Laboratorio 1
Sesión 1

Ing. Sergio Arriola-Valverde. M.Sc

Escuela de Ingeniería Electrónica
Instituto Tecnológico de Costa Rica
EL-5522 Taller de Comunicaciones Eléctricas

I Semestre 2023

Ecuaciones de Maxwell

Fenómeno de Propagación

Aplicaciones

Concepto Básicos

Bibliografía

Agenda

Ecuaciones de Maxwell

Fenómeno de Propagación

Aplicaciones

Concepto Básicos

Bibliografía

Agenda

Ecuaciones de Maxwell

Fenómeno de Propagación

Aplicaciones

Concepto Básicos

Bibliografía

Agenda
S. Arriola
Ecuaciones de Maxwell
Fenómeno de Propagación
Aplicaciones
Concepto Básicos
Bibliografía

¿Qué es la luz?

Para dar respuesta a esto, se partirá de la ecuación de onda de D'Alambert:

$$u = u\left(x_1, x_2, x_3, t\right)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 u$$

Donde: u depende del tiempo y de una o más cantidades espaciales.

Ecuaciones de Maxwell

Se utilizarán las ecuaciones de Maxwell en forma puntual considerando el caso dinámico:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

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

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

Ecuaciones de Maxwell

Para iniciar con la demostración se aplicará un operador rotacional a ambos lados:

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

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\frac{\partial (\nabla \times \mathbf{B})}{\partial t}$$

Ecuaciones de Maxwell

Se deberá reducir la expresión, utilizando identidades de vectoriales:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{F}) = \nabla (\nabla \cdot F) - \nabla^2 F$$

Recordando que el $\nabla \times B = \mu_0 \left(\mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$, sustituyendo se obtiene que:

$$-\nabla^2 \mathbf{E} + \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} \mu_0 \left(\mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$$

Ecuaciones de Maxwell

Para la reducción de la expresión, contemplando el espacio vacío, se que tiene :

$$-\nabla^2\mathbf{E} + \underbrace{\nabla(\nabla\cdot\mathbf{E})}_{\rho=0\to 0} = -\frac{\partial}{\partial t}\mu_0\left(\underbrace{\mathbf{J}}_{\rho=0\to 0} + \epsilon_0\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t}\right)$$

Reduciendo la expresión se obtiene:

$$-\nabla^2\mathbf{E} = -\mu_0\epsilon_0\frac{\partial^2\mathbf{E}}{\partial t}$$

Finalmente se obtiene organizando los términos según la ecuación de D'Alambert:

$$\frac{\partial^2\mathbf{E}}{\partial t} = c^2\nabla^2\mathbf{E} \Leftrightarrow \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2\nabla^2 u$$

Con lo anterior aplicado para **B**, se afirma que la luz es una onda de tipo electromagnética.

Ecuaciones de Maxwell

Forma "puntual" de las Ecuaciones de Maxwell para el caso dinámico:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$
$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$
$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

Campos Dinámicos

- Existe dependencia temporal.
- Acople E-M completo.
- Para describir campos que varían rápidamente.
- Para propagación de ondas y radiación.

Agenda

Ecuaciones de Maxwell

Fenómeno de Propagación

Aplicaciones

Concepto Básicos

Bibliografía

Fenómeno de Propagación

Ejemplo onda TEM, caso armónico:

$$E_x(z,t) = f_1(t - \tfrac{z}{v}) + f_2(t + \tfrac{z}{v}) \quad E_x(z,t) = |E_{x_0}| \cos(\omega t - k_0 z)$$

$$H_y(z,t) = f_1(t - \tfrac{z}{v}) + f_2(t + \tfrac{z}{v}) \quad H_y(z,t) = |H_{y_0}| \cos(\omega t - k_0 z)$$

Onda viajera → función del tiempo y espacio

Fenómeno de Propagación

Ejemplo onda TEM, caso armónico:

$$E_x(z,t) = \varepsilon_x + \varepsilon_x^{'} \qquad k_o = \frac{\omega}{c} \qquad \lambda = \frac{2\pi}{k_0} \qquad v_p = c$$

$$E_x(z,t) = \left|E_{x_0}\right| \cos\left[\omega\left(t - \frac{z}{v_p}\right) + \phi_1\right] + \left|E_{x_0}^{'}\right| \cos\left[\omega\left(t + \frac{z}{v_p}\right) + \phi_2\right]$$

$$E_x(z,t) = \underbrace{\left|E_{x_0}\right| \cos\left[\omega\left(t - \frac{z}{v_p}\right) + \phi_1\right]}_{z \quad hacia \quad adelante} + \underbrace{\left|E_{x_0}^{'}\right| \cos\left[\omega\left(t + \frac{z}{v_p}\right) + \phi_2\right]}_{z \quad hacia \quad atras}$$

Onda viajera → función del tiempo y espacio

Fenómeno de Propagación

Tomado de: *http://www.emagtech.com/wiki/images/e/e7/EM_wave.png*

Fenómeno de Propagación

Tomado de: Teoría Electromagnética, Hayt

Ejemplo: Capacitor Real vs Ideal

Para un capacitor de placas paralelas, con dimensiones de 10 x 10 cm y una separación de 0.5 cm, en el aire. ¿Cuál es su impedancia como una función de la frecuencia?

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \approx 17.7 \text{ pF}$$

$$Z = \frac{1}{j2\pi f \cdot C}$$

Adaptado de notas de clase de Prof. Dr. C. Schuster, Instituto Teoría Electromagnética, TUHH

Ejemplo: Capacitor Real vs Ideal

Para un capacitor de placas paralelas, con dimensiones de 10 x 10 cm y una separación de 0.5 cm, en el aire. ¿Cuál es su impedancia como una función de la frecuencia?

Adaptado de notas de clase de Prof. Dr. C. Schuster, Instituto Teoría Electromagnética, TUHH

Ejemplo: Capacitor Real vs Ideal

Para un capacitor de placas paralelas, con dimensiones de 10 x 10 cm y una separación de 0.5 cm, en el aire. ¿Cuál es su impedancia como una función de la frecuencia?

Adaptado de notas de clase de Prof. Dr. C. Schuster, Instituto Teoría Electromagnética, TUHH

Ejemplo: Capacitor Real vs Ideal

Para un capacitor de placas paralelas, con dimensiones de 10 x 10 cm y una separación de 0.5 cm, en el aire. ¿Cuál es su impedancia como una función de la frecuencia?

- Modelo es únicamente válido para frecuencias relativamente bajas!
- Relación importante a verificar: Dimensiones vs frecuencia (o longitud de onda).

$$\lambda = \frac{v_p}{f}$$

Adaptado de notas de clase de Prof. Dr. C. Schuster, Instituto Teoría Electromagnética, TUHH

Agenda

Ecuaciones de Maxwell

Fenómeno de Propagación

Aplicaciones

Concepto Básicos

Bibliografía

Aplicaciones

- Comunicaciones Eléctricas.
- Líneas de Transmisión.
- Antenas.
- Enlaces Ópticos.
- Aplicaciones en Electro-medicina.
- Compatibilidad Electromagnética.
- Integridad de Señales.
  - Interconexiones de alta velocidad.
  - Diseño de circuitos en alta frecuencia.
- Dispositivos MEMs.

PCI-E

Tomado del trabajo final del Ing. Javier Aparicio Morales

4G-LTE Antena

Fig. 1. Triangular multiband antenna: (a) proposed geometry with design parameters, (b) simulation model on a spherical surface.

Fig. 3. Simulated gain radiation pattern for the proposed antenna: (a) on a planar surface, (b) on a spheric surface. Color scale is given in dB (refers to isotropic radiatortropic radiator).

Tomado de Design of a 4G/LTE Multiband Antenna Considering Curvature Effects

4G-LTE Antena

Fig. 4. Fabricated antenna prototype.

(a)

(b)

Fig. 5. Simulated and measured $|S_{11}|$ curves for the proposed triangular antenna: (a) on planar surface (b) on spheric device.

Tomado de Design of a 4G/LTE Multiband Antenna Considering Curvature Effects

SerDes Links FPGA

Fig. 1: Simplified block diagram of the implemented SerDes transceiver.

(a)

(b)

Fig. 3: Setup for the evaluation of 8b/10b encoder: a) Evaluation setup and b) diagram of the test setup.

Tomado de Evaluation of 8b/10b FPGA Encoder Implementations for SerDes Links

SerDes Links FPGA

TABLE I: RESOURCES REQUIRED BY THE THREE IMPLEMENTATIONS OF 8B/10B ENCODERS OBTAINED FROM VIVADO SYNTHESIS REPORT

Components	Decoder	Memory	Xilinx's IP
Slice LUTs	18	27	908
Bonded IOB	24	24	113
BUFGCTRL	1	1	0
Slice Registers	21	27	960
F7Muxes	6	0	0
Slice	8	14	0
Block RAM	0	1.5	0
Bonded IPADs	0	0	2
Bonded OPADs	0	0	2
GTX Channel	0	0	1
Total	78	94.5	1986

TABLE II: POWER CONSUMPTION OF THREE IMPLEMENTATIONS OF 8B/10B ENCODERS OBTAINED FROM VIVADO SYNTHESIS REPORT

Implementation	Power (mW)			
	Dynamic	Static	GTX	Total
Decoder	19	158	0	177
Memory	27	158	0	186
Xilinx's IP	46	170	175	421

TABLE III: TIMING REPORT OF THE THREE IMPLEMENTATIONS 8B/10B ENCODERS OBTAINED FROM VIVADO SYNTHESIS REPORT

Implementation	Logic delay (ns)	Net delay (ns)	Total (ns)
Memory	1.929	1.346	3.275
Decoders	0.309	1.059	1.368
Xilinx IP's	-	-	3.03

Fig. 4: Serial waveform of the transmitter SerDes link.

Fig. 5: Eye diagram of the serial out data at 1.2 Gbps.

Tomado de Evaluation of 8b/10b FPGA Encoder Implementations for SerDes Links

Agenda

Ecuaciones de Maxwell

Fenómeno de Propagación

Aplicaciones

Concepto Básicos

Bibliografía

Espectro

Representación de una señal en el dominio de la frecuencia y además se puede interpretar mediante la Transformada de Fourier $\mathscr{F}$.

$$f(t) \xrightarrow{\mathscr{F}} F(\omega)$$

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right)$$

Tomado de: Manual de Equipo

Espectro

Considere que se tiene un par de señales tales como:

$$s(t) = 0,7sen(100\pi t) + 0,7sen(240\pi t)$$

Tomado de: Autoría Propia

Espectro

Considere que se tiene un par de señales tales como:

$$s(t) = 0,7sen(100\pi t) + 0,7sen(240\pi t)$$

Si a la señal s(t) se le aplica una Transformada Rápida de Fourier $\mathscr{F}$.

Tomado de: Autoría Propia

Espectro

Se le agrega una fuente de ruido tal que genere alguna distorsión

Tomado de: Autoría Propia

Espectro

Y en el dominio de la frecuencia la señal se puede visualizar

Tomado de: Autoría Propia

Espectro

Tomado de: Autoría Propia

Espectro Electromagnético

Es el rango de todas las radiaciones electromagnéticas posibles, y en el se describen las ondas electromagnéticas según sea su frecuencia.

Tomado de http://www.acmor.org.mx/?q=content/hay-de-espectros-espectros

Espectro Radioeléctrico

Es la designación de las frecuencias que se pueden utiliza para transmisión de ondas de radio que son capaces de transportar información.

Tomado de SUTEL Costa Rica

Analizador de Espectros

Es un instrumento de laboratorio que permite visualizar y medir el espectro de una señal. Es semejante a un osciloscopio, pero es capaz de realizar mediciones en el dominio dela frecuencia en lugar del dominio del tiempo.

Tomado de Manual de Equipo

Analizador de Espectros

Tomado de Manual de Equipo

Analizador de Espectros

Mixer

Tomado de https://www.analogictips.com/analyzing-millimeter-frequencies-with-external-harmonic-mixing/

Analizador de Espectros

IF Filter

Tomado de $https://commons.wikimedia.org/wiki/File:How_superheterodyne_receiver_works.svg$

Analizador de Espectros
VBW

Tomado de *https://www.techplayon.com/wp-content/uploads/2017/07/VBW-1.png*

Analizador de Espectros
VBW

Tomado de *https://www.techplayon.com/wp-content/uploads/2017/07/VBW-1.png*

Modulación

Modulación: Proceso mediante el cual alguna característica de la portadora (señal que transmite la información) cambia de acuerdo con la moduladora (señal de información), el resultado a este proceso se le llama "onda modulada".

Banda base: Es la banda de frecuencias que representa la señal original tal y como la entrega la fuente de información.

Banda de transmisión: Es la banda de frecuencia a las que se traslada la banda base para poder transmitir la información (El espectro se traslada en frecuencia).

Canal de Comunicación

Tomado de $https://www.analfatecnicos.net/pregunta.php?id=22$

Canal de Comunicación

Tomado de Laboratorio 1-IS2020-ITCR

Modulación

Modulación AM

La amplitud de la portadora varia según la señal de información: la información de amplitud y frecuencia se "montan" sobre la portadora haciendo que la envolvente varíe de acuerdo a la señal moduladora.

Tomado de *http://webpages.eng.wayne.edu/ece4700/Lecture%20Notes/Lecture – Am.pdf*

Modulación AM, con un índice de modulación de 1:

Tomado de: Autoría Propia

Modulación

Modulación FM

La modulación en frecuencia consisten en varia la frecuencia de la onda portadora de acuerdo con la intensidad de la onda de información, la amplitud de la onda modulada y portadora permanece constante.

Tomado de: https://fdocuments.ec/document/modulacion-fm-560769a6a87ee.html

Modulación

Modulación FM

Tomado de: https://www.mathworks.com/help/comm/ref/fmmod.html

Desviación de Frecuencia

La desviación frecuencia se entiende como el cambio existente en frecuencia en relación a su señal portadora cuando esta actuando una señal moduladora.

Tomado de: Autoría Propia

Desviación de Frecuencia

El canal 1 posee la señal ideal, mientras que el canal 2 posee un desviación de 10 Hz y ruido aditivo.

Tomado de: https://www.mathworks.com/help/comm/ref/comm.fmmodulator-system-object.html

Desviación de Frecuencia

El canal 1 posee la señal ideal, mientras que el canal 2 posee un desviación de 40 Hz y ruido aditivo.

Tomado de: https://www.mathworks.com/help/comm/ref/comm.fmmodulator-system-object.html

Desviación de Frecuencia

El canal 1 posee la señal ideal, mientras que el canal 2 posee solamente ruido aditivo.

Tomado de: https://www.mathworks.com/help/comm/ref/comm.fmmodulator-system-object.html

THD

Este parámetro se define como el cociente de la suma de todas potencias de todos los armónicos en relación a la potencia del armónico fundamental. Generalmente este parámetro mide la distorsión armónica total.

$$THD = \frac{\sum Potencia \quad de \quad los \quad armonicos}{Potenciavde \quad la \quad frecuencia \quad fundamental} = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + \cdots + P_N}{P_0}$$

Tomado de: NI

THD

Caso de análisis con 2 armónicos:

Tomado de: https://www.mathworks.com/help/signal/ref/thd.html

THD

Caso de análisis con 10 armónicos:

Tomado de: https://www.mathworks.com/help/signal/ref/thd.html

SINAD

El parámetro SINAD permite medir la calidad de la señal en relación a las perturbaciones existentes tales como ruido y distorsión.

$$SINAD = \frac{Power_{Signal} + Power_{Noise} + Power_{Distorsion}}{Power_{Noise} + Power_{Distorsion}}$$

Tomado de: NI

SINAD

Caso de análisis sin presencia de ruido:

Tomado de: https://www.mathworks.com/help/signal/ref/sinad.html

SINAD

Caso de análisis con presencia de ruido:

Tomado de: https://www.mathworks.com/help/signal/ref/sinad.html

SNR

Es un parámetro que relaciona el nivel de potencia de la entrada en función con el nivel de ruido presente.

$$SNR = \frac{Power_{Signal}}{Power_{Noise}}$$

Tomado de: NI

SNR

Caso de análisis con presencia de ruido y 10 armónicos:

Tomado de: https://www.mathworks.com/help/signal/ref/snr.html

SNR

Caso de análisis con presencia de ruido y 2 armónicos:

Tomado de: https://www.mathworks.com/help/signal/ref/snr.html

Televisión Analógica NTSC

Tomado de: NTSC

Televisión Analógica NTSC

Tomado de: Laboratorio IS2016

Televisión Digital

Actualmente se ha dado una nueva tendencia de migrar la televisión analógica a un enfoque digital, no obstante Costa Rica adoptó el estándar de televisión digital ISDB-T.

El estándar ISDB-T es llamado también como Integrated Services Digital Broadcasting según sus siglas en ingles.

No obstante, muchos países han realizado la migración de estándares analógicos a digitales.

	Mode 1	Mode 2	Mode 3
Number of segments	13		
Bandwidth	5.575 MHz	5.573 MHz	5.572 MHz
Carrier offset	3.968 kHz	1.984 kHz	0.992 kHz
Number of carriers	1405	2809	5617
Carrier modulation	QPSK, 16QAM, 64QAM, DQPSK		
Symbols per frame	204		
Symbol duration (actual)	252 µs	504 µs	1008 µs
Guard interval	1/4, 1/8, 1/16, 1/32		
IFFT length	2K	4K	8K
Inner code	Convolutional code (1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8)		
Outer code	Reed-Solomon (204,188)		

Tomado de: ISDB-T

Espectro ISDB-T

Tomado de: ISDB-T

Agenda
S. Arriola
Ecuaciones de Maxwell
Fenómeno de Propagación
Aplicaciones
Concepto Básicos
Bibliografía

Jerarquía de transmisión y recepción parcial

Tomado de: ISDB-T

Codificación del canal

Tomado de: ISDB-T

Agenda
S. Arriola
Ecuaciones de Maxwell
Fenómeno de Propagación
Aplicaciones
Concepto Básicos
Bibliografía

Esquema de modulación

Tomado de: ISDB-T

Decibeles

Decibeles con 1 W como potencia de referencia lo calculamos como:

$$P_{dB} = 10log\left(P\right)$$

Decibeles con 1 mW como potencia de referencia lo calculamos como:

$$P_{dBm} = 10log\left(\frac{P}{1mv}\right)$$

Cálculo en decibeles respecto a 1 V:

$$V_{dB} = 20log\left(V\right)$$

Cálculo de decibeles respecto a 1 μV:

$$V_{dB\mu} = 20log\left(\frac{V}{1\mu v}\right)$$

Agenda

Ecuaciones de Maxwell

Fenómeno de Propagación

Aplicaciones

Concepto Básicos

Bibliografía

Bibliografía

1. Rohde & Schwarz, Spectrum Analysis Fundamentals, Theory and Operation of Modern Spectrum Analyzers, 2013.
2. Stremler, F.Introducción a los Sistemas de Comunicación, 3era. Ed.
3. Haykin, S. Communications Systems. 4th Ed.
4. Tomasi, W. Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. 4th Ed.
5. Kraus, J. Electromagnetismo con Aplicaciones. 5th Ed.

Para más información pueden ingresar a:

TEC-Digital ó `http://www.ie.tec.ac.cr/sarriola/TallerdeComunicaciones/`

Esta presentación se ha basado parcialmente en compilación para semestre anteriores de cursos de Laboratorio de Teoría Electromagnética II y Laboratorio de Comunicaciones Eléctricas por Aníbal Coto-Cortés, Renato Rimolo-Donadio y Sergio Arriola-Valverde

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons "Reconocimiento-NoCommercial-CompartirIgual 3.0 España".