



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

# Κεραίες

Ενότητα 3: Οι Βασικές παράμετροι των κεραιών

Δημήτρης Βαρουτάς, Αριστείδης Τσίπουρας

Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

# Οι Βασικές παράμετροι των κεραιών



---

# **ΚΕΡΑΙΕΣ**

## **ΜΑΘΗΜΑ 3ο - 4ο - 5ο**

### **Οι Βασικές παράμετροι των κεραιών**

---

**ΜΔΕ Ρ/Η 2014 -2015**

**Δ. Βαρουτάς**

**Α. Τσίπουρας**

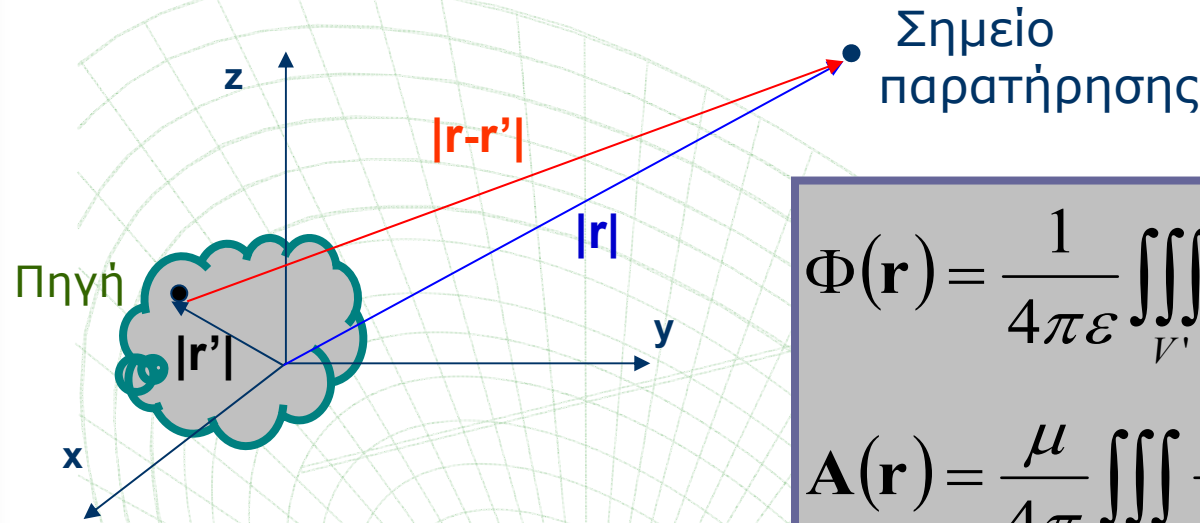


# Περιεχόμενα ενότητας

- Ανασκόπηση προηγούμενων...
- Αρχή διατήρησης της ισχύος. Θεώρημα Poynting
- Οι δείκτες μιας κεραίας
  - Πόλωση
  - Ένταση ακτινοβολίας
  - Κατευθυντική απολαβή
  - Κατευθυντικότητα – απολαβή
  - Απόδοση
  - Αντίσταση ακτινοβολίας - εισόδου
- Αρχή της Αμοιβαιότητας
- Διάγραμμα Ακτινοβολίας



# Επίλυση της κυματικής εξίσωσης



$$\Phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \iiint_{V'} \frac{\rho(\mathbf{r}') e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \cdot dV'$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_{V'} \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}') e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \cdot dV'$$



$$\Phi(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \iiint_{V'} \frac{\rho(\mathbf{r}', t - |\mathbf{r}-\mathbf{r}'|/c)}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \cdot dV'$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_{V'} \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}', t - |\mathbf{r}-\mathbf{r}'|/c)}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \cdot dV'$$



$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \nabla \times \mathbf{A}$$

$$\mathbf{E} = -\nabla\Phi - \frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}$$

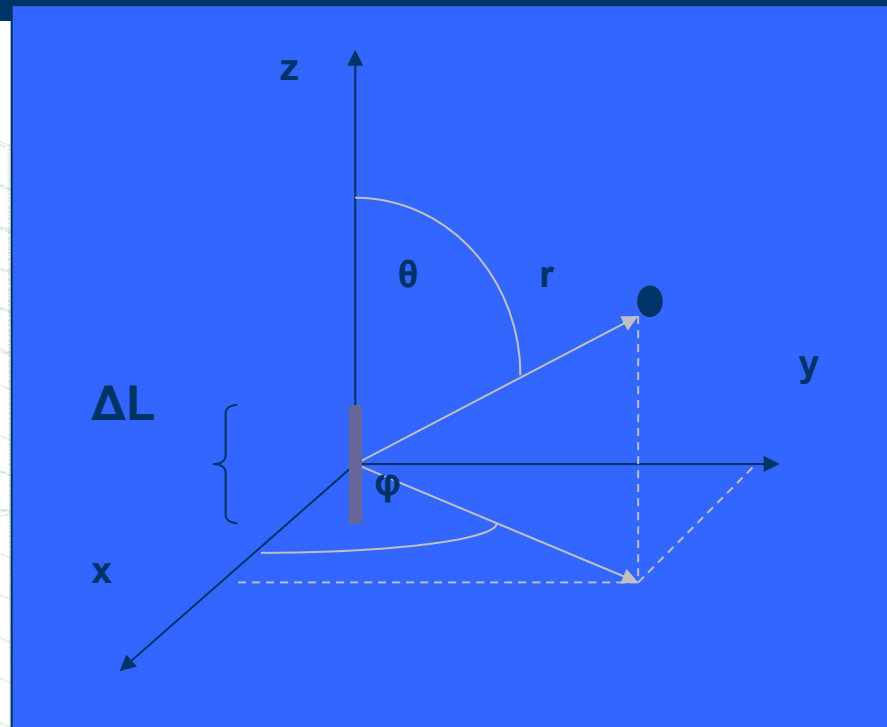
$$\rho(\mathbf{r}', t) = \text{Re}\{\rho(\mathbf{r}') \cdot e^{j\omega t}\}$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}', t) = \text{Re}\{\mathbf{J}(\mathbf{r}') \cdot e^{j\omega t}\}$$



# Το ιδανικό δίπολο

Κατανομή ρεύματος κατά μήκος αγωγού μήκους  $\Delta L$

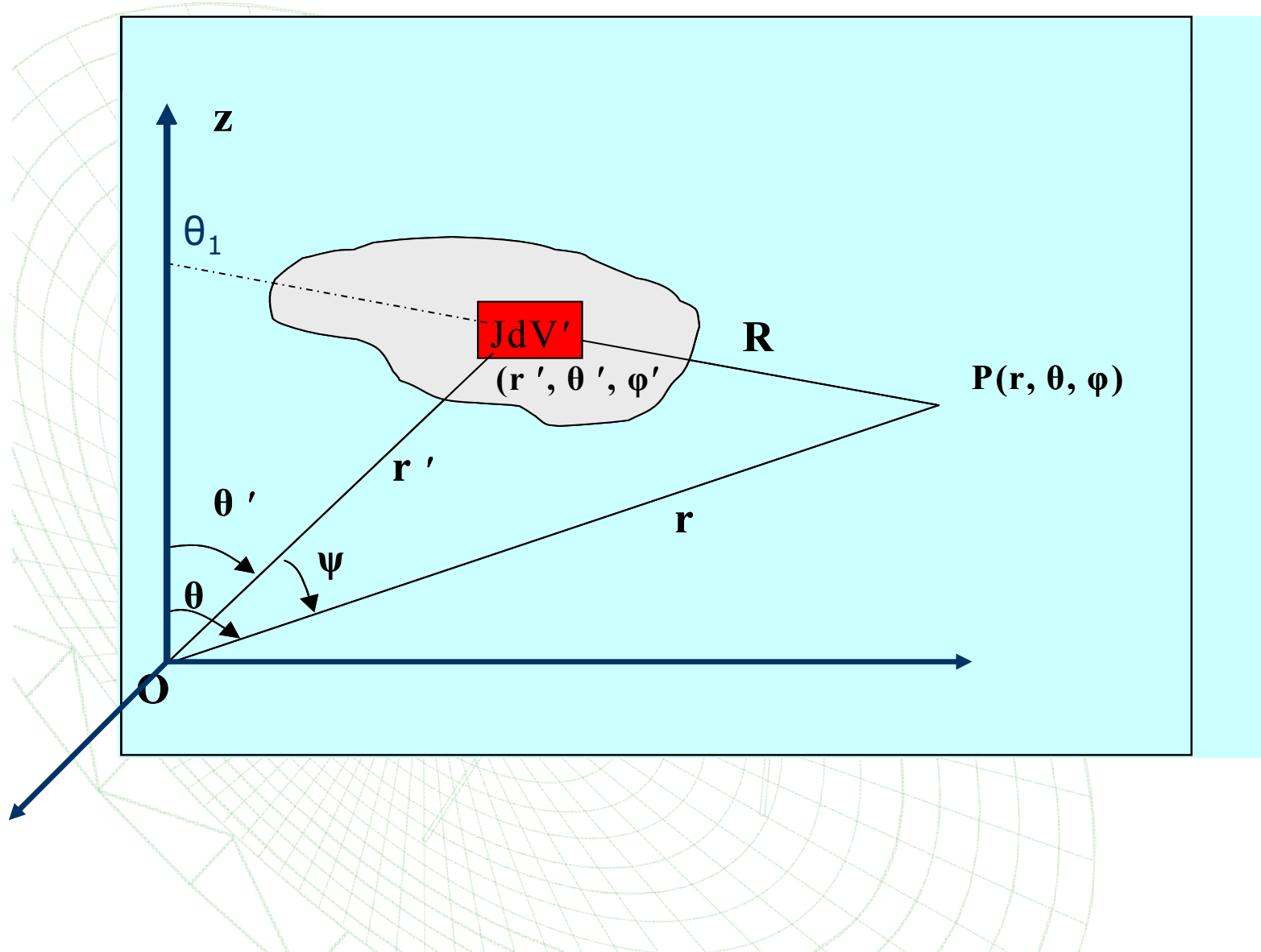


$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_{V'} \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}') e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \cdot dV'$$

- current constant?
- coordinate system?
- distance  $r = r'$ ?



# Ηλεκτρομαγνητικό Πεδίο «Τυχαίας» Κεραίας





## Ηλεκτρομαγνητικό Πεδίο «Τυχαίας» Κεραίας

- Εφόσον  $r \gg \lambda$  και  $r \gg$  διαστάσεων κεραίας οι διαφορές στις ακτινικές αποστάσεις  $R$  και  $r$  μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες σε ότι αφορά το πλάτος του υπολογιζόμενου μεγέθους δηλ.  $1/R \cong 1/r$
- Οι ευθείες που ενώνουν τις θέσεις  $(r', \theta', \varphi')$  των στοιχειωδών ρευματικών κατανομών και το μακρινό σημείο υπολογισμού  $P(r, \theta, \varphi)$  μπορούν να θεωρηθούν παράλληλες μεταξύ τους και επομένως  $\theta_1 \cong \theta$
- Οι συνιστώσες πεδίου οι οποίες εξασθενούν ταχύτερα του  $1/r$  (πχ.  $1/r^2, 1/r^3$  κ.ο.κ) θεωρούνται αμελητέες συγκριτικά με αυτές που εξασθενούν ανάλογα του  $1/r$ . Συνεπώς, στους υπολογισμούς που αφορούν στο μακρινό πεδίο, μπορούν να αμεληθούν
- Οι διαφορές μεταξύ των ακτινικών αποστάσεων  $R$  και  $r'$ , αν και αμελητέες ως προς το πλάτος, υπολογίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια σε ότι αφορά τη τιμή της φάσης
- Οπότε για τη φάση:  $e^{-jkR}$
- και

$$R \cong r - r' \cos \psi$$

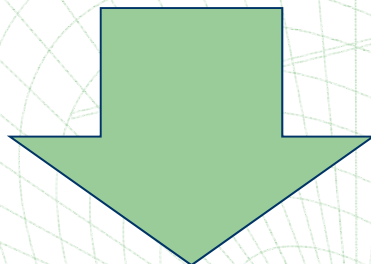
$$\cos \psi = \cos \theta \cos \theta' + \sin \theta \sin \theta' \cos(\varphi - \varphi')$$



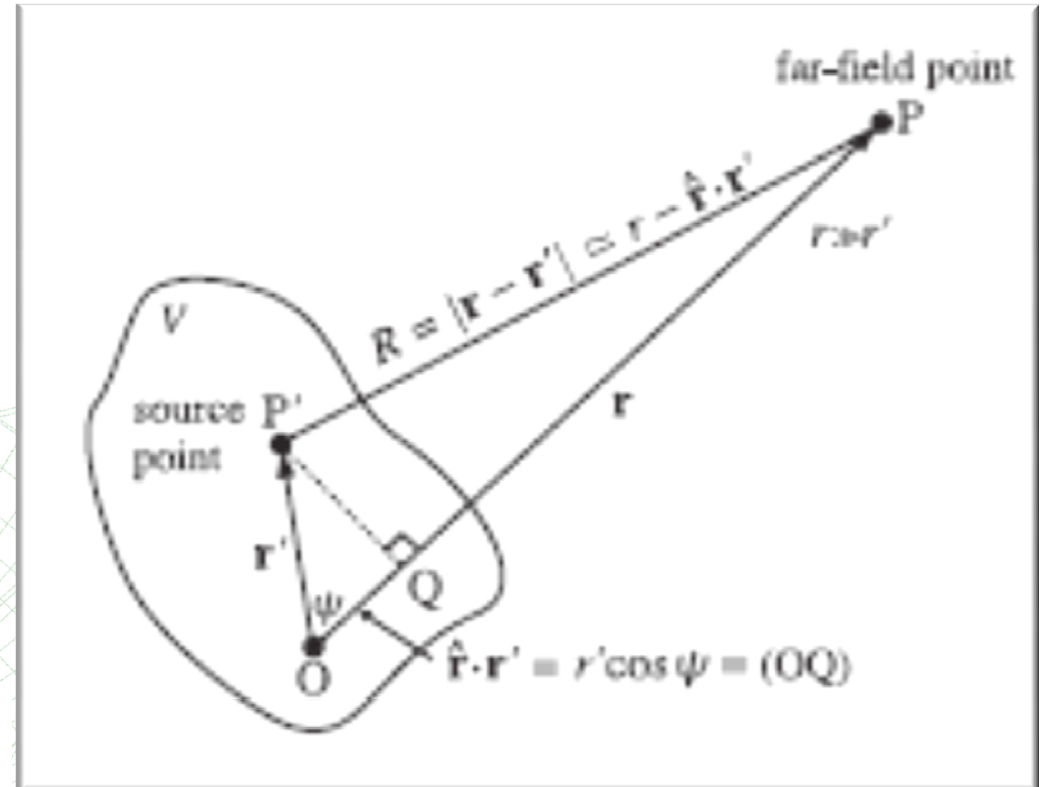


# Προσέγγιση μακρινού πεδίου

$$\begin{aligned} R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| &= \sqrt{r^2 - 2rr' \cos \psi + r'^2} = r \sqrt{1 - 2\frac{r'}{r} \cos \psi + \frac{r'^2}{r^2}} \\ &= r \left( 1 - \frac{r'}{r} \cos \psi + \frac{r'^2}{2r^2} - \frac{1}{8} \left( -2\frac{r'}{r} \cos \psi + \frac{r'^2}{r^2} \right)^2 \right) \\ &\approx r \left( 1 - \frac{r'}{r} \cos \psi + \frac{r'^2}{2r^2} - \frac{r'^2}{2r^2} \cos^2 \psi \right) \end{aligned}$$



$$R = r - r' \cos \psi + \frac{r'^2}{2r} \sin^2 \psi, \quad \text{for } r \gg r'$$



$$r \gg l \quad \text{and} \quad r \gg \frac{2l^2}{\lambda} \quad (\text{far-field conditions})$$

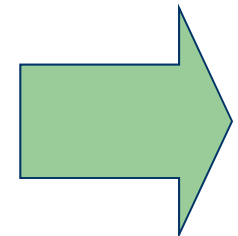


# Διαν. Δυναμικό A και μακρινά πεδία

$$\begin{aligned}\vec{A}(x, y, z) &= \frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \int_V \vec{J}(r', \theta, \phi') e^{jkr' \cos\psi} dV' = \frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \vec{N}(\theta, \phi) \\ &= \frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \left[ \hat{r} N_r(\theta, \phi) + \hat{\theta} N_\theta(\theta, \phi) + \hat{\phi} N_\phi(\theta, \phi) \right]\end{aligned}$$

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

Αμελώντας τους τις ακτινικές συνιστώσες και όρους που εξαρτώνται από το  $1/r^2$





$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} =$$

$$\frac{1}{\mu} \hat{r} \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} (A_\phi r \mu \theta) - \frac{\partial A_\theta}{\partial \phi} \right] + \frac{1}{\mu} \hat{\theta} \left[ \frac{1}{r \mu \theta} \frac{\partial A_r}{\partial \phi} - \frac{\partial}{\partial r} (r A_\phi) \right] +$$

Ακτινική συνιστώσα  
πεδίων  $\rightarrow 0$

$$+ \frac{1}{\mu} \hat{\phi} \left[ \frac{\partial}{\partial r} (r A_\theta) - \frac{\partial A_r}{\partial \theta} \right]$$

Δίνουν Όρους  $1/r^2$

$$\vec{E} = \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times \vec{H}$$



# Μη αμελητέες συνιστώσες των πεδίων στο μακρινό πεδίο

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

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

απευθείας από τις πάνω εξισώσεις εάν αντικατασταθούν τα  $\mu$ ,  $A$  με τα  $j\omega\epsilon$  και  $H$  αντίστοιχα  $n = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ :

$$E_{\theta}(r, \theta, \varphi) \cong -\frac{1}{j\omega\epsilon r} \frac{\partial}{\partial r} (rH_{\varphi}) = -\frac{j\omega\mu}{4\pi r} e^{-jkr} N_{\theta}(\theta, \varphi) = nH_{\varphi} \quad (r \gg \lambda)$$

$$E_{\varphi}(r, \theta, \varphi) \cong \frac{1}{j\omega\epsilon r} \frac{\partial}{\partial r} (rH_{\theta}) = -\frac{j\omega\mu}{4\pi r} e^{-jkr} N_{\varphi}(\theta, \varphi) = -nH_{\theta} \quad (r \gg \lambda)$$

$$k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$$

Και Γενικά:

$$\vec{E} \approx j\omega\mu\vec{A} \quad \text{και} \quad \vec{H} = \frac{1}{n} \hat{r} \times \vec{E}$$



# Αρχή διατήρησης της ισχύος

- Έστω χώρος  $V$  που περιορίζεται από κλειστή επιφάνεια  $S$ . Η μιγαδική ισχύς που εκπέμπεται από τις πηγές εντός του  $V$  είναι:

$$P_S = P_r + P_d + 2j\omega(W_H - W_E)$$

$$P_r = \frac{1}{2} \oint_S \vec{E} \times \vec{H}^* \cdot d\vec{S}$$

Ισχύς ακτινοβολίας

$$P_d = \frac{1}{2} \int_V \sigma |E^2| dV$$

Ισχύς απωλειών

$$W_H = \frac{1}{2} \int_V \frac{1}{2} \mu |H^2| dV$$

Αποθηκευόμενη ενέργεια  
Μαγνητικού πεδίου

$$W_E = \frac{1}{2} \int_V \frac{1}{2} \varepsilon |E^2| dV$$

Αποθηκευόμενη ενέργεια  
Ηλεκτρικού πεδίου

$$P_S = P_{ave} + jP_a$$

$$P_S = \frac{1}{2} \int_V \vec{E} \cdot \vec{J} dV$$



# Εγγύς και μακρινό πεδίο στο στοιχειώδες δίπολο

Near Field Approximation

Fresnel Region

$$k \cdot r \ll 1$$

Far Field Approximation

Fraunhofer Region

$$k \cdot r \gg 1$$

$$R = \frac{2L^2}{\lambda}$$

$$E_r = \frac{\eta \cdot I \cdot \Delta L \cdot \cos \theta}{j \cdot 2\pi k r^3} e^{-jkr}$$

$$E_r \approx 0$$

$$E_\theta = \frac{\eta \cdot I \cdot \Delta L \cdot \sin \theta}{j \cdot 4\pi k r^3} e^{-jkr}$$

$$E_\theta = \eta \cdot H_\phi$$

$$H_\phi = \frac{I \cdot \Delta L \cdot \sin \theta}{4\pi r^2} e^{-jkr}$$

$$H_\phi = j \frac{I \cdot \Delta L \cdot k \cdot \sin \theta}{4\pi r} e^{-jkr}$$

**E & H έχουν διαφορά φάσης  $\pi/2$ ,**

$$\eta = 377 \Omega = 120\pi \Omega$$

**(αποθήκευση ενέργειας)**

**E & H σε φάση, (ακτινοβολία)**

$$P_{rms} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] = \frac{1}{2} \text{Re}[\hat{a}_r E_\theta H_\phi^* - \hat{a}_\theta E_r H_\phi^*] \eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{k}{\omega \epsilon}$$



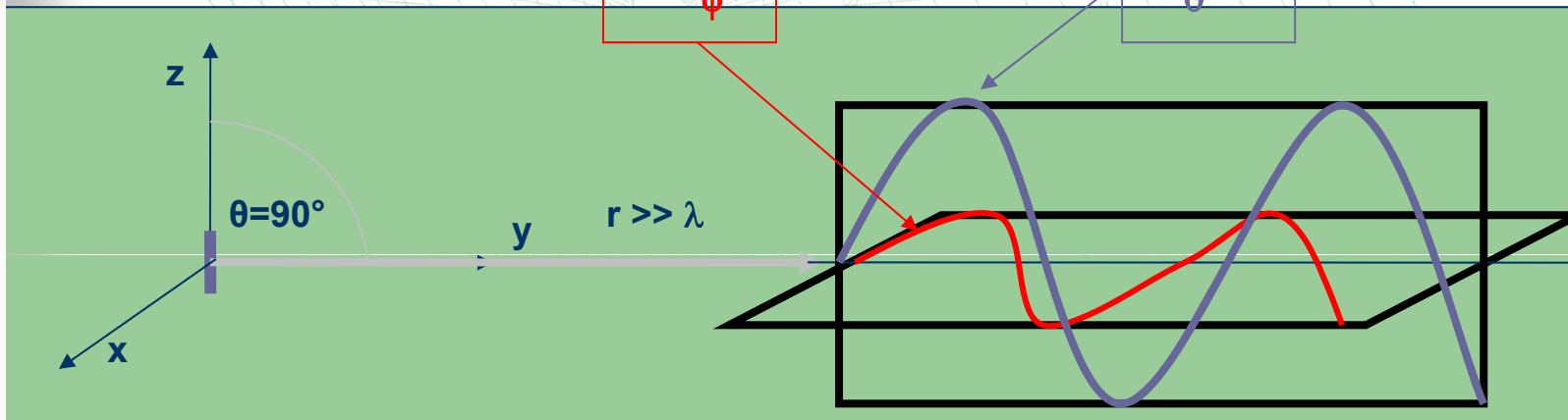
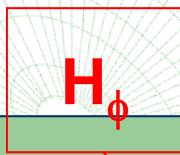
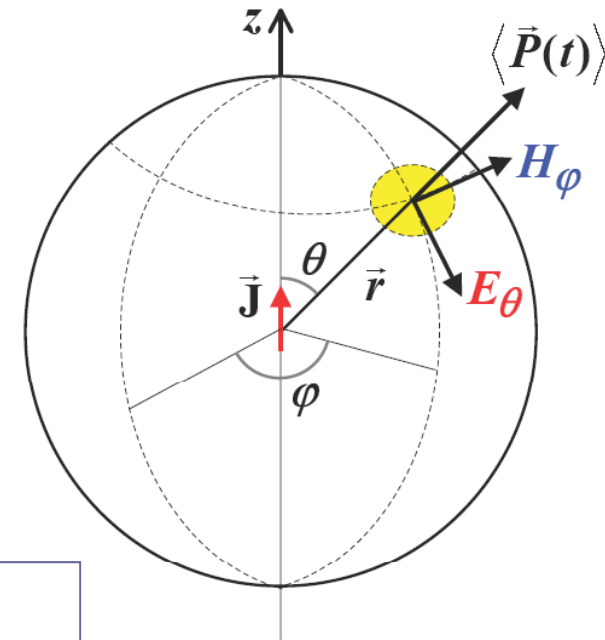
# Συμπεράσματα:

- Το μακρινό πεδίο οποιασδήποτε κεραίας είναι TEM
- Το μακρινό πεδίο = επίπεδο κύμα
- Πχ για το στοιχειώδες δίπολο:

$$\mathbf{H}_\varphi = \mathbf{H}_{\varphi, \max} (I, \Delta L, \lambda) \cdot \sin \theta \cdot \frac{e^{-j(kr - \omega t)}}{4\pi r}$$

$$\mathbf{E}_\theta = \eta \cdot \mathbf{H}_\varphi$$

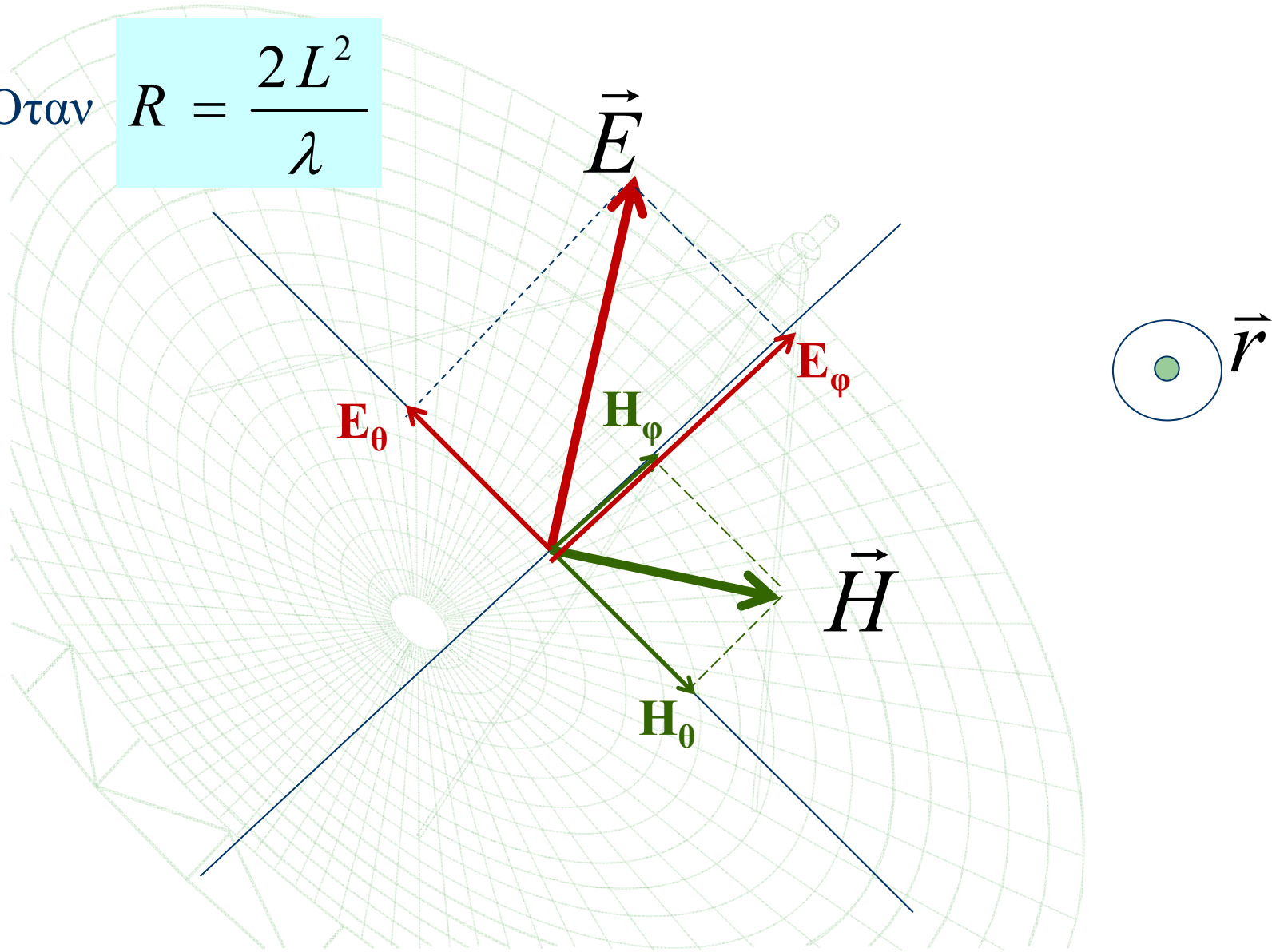
$$W_H - W_E = P_a = 0$$





# Το ΗΛΜ πεδίο ακτινοβολίας είναι TEM

Όταν  $R = \frac{2L^2}{\lambda}$

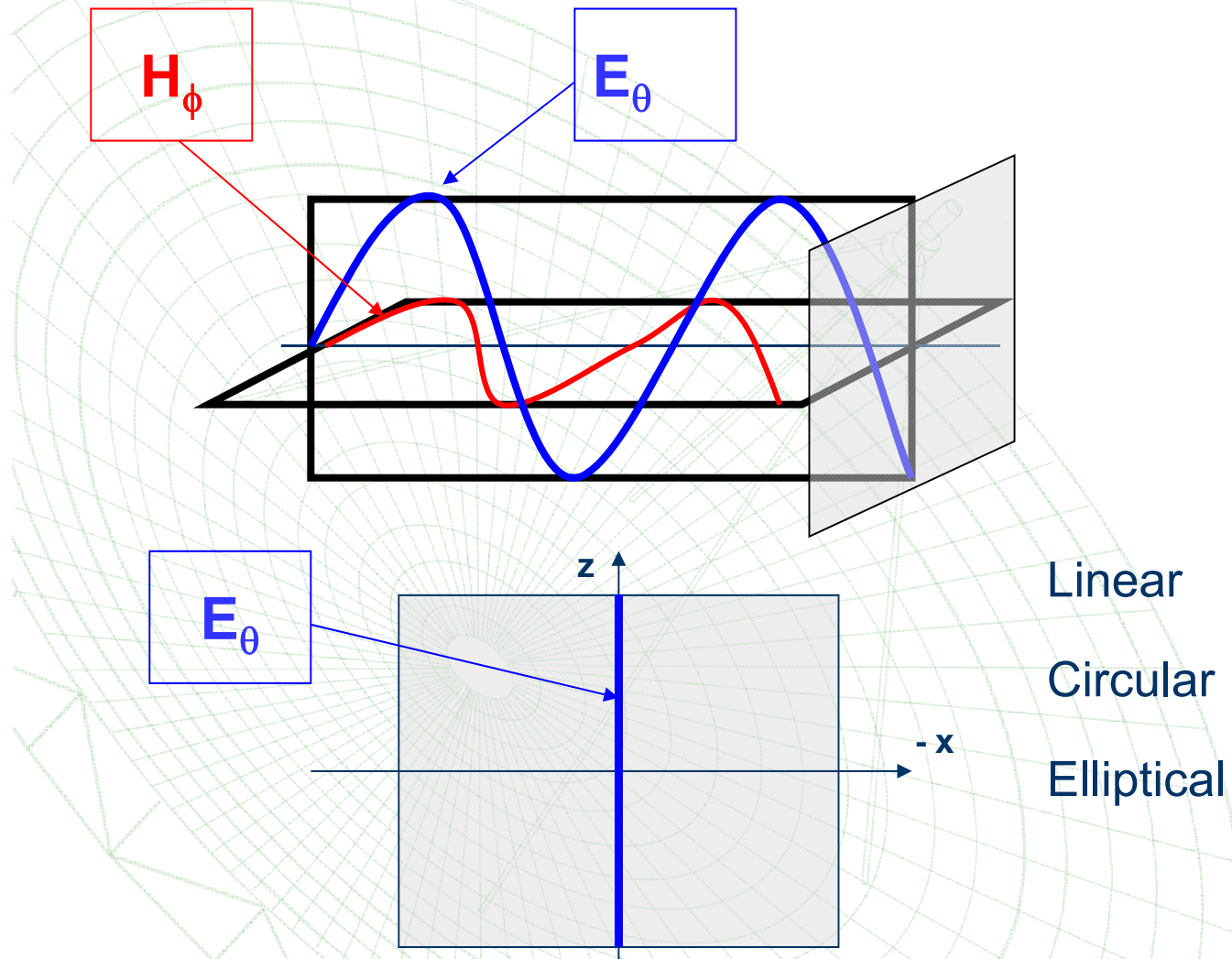






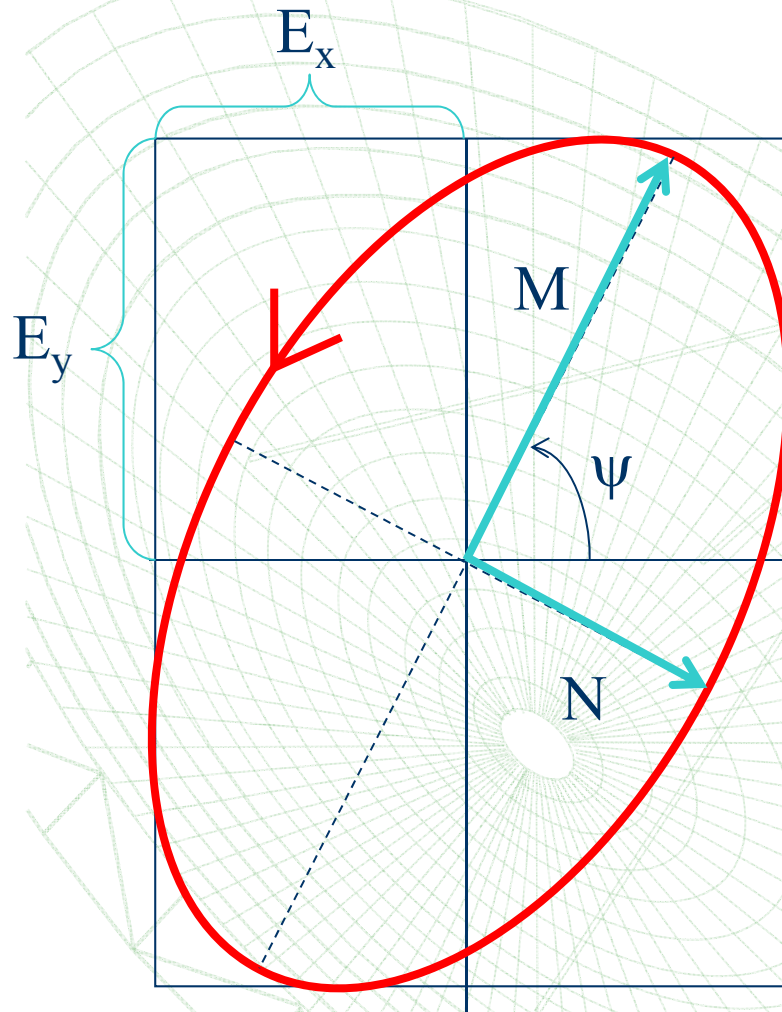
# Χαρακτηριστικές παράμετροι κεραιών

# Πόλωση





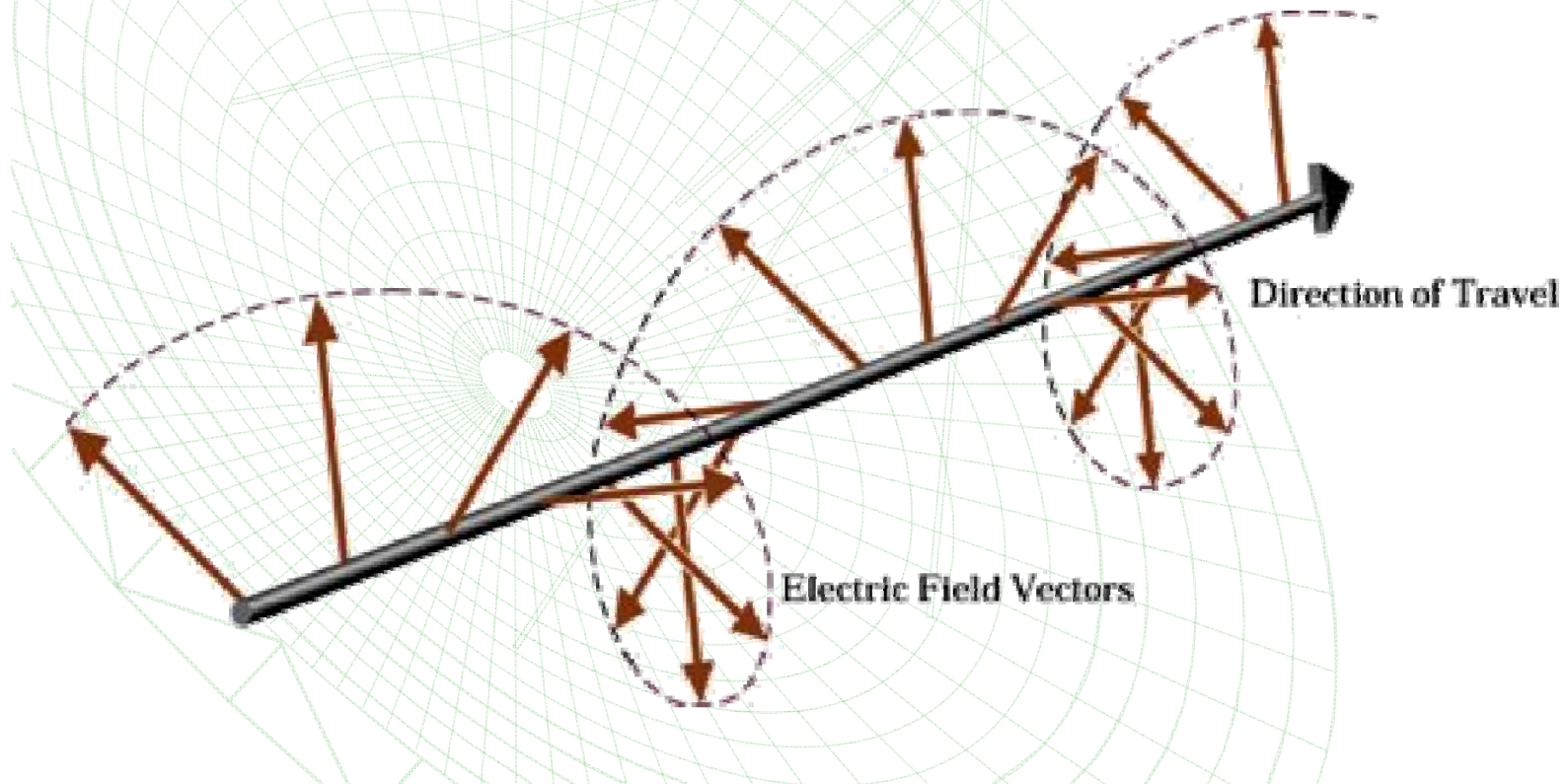
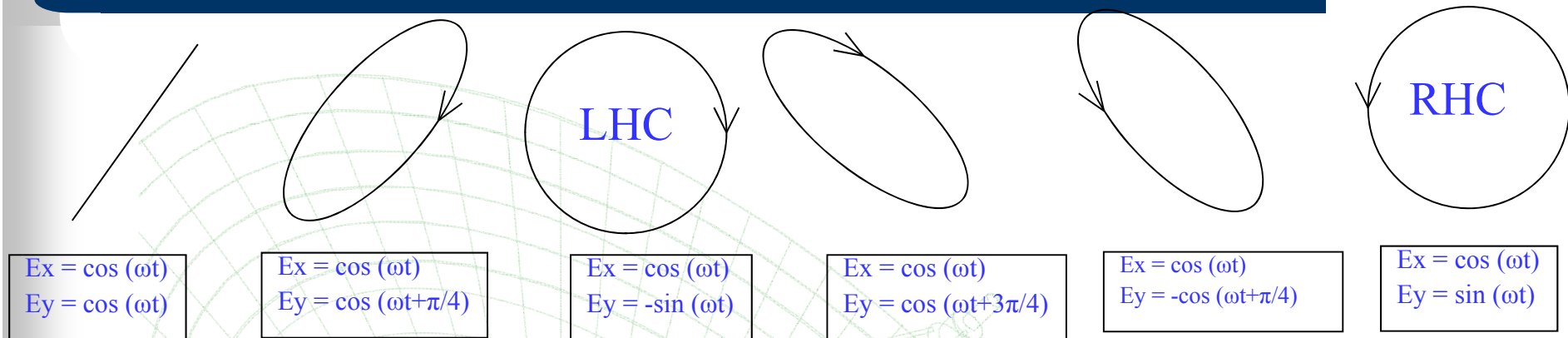
# Polarization ellipse



- The superposition of two plane-wave components results in an elliptically polarized wave
- The polarization ellipse is defined by its axial ratio  $N/M$  (ellipticity), tilt angle  $\psi$  and sense of rotation

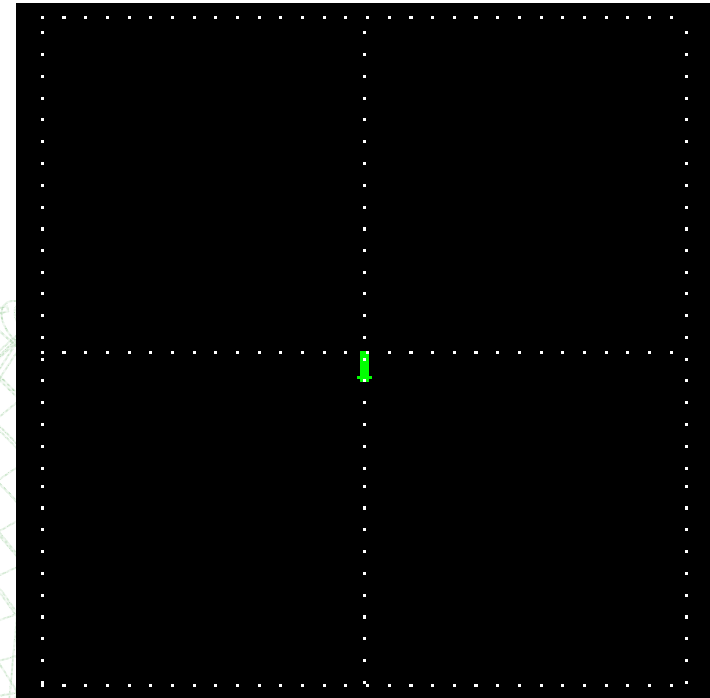
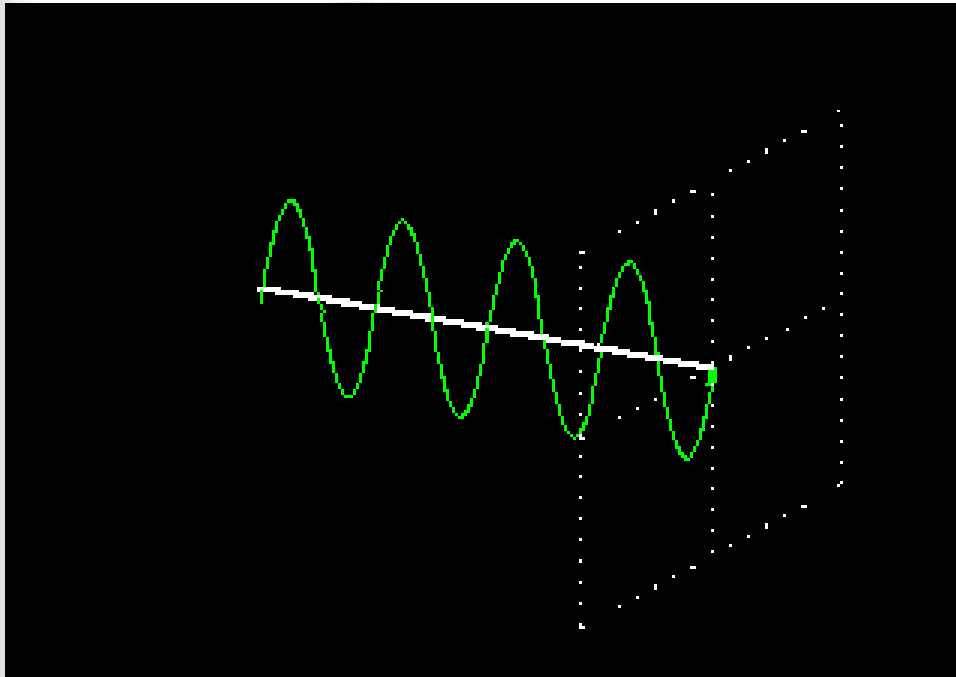


# Πόλωση - Polarization





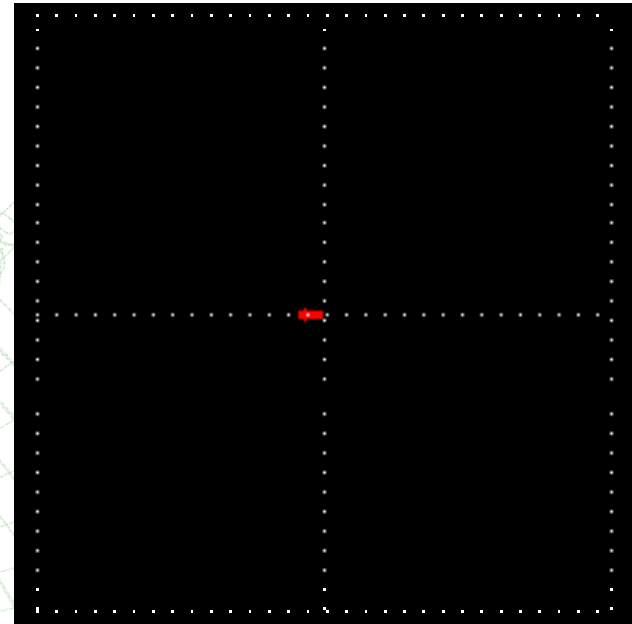
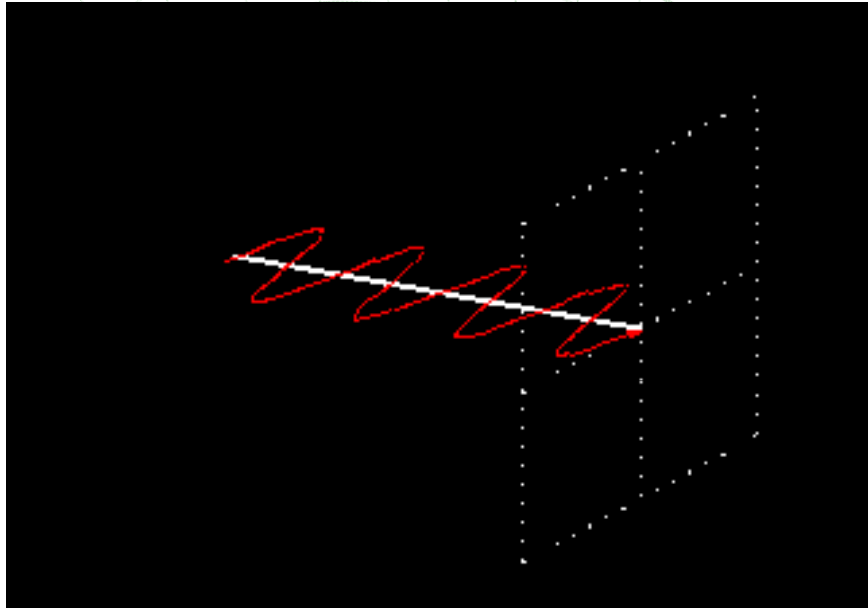
# Γραμμικώς πολωμένα κύματα σε κάθετο επίπεδο



όταν το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου ταλαντεύεται κατά μήκος μιας ίσιας γραμμής τότε τα κύματα λέγονται επίπεδα ή γραμμικώς πολωμένα

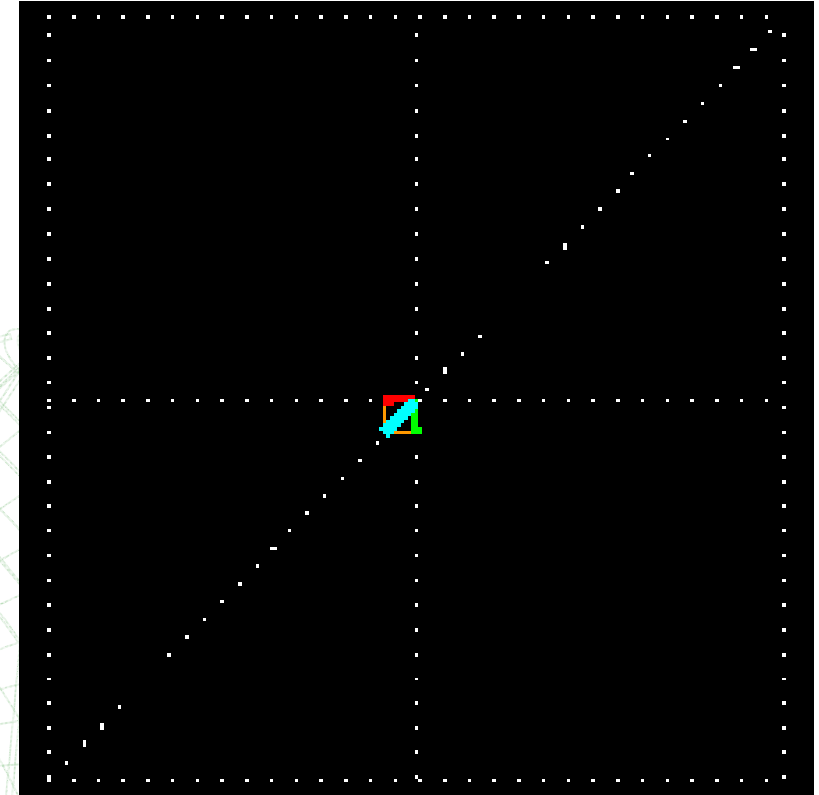
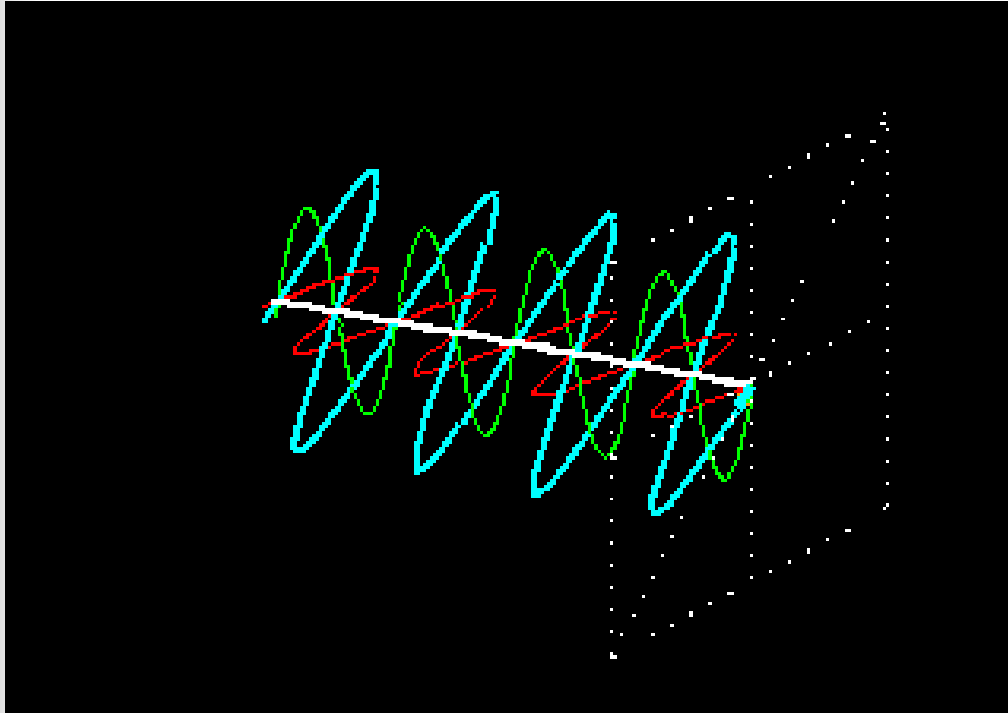


# Γραμμικώς πολωμένα κύματα σε οριζόντιο επίπεδο





## Συνδυασμός δύο γραμμικώς πολωμένων κυμάτων κάθετων μεταξύ τους που βρίσκονται στην **ίδια φάση**

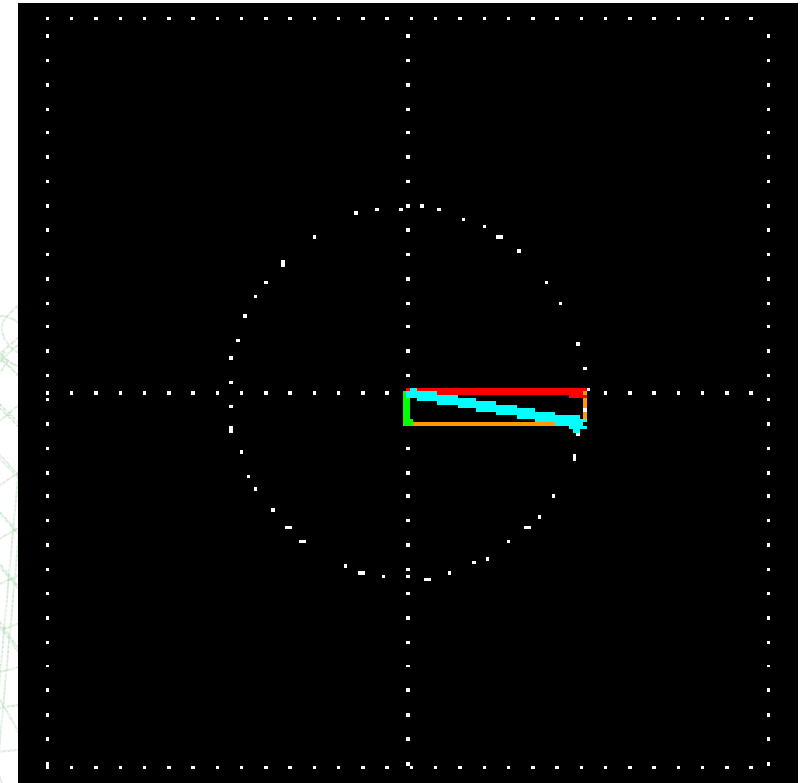
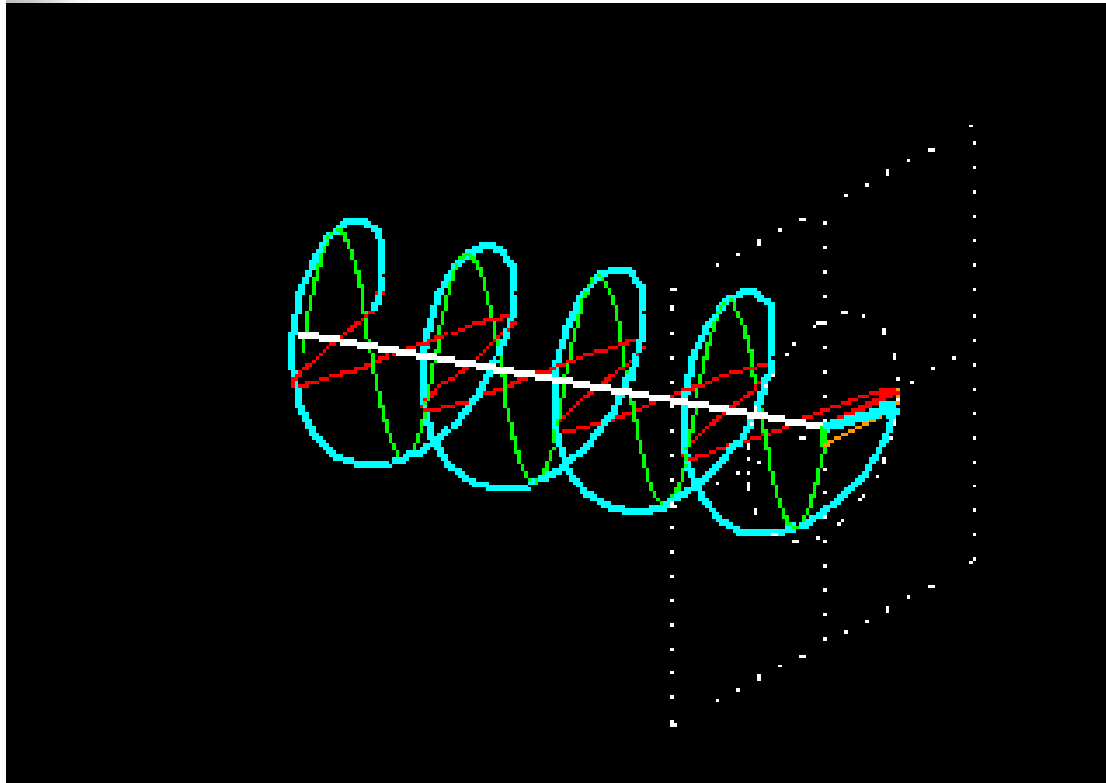


τα παραπάνω κύματα έχουν :  
ίδιο μήκος κύματος  
ίδιο πλάτος  
ίδια φάση

γραμμικώς πολωμένο κύμα με επίπεδο πόλωσης να διαφέρει κατά 45 μοίρες από τα επίπεδα πόλωσης των δύο αρχικών κυμάτων



# Συνδυασμός δύο γρ. πολωμένων κυμάτων κάθετων μεταξύ τους με φάση +90 μοίρες



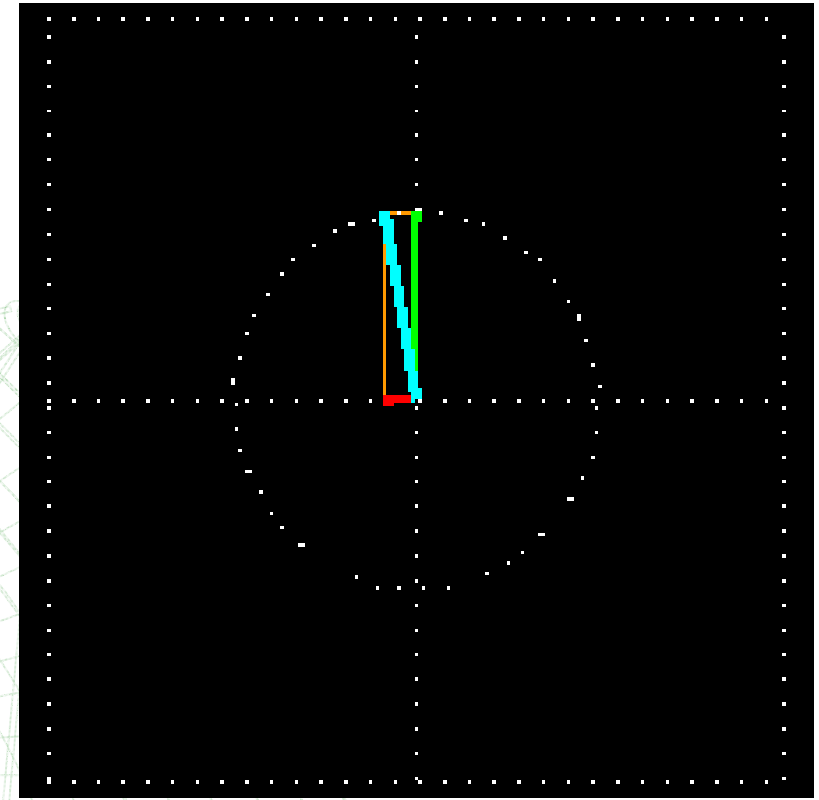
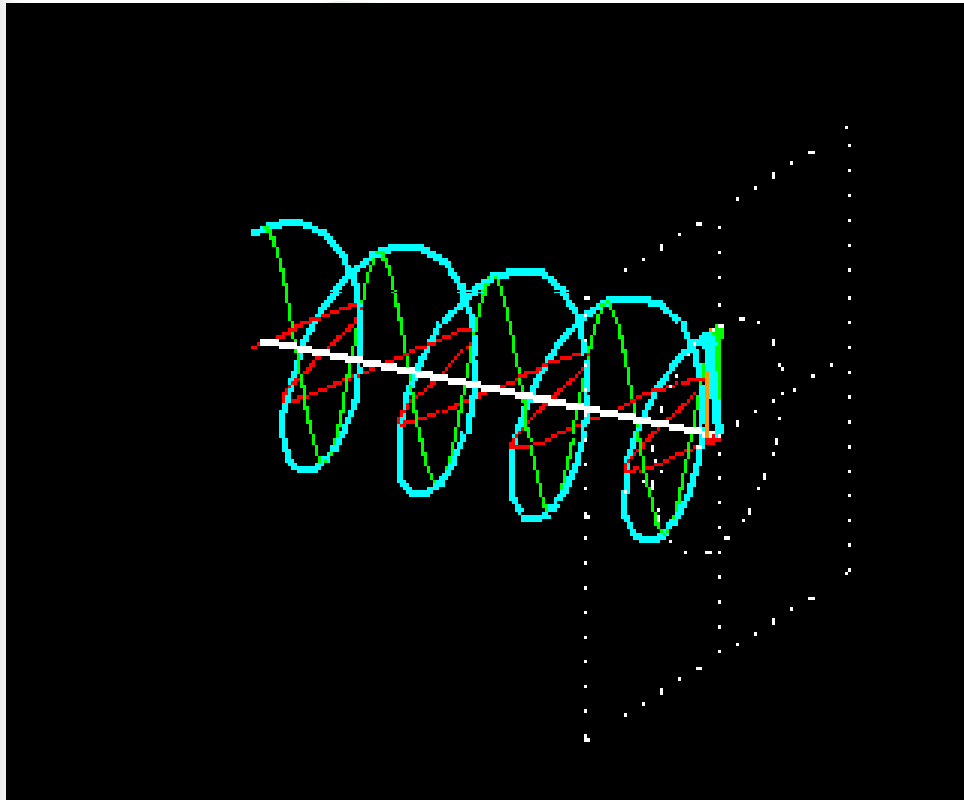
Ίδιο πλάτος, ίδιο μήκος κύματος , διαφορά φάσης κατά 90 μοίρες

: κυκλικά πολωμένο κύμα: δεξιόστροφο





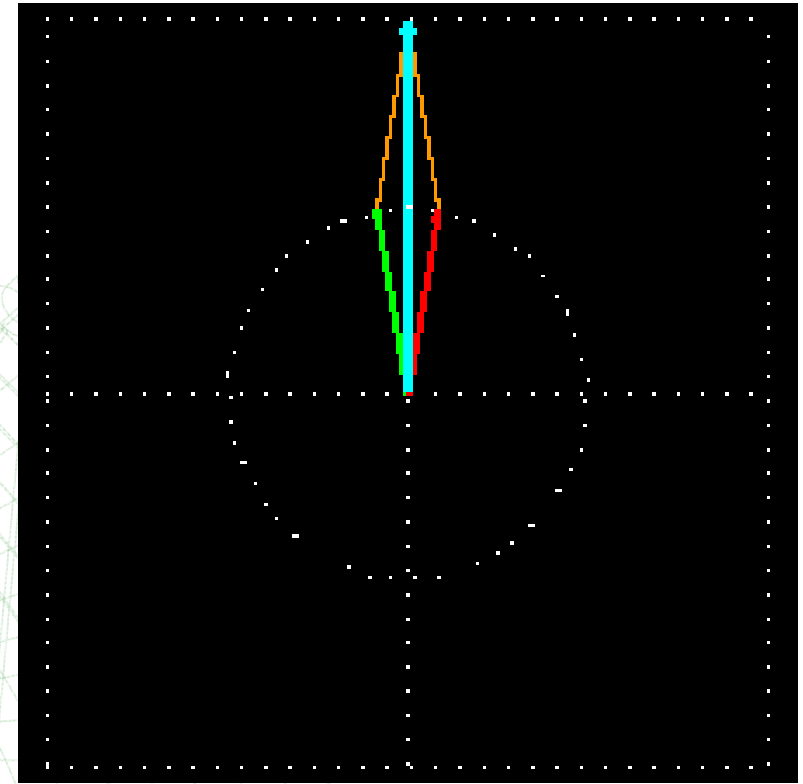
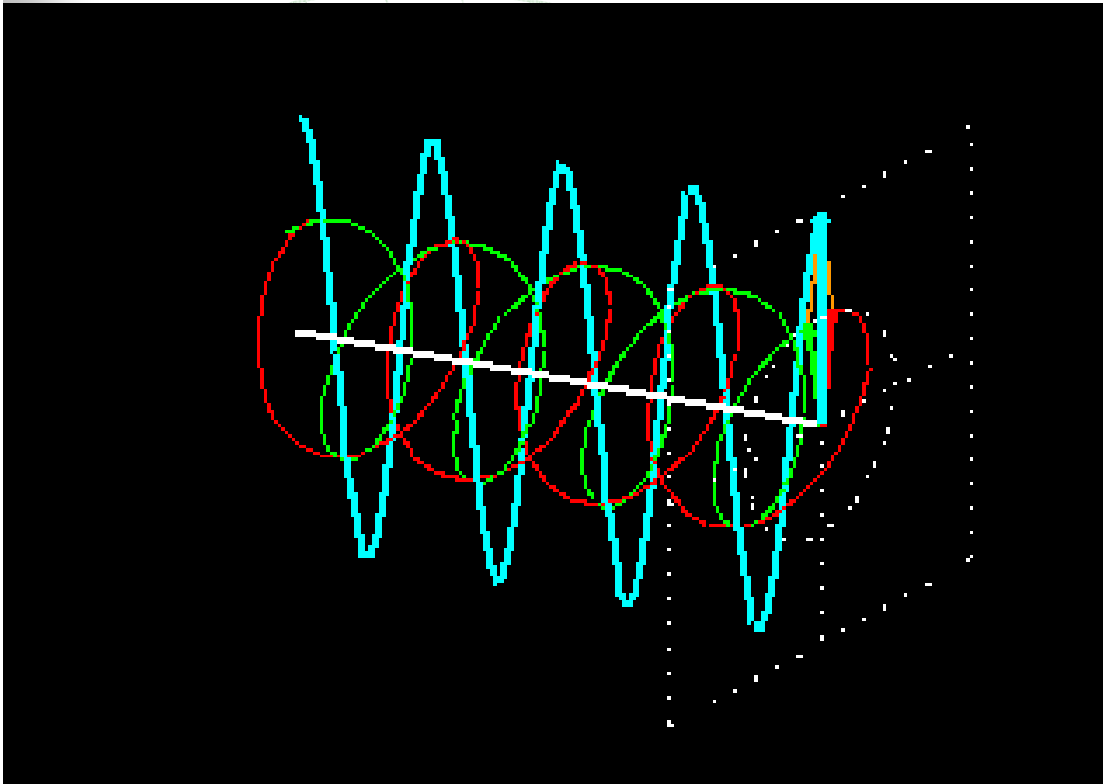
# Συνδυασμός δύο γραμμικά πολωμένων κυμάτων κάθετα μεταξύ τους με **διαφορά φάσης $-90$ μοίρες**



Κυκλικάς πολωμένο κύμα: αριστερόστροφο



## Συνδυασμός ενός δεξιόστροφου και ενός αριστερόστροφου κυκλικά πολωμένου κύματος



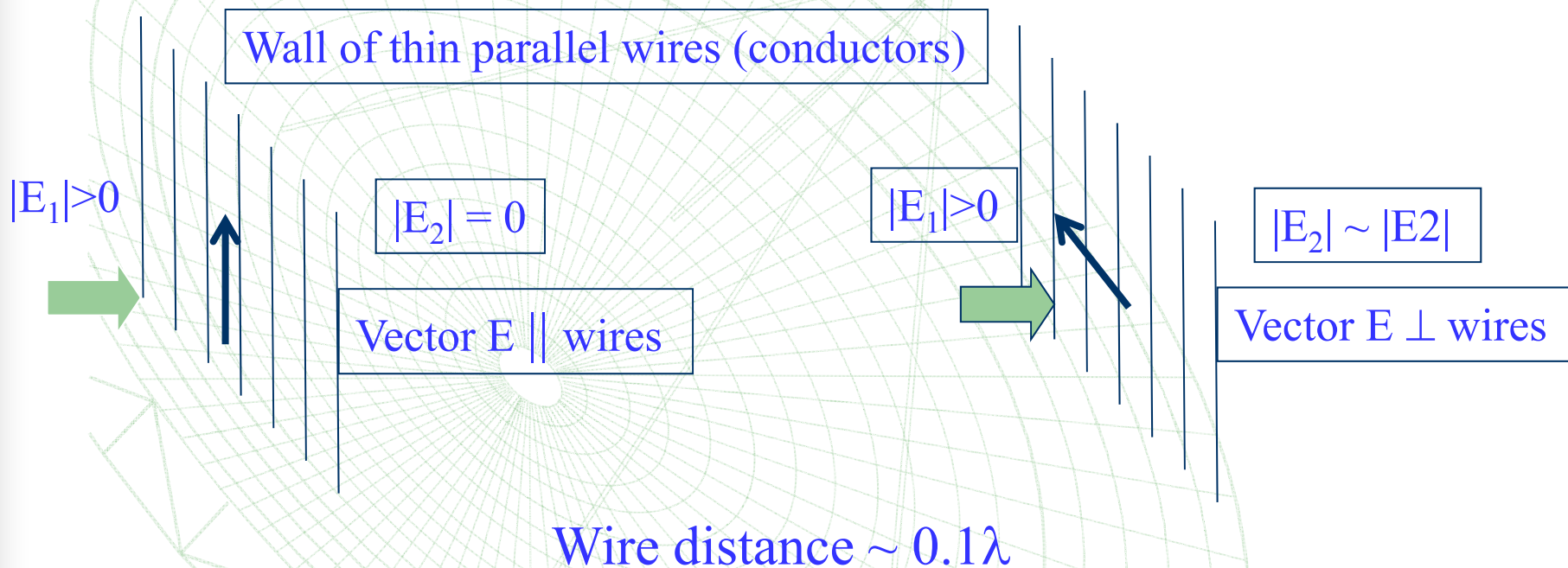
Οι δύο συνιστώσες του ΗΛΜ πεδίου έχουν ίδιο πλάτος και ίδιο μήκος κύματος:  
ένα γραμμικώς πολωμένο ΗΛΜ πεδίο

**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ:** οποιοδήποτε γραμμικώς πολωμένο κύμα μπορεί να προκύψει από το συνδυασμό ενός αριστερόστροφου και ενός δεξιόστροφου κυκλικά πολωμένου κύματος, των οποίων τα πλάτη είναι ίσα



# Πόλωση κεραίας

- Η πόλωση της κεραίας ως προς μια συγκεκριμένη διεύθυνση καθορίζεται από την πόλωση του παραγόμενου από την κεραία κύματος σε αυτή τη διεύθυνση και σε μεγάλη απόσταση

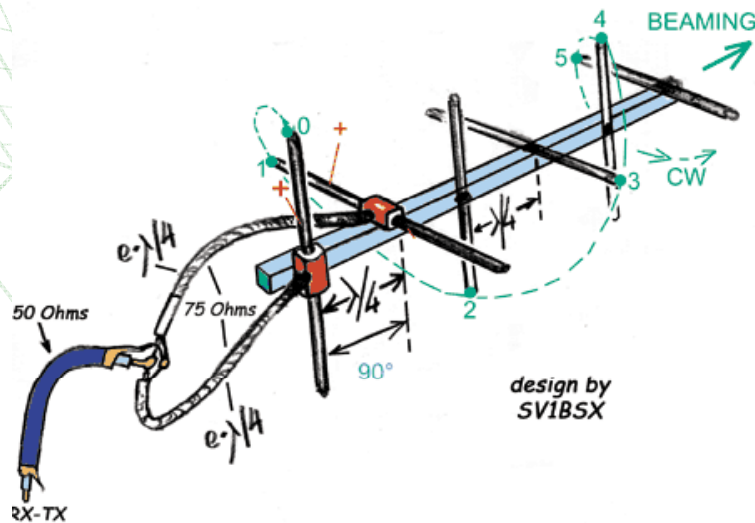
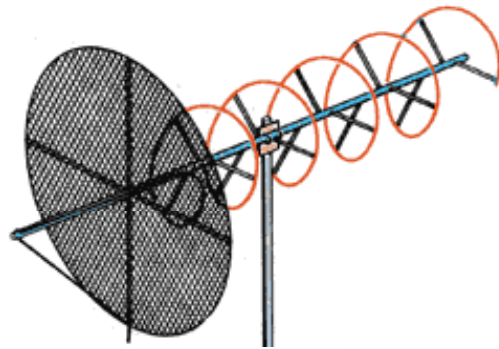




# Κεραίες κυκλικής πόλωσης

- Κυκλική Πόλωση επιτυγχάνεται με δύο κυρίως μεθόδους:

- α) με Ελικοειδείς κεραίες
- β) με "σταυρωτές Κεραίες" (crossed-Yagis antennas).





- Η ισχύς που λαμβάνει μια κεραία σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση είναι μέγιστη αν η πόλωση του προσπίπτοντος κύματος και αυτή της κεραίας έχουν: α) την ίδια αξονική αναλογία, β) την ίδια μορφή (κυκλική, ελλειπτική, γραμμική), γ) τον ίδιο χωρικό προσανατολισμό (δεξιόστροφη-αριστερόστροφη, κάθετη-οριζόντια)
- Αν η πόλωση του προσπίπτοντος κύματος είναι διαφορετική από αυτή της κεραίας λήψης τότε υπάρχουν απώλειες λόγω μη προσαρμογής των πολώσεων.
- **Ικανότητα πόλωσης**=(Ισχύς που λαμβάνεται)/(Ισχύς που θα λαμβανόταν αν υπήρχε ταίριασμα στις πολώσεις)



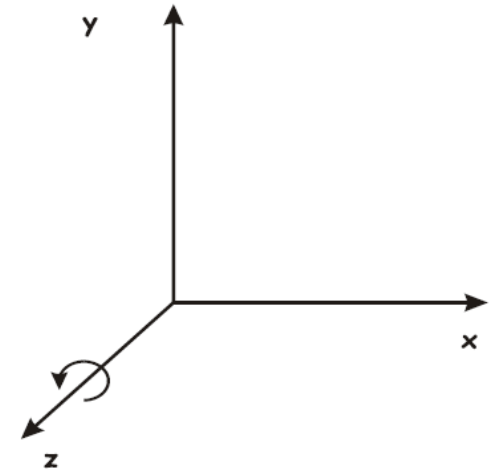
# Διάνυσμα Πόλωσης κεραίας

- Το μακρινό πεδίο οποιασδήποτε κεραίας είναι TEM
- Το μακρινό πεδίο = επίπεδο κύμα

$$\vec{E}(\theta, \phi) = E_{x0}(\theta, \phi) e^{i(\omega t - kz)} \hat{a}_x + E_{y0}(\theta, \phi) e^{i(\omega t - kz + \varphi)} \hat{a}_y$$

- Το διάνυσμα πόλωσης του, ισοδύνα το διάνυσμα πόλωσης της κεραίας που το παράγει είναι:

$$\vec{\rho}_w = \frac{E_{x0} \hat{a}_x \pm E_{y0} e^{i\varphi} \hat{a}_y}{\sqrt{E_{x0}^2 + E_{y0}^2}}$$



- $\varphi$  η διαφορά φάσης των συνιστωσών του ηλ. πεδίου
- +(-) CCW (CW) πόλωση και διάδοση στον +z άξονα
- Για διάδοση στον -z ισχύουν αντίστροφα



- Ο παρακάτω πίνακας δείχνει την σχέση που υπάρχει μεταξύ Οριζόντιας (Horizontal), Κάθετης (Vertical), Δεξιόστροφης (RHCP - Right Hand Circular Polarization) και Αριστερόστροφης Πόλωσης ( LHCP - Left Hand Circular Polarization) και την απώλεια μεταξύ τους σε dB
- Η Δεξιόστροφη (RHCP) αναφέρεται επίσης στα διάφορα βιβλία και σαν CW (ClockWise) Πόλωση και αντίστοιχα η Αριστερόστροφη (LHCP) σαν CCW (Counter ClockWise) πόλωση

### ΑΠΩΛΕΙΕΣ σε dB

	Horizontal	Vertical	RHCP	LHCP
Horizontal	0	30	3	3
Vertical	30	0	3	3
RHCP	3	3	0	30
LHCP	3	3	30	0



# Polarization Loss Factor PLF

$$\vec{E}_i = \hat{\rho}_w E_i \quad \kappa\alpha l \quad \vec{E}_a = \hat{\rho}_a E_a$$

$$\text{PLF} = |\hat{\rho}_w \cdot \hat{\rho}_a|^2 = |\cos \psi|^2$$

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

$$E_i = \hat{a}_x E_0(x, y) e^{-jkz}$$

$$E_a = (\hat{a}_x + \hat{a}_y) E(r, \theta, \phi)$$

For the incident wave

$$\hat{\rho}_w = \hat{a}_x$$

and for the antenna

$$\hat{\rho}_a = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{a}_x + \hat{a}_y)$$



$$\text{PLF} = |\hat{\rho}_w \cdot \hat{\rho}_a|^2 = \left| \hat{a}_x \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{a}_x + \hat{a}_y) \right|^2 = \frac{1}{2}$$

which in dB is equal to



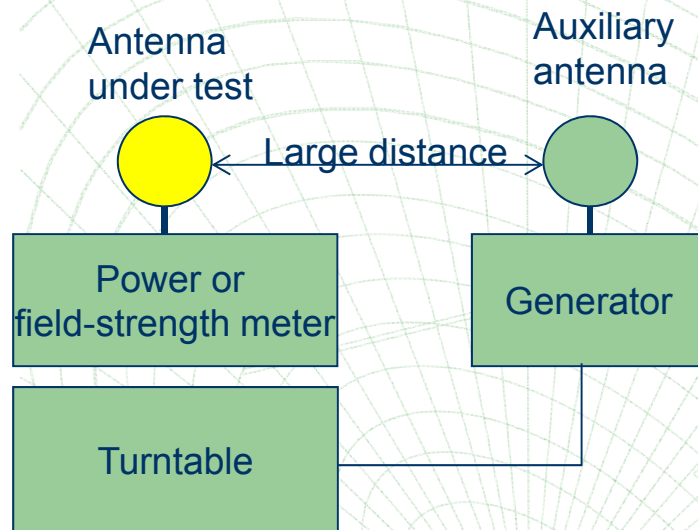


# Διάγραμμα ακτινοβολίας

- Το διάγραμμα ακτινοβολίας μια κεραίας είναι η αναπαράσταση (με εικόνα ή εξισώσεις) της εκπεμπόμενης ακτινοβολούμενης ισχύος (transmitting antenna), ή της εισερχόμενης (receiving antenna) σαν συνάρτηση των γωνιών  $\Theta, \varphi$  (γωνίες κατεύθυνσης)
- Antenna radiation pattern (*antenna pattern*):
  - Ορίζεται σε μεγάλες αποστάσεις από την κεραία, όπου η χωρική κατανομή της ακτινοβολούμενης ισχύος είναι ανεξάρτητη από την απόσταση από την πηγή ακτινοβολίας
  - Είναι ανεξάρτητο από την κατεύθυνση ροής της ισχύος: είναι το ίδιο ανεξάρτητα από το αν μια κεραία χρησιμοποιείται για εκπομπή ή λήψη
  - εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη συχνότητα και την πόλωση του radio wave radiated/ received



# Διάγραμμα ισχύος vs. Διάγραμμα πεδίου



- The power pattern and the field patterns are inter-related:

$$P(\theta, \varphi) = (1/\eta) * |E(\theta, \varphi)|^2 = \eta * |H(\theta, \varphi)|^2$$

P = power

E = electrical field component vector

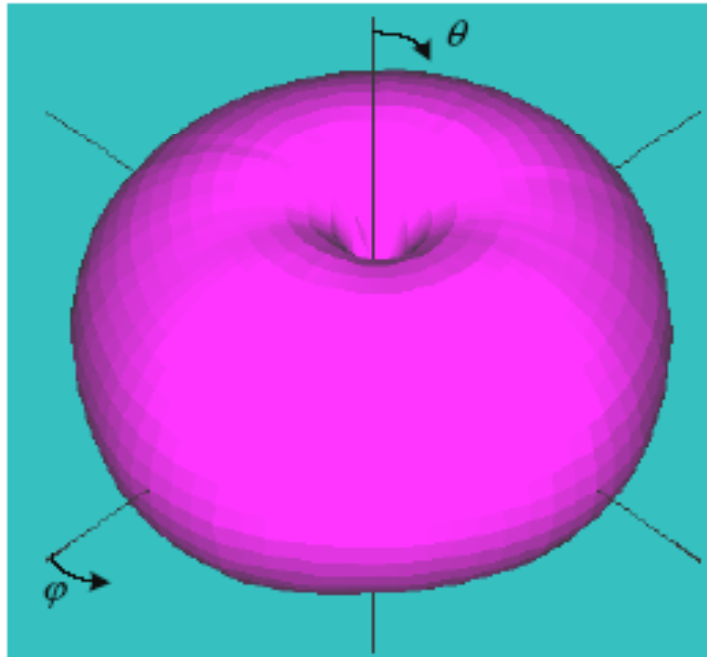
H = magnetic field component vector

$\eta$  = 377 ohm (free-space, plane wave impedance)

- The *power pattern* is the measured (calculated) and plotted received power  $|P(\theta, \varphi)|$  at a constant (large) distance from the antenna
- The *amplitude field pattern* is the measured (calculated) and plotted electric (magnetic) field intensity,  $|E(\theta, \varphi)|$  or  $|H(\theta, \varphi)|$  at a constant (large) distance from the antenna
- Κανονικοποιημένο διάγραμμα ως προς τις max τιμές
  - The power pattern and the amplitude field pattern are the same when computed and when plotted in dB



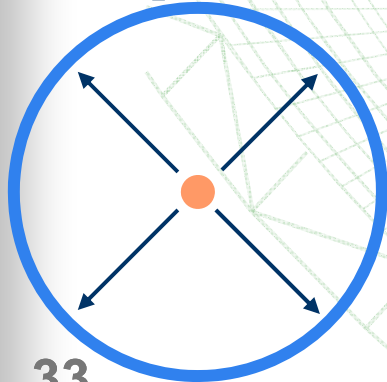
# 3-D διάγραμμα ακτινοβολίας



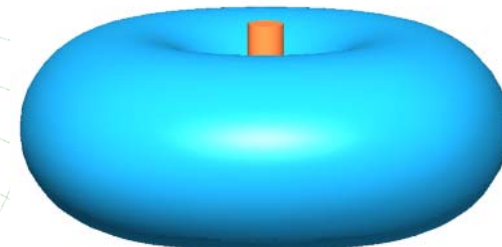
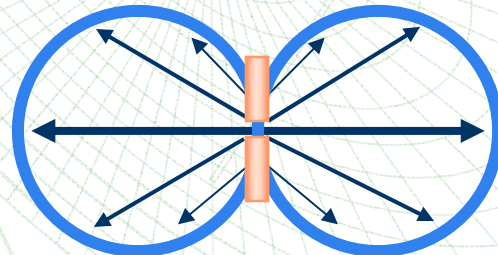
3-D pattern

- Το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραίας είναι τρισδιάστατο 3-D
- Στο 3-D plot του διαγράμματος ακτινοβολίας οι γωνίες  $\theta$  and  $\phi$  μεταβάλλονται, οπότε είναι δύσκολο και να το φτιάξουμε αλλά και να το ερμηνεύσουμε

Top view

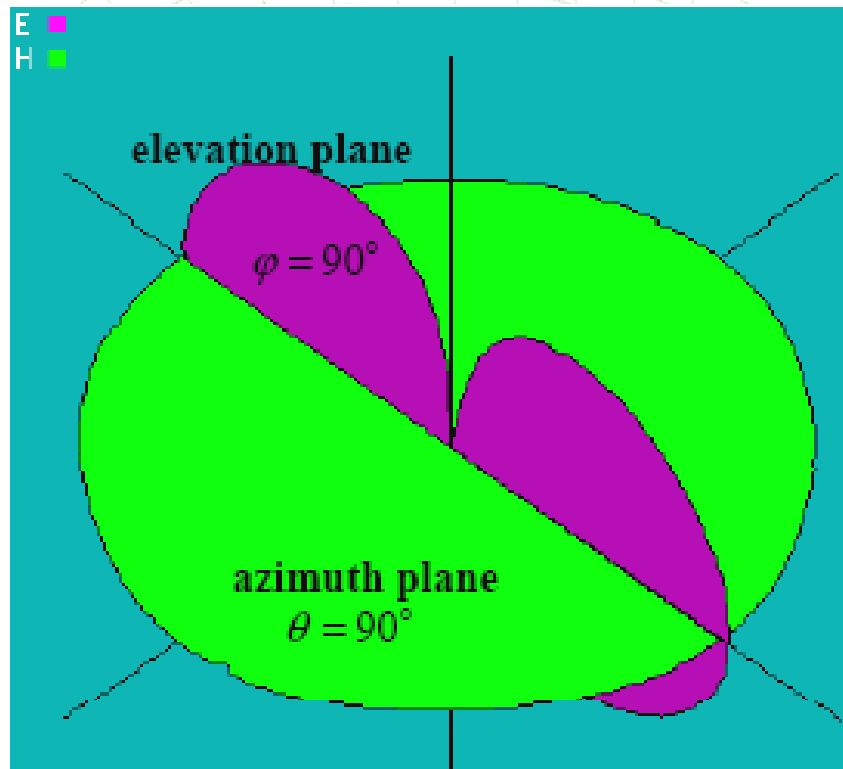


Side view





# 2-D διάγραμμα



Two 2-D patterns

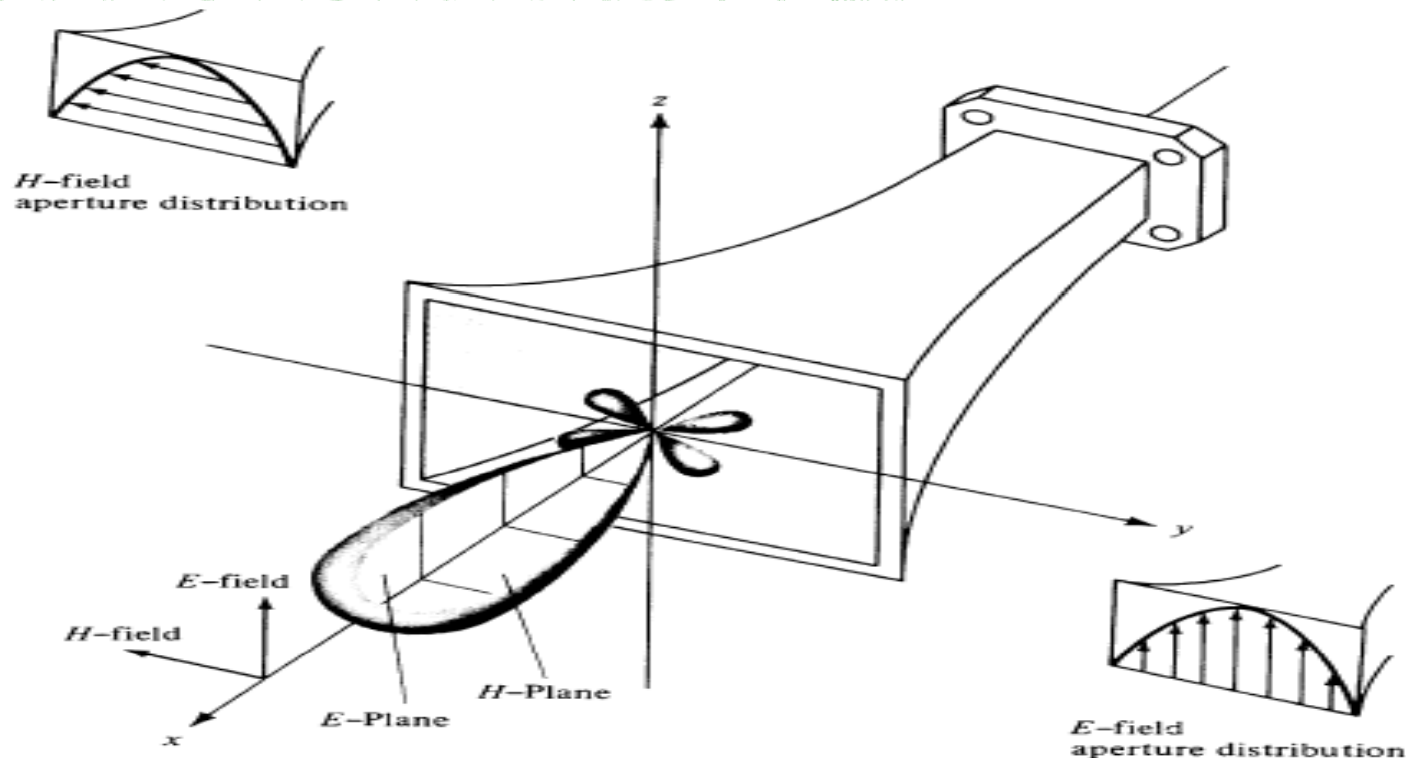
- Συνήθως το διάγραμμα ακτινοβολίας παριστάνεται ως 2-D plot, όπου μεταβάλλεται μόνο μια από τις γωνίες κατεύθυνσης  $\theta$  ή  $\varphi$
- Τομή του 3-D διαγράμματος με δεδομένο επίπεδο
  - usually it is a  $\theta = \text{const}$  plane or a  $\varphi = \text{const}$  plane that contains the pattern's maximum

Source: NK Nikolova



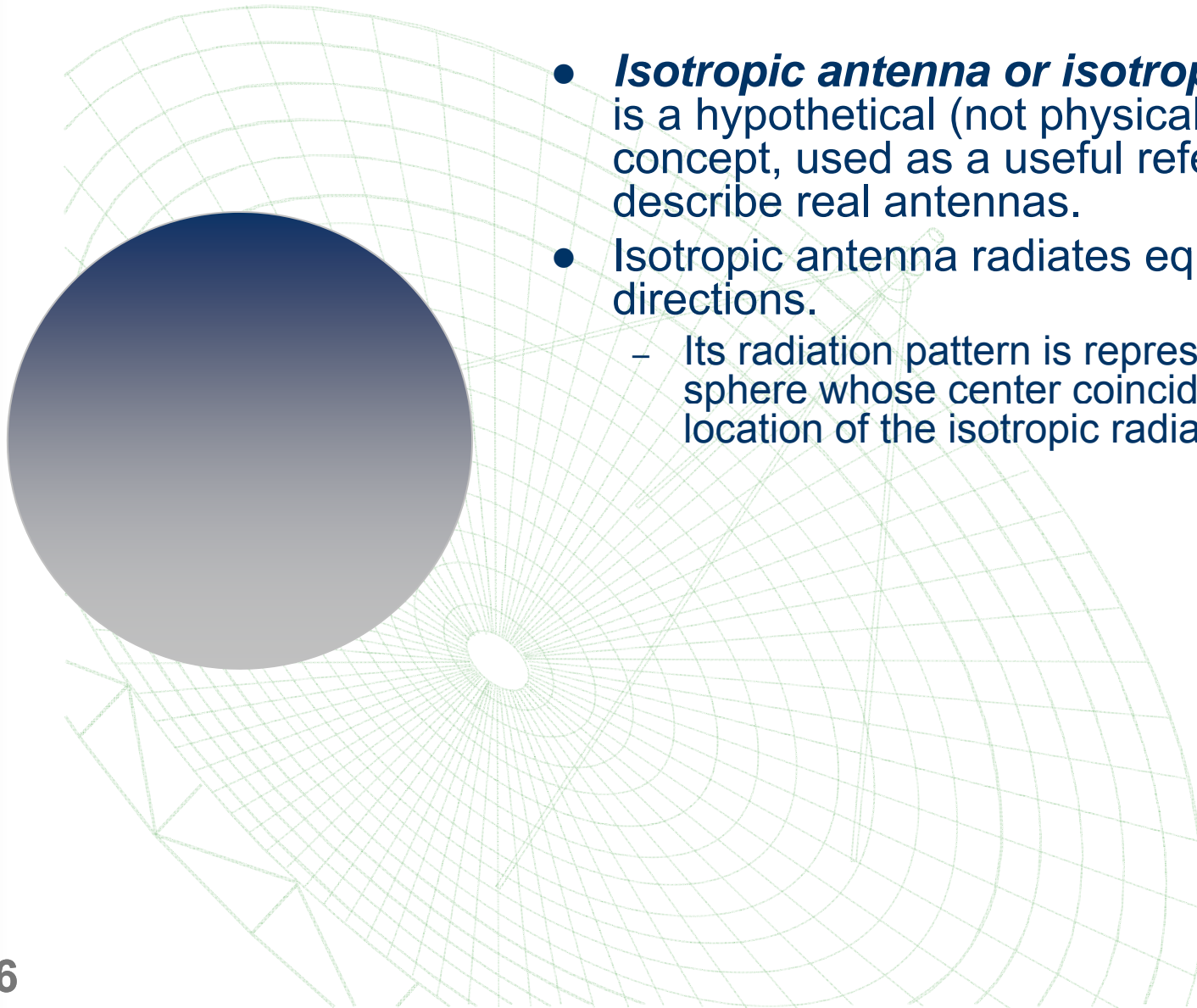
# Πρωτεύοντα (Principal) διαγράμματα

- Principal patterns are the 2-D patterns of linearly polarized antennas, measured in 2 planes
  1. the ***E-plane***: a plane parallel to the  $E$  vector and containing the direction of maximum radiation, and
  2. the ***H-plane***: a plane parallel to the  $H$  vector, orthogonal to the  $E$ -plane, and containing the direction of maximum radiation





# Ισοτροπική (Isotropic) κεραία



- ***Isotropic antenna or isotropic radiator*** is a hypothetical (not physically realizable) concept, used as a useful reference to describe real antennas.
- Isotropic antenna radiates equally in all directions.
  - Its radiation pattern is represented by a sphere whose center coincides with the location of the isotropic radiator.



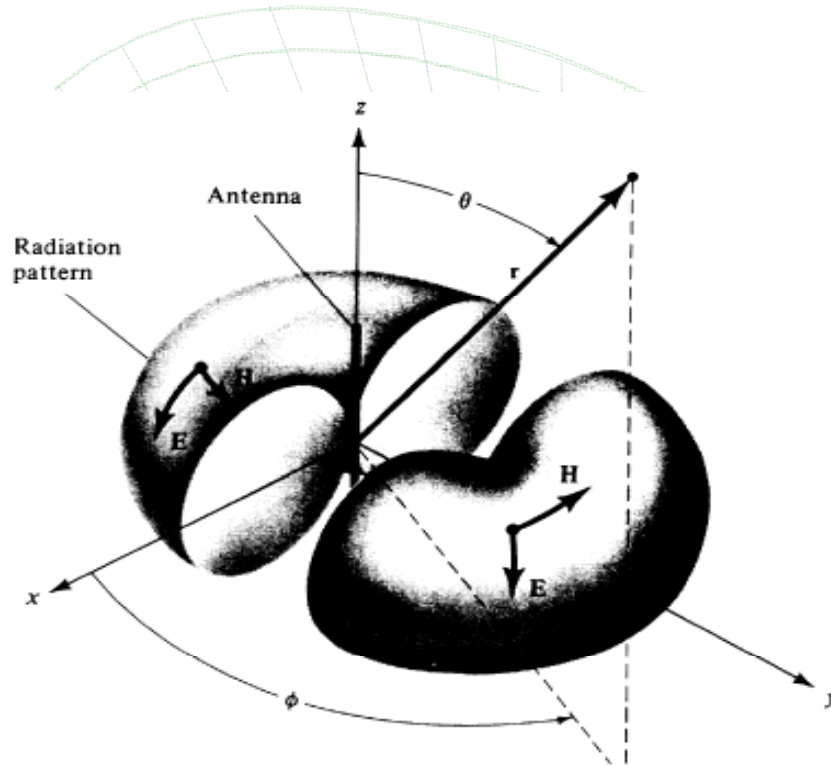
# Κατευθυντική (Directional) κεραία

- ***Directional antenna*** is an antenna, which radiates (or receives) much more power in (or from) some directions than in (or from) others.
  - Note: Usually, this term is applied to antennas whose directivity is much higher than that of a half-wavelength dipole.

Source: NK Nikolova



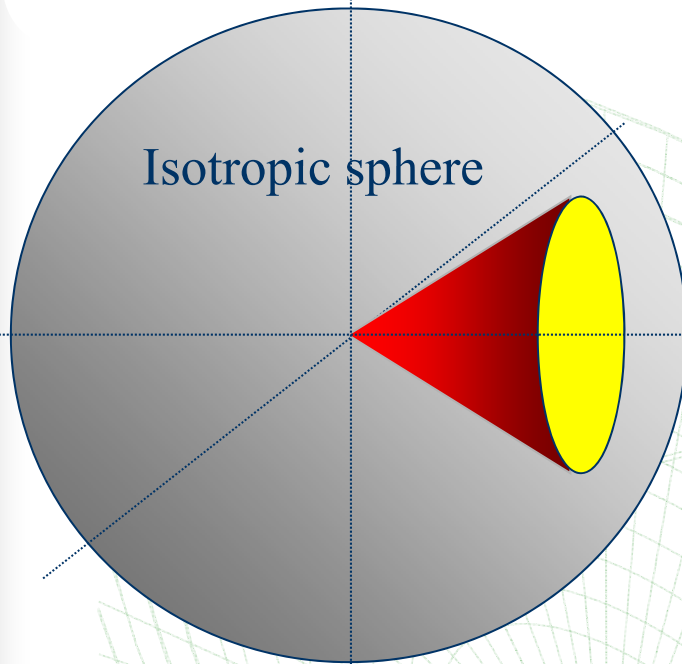
# Πανκατευθυντική (Omnidirectional) κεραία



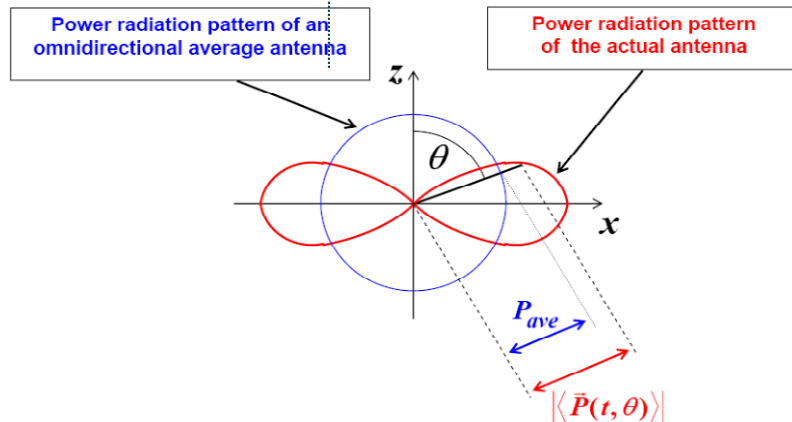
- Κεραία με μη κατευθυντικό διάγραμμα σε ένα επίπεδο
  - Είναι συνήθως κατευθυντική στα άλλα επίπεδα



# Ανισοτροπικές πηγές

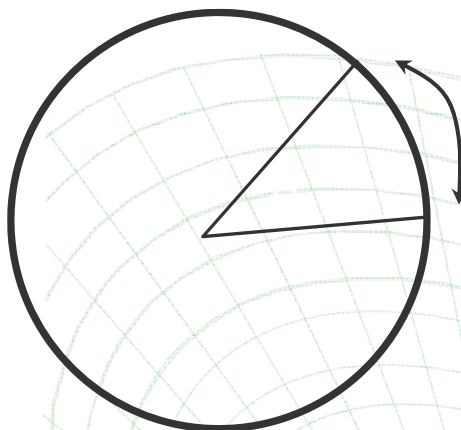


- Every real antenna radiates more energy in some directions than in others (i.e. has directional properties)
- Κατευθυντικότητα
- Idealized example of directional antenna: the radiated energy is concentrated in the yellow region (cone).
- Directive antenna gain: the power flux density is increased by (roughly) the inverse ratio of the yellow area and the total surface of the isotropic sphere
  - Gain in the field intensity may also be considered - it is equal to the square root of the power gain.
  - Gain generally has to do with the radiation pattern of the antenna, that is, the narrower the main beam, and the smaller the back beam and side beam, the higher the gain.



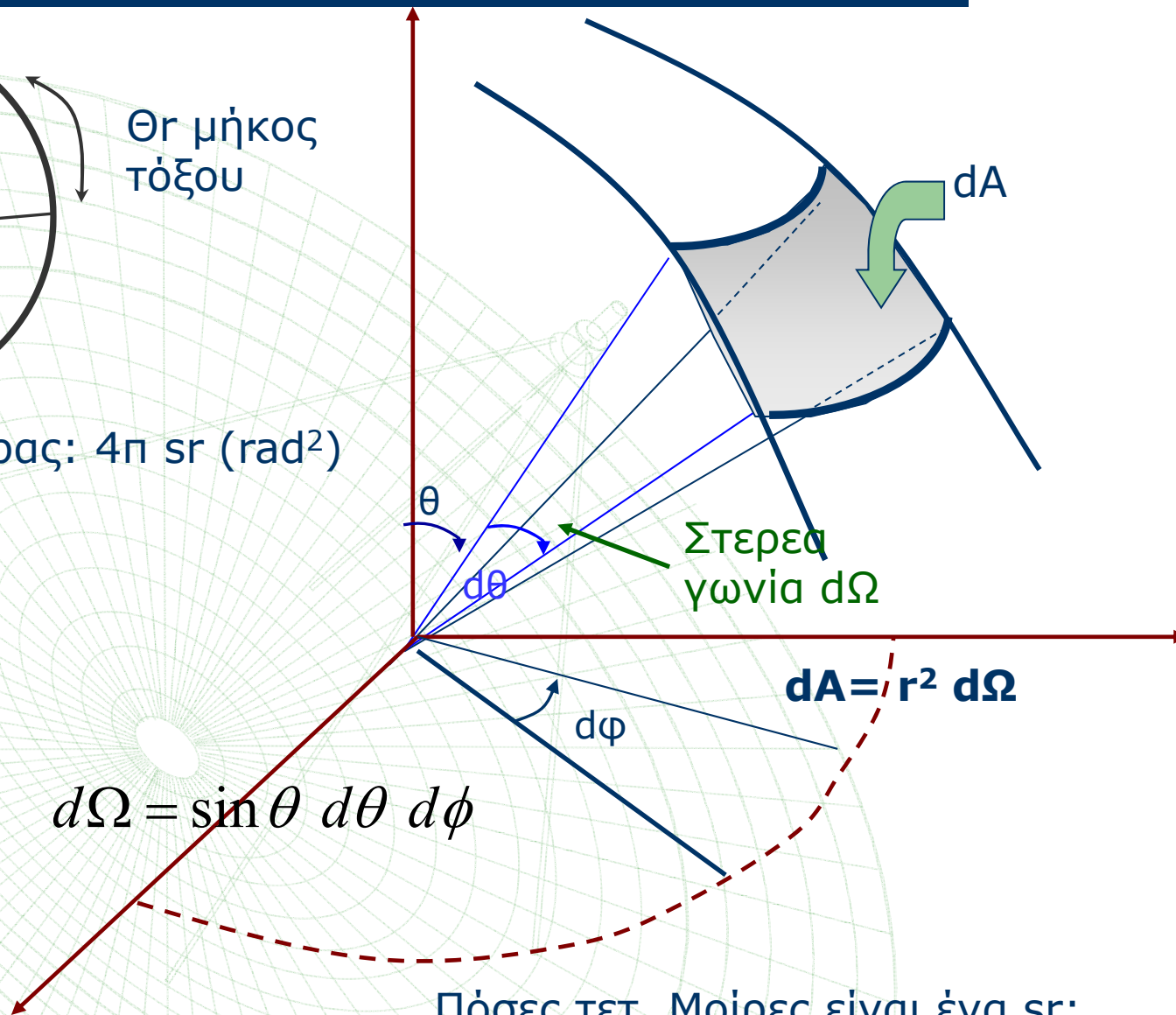


# Στερεά γωνία Ω



$\theta r$  μήκος τόξου

Στερεά γωνία σφαίρας:  $4\pi$  sr ( $\text{rad}^2$ )



Στερεά γωνία  $d\Omega$

$$dA = r^2 d\Omega$$

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

Πόσες τετ. Μοίρες είναι ένα sr;  
= 3282,8 τετ. μοίρες



# Πυκνότητα ακτινοβολούμενης ισχύος

Στιγμιαία πυκνότητα ισχύος:

$$w = \mathcal{E} \times \mathcal{H} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \} + \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ \mathbf{E} \times \mathbf{H} e^{j2\omega t} \} \quad [\text{W/m}^2]$$

Averaged Power Density

$$W = \operatorname{Re} \{ \mathbf{S} \} = \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{2} \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \right\}$$

Pointing

Vector  $\mathbf{S}$

ιδανικό δίπολο  $\Delta z$

$$\operatorname{Re} \{ \mathbf{S} \} = \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \mathbf{r} & \boldsymbol{\theta} & \boldsymbol{\phi} \\ \mathbf{E}_r & \mathbf{E}_\theta & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{H}_\phi^* \end{bmatrix} \right\} \quad \operatorname{Re} \{ \mathbf{S} \} = \frac{I^2}{8} \eta \left( \frac{\Delta L}{\lambda} \right)^2 \frac{\sin^2 \theta}{r^2}$$



# Ολική ακτινοβολούμενη ισχύς

Μέση ακτινοβολούμενη ισχύς από επιφάνεια  $dA$ :  $dP = \text{Re}\{\mathbf{S}\} \cdot dA$

$$dP = \text{Re}\{\mathbf{S}\} \cdot dA = \text{Re}\{\mathbf{S}\} \cdot (r^2 \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi)$$

Η ολική μέση τιμή της ακτινοβολούμενης ισχύος είναι:

$$P_r = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \text{Re}\{\mathbf{S}\} \cdot (r^2 \sin \theta) \cdot d\theta \cdot d\phi$$

Ισοτροπική πηγή

$$P_r = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \text{Re}\{\mathbf{S}\} \cdot (r^2 \sin \theta) \cdot d\theta \cdot d\phi = 4\pi r^2 W_{r0}$$

Ιδανικό δίπολο

$$P_r = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{I^2}{8} \eta \left( \frac{\Delta L}{\lambda} \right)^2 \sin^3 \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \longrightarrow P_r = \frac{\pi \eta}{3} I^2 \left( \frac{\Delta L}{\lambda} \right)^2$$



# Ακτινοβολούμενη ισχύς και πλάτος πεδίου

$$P_r = \frac{|E|^2}{Z_0} \rightarrow |E| = \sqrt{P_r Z_0}$$

$$|E| = \sqrt{E_\theta^2 + E_\phi^2}$$

$$|H| = \frac{|E|}{Z_0}$$

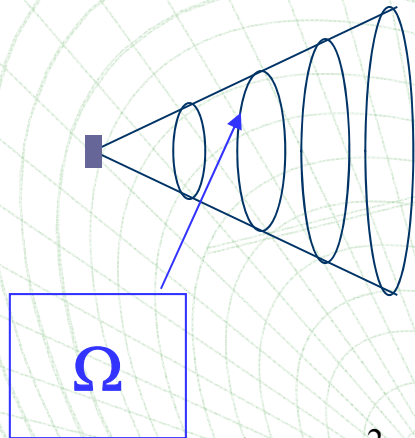
$$Z_0 = 377 \Omega \text{ [free space-far field]}$$



# Ένταση ακτινοβολίας $U(\theta, \varphi)$

Ορίζεται ως:

... Η ακτινοβολούμενη ισχύς  $P_r$  ανά στερεά γωνία  $\Omega$ . Είναι ανεξάρτητη του  $r$



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

$$U = \frac{dP_r}{d\Omega} = \frac{\text{Re}\{\mathbf{S}\} \cdot r^2 \cdot d\Omega}{d\Omega} \Rightarrow U = \text{Re}\{\mathbf{S}\} \cdot r^2$$

$$U = \text{Re}\{\mathbf{S}\} \cdot r^2$$

Ισοτροπική πηγή

$$P_r = \iint_{\Omega} U_0 d\Omega = 4\pi U_0 \quad \Rightarrow \quad U_0 = \frac{P_r}{4\pi}$$

Ιδανικό δίπολο

$$U = \frac{\eta}{8} I^2 \left( \frac{\Delta L}{\lambda} \right)^2 \sin^2 \theta$$



# Ένταση ακτινοβολίας και ολική ακτινοβολούμενη ισχύς

- Η ολική ακτινοβολούμενη ισχύς μιας κεραίας προκύπτει ως:

$$P_r = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \cdot d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi$$

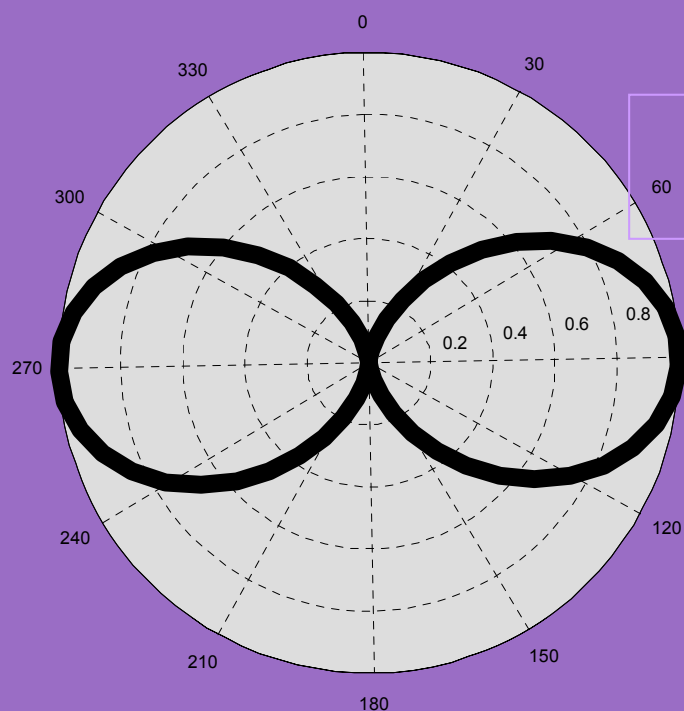


# Ένταση ακτινοβολίας

Αφού η Radiation Intensity  $U$  είναι ανεξάρτητη του  $r$  και εξαρτάται μόνο από ενδογενείς παραμέτρους της κεραίας

χρησιμοποιείται για να περιγράψει το

## Διάγραμμα ακτινοβολίας



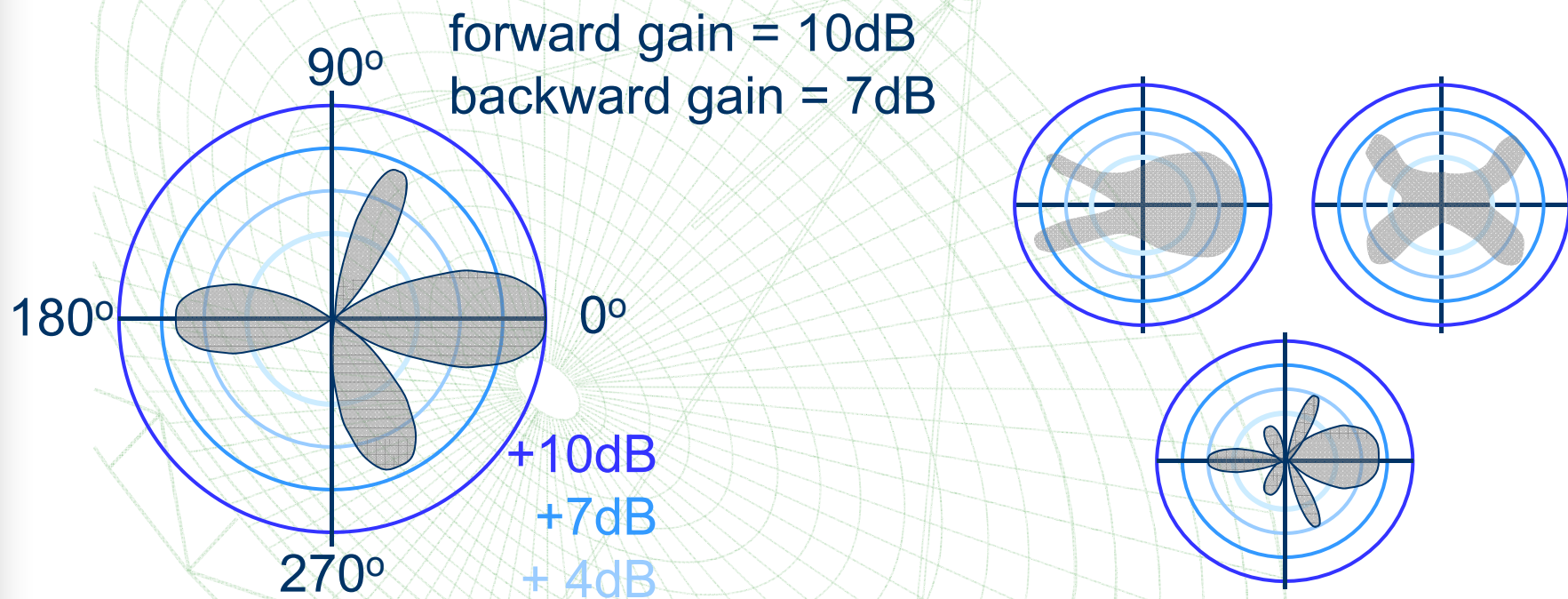
Ιδανικό δίπολο





# Πολικά διαγράμματα (Polar Plots)

- ✓ shows how field strength is shaped
- generally  $0^\circ$  aligned with major physical axis of antenna
- most plots are relative scale (dB)
  - maximum signal strength location is 0 dB reference
  - closer to center represents weaker signals





# Beamwidth, Lobes & Nulls

**Lobe:** area of high signal strength

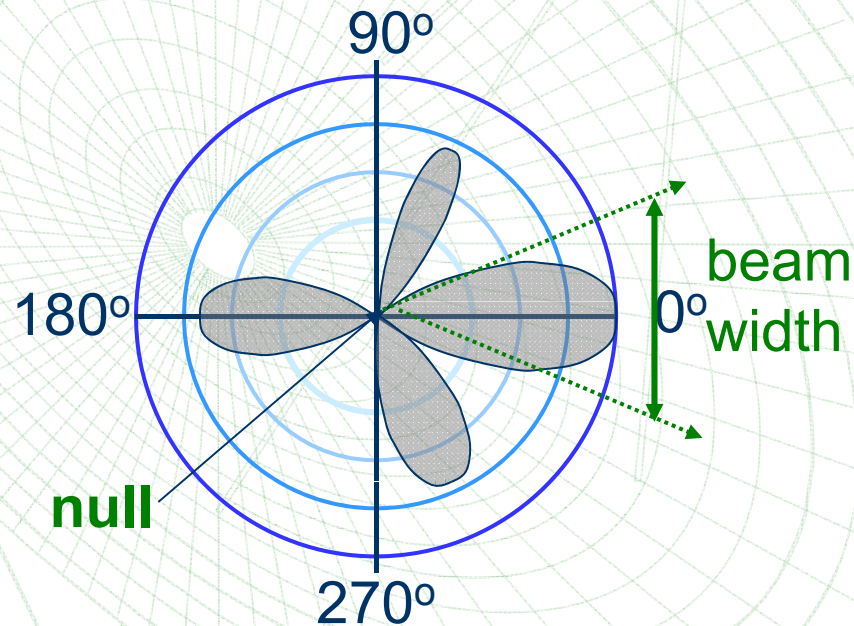
- main lobe
- secondary lobes

**Nulls:** area of very low signal strength

**Beamwidth:** total angle where relative signal power is 3dB below peak value of main lobe

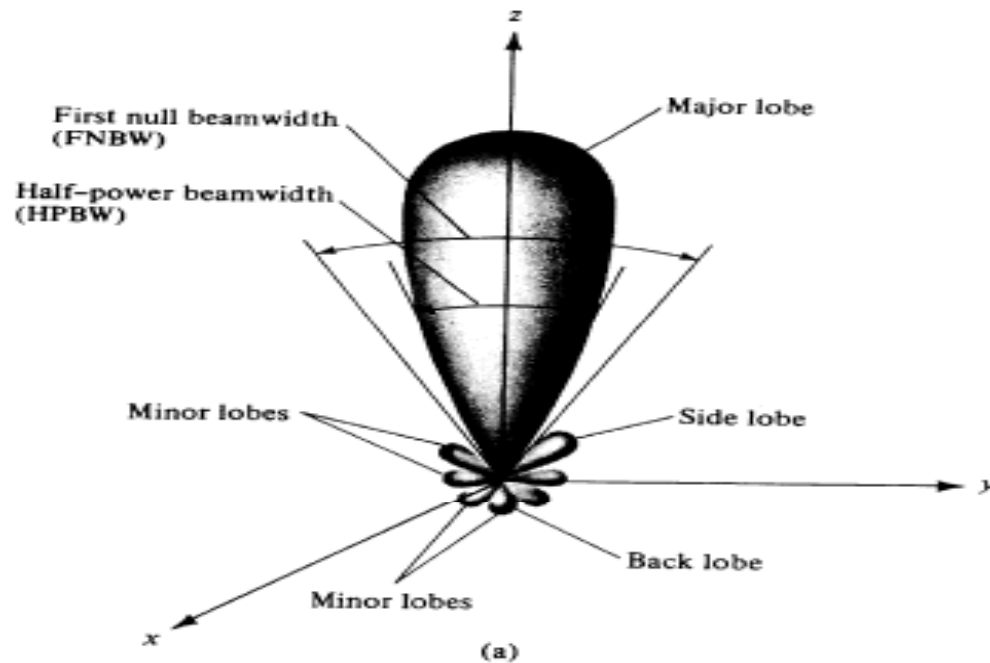
- can range from  $1^\circ$  to  $360^\circ$

Beamwidth & Lobes indicate sharpness of pattern focus





# Λοβοί (lobes)



*Pattern lobe* is a portion of the radiation pattern with a local maximum

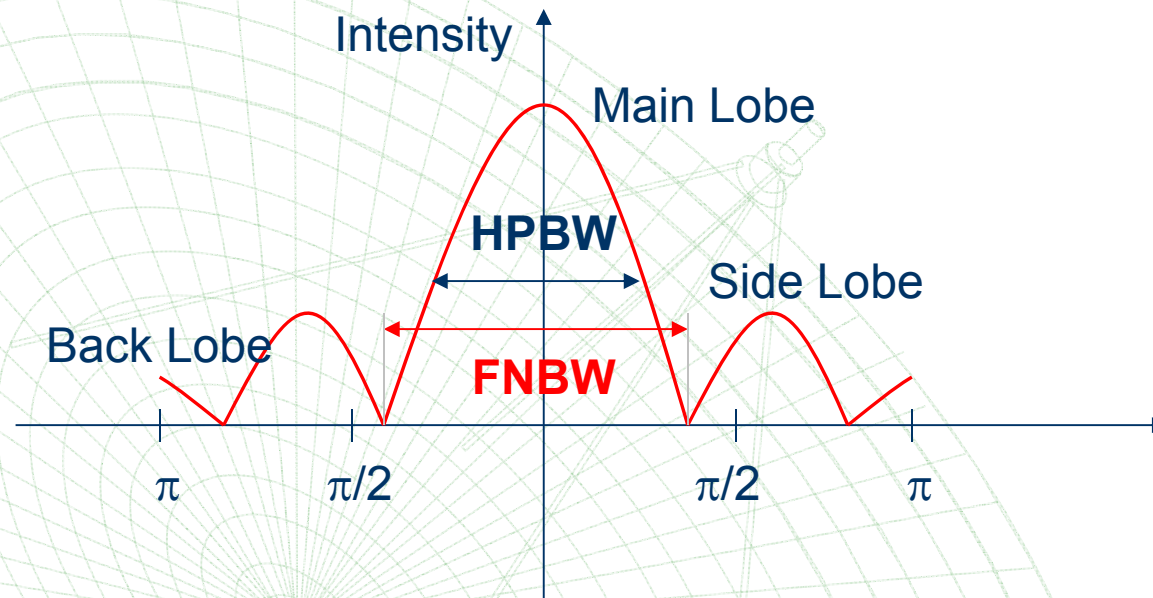
Lobes are classified as: major, minor, side lobes, back lobes.

Source: NK Nikolova



# Διαγράμματα ακτινοβολίας

Rolled out generic Radiation Pattern

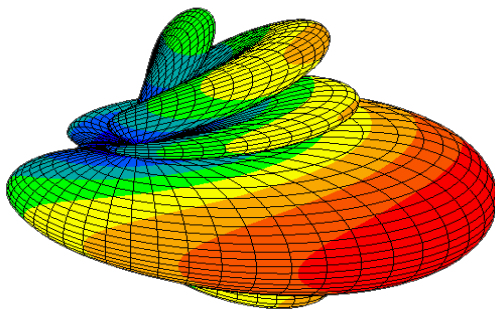
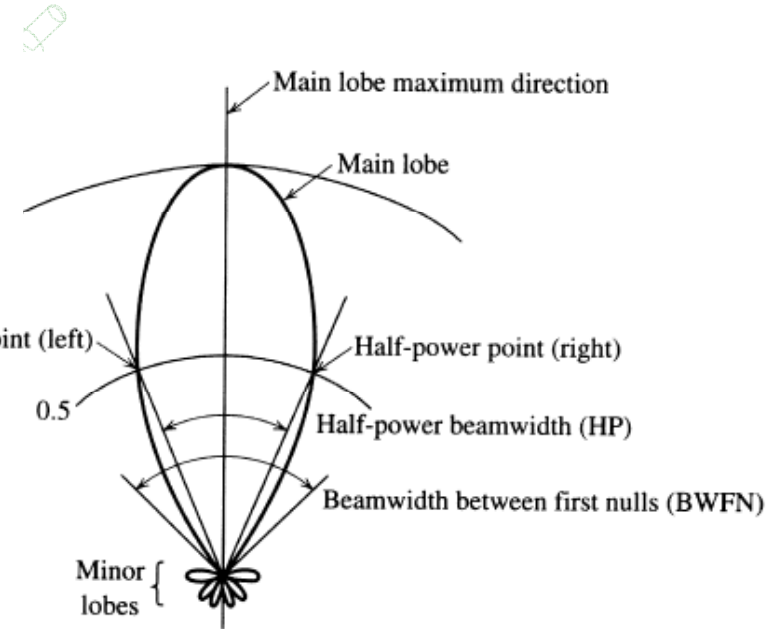
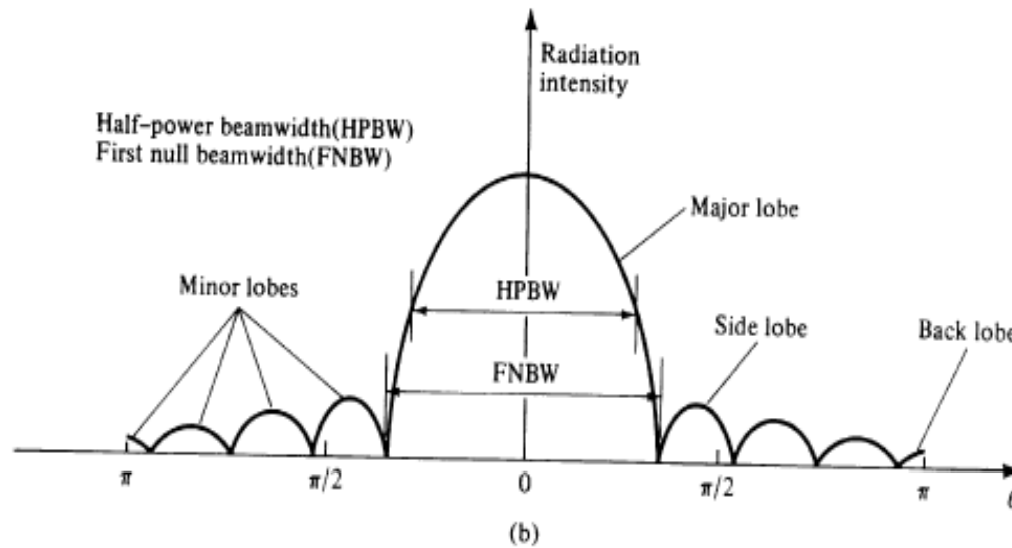


**HPBW** = Half Power Beamwidth

**FNBW** = First Null Beamwidth



# Λοβοί και άνοιγμα δέσμης



HPBW: describes the antenna resolution properties

»Important in radar technology, radioastronomy, etc.

»Often  $FNBW \approx 2 * HPBW$



# Λογος εμπροσθεν/οπισθεν λοβού

- **F/B ratio:** μια άλλη σημαντική παράμετρος που χαρακτηρίζει μια κεραία ο λόγος F/B (Front to back ratio)
- Όταν ευθυγραμμίσουμε την κεραία μας με την πηγή (αναμεταδότη), θα λάβουμε ένα ποσοστό σήματος. Αν στρέψουμε την κεραία αντίθετα (κατά 180 μοίρες), θα λάβουμε και πάλι ένα μικρότερο σήμα από την ίδια πηγή. Ο λόγος των δύο αυτών σημάτων είναι το F/B
- Πρόκειται για μία σημαντική παράμετρο, που καθορίζει το ποσοστό απόρριψης ανεπιθύμητων σημάτων που προέρχονται από την αντίθετη κατεύθυνση από την κεραία (θεωρητικά θα έπρεπε να ήταν μηδέν)
- Εκφράζεται σε dB [F/B <20dB typical]



# Μέση ένταση ακτινοβολίας $U_{ave}$

- Ορίζεται ως η ένταση ακτινοβολίας  $U_0$  **ισοτροπικής πηγής** που έχει την ίδια ισχύ ακτινοβολίας  $P_r$  με την κεραία

## ισοτροπική πηγή

“... κεραία που ακτινοβολεί την ίδια ισχύ προς όλες τις κατευθύνσεις.”

**It is a purely hypothetical radiator!!!!**

Radiation Intensity  $U_0$



$$U_{ave} = U_0 = \frac{P_r}{4\pi}$$

Ιδανικό δίπολο

$$U_0 = \frac{\eta}{12} I^2 \left( \frac{\Delta L}{\lambda} \right)^2$$



# Κατευθυντική απολαβή $g(\theta, \varphi)$

- Ορίζεται ως ο λόγος:
- Είναι συνάρτηση της διεύθυνσης

$$g(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_0}$$

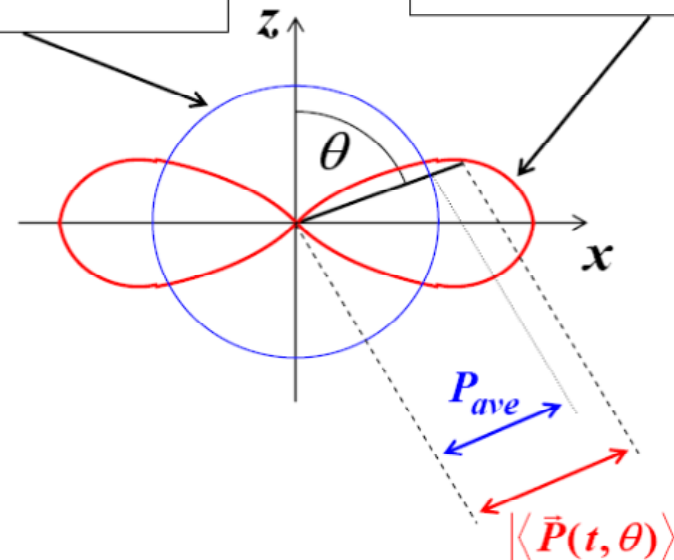
$$g = \frac{U}{U_0} = 4\pi \frac{U}{P_r}$$

Ιδανικό δίπολο

$$g(\theta) = 1.5 \cdot \sin^2 \theta$$

Power radiation pattern of an omnidirectional average antenna

Power radiation pattern of the actual antenna



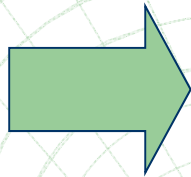




# Κατευθυντικότητα D

- Ορίζεται ως η μέγιστη τιμή του g:

$$D = \frac{U_{\max}}{U_0} = 4\pi \frac{U_{\max}}{P_r}$$



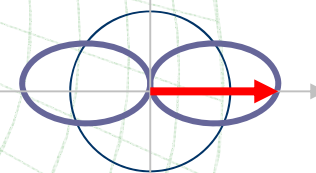
$$D = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{U(\theta, \phi)}{U_{\max}(\theta, \phi)} d\Omega}$$

$$\Omega_A = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{U(\theta, \phi)}{U_{\max}(\theta, \phi)} d\Omega \approx \theta_{HP} \phi_{HP} \quad \text{Στερεά γωνία δέσμης } \Omega_A \text{ κεραίας}$$

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A} = \frac{4\pi}{\Theta_{HPBW} \Phi_{HPBW}} = \frac{4\pi(180/\pi)^2}{\Theta_{HPBW} \Phi_{HPBW}} = \frac{41.253}{\Theta_{HPBW} \Phi_{HPBW}}$$

Ιδανικό δίπολο

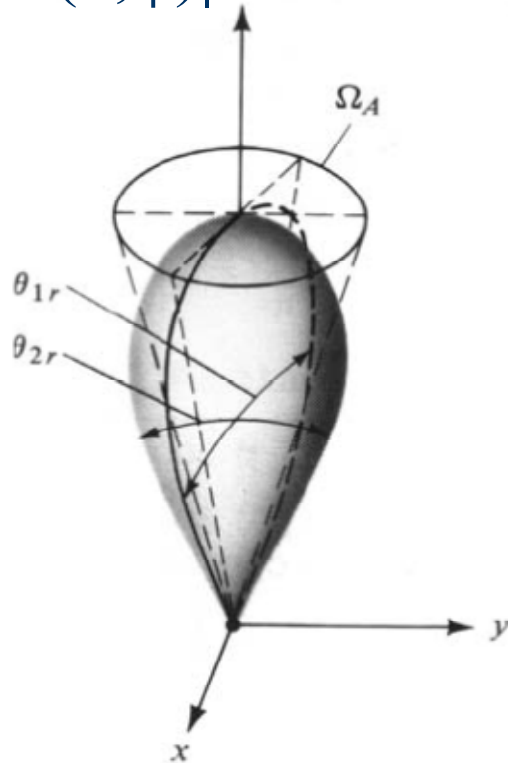
$$D = 1.5$$



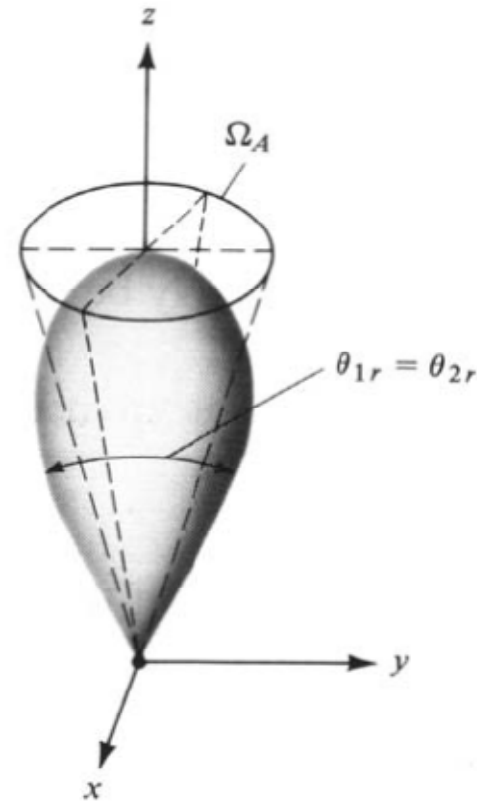


## Στερεά γωνία δέσμης $\Omega_A$ κεραίας

είναι η στερεά γωνία εντός της οποίας θα εκπεμπόταν όλη η ισχύς αν η κεραία εξέπεμπε με σταθερή ένταση ακτινοβολίας η οποία είναι ίση με  $U(\theta, \varphi)|_{\max}$  δεδομένου ότι  $P_r = U(\theta, \varphi)|_{\max} \times \Omega_A$



(a) Nonsymmetrical pattern



(b) Symmetrical pattern



# Απόδοση ακτινοβολίας $e_c$

- Ο ορισμός της κατευθυντικότητας βασίζεται μόνο στην μορφή του διαγράμματος ακτινοβολουμένης ισχύος και δεν περιγράφει την ικανότητα της κεραίας να ακτινοβολεί την ισχύ που της προσφέρεται
- $e_c$  : ο λόγος της ισχύος που ακτινοβολεί η κεραία  $P_r$  προς την ισχύ στην είσοδό της  $P_{in}$
- The radiation efficiency  $e_c$  indicates how efficiently the antenna uses the RF power

$$e_c = \frac{P_r}{P_{input}} = \frac{P_r}{P_r + P_{Loss}}$$

Ιδανικό δίπολο  
Απώλειες επιδερμικού φαινομένου

$$R_{ohm} = \frac{L}{2\pi a} \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}$$

$$e_c = \frac{R_r}{R_r + R_{loss}} = \left[ 1 + \frac{\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}}{1578\pi} \left(\frac{\lambda}{a}\right) \left(\frac{\lambda}{L}\right) \right]^{-1}$$



# Απολαβή ισχύος $G(\theta, \phi)$

- Ποσοτικοποιεί την ικανότητα της κεραίας να μετατρέπει την αποδιδόμενη σε αυτή ισχύ, σε ακτινοβολία

$$G = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{\theta, \text{input}}} = 4\pi \frac{U}{P_{\text{input}}}$$

Ένταση ακτινοβολίας  
ιστροπικής πηγής που  
εκπέμπει ισχύ ίση με  $P_{\text{input}}$

$$G_{\text{max}} = 4\pi \frac{U_{\text{max}}}{P_{\text{input}}}$$

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{\text{input}}} = 4\pi \frac{g(\theta, \phi) \frac{P_r}{4\pi}}{P_{\text{input}}} = g(\theta, \phi) \frac{P_r}{P_{\text{input}}}$$

$$e_c = \frac{G}{g} = \frac{G_{\text{max}}}{D}$$

**Βαθμός απόδοσης:** Ορίζεται ως ο λόγος της εκπεμπόμενης ισχύος προς την ισχύ εισόδου και καταλήγει να εκφράζει το λόγο κέρδους προς κατευθυντικότητα

• **radiation efficiency**

$e_c = (0.8 - 0.9)$  ΤΥΠΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ

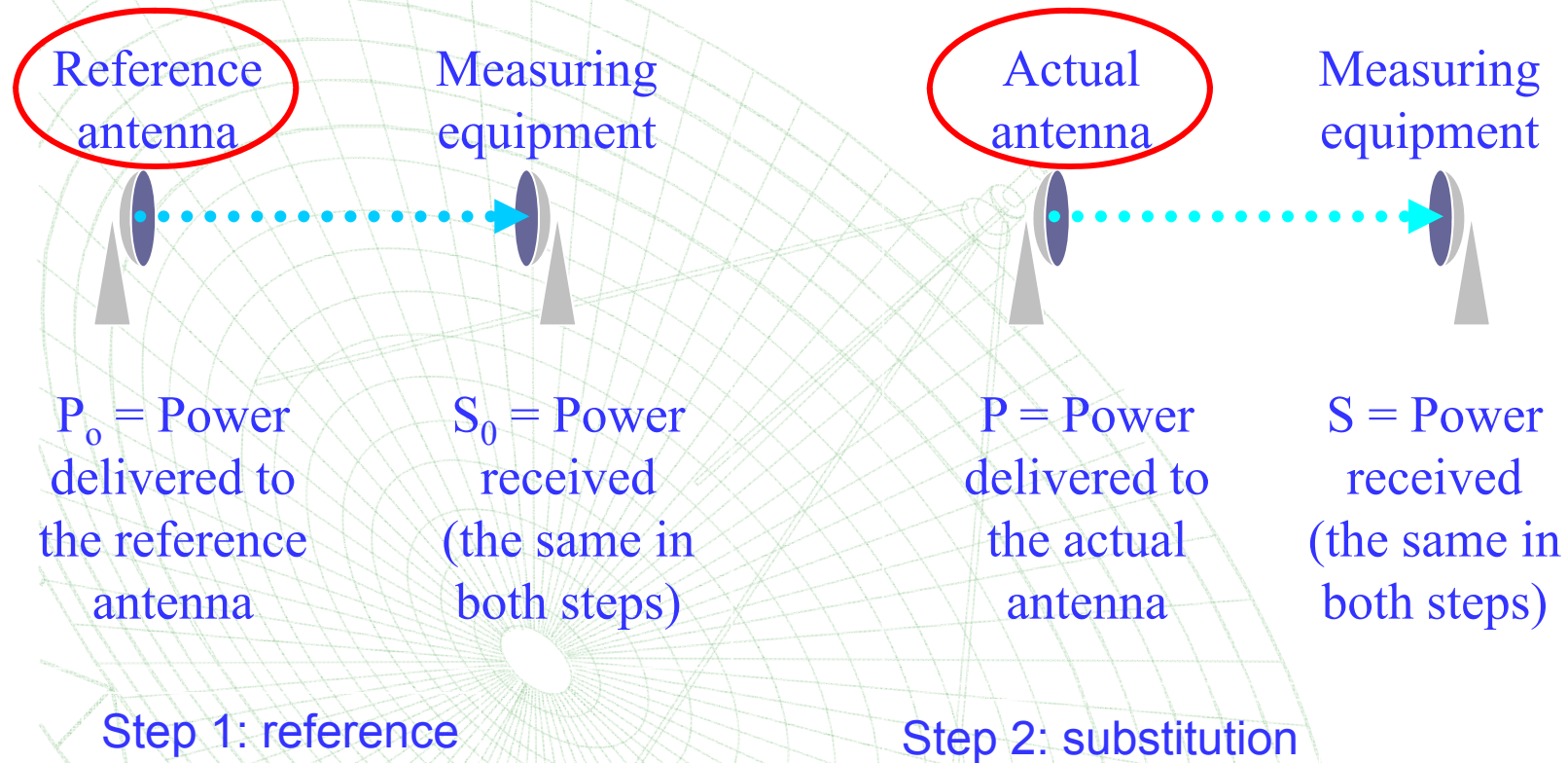


## ΣΥΝΕΠΩΣ.....

- Απολαβή ή Κέρδος μιας κεραίας: ορίζεται ως ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας προς κάποια δεδομένη κατεύθυνση ( $\theta, \varphi$ ), προς την ένταση ακτινοβολίας που θα προέκυπτε αν η κεραία ήταν ισοτροπική με απόδοση 100% και δεχόταν την ίδια ισχύ εισόδου
- Ορίζεται, δηλαδή, με παρόμοιο τρόπο με την κατευθυντικότητα, μόνο που αντί της ισχύος εκπομπής έχουμε την ισχύ εισόδου της κεραίας (ισχύς εκπομπής  $W_{\text{rad}}$  + ισχύς απωλειών  $W_{\text{Loss}}$  ) γι' αυτό και **είναι ένα άμεσα μετρήσιμο μέγεθος**



# Μέτρηση του gain της κεραίας

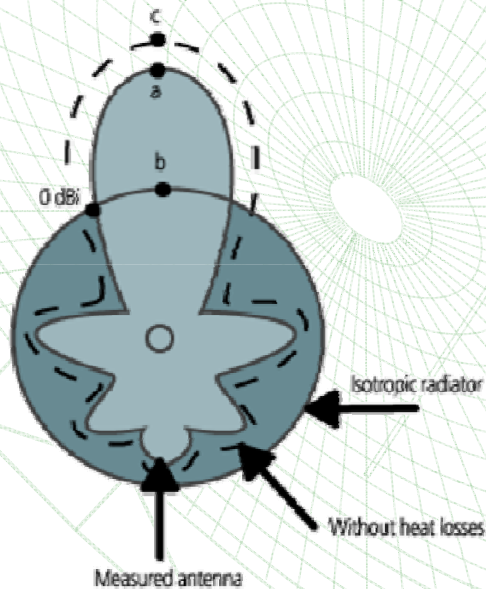


$$\text{Antenna Gain} = (P/P_o)_{S=S_o}$$



## Κέρδος - απολαβή κεραίας $G_i$ , $G_d$

- Unless otherwise specified, the gain refers to the direction of maximum radiation.
- Gain is a dimension-less factor related to power and usually expressed in decibels
- $G_i$  “Isotropic Power Gain” – theoretical concept, the reference antenna is isotropic
- $G_d$  - the reference antenna is a half-wave dipole

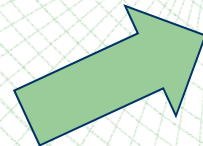


$$dBi = dBd + 2.15 dB$$



# ενεργος επιφάνεια $A_e$

- Συναφής με την έννοια του κέρδους είναι η έννοια της ενεργού επιφάνειας  $A_e$  (effective area) μιας κεραίας, που κατά βάση χαρακτηρίζει τη λειτουργία της ως κεραία λήψης
- Ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος που λαμβάνει μια κεραία προς την πυκνότητα ισχύος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που προσπίπτει σε αυτή. Συνδέεται με το κέρδος μέσω της γενικής έκφρασης


$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_e$$

ισχύει για όλες τις κεραίες  
ανεξαρτήτως τύπου





## Ενεργός επιφάνεια κεραιάς - effective area

- Measure of the effective absorption area presented by an antenna to an incident plane wave.
- Συνδέει την ισχύ που αποδίδεται στο φορτίο που συνδέεται με την κεραιά και την πυκνότητα ισχύος που προσπίπτει στην κεραιά :

$$P_L = w \cdot A_e$$

- Depends on the antenna gain and wavelength
- Για συζυγή προσαρμογή φορτίου – κεραιάς ( $A_e = A_{e \max}$ ), αποδεικνύεται ότι :

$$A_{em} = e PLF \frac{\lambda^2}{4\pi} g(\theta, \varphi) = PLF \frac{\lambda^2}{4\pi} G(\theta, \varphi) [\text{m}^2]$$
$$e = e_c (1 - \Gamma^2)$$

Aperture efficiency:  $\eta_a = A_e / A$

A: physical area of antenna's aperture, square meters



# Αντίσταση ακτινοβολίας $R_r$

- Η Αντίσταση ακτινοβολίας ορίζεται ως ...
- “... Η τιμή υποθετικής αντίστασης που καταναλώνει ισχύ ίση με την ακτινοβολούμενη  $P_r$  όταν διαρρέεται απο το ίδιο ρεύμα με αυτό που τροφοδοτεί την κεραία,  $I = I_{rms}$ ”

$$\frac{1}{2}UI = \frac{1}{2}I^2R_r \equiv P_r$$

Ιδανικό δίπολο

$$R_r = \frac{2\pi\eta}{3} \left( \frac{\Delta L}{\lambda} \right)^2 = 80\pi^2 \left( \frac{\Delta L}{\lambda} \right)^2 = 789 \left( \frac{\Delta L}{\lambda} \right)^2$$



# Εμπέδηση εισόδου $Z_A$

- Εμπέδηση εισόδου είναι η αντίσταση που παρουσιάζει η κεραία στα σημεία τροφοδοσίας της
- Εξαρτάται από τη γεωμετρία της, το χρησιμοποιούμενο  $\lambda$  αλλά και από τυχόν αγώγιμα σώματα που βρίσκονται κοντά της

$$Z_A = \frac{V(0)}{I_{\text{Antenna}}}$$

If  $I_{\text{Antenna}} = I_{\text{max}}$  then  $Z_A$  impedance referred to the *loop current*

If  $I_{\text{Antenna}} = I(0)$  then  $Z_A$  impedance referred to the *base current*

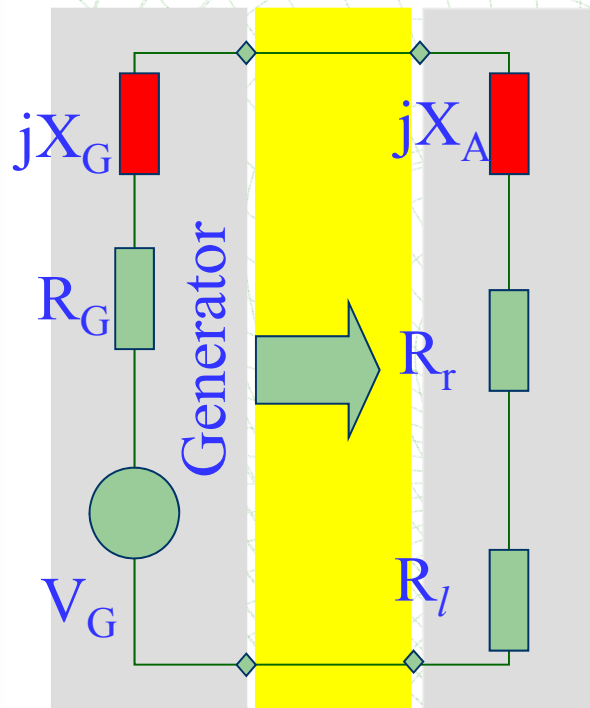
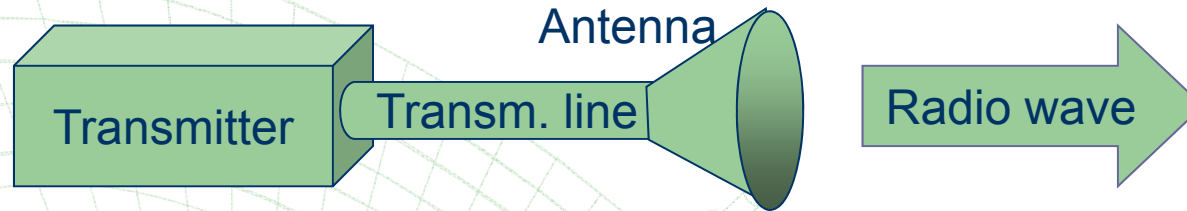
$$Z_A = \frac{V(0)}{I(0)} = R_A + jX_A$$

Resistance

Reactance



# Ισοδύναμο κύκλωμα κεραίας εκπομπής



The transmitter with the transmission line is represented by an (Thevenin) equivalent generator

The antenna is represented by its input impedance (which is frequency-dependent and is influenced by objects nearby) as seen from the generator

$jX_A$  represents energy stored in electric ( $E_e$ ) and magnetic ( $E_m$ ) near-field components; if  $|E_e| = |E_m|$  then  $X_A = 0$  (antenna resonance)

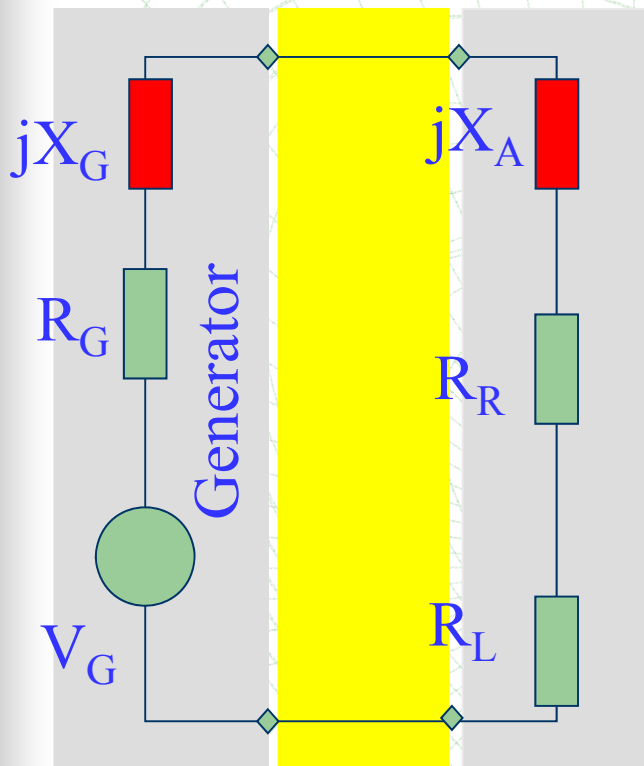
$R_r$  represents energy radiated into space (far-field components)

$R_l$  represents energy lost, i.e. transformed into heat in the antenna structure

$$Z_A = \frac{V(0)}{I(0)} = R_A + jX_A$$



# Power transfer: Tx antenna



generator :  $V_G, R_G, X_G = const.$

Είναι:  $R_A = R_R + R_L; R_A, X_A \neq const.$

Η ισχύς (στιγμιαία) που αποδίδεται στην κεραία είναι

$$P_A = I^2 R_A$$

$$I^2 = \left[ \frac{V_G}{\sqrt{(R_G + R_A)^2 + (X_G + X_A)^2}} \right]^2$$

$$P_A = V_G^2 \frac{R_A}{(R_G + R_A)^2 + (X_G + X_A)^2}$$

$$P_A = \left( \frac{V_G^2}{R_G} \right) \frac{\frac{R_A}{R_G}}{\left( 1 + \frac{R_A}{R_G} \right)^2 + \left( \frac{X_G}{R_G} + \frac{X_A}{R_G} \right)^2}$$



# Προσαρμογή κεραίας

Power  $P_r$  (average) delivered to antenna for radiation is given by:

$$P_r = \frac{1}{2} |I|^2 \cdot R_r$$

Σύμφωνα με το Θεώρημα μέγιστης μεταφοράς ισχύος:

Maximum Power 
$$P_A = \frac{1}{8} \frac{|V_g|^2}{R_r + R_{Loss}}$$

is delivered to the antenna for conjugate matching:

$$R_r + R_{Loss} = R_g$$
$$X_A = -X_g$$

Αποδίδεται στην κεραία

$$P_A = \frac{|V_g|^2}{8R_A}$$

$$P_g = \frac{|V_g|^2}{8R_g} \quad (= P_A)$$

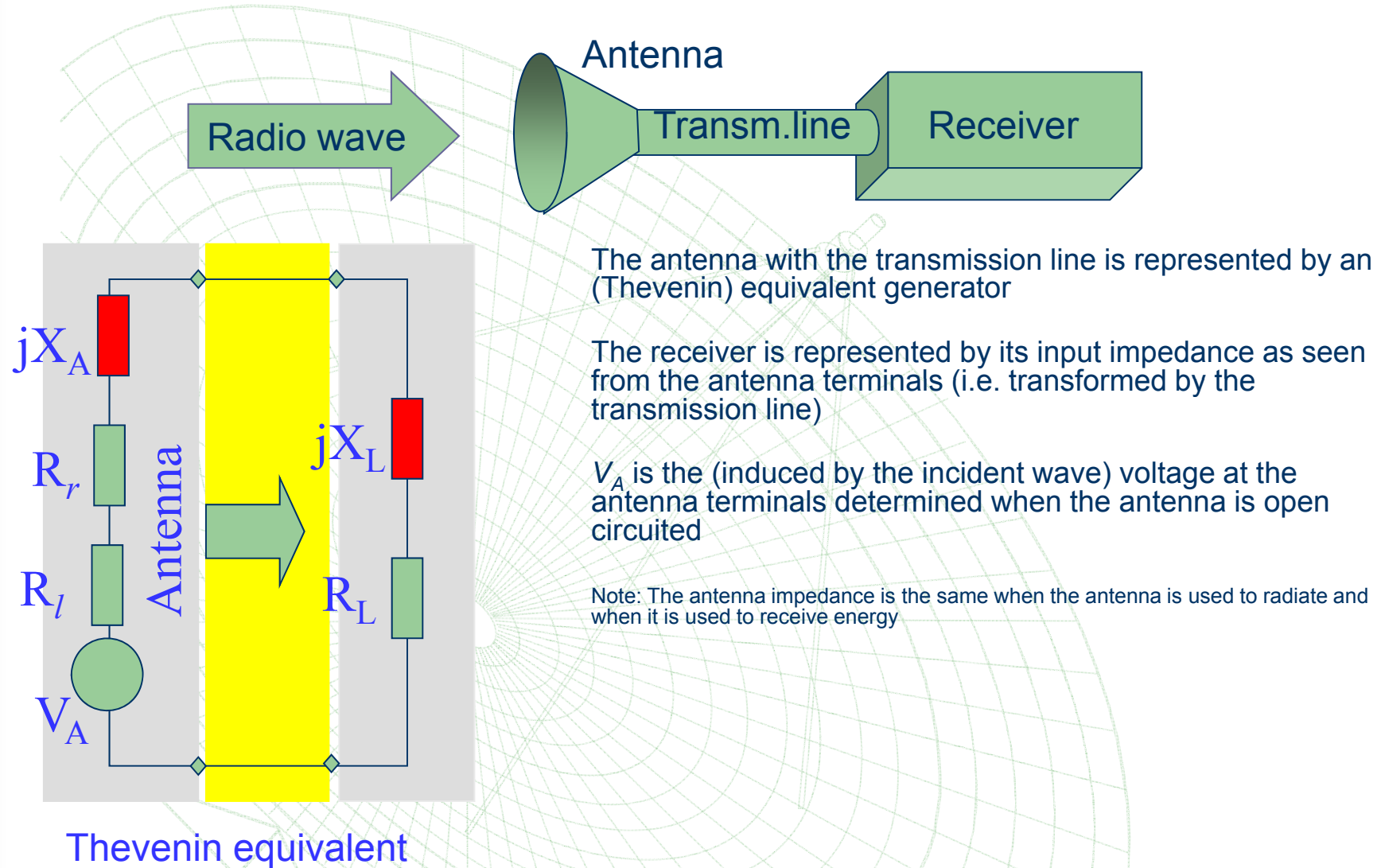
Γίνεται θερμότητα στην  $R_g$

$$P_r = P_A \frac{R_r}{(R_r + R_l)}$$

$$P_l = P_A \frac{R_l}{(R_r + R_l)}$$



# Receiving antenna equivalent circuit





# Power transfer

- The maximum power is delivered to (or from) the antenna when the antenna impedance and the impedance of the equivalent generator (or load) are matched
- When the impedances are matched
  - Half of the source power is delivered to the load and half is dissipated within the (equivalent) generator as heat
  - In the case of receiving antenna, a part ( $P_l$ ) of the power captured is lost as heat in the antenna elements, , the other part being reradiated (scattered) back into space
    - Even when the antenna losses tend to zero, still only half of the power captured is delivered to the load (in the case of conjugate matching), the other half being scattered back into space





# Power transfer: Rx antenna

$$R_r + R_{Loss} = R_L$$

$$X_A = -X_L$$

$$P_A = \frac{1}{4} \frac{|V_A|^2}{R_r + R_{Loss}}$$

Ισχύς που "μαζεύει" η κεραία

Επαγόμενη τάση στη κεραία

Γίνεται θερμότητα

Ισχύς που επανακτινοβολείται από την η κεραία

$$P_r = \frac{P_A}{2} \frac{R_r}{(R_r + R_l)}$$

$$P_l = \frac{P_A}{2} \frac{R_l}{(R_r + R_l)}$$

$$P_L = \frac{P_A}{2}$$

Ισχύς που αποδίδεται στο φορτίο

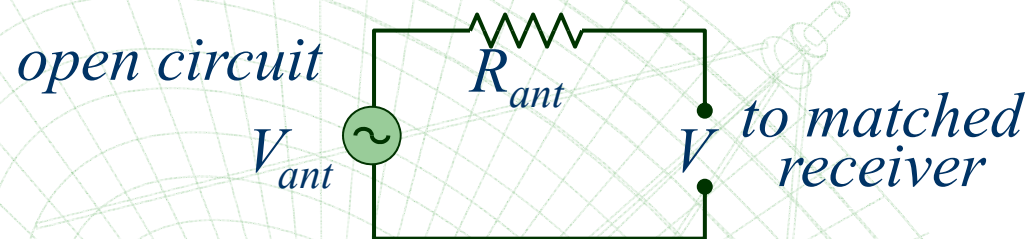
$$P_L = w \cdot A_e$$



# Λαμβανόμενη Ισχύς και ηλ. τάση στο δέκτη

model receive antenna as matched resistive load

- receiver antenna induces rms voltage into receiver
- induced voltage  $V = \frac{1}{2}$  open circuit voltage at antenna:  $V = \frac{1}{2} V_A$



Rms  
τιμές

- $V_A$  = receive antenna voltage
- $R_A$  = antenna resistance
- $E$  = induced electric field
- $V$  = induced receiver input voltage

$$P_L = \left( \frac{V_{Arms} / 2}{R_A} \right)^2 = \frac{V_{Arms}^2}{4R_A} = \frac{|E|^2}{120\pi} A_e$$

- $|E|$  = magnitude of radiating portion of electric field in far-field



- Ο μηχανισμός επανεκπομπής, αν και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ανεπιθύμητος αφού οδηγεί σε μείωση της ισχύος  $P_L$ , χρησιμεύει για τη δημιουργία στοιχειοκεραιών
- Η αρχή της αμοιβαιότητας προβλέπει ότι οι κατευθυντικές ιδιότητες μίας κεραίας όταν χρησιμοποιείται για εκπομπή ταυτίζονται με τις ιδιότητές της όταν χρησιμοποιείται για λήψη. Έτσι κάθε κεραία εμφανίζει την ίδια συνάρτηση κατευθυντικότητας είτε χρησιμοποιείται για εκπομπή είτε χρησιμοποιείται για λήψη, υπό την προϋπόθεση ότι το προσπίπτον έχει την ίδια πόλωση



# Παράγοντας κεραίας

- Συχνά, στη θεωρία κεραιών και ειδικότερα στις μετρήσεις κεραιών χρησιμοποιείται ο όρος παράγοντας κεραίας (*antenna factor*) για την προτυποποίηση μιας κεραίας. Ο παράγοντας κεραίας ορίζεται ως ο λόγος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  (V/m ή  $\mu\text{V}/\text{m}$ ) του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που προσπίπτει στην κεραία προς την τάση  $V$  (V ή  $\mu\text{V}$ ) που αναπτύσσεται στα άκρα σύνδεσής της με τη γραμμή μεταφοράς, όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$AF = E/V$$

- Εκφράζεται σε 1/m ή σε dBm-1 από τη σχέση

$$AF(\text{dBm-1}) = 20 \log(AF)$$

Αποδεικνύεται ότι:

$$AF = \frac{\sqrt{\frac{4\pi\eta_0}{Z_0}}}{\lambda\sqrt{G}}$$



## Ενεργός επιφάνεια κεραιάς - effective area

- Measure of the effective absorption area presented by an antenna to an incident plane wave.
- Συνδέει την ισχύ που αποδίδεται στο φορτίο που συνδέεται με την κεραιά και την πυκνότητα ισχύος που προσπίπτει στην κεραιά :

$$P_L = w \cdot A_e$$

- Depends on the antenna gain and wavelength
- Για συζυγή προσαρμογή φορτίου – κεραιάς ( $A_e = A_{em}$ ), αποδεικνύεται ότι :

$$A_{em} = e PLF \frac{\lambda^2}{4\pi} g(\theta, \varphi) = PLF \frac{\lambda^2}{4\pi} G(\theta, \varphi) [\text{m}^2]$$
$$e = e_c (1 - \Gamma^2)$$

Aperture efficiency:  $\eta_a = A_e / A$

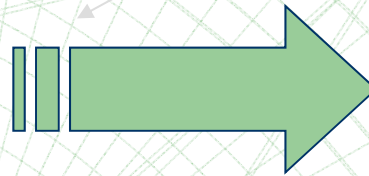
A: physical area of antenna's aperture, square meters



# Αρχή Αντιστοιχίας

## Reciprocity Theorem with Consequences

**Tx = Rx Antenna**



**Friis Transmission  
Formula**

$$\frac{P_{received}}{P_{transmitted}} = G_T \cdot G_R \cdot \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$$



# Power Transfer in Free Space

$$\begin{aligned} P_R &= w_T \cdot A_{eR} \\ &= \left( \frac{g_T(\theta, \phi) P_{rT}}{4\pi r^2} \right) \left( \frac{\lambda^2 e_R g_R(\theta, \phi)}{4\pi} \right) \\ &= \left( \frac{g_T(\theta, \phi) e_T P_{inT}}{4\pi r^2} \right) \left( \frac{\lambda^2 e_R g_R(\theta, \phi)}{4\pi} \right) \\ &= e_T e_R P_{inT} g_T g_R \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \\ &= P_{inT} G_T(\theta, \phi) G_R(\theta, \phi) \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \end{aligned}$$

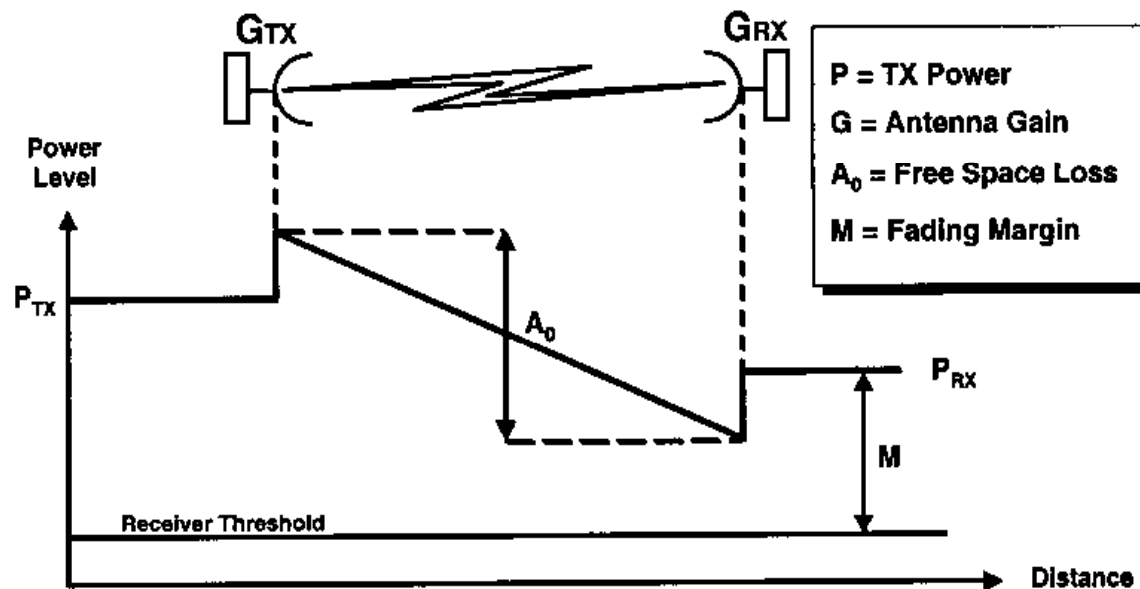
- $\lambda$ : wavelength [m]
- $P_R$ : power available at the receiving antenna (load)
- $P_{inT}$ : power delivered to the transmitting antenna
- $P_{rT}$ : power radiated by the transmitting antenna
- $G_R$ : gain of the transmitting antenna in the direction of the receiving antenna
- $G_T$ : gain of the receiving antenna in the direction of the transmitting antenna
- Matched polarizations



## Διάδοση ελεύθερου χώρου και Free-Space "loss"

- Η απώλεια κενού χώρου στην πραγματικότητα δεν είναι απώλεια, οφείλεται στο **σκόρπισμα** της ακτινοβολούμενης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στο χώρο
- Είναι η ελάχιστη απώλεια που μπορεί να συμβεί ανάμεσα σε πομπό και δέκτη (τα φυσικά φαινόμενα αυξάνουν αυτή την απώλεια)
- Ορίζεται σαν η υποβάθμιση της ισχύος του σήματος μεταξύ της εκπεμπόμενης ισχύος και της λαμβανόμενης από ισοτροπική κεραία

### Free Space (Basic Transmission) Loss







# Θερμοκρασία κεραίας

Η κεραία μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας δέκτης θορύβου, αφού κάθε αντικείμενο που έχει κάποια θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν ακτινοβολεί.

- Η ποσότητα της ακτινοβολούμενης ισχύος παριστάνεται από μία ισοδύναμη θερμοκρασία.
- Η θερμοκρασία της κεραίας ή θερμοκρασία της αντίστασης ακτινοβολίας της κεραίας προσδιορίζεται από τη θερμοκρασία του χώρου ή αντικειμένου προς το οποίο η κεραία είναι προσανατολισμένη



# Θόρυβος συλλεγόμενος από μια Κεραία Λήψης

- Πηγές Θορύβου

- **Sky Noise**

- Ατμοσφαιρικός ή Στατικός Θόρυβος για  $f < 30\text{MHz}$
- Γαλαξιακός Θόρυβος (**Galactic Noise**) μειώνεται ανάλογα  $1/f^{2.4}$
- Θόρυβος υδρατμών - **Water Vapor** Max στα  $23\text{GHz}$
- Θόρυβος Μοριακού Οξυγόνου (**Oxygen Molecules**) Max στα  $60\text{GHz}$

- **Sun Noise**

- The level of the sun's contribution depends on the solar flux. It is given by

$$T_A = 3.468 F \lambda^2 10^{G/10}$$

where  $F$  is the solar flux,  $\lambda$  is the wavelength, and  $G$  is the gain of the antenna [dB]

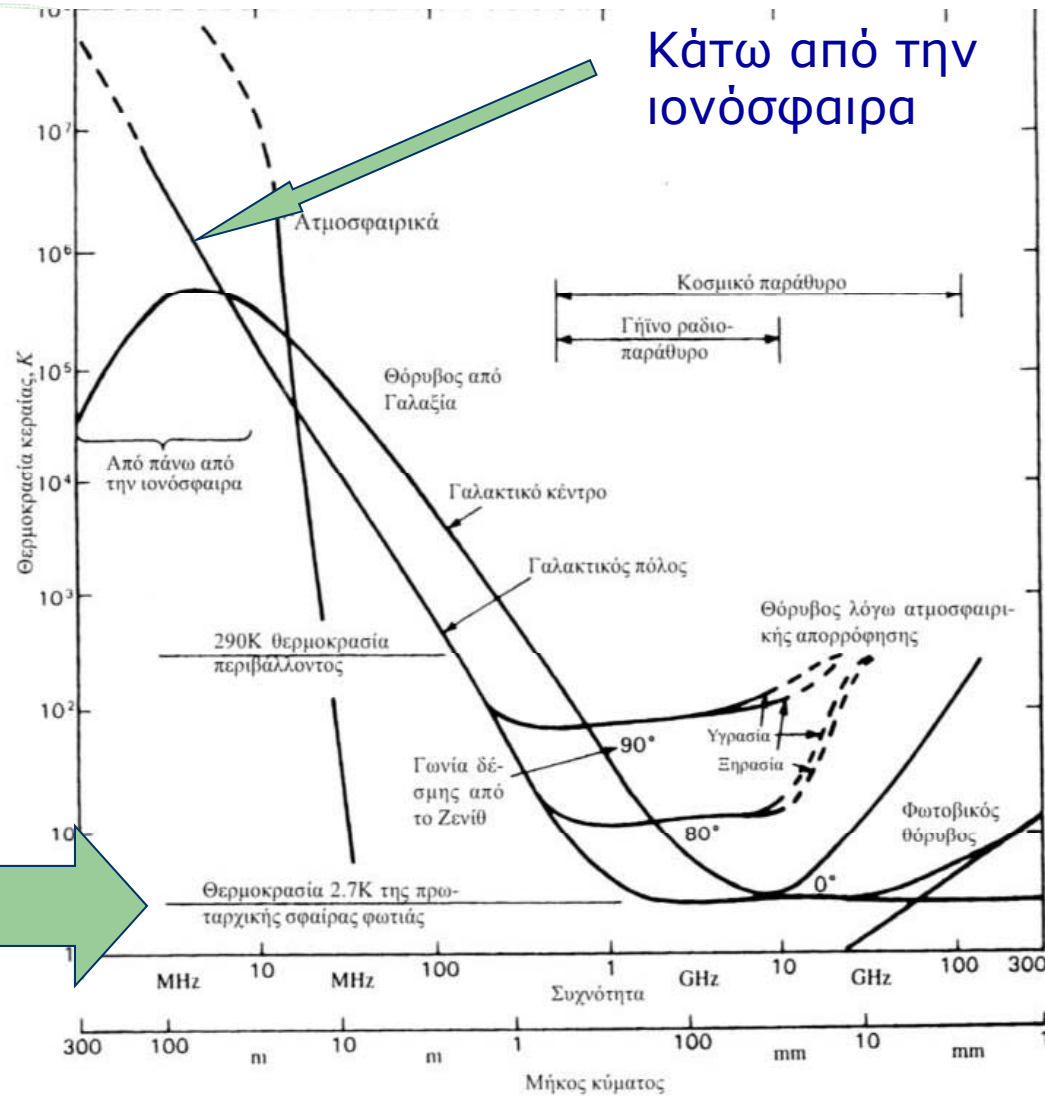
- **Man Made Noise** <  $600\text{ MHz}$

- **Εδαφος της γης**



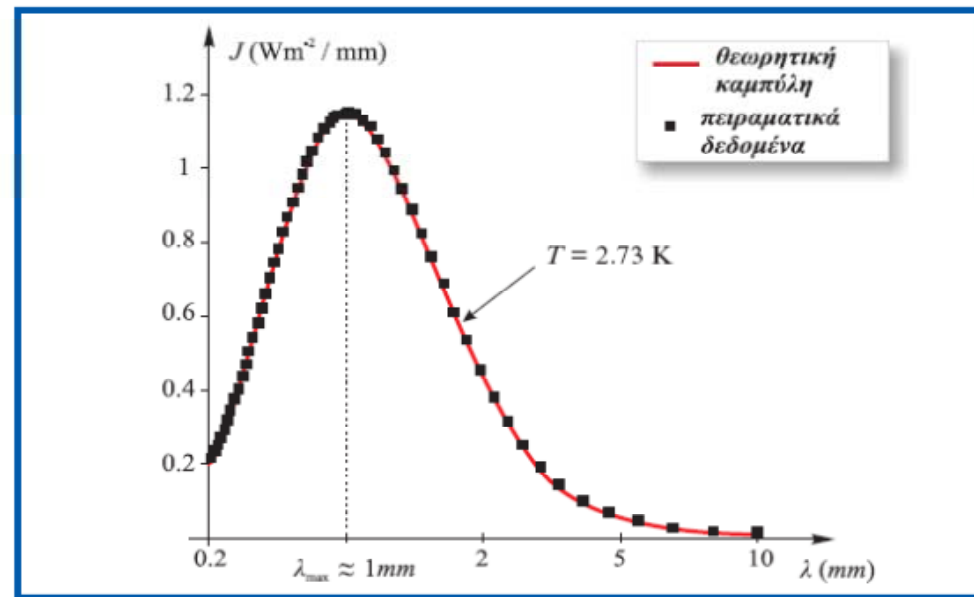
# Θερμοκρασία θορύβου από το περιβάλλον

Big Bang





**ΔΕΔΟΜΕΝΟ 2.** Η κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου είναι ακτινοβολία μέλανος σώματος με θερμοκρασία  $T = 2,73 \text{ K}$ .



**... και το συμπέρασμα:**

Δεν υπάρχει κανένας τρόπος να έχει δημιουργηθεί και να πληροί το σύμπαν μια ακτινοβολία μέλανος σώματος –δηλαδή μια θερμική ακτινοβολία– παρά μόνον εάν έχει εκπεμφθεί από την ίδια την ύλη του σύμπαντος σε μια υπέρθερμη αρχική κατάσταση και έχει έκτοτε ψυχθεί λόγω της κοσμικής διαστολής.

Η ακτινοβολία υποβάθρου είναι η αναμφίβολη απόδειξη –ο αδιάψευστος μάρτυρας– της Μεγάλης Έκρηξης.

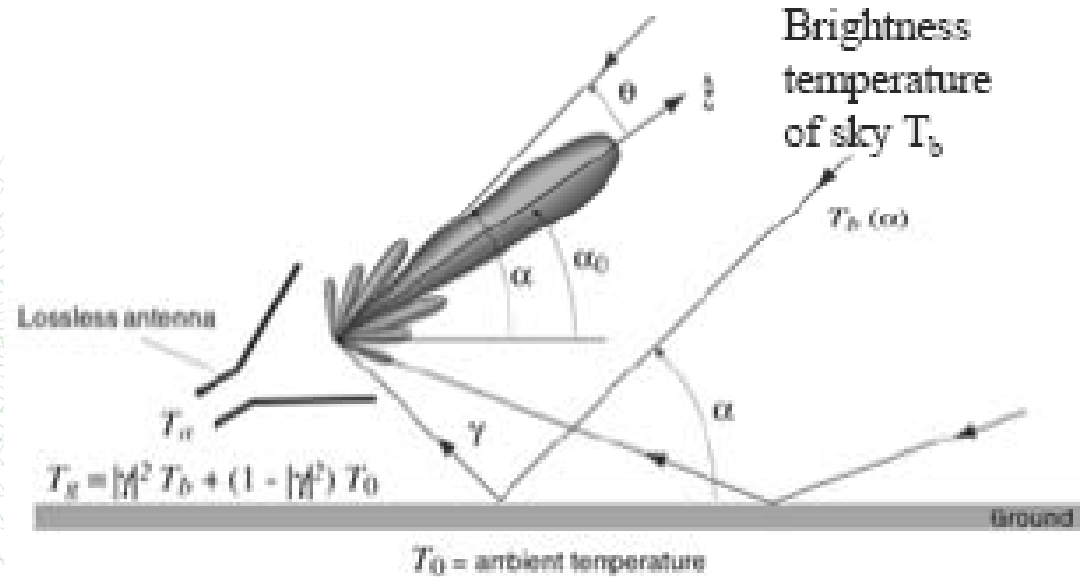
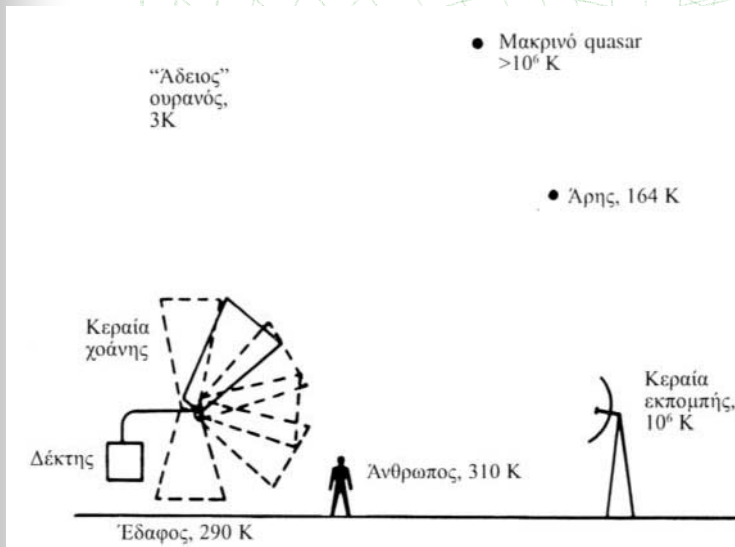


- Εάν  $T(\theta, \varphi)$  η θερμοκρασία θορύβου από το εγγύς της κεραίας περιβάλλον στη διεύθυνση  $(\theta, \varphi)$  και  $U(\theta, \varphi)$  η ένταση ακτινοβολίας της κεραίας, τότε η συνολική θερμοκρασία θορύβου  $T_A$  της κεραίας θα προκύπτει από την ολοκλήρωση όλων των συνεισφορών του εξωτερικού θορύβου ως εξής:



# Ολική Θερμοκρασία κεραίας $T_A$

$$T_A = \frac{1}{\Omega_A} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} T_s(\theta, \phi) \frac{U(\theta, \phi)}{U_{\max}} d\Omega$$





# Θερμοκρασία συστήματος

$$T_{sys} = T_A + T_{A\,physical} \left( \frac{1}{a_1} - 1 \right) + T_{L\,physical} \left( \frac{1}{a_2} - 1 \right) + T_{Rx}$$

$a_1, a_2$ : θερμικές αποδόσεις κεραίας και γμ αντίστοιχα  
 $0 < a_1, a_2 < 1$



$$T_{rx} = T_1 + T_2 / G_1 + T_3 / (G_1 G_2) + \dots + T_n / (G_1 G_2 \dots G_n)$$

$$\delta T_{min} = \frac{AT_{sys}}{\sqrt{\Delta f t}}$$

Ελάχιστη ανιχνεύσιμη  
 θερμοκρασία συστήματος

$$\Delta T_A \geq \delta T_{min}$$

$$N = kT_{sys} \Delta f_R$$

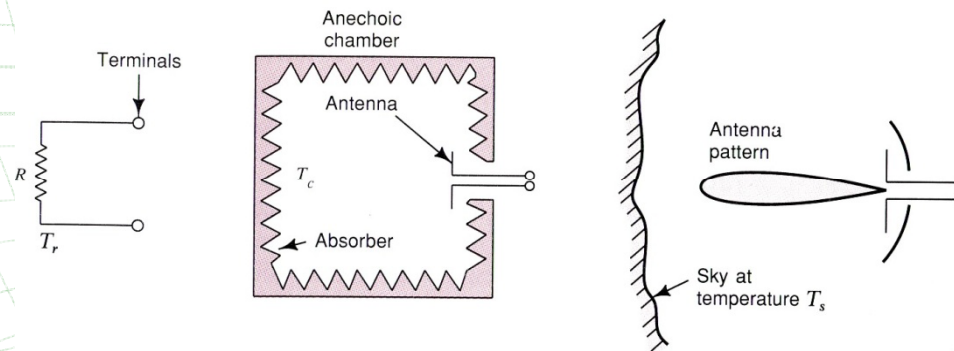
Σχέση Nyquist

Ισχύς θορύβου  
 στο δέκτη



# Θερμοκρασία κεραίας T

- Power received from antenna as from a black body or the radiation resistance at temperature  $T_a$



$$p = kT \quad [wHz^{-1}], \quad k = 1.38 \cdot 10^{-23} \quad [JK^{-1}]$$

$$\left. \begin{aligned} P &= SA_e \Delta f \\ P &= k \Delta T_A \Delta f \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta T_A = 2 \frac{A_e S}{k}$$

$$\Delta T_A = \frac{\Omega_s}{\Omega_A} T_s \quad \Omega_A \geq \Omega_s$$

$S$ : πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα εύρους ζώνης  
 $A_e$ : Ενεργός επιφάνεια κεραίας  
 $\Delta T_A$ : επαυξηνητική θερμοκρασία κεραίας  
 $\Omega_A$  γωνία δέσμης κεραίας  
 $\Omega_s$  γωνία δέσμης πηγής





# Ισχύς θορύβου στο δέκτη

Received noise power from an antenna / receiver system:

Noise power  $N_{sys} = W_A + W_{rx} = k T_{sys} \Delta f = k (T_A + T_{rx}) \Delta f$

$$T_{sys} = T_A + T_{rx}$$

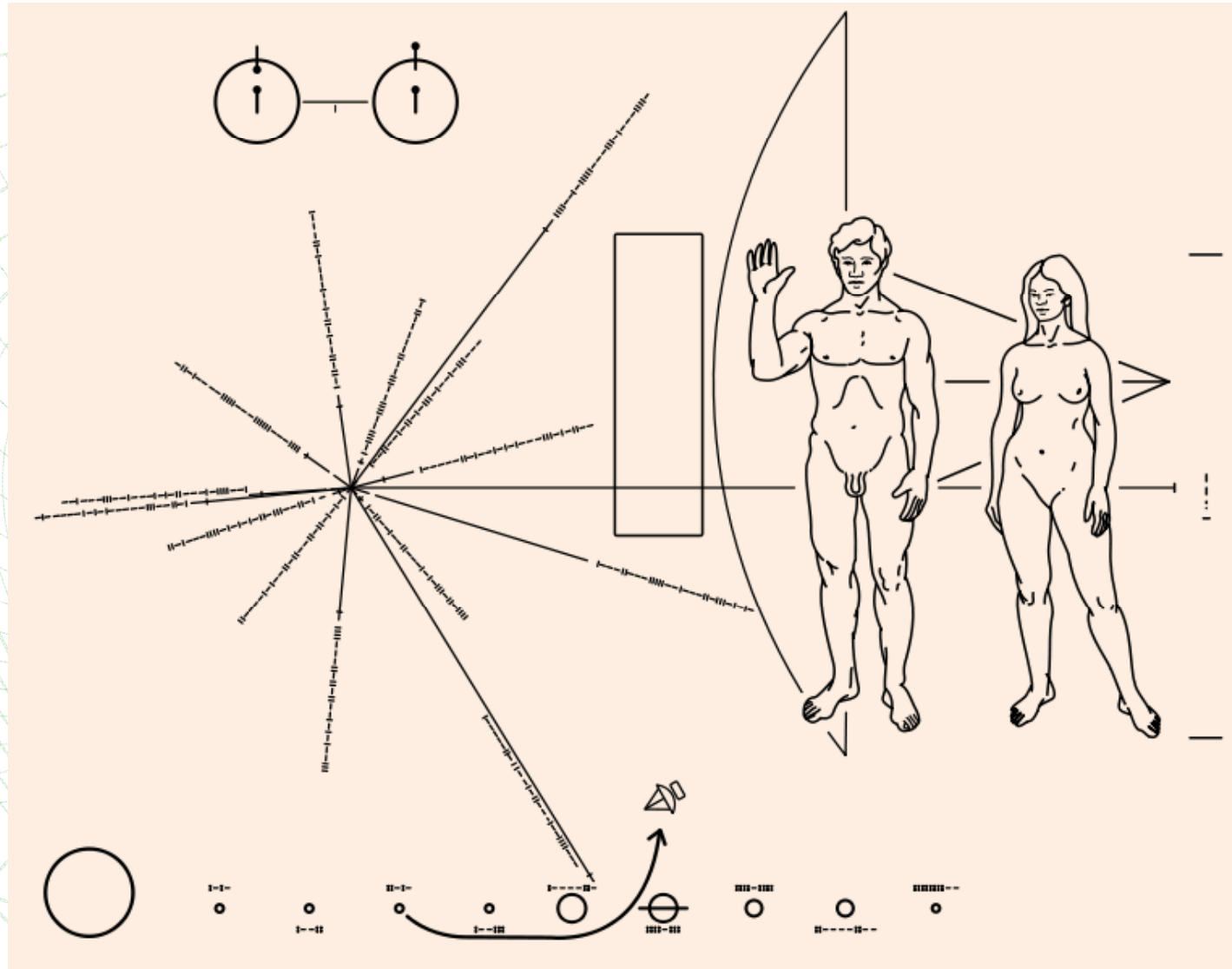
receiver noise temperature

antenna temperature (signal, atmosphere, antenna losses)



# Μερικές ερωτήσεις.....

- What is the lowest brightness temperature of the sky and what is its origin? *3 K, comes from Bing Bang.*
- There are some strong point sources for noise on the sky. Which is the strongest? *The sun.*
- Mention some strong radio stars and what can they be used for! *Cassiopeia A is used to measure gain of antennas.*





# Εύρος ζώνης $B$

- **The Bandwidth  $B$  is defined as ...**
- “... the range of frequencies within the performance of the antenna, with respect to some characteristics, conforms to a specified standard.”
- Πχ Για το εύρος συχνοτήτων για το οποίο η  $|X_a(f)|$  είναι σχετικά μικρή, η κεραία πρακτικά θεωρείται συντονισμένη. Το εύρος  $\Delta f$  καλείται συνήθως εύρος ζώνης της κεραίας.

**Pattern Bandwidth:** beamwidth, gain, etc.

**Impedance Bandwidth :** input impedance, radiation efficiency

**Broadband Antennas:**  $B_{\text{broad}} = f_{\text{upper}} : f_{\text{lower}}$  ( $B=10:1$ )

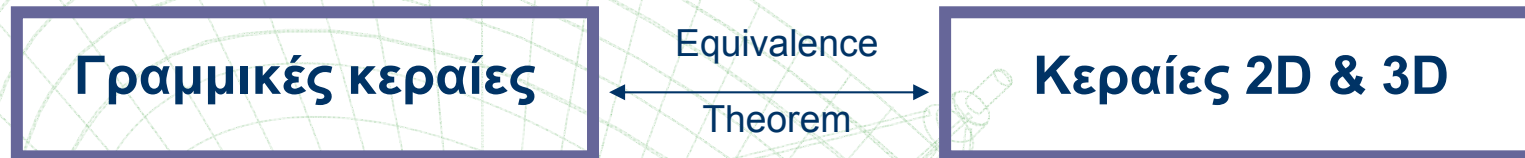
**Narrowband Antennas:**  $B_{\text{narrow}} = (f_{\text{upper}} - f_{\text{lower}}) / f_{\text{centre}}$  ( $B=5\%$ )

**Frequency Independent Antennas:**  $B_{\text{fr.ind.}} > 40 : 1$

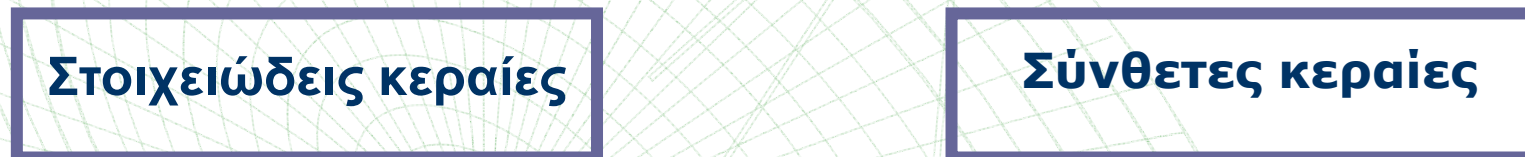


# Τύποι κεραιών

## α) Αναλυτική μελέτη



## β) Τεχνική άποψη



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

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

# Τέλος Ενότητας

Οι Βασικές παράμετροι των κεραιών

# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την 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.



Σημειώματα



# Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Δημήτρης Βαρουτάς, Αριστείδης Τσίπουρας. «Κεραίες, Οι Βασικές παράμετροι των κεραιών». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/DI123/>.



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

**Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες**

