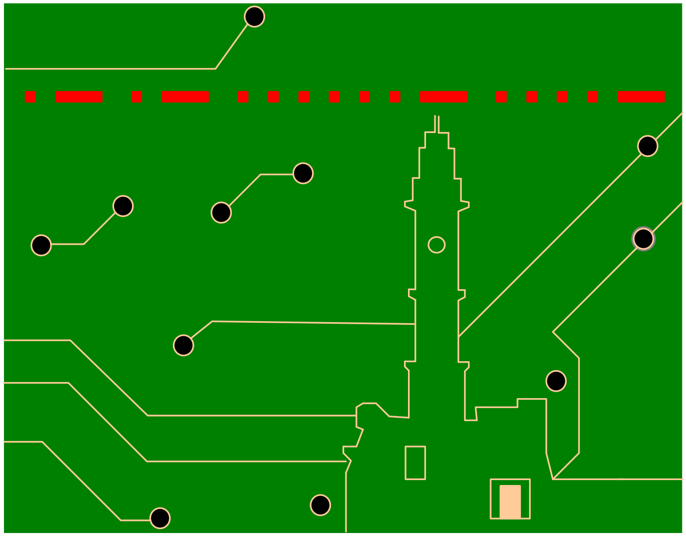
ΤΗΛ412 Ανάλυση & Σχεδίαση (Σύνθεση) Τηλεπικοινωνιακών Διατάξεων

Διαλέξεις 9-10

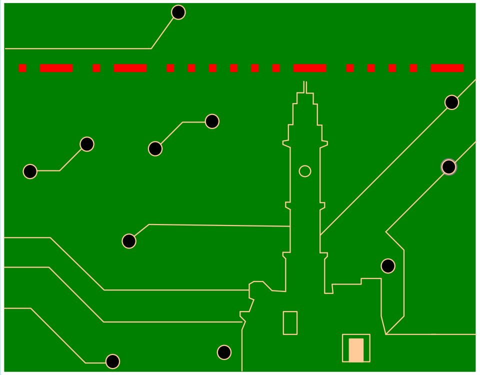


Άγγελος Μπλέτσας

ΗΜΜΥ Πολυτεχνείου Κρήτης, Χειμερινό Εξάμηνο 2016-2017

Διαλέξεις 9-10 – Κεραίες
(Από την οπτική γωνία του μηχανικού!)

- Εξισώσεις Helmholtz & Maxwell (& διανυσματική ανάλυση).
- Σύζευξη μακρινού πεδίου (Far Field Coupling).
- Χαρακτηριστικά Κεραιών: VSWR, RL, Efficiency, Gain, Bandwidth, HPBW, Polarization.
- Γρήγορος υπολογισμός κέρδους σε κεραίες υψηλού κέρδους
- Κακή προσαρμογή Πόλωσης (Polarization Mismatch)



Βιβλιογραφία Διάλεξης

Kai Chang, “RF and Microwave Wireless Systems”, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, John Wiley & Sons, 2000.

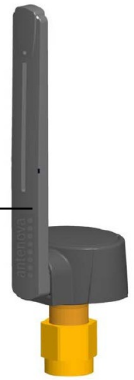
Βασική ερώτηση μαθήματος

ή

?

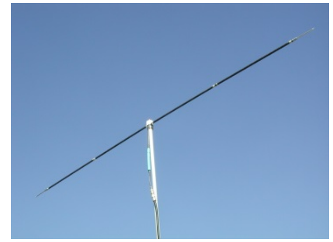
Κεραίες 2.4-2.5GHz

	Typical performance
Peak gain	2.2 dBi
Average gain	-1.0 dBi
Average efficiency	80%
Maximum Return Loss	-13 dB
Maximum VSWR	1.6:1

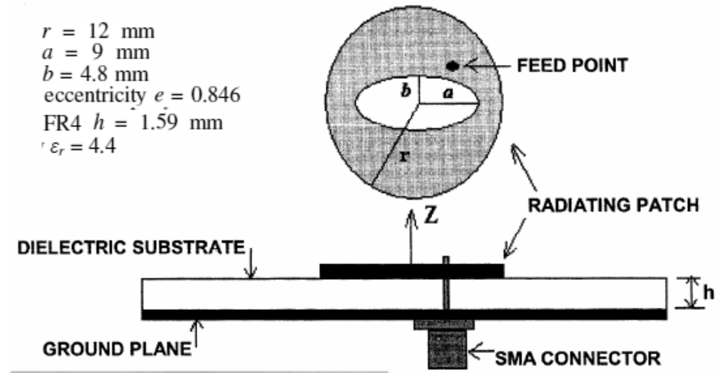


Frequency [GHz]	Gain [dBi]	Impedance [Nom]	VSWR	Polarization	Electrical Length	Radiation
2.4 – 2.5	2.0	50 Ω	≤ 2.0	Vertical	¼, dipole	Omni

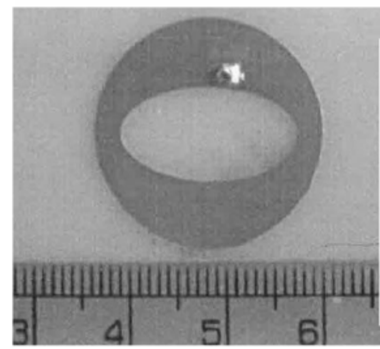
Ορισμός

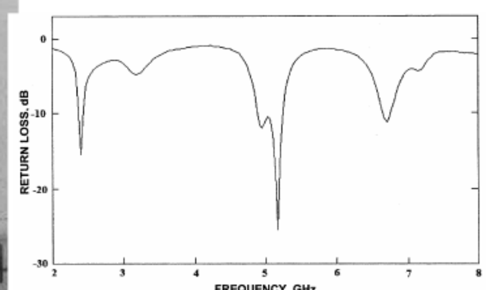


- Κεραία = διεπαφή (i.e. interface) μεταξύ κυμάτων/ σημάτων.
- Κεραία ≡ συντονισμός.



- Κεραία = μέγιστη ακτινοβολία.

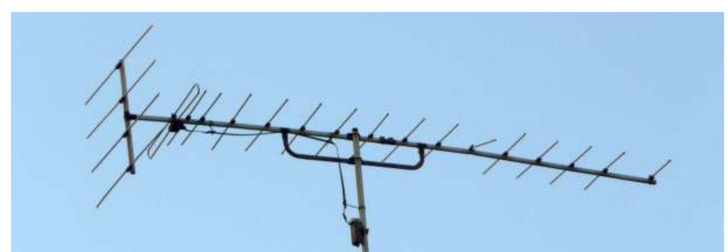




http://www.qsl.net/va3iul/

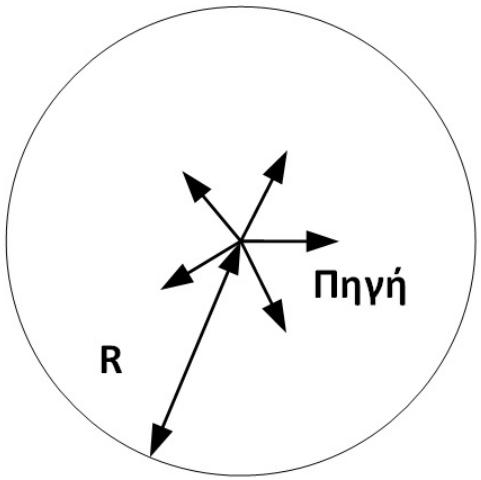
- Κυματοδηγός = ελάχιστη ακτινοβολία.

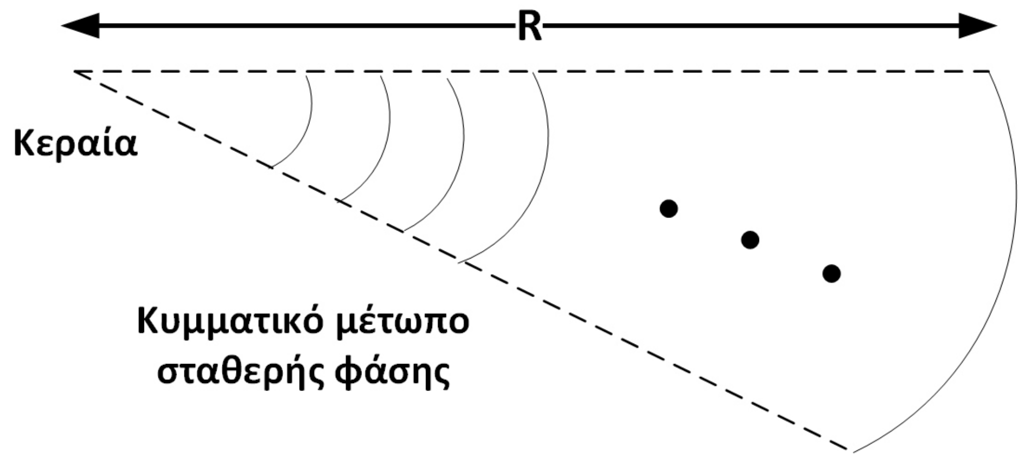
- Χαρακτηρισμός: γεωμετρία, κέρδος, λωβός, εύρος ζώνης.



Ισοτροπικός Ακτινοβολητής και Επίπεδα Κύματα

$$\nabla^2\vec{E} + k_0^2\vec{E} = 0$$





- Θεωρητικό (και μόνο) εργαλείο.
- Μέτωπο κύματος σφαιρικό.
- Πυκνότητα ισχύος:

$$P_d = \frac{P_t}{4\pi \cdot R^2}$$

- Μεγάλο R => επίπεδο κύμα (όχι σφαιρικό)
- Η/Μ πεδίο: Εξίσωση Κύματος (Helmholtz).

Θυμάστε τις εξισώσεις του Maxwell?

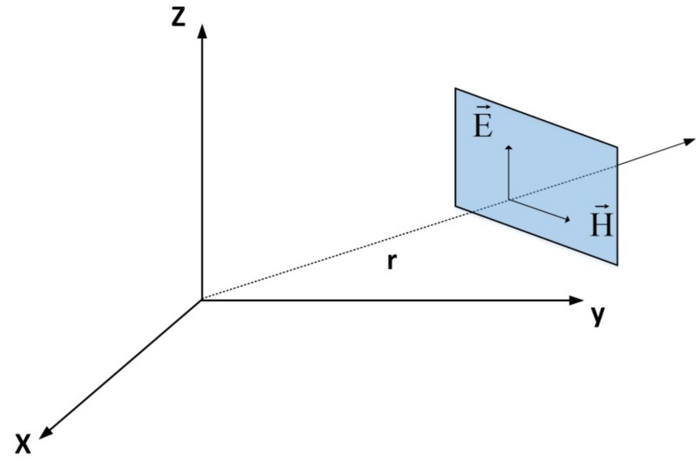
Div: Μεταβολή διανυσματικού πεδίου ανά μονάδα όγκου

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad \text{Gauss' law}$$

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Faraday's law}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad \text{Ampere's law}$$

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \quad \text{flux law}$$



Curl: Στροβιλισμός διανυσματικού πεδίου ανά μονάδα επιφάνειας

Βασικές Η/Μ Μονάδες

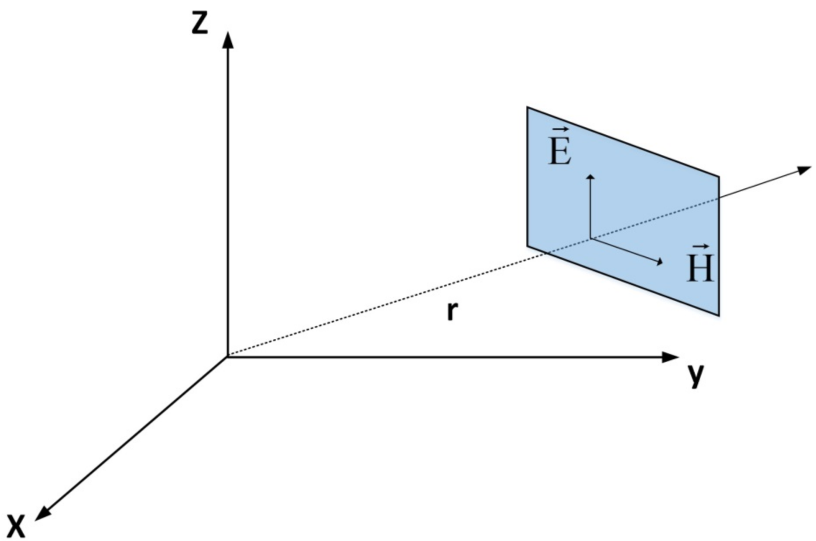
- Διηλεκτρική σταθερά (permittivity) ε: Farad/m
- Ηλεκτρικό πεδίο (Electric Field) E: Volt/m
- Μαγνητική διαπερατότητα (permeability) μ: Henry/m
- Μαγνητικό πεδίο (Magnetic Field) H: Ampere/m
- Πυκνότητα μαγνητικής ροής (Magnetic flux density) B: Tesla
- Μαγνητική ροή (Magnetic flux) Φ: Weber = Henry Ampere
- Ηλεκτρική μετατόπιση (Electric Displacement) D: Coulomb/m^2

Θυμάστε διανυσματική ανάλυση?

Let f: $R^3 \to R^3$ and F:$R^3 \to R^3$. Write $F = (f_1, f_2, f_3)$.

Similarly for g and G.

Define:



$$\text{grad}(f) \equiv \nabla f = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z}\right)$$

$$\text{div}(F) \equiv \nabla \cdot F = \frac{\partial f_1}{\partial x} + \frac{\partial f_2}{\partial y} + \frac{\partial f_3}{\partial z}$$

$$\text{curl}(F) \equiv \nabla \times F = \left(\frac{\partial f_3}{\partial y} - \frac{\partial f_2}{\partial z}, \frac{\partial f_1}{\partial z} - \frac{\partial f_3}{\partial x}, \frac{\partial f_2}{\partial x} - \frac{\partial f_1}{\partial y}\right)$$

$$\text{laplace}(f) \equiv \nabla^2 f = \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}\right)$$

$$\text{laplace}(F) \equiv \nabla^2 F = \left(\nabla^2 f_1, \nabla^2 f_2, \nabla^2 f_3\right)$$

Θυμάστε διανυσματική ανάλυση?

Let $\phi(x,y,z)$ be a scalar field. The gradient is a vector

$$\text{grad } \phi = \left(\frac{\partial\phi}{\partial x}, \frac{\partial\phi}{\partial y}, \frac{\partial\phi}{\partial z}\right),$$

it is the derivative of ϕ in each direction. The gradient of a scalar field is a vector field. An alternative notation is to use the *del* or *nabla* operator, $\nabla\phi = \text{grad } \phi$.

Divergence of a vector field

Let F(x,y,z) be a vector field, continuously differentiable with respect to x,y and z. Then the divergence of F is defined by

$$\text{div F} = \frac{\partial F_1}{\partial x} + \frac{\partial F_2}{\partial y} + \frac{\partial F_3}{\partial z}.$$

div F is a scalar field it can also be written as $\text{div}\,\mathbf{F} = \nabla \cdot \mathbf{F}$

Laplacian

$$\Delta f = \nabla^2 f = \nabla \cdot \nabla f,$$

$$\Delta f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

$$\Delta f = \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial \rho}\left(\rho\frac{\partial f}{\partial \rho}\right) + \frac{1}{\rho^2}\frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

$$\Delta f = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial f}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2 \sin\varphi}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\sin\varphi\frac{\partial f}{\partial \varphi}\right) + \frac{1}{r^2\sin^2\varphi}\frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2}$$

Curl of a vector field

Let F(x,y,z) be a vector field, continuously differentiable with respect to x,y and z. Then the **curl** of F is defined by

$$\begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ F_1 & F_2 & F_3 \end{vmatrix} = \text{curl F} = \left(\frac{\partial F_3}{\partial y} - \frac{\partial F_2}{\partial z}\right)i - \left(\frac{\partial F_3}{\partial x} - \frac{\partial F_1}{\partial z}\right)j + \left(\frac{\partial F_2}{\partial x} - \frac{\partial F_1}{\partial y}\right)k$$

curl F is a vector field it can also be written as $\nabla\times F$.

Notice that $\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) = 0$

Θυμάστε διανυσματική ανάλυση?

$$\mathrm{grad}(f+g) \equiv \nabla(f+g) = \nabla f + \nabla g$$

$$\mathrm{div}(F+G) \equiv \nabla\cdot(F+G) = \nabla\cdot F + \nabla\cdot G$$

$$\mathrm{curl}(F+G) \equiv \nabla\times(F+G) = \nabla\times F + \nabla\times G$$

$$\mathrm{grad}(fg) \equiv \nabla(fg) = f\nabla g + g\nabla f$$

$$\mathrm{div}(fG) \equiv \nabla\cdot(fG) = \nabla f\cdot G + f\nabla\cdot G$$

$$\mathrm{curl}(fG) \equiv \nabla\times(fG) = \nabla f\times G + f\nabla\times G$$

$$\mathrm{grad}(F\cdot G) \equiv \nabla(F\cdot G) = (F\cdot\nabla)G\text{-}(G\cdot\nabla)F + F\times(\nabla\times G) + G\times(\nabla\times F)$$

$$\mathrm{div}(F\times G) \equiv \nabla\cdot(F\times G) = G\cdot\nabla\times F\text{-}F\cdot\nabla\times G$$

$$\mathrm{curl}(F\times G) \equiv \nabla\times(F\times G) = F(\nabla\cdot G)\text{-}G(\nabla\cdot F) + (G\cdot\nabla)F - (F\cdot\nabla)G$$

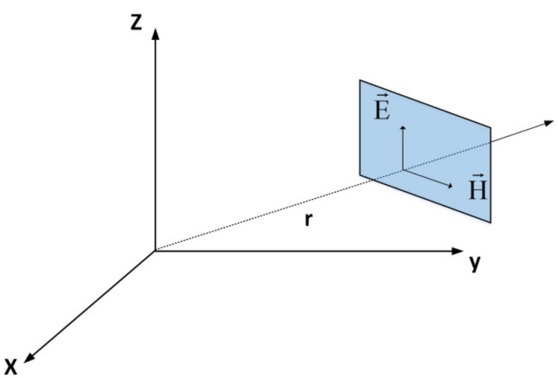
$$\mathrm{div\ grad}\ f = \nabla\cdot\nabla f = \nabla^2 f = \mathrm{laplace}\ f$$

$$\mathrm{curl\ grad}\ f = \nabla\times\nabla f = 0$$

$$\mathrm{div\ curl}\ F = \nabla\cdot(\nabla\times F) = 0$$

$$\mathrm{curl}^2 F = \nabla\times(\nabla\times F) = \nabla\nabla\cdot F\text{-}\nabla^2 F = \mathrm{grad\ div}(F)\text{-laplace}\ F$$

$$\mathrm{grad\ div}\ F = \nabla\nabla\cdot F = \nabla\times(\nabla\times F) + \nabla^2 F = \mathrm{curl}^2 F + \mathrm{laplace}\ F$$



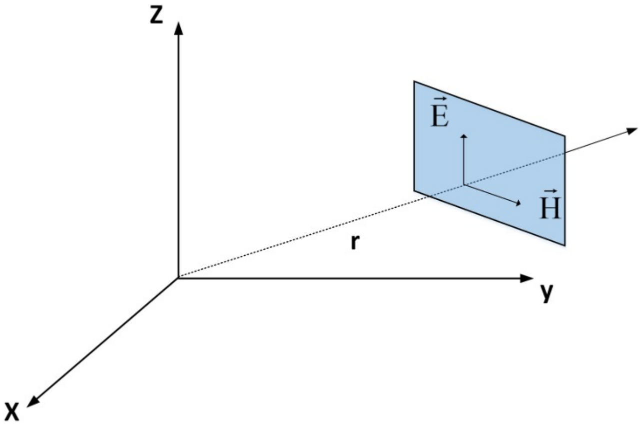
Θυμάστε διανυσματική ανάλυση?(2)

Τα παρακάτω video εξηγούν την διαίσθηση (intuition)... (curl=περιστροφή/ροπή διανύσματος σε σχέση με επιφάνεια, div=ρυθμός μεταβολής διανύσματος σε σχέση με όγκο, grad= κατεύθυνση ρυθμού μεταβολής)

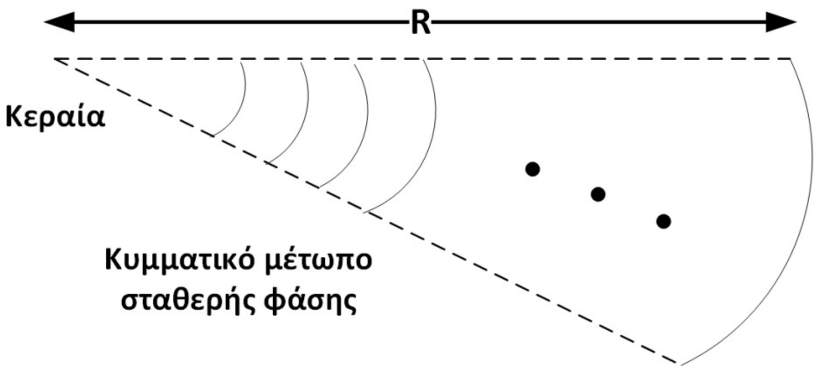
Curl
http://www.youtube.com/watch?v=fYzoiWIBjP8

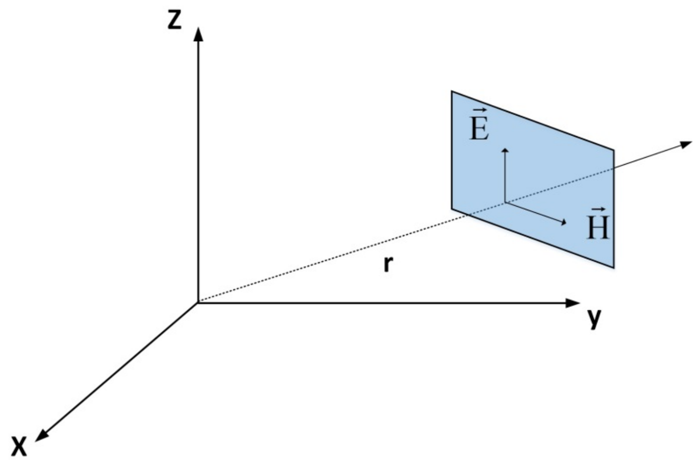
Div
http://www.youtube.com/watch?v=tOX3RkH2guE

Grad
http://www.youtube.com/watch?v=OB8b8aDGLgE



Εξίσωση Κύματος (Εξίσωση Helmholtz): Επίλυση





$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}, \vec{k}_0 = k_0 \vec{n}_0,$$

$$\vec{H} = -\frac{1}{j\omega\mu_0}\nabla\times\vec{E} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}\vec{n}\times\vec{E}.$$

Maxwell

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-j\vec{k}_0 \vec{r}},$$

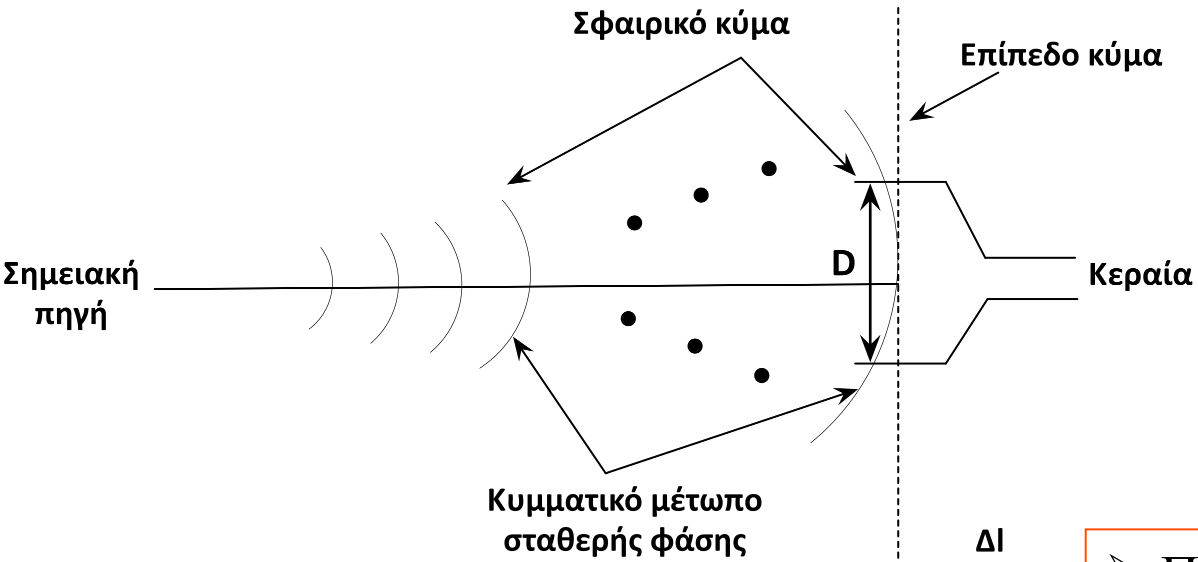
$$\eta_0 = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi$$

Διαστάσεις σε Ωhm

Λύση Helmholtz

$$P_d = \left|\frac{1}{2}\vec{E}\times\vec{H}^*\right| = \frac{1}{2}\frac{E_0^2}{\eta_0} = \frac{P_t}{4\pi R^2} \Rightarrow E_0 = \frac{\sqrt{60P_t}}{R} = \sqrt{2}E_{rms}$$

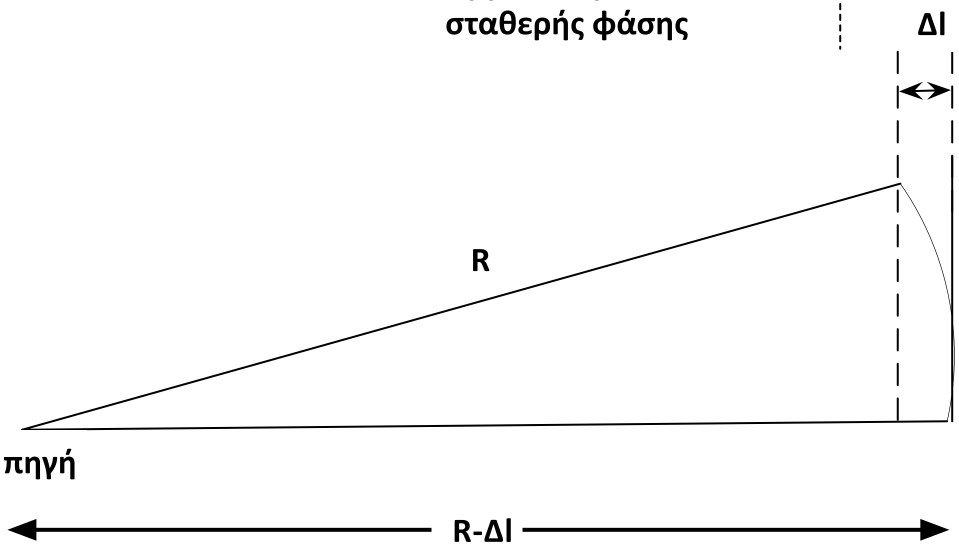
Περιοχή Μακρινού Πεδίου (Far Field Region)



$$R^2 = (R - \Delta I)^2 + \frac{D^2}{4}, R^2 \approx R^2 + (\Delta I)^2 \Rightarrow$$

$$R = \frac{D^2}{8\Delta I}, \Delta I = \frac{1}{16}\lambda_0 \Rightarrow$$

$$R_{far-field} = \frac{2D^2}{\lambda_0}$$



- Περιοχή όπου το επίπεδο κύμα είναι “καλή” προσέγγιση!

- Πρακτικά, εκεί όπου τα διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραιών είναι <u>ανεξάρτητα της απόστασης</u>.

Χαρακτηριστικά: Input VSWR & Impedance

Αποδεικνύονται στις επόμενες διαλέξεις

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|},$$

$$\text{RL} = 20\log_{10}|\Gamma|,$$

Return Loss

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}.$$

- $|\Gamma|^2$: ποσοστό ισχύος που χάνεται λόγω κακής προσαρμογής (και ανάκλασης).
- ισχύς στην κεραία = $(1-|\Gamma|^2)$ φορές την ισχύ που παραδίδει η πηγή.
- Συνήθως, VSWR είναι μικρότερο του 2:1.
- Παράδειγμα: VSWR = 2:1 σημαίνει ότι $|\Gamma|^2$ =11% της παραδιδόμενης ισχύος στην κεραία χάνεται και δεν εκπέμπεται (λόγω κεραίας)!

Χαρακτηριστικά: Bandwidth

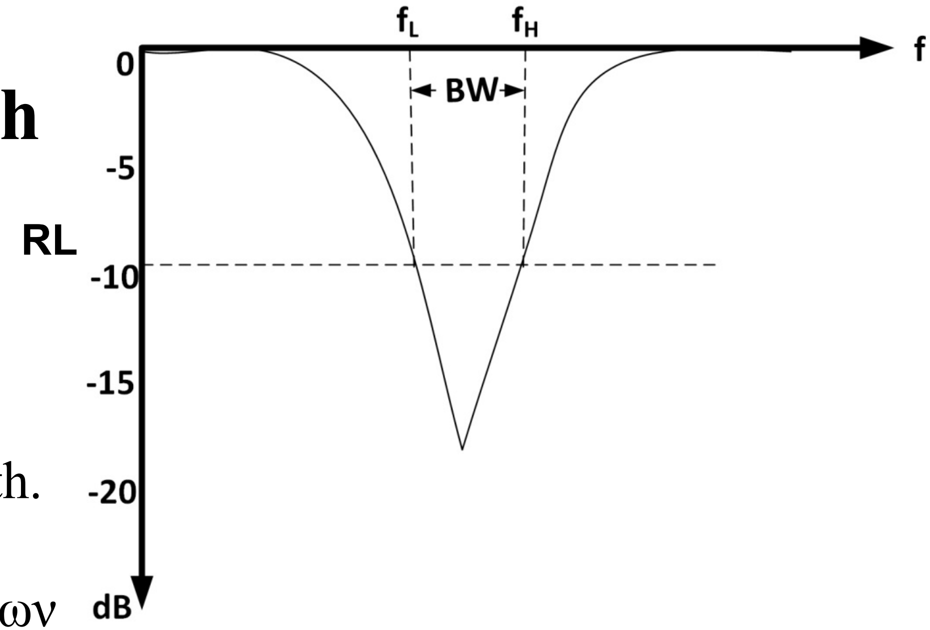
➢ Πολλαπλοί ορισμοί, ανάλογα με την εφαρμογή.

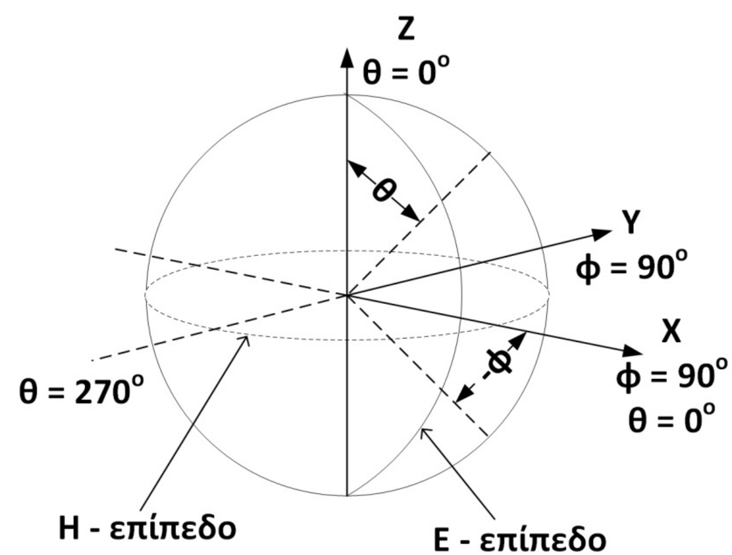
➢ Πιο συνηθισμένη: impedance bandwidth.

➢ Impedance bandwidth: εύρος συχνοτήτων όπου RL είναι κάτω από ένα όριο.

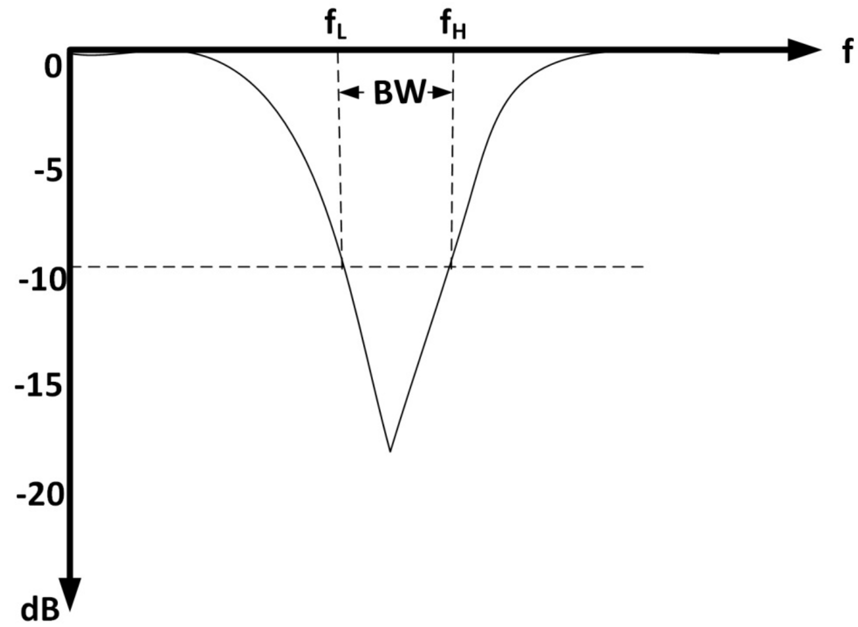
➢ Άλλοι ορισμοί βασίζονται σε κέρδος (gain), απόδοση (efficiency), διαγράμματα (patterns) etc.

➢ Λειτουργικό εύρος ζώνης συνήθως μικρότερο.





Χαρακτηριστικά: Διαγράμματα Ακτινοβολίας



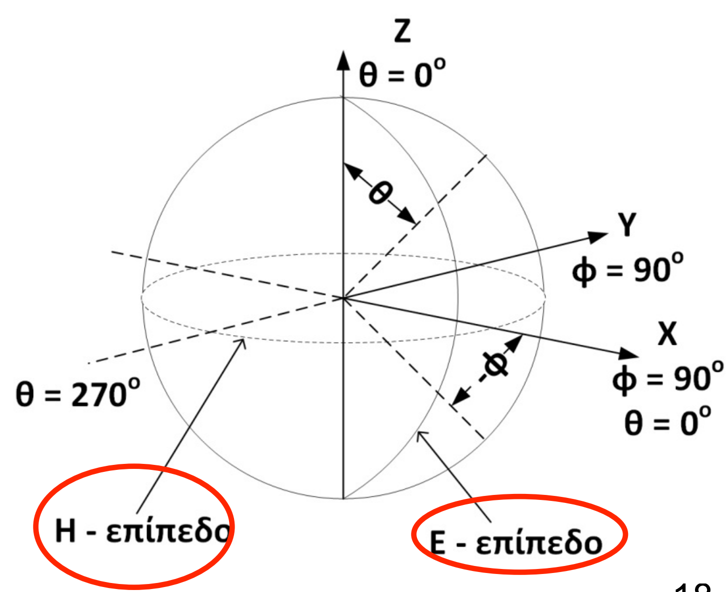
- Θυμηθείτε: ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μακρινού πεδίου είναι ανεξάρτητα της απόστασης.

- <u>Τυπικά, διαγράμματα πυκνότητας ισχύος (διάνυσμα Poynting διαμέσου μιας σφαίρας με κέντρο την κεραία).</u>

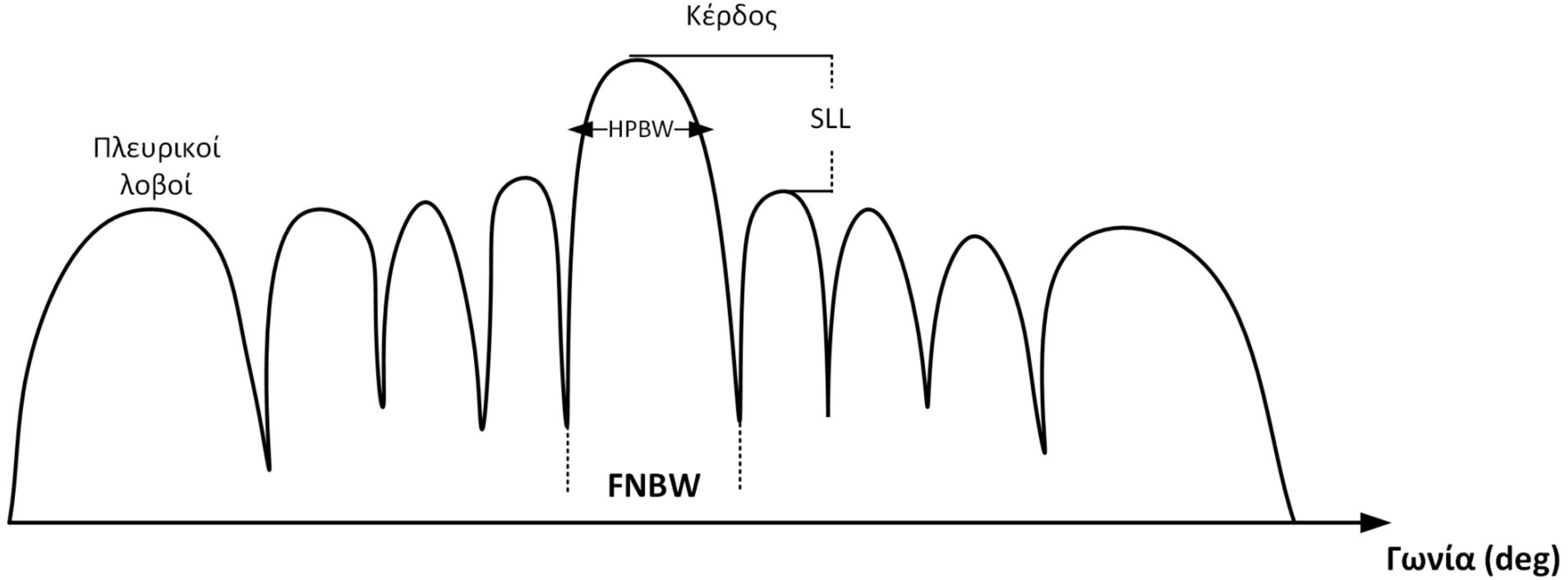
- Απλούστερη προσέγγιση: σχεδίαση ηλεκτρικού ή/και μαγνητικού πεδίου σε επίπεδα τομής όπου το πεδίο μεγιστοποιείται.

- E-plane: E_θ plane.

- Cross-polarization component: E_φ



Χαρακτηριστικά: Εύρος δέσμης κεραίας Ημίσειας-Ισχύος (Half-Power Beamwidth-HPBW) και Επίπεδο Πλευρικού Λοβού (Side Lobe Level - SLL)



- HPBW: το εύρος σε μοίρες ώστε η ισχύς ακτινοβολίας να πέσει στο μισό.
- SLL: ο αριθμός σε dB κάτω από τον κύριο λοβό των πλευρικών λοβών.

Χαρακτηριστικά: Κατευθυντικότητα (Directivity), Κέρδος (Gain), Απόδοση (Efficiency)

$$\text{Poynting power density} = \vec{S}(\theta,\varphi) = \frac{1}{2}\Re\left[\vec{E}\times\overrightarrow{H^*}\right],$$

$$D(\theta,\varphi) = \frac{S(\theta,\varphi)}{P_t/4\pi R^2},$$

$$D_{max} = \frac{\max\left|\vec{S}(\theta,\varphi)\right|}{P_t/4\pi R^2},$$

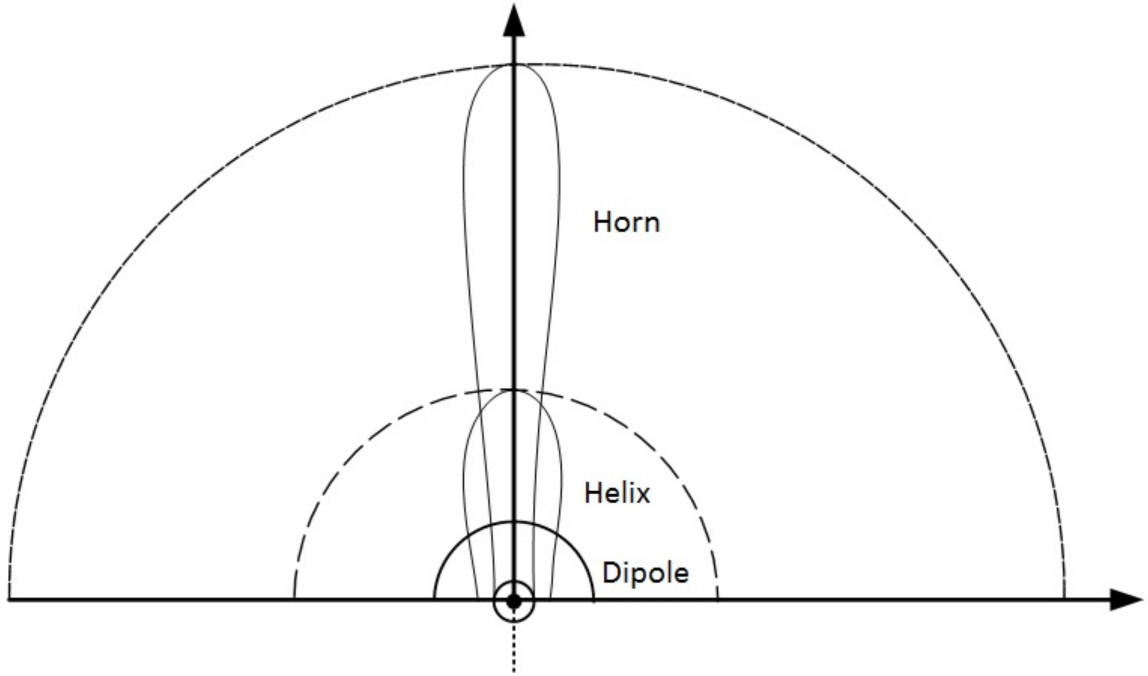
Note: $P_t = P_{rad}$

$$\text{efficiency } n = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{P_{rad}}{P_{rad}+P_{loss}}.$$

$$\text{Gain } G = nD_{max}.$$

- Κέρδος και απόδοση συνδέουν ακτινοβολούμενη ισχύ με ισχύ εισόδου (στην κεραία).
- Για παράδειγμα: $G\,P_{in}/4\pi R^2$ είναι ακτινοβολούμενη πυκνότητα ισχύος στην κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας (Σημ.: P_{in} είναι συνολική ισχύ εισόδου)
- $P_{in} = P_{rad}+P_{loss}$.
- Γιατί δεν μεγιστοποιούμε πάντα το κέρδος?

Χαρακτηριστικά: Κέρδος-εύρος ζώνης tradeoff



- Κέρδος-εύρος δέσμης tradeoff: μεγιστοποίηση του ενός, ελαχιστοποίηση του άλλου.
- Κέρδος-εύρος ζώνης (bandwidth) tradeoff υπάρχει επίσης και είναι θεμελιώδες.
- Επομένως, μεγιστοποίηση του κέρδους κεραίας κοστίζει σε μειωμένο εύρος ζώνης και αυξημένο SLL.

Χαρακτηριστικά: Γρήγορη Εκτίμηση Κέρδους σε Κεραίες Υψηλού Κέρδους

$$\text{HPBW} \approx K_1 \frac{\lambda_0}{\text{D}}, \qquad G \approx \frac{K_2}{\theta_1 \theta_2}$$

- $K_1 \approx 70^o$, D διάσταση κεραίας στο επίπεδο ενδιαφέροντος.
- $K_2 \approx 30{,}000$, θ_1, θ_2 είναι HPBW σε δύο βασικά ορθογώνια επίπεδα.

Χαρακτηριστικά: Ενεργός επιφάνεια (Effective Area), Πόλωση (Polarization)

- Ενεργός επιφάνεια είναι ανάλογη (αλλά συνήθως μικρότερη) της φυσικής επιφάνειας της κεραίας.
- Η εξίσωση απωλειών ελευθέρου χώρου Friis βασίζεται στην ενεργό επιφάνεια A_e η οποία συνδέεται με το κέρδος βάση της παρακάτω:

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

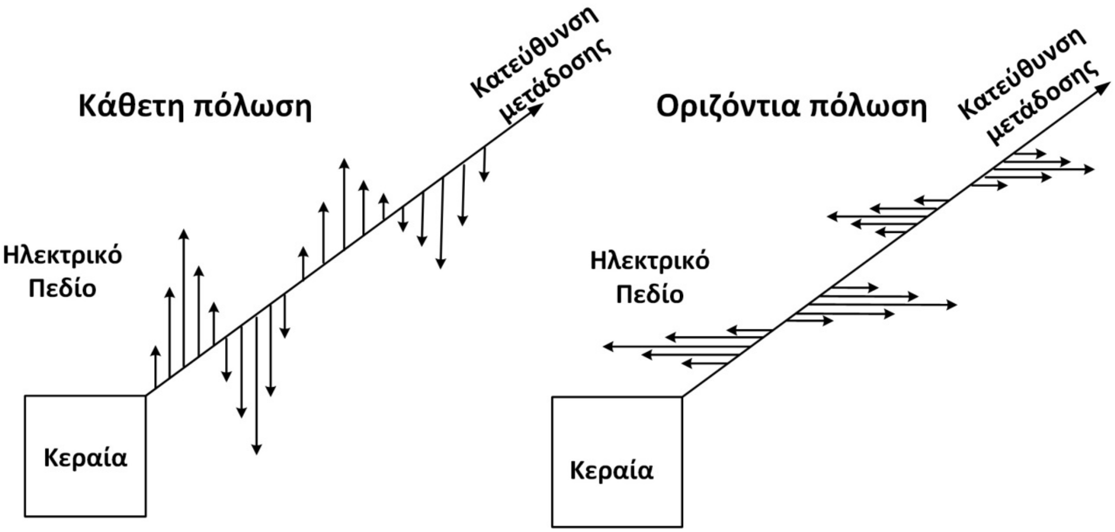
- Πόλωση = κατεύθυνση ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου:

  ίσια γραμμή: γραμμική πόλωση (linear polarization),

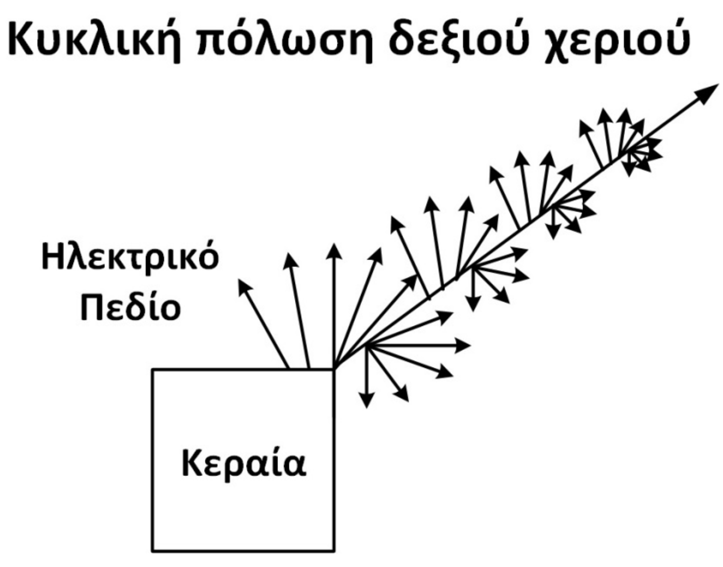
  κύκλος: κυκλική πόλωση [circular polarization, Left Hand (LH) ή Right Hand (RH)],

  έλλειψη: ελλειπτική πόλωση (elliptical polarization).

Παράδειγμα Πόλωσης



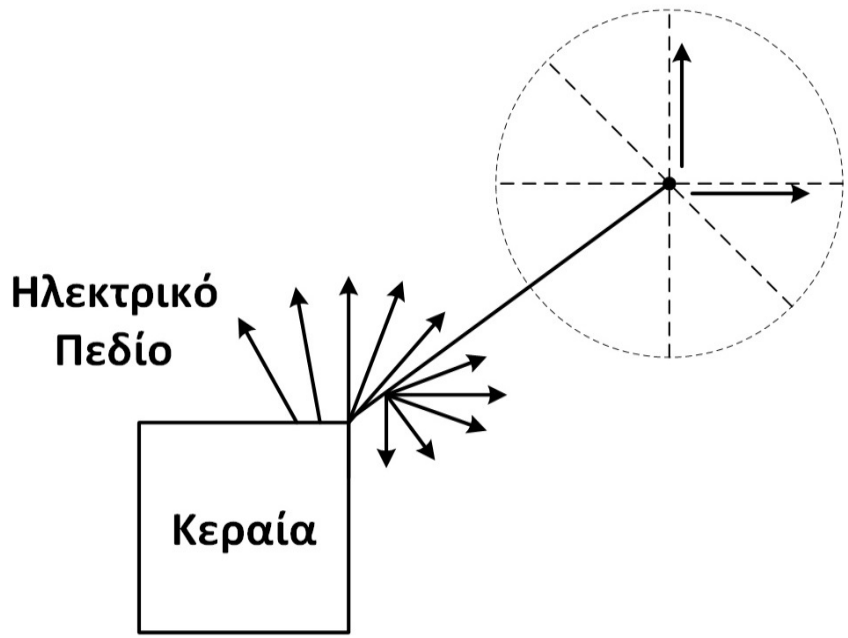
- ➢ γραμμική…



- ➢ κυκλική…

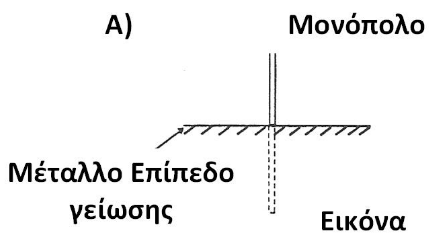
Κακή προσαρμογή Πόλωσης

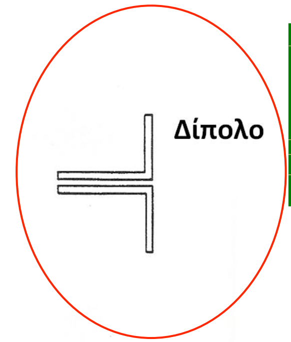
Κάθε οριζόντια ή κάθετη πόλωση λαμβάνει την μισή ισχύ

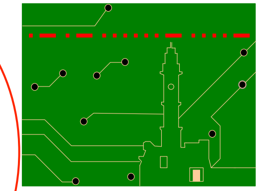


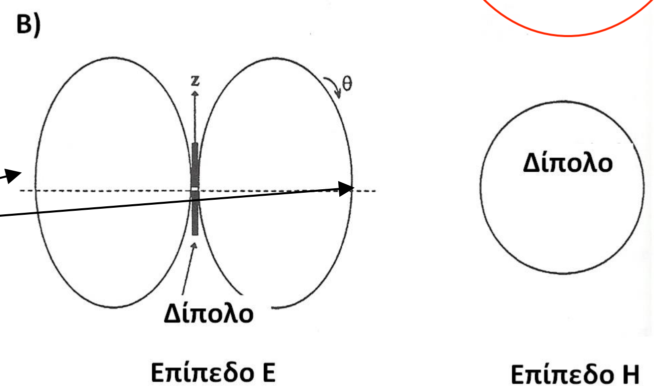
- Κυκλικά πολωμένη κεραία εκπέμπει σε γραμμικά πολωμένη κεραία λήψης.
- Η ισχύς λήψης είναι μειωμένη κατά 3 dB.

Παράδειγμα: Δίπολο

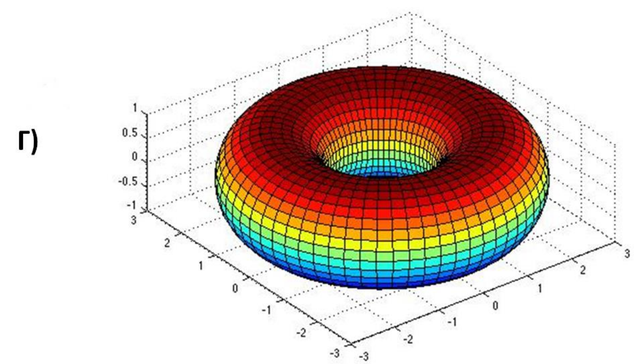








- G = 1.64 => 2.15 dBi

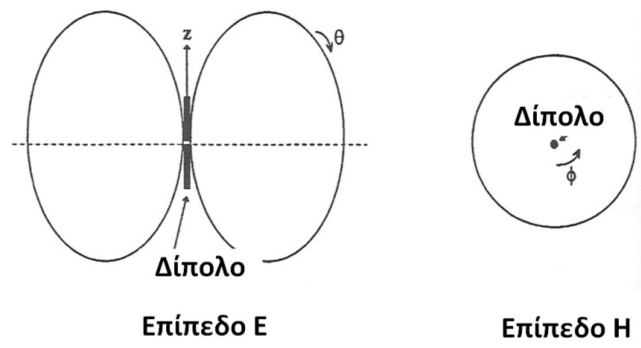


- ERP: ισχύς εκπομπής σε σχέση με το κέρδος διπόλου.
- EIRP: ισχύς εκπομπής σε σχέση με το κέρδος (=1) ισοτροπικής κεραίας.
- dBc: κέρδος κεραίας αναφερόμενο σε κυκλικά πολωμένη κεραία.

Παραδείγματα:

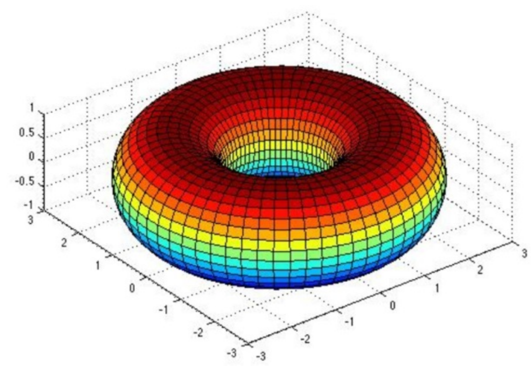
A)

B)



- ➢ δίπολο G = 1.64 = 2.15 dBi
- ➢ 2 W ERP = 2 x 1.64 EIRP = = 35.15 dBm EIRP
- ➢ G = 7 dBc = 4 dBi
- ➢ G = 7 dBd = 9.15 dBi

Γ)



Βασική ερώτηση μαθήματος

ή

?

Κεραίες 2.4-2.5GHz

	Typical performance
Peak gain	2.2 dBi
Average gain	-1.0 dBi
Average efficiency	80%
Maximum Return Loss	-13 dB
Maximum VSWR	1.6:1

Frequency [GHz]	Gain [dBi]	Impedance [Nom]	VSWR	Polarization	Electrical Length	Radiation
2.4 – 2.5	2.0	50 Ω	≤ 2.0	Vertical	¼, dipole	Omni

Ερωτήσεις?