Από το στοιχειώδες δίπολο στις κεραίες

Τι ξέρουμε

- Έχουμε μελετήσει ένα στοιχειώδες ($l<<\lambda$) παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο για το οποίο η διπολική του ροπή είναι $\vec{p}=Q_o l e^{j\omega t}\hat{z}$ και διαρρέεται από ρεύμα $I(t)=I_o e^{j\omega t}$
- Στην προσέγγιση αυτή το Η/Μ που παράγεται είναι (συναρτήσει του ρεύματος)

$$E_r(t,r)=\frac{I_o l}{2\pi\epsilon_o}\left(\frac{1}{\boxed{cr^2}}+\frac{1}{\boxed{j\omega r^3}}\right)e^{j(\omega t-kr)}\cos\theta,\quad E_\theta(t,r)=\frac{I_o l}{4\pi\epsilon_o}\left(\frac{j\omega}{\boxed{c^2 r}}+\frac{1}{\boxed{cr^2}}+\frac{1}{\boxed{j\omega r^3}}\right)e^{j(\omega t-kr)}\sin\theta$$

$\kappa\alpha\iota$

$$H_\phi(t,r)=\frac{I_o l}{4\pi}\left(\frac{j\omega}{\boxed{cr}}+\frac{1}{\boxed{r^2}}\right)e^{j(\omega t-kr)}\sin\theta$$

Πεδίο ακτινοβολίας

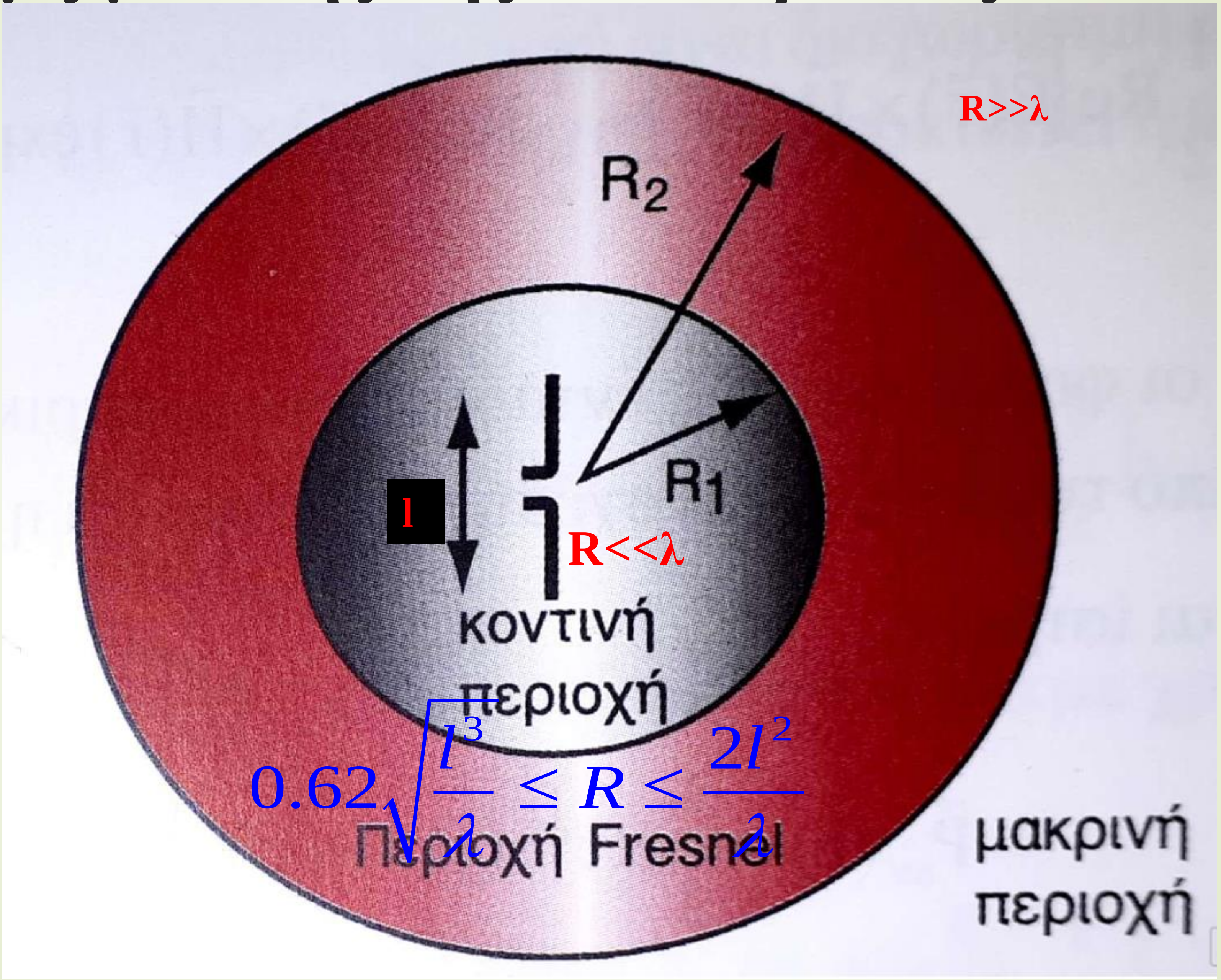
Στατικό Πεδίο

Πεδίο Επαγωγής

- Στην μεταφορά ενέργειας μέσω του Η/Μ πεδίο συμβάλει ΜΟΝΟ το πεδίο ακτινοβολίας και σε μεγάλες αποστάσεις το διάνυσμα pointing γίνεται
- $S_r=\frac{\mu_o}{8c}\frac{f^2 I_o^2 l^2}{r^2}\sin^2\theta=\frac{I_o^2 l^2 k^2 Z_o}{32\pi^2 r^2}\sin^2\theta$. Η συνολική δε ισχύς που μεταδίδεται μέσω ακτινοβολίας είναι

$$P_{rad}\cong 40\pi^2 I_0^2\frac{\ell^2}{\lambda^2}=20I_{rms}^2\frac{\ell^2}{\lambda^2},\ Watt$$

Περιοχές μελέτης της ακτινοβολίας



Ζώνες ακτινοβολίας για στοιχειώδες δίπολο

- **Περιοχή αντιδραστικού κοντινού πεδίου (Reactive near field region):**
- Είναι η περιοχή εντός σφαίρας ακτίνας: $r \rightarrow 0.62\sqrt{\frac{l^3}{\lambda}} \Rightarrow kr << 1$ Στην περιοχή αυτή ισχύουν οι εξισώσεις:

$$H_\phi \approx \frac{(I\Delta l)e^{j(\omega t-kr)}}{4\pi r^2}\sin\theta$$

$$E_r \approx -j\eta\frac{(I\Delta l)e^{j(\omega t-kr)}}{4\pi k r^3}\cos\theta$$

$$E_\theta \approx -j\eta\frac{(I\Delta l)e^{j(\omega t-kr)}}{4\pi k r^3}\sin\theta$$

$$H_r = H_\theta = E_\phi = 0$$

- **Περιοχή ακτινοβολούντος κοντινού πεδίου (Radiating near field region) ή περιοχή Fresnel:**
- Είναι η ενδιάμεση περιοχή από το κοντινό αντιδραστικό πεδίο ως την περιοχή του μακρινού πεδίου:

$r \rightarrow 0.62\sqrt{\frac{l^3}{\lambda}} \leq r \leq \frac{2l^2}{\lambda} \rightarrow kr \geq 1$ Ενώ για το Ηλ/κό και μαγνητικό πεδίο ισχύουν οι εξισώσεις :

$$H_\phi \approx j\frac{kI_o l e^{-j(\omega t-kr)}}{4\pi r}\sin\theta$$

$$E_r \approx \eta\frac{I_o l e^{-j(\omega t-kr)}}{2\pi r^2}\cos\theta$$

$$E_\theta \approx j\eta\frac{kI_o l e^{-j(\omega t-kr)}}{4\pi r}\sin\theta$$

$$H_r = H_r = E_\phi = 0$$

Ζώνες ακτινοβολίας για στοιχειώδες δίπολο

- **Περιοχή μακρινού πεδίου** (Far field region) ή περιοχή Fraunhofer: Είναι η περιοχή για την οποία: $r \geq \frac{2l^2}{\lambda} \Rightarrow kr >> 1 \Rightarrow r >> l, r >> \lambda$
- Στην περιοχή αυτή ισχύουν οι εξισώσεις:

$$H_\phi = j\frac{kI_o l e^{j(\omega - kr)}}{4\pi r}\sin\theta$$

$$E_\theta = j\eta\frac{kI_o l e^{j(\omega - kr)}}{4\pi r}\sin\theta$$

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

- Υπάρχει ακτινοβολούμενη ισχύς κατά την ακτινική κατεύθυνση. Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο διαδίδονται στην ακτινική κατεύθυνση και κάθετα μεταξύ τους. Κατά τα γνωστά ισχύουν:

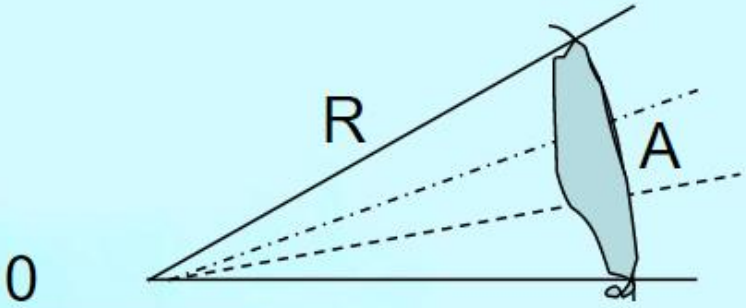
$$\eta = \eta_o = \frac{E_\theta}{H_\phi} = \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o}} = 377\Omega, \quad \vec{s} = \frac{1}{2}\frac{|E_\theta|^2}{\eta}\hat{r} = \frac{1}{2}\eta\,|\mathrm{H}_\phi|^2\,\hat{r}$$

Στερεά Γωνία

Στερεά γωνία

Εστω σφαίρα με κέντρο το σημείο τομής των δύο ευθειών και ακτίνα R

Στερεά γωνία ορίζεται ως το πηλίκο του εμβαδού που σχηματίζεται από τις δύο ευθείες πάνω στην επιφάνεια της σφαίρας προς το τετράγωνο της ακτίνας



$$\Omega = \frac{A}{R^2}$$

Μονάδα μέτρησης: sterad (στερακτίνιο)

Ένα στερακτίνιο=με τη στερεά γωνία που κόβει σε σφαίρα ακτίνας R επιφάνεια εμβαδού $=R^2$

Μεγέθη που χρησιμοποιούνται στις κεραίες

- **Ένταση Ακτινοβολίας** εκφράζει την ισχύ που ακτινοβολείται ανά μονάδα στερεάς γωνίας. Ορίζεται από τη σχέση:

$$U(\theta,\phi) = \frac{dW}{d\Omega} = r^2 S_r \text{ για το δίπολο } U(\theta,\phi) = \frac{I_o{}^2 l^2 k^2 \eta}{32\pi^2} sin^2\theta$$

- ***<u>Κατευθυντικό κέρδος (συνάρτηση κατευθυντικότητας)</u>*** **D_g(θ,φ):** ορίζεται ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας μιας κεραίας κατά την κατεύθυνση *θ, φ*, ως προς την ένταση ακτινοβολίας U_o ισοτροπικής κεραίας που εκπέμπει την ίδια ισχύ ακτινοβολίας, δηλαδή:

$$D_g(\theta,\phi) = \frac{U(\theta,\phi)}{U_o} = \frac{U(\theta,\phi)}{W_r/4\pi} \text{ για το δίπολο } D_{gd}(\theta,\phi) = 4\pi \frac{\frac{\eta k^2 I_o{}^2 l^2}{32\pi^2}\sin^2\theta}{\frac{\eta\left(klI_o\right)^2}{12\pi}} = \frac{3}{2}\sin^2\theta$$

Μεγέθη που χρησιμοποιούνται στις κεραίες

- ***Κατευθυντικότητα*** $\boldsymbol{D_m}$ μιας κεραίας είναι η μέγιστη τιμή του κατευθυντικού κέρδους της, δηλαδή:

$$D_m = D_g(\theta,\phi)|_{max} = \frac{U(\theta,\phi)|_{max}}{U_o} = 4\pi \frac{U(\theta,\phi)|_{max}}{W_r}$$

Με U_{max} μέγιστη τιμή της έντασης ακτινοβολίας και W_{rad} η συνολική ισχύς ακτινοβολίας της κεραίας. Το κατευθυντικό κέρδος είναι συνάρτηση των συντεταγμένων θέσης θ και φ του σημείου υπολογισμού του πεδίου ακτινοβολίας μιας κεραίας.

Η κατευθυντικότητα μιας ισοτροπικής κεραίας είναι ίση προς τη μονάδα, αφού η ακτινοβολία της είναι η ίδια προς όλες τις διευθύνσεις του χώρου. Σε κάθε άλλη περίπτωση κεραίας, η κατευθυντικότητα είναι μεγαλύτερη από τη μονάδα και αποτελεί ένα μέτρο του πόσο κατευθυντική είναι η κεραία.

- Για το στοιχειώδες δίπολο

$$D_m = Max\left\{D_g(\theta,\varphi)\right\} = Max\left\{\tfrac{3}{2}(\sin\theta)^2\right\} = \frac{3}{2} \text{ ή σε dB } 10\log_{10}\left(\frac{3}{2}\right) = 1,76dB$$

Μεγέθη που χρησιμοποιούνται στις κεραίες

- ***Κανονικοποιημένη Ένταση Ακτινοβολίας* $\mathbf{U_n}$** η ένταση ακτινοβολίας σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση σε σχέση με το μέγιστο της ακτινοβολιάς.

$$U_n(\theta,\phi) = \frac{U(\theta,\phi)}{U(\theta,\phi)|_{max}}$$

Χρησιμοποιείται για να καθορίσουμε σε ποιες γωνίες η ένταση ακτινοβολίας πέφτει στο μισό μπορεί να εμφανιστεί και λογαριθμική μορφή (dB)

- **Διάγραμμα ακτινοβολίας**
- Το διάγραμμα ακτινοβολίας είναι η γραφική παράσταση των ιδιοτήτων ακτινοβολίας (μακρινού πεδίου) μιας κεραίας.
- Μπορεί να αναπαρασταθεί
  - Το διάγραμμα της έντασης του Η/Μ πεδίου (διάγραμμα πεδίου)
  - Το διάγραμμα της Έντασης ακτινοβολίας (U(θ,φ)) (διάγραμμα ισχύος

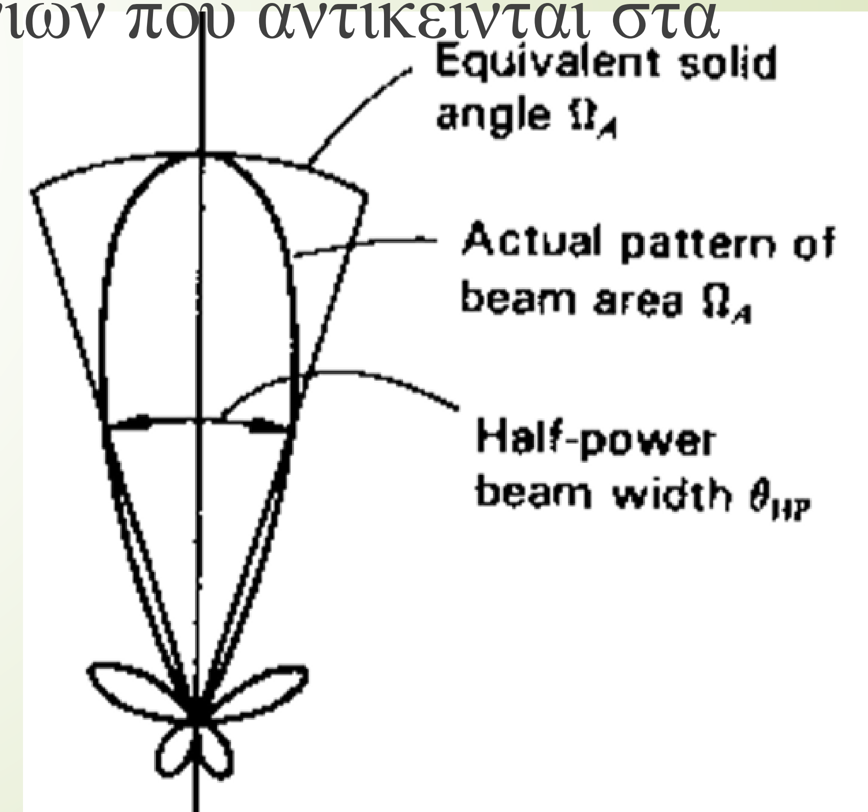
Μεγέθη που χρησιμοποιούνται στις κεραίες

- **Στερεός λοβός ακτινοβολίας Ω_A**:είναι η στερεά γωνία δια της οποίας θα εκπεμπόταν όλη η ισχύς, αν η κεραία εξέπεμπε σταθερή ένταση ακτινοβολίας και ίση προς $U(\theta,\varphi)|_{max}$ προς κάθε κατεύθυνση στο εσωτερικό της Ω_A.

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

Προσεγγιστικά μπορεί να υπολογιστεί βάσει των γωνιών που αντίκεινται στα σημεία ημίσειας ισχύος του κ. λοβού

$$\Omega_A \approx \theta_{HP}\phi_{HP}$$



Μεγέθη που χρησιμοποιούνται στις κεραίες

- ***Κέρδος ισχύος (Antenna Gain):***Είναι ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας σε μια ορισμένη κατεύθυνση προς την ισχύ τροφοδοσίας της κεραίας: $$G_g(\theta,\phi)=4\pi\frac{U(\theta,\phi)}{W_{input}}$$
- Στις συνήθεις πρακτικές περιπτώσεις, το κέρδος ισχύος αναφέρεται στη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας, οπότε και ονομάζεται απλώς **κέρδος της κεραίας**, δηλαδή $$G(\theta,\phi)=4\pi\frac{U(\theta,\phi)\big|_{\max}}{W_{input}}$$
- **Απόδοση ακτινοβολίας (Radiation Efficiency)** (συντελεστής απόδοσης). Ο λόγος της ακτινοβολούμενης ισχύος προς την προσφερόμενη ισχύ $$e_t=\frac{P_{rad}}{P_{in}}=\frac{P_{rad}}{P_{rad}+P_{loss}}=\frac{R_{rad}}{R_{rad}+R_{loss}}$$
- Το κέρδος κεραίας μπορεί να γραφεί και ως: $G=e_t*D_m$

Μεγέθη που χρησιμοποιούνται στις κεραίες

- **Αντίσταση εισόδου** κεραία ως στοιχείο κυκλωμάτων περιγράφεται μέσω της αντίστασης εισόδου της. Είναι η μιγαδική αντίσταση που εμφανίζει στους ακροδέκτες της ή ισοδύναμα, ως το πηλίκο της τάσης προς το ρεύμα που εμφανίζονται στο σημείο τροφοδότησης της. Η αντίσταση εισόδου περιλαμβάνει τόσο πραγματικό όσο και φανταστικό μέρος, δηλαδή :

$$Z_a = R_a + jX_a, R_a = R_r + R_L$$

- Η αντίσταση εισόδου μιας κεραίας αλλά και οι αντιστάσεις ακτινοβολίας και απωλειών δεν είναι συγκεντρωμένες φυσικές οντότητες, αλλά αποτελούν ισοδύναμα μεγέθη μέσω των οποίων μελετάται η συμπεριφορά της κεραίας.
- Για το στοιχειώδες δίπολο όπως είδαμε $R_r = \frac{2P_{rad}^{total}}{|I_o|^2} = \frac{2\oiint_{4\pi} U(\theta,\phi)d\Omega}{|I_o|^2}$

Τελικά $R_r = \eta \frac{2\pi}{3}\left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 = 80\pi^2\left(\frac{l}{\lambda}\right)^2$

Μεγέθη που χρησιμοποιούνται στις κεραίες

- **Συντονισμός κεραίας:** Επιδιώκεται η χρησιμοποίηση κεραιών με Ωμική μόνο αντίσταση Αφού :
  - Προσαρμόζεται έτσι με τη Γραμμή Μεταφοράς.
  - Ελαχιστοποιείται η κατανάλωση Άεργου Ισχύος στο Εγγύς Πεδίο.
  - Μεγάλες τιμές φανταστικού μέρους εμπέδησης απαιτούν μεγάλες τάσης τροφοδοσίας
- Θέλουμε δηλαδή $\operatorname{Im}\{Z_\alpha(\omega_0)\} = X_\alpha(\omega_0) = 0$
- Η συχνότητα ω_0 ονομάζεται συχνότητα συντονισμού και Δω το εύρος ζώνης όπου όπου είναι η περιοχή των συχνοτήτων που θεωρούμε ότι έχουμε συντονισμό. Αυτό γίνεται όταν η ποσότητα $|\rho(\omega)| \leq \rho_m$ με $\rho(\omega) = \dfrac{Z_a(\omega) - Z_0}{Z_a(\omega) + Z_0}$,

Z_0 η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς που τροφοδοτεί την κεραία δηλαδή τελικά θα πρέπει:

$$\left|\frac{Z_a(\omega) - Z_0}{Z_a(\omega) + Z_0}\right| \leq \rho_m \Leftrightarrow |X_a(\omega)| \leq \frac{2\rho_m}{\sqrt{1-\rho_m^2}} Z_0 \ldots \mu\varepsilon\, X_0(\omega_0) = 0$$

Μεγέθη που χρησιμοποιούνται στις κεραίες

- **Συντονισμός κεραίας:** Επιδιώκεται η χρησιμοποίηση κεραιών με Ωμική μόνο αντίσταση Αφού :
  - Προσαρμόζεται έτσι με τη Γραμμή Μεταφοράς.
  - Ελαχιστοποιείται η κατανάλωση Άεργου Ισχύος στο Εγγύς Πεδίο.
  - Μεγάλες τιμές φανταστικού μέρους εμπέδησης απαιτούν μεγάλες τάσης τροφοδοσίας
- Θέλουμε δηλαδή $\mathrm{Im}\{Z_\alpha(\omega_0)\} = X_\alpha(\omega_0) = 0$
- Η συχνότητα ω_0 ονομάζεται συχνότητα συντονισμού και $\Delta\omega$ το εύρος ζώνης όπου όπου είναι η περιοχή των συχνοτήτων που θεωρούμε ότι έχουμε συντονισμό. Αυτό γίνεται όταν η ποσότητα $|\rho(\omega)| \le \rho_m$ με $\rho(\omega) = \dfrac{Z_a(\omega) - Z_0}{Z_a(\omega) + Z_0}$,

Z_0 η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς που τροφοδοτεί την κεραία δηλαδή τελικά θα πρέπει:

$$\left|\frac{Z_a(\omega) - Z_0}{Z_a(\omega) + Z_0}\right| \le \rho_m \Leftrightarrow |X_a(\omega)| \le \frac{2\rho_m}{\sqrt{1-\rho_m^2}} Z_0 \ldots \mu\varepsilon\, X_0(\omega_0) = 0$$

Από το στοιχειώδες δίπολο στις πραγματικές κεραίες

- Το στοιχειώδες δίπολο (Hertz) έχει την ιδιότητα να έχει μήκος απειροστό ικανό να έχει ομοιόμορφη κατανομή ρεύματος την μαγική αυτή ιδιότητα του την δίνει το γεγονός ότι η διαστάσεις του είναι πολύ μικρότερες του μήκους κύματος. Τι γίνεται όταν η διάσταση του διπόλου είναι συγκρίσιμη με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που μεταδίδομε τότε η κατανομή του ρεύματος στην κεραία δεν είναι γνωστή και εν γένει η λύση του προβλήματος μη αναλυτική.
- Μπορεί η κατανομή ρεύματος να είναι τυχαία ? ΌΧΙ θυμηθείτε τα στάσιμα κύματα.
- Η Πρώτη περίπτωση τέτοιας κεραίας που πρόκειται να μελετήσουμε είναι ένα ηλεκτρικό δίπολο μήκους $\lambda/2$ δηλαδή σε τάξη μεγέθους του μήκους κύματος του σήματος που θέλουμε να εκπέμψουμε.

Κεραία λ/2

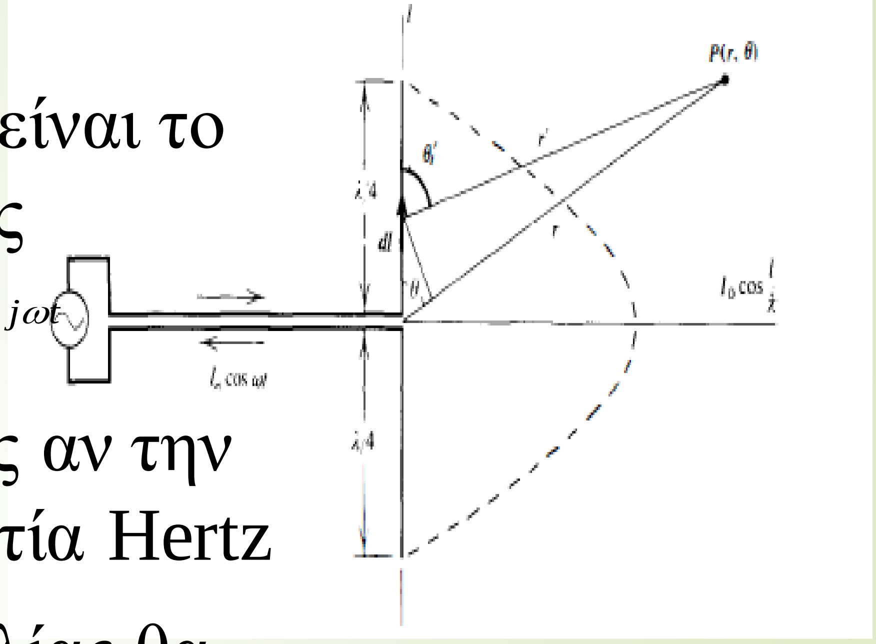
- Στη περίπτωση αυτή το συνολικό μήκος της κεραίας είναι το μισό του μήκους κύματος του εκπεμπόμενου σήματος
- Το ρεύμα που διαρρέει την κεραία είναι $I(t)=I_o \cos kz e^{j\omega t}$
- Θα μπορούσαμε να υπολογίζαμε το πεδίο της κεραίας αν την φανταζόμασταν σαν ένα σύνολο από στοιχειώδη φορτία Hertz
- Άρα στο μακρινό πεδίο το ηλεκτρικό πεδίο ακτινοβολίας θα είναι $E_\theta = \int_{z=-\frac{\lambda}{4}}^{z=\frac{\lambda}{4}} dE_{\theta d}$ με $dE_{\theta d} = \frac{I_o dz}{4\pi\epsilon_o} \frac{j\omega}{c^2 r} e^{j(\omega t - kr)} \sin\theta_r$ &

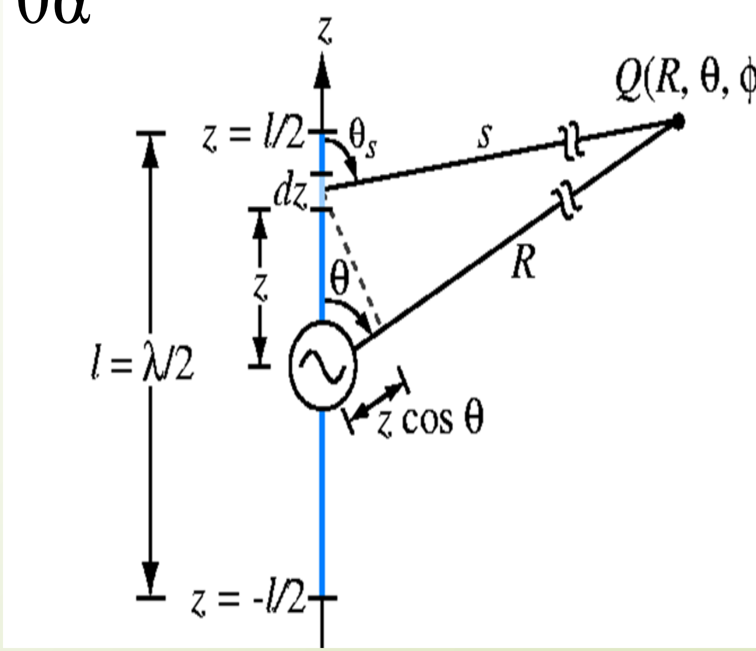
$$dH_\phi = \frac{dE_\theta}{\eta} \quad \text{με } r=R- z\cos\theta$$

και τελικά

$$\tilde{E}_\theta = j\,60\,I_0 \left[\frac{\cos\left[\frac{\pi}{2}\cos\theta\right]}{\sin\theta} \right] \left(\frac{e^{j(\omega t - kR)}}{R} \right)$$

$$\tilde{H}_\phi = \frac{\tilde{E}_\theta}{\eta_0}$$





Κεραία λ/2

- Το μέτρο του διανύσματος του Poynting θα δίνεται από τη σχέση (ισχύς ανά επιφάνεια):

$$P(R,\theta) = \frac{\left|\tilde{E}_\theta\right|^2}{2\eta_0} = \frac{15\ \mathrm{I}_0^2}{\pi R^2}\left[\frac{\cos^2\left[\frac{\pi}{2}\cos\theta\right]}{\sin^2\theta}\right]$$

- Η μέγιστη τιμή του είναι όταν θ=π/2, και είναι ίση με: $P_{\max} = P_0 = \frac{15\ \mathrm{I}_0^2}{\pi R^2}$
- Ο όρος $F(\theta) = \frac{P(R,\theta)}{P_0} = \left[\frac{\cos\left[\frac{\pi}{2}\cos\theta\right]}{\sin\theta}\right]^2$

ονομάζεται συντελεστής διαγράμματος και περιγράφει το διάγραμμα εκπομπής στο μακρινό πεδίο. Η ισχύς στο μακρινό πεδίο πέφτει στο μισό της μέγιστης τιμή (το Ε πέφτει στο 0.707 της μέγιστης τιμής) για γωνίες 51° και 129° που αντιστοιχούν σε εύρος γωνίας μισής ισχύος 78° (Το στοιχειώδες δίπολο το αντίστοιχο είναι 90°).

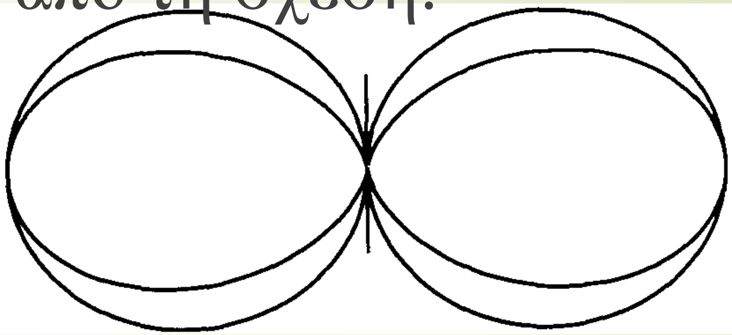
Κεραία λ/2

- Η ολική ακτινοβολούμενη ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$P_{rad} = R^2 \iint_{4\pi} S(R,\theta)\, d\Omega = \frac{15\, I_0^2}{\pi} \int_0^{2\pi}\int_0^{2\pi} \left[\frac{\cos\left[\frac{\pi}{2}\cos\theta\right]}{\sin\theta} \right]^2 \sin\theta\, d\theta\, d\phi = 36.6\, I_0^2$$

- Η κατευθυντικότητα της διπολικής κεραίας λ/2 θα δίνεται από τη σχέση:

$$D = \frac{4\pi R^2 P_{max}}{P_{rad}} = \frac{4\pi R^2}{36.6\, I_0^2}\left(\frac{15\, I_0^2}{\pi R^2}\right) = 1.64\ (2.15\, dB)$$



- και η αντίσταση ακτινοβολίας από τη σχέση: $R_{rad} = \frac{2 P_{rad}}{I_0^2} = \frac{2 \times 36.6\, I_0^2}{I_0^2} \simeq 73\ \Omega$

Πέρα από τη λ/2

- Τα προηγούμενα αποτελέσματα γενικεύονται για οποιαδήποτε κεραία λεπτής διατομής μήκους συγκρίσιμο με το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου σήματος Συγκεκριμένα στην προσέγγιση r=R-z cos θ και θεωρώντας ως D_l το μήκος της κεραίας έχουμε

$$H_\phi = \frac{jI_o sin\theta e^{j(\omega t - kr)}}{4\pi r}\left\{\int_{-D_l/2}^{0} e^{jkzcos\theta} sin\left[k\left(\frac{D_l}{2}+z\right)\right]dz + \int_{0}^{D_l/2} e^{jkzcos\theta} sin\left[k\left(\frac{D_l}{2}-z\right)\right]dz\right\}$$

$$H_\phi = \frac{jI_o e^{j(\omega t - kr)}}{2\pi r}\frac{cos[(kD_l cos\theta)/2] - cos(kD_l/2)}{sin\theta}$$ για το E_θ πολ/με με Z_o ή η_o

$$E_\theta = \frac{j\eta_o I_o e^{j(\omega t - kr)}}{2\pi r}\frac{cos[(kD_l cos\theta)/2] - cos(kD_l/2)}{sin\theta}$$

- (δεν κάναμε και τίποτα απλά αποδεικνύουμε τους προηγούμενους τύπους)

Κεραίες N * λ/2

- Δεδομένου ότι για λεπτή κεραία μήκους n λ/2 το μέτρο του Δ. Pointing είναι:

$$P(R,\theta)=\frac{|E_\theta|^2}{2\eta_0}=\frac{15\,\mathrm{I}_0^2}{\pi R^2}\left[\frac{\cos\left[\frac{n\pi}{2}\cos\theta-\cos(\frac{n\pi}{2})\right]}{\sin\theta}\right]^2$$

- Τότε για n =1 η ποσότητα *F(θ)* κατά τα γνωστά είναι $\mathrm{F}_1(\theta)=\dfrac{P(R,\theta)}{P_0}=\left[\dfrac{\cos\left[\frac{\pi}{2}\cos\theta\right]}{\sin\theta}\right]^2$

- Για n=2 $\mathrm{F}_2(\theta)=\left[\dfrac{\cos\left[\pi\cos\theta+1\right]}{\sin\theta}\right]^2$ και εύρος ημίσειας δέσμης (εκεί που ισχύς του πεδίο ακτινοβολίας πέφτει στο μισό της) είναι 47^o

- Για n=3 $\mathrm{F}_3(\theta)=\left[\dfrac{\cos\left[\frac{3\pi}{2}\cos\theta\right]}{\sin\theta}\right]^2$ και το σχήμα του φαίνεται στο 3^o διάγραμμα