Topic 6. Radiation Fundamentals

Telecommunication Systems Fundamentals

Profs. Javier Ramos & Eduardo Morgado
Academic year 2.013-2.014

Concepts in this Chapter

- *Antennas: definitions and classification*
- *Antenna parameters*
- *Fundamental Theorems: uniqueness and reciprocity. Images' method*
- *Friis' equation*
- *Link Budget of a Radio-Link*

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al
Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

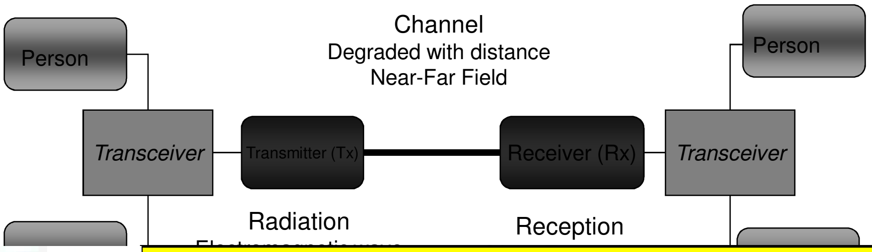
Bibliography

Antenna Theory and Design. W.L. Stutzman, G.A. Thiele. John Wiley & Sons

---

Introduction: Radio-Telecommunication Systems

- Info transmission implies to transmit a signal (with a given energy) through a radio-channel



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

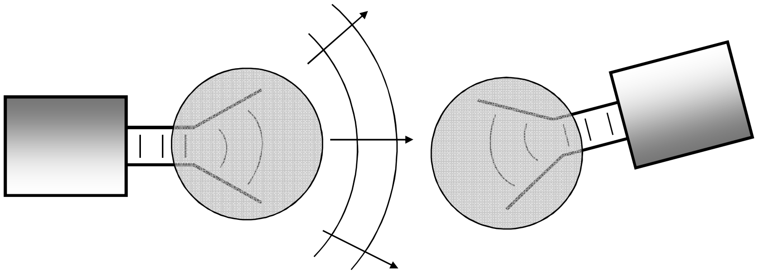
- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Introduction: Transmitting and Receiving Antenna

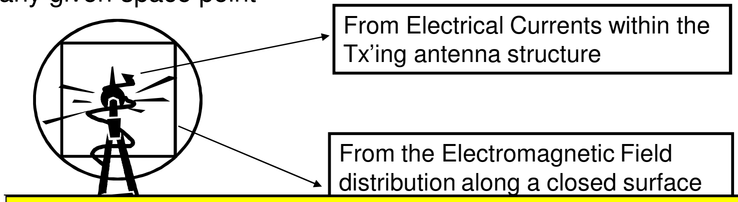
- An antenna can either transmit (radiate) energy in Transmission



- Or capture energy in Reception

Radiation Performance of an Antenna

- Radiation is the electromagnetic energy flux outward form a source
- Basic Problem in electromagnetic theory:
  - Calculus of the electromagnetic field produced by a structure in any given space point



From Electrical Currents within the Tx’ing antenna structure

From the Electromagnetic Field distribution along a closed surface

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Efficiency as Main Objetive in Antennas

- Efficiency is the main objective when designing/ selecting an antenna
  - Maximize the electromagnetic field power in a given point given an amount of power provided to the antenna
- Which antenna parameters should we consider
  - Phase Center
  - Power Parameters
    - Radiated power flux density
    - Radiation intensity
    - Directivity
    - Power Gain
  - Gain diagram
  - Polarization
  - Bandwidth

Power Parameters: Poynting's Theorem

- **Complex Poynting's Vector**: electromagnetic energy flux density through a given surface

$$S = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left\{\overline{E}\times\overline{H}^{*}\right\}$$

- **Average Power**: Poynting's vector flux

$$P_{media} = \iint S \cdot dS \;\; [\mathrm{W}]$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

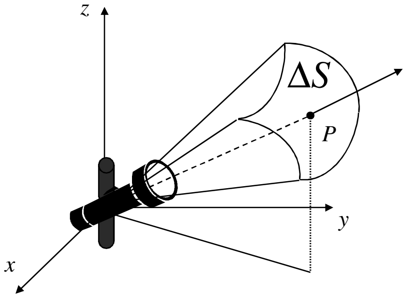
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al
Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Power Parameters: Radiation Density

- Average radiated power **per surface unit** in a given direction

$$\phi(\theta,\varphi)=\frac{1}{2}\mathrm{Re}\left\{\overline{E}\times\overline{H}^{*}\right\}\;\left[\frac{W}{m^{2}}\right]$$

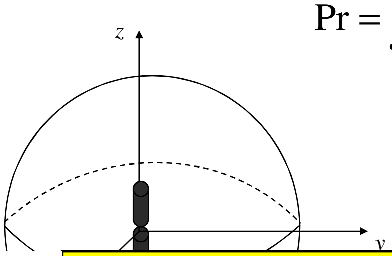


$$\phi(\theta,\varphi)=\frac{\Delta p(\theta,\varphi)}{\Delta S}$$

Power Parameters: Radiated Power

- ***Sum up*** radiated flux density along a sphere surface that circumscribe the antenna

$$\mathrm{Pr}=\iint\phi(\theta,\varphi)\cdot dS\;\;[\mathrm{W}]$$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

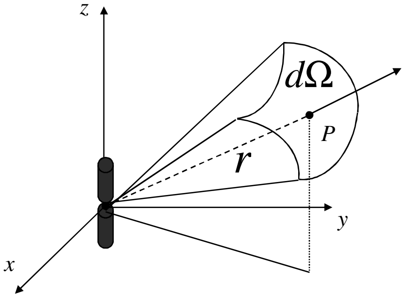
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Power Parameters: Radiation Intensity

- Average radiated power **per solid angle unit** in a given direction

$$i(\theta,\varphi)=\frac{\Delta p(\theta,\varphi)}{\Delta\Omega}\quad\left[\frac{W}{esteroradian}\right]$$



$$\mathrm{Pr}=\int\!\!\int i(\theta,\varphi)\cdot d\Omega$$

Power Parameters: Radiation Intensity

- **Independently of the distance** from the antenna

$$\Delta S=r^2\Delta\Omega\Rightarrow\phi(\theta,\varphi)\cdot r^2=i(\theta,\varphi)$$

- The Power Flux Density decreases with distance inversely proportional to the area of the spherical solid angle

- Radiation Diagram (power-wise)

$$r(\theta,\varphi)=\frac{i(\theta,\varphi)}{i_{\max}}$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

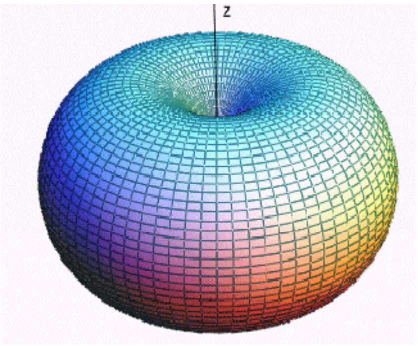
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

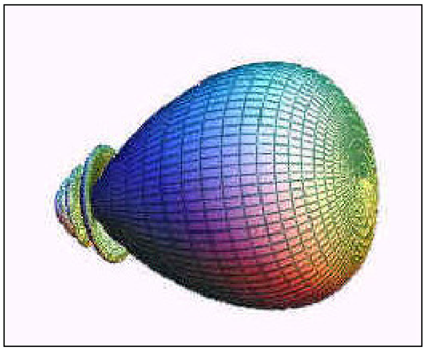
Power Parameters: Radiation Intensity

Omnidirectional (on Azimuth)

Directive



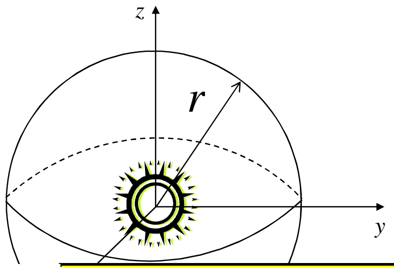
Dipolo: typical on cellular terminals



Yagi: typical for television receivers

Power Parameters: Isotropic Antenna

- **Ideal** point source that radiates **uniformly** in all directions



$$i_{iso} = \frac{\mathrm{Pr}}{4\pi}$$

$$\phi_{iso} = \frac{\mathrm{Pr}}{4\pi \cdot r^2}$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

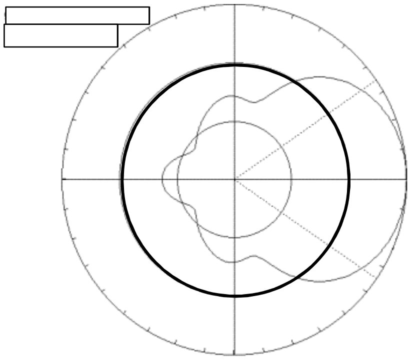
- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Power Parameters: Isotropic Antenna

$i(\theta,\varphi)$



Same area
under the curve

Assuming the same transmitted power by both antennas…which *focalizes* better?

Power Parameters: Directivity (function of direction)

- Ratio between the power density flux an antenna radiates and the one an isotropic (omnidirectional) antenna would do, as a function of the radiating direction

$$\boxed{D(\theta,\varphi)=\frac{i(\theta,\varphi)}{i_{iso}}=4\pi\frac{i(\theta,\varphi)}{\mathrm{Pr}}}$$

Pr Pr

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al
Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Power Parameters: Directivity

- Directivity is defined as the maximum value of the Directivity function

$$\boxed{D = 4\pi \frac{i_{\max}}{\Pr}}$$

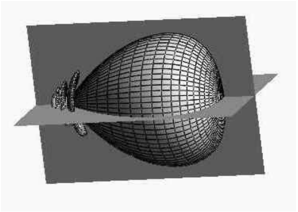
  - Because $\Pr = \iint i(\theta,\varphi)\cdot d\Omega \qquad r(\theta,\varphi) = \dfrac{i(\theta,\varphi)}{i_{\max}}$

$$\boxed{D = \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad \text{being} \quad \Omega_A = \iint r(\theta,\varphi)\, d\Omega}$$

Power Parameters: Directivity

- When the Bean is narrow

$$\boxed{D \approx \frac{4\pi}{\theta_1\theta_2}}$$



- Conclusions
  - Directivity provides information about how the radiated power is distributed with direction (elevation and azimuth)
  - Directivity does not provide information about the actual

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Power Parameters: Gain Function

- **Ratio** between the power intensity radiated in a direction and the radiated intensity of an isotropic antenna, given a power available to the antenna

$$\boxed{G(\theta,\varphi) = 4\pi \frac{i(\theta,\varphi)}{P_{in}}}$$

being P_{in} the power available at the antenna input

Power Parameters: Gain

- Gain is the maximum value of the Gain Function

$$\boxed{G = 4\pi \frac{i_{\max}}{P_{in}}}$$

  - Because it is a ratio, the units are dBs

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Power Parameters: Examples of Gain

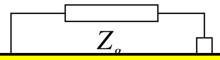
ANTENNA TYPE	GAIN (dBi)
Isotropic	**0,0**
Ground Plane 1/4 wavelength	**1,8**
Dipole 1/2 wavelength	**2,1**
Monopole 5/8 wavelength	**3,3**
Yagui 2 elements	**7,1**
Yagui 3 elements	**10,1**
Yagui 4 elements	**12,1**
Yagui 5 elements	**14,1**

Power Parameters: Efficiency

- P_{in} and **Pr** are related to each other around radiating ***Efficiency*** of the antenna

$$\boxed{\Pr = \eta \cdot P_{in}}$$

$$\eta_{cd} = \frac{R_r}{R_r + R_L} \qquad \eta_{cd} \qquad \eta_d = 1 - \left|\Gamma^2\right| \qquad \Gamma = \frac{Z_a - Z_g}{Z_a + Z_g}$$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al
Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Power Parameters: Efficiency

- From the above definition of Efficiency, the relationship between Gain and Directivity of an antenna can be derived

$$\boxed{G = \eta \cdot D}$$

- Can the Gain of an antenna be increased by increasing the Directivity?

Example

- A dipole of half wavelength without losses, with input impedanze of 73Ω is connected to a transmission line with characteristic impedance of 50Ω. Assuming the radiating intensity of the antenna is

$$i(\theta) = B_0 sen^3(\theta)$$

Compute the Gain of the Antenna

$$i_{\max} = i_{\max}(\theta) = B_0$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Example Answer

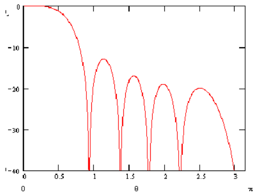
$$i_{\max} = i_{\max}(\theta) = B_0$$

$$P_r = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} D(\theta) sen\theta = 2\pi B_0 \int_0^{\pi} sen^4\theta \, d\theta = B_0\left(\frac{3\pi^2}{4}\right)$$

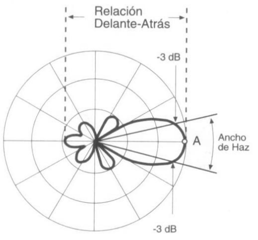
$$D = 4\pi \frac{i_{\max}}{P_r} = 1.697$$

$$G = \eta \cdot D = \left(1-|\Gamma|^2\right)D = \left(1-\left|\frac{73-50}{73+50}\right|^2\right)1.697 = 0.965 \cdot 1.697 = 1.638 = 2.14dB$$

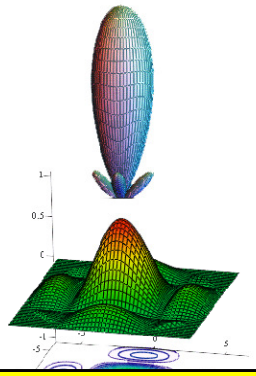
Radiation Diagram



Cartesian



Polar



What parameter are usefull?

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

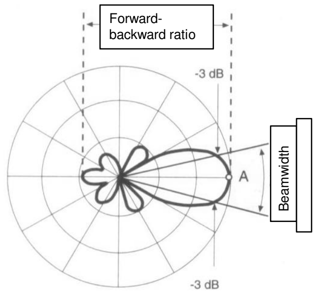
- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al
Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Radiation Diagram

- Parameters to characterize the lobe structure
  - Beamwidth
    - Null to Null Beamwidth
    - Half Power Beamwidth (HPBW) – 3dBs
    - 10 dB Beamwidth
  - Lobes
    - Main lobe
    - Side lobes
      - First lobe
    - Backlobe
  - Forward-backward ratio



Radiation Diagram: Classification

- Isotropic
- Omnidirectional
- Directive
- Multi-beam

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

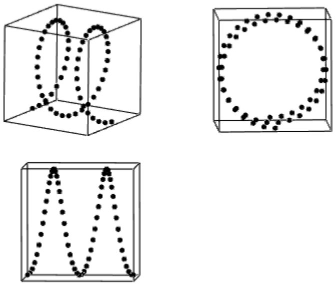
- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al
Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

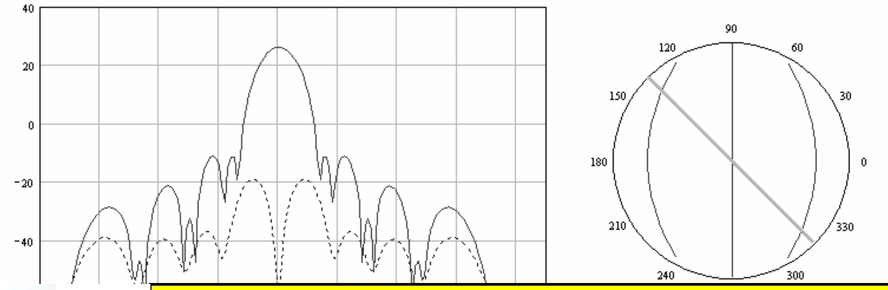
Polarization

- Of a **Plane-wave**, it refers to the spatial orientation of the time-variation of the electric field
- Of an **antenna**, it refers to the polarization of the radiated field
  - Generally speaking polarization is defined acording to the propagation direction



Polarization

- Co-Polar and Cross-Polar components



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

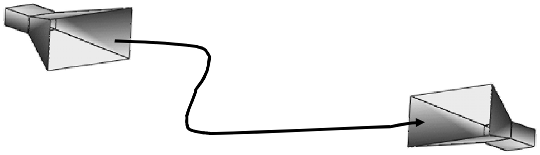
www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Antenna Bandwidth

- Frequency margin where the defined parameters for the antenna remain valid (impedance, beamwidth, sidelobes ratio, etc.)
  - Narrowband Antennas (<10% central frequency)
  - Broadband Antennas (>10% central frequency)

Antenna Radiation on Free-Space Condition

- What is Free-Space condition: no obstacles or material to influence the radiation patern – not even the ground



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

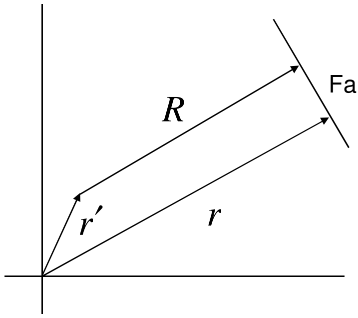
- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Radiation Zones

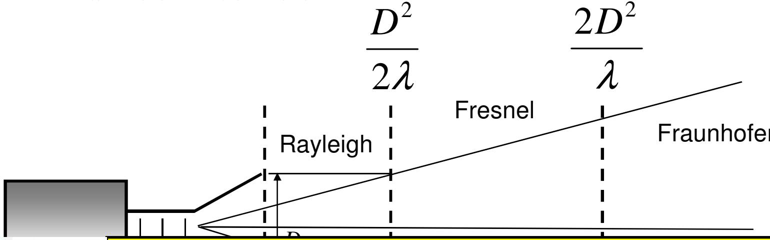
- When the distance is much greater than the wavelength, **R>> λ**, the observed wave behaves as a Plane-Wave.
- When can we consider we are “far enough”?



Far-Field zone: $R \approx r$

Radiation Zones

- Simplifying but useful approach: three zones are defined:
  - Near-Field: **Rayleigh** (spheric propagation)
  - Intermediate-Field: **Fresnel** (interferences)
  - Far-Field: **Fraunhofer**



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Radiation Zones: Far-Field

- Conclusions:
  - Power decreases as **square of the distance**
  - Satisfy condition of **Plane-Wave**
    - E and H fields are perpendicular
    - Amplitude of E and H fields are related to each other through the transmission mean impedance
  - The type of the transmitting antenna afects only on the angular variation of the transmitted power flux (**Radiation Diagram**)
  - **Transmission direction of the wave propagation** coincides with **line of sight** of the transmitting antenna

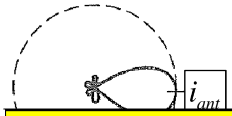
---

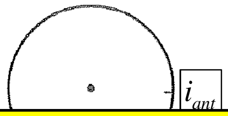
EIRP - Equivalent Isotropic Radiated Power

- The product of the antenna Gain by the available Power

$$\boxed{PIRE = G \cdot P_{in}}$$

$$i_{iso} = \frac{P_{in}}{4\pi} \qquad i_{ant} = \frac{G \cdot P_{in}}{4\pi} = \frac{PIRE}{4\pi}$$





CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

EIRP

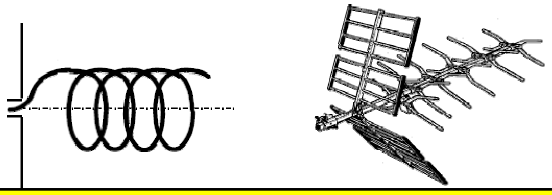
- Its units are dBW (or dBm)
- We will see later, this parameter (expressed on dBW) is quite usefull when computing the “availability” of the radio-link

- Example: if the Gain of an antenna is 2dBi and it gets a power of 10W, How much is its EIRP?

$$\boxed{\begin{aligned} &G = 2\,\text{dB} \\ &P_{in} = 10 \cdot \log(10) = 10\ \ \text{dB} \\ &PIRE = 12\,\text{dB} \end{aligned}}$$

Lineal Antennas

- Antennas built with thin electrically conductive wires (very small diameter compared to λ).
- They are used extensively in the MF, HF, VHF and UHF bands, and mobile communications.
- Among others:
  - Dipole
  - Monopole
  - Yagi antenna
  - Loops



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

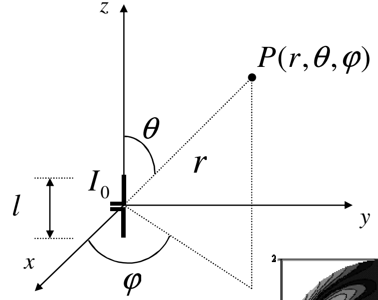
- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Lineal Antennas: Infinitesimal Dipole

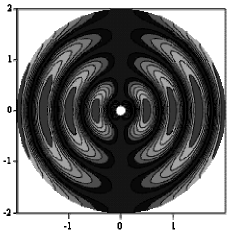
- Formed by two short conductive wires simetrically feeded at its center, being $l << \lambda$.

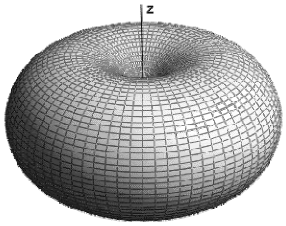


$$E_\theta = jZ_0 \frac{l \cdot I_0}{2\pi \cdot \lambda \cdot r} sen(\theta) \cdot e^{-j\frac{2\pi r}{\lambda}}$$

With Linear Polarization

And radiation diagram





Lineal Antennas: Infinitesimal Dipole

- Computing the magnetic field form the electrical, calculating the power flux and integrating for all θ we get

$$\Pr = Z_0 \left(\frac{2\pi}{3}\right)\left(\frac{l \cdot I_0}{\lambda}\right)^2 = I_0^2 R_r$$

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

and consequently $D = \frac{3}{}$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

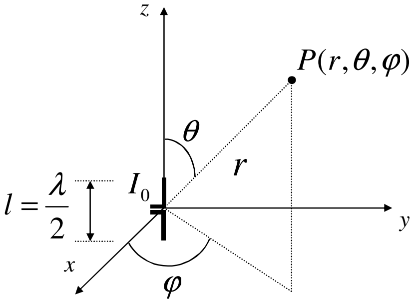
- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Lineal Antennas: Half-Wavelength Dipole

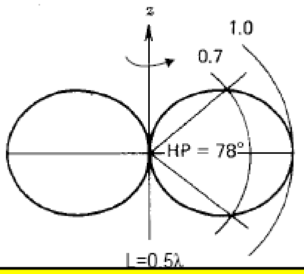
- Very common antenna, with a “convenient” radiation impedance of 73Ω



$$E_\theta = jZ_0 \frac{I_0 e^{-j\frac{2\pi r}{\lambda}}}{2\pi \cdot r}\left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}{\sin\theta}\right]$$

Lineal Antennas: Half-Wavelength Dipole

- Radiation parameters



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

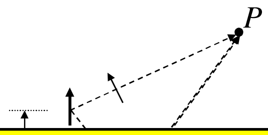
www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Radiated Field over a Perfect Conductor

- Up to this point we have assumed the antennas are in the free-space environment. However they usually are close to the ground
- When the distance to ground is comparable to the wavelength, and the beamwidth is large, antenna radiation is heavily affected by the presence of the ground
- For these scenarios, we will assume the ground is a perfect conductor, infinite and plane

Image Theory

- Intuitively, the field is reflected on the ground
  - Perfect conductor: the transmitted wave is reflected
  - The field *P* is the result of the sum of the direct and reflected waves
  - Fiend P is the result of the primary and image waves in the equivalent free-space scenario
    - Which is valid only for the upper half semi-space



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

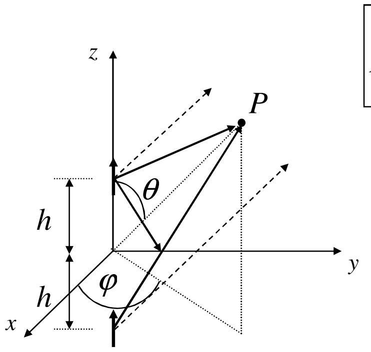
- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Image Theory

- Example: field produced by a Infinitesimal dipole



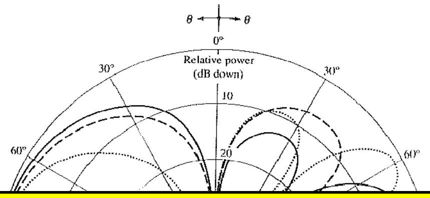
$$E_\theta \approx \underbrace{jZ_0 \frac{I_0 e^{-j\frac{2\pi r}{\lambda}}}{2\pi \cdot r} \sin\theta}_{\text{Isolated Dipole Field}} \underbrace{\left[2\cos\left(\frac{2\pi \cdot h}{\lambda}\cos\theta\right)\right]}_{\text{Joint Contribution of two Antennas}}$$

Radiation Properties change as function of the ratio

$$h/\lambda$$

Image Theory

- Example (cont.)
  - If $\lambda >> h$ then, directivity increases by 3dB! -> decrease the size
  - Otherwise….



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

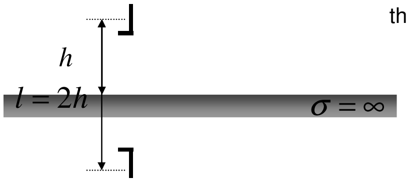
- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Monopole

- Vertical Dipole divided to its half, that is fed between wire end and a conductive plane



- Applying Image theory, it can be proven that a monopole above a conductive plane exhibit the same behavior than a dipole with a length twice the height of the monopole

Consider only $z > 0$ and $\lambda >> h$

$$\boxed{i_{mono} = i_{dipolo}}$$

$$\boxed{\Pr_{mono} = \frac{1}{2}\Pr_{dipolo}} \quad \boxed{R_{r,mono} = \frac{1}{2}R_{r,dipolo}} \quad \boxed{D_{mono} = 2D_{dipolo}}$$

Monopole

- Example: λ/4 monopole
  - As shown before, the monopole exhibit the same performances than a λ/2 dipole and therefore its directivity is

$$\boxed{D = 5.15 \text{ dBi}}$$

- At low frequencies, this antenna has quite large physical dimensions
  - Example: the standard AM transmitter for frequency carrier

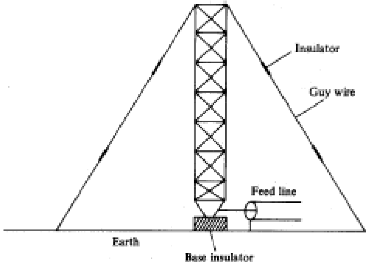
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

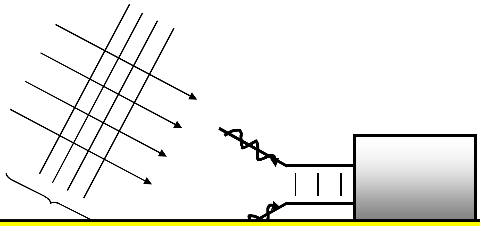
www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Monopole



Reception of an Electromagnetic Field

- If and electromagnetic wave, with a plan-wave like propagation, runs over a conductor (antenna) it generates a current distribution over it



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

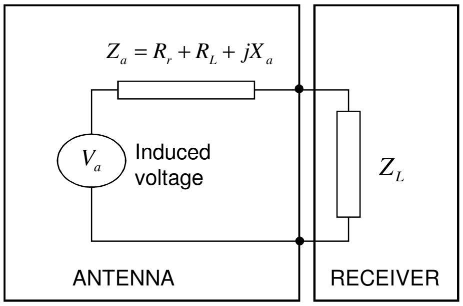
- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Equivalent Circuit Model for a Receiving Antenna

- An antenna at reception is designed to optimize the power handed out at its terminal



- Available power at antenna

$$P_a = \frac{|V_a|^2}{8R_a}$$

- Power handed out

$$P_L = \frac{1}{2}|I_L|^2 R_L = P_a\left(1-\left|\Gamma^2\right|\right)$$

$$\Gamma = \frac{Z_a - Z_L}{Z_a + Z_L}$$

Reciprocity Theorem

- It allows to relate the properties of an antenna when receiving and transmitting
- “The relationship between an oscillating current and the resulting electric field is unchanged if one interchanges the points where the current is placed and where the field is measured”
  - For the specific case of an electrical network, it is sometimes phrased as the statement that voltages and currents at different points in the network can be interchanged”

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

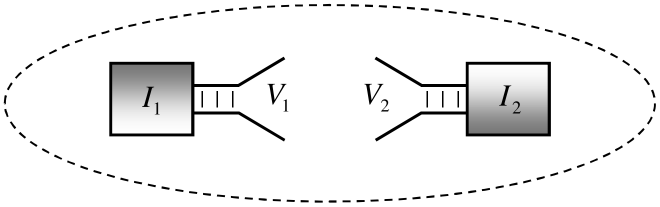
- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Reciprocity Theorem

- Suppose an anechoic chamber (no echo) in which are placed two antennas, both can transmit and receive, and operating at the same frequency



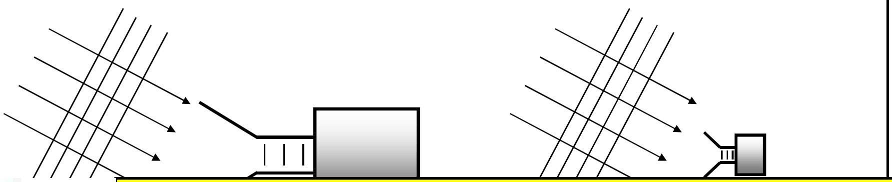
- The roles of sending and receiving can exchanged. Thus, the radiation patterns of transmitting and receiving are the same

$$\boxed{\text{If } I_1 \rightarrow V_{2,ca} \Rightarrow V_{1,ca} = V_{2,ca} \text{ when } I_2 \rightarrow V_{1,ca}}$$

$$\boxed{I_1 = I_2}$$

Effective Aperture

- Effective Aperture of an antenna characterizes the electromagnetic energy that it is able to capture
- Intuitively a large antenna captures more power, as it has more area



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Effective Aperture

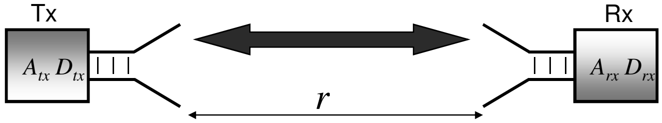
- Equivalent aperture is defined as

$$\boxed{A_{ef} = \frac{\text{Potencia entregada}}{\text{Densidad de potencia incidente}} = \frac{P_L}{\phi_i} = \frac{\left|I_L\right|^2 R_L / 2}{\phi_i}}$$

- The value does not have to match the dimensions (physical) of the antenna.
- When the antenna is flat, the physical relationship between the opening (A_f) and the effective aperture (A_{eff}) is known as aperture efficiency, verifying that:

$$\boxed{A_{eff} = \varepsilon_{ap} A_f \qquad \text{con } 0 \le \varepsilon_{ap} \le 1}$$

Directivity vs Maximum Effective Aperture



$$\phi_{tx} = \frac{P_{tx}}{4\pi \cdot r^2} D_{tx}$$

$$P_{rx} = \phi_{tx} A_{rx} = \frac{P_{tx} D_{tx} A_{rx}}{4\pi \cdot r^2} \longrightarrow D_{tx} A_{rx} = \frac{P_{rx}}{P_{tx}} \left(4\pi r^2\right)$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Directivity vs Maximum Effective Aperture

$$\boxed{\frac{D_{tx}}{A_{tx}} = \frac{D_{rx}}{A_{rx}} \Rightarrow \frac{D_{tx}}{A_{tx,m}} = \frac{D_{rx}}{A_{rx,m}}}$$

- The above solution is valid for any antenna. For an infinitesimal dipole it can be proof that

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

Directivity vs Maximum Effective Aperture

- In case of losses associated to the antenna, the maximum effective aperture is

$$\boxed{A_{ef} = \eta_{cd}\left(1-|\Gamma|^2\right)\frac{\lambda^2}{4\pi} D = \frac{\lambda^2}{4\pi} G}$$

$$\boxed{G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{ef}}$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

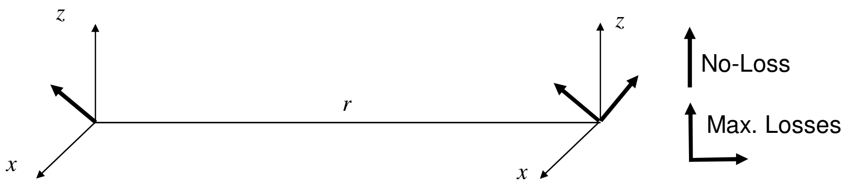
Polarization Mismatch

- The difference of polarization between transmitting and receiving antennas, it is known as ***Polarization Loss Factor***

$$\boxed{L_{polarization} = \left| \overline{e}_{tx} \cdot \overline{e}^{*}_{rx} \right|^{2}}$$

Polarization Vector
For Tx antenna

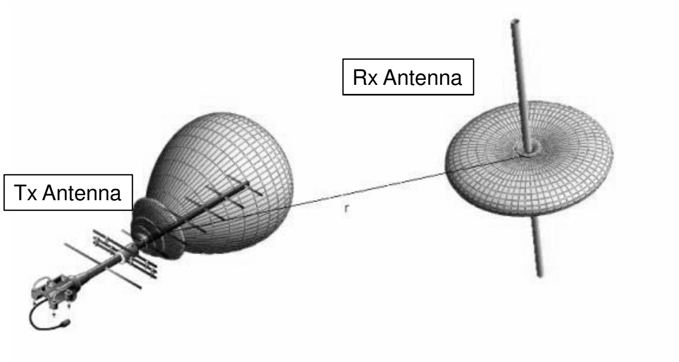
Polarization Vector
For Rx antenna



No-Loss

Max. Losses

Gains in the Radio Link: Tx and Rx Gains



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

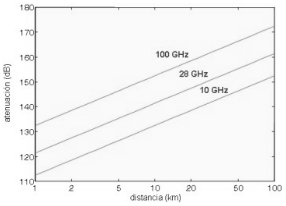
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al
Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Friis Transmission Equation

- For Isotropic antennas and free-space propagation
  ➔ The basic losses are

$$\left.\begin{aligned} p_{Rx} &= \phi_{iso}\cdot s_{eq_{iso}} = \phi_{iso}\cdot\frac{\lambda^2}{4\pi} \\ \phi_{iso} &= \frac{p_{Tx}}{4\pi d^2} \end{aligned}\right\} \Rightarrow l_{bf} = \frac{p_{Tx}}{p_{Rx}} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2$$



$$L_{bf}(dB) = 32{,}45 + 20\log f(MHz) + 20\log d(km)$$

$$L_{bf}(dB) = 92{,}45 + 20\log f(GHz) + 20\log d(km)$$

Friis Transmission Equation

- For any pair of antennas and free-space propagation
  ➔ The basic losses are

$$l_{tf} = \frac{p_{et}}{p_{dr}} \quad \begin{cases} p_{et}: \text{power handed in to Tx antenna} \\ p_{dr}: \text{power handed in to Rx antenna} \end{cases}$$

$$\left.\begin{aligned} p_{dr} &= \phi\cdot s_{eq} = \phi\cdot\frac{\lambda^2}{4\pi}\cdot g_{Rx} \\ \phi &= \frac{p_{et}}{4\pi d^2}\cdot g_{Tx} \end{aligned}\right\} \Rightarrow l_{tf} = \frac{p_{Tx}}{p_{Rx}} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2\cdot\frac{1}{g_{Tx}\cdot g_{Rx}} = \frac{l_{bf}}{g_{Tx}\cdot g_{Rx}}$$

$$p = \frac{p_{Tx} g_{Tx}\cdot g_{Rx}}{}$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

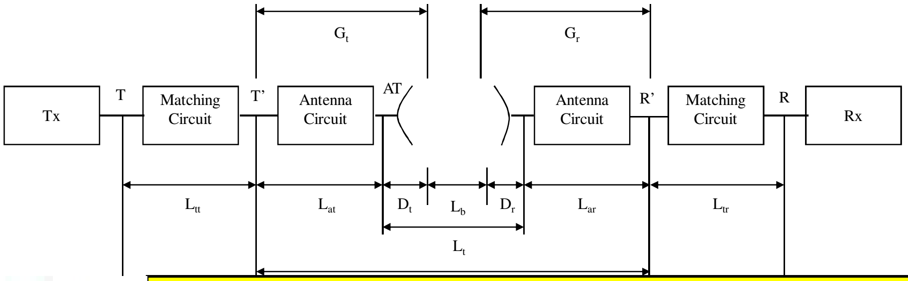
Friis Transmission Equation

- Sumarizing, for any antenna

$$l_t = \frac{p_{Tx}}{p_{Rx}} = a_e \cdot \left(\frac{4\pi d^2}{\lambda}\right) \cdot \frac{1}{g_{Tx} \cdot g_{Rx}} \qquad \boxed{L_t = L_{bf} + A_e - G_t - G_r = L_b - G_t - G_r}$$

	Usual Notation	Definition	
		Antennas	Mean
Free-Space Basic Loss	L_{bf}	Isotripic	Free-Space
Basic Loss	L_b	Isotripic	Any
Free-Space Transmission Loss	L_{tf}	Any	Free-Space
Transmission Loss	L_t	Any	Any

Friis Transmission Equation



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al
Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Link Budget

- Link Budget = expression for available power at the receiver as a function of
  - Transmitted Power
  - Rx andTx Antenna Gains
  - All the losses in the link

$$P_{Rx} = P_{Tx} - L_{bf} + G_{Tx} + G_{Rx} - A_e$$

Link Budget

- Other factors affecting the link
  - Normalized Noise Power
    - SNR
    - Power-limited Systems
      - Minimum Received Power (Sensibility) + Fading Margin
      - The maximum distance between Tx and Rx is calculated by the Link Budget

$$p_n = k \cdot T_0 \cdot b \cdot f_{sis} \qquad P_n\left(dBm\right) = F_{sis}(dB) + 10\log b(Hz) - 174$$

  - Interference

$$p_n = k \cdot T_{eq} \cdot b$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al
Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Important Concepts in this Topic

- Poynting Vector
- Radiated Power Flux Density
- Antenna Directivity
- Antenna Gain
- Antenna Efficiency
- Antenna Effective Aperture
- Polarization
- Reciprocity Theorem
- Most common simple antennas
- Friis Equation and Link Budget
- Free-Space Basic Propagation Loss

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al
Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.