



Πανεπιστήμιο Αιγαίου

Ασύρματες Επικοινωνίες

Ενότητα 4 : Κεραίες και Πεδία Ακτινοβολίας

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 Κεφαλαίου

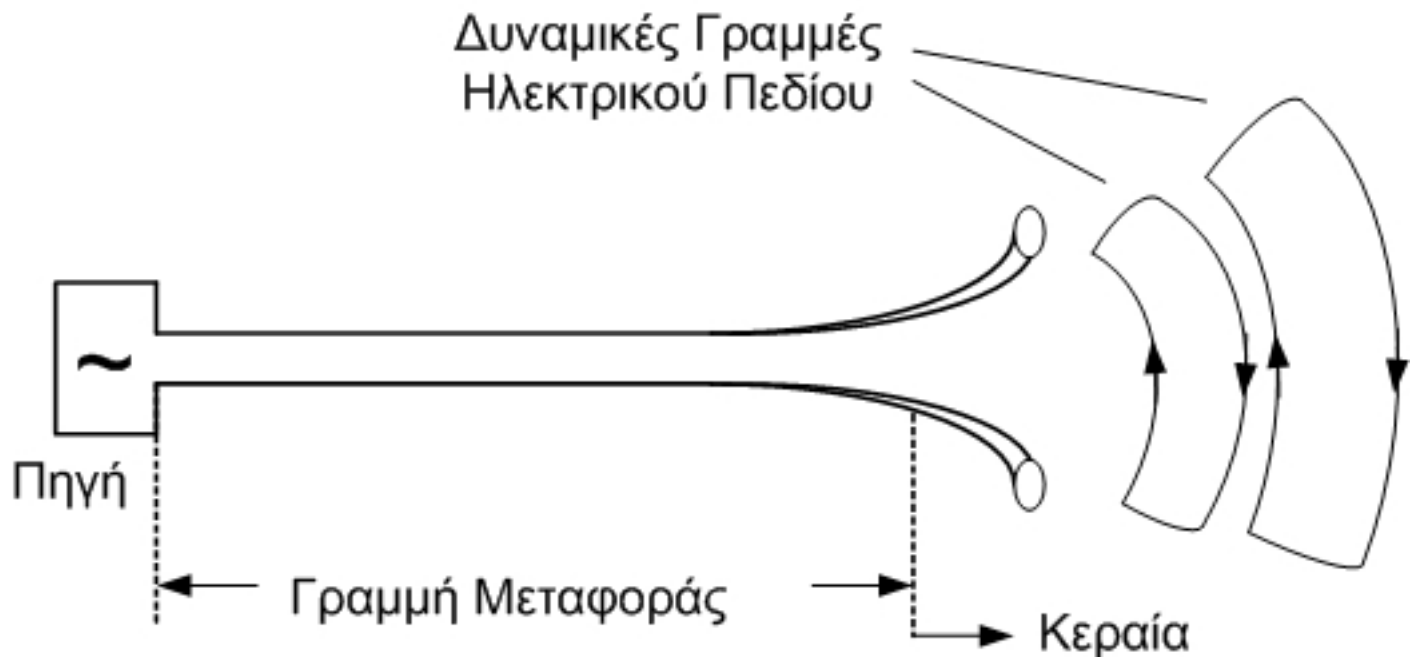
4

- Μηχανισμός Ακτινοβολίας
- Συναρτήσεις Δυναμικού
- Περιοχές Ακτινοβολίας Κεραιών
- Υπολογισμός Πεδίου Ακτινοβολίας Οποιασδήποτε Κεραίας
- Σημειακές Πηγές και Η/Μ κύματα
- Διαγράμματα Ακτινοβολίας
- Χρήσιμα Μεγέθη (ένταση ακτινοβολίας, γωνιακό εύρος, στερεός λοβός ακτινοβολίας, κατευθυντικό κέρδος, κέρδος ισχύος)
- Η Κεραία ως στοιχείο κυκλώματος
- Θεώρημα Αμοιβαιότητας
- Ενεργό Μήκος Κεραίας
- Πόλωση Κεραιών
- Η Κεραία ως Άνοιγμα
- EIRP και ERP

Πηγή, Γραμμή Μεταφοράς & Κεραία

5

- **Κεραία** : Η κατασκευή εκείνη που σχετίζεται με την περιοχή μετάβασης από **καθοδηγούμενα κύματα** σε **κύματα ελεύθερου χώρου** και αντίστροφα.



Μηχανισμός Ακτινοβολίας Κεραιών

6

□ Απλός Μονός Αγωγός

- Θεωρούμε αγωγό μήκους l που διαρρέεται από χρονικά μεταβαλλόμενο ρεύμα $I(t)$

$$I(t) = \rho_l v(t) \Rightarrow \frac{dI}{dt} = \rho_l \frac{dv}{dt} = \rho_l a$$

$$l \frac{dI}{dt} = l \rho_l \frac{dv}{dt} = l \rho_l a$$

- Αυτή είναι η βασική εξίσωση ακτινοβολίας σύμφωνα με την οποία για να παραχθεί ακτινοβολία θα πρέπει να έχουμε είτε χρονικά μεταβαλλόμενο ρεύμα είτε επιταχυνόμενο (ή επιβραδυνόμενο) φορτίο.

Μηχανισμός Ακτινοβολίας Κεραιών

7

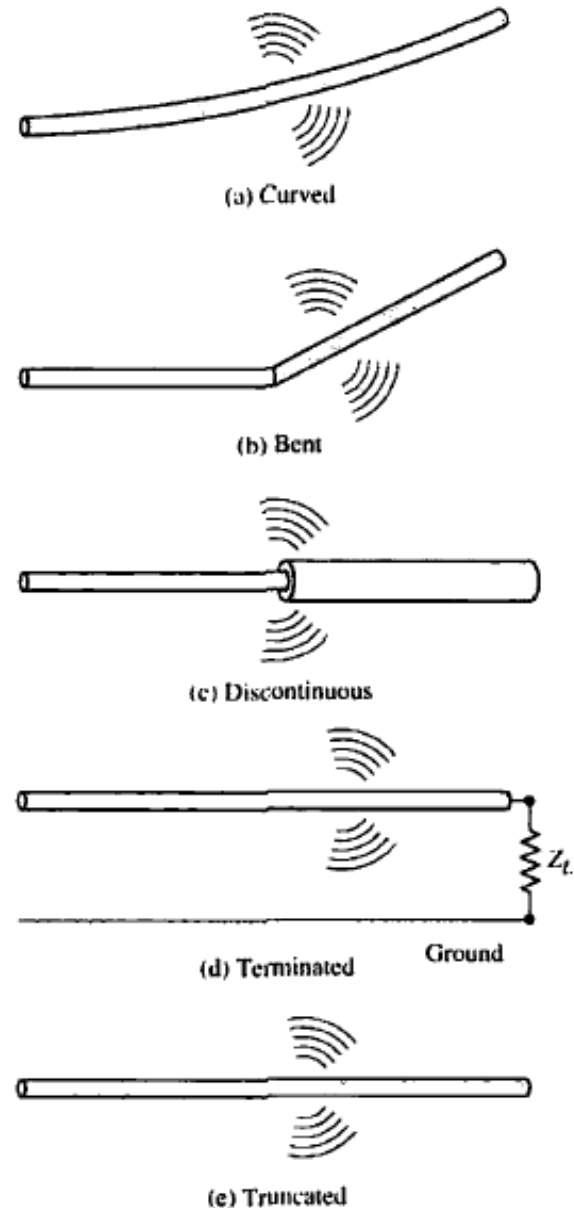
□ Απλός Μονός Αγωγός

- Για να επιταχυνθεί (ή να επιβραδυνθεί) ένα φορτίο πρέπει το σύρμα να:
 - καμπυλωθεί
 - καμφθεί
 - να έχει ασυνέχειες
 - να έχει απολήξεις
- Αν ένα φορτίο δεν κινείται, δε δημιουργεί ρεύμα, άρα δεν υπάρχει ακτινοβολία.
- Αν ένα φορτίο κινείται με σταθερή ταχύτητα:
 - Δε δημιουργεί ακτινοβολία αν το σύρμα είναι ευθύγραμμο και απείρου μήκους
 - Δημιουργείται ακτινοβολία αν το σύρμα έχει καμπύλα σημεία, κάμψεις, ασυνέχειες, απολήξεις, κλπ.
 - Αν το φορτίο ταλαντώνεται χρονικά, ακτινοβολεί ακόμα και αν είναι ευθύγραμμο.

Μηχανισμός Ακτινοβολίας Κεραιών

8

- Πως επιταχύνουμε ή επιβραδύνουμε τα φορτία:
 - 1) Κύρτωση
 - 2) Μόνιμη στρέβλωση
 - 3) Αλλαγή διατομής
 - 4) Τερματισμός
 - 5) Αποκοπή
 - 6) Σύνδεση με πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος

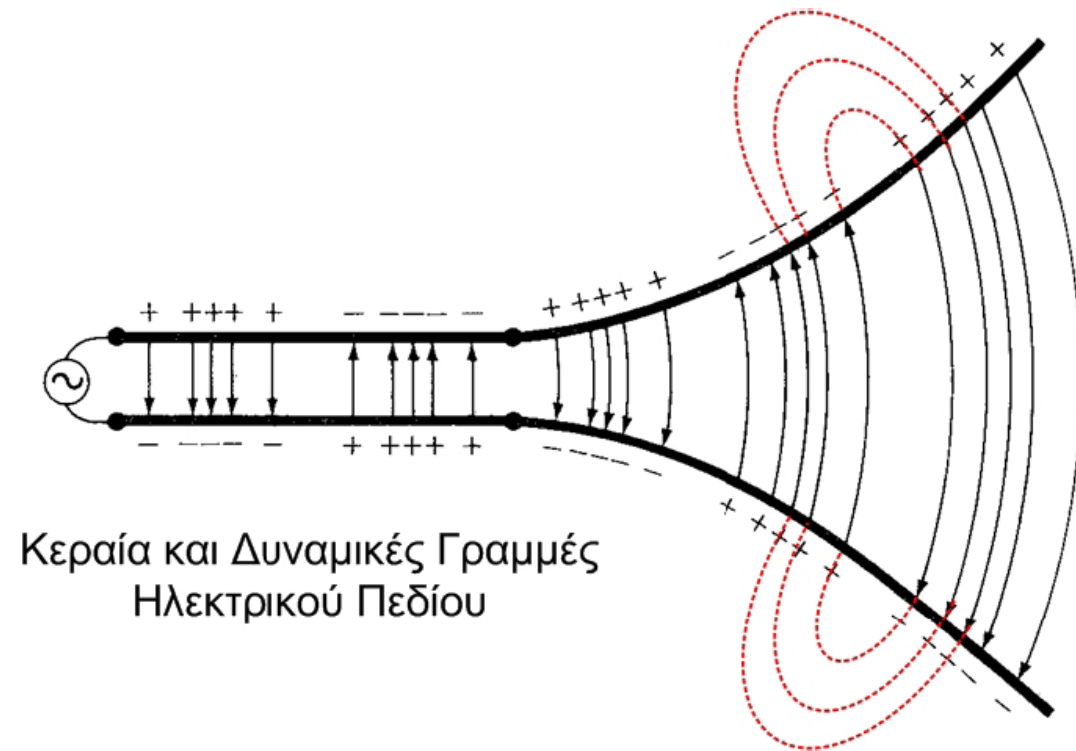


Μηχανισμός Ακτινοβολίας Κεραιών

9

□ Διπλός Αγωγός

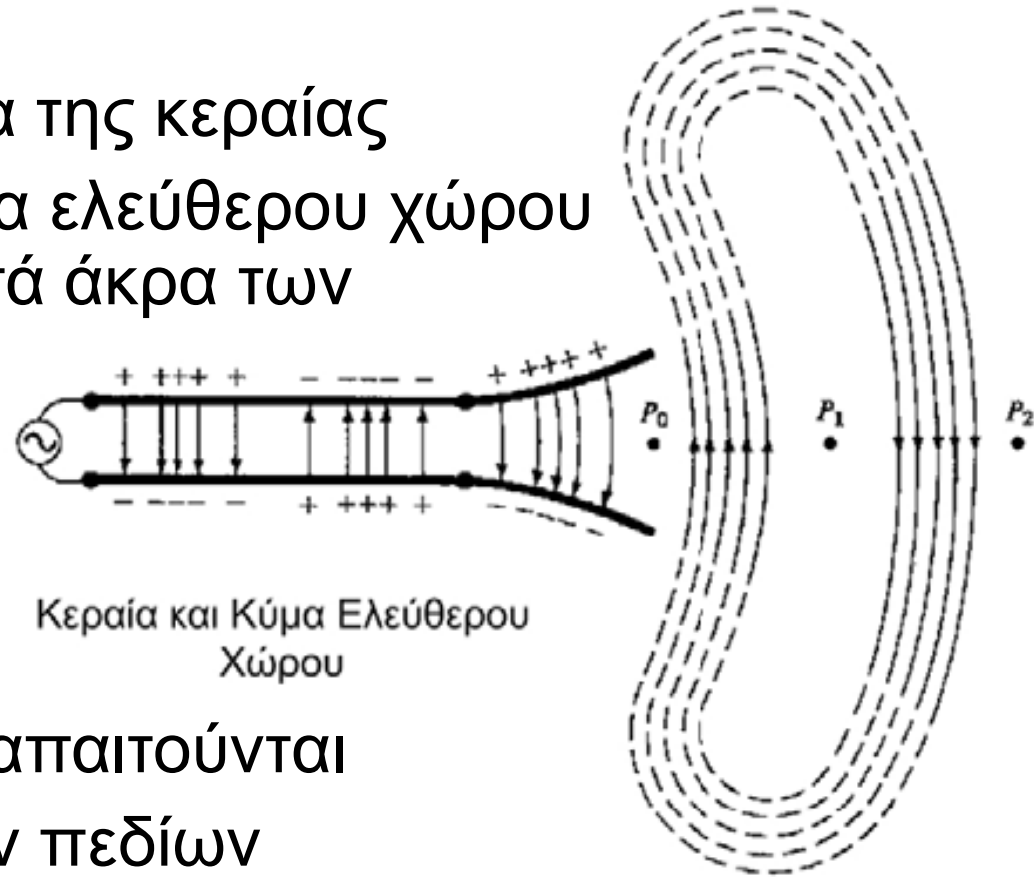
- Πηγή εναλλασσόμενης τάσης, γραμμή μεταφοράς και κεραία



Μηχανισμός Ακτινοβολίας Κεραίων

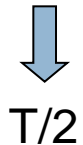
10

- Αφαιρούμε ένα τμήμα της κεραίας σχηματίζοντας κύματα ελεύθερου χώρου συνδέοντας τα ανοικτά άκρα των δυναμικών γραμμών.



- Τα ηλεκτρικά φορτία απαιτούνται για τη δημιουργία των πεδίων αλλά όχι και για τη διατήρησή τους

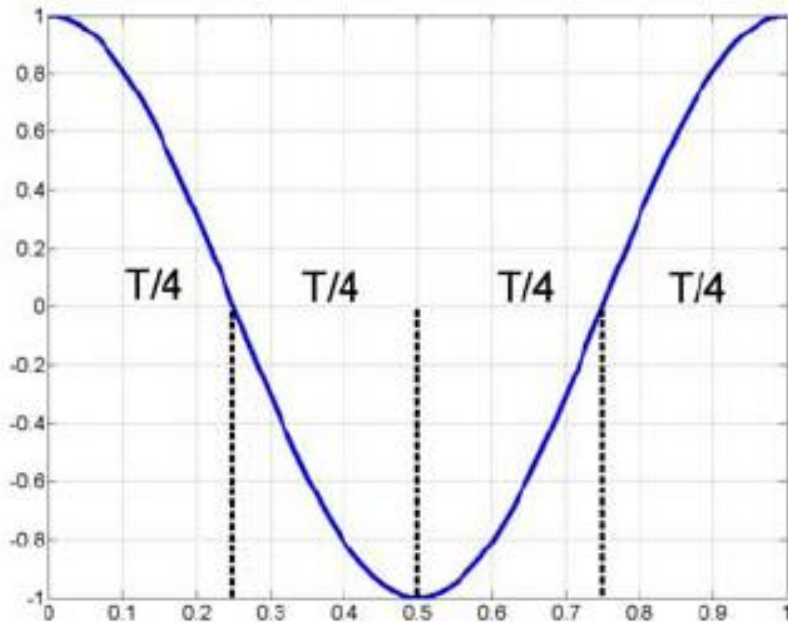
$$P_1 - P_0 = P_2 - P_1 = \lambda/2$$



Μηχανισμός Ακτινοβολίας Κεραιών

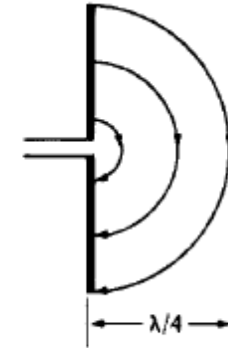
11

- Η πηγή ισοδυναμεί με την εισαγωγή θετικών και αρνητικών φορτίων στο δίπολο

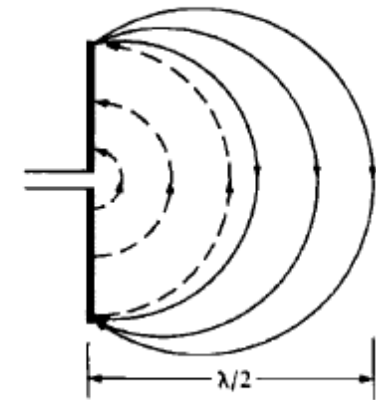


Ασύρματες Επικοινωνίες

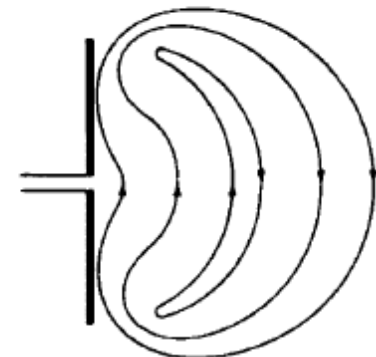
(a) $t = T/4$ ($T = \text{period}$)



(b) $t = T/2$ ($T = \text{period}$)

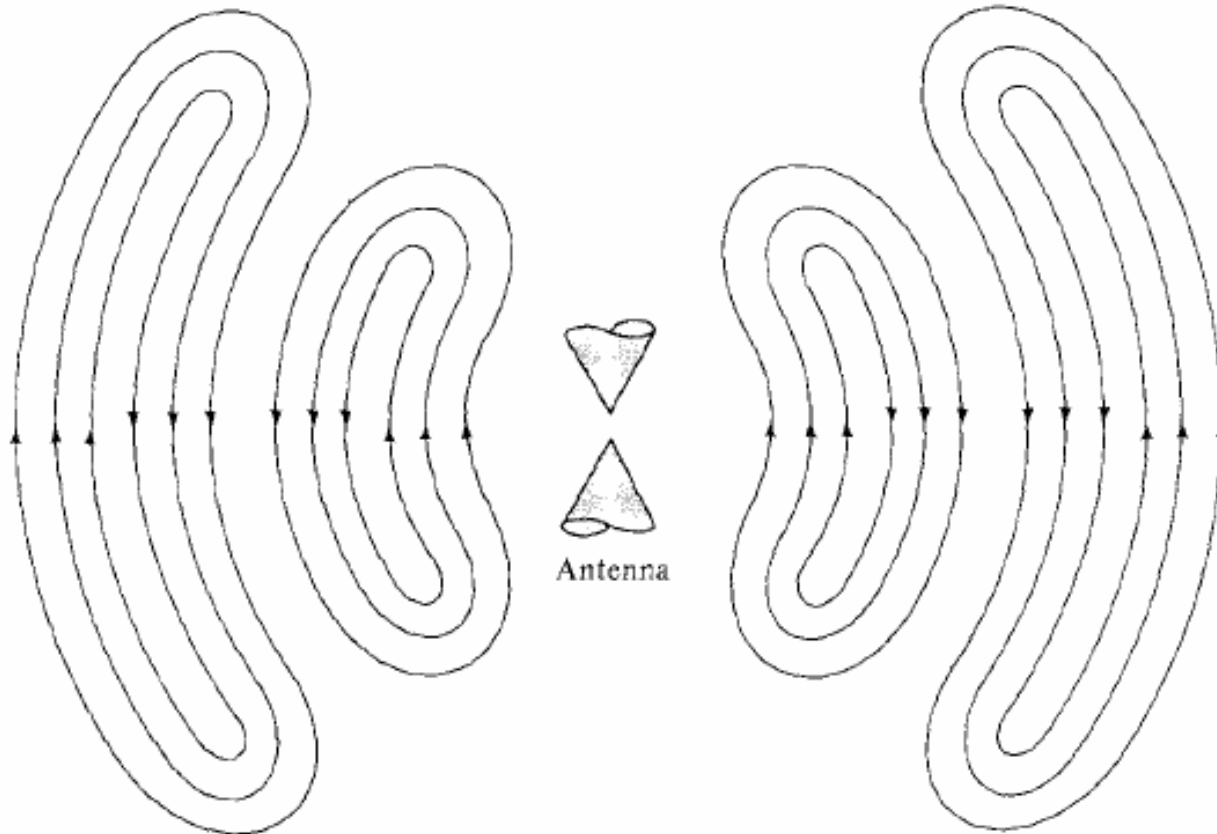


(c) $t = T/2$ ($T = \text{period}$)



Μηχανισμός Ακτινοβολίας Κεραιών

12



Εφόσον δεν υπάρχει συνολικά φορτίο στην κεραία, οι δυναμικές γραμμές αναγκάζονται να αποσπαστούν και να ενωθούν σε κλειστού βρόγχους

Κεραίες

13

- Η κεραία αποτελείται από σύστημα αγωγών κατάλληλου σχήματος, το οποίο τροφοδοτούμενο (διεγυρόμενο) κατάλληλα από ρεύματα υψηλής συχνότητας, δημιουργεί ισχυρά Η/Μ πεδία ή κύματα στον περιβάλλοντα χώρο, τα οποία είναι της ίδιας συχνότητας και μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η μετάδοση της Η/Μ ενέργειας.
- Το Η/Μ πεδίο εξαρτάται από την πυκνότητα ρεύματος που επάγεται στην επιφάνεια της κεραίας.
- Το **σχήμα**, ο **τρόπος διέγερσης**, και η **συχνότητα** προσδιορίζουν τις βασικές ιδιότητες λειτουργίας της κεραίας.

Συναρτήσεις Δυναμικού

14

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathcal{E}} = -\frac{\partial \vec{\mathcal{B}}}{\partial t}$$

$$\vec{\mathcal{B}} = \mu \vec{\mathcal{H}} = \vec{\nabla} \times \vec{\mathcal{A}}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathcal{H}} = \frac{\partial \vec{\mathcal{D}}}{\partial t} + \vec{\mathcal{J}}$$

$$\vec{\nabla} \times \left(\vec{\mathcal{E}} + \frac{\partial \vec{\mathcal{A}}}{\partial t} \right) = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathcal{D}} = \rho$$

$$\text{curl grad } \Phi = \nabla \times (\nabla \Phi) = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathcal{B}} = 0$$

Βαθμωτό Δυναμικό

$$\vec{\mathcal{E}} + \frac{\partial \vec{\mathcal{A}}}{\partial t} = -\nabla \Phi$$

Συναρτήσεις Δυναμικού

15

$$\nabla^2 \Phi + \vec{\nabla} \cdot \frac{\partial \vec{\mathcal{A}}}{\partial t} = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

$$\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathcal{A}}) - \nabla^2 \vec{\mathcal{A}} = \mu \vec{J} - \mu \epsilon \left(\vec{\nabla} \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial^2 \vec{\mathcal{A}}}{\partial t^2} \right)$$

Ζευγάρι συμπλεγμένων διαφορικών εξισώσεων

Συνθήκη Lorentz

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathcal{A}} = -\mu \epsilon \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

Επίλυση με Συνθήκη Lorentz

16

Εξισώσεις Helmholtz ή Κυματικές Εξισώσεις

$$\nabla^2 \Phi - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad \nabla^2 \vec{\mathcal{A}} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{\mathcal{A}}}{\partial t^2} = -\mu \vec{J}$$

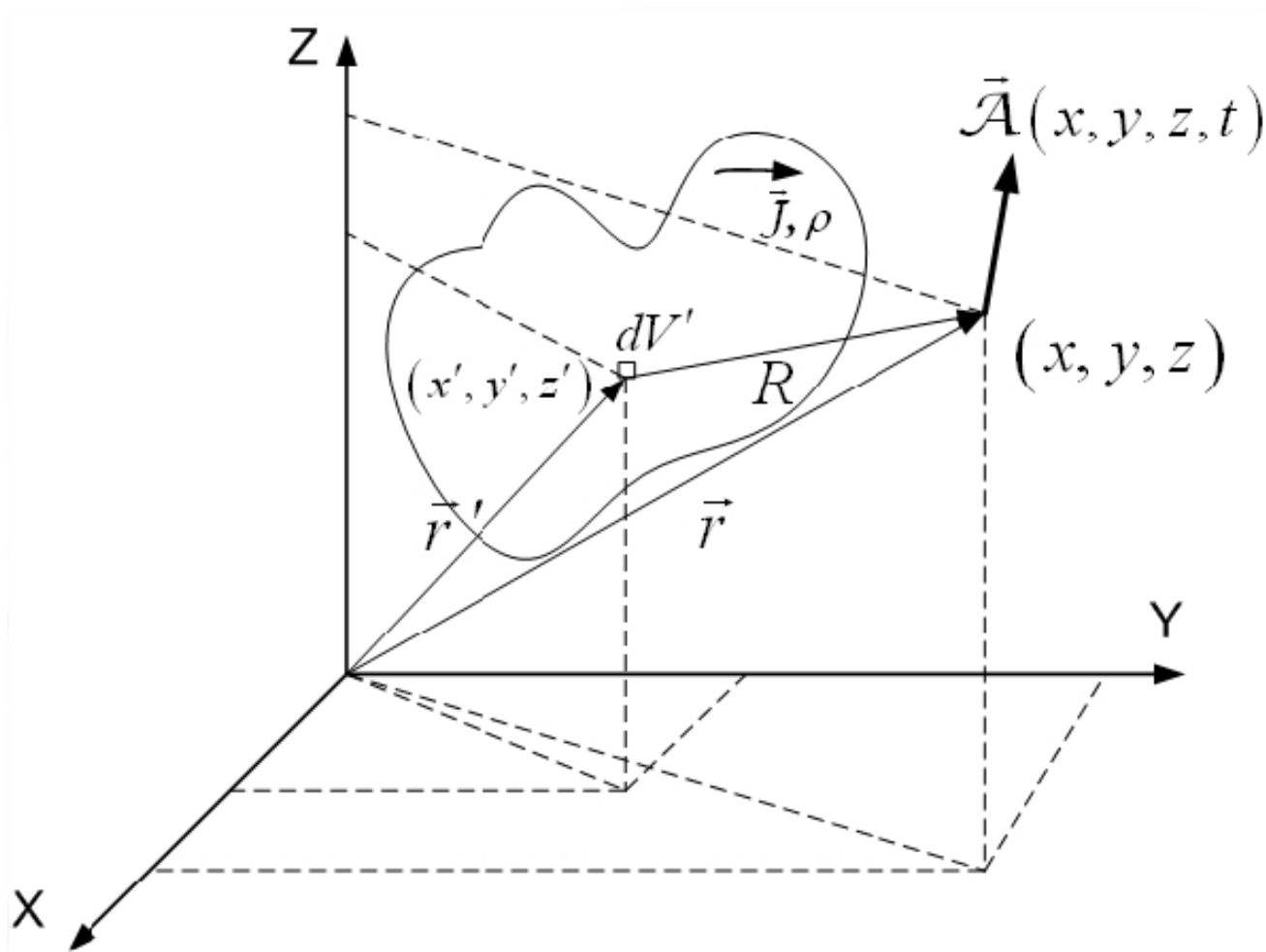
Καθυστερημένα (Retarded) Δυναμικά

Λύσεις: {

$$\vec{\mathcal{A}}(\vec{r}, t) = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{1}{R} \vec{J}\left(\vec{r}', t - \frac{R}{c}\right) dV'$$
$$\Phi(\vec{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_V \frac{1}{R} \rho\left(\vec{r}', t - \frac{R}{c}\right) dV'$$

Θέσεις Υπολογισμού Δυναμικών

17



Ημιτονοειδώς Μεταβαλλόμενα Πεδία

18

$$\begin{aligned} \vec{\mathcal{A}}(\vec{r}, t) &= \text{Re} \left[\vec{A}(\vec{r}) e^{j\omega t} \right] \\ \Phi(\vec{r}, t) &= \text{Re} \left[\Phi(\vec{r}) e^{j\omega t} \right] \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad \begin{aligned} \nabla^2 \vec{A} + k^2 \vec{A} &= -\mu \vec{J} \\ \nabla^2 \Phi + k^2 \Phi &= -\frac{\rho}{\varepsilon} \end{aligned}$$

Φασιθέτες Δυναμικών

$$\text{Λύσεις:} \left\{ \begin{aligned} \vec{A}(\vec{r}) &= \frac{\mu}{4\pi} \int \vec{J}(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} dV' \\ \Phi(\vec{r}) &= \frac{1}{4\pi\varepsilon} \int \rho(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} dV' \end{aligned} \right.$$

$$R = |\vec{r} - \vec{r}'|$$

Ημιτονοειδώς Μεταβαλλόμενα Πεδία

19

- Εναλλακτικά μπορούμε να γράψουμε

$$\vec{A}(\vec{r}) = \mu \int \vec{J}(\vec{r}') \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}'|} dV' = \mu \int \vec{J}(\vec{r}') G(|\vec{r}-\vec{r}'|) dV'$$

$$\Phi(\vec{r}) = \frac{1}{\varepsilon} \int \rho(\vec{r}') \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}'|} dV' = \frac{1}{\varepsilon} \int \rho(\vec{r}') G(|\vec{r}-\vec{r}'|) dV'$$

- Όπου η συνάρτηση Green

$$G(\vec{r}') = \frac{e^{-jk\vec{r}'}}{4\pi\vec{r}'}$$

- Τελικά $\vec{E} = -j\omega\vec{A} - j \frac{\vec{\nabla}(\vec{\nabla}\cdot\vec{A})}{\omega\mu\varepsilon} = -j\omega\vec{A} - j \left(\frac{\omega}{k^2} \right) \vec{\nabla}(\vec{\nabla}\cdot\vec{A})$

$$\vec{E} = -j\omega\vec{A} - \nabla\Phi$$

$$\nabla \cdot \vec{A} = -\mu\varepsilon \frac{\partial\Phi}{\partial t}$$

Ασύρματες Επικοινωνίες

Σημασία Συναρτήσεων Green

20

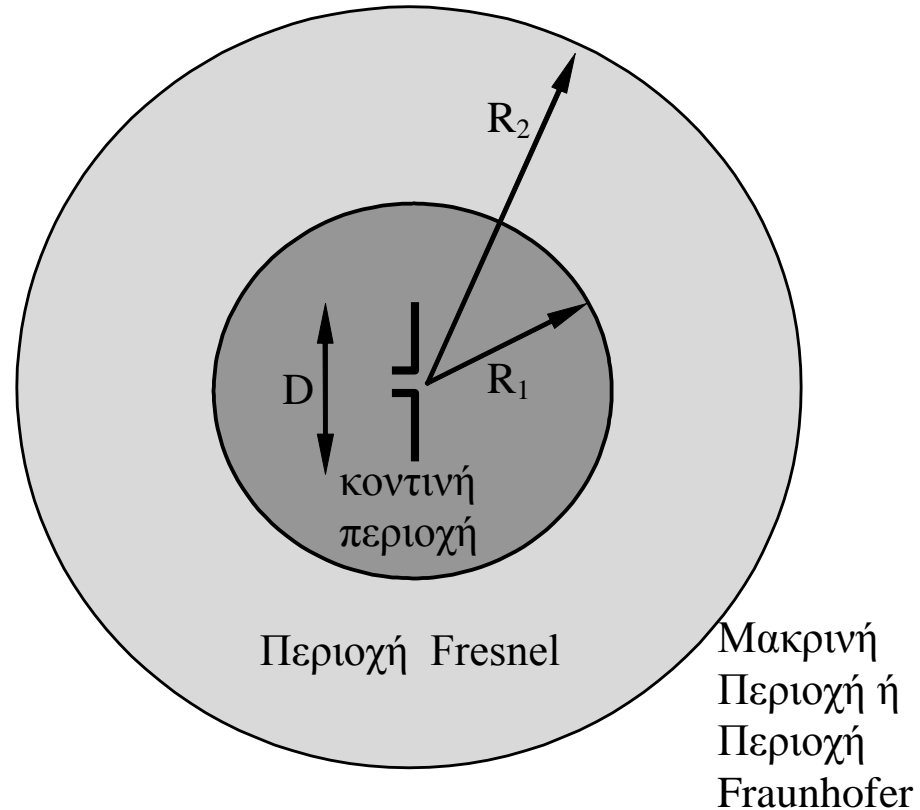
- Η έκφραση των δυναμικών θυμίζει συνέλιξη.
- Η έξοδος ενός συστήματος είναι η συνέλιξη της εισόδου με την κρουστική απόκριση του συστήματος.
- Το ρόλο της κρουστικής απόκρισης εδώ παίζει η συνάρτηση Green.
- Τα δυναμικά υπολογίζονται ως η υπέρθεση των κρουστικών αποκρίσεων που προκύπτουν από τη θεώρηση ότι στοιχειώδεις πηγές συνιστούν το σήμα εισόδου, δηλαδή τη συνολική πηγή.

Περιοχές Ακτινοβολίας Κεραιών

21

$$R_1 = 0.62 \left(\frac{D^3}{\lambda} \right)^{1/2}$$

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



Προσεγγίσεις Μακρινής Περιοχής

22

$$\vec{A}(\vec{r}) = A_r(\vec{r})\hat{r} + A_\theta(\vec{r})\hat{\theta} + A_\varphi(\vec{r})\hat{\phi} \quad \text{ή}$$

$$\vec{A}(r, \theta, \varphi) = A_r(r, \theta, \varphi)\hat{r} + A_\theta(r, \theta, \varphi)\hat{\theta} + A_\varphi(r, \theta, \varphi)\hat{\phi}$$

$$\vec{A}(\vec{r}) \approx \left[A_r(\theta, \varphi)\hat{r} + A_\theta(\theta, \varphi)\hat{\theta} + A_\varphi(\theta, \varphi)\hat{\phi} \right] \frac{e^{-jkr}}{r}$$

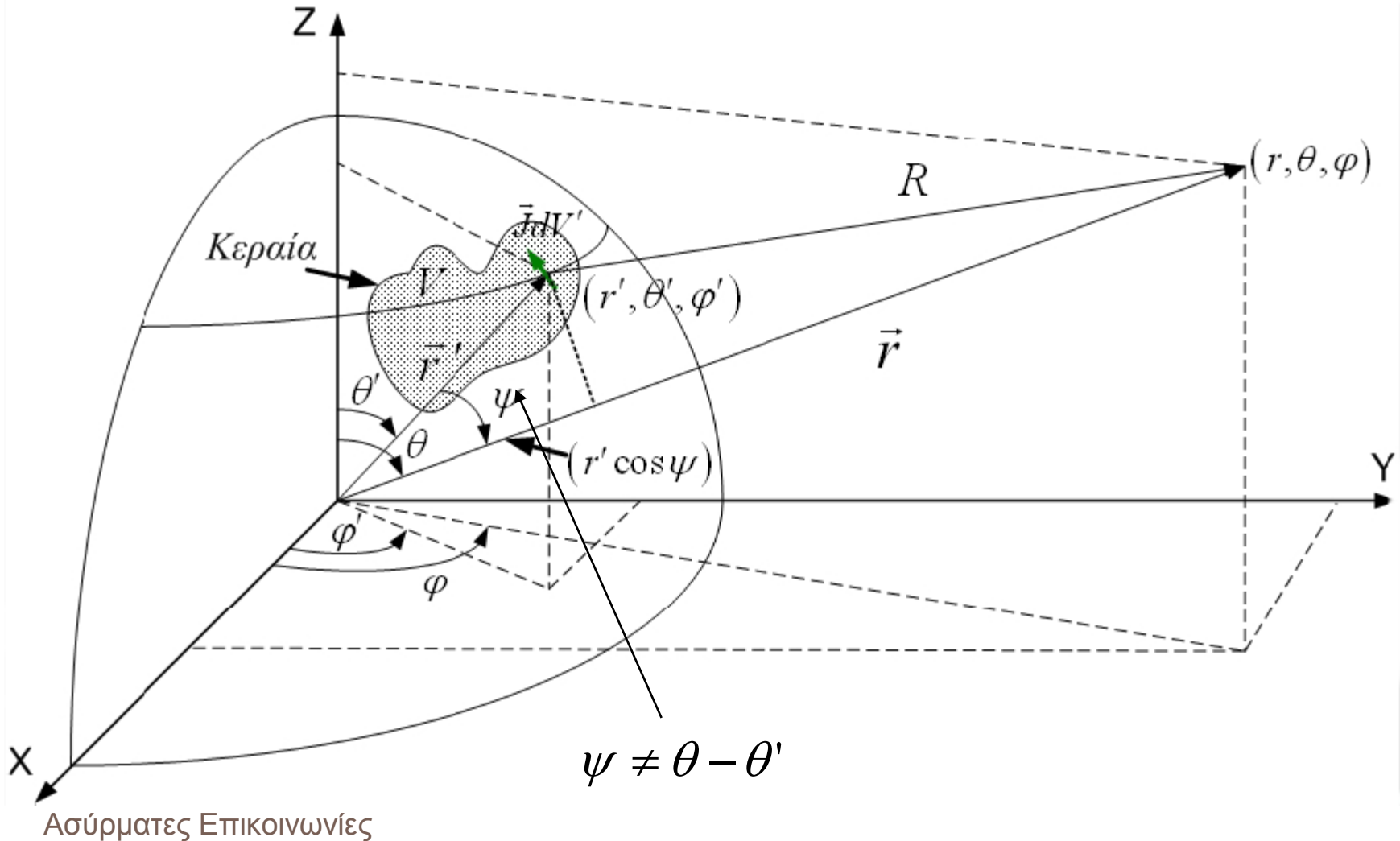
Εγκάρσιο (TEM) Η/Μ Κύμα

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{r} \left\{ -j\omega e^{-jkr} \left[A_\theta(\theta, \varphi)\hat{\theta} + A_\varphi(\theta, \varphi)\hat{\phi} \right] \right\} + \frac{1}{r^2} \{ \dots \} + \dots$$

$$\vec{H}(\vec{r}) = \frac{1}{r} \left\{ j\omega e^{-jkr} \left[-\sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} A_\theta(\theta, \varphi)\hat{\theta} + A_\varphi(\theta, \varphi)\hat{\phi} \right] \right\} + \frac{1}{r^2} \{ \dots \} + \dots$$

Μεθοδολογία Υπολογισμού του Πεδίου Ακτινοβολίας Οποιασδήποτε Κεραίας

23



Μεθοδολογία Υπολογισμού του Πεδίου Ακτινοβολίας Οποιασδήποτε Κεραίας

24

□ Απλοποιήσεις :

- Όσον αφορά στο μέτρο του δυναμικού $R \approx r$ και $\frac{1}{R} \approx \frac{1}{r}$
- Οι διαφορές στην κατεύθυνση των ευθειών που ενώνουν οποιοδήποτε σημείο της κεραίας με το σημείο υπολογισμού είναι αμελητέες
- Όλα τα πεδιακά μεγέθη με εξάρτηση $\left(\frac{1}{r^2}\right)$ ή και ανώτερης τάξης μπορούν να αγνοηθούν.
- Οι διαφορές των R, r λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό των φάσεων με βάση την προσέγγιση:

$$(R \sim r - r' \cos \psi)$$

Μεθοδολογία Υπολογισμού του Πεδίου Ακτινοβολίας Οποιασδήποτε Κεραίας

25

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \int \vec{J}(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} dV'$$

- Χρησιμοποιώντας τις απλοποιήσεις

$$\vec{A}(\vec{r}) = \vec{A}(r, \theta, \varphi) = \frac{\mu}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \int_V \vec{J}(r', \theta', \varphi') e^{jkr' \cos \psi} dV'$$

$$\cos \psi = \hat{r} \cdot \hat{r}' = \cos \theta \cos \theta' + \sin \theta \sin \theta' \cos(\varphi - \varphi')$$

Μεθοδολογία Υπολογισμού του Πεδίου Ακτινοβολίας Οποιασδήποτε Κεραίας

26

- Ορίζουμε το **διάνυσμα ακτινοβολίας** ως εξής

$$\vec{N}(\theta, \varphi) = \int_V \vec{J}(r', \theta', \varphi') e^{jkr' \cos \psi} dV'$$

$$\begin{aligned} \vec{A}(r, \theta, \varphi) &= \frac{\mu}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \vec{N}(\theta, \varphi) \\ &= \frac{\mu}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \left[\hat{r} N_r(\theta, \varphi) + \hat{\theta} N_\theta(\theta, \varphi) + \hat{\phi} N_\phi(\theta, \varphi) \right] \end{aligned}$$

Μεθοδολογία Υπολογισμού του Πεδίου Ακτινοβολίας Οποιασδήποτε Κεραίας

27

$$H_{\theta}(\vec{r}) \approx -\frac{1}{\mu r} \frac{\partial(rA_{\varphi})}{\partial r} = \frac{jk}{4\pi r} e^{-jkr} N_{\varphi}(\theta, \varphi)$$

$$H_{\varphi}(\vec{r}) \approx \frac{1}{\mu r} \frac{\partial(rA_{\theta})}{\partial r} = -\frac{jk}{4\pi r} e^{-jkr} N_{\theta}(\theta, \varphi)$$

$$E_{\theta}(\vec{r}) \approx -\frac{1}{j\omega\epsilon r} \frac{\partial(rH_{\varphi})}{\partial r} = -\frac{jkZ_o}{4\pi r} e^{-jkr} N_{\theta}(\theta, \varphi) = Z_o H_{\varphi}(\vec{r})$$

$$E_{\varphi}(\vec{r}) \approx \frac{1}{j\omega\epsilon r} \frac{\partial(rH_{\theta})}{\partial r} = -\frac{jkZ_o}{4\pi r} e^{-jkr} N_{\varphi}(\theta, \varphi) = -Z_o H_{\theta}(\vec{r})$$

Μεθοδολογία Υπολογισμού του Πεδίου Ακτινοβολίας Οποιασδήποτε Κεραίας

28

Εξάρτηση του πεδίου μόνο από τις εγκάρσιες συνιστώσες

$$\vec{H}(\vec{r}) = -jk \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \left(-\hat{\theta} N_{\varphi}(\theta, \varphi) + \hat{\phi} N_{\theta}(\theta, \varphi) \right)$$

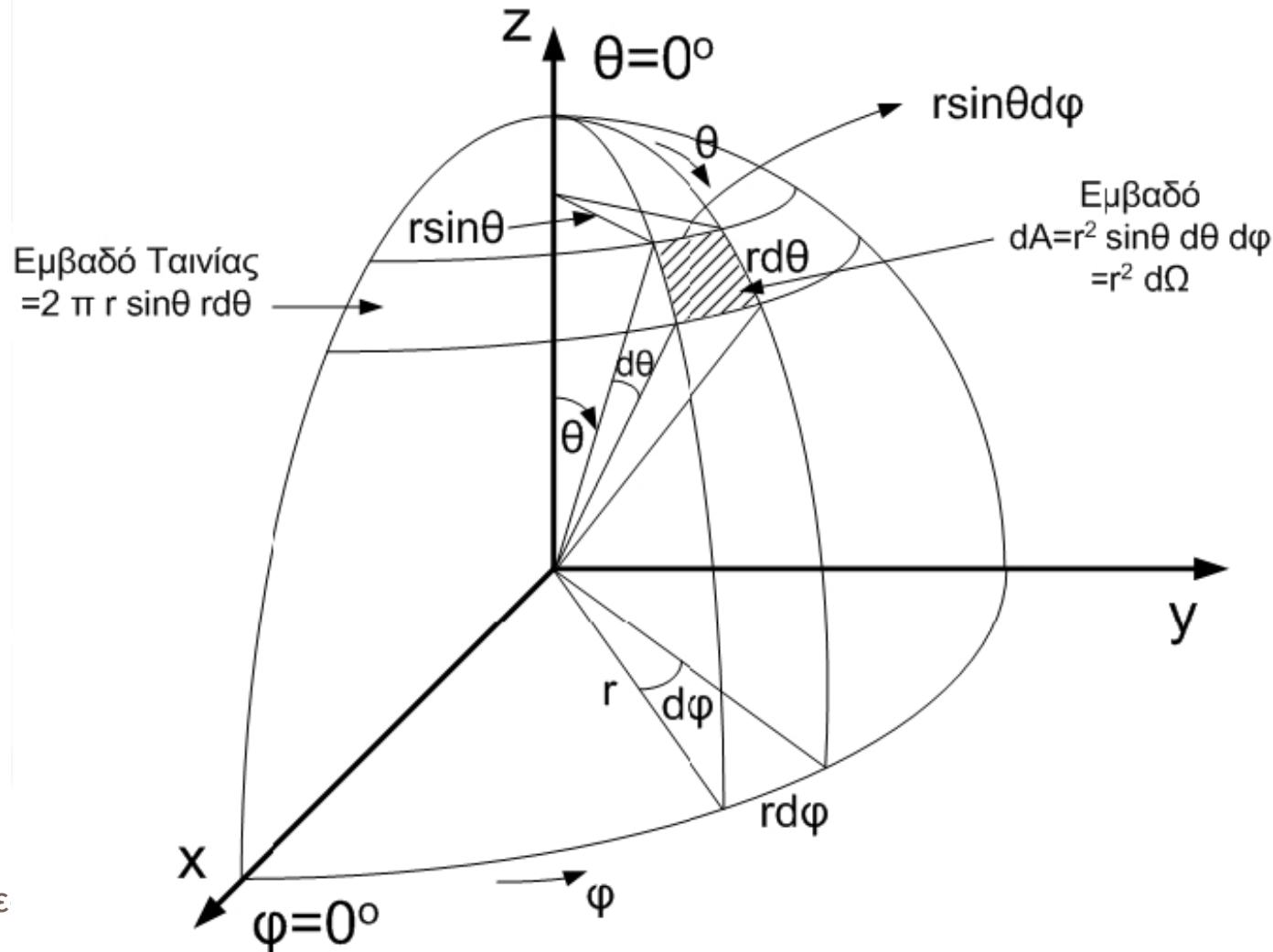
$$\vec{E}(\vec{r}) = -jkZ \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \left(\hat{\theta} N_{\theta}(\theta, \varphi) + \hat{\phi} N_{\varphi}(\theta, \varphi) \right)$$

$$\vec{P}_{av}(\vec{r}) = \frac{1}{2} \text{Re} \left[\vec{E}(\vec{r}) \times \vec{H}^*(\vec{r}) \right] = \frac{Z}{2} \hat{r} |\vec{H}(\vec{r})|^2 = \frac{1}{2Z} \hat{r} |\vec{E}(\vec{r})|^2$$

$$\vec{P}_{av}(\vec{r}) = \hat{r} \frac{1}{2Z} \left[|E_{\theta}(\vec{r})|^2 + |E_{\varphi}(\vec{r})|^2 \right] = \hat{r} \frac{Z}{8\lambda^2 r^2} \left[|N_{\theta}(\theta, \varphi)|^2 + |N_{\varphi}(\theta, \varphi)|^2 \right]$$

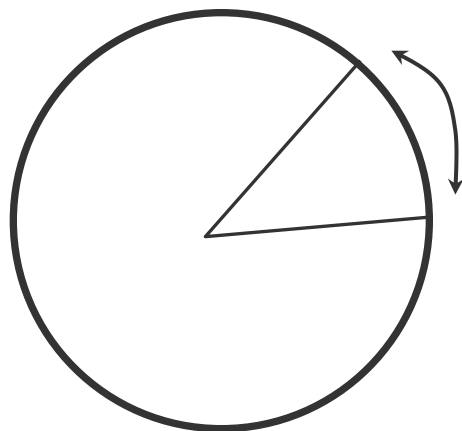
Σφαιρικές Συντεταγμένες & Στερεά Γωνία

29



Στερεά Γωνία Ω

30



θr μήκος τόξου

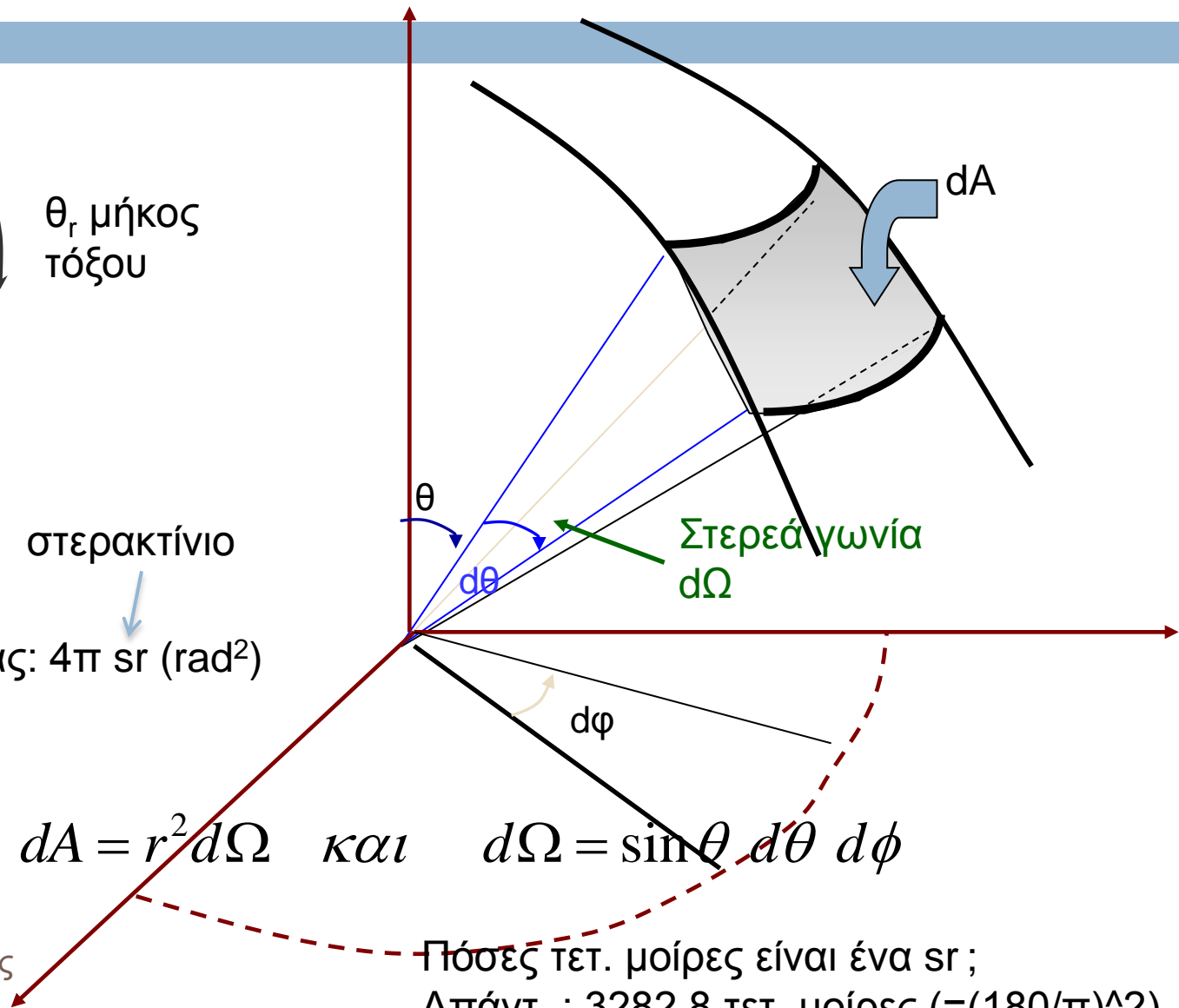
στερακτίσιο

Στερεά γωνία σφαίρας: 4π sr (rad^2)

$$dA = r^2 d\Omega \quad \text{και} \quad d\Omega = \sin\theta \, d\theta \, d\phi$$

Ασύρματες Επικοινωνίες

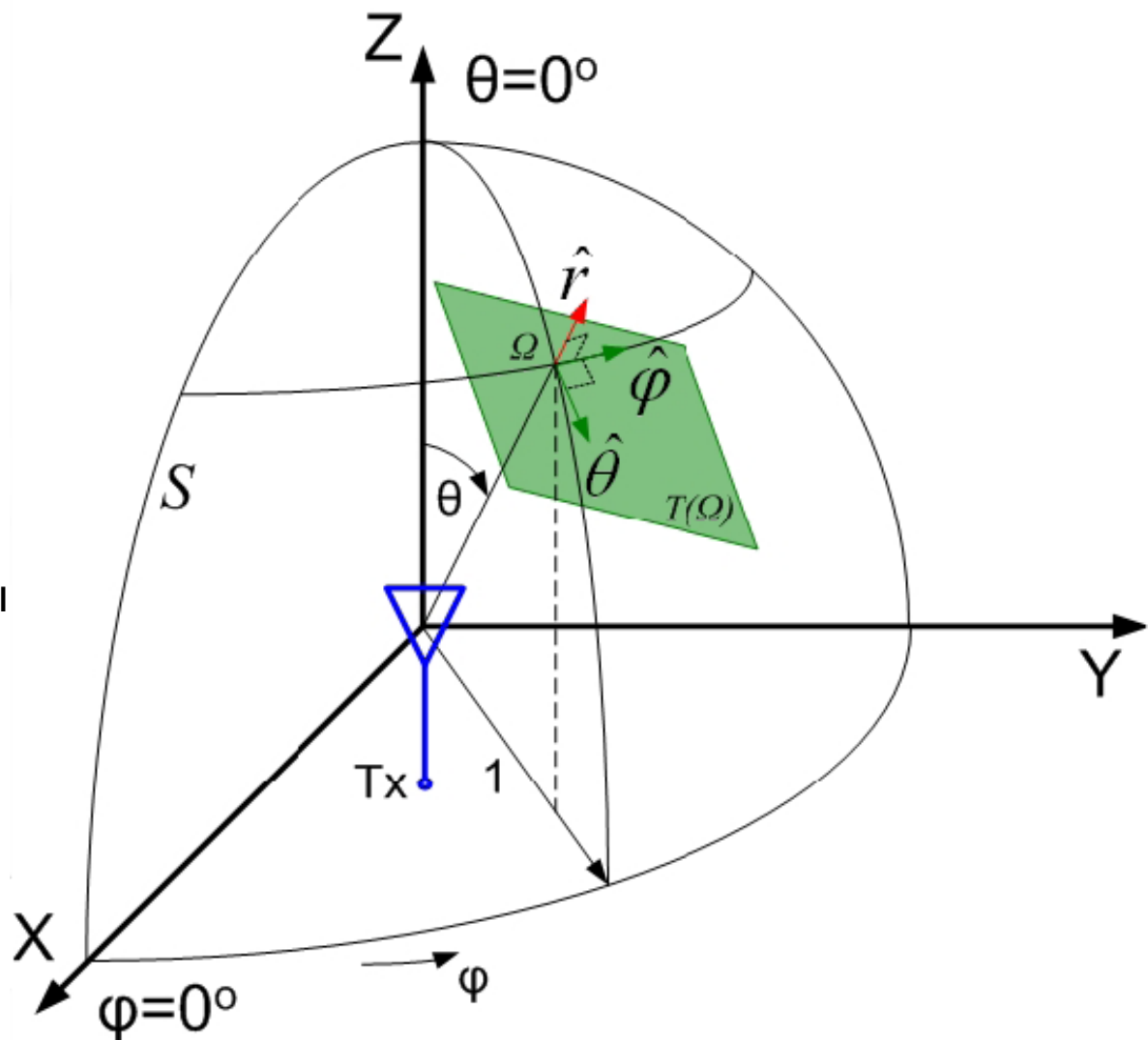
Πόσες τετ. μοίρες είναι ένα sr ;
Απάντ. : 3282,8 τετ. μοίρες ($= (180/\pi)^2$)



Σημειακή Πηγή

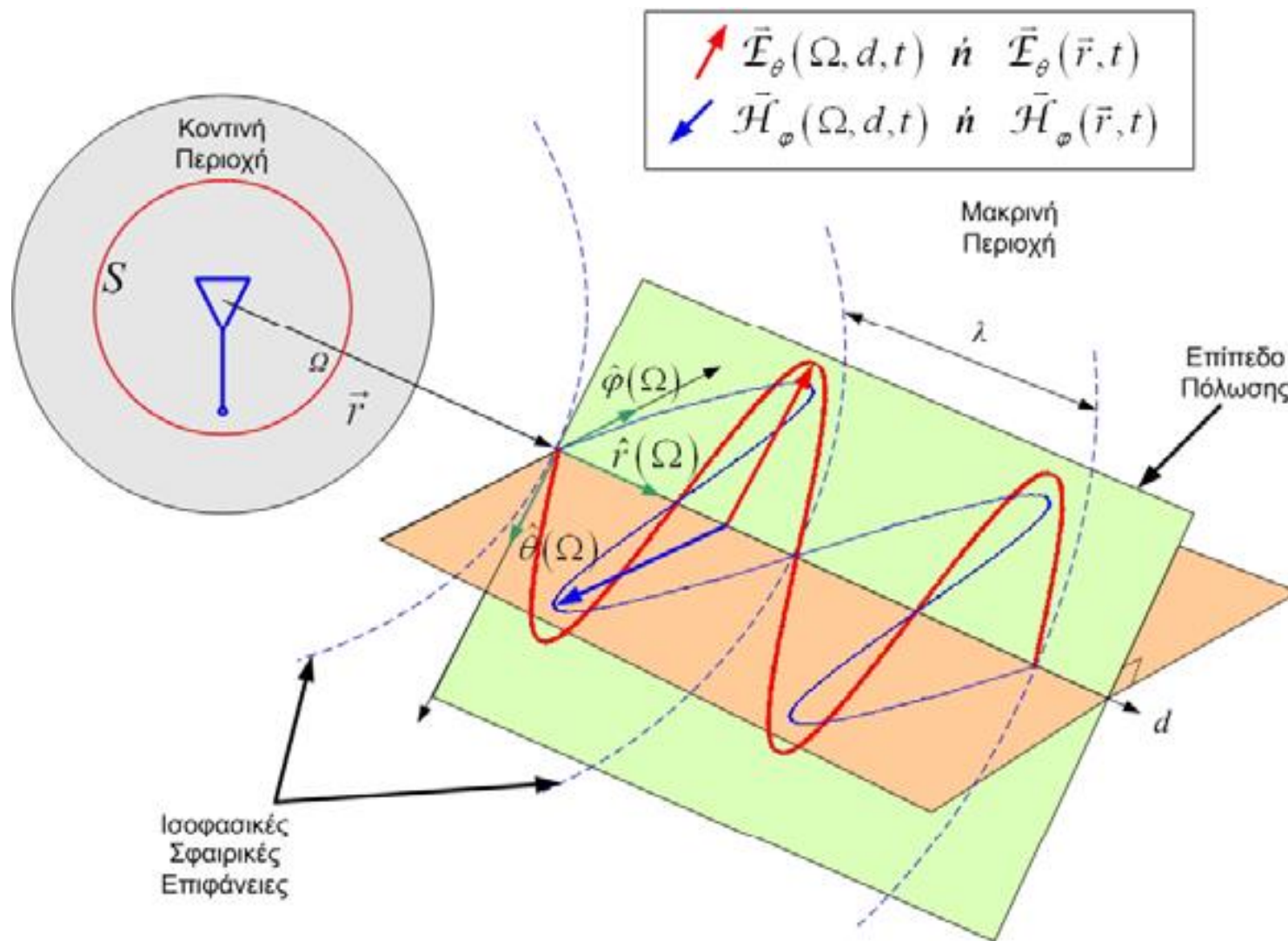
31

- Σημειακή Πηγή:
 - ▣ Το διάνυσμα Poynting στη μακρινή περιοχή είναι εξολοκλήρου ακτινικό
 - ▣ Η κεραία θεωρείται σημειακή πηγή
 - ▣ Τα σφαιρικά κύματα θεωρούνται εγκάρσια H/M κύματα (TEM) και συμφασικά



Κατακόρυφα Πολωμένο Κύμα

32



Κατακόρυφα Πολωμένο Κύμα

33

$$\phi \neq \varphi$$

$$\begin{aligned}\vec{E}(\vec{r}, t) &= \hat{\theta}(\Omega) \mathcal{E}_\theta(\vec{r}, t) = \hat{\theta}(\Omega) \operatorname{Re} \left[E_\theta(\vec{r}) e^{j\omega t} \right] \\ &= \hat{\theta}(\Omega) \operatorname{Re} \left[E_{o\theta}(\vec{r}) e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}} e^{j\omega t} \right] \\ &= \hat{\theta}(\Omega) |E_{o\theta}(\vec{r})| \operatorname{Re} \left[e^{j\phi_\theta(\Omega)} e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}} e^{j\omega t} \right] \\ &= \hat{\theta}(\Omega) |E_{o\theta}(\vec{r})| \cos \left[\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \phi_\theta(\Omega) \right] \\ \vec{H}(\vec{r}, t) &= \hat{\phi}(\Omega) \mathcal{H}_\phi(\vec{r}, t) = \hat{\phi}(\Omega) |H_{o\phi}(\vec{r})| \cos \left[\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \phi_\theta(\Omega) \right]\end{aligned}$$

$$\vec{P}_{av}(\vec{r}) = \frac{Z_o}{2} \hat{r} |\vec{H}(\vec{r})|^2 = \frac{1}{2Z_o} \hat{r} |\vec{E}(\vec{r})|^2$$

Κατακόρυφα Πολωμένο Κύμα

34

$$\begin{aligned}\vec{E}(\vec{r}) &= \hat{\theta}(\Omega) E_{o\theta}(\vec{r}) e^{-j\vec{k}\cdot\vec{r}} = \hat{\theta}(\Omega) |E_{o\theta}(\vec{r})| e^{j\phi_{\theta}(\Omega)} e^{-j\vec{k}\cdot\vec{r}} \\ &= \hat{\theta}(\Omega) \frac{-jkZ_o}{4\pi r} N_{\theta}(\Omega) e^{-j\vec{k}\cdot\vec{r}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vec{H}(\vec{r}) &= \hat{\phi}(\Omega) H_{o\phi}(\vec{r}) e^{-j\vec{k}\cdot\vec{r}} = \hat{\phi}(\Omega) |H_{o\phi}(\vec{r})| e^{j\phi_{\theta}(\Omega)} e^{-j\vec{k}\cdot\vec{r}} \\ &= \hat{\phi}(\Omega) \frac{-jk}{4\pi r} N_{\theta}(\Omega) e^{-j\vec{k}\cdot\vec{r}}\end{aligned}$$

Κατακόρυφα Πολωμένο Κύμα

35

$$\begin{aligned}W_{rad} &= \oint_{S_d} \vec{P}_{av}(\theta, \varphi, d) \cdot d\vec{S}_d = \oint_S \frac{1}{2Z_o} |\vec{E}(\theta, \varphi, d)|^2 \hat{r} \cdot \hat{r} d^2 d\Omega \\&= \frac{d^2}{2Z_o} \oint_S |\vec{E}(\theta, \varphi, d)|^2 d\Omega = \frac{d^2}{2Z_o} \oint_S \frac{Z_o^2 k^2}{16\pi^2 d^2} |\vec{N}(\theta, \varphi)|^2 d\Omega \\&= \frac{Z_o k^2}{32\pi^2} \oint_S |\vec{N}(\theta, \varphi)|^2 d\Omega = \frac{15\pi}{\lambda^2} \oint_S |\vec{N}(\theta, \varphi)|^2 d\Omega\end{aligned}$$

Κατακόρυφα Πολωμένο Κύμα

36

- Για Ισοτροπικές Πηγές → ανεξάρτητο από τα φ , θ

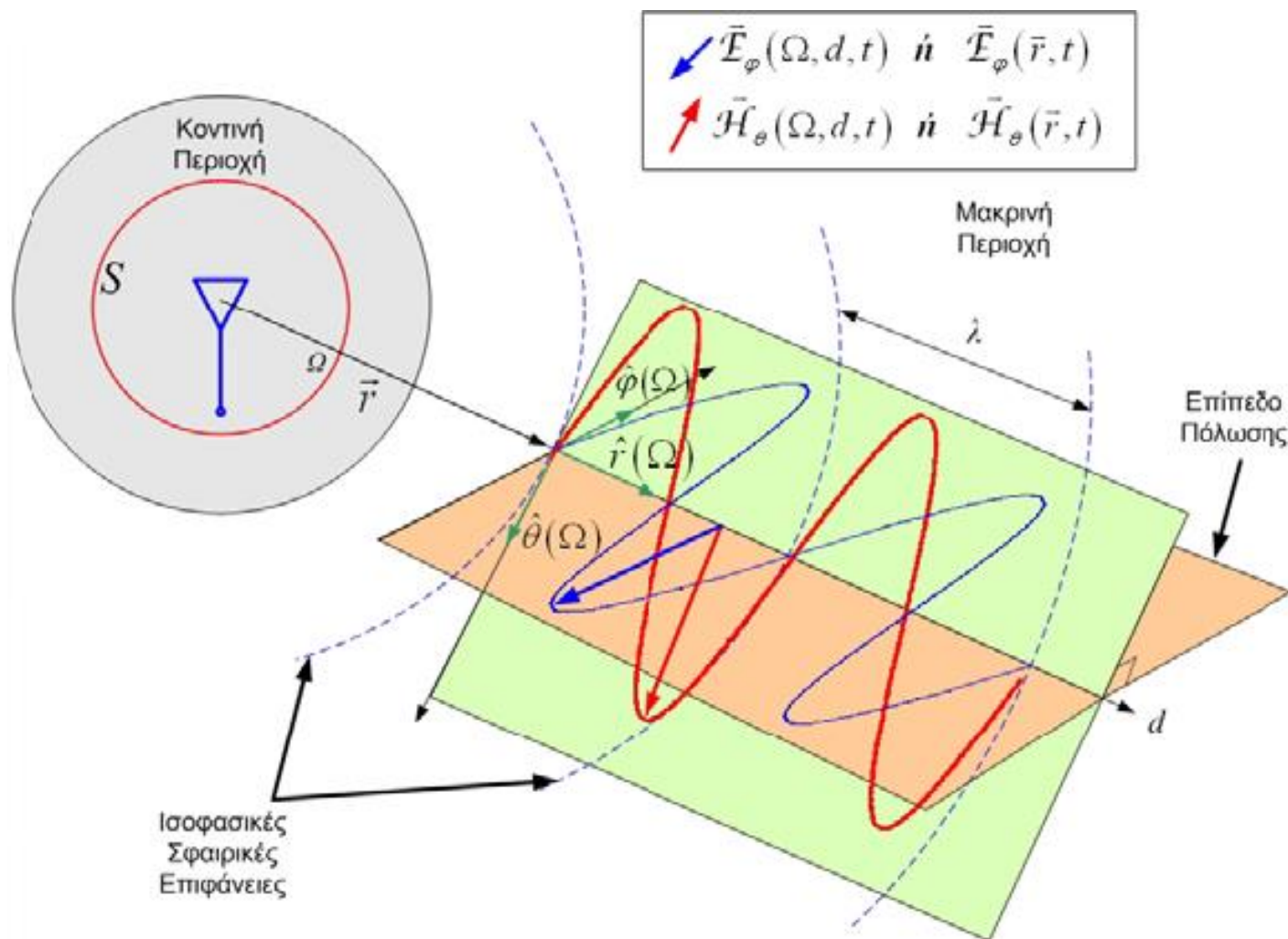
$$\begin{aligned}W_{rad} &= \oint_{S_d} \vec{P}_{av}(d) \cdot d\vec{S}_d = \oint_S \frac{1}{2Z_o} |\vec{E}(d)|^2 \hat{r} \cdot \hat{r} d^2 d\Omega \\&= \frac{1}{2Z_o} |\vec{E}(d)|^2 d^2 \oint_S d\Omega = \frac{1}{2Z_o} |\vec{E}(d)|^2 d^2 4\pi \\&= \frac{2\pi d^2}{Z_o} |E_{o\theta}(d)|^2\end{aligned}$$

$$|E_{o\theta}(d)| = \sqrt{\frac{Z_o W_{rad}}{2\pi}} \frac{1}{d} \approx \sqrt{60W_{rad}} \frac{1}{d}$$

$$|H_{o\varphi}(d)| = \frac{\sqrt{60W_{rad}}}{Z_o} \frac{1}{d}$$

Οριζόντια Πολωμένο Κύμα

37



Οριζόντια Πολωμένο Κύμα

38

$$\begin{aligned}\vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t) &= \hat{\phi}(\Omega) \mathcal{E}_{\phi}(\vec{r}, t) = \hat{\phi}(\Omega) \operatorname{Re}\left[E_{\phi}(\vec{r}) e^{j\omega t} \right] \\ &= \hat{\phi}(\Omega) \operatorname{Re}\left[E_{\phi}(\vec{r}) e^{-j\vec{k}\cdot\vec{r}} e^{j\omega t} \right] \\ &= \hat{\phi}(\Omega) |E_{\phi}(\vec{r})| \operatorname{Re}\left[e^{j\phi_{\phi}(\Omega)} e^{-j\vec{k}\cdot\vec{r}} e^{j\omega t} \right] \\ &= \hat{\phi}(\Omega) |E_{\phi}(\vec{r})| \cos\left[\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r} + \phi_{\phi}(\Omega) \right] \\ \vec{\mathcal{H}}(\vec{r}, t) &= \hat{\theta}(\Omega) \mathcal{H}_{\theta}(\vec{r}, t) = \hat{\theta}(\Omega) |H_{\theta}(\vec{r})| \cos\left[\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r} + \phi_{\phi}(\Omega) \right]\end{aligned}$$

Για ισοτροπικές πηγές γράφουμε

$$\begin{aligned}\vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t) &= \hat{\phi}(\Omega) |E_{\phi}(\vec{r})| \cos(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r} + \phi_{\phi}) = \hat{\phi}(\Omega) \frac{\sqrt{60W_{\text{rad}}}}{d} \cos[\omega t - kd + \phi_{\phi}] \\ \vec{\mathcal{H}}(\vec{r}, t) &= \hat{\theta}(\Omega) |H_{\theta}(\vec{r})| \cos(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r} + \phi_{\phi}) = -\hat{\theta}(\Omega) \frac{\sqrt{60W_{\text{rad}}}}{Z_0 d} \cos[\omega t - kd + \phi_{\phi}]\end{aligned}$$

Ασύρμα...

Ελλειπτική Πόλωση

39

Ελλειπτική
Πόλωση

$$\vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t) = \vec{\mathcal{E}}_{\varphi}(\vec{r}, t) + \vec{\mathcal{E}}_{\theta}(\vec{r}, t)$$

Υπέρθωση

$$\vec{\mathcal{E}}_{\varphi}(\vec{r}, t) = \vec{\mathcal{E}}_{\varphi}(\Omega, d, t) = \hat{\varphi}(\Omega) \mathcal{E}_{\varphi}(\Omega, d, t) = \hat{\varphi}(\Omega) \operatorname{Re} \left[|E_{o\varphi}(\vec{r})| e^{j\phi_{\varphi}(\Omega)} e^{-jkd} e^{j\omega t} \right]$$

$$\vec{\mathcal{E}}_{\theta}(\vec{r}, t) = \vec{\mathcal{E}}_{\theta}(\Omega, d, t) = \hat{\theta}(\Omega) \mathcal{E}_{\theta}(\Omega, d, t) = \hat{\theta}(\Omega) \operatorname{Re} \left[|E_{o\theta}(\vec{r})| e^{j\phi_{\theta}(\Omega)} e^{-jkd} e^{j\omega t} \right]$$

$$E_{o\theta}(\vec{r}) = E_{o\theta}(\theta, \varphi, d) = \frac{-jkZ}{4\pi d} N_{\theta}(\theta, \varphi)$$

$$E_{o\varphi}(\vec{r}) = E_{o\varphi}(\theta, \varphi, d) = \frac{-jkZ}{4\pi d} N_{\varphi}(\theta, \varphi)$$

Ελλειπτική Πόλωση

40

$$\begin{aligned}\vec{E}(\vec{r}) &= \vec{E}(\Omega, d) = \begin{bmatrix} \hat{\theta}(\Omega) & \hat{\phi}(\Omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\theta\theta}(\vec{r}) e^{-jkd} \\ E_{\theta\phi}(\vec{r}) e^{-jkd} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \hat{\theta}(\Omega) & \hat{\phi}(\Omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |E_{\theta\theta}(\vec{r})| e^{j\phi_\theta(\Omega)} e^{-jkd} \\ |E_{\theta\phi}(\vec{r})| e^{j\phi_\phi(\Omega)} e^{-jkd} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \hat{\theta}(\Omega) & \hat{\phi}(\Omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_\theta(\theta, \varphi) \\ N_\phi(\theta, \varphi) \end{bmatrix} \frac{-jkZ}{4\pi d} e^{-jkd}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}W_{rad} &= \oint_{S_d} \vec{P}_{av}(\theta, \varphi, d) \cdot d\vec{S}_d \\ &= \frac{d^2}{2Z} \oint_s |\vec{E}(\theta, \varphi, d)|^2 d\Omega = \frac{d^2}{2Z} \oint_s \left(|E_\theta(\theta, \varphi, d)|^2 + |E_\phi(\theta, \varphi, d)|^2 \right) d\Omega \\ &= \frac{15\pi}{\lambda^2} \oint_s |\vec{N}(\theta, \varphi)|^2 d\Omega = \frac{15\pi}{\lambda^2} \oint_s \left(|N_\theta(\theta, \varphi)|^2 + |N_\phi(\theta, \varphi)|^2 \right) d\Omega\end{aligned}$$

Ελλειπτική Πόλωση

41

$$f_{\theta}(\theta, \varphi) = \frac{-jkZ}{4\pi} N_{\theta}(\theta, \varphi)$$

$$f_{\varphi}(\theta, \varphi) = \frac{-jkZ}{4\pi} N_{\varphi}(\theta, \varphi)$$

$$E_{\theta}(\vec{r}) = \frac{-jkZ}{4\pi d} N_{\theta}(\theta, \varphi) = \frac{f_{\theta}(\theta, \varphi)}{d}$$

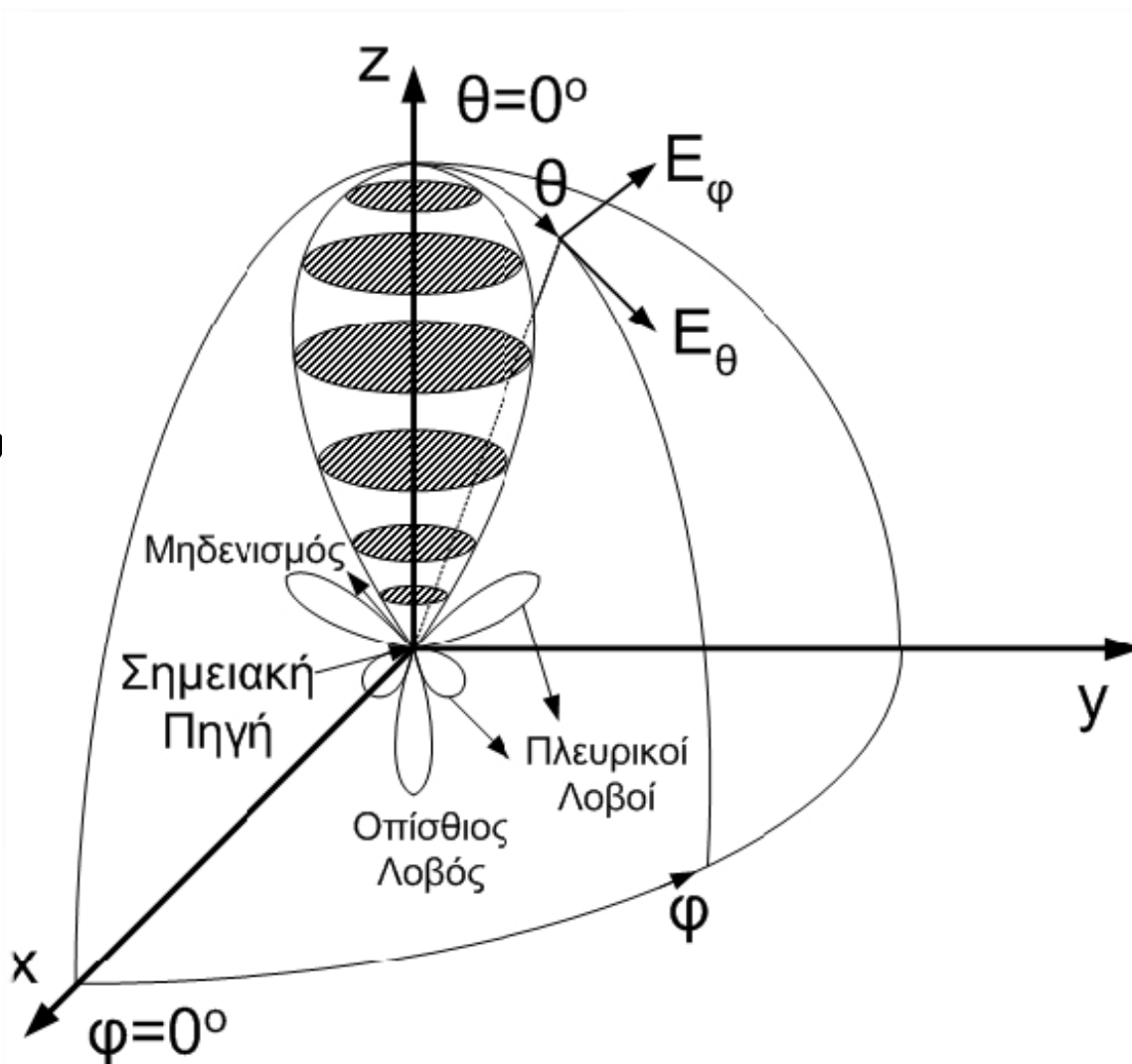
$$E_{\varphi}(\vec{r}) = \frac{-jkZ}{4\pi d} N_{\varphi}(\theta, \varphi) = \frac{f_{\varphi}(\theta, \varphi)}{d}$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}(\Omega, d) = \begin{bmatrix} \hat{\theta}(\Omega) & \hat{\varphi}(\Omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{\theta}(\theta, \varphi) \\ f_{\varphi}(\theta, \varphi) \end{bmatrix} \frac{e^{-jkd}}{d}$$

Διάγραμμα Πεδίου Κεραίας

42

- Διάγραμμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου της κεραίας συναρτήσει των συντεταγμένων θ , φ

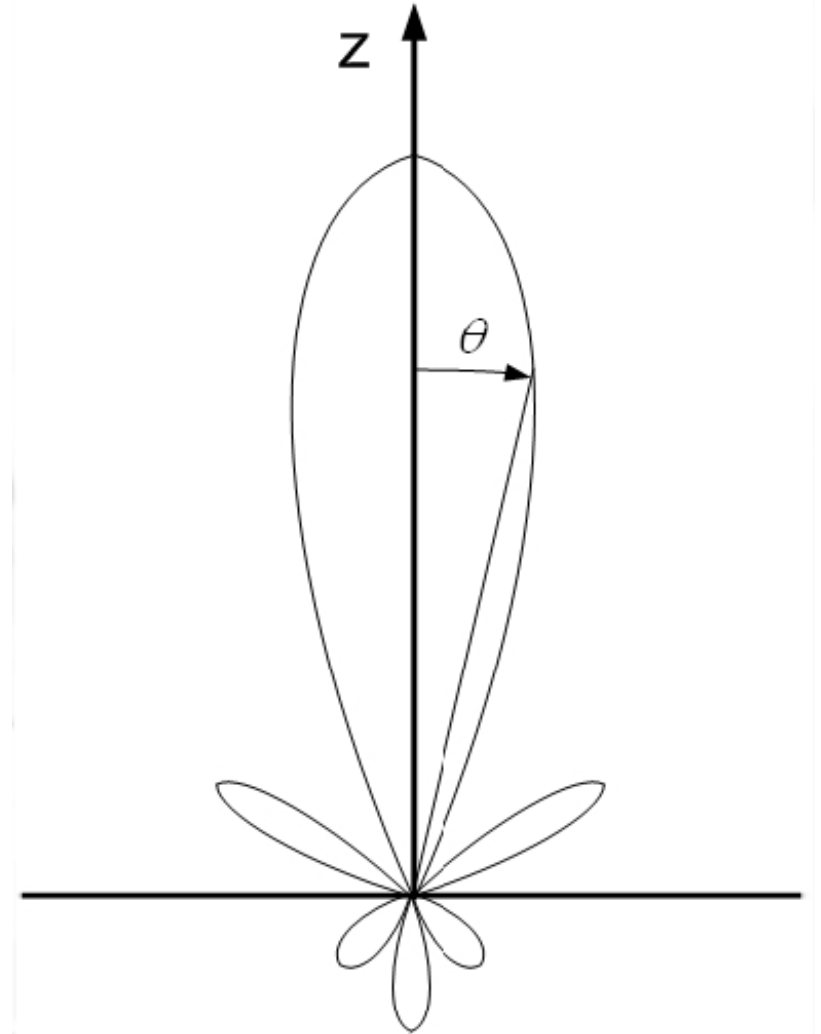


Διάγραμμα Πεδίου Κεραίας

43

$$\vec{f}(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} f_{\theta}(\theta, \varphi) \\ f_{\varphi}(\theta, \varphi) \end{bmatrix}$$

$$\vec{N}(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} N_{\theta}(\theta, \varphi) \\ N_{\varphi}(\theta, \varphi) \end{bmatrix}$$



Κανονικοποιημένο Διάγραμμα Πεδίου

44

$$\vec{f}_n(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} f_{\theta n}(\theta, \varphi) \\ f_{\varphi n}(\theta, \varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f_{\theta}(\theta, \varphi)}{f_{\theta}(\theta, \varphi)|_{\max}} \\ \frac{f_{\varphi}(\theta, \varphi)}{f_{\varphi}(\theta, \varphi)|_{\max}} \end{bmatrix}$$

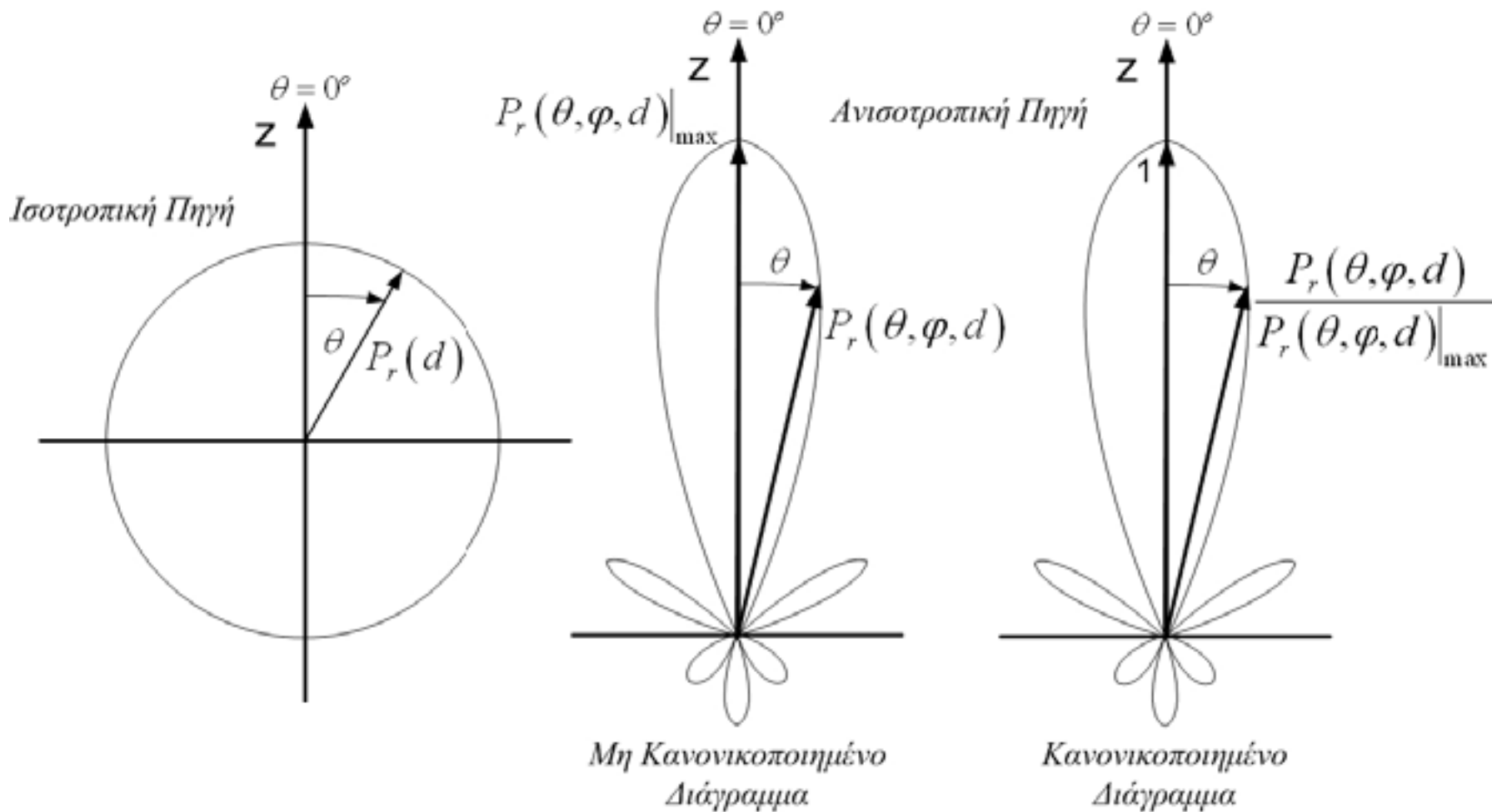
$$f_{\theta}(\theta, \varphi)|_{\max} = \max_{\theta, \varphi} \{f_{\theta}(\theta, \varphi)\}$$

$$f_{\varphi}(\theta, \varphi)|_{\max} = \max_{\theta, \varphi} \{f_{\varphi}(\theta, \varphi)\}$$

$$|f_{\theta n}(\theta, \varphi)|_{\max} = |f_{\varphi n}(\theta, \varphi)|_{\max} = 1$$

Διαγράμματα Ισχύος Κεραίας

45



Διαγράμματα Ισχύος Κεραίας

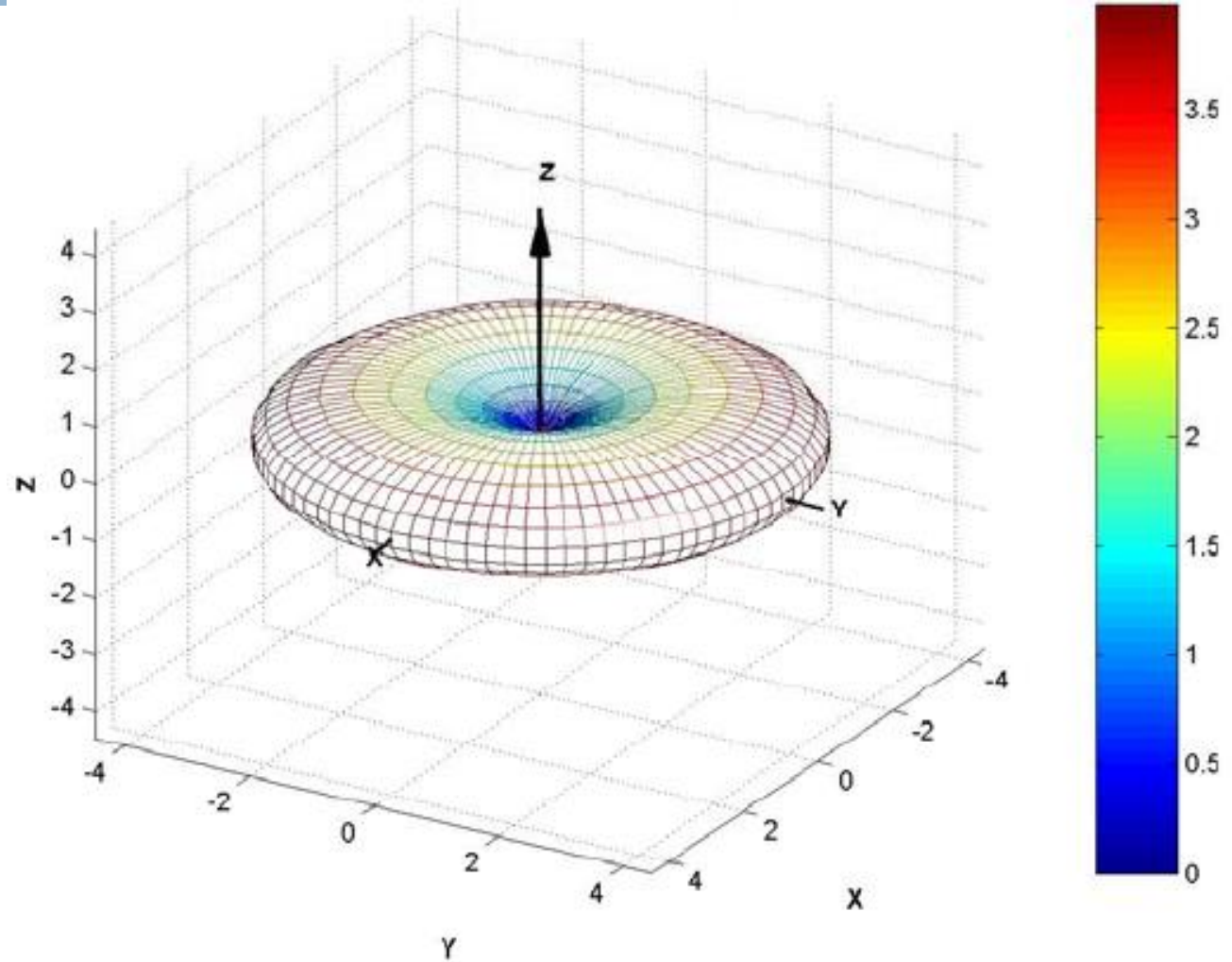
$$F_n(\theta, \varphi) = F_n(\Omega) = \frac{P_r(\theta, \varphi, d)}{P_r(\theta, \varphi, d)|_{\max}} = \frac{P_r(\Omega, d)}{P_r(\Omega, d)|_{\max}}$$

- Είναι προφανές ότι το κανονικοποιημένο διάγραμμα είναι ανεξάρτητο της απόστασης γιατί αριθμητής και παρονομαστής έχουν την ίδια εξάρτηση από την απόσταση.

$$\begin{aligned} P_r(\vec{r}) &= \frac{|\vec{E}(\vec{r})|^2}{2Z_o} = \frac{|E_\theta(\vec{r})|^2 + |E_\varphi(\vec{r})|^2}{2Z_o} \\ &= \frac{Z_o}{8\lambda^2 r^2} \left[|N_\theta(\theta, \varphi)|^2 + |N_\varphi(\theta, \varphi)|^2 \right] \end{aligned}$$

Ομοιοκατευθυντική Πηγή

47



Ακτινοβολούμενη Ισχύς

48

$$W_{rad} = \oint_S \vec{P}_{av}(\vec{r}) \cdot d\vec{S}$$

$$W_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} P_r(\theta, \varphi, d) d^2 \sin(\theta) d\theta d\varphi$$

$$\begin{aligned} W_{rad} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} P_r(\theta, \varphi, d) d^2 \sin(\theta) d\theta d\varphi = \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{|E_{\theta}(\theta, \varphi, d)|^2 + |E_{\varphi}(\theta, \varphi, d)|^2}{2Z_o} d^2 \sin(\theta) d\theta d\varphi \\ &= \frac{d^2}{2Z_o} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \left[|E_{\theta}(\theta, \varphi, d)|^2 + |E_{\varphi}(\theta, \varphi, d)|^2 \right] \sin(\theta) d\theta d\varphi \end{aligned}$$

Ακτινοβολούμενη Ισχύς

49

- Για ισοτροπική πηγή

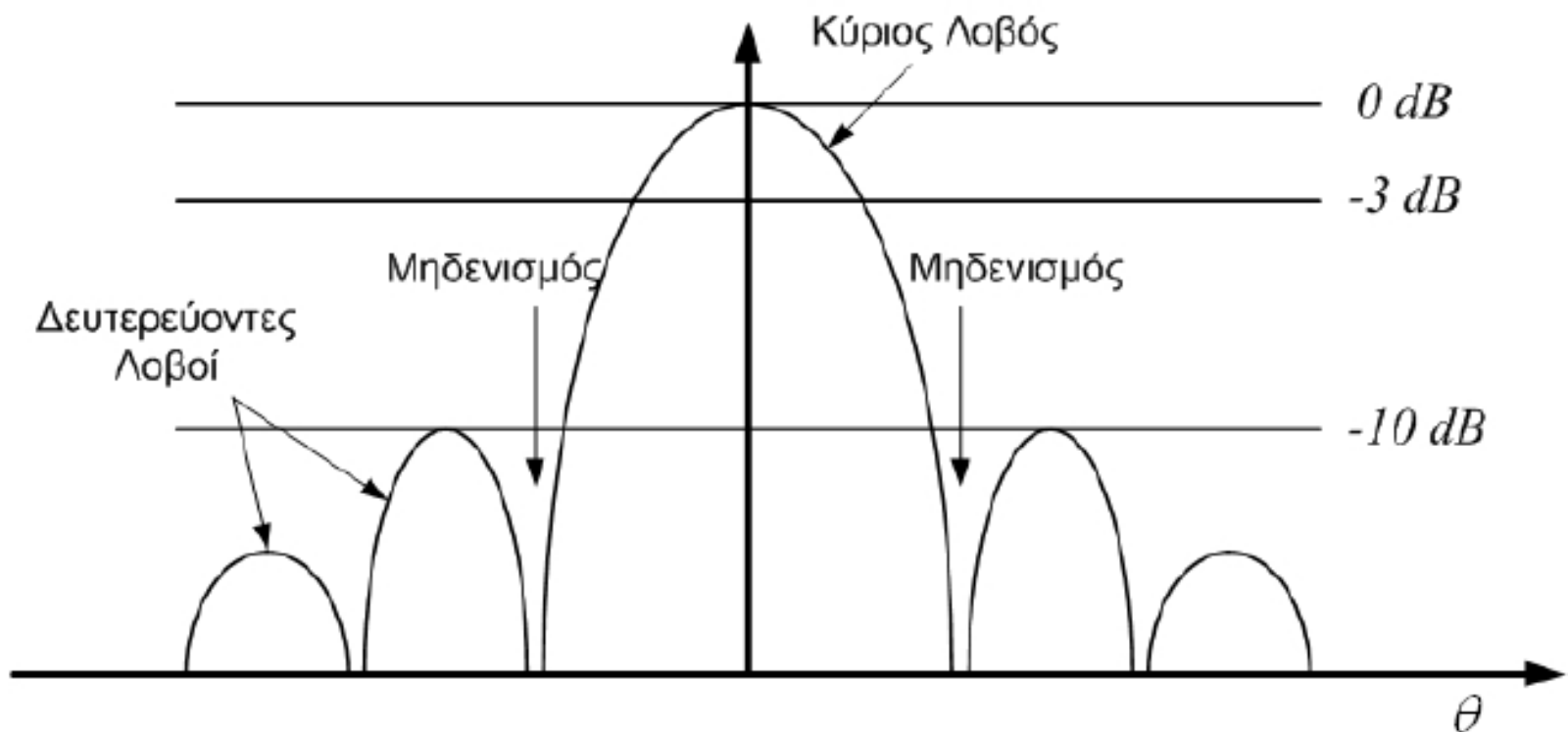
$$\begin{aligned}W_{rad} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} P_r(d) d^2 \sin(\theta) d\theta d\varphi \\ &= P_r(d) d^2 \int_0^{2\pi} 2 d\varphi = 4\pi d^2 P_r(d)\end{aligned}$$

$$P_r(d) = \frac{W_{rad}}{4\pi d^2} \quad (\text{Watt} / \text{m}^2)$$

Λογαριθμικό Διάγραμμα Ισχύος

50

$$F_{ndB}(\Omega) = 10 \log_{10} F_n(\Omega)$$



Ένταση Ακτινοβολίας

51

- Ισχύς που ακτινοβολείται ανά μονάδα στερεάς γωνίας

$$U(\theta, \varphi) = U(\Omega) = d^2 \left| \vec{P}_{av}(\vec{r}) \right|$$

$$U(\theta, \varphi) = \frac{Z_o}{8\lambda^2} \left[|N_\theta(\theta, \varphi)|^2 + |N_\varphi(\theta, \varphi)|^2 \right]$$

$$W_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi$$

Ένταση Ακτινοβολίας

52

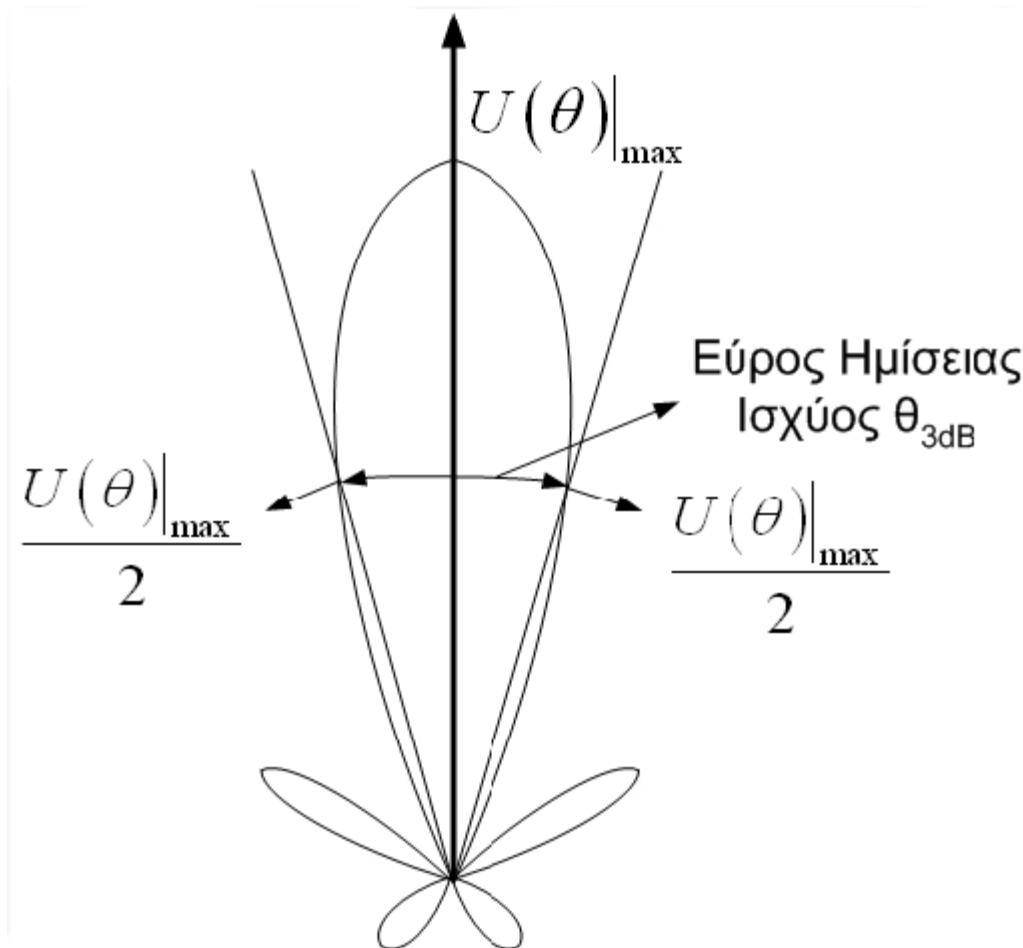
$$F_n(\theta, \varphi) = \frac{P_r(\theta, \varphi, d)}{P_r(\theta, \varphi, d)|_{\max}} = \frac{U(\theta, \varphi)}{U(\theta, \varphi)|_{\max}}$$

Για **ισοτροπικό** ακτινοβολητή

$$\begin{aligned} W_{rad} &= U_o \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \sin(\theta) d\theta d\varphi = U_o 2\pi \int_0^{\pi} \sin(\theta) d\theta d\varphi \\ &= U_o 2\pi \left[-\cos(\theta) \right]_0^{\pi} = U_o 4\pi \Rightarrow U_o = \frac{W_{rad}}{4\pi} \end{aligned}$$

Γωνιακό Εύρος Κύριου Λοβού

53



Ασύρματες Επικοινωνίες

- Η γωνία μεταξύ των διευθύνσεων μηδενισμών ή ελαχίστων μεταξύ των οποίων περιλαμβάνεται η κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας.
- **Γωνιακό εύρος ημίσειας ισχύος**, είναι η γωνία που σχηματίζουν οι διευθύνσεις εκατέρωθεν της κατεύθυνσης της μέγιστης ακτινοβολίας, για τις οποίες η ένταση ακτινοβολίας είναι η μισή της μέγιστης τιμής

Στερεός Λοβός Ακτινοβολίας

54

- Η στερεά γωνία Ω_A , μέσα από την οποία θα εκπέμπονταν όλη η ισχύς αν η κεραία εξέπεμπε σταθερή ένταση ακτινοβολίας προς κάθε κατεύθυνση στο εσωτερικό της και ίση με τη μέγιστη τιμή της.

$$\Omega_A = \frac{4\pi}{U(\theta, \varphi)|_{\max}}$$

$$\Omega_A = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F_n(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi$$

$$\Omega_A \approx \theta_{3dB} \varphi_{3dB}$$



Κατευθυντικό Κέρδος & Κατευθυντικότητα

55

- Ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας προς την ένταση ακτινοβολίας του ισοτροπικού ακτινοβολητή που εκπέμπει την **ίδια ισχύ ακτινοβολίας**

$$D_g(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_o} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{W_{rad}}$$

- Κατευθυντικότητα

$$D = D_g(\theta, \varphi) \Big|_{\max} = \frac{U(\theta, \varphi) \Big|_{\max}}{U_o} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi) \Big|_{\max}}{W_{rad}} = \frac{4\pi}{\Omega_A}$$

Κατευθυντικότητα

56

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

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

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

Κατευθυντικότητα

57

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

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

- 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

58

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

$$W_{rad} = nW_A \quad (0 \leq n \leq 1)$$

- Πόσο αποδοτικά ακτινοβολεί η κεραία???

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

Κέρδος Ισχύος & Μέγιστο Κέρδος

59

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

- Μέγιστο Κέρδος

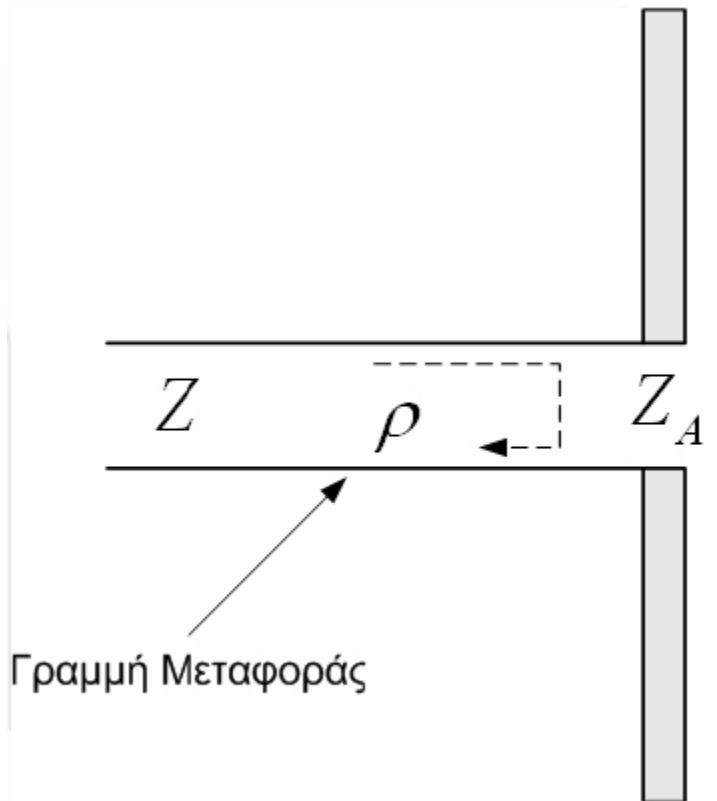
$$G_{\max} = G_g(\theta, \varphi) \Big|_{\max} = n D_g(\theta, \varphi) \Big|_{\max} = nD$$

- Η **συνάρτηση κέρδους** υποδεικνύει πώς κατανέμεται στο χώρο το κέρδος της κεραίας, όταν το σύστημα συντεταγμένων τοποθετηθεί στο κέντρο της.

$$G_g(\theta, \varphi) = G_{\max} F_n(\theta, \varphi)$$

Η Κεραία Στοιχείο Κυκλώματος

60



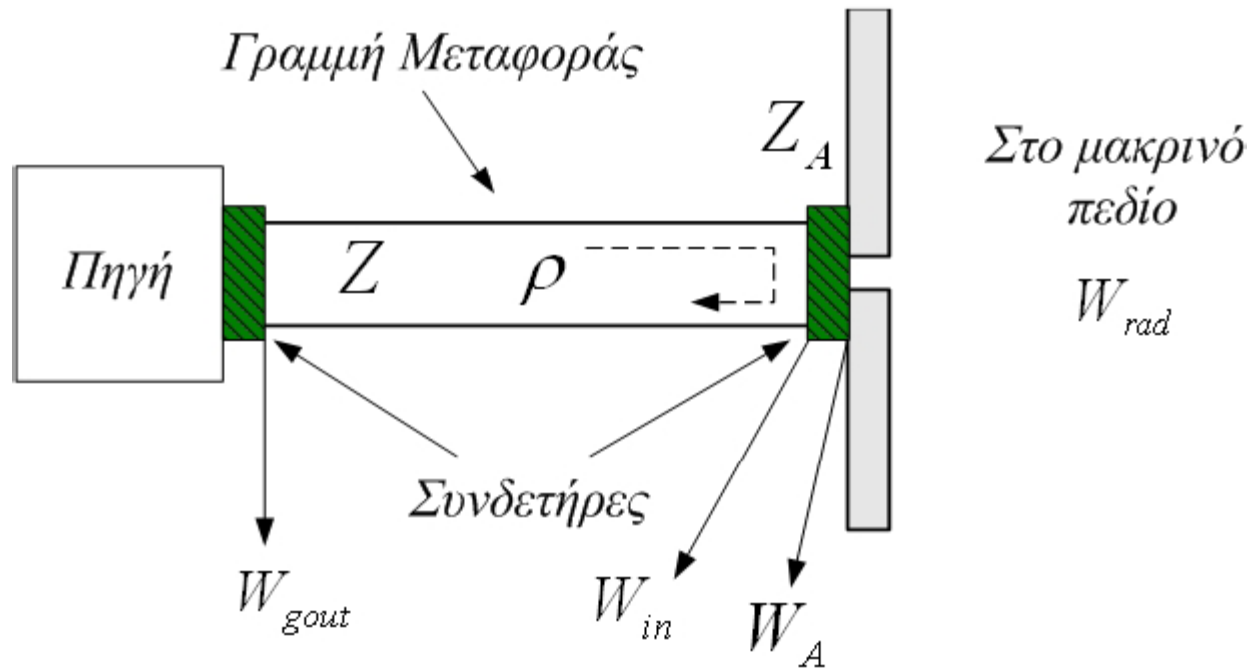
$$Z_A = R_A + jX_A$$

$$\rho = \frac{Z_A - Z^*}{Z_A + Z}$$

$$VSWR = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} \leq 1,5$$

Η Κεραία Στοιχείο Κυκλώματος

61



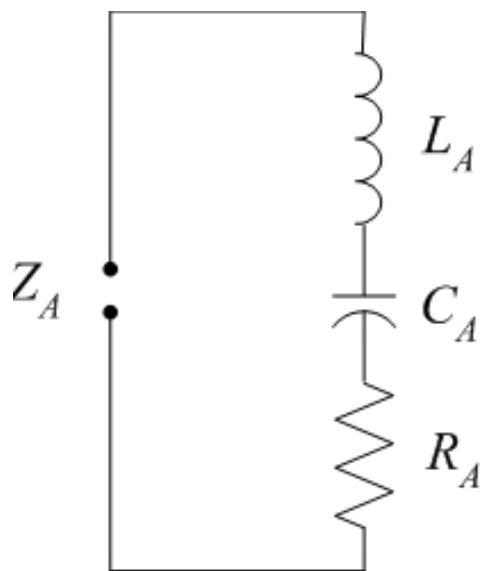
$$W_A = (1 - |\rho|^2) W_{in}$$

$$W_{rad} = n W_A = n (1 - |\rho|^2) W_{in}$$

Συντονισμός

62

- Σύνθετη αντίσταση εισόδου της κεραίας



$$Z_A = R_A + jX_A = R_A + j\left(\omega L_A - \frac{1}{\omega C_A}\right)$$

Συχνότητα συντονισμού ω_0 τέτοια ώστε:

$$\omega_0 L_A = \frac{1}{\omega_0 C_A} \Rightarrow X_A = 0$$

Αντίσταση
ακτινοβολίας

$$Z_A = R_A$$

$$R_A = R_{rad} + R_L$$

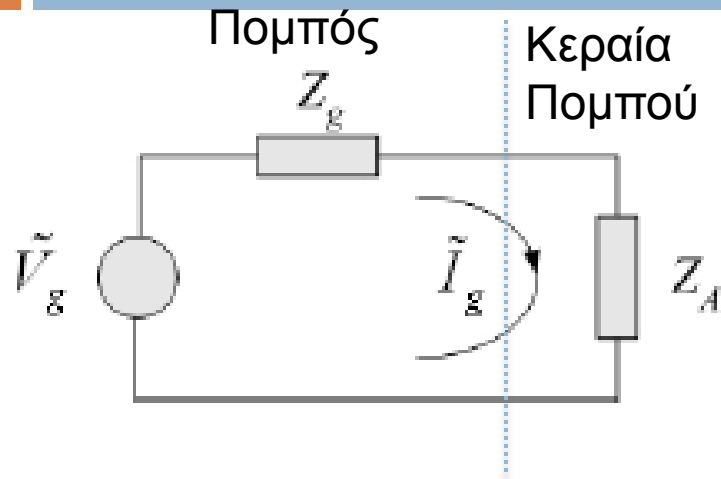
$$R_{rad} = \frac{W_{rad}}{I_{eff}^2}$$

Αντίσταση
απωλειών

Μηδενισμός της άεργης ισχύος και καθαρή ωμική αντίσταση

Ισοδύναμο Συγκεντρωμένο Κύκλωμα Κεραίας Εκπομπής

63



$$\tilde{I}_g = \frac{\tilde{V}_g}{\tilde{Z}} = \frac{\tilde{V}_g}{Z_g + Z_A} = \frac{\tilde{V}_g}{(R_g + R_A) + j(X_g + X_A)}$$

$$\tilde{I}_g = I_{g \max} e^{j\phi}$$

$$\tilde{V}_g = V_{g \max} e^{j\phi_v}$$

$$\tilde{Z} = \frac{\tilde{V}_g}{\tilde{I}_g} = \frac{V_{g \max}}{I_{g \max}} e^{j(\phi_v - \phi)} = Z e^{j\phi}$$

$$Z = |Z_g + Z_A| = \sqrt{(R_g + R_A)^2 + (X_g + X_A)^2}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{X_g + X_A}{R_g + R_A} \right)$$

$$\tilde{S} = P + jQ = \frac{1}{2} V_{g \max} I_{g \max} \cos(\phi) + j \frac{1}{2} V_{g \max} I_{g \max} \sin(\phi) = S e^{j\phi} = \sqrt{P^2 + Q^2} e^{j\phi}$$

Ισοδύναμο Συγκεντρωμένο Κύκλωμα Κεραίας Εκπομπής

64

- Για να μηδενιστεί η άεργος ισχύς πρέπει ($\phi = 0^\circ$)

$$X_g = -X_A$$

$$Z = R_g + R_A \quad S = P = \frac{1}{2} V_{g \max} I_{g \max} = \frac{1}{2} \frac{V_{g \max}^2}{R_g + R_A}$$

- Η κεραία παραλαμβάνει $W_A = I_{g \text{eff}}^2 R_A = \frac{1}{2} I_{g \max}^2 R_A = \frac{1}{2} R_A \frac{V_{g \max}^2}{(R_A + R_g)^2}$

- Αυτή μεγιστοποιείται αν $R_A = R_g$

- Οι δύο συνθήκες καλούνται **συνθήκες συζυγούς προσαρμογής**

$$S = P = \frac{V_{g \max}^2}{4 R_g}$$

Μέγιστη Ισχύς

Ισοδύναμο Συγκεντρωμένο Κύκλωμα Κεραίας Εκπομπής

65

Σε συνθήκες Συζυγούς Προσαρμογής

$$W_A = I_{g\text{eff}}^2 R_A = \frac{1}{2} I_{g\text{max}}^2 R_A = \frac{1}{2} R_A \frac{V_{g\text{max}}^2}{(R_A + R_g)^2} = \frac{1}{8} \frac{V_{g\text{max}}^2}{R_A}$$

$$W_g = I_{g\text{eff}}^2 R_g = \frac{1}{2} I_{g\text{max}}^2 R_g = \frac{1}{2} R_g \frac{V_{g\text{max}}^2}{(R_A + R_g)^2} = \frac{1}{8} \frac{V_{g\text{max}}^2}{R_g} = \frac{1}{8} \frac{V_{g\text{max}}^2}{R_A}$$

$$S = \frac{V_{g\text{max}}^2}{4R_g} = W_A + W_g = 2W_A = 2W_g$$

$$W_A = W_{\text{rad}} + W_L = \frac{1}{8} V_{g\text{max}}^2 \frac{R_{\text{rad}}}{(R_{\text{rad}} + R_L)^2} + \frac{1}{8} V_{g\text{max}}^2 \frac{R_L}{(R_{\text{rad}} + R_L)^2}$$

$$= nW_A + (1-n)W_A$$

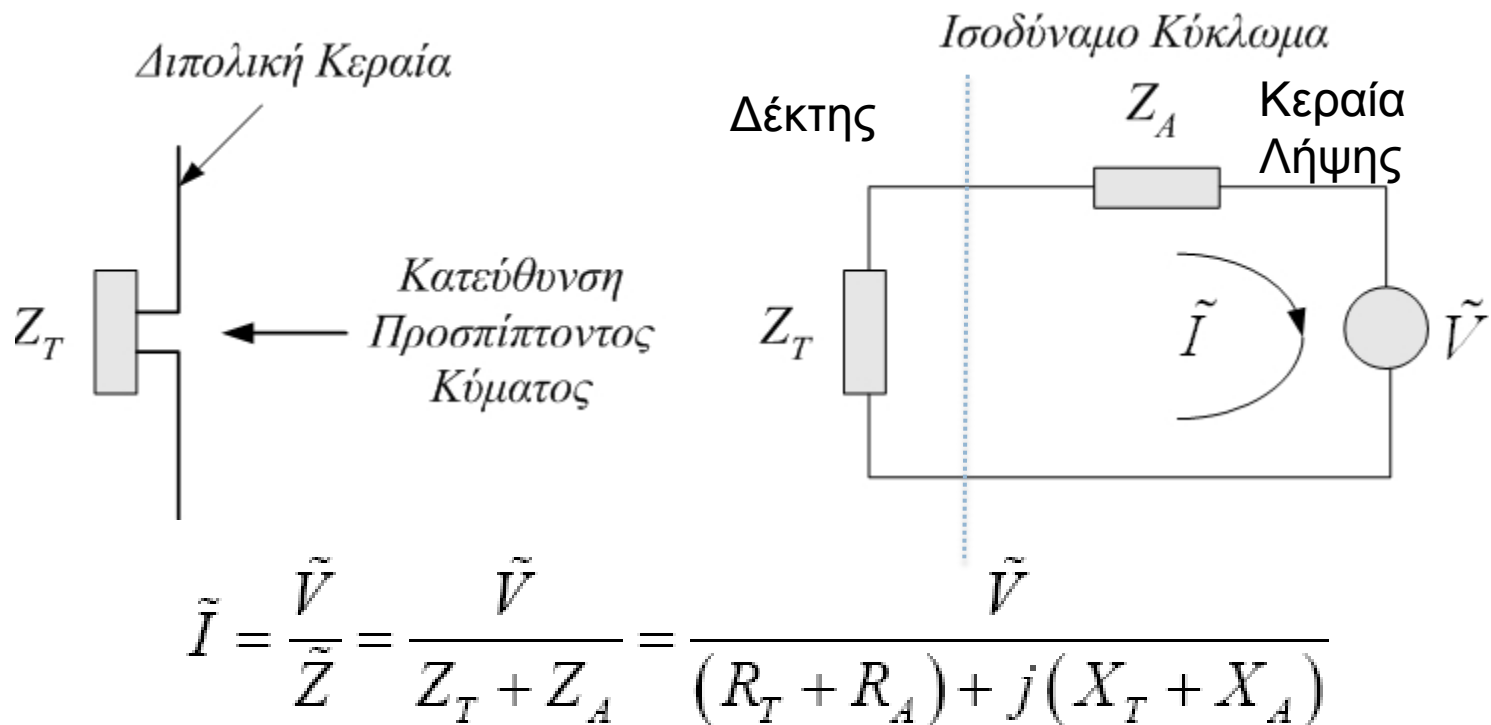
Ασύρματες Επικοινωνίες

W_L

$$n = \frac{R_{\text{rad}}}{R_{\text{rad}} + R_L}$$

Ισοδύναμο Συγκεντρωμένο Κύκλωμα Κεραίας Λήψης

66



Συνθήκες συζυγούς προσαρμογής για
μεγιστοποίηση της ισχύος που
παραλαμβάνει το φορτίο, δηλαδή ο δέκτης

$$\begin{aligned} R_T &= R_A \\ X_T &= -X_A \end{aligned}$$

Ισοδύναμο Συγκεντρωμένο Κύκλωμα Κεραίας Λήψης

67

$$W_A = I_{eff}^2 R_A = \frac{1}{8} \frac{V_{max}^2}{R_A} \quad W_T = I_{eff}^2 R_T = \frac{1}{8} \frac{V_{max}^2}{R_T} = \frac{1}{8} \frac{V_{max}^2}{R_A}$$

$$R_A = R_{rad} + R_L$$

Η αντίσταση ακτινοβολίας αντιστοιχεί στην ισχύ της κεραίας που επανακτινοβολείται (ισχύς σκέδασης)

$$W_{rad} = \frac{1}{8} V_{max}^2 \frac{R_{rad}}{(R_{rad} + R_L)^2}$$

$$W_L = \frac{1}{8} V_{max}^2 \frac{R_L}{(R_{rad} + R_L)^2}$$

Θεώρημα Αμοιβαιότητας

68

- Τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας μιας κεραίας παραμένουν τα ίδια είτε η κεραία χρησιμοποιείται ως πομπός είτε ως δέκτης.
- Αν μια κεραία είναι αποδοτικός ακτινοβολητής, τότε είναι και αποδοτικός δέκτης.
- Επίσης τα διαγράμματα ακτινοβολίας παραμένουν τα ίδια.
- Η βασική προϋπόθεση για να ισχύει το θεώρημα της αμοιβαιότητας είναι τόσο οι κεραίες να είναι κατασκευασμένες από υλικά γραμμικά, όσο και το μέσο μετάδοσης να είναι γραμμικό και ισοτροπικό.

Ενεργό Μήκος Κεραίας

69

- Χρησιμοποιείται για να καθορίσουμε την τάση η οποία επάγεται στους ανοικτοκυκλωμένους ακροδέκτες οποιασδήποτε κεραίας κατά την πρόσπτωση σε αυτή ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{-jkZ_0}{4\pi r} e^{-jkr} \left(\hat{\theta} N_\theta(\theta, \varphi) + \hat{\phi} N_\phi(\theta, \varphi) \right)$$

Κεραία Πομπός

$$\vec{l}_{eff}(\theta, \varphi) = \frac{\hat{\theta} N_\theta(\theta, \varphi) + \hat{\phi} N_\phi(\theta, \varphi)}{I}$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{-jkZ_0}{4\pi r} e^{-jkr} \vec{l}_{eff}(\theta, \varphi)$$

Ενεργό Μήκος Κεραίας

70

- Κεραία Δέκτης

$$V_{oc} = \vec{E}_i(\vec{r}) \cdot \vec{l}_{eff}(\theta, \varphi)$$

- Το ενεργό μήκος μιας κεραίας, το οποίο πολλές φορές καλείται και **ενεργό ύψος**, είναι το μήκος μιας ισοδύναμης κεραίας η οποία είναι ένας ευθύγραμμος αγωγός προσανατολισμένος στην κατεύθυνση πόλωσης και κάθετα στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος, ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα ίσο με το ρεύμα στους ακροδέκτες της κεραίας και παράγει το ίδιο πεδίο στη μακρινή περιοχή και στη συγκεκριμένη κατεύθυνση όπως και η κεραία.

Πόλωση Κεραιών

71

- Προσδιορίζουμε την πόλωση μιας κεραίας από τη λειτουργία εκπομπής.
- Παράγοντας απωλειών πόλωσης

$$n_p = \cos^2 \psi = \left| \hat{p}_i \cdot \hat{p}_a \right|^2 \quad n_p = \frac{\left| \vec{E}_i \cdot \vec{l}_{eff} \right|^2}{\left| \vec{E}_i \right|^2 \left| \vec{l}_{eff} \right|^2}$$

Κατ/νση πόλωσης κύματος

Κατ/νση πόλωσης κεραίας

$$\hat{p} = \frac{\vec{E}(\vec{r})}{|\vec{E}(\vec{r})|} = \frac{|E_{o\theta}(\vec{r})| e^{j\phi_\theta} \hat{\theta} + |E_{o\phi}(\vec{r})| e^{j\phi_\phi} \hat{\phi}}{\sqrt{|E_{o\theta}(\vec{r})|^2 + |E_{o\phi}(\vec{r})|^2}}$$

Πόλωση Κεραιών

72

- Παράδειγμα : Προσπίπτον κύμα με **δεξιόστροφη κυκλική πόλωση**, δηλαδή η ϕ έπεται της θ κατά $\pi/2$ και τα μέτρα είναι ίσα

$$\phi_{\phi} = -\frac{\pi}{2} \quad \phi_{\theta} = 0 \quad |E_{\theta}| = |E_{\phi}|$$

$$\hat{p}_i = \frac{\vec{E}(\vec{r})}{|\vec{E}(\vec{r})|} = \frac{|E_{\theta}(\vec{r})|(\hat{\theta} + e^{-j\pi/2}\hat{\phi})}{|E_{\theta}(\vec{r})|\sqrt{2}} = \frac{(\hat{\theta} - j\hat{\phi})}{\sqrt{2}}$$

- Ο παρατηρητής που βρίσκεται στην κεραία λήψης το βλέπει ως αριστερόστροφο

Πόλωση Κεραιών

73

- Αν η κεραία λήψης χαρακτηρίζεται από δεξιόστροφη πόλωση

$$\hat{p}_a = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{\theta} - j\hat{\phi})$$

$$n_p = \cos^2 \psi = |\hat{p}_i \cdot \hat{p}_a|^2 = \frac{1}{4} |(\hat{\theta} - j\hat{\phi}) \cdot (\hat{\theta} - j\hat{\phi})|^2 = \frac{1}{4} |(\hat{\theta} \cdot \hat{\theta}) - (\hat{\phi} \cdot \hat{\phi})|^2 = 0$$

- Αν $\hat{p}_a = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{\theta} + j\hat{\phi})$

$$n_p = \cos^2 \psi = |\hat{p}_i \cdot \hat{p}_a|^2 = \frac{1}{4} |(\hat{\theta} - j\hat{\phi}) \cdot (\hat{\theta} + j\hat{\phi})|^2 = \frac{1}{4} |(\hat{\theta} \cdot \hat{\theta}) + (\hat{\phi} \cdot \hat{\phi})|^2 = 1$$

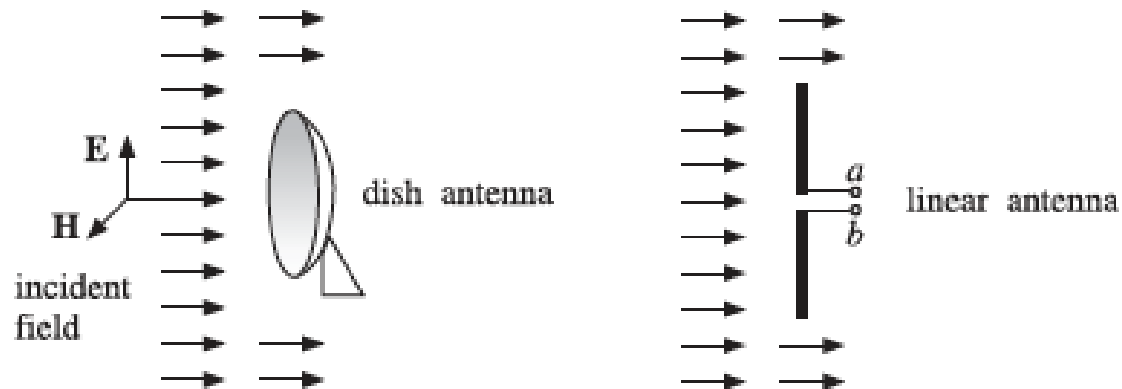
Η κεραία ως άνοιγμα

- **Ενεργός επιφάνεια** : μέγεθος που χρησιμεύει για την ποσοτική περιγραφή της δυνατότητας μιας κεραίας να συλλέγει ισχύ από την προσπίπτουσα σε αυτή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Για συνθήκες συζυγούς προσαρμογής και βέλτιστου προσανατολισμού

$$A_e = \frac{W_T}{|\vec{P}_{av}(\vec{r})|} = \frac{1}{8} \frac{V_{\max}^2}{R_A |\vec{P}_{av}(\vec{r})|} = \frac{1}{4} \frac{V_{eff}^2}{R_A |\vec{P}_{av}(\vec{r})|}$$

- Για $(R_L = 0 \Rightarrow A_e = A_{e\max})$

$$A_e = nA_{e\max}$$



Ενεργός Επιφάνεια & Κατευθυντικότητα

75

$$A_e(\theta, \varphi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} nD_g(\theta, \varphi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_g(\theta, \varphi)$$

$$G_{\max} = nD = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_e \qquad D = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{e\max}$$

- Οι κεραιές χωρίζονται σε
 - A) **σταθερού κέρδους** (ανεξάρτητου της συχνότητας) π.χ. γραμμικές κεραιές
 - B) **σταθερής επιφάνειας** (ανεξάρτητης της συχνότητας) π.χ. κεραιές κάτοπτρα (παραβολικές)

Ενεργός Επιφάνεια & Ενεργό Μήκος

76

- Στη γενική περίπτωση (όχι απαραίτητα συζυγούς προσαρμογής και βέλτιστου προσανατολισμού)

$$A_e(\theta, \varphi) = \frac{Z_o R_T}{|Z_T + Z_A|^2} \frac{|\vec{E}_i(\vec{r}) \cdot \vec{l}_{eff}(\theta, \varphi)|^2}{|\vec{E}_i(\vec{r})|^2} = \frac{Z_o |\vec{l}_{eff}(\theta, \varphi)|^2}{4R_A} (1 - |\rho|^2) n_p$$

$$A_e(\theta, \varphi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} n_p (1 - |\rho|^2) G_g(\theta, \varphi)$$

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

$$D_{Hertz} = 1,5 \quad A_{eHertz} = \frac{3\lambda^2}{8\pi} = 0.1194\lambda^2$$

$$D_{dipole(\lambda/2)} = 1,64 \quad A_{edipole(\lambda/2)} = 0.1305\lambda^2$$

Επιφάνειες Κεραίας

77

- Επιφάνεια Σκέδασης A_s

$$A_s = \frac{V_{\max}^2}{8 |\vec{P}_{av}(\vec{r})|} \frac{R_{rad}}{(R_{rad} + R_L)^2}$$

- Επιφάνεια Απωλειών A_L

$$A_L = \frac{V_{\max}^2}{8 |\vec{P}_{av}(\vec{r})|} \frac{R_L}{(R_{rad} + R_L)^2}$$

- Επιφάνεια Συλλογής A_c

$$A_c = A_e + A_s + A_L$$

Συλλεκτική Ικανότητα

78

□ Ορίζεται ως: $\varepsilon = \frac{A_e}{A_p}$ (Λόγος Ενεργούς προς Φυσικής Επιφάνειας)

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

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

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

EIRP & ERP

79

- *Ισοδύναμη Ισοτροπικά Ακτινοβολούμενη Ισχύς* (Equivalent Isotropically Radiated Power, *EIRP*)

$$EIRP(\theta, \varphi) = W_A G_g(\theta, \varphi) \qquad EIRP = W_A G_{\max}$$

- *Ενεργός Ακτινοβολούμενη Ισχύς* (Effective Radiated Power, *ERP*)

$$ERP(\theta, \varphi) = W_A G_{gdipole}(\theta, \varphi) \qquad ERP = W_A G_{\max dipole}$$

$$G_g(\theta, \varphi)(dB_i) = G_{gdipole}(\theta, \varphi)(dB_d) + 2.15(dB_i)$$

$$EIRP(dBW) = ERP(dBW) + 2.15$$

Έκθεση του Ανθρώπου στην RF Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία

80

- Υπάρχουν δύο είδη ακτινοβολίας:
 - Τα σωματίδια άλφα και βήτα τα οποία εκπέμπονται από τα ραδιενεργά υλικά.
 - Τα ΗΜ κύματα ή φωτόνια
- Στο κάτω άκρο του φάσματος συχνοτήτων (60 ή 50Hz) βρίσκονται τα ΗΜ πεδία που παράγονται από τα καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος και από τις ηλεκτρικές συσκευές.
- Στο πάνω άκρο των ΗΜ κυμάτων βρίσκεται η πυρηνική ακτινοβολία, η οποία αποτελείται από ακτίνες γ και X .

Έκθεση του Ανθρώπου στην RF Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία

81

- Ο όρος RF χρησιμοποιείται για να περιγράψει το φάσμα συχνοτήτων μεταξύ μερικών χιλιοκύκλων έως και μερικών εκατοντάδων Gigahertz (GHz).
- Οι εκπομπές AM και FM ραδιοφώνου και τηλεόρασης, αστικής μπάντας (CB), ασύρματων και κινητών τηλεφώνων κλπ βρίσκονται στην RF μπάντα.
- Τα ΗΜ κύματα πολύ υψηλής ενέργειας, όπως οι ακτίνες Χ, αποκαλούνται ιονίζουσες ακτινοβολίες επειδή ιονίζουν τα μόρια που συναντούν στο δρόμο τους. (Ασθενής τεχνητή ακτινοβολία χρησιμοποιείται για ιατρικούς λόγους.)

Έκθεση του Ανθρώπου στην RF Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία

82

- Ο βιολογικές επιδράσεις των RF ΗΜ κυμάτων που δεν προκαλούν ιονισμό, δεν είναι πολύ γνωστές, παρά τις πολυάριθμες μελέτες.
- Η ΙΕΕΕ έχει προτείνει κάποια όρια ασφαλείας. Σε συχνότητες υψηλότερες των 100MHz τα όρια της ανθρώπινης έκθεσης εκφράζονται με όρους πυκνότητας ισχύος.
- Σε χαμηλότερες συχνότητες τα όρια εκφράζονται ως συνάρτηση των πεδίων E και H , ανεξάρτητα αφού το κάθε πεδίο έχει διαφορετικές βιολογικές επιδράσεις.

Παράδειγμα: Φούρνοι Μικροκυμάτων

83

- Ένας φούρνος μικροκυμάτων μετατρέπει την 60Hz ηλεκτρική ισχύ, σε μικροκυματική ισχύ (2,45GHz), η οποία στη συνέχεια εκπέμπεται μέσα στο φαγητό.
- Καθώς η μικροκυματική ενέργεια διαπερνά το φαγητό μέρος της χάνεται ως θερμότητα, η οποία στιγμιαία αυξάνει τη θερμοκρασία του φαγητού.
- Η εφραπτομένη απωλειών π.χ. της μπριζόλας είναι μεγάλη στις μικροκυματικές συχνότητες, ενώ η διηλεκτρική σταθερά του αφρού πολυστερίνης είναι πολύ κοντά σε αυτή του απόλυτου κενού (ψήσιμο μέσα σε κουτί από αφρό πολυστερίνης).
- Μπριζόλα: $\epsilon' = 40(1-j0,3)\epsilon_0 \rightarrow k = 402-j59 \rightarrow d_p = 1/k_r = 1,70\text{cm}$.
- Η ισχύς που θερμαίνει το εσωτερικό της μπριζόλας σε βάθος 0,85cm είναι ~37% αυτής που θερμαίνει την επιφάνεια.

Σχετικές ιστοσελίδες

84

- Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας:
<http://www.eeae.gr>
- ΠΕΔΙΟΝ24 <http://www.pedion24.gr>
- World Health Organization International EMF Project: <http://www.who.int/peh-emf/>
- ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection):
<http://www.icnirp.de/>
- NRPB (National Radiological Protection Board):
<http://www.hpa.org.uk/radiation/>