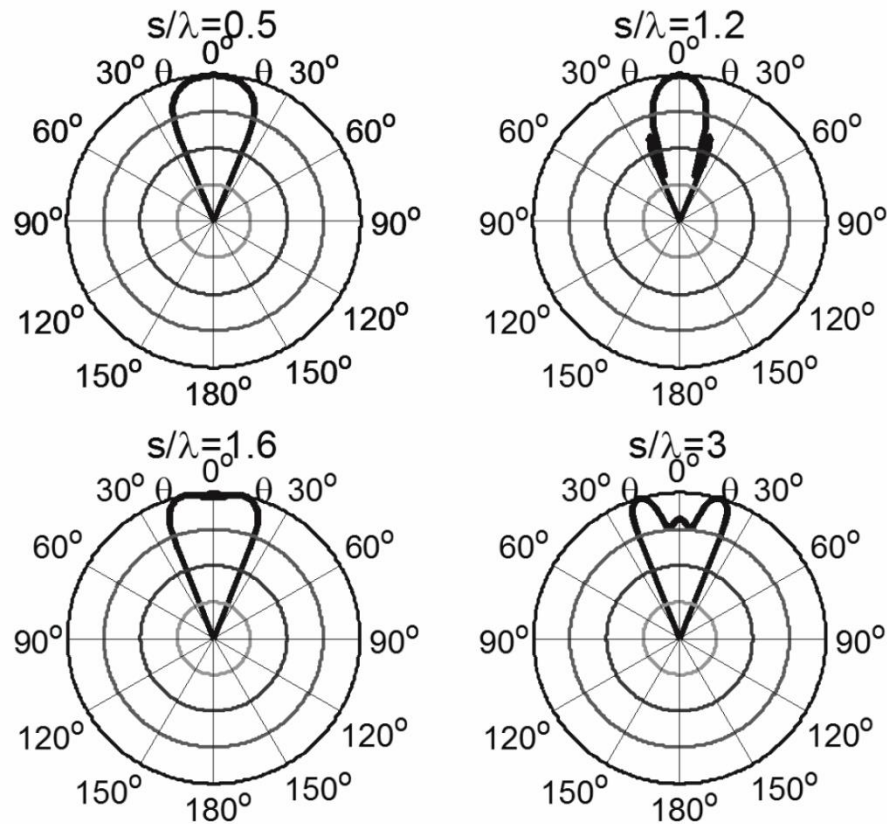
Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου Γωνιακού Ανακλαστήρα

74



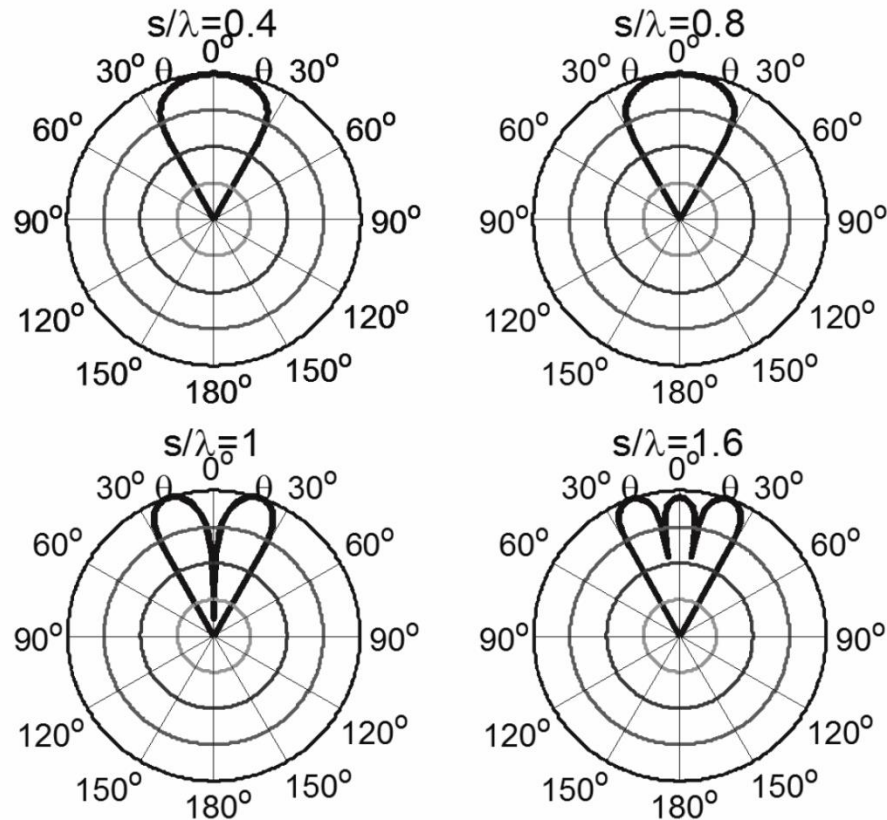
Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου Γωνιακού Ανακλαστήρα ($\alpha=\pi/4$)

75



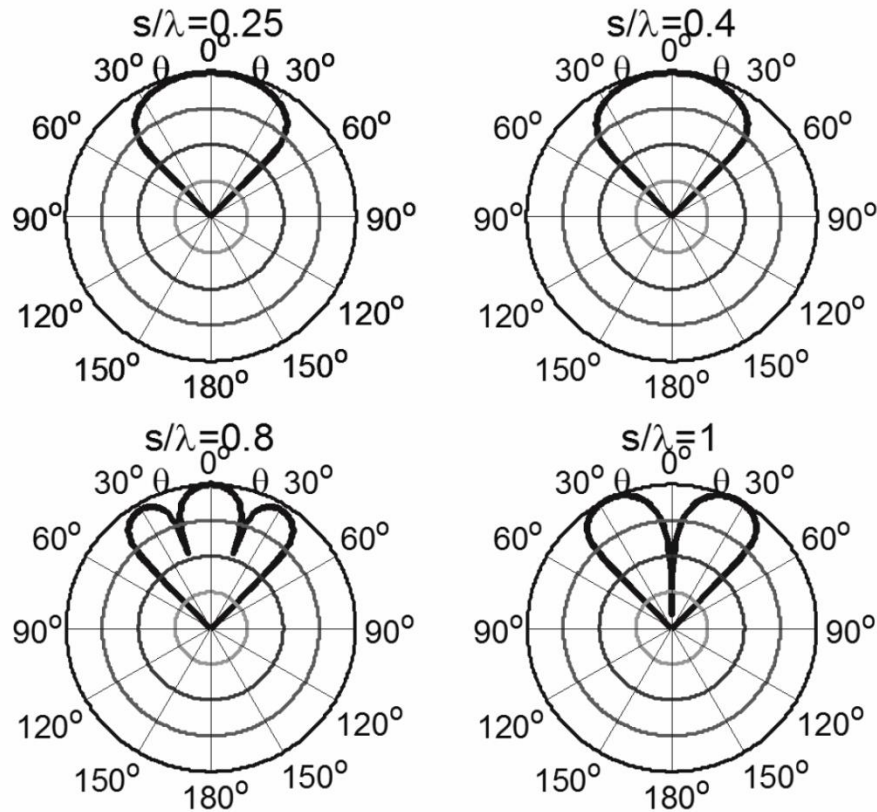
Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου Γωνιακού Ανακλαστήρα ($\alpha=\pi/3$)

76



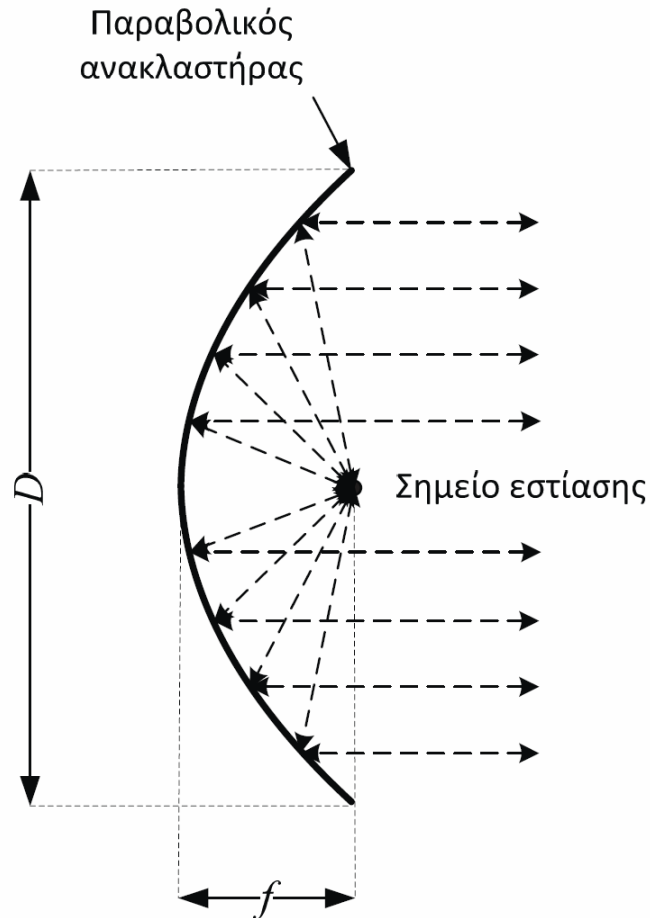
Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου Γωνιακού Ανακλαστήρα ($\alpha=\pi/2$)

77



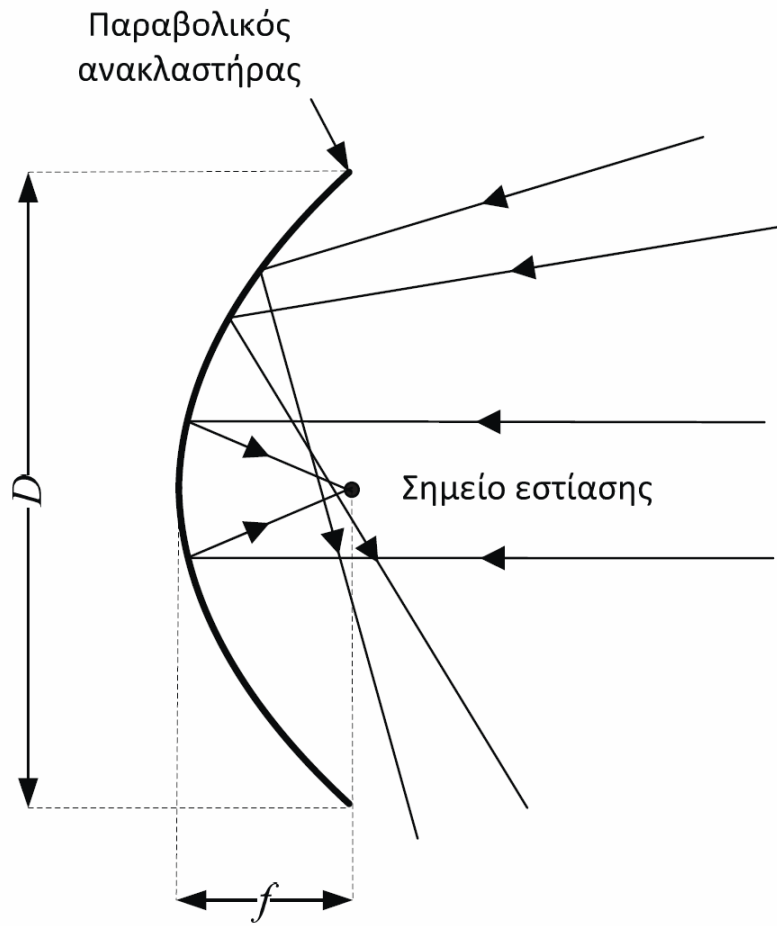
Σημείο Σύγκλισης Παραβολικού Ανακλαστήρα

78



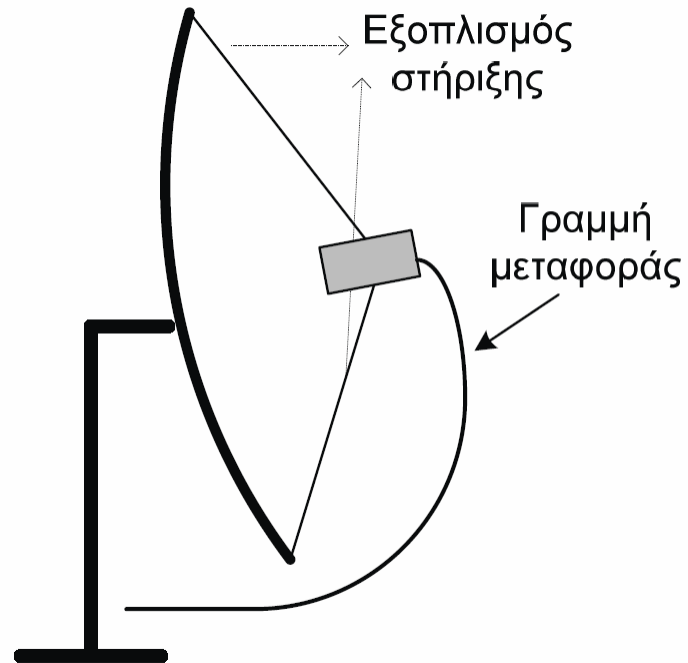
Απόκλιση Ακτίνων στον Παραβολικό Ανακλαστήρα

79



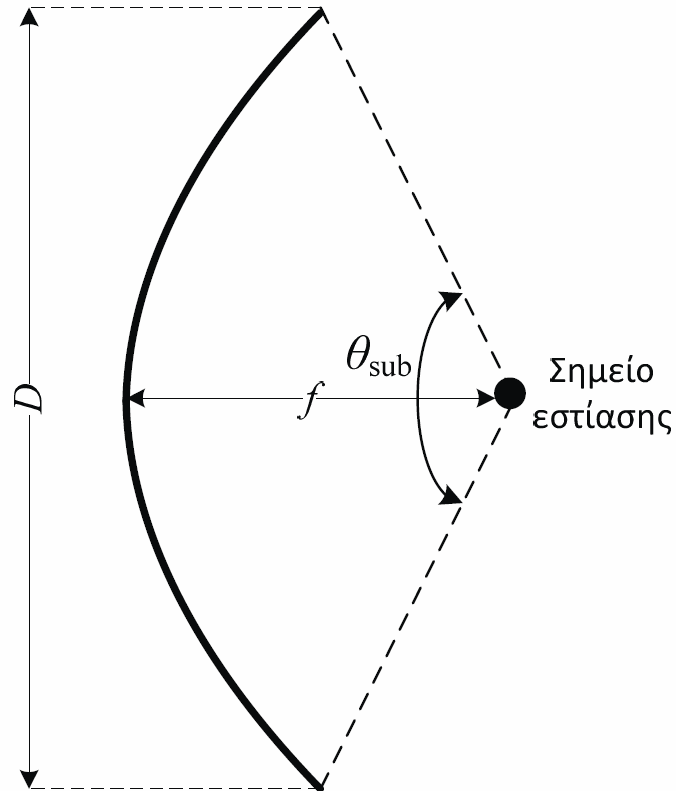
Κεραία Εμπρόσθια Τροφοδότησης

80



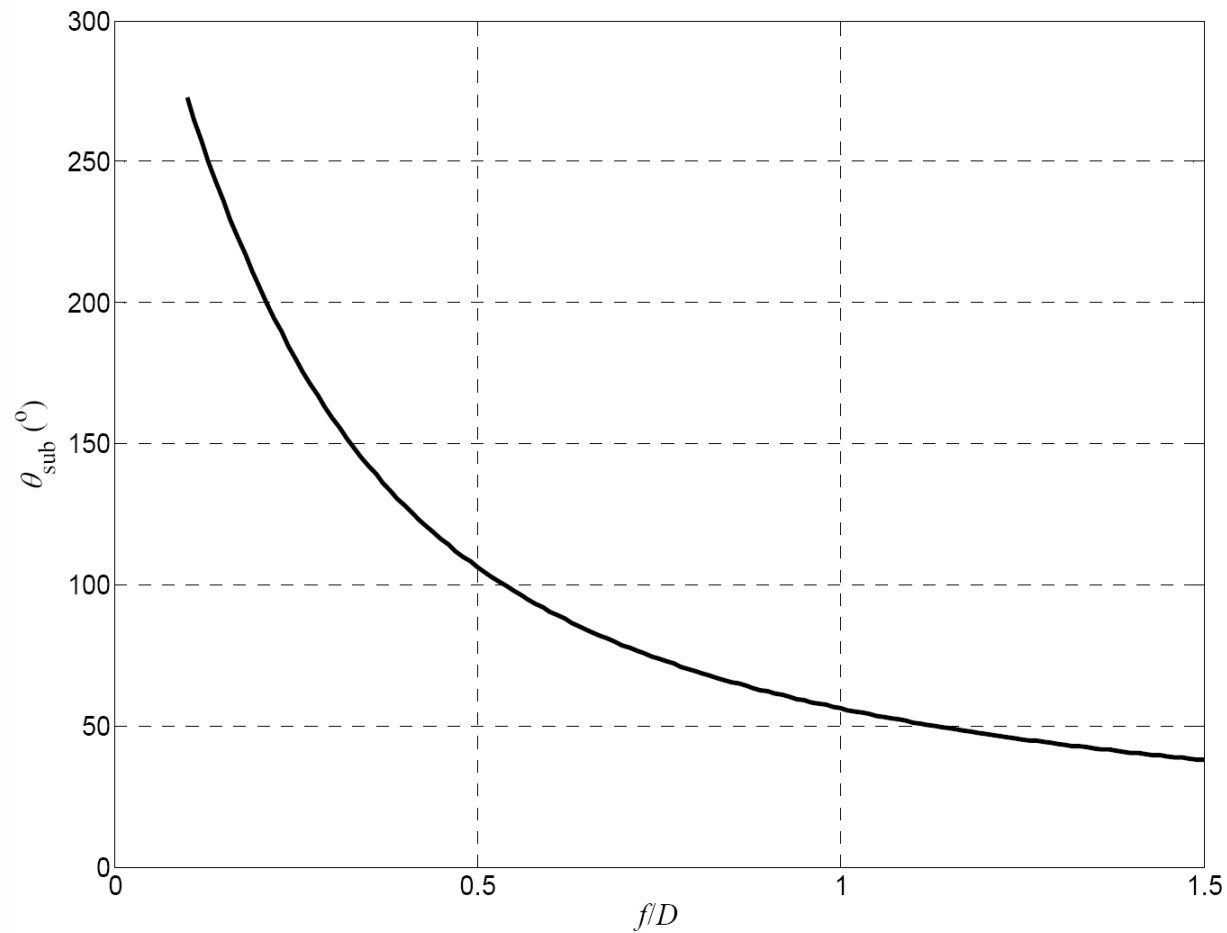
Υποκείμενη Γωνία

81



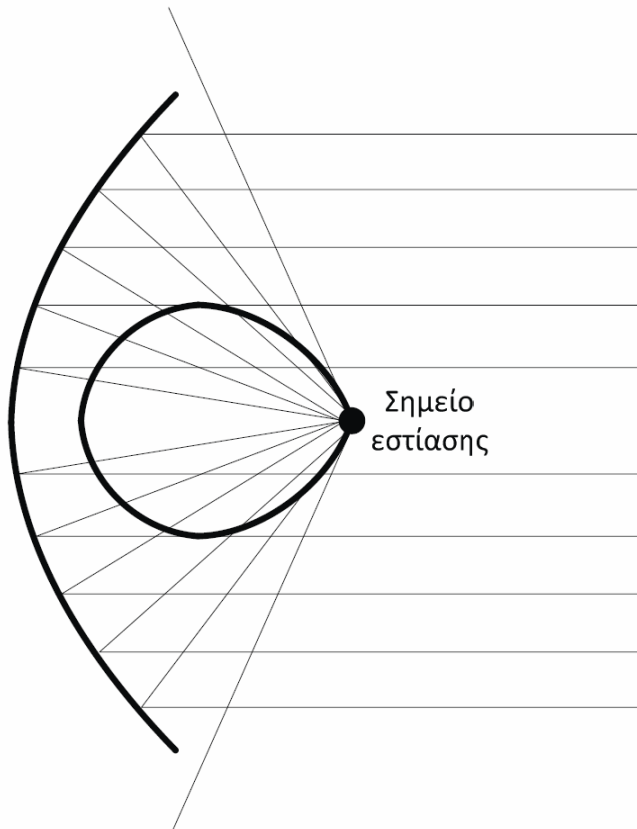
Μεταβολή Υποκείμενης Γωνίας

82

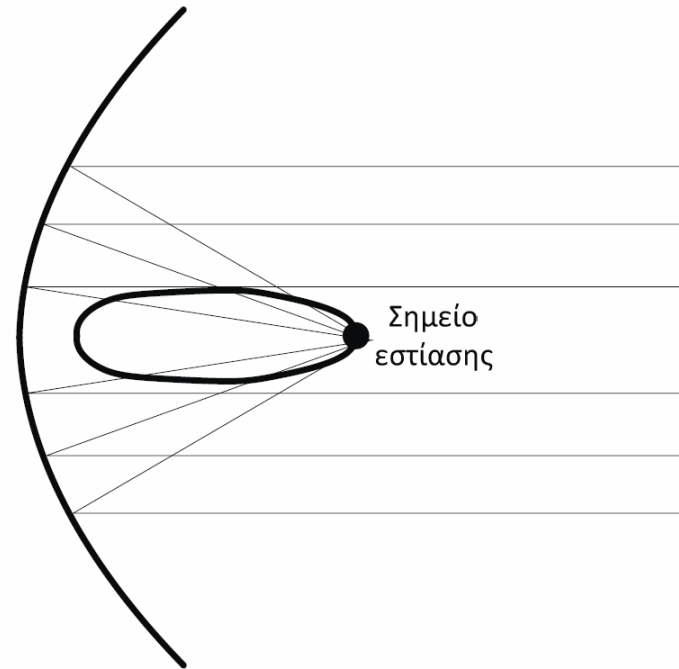


Κακή Προσαρμογή Τροφοδοσίας

83



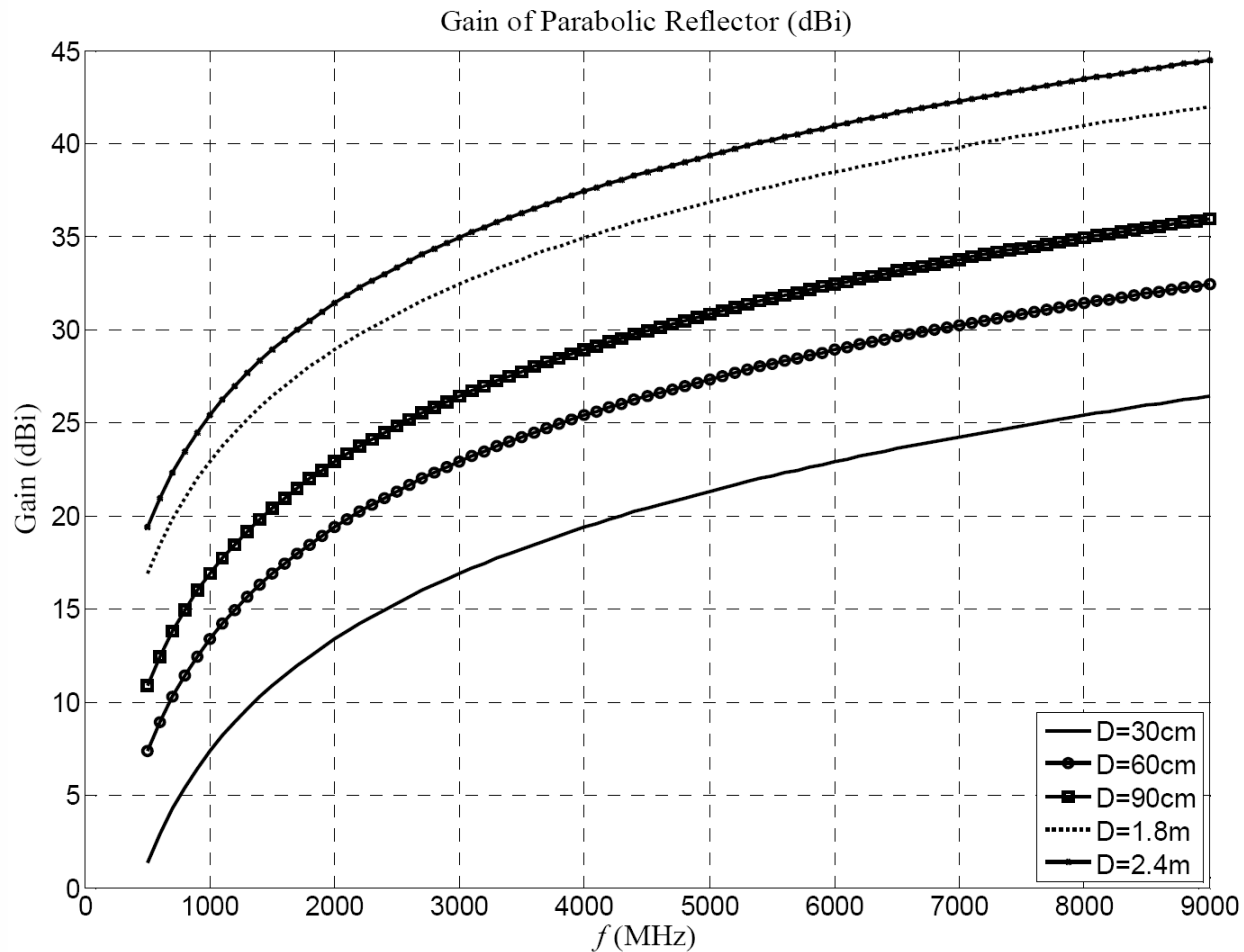
(α)



(β)

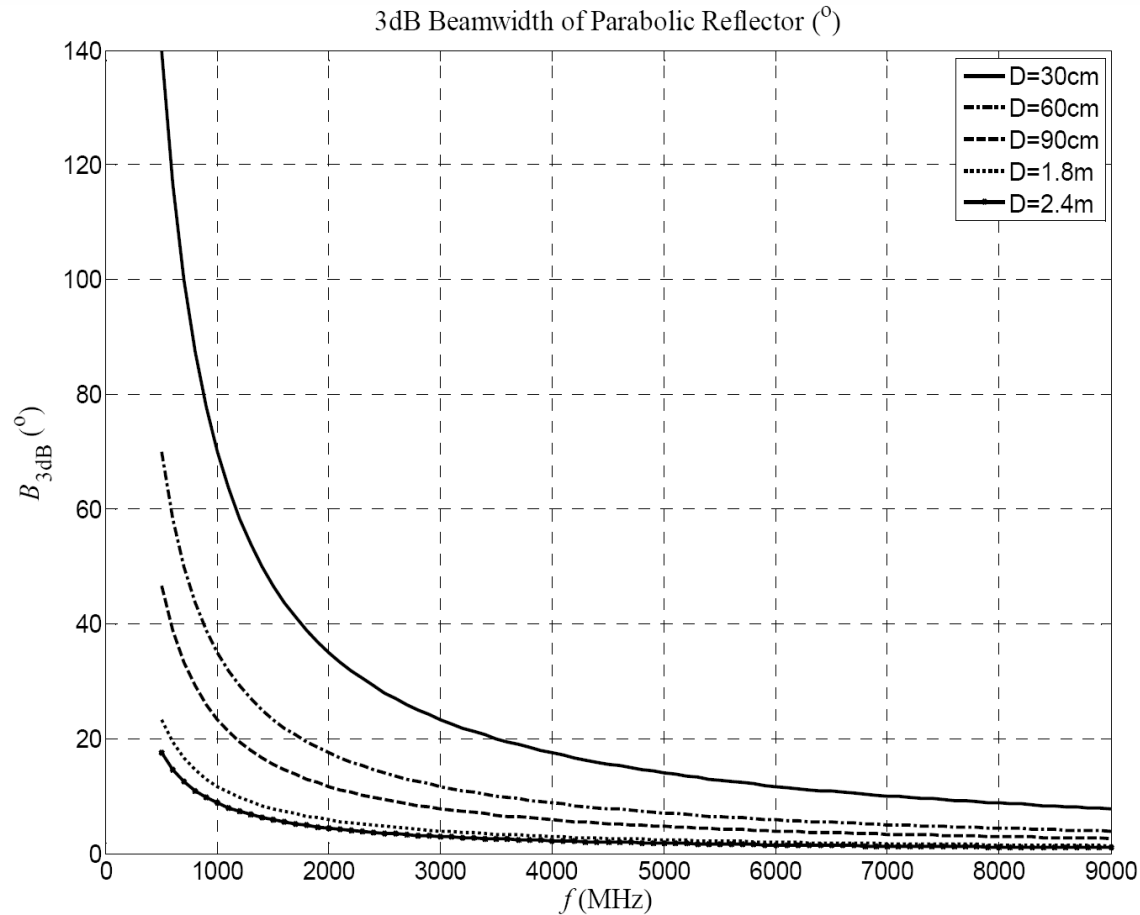
Κέρδος Παραβολικού Ανακλαστήρα

84



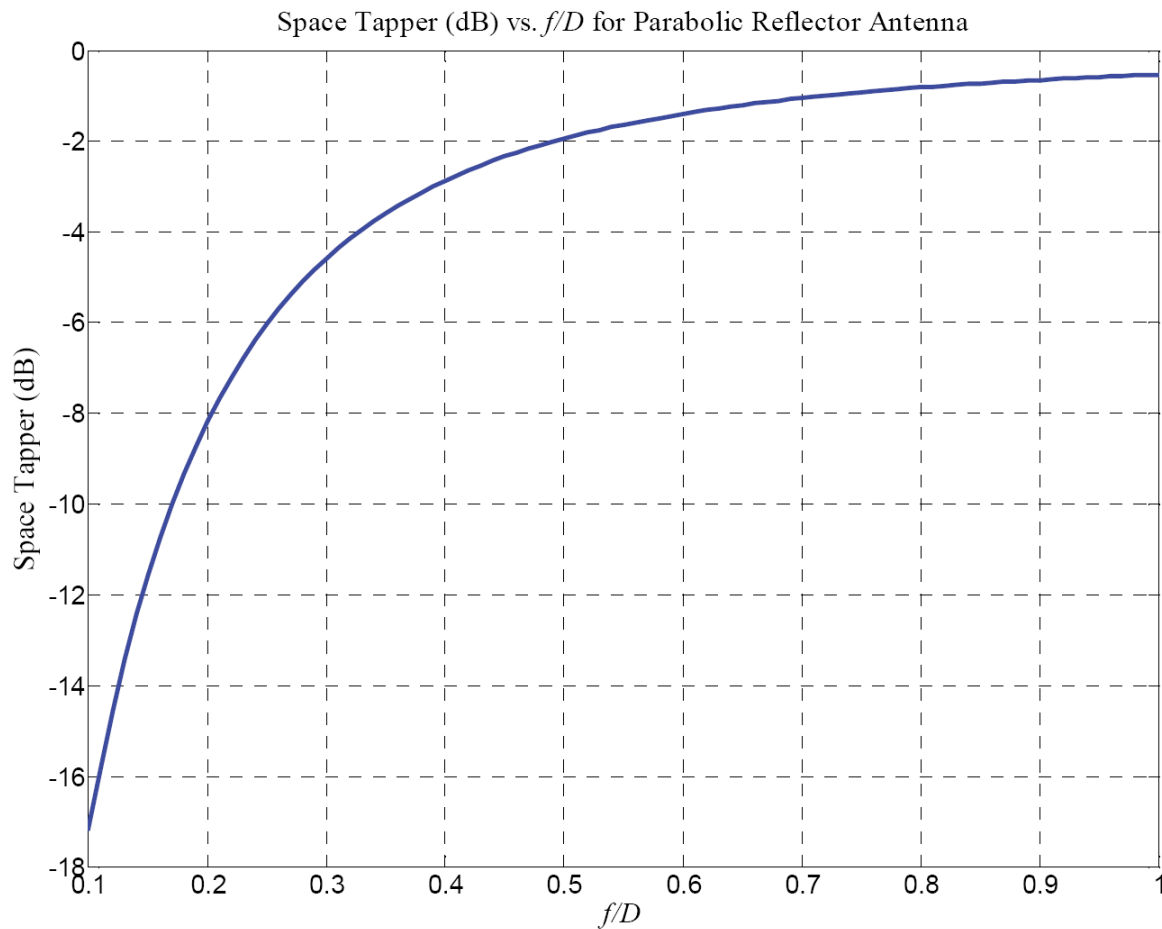
Εύρος Δέσμης 3dB Παραβολικού Ανακλαστήρα

85



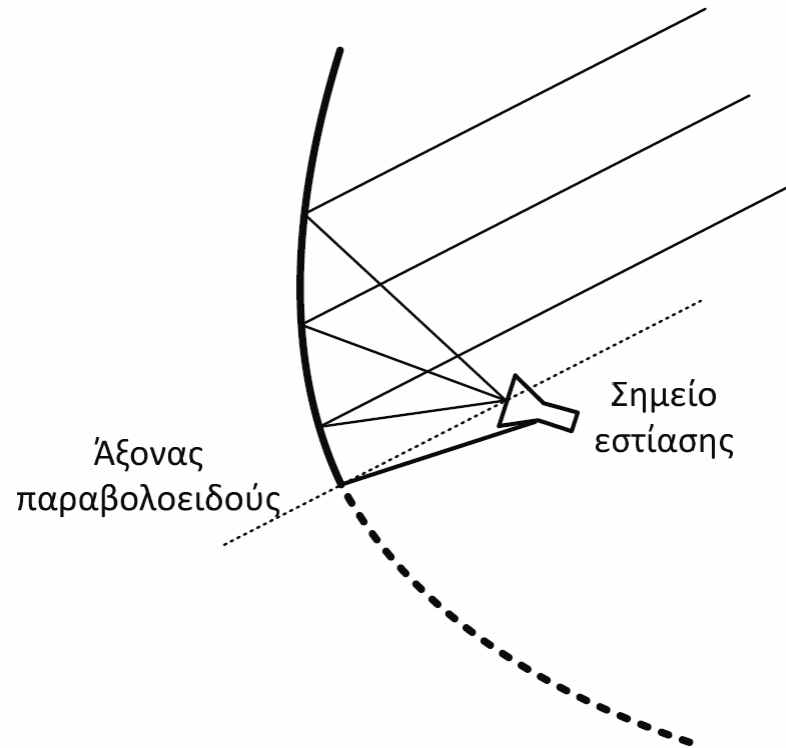
Μέγιστη Μεταβολή της Προσπίπτουσας Ισχύος

86



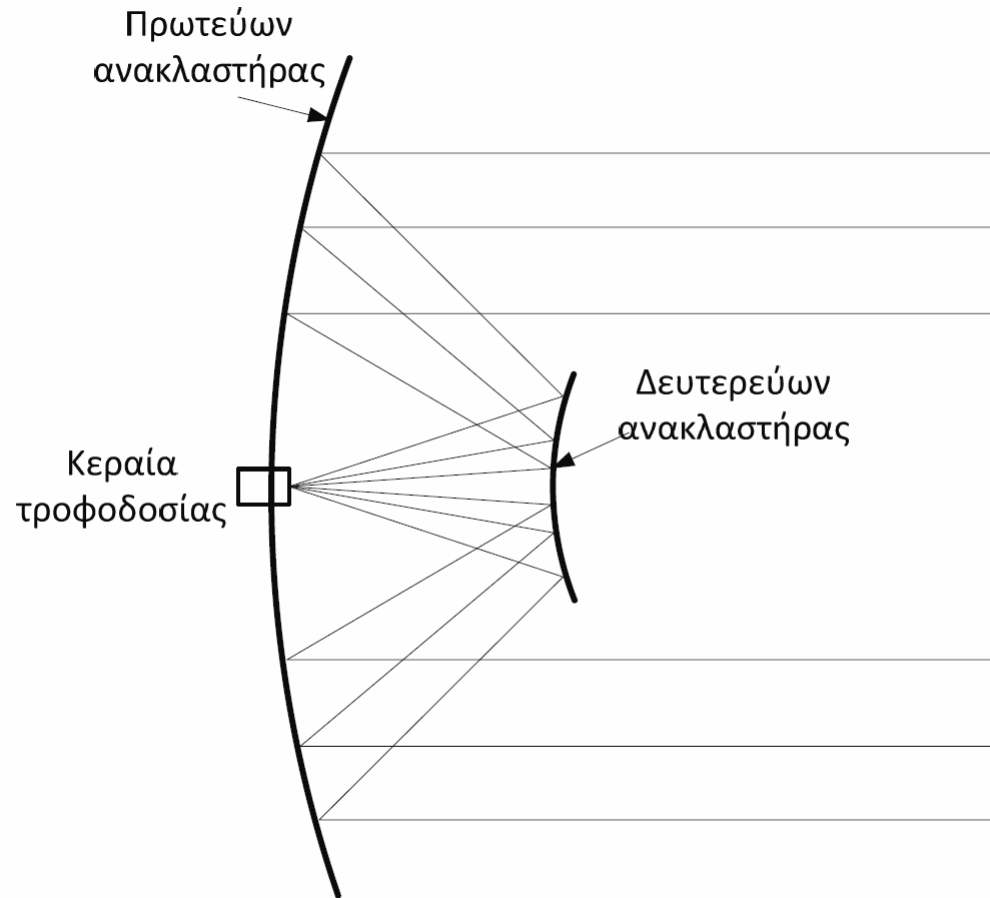
Κάτοπτρο Μετατοπισμένης Εστίας

87



Κεραία Cassegrain

88



Cassegrain με Εναλλαγή Πόλωσης

89

