

Presentación

Este material ha sido preparado basado en la experiencia docente de los autores y en las necesidades que experimentan los discentes de los cursos de Telecomunicaciones en cuanto a la verificación de fenómenos físicos se refiere. Las señales empleadas en los sistemas de Telecomunicaciones usualmente son de alta frecuencia y requieren de un alto nivel de abstracción para su análisis. Ver, comparar, contrastar e inferir sobre estas es parte de los objetivos a alcanzar con la vivencia de experiencias prácticas desarrolladas en los laboratorios, en donde es deseable corroborar las leyes físicas mediante la instrumentación y el equipamiento adecuado. Sin embargo, cuando un laboratorio adolece de los equipos necesarios o la cantidad de los mismos no es suficientemente adecuada, es posible recurrir a la simulación como método de enseñanza-aprendizaje.

Este libro no pretende reemplazar los textos guías tradicionales, por el contrario, intenta preparar a los discentes en una alternativa válida para la comprobación de los fenómenos al procesar señales en alta frecuencia, mediante el uso de la herramienta computacional Simulink de Mathworks. El documento está distribuido por capítulos, siendo el primero una introducción a los elementos que conforman un sistema de telecomunicaciones. Las definiciones empleadas para los fenómenos clásicos son abordadas desde la experiencia y desde la argumentación bibliográfica. En seguida, es presentado un aparte para el manejo de las unidades logarítmicas que son fuertemente empleadas en el área. La regulación es uno de los temas más complejos, siendo documentados los principales entes reguladores a nivel global y como referentes para el nivel local.

En el capítulo 2 son mostradas las formas más comunes de simular una señal, las señales básicas que sirven de prueba y la clasificación de las señales. Los fenómenos de mezclado, usando señales de baja frecuencia que, como ejemplo, ilustran los primeros pasos en la simulación por Software especializado.

Uno de los elementos más empleados en la electrónica de aplicación es el filtro. El capítulo 3 presenta definiciones básicas con el fin de aplicar en diferentes casos de estudio la herramienta de apoyo en el diseño y la simulación provista por Simulink de Mathworks.

El capítulo 4 muestra los principios conceptuales y de simulación en el tratamiento de señal en sistemas de modulación lineal. Se aplican simulaciones para sistemas de doble banda lateral (con y sin portadora), banda lateral única y sistemas banda base multitono. Los tipos de recepción son explicados y evidenciados en la unidad 5.

El siguiente y último aparte, muestra la simulación de sistemas analógicos modulados angularmente (frecuencia y fase).

1. Introducción

El hombre ha evolucionado gracias a su necesidad de ser socialmente activo, a la necesidad de transmitir sus pensamientos, necesidades y deseos. Esta característica ha permitido diferenciar la especie humana y ubicarle en la punta de la pirámide evolutiva.

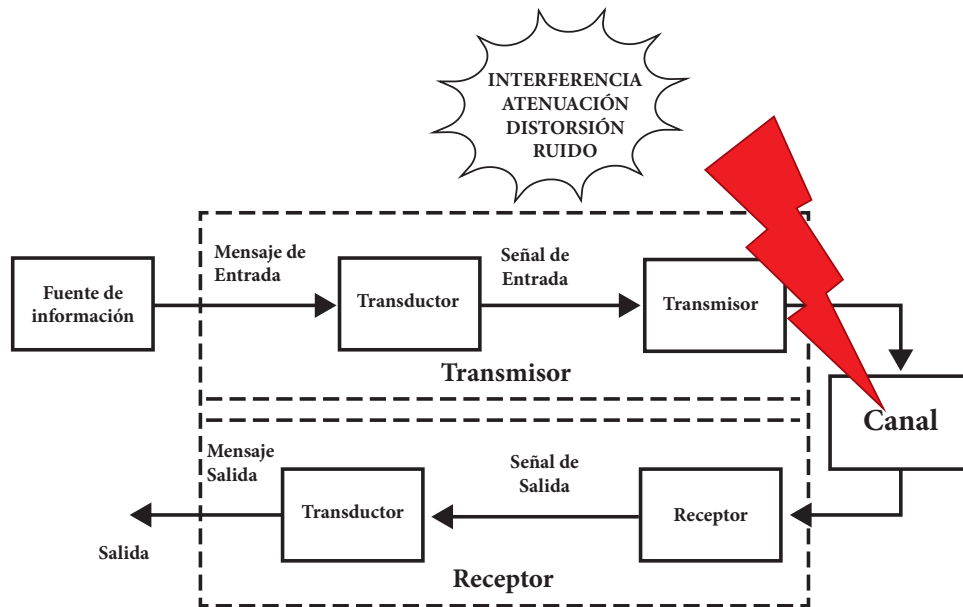
El principal acto que conlleva a desarrollar estas actividades de comunicación es el empleo de un conjunto de símbolos que conforman un alfabeto. Si dicho alfabeto es conocido por quien desea transmitir un mensaje y también es conocido por el receptor, se está en presencia de una comunicación.

La principal idea de un sistema de comunicaciones es transmitir información. Usualmente, no se tienen en el mismo contexto geográfico el transmisor y el receptor, por ello el hombre ha desarrollado herramientas que han permitido superar la barrera de la distancia para lograr su objetivo evolutivo. Cuando es empleado un sistema que permite realizar una comunicación a una distancia considerable, se está en presencia y uso de un sistema de telecomunicaciones. Hoy día la mayor parte de nuestras comunicaciones emplean estos sistemas.

1.1. Elementos de un sistema de telecomunicaciones

Los elementos básicos de un sistema de telecomunicaciones se muestran en la figura 1.1. Inicialmente, la información es entregada por una fuente. Esta información usualmente es entregada en formato analógico ya que de esa naturaleza es nuestro mundo. Para introducir esta señal de naturaleza física es necesario pasarla por un dispositivo que la convierta en una señal de naturaleza eléctrica: un transductor.

Figura 1.1
Sistema básico de telecomunicaciones y los principales elementos que afectan al canal



Una vez la señal de información se encuentra en el dominio eléctrico (voltajes o corrientes), pasa a un transmisor propiamente dicho, que se encarga de adaptar la señal de información al medio por el cual se desea transmitir. Es de notar que cuando se diseñan estos componentes, los criterios de diseño incluyen la definición del medio por el cual se va a propagar la señal y las cantidades de señal que se desplazarán por unidad de tiempo.

En el canal es posible la aparición de señales y fenómenos no deseados pero que son naturales e inherentes, propios del medio. La idea del bloque transmisor es evitar que estos factores, como lo son la atenuación, el ruido, la distorsión y la interferencia, afecten la señal de información. De otra parte, la función del bloque receptor es contrarrestar los efectos del canal, permitiendo la recuperación de la información. En ese orden, son definidos estos factores, los cuales pueden llegar a confundirse entre sí.

1.1.1. Atenuación

Es el debilitamiento que sufre la señal a medida que recorre el canal y es debido a la naturaleza resistiva del mismo. Normalmente, sus unidades son presentadas en unidades logarítmicas dadas en decibeles por unidad de longitud.

1.1.2. Distorsión

La distorsión es la respuesta de un sistema electrónico, debido a su característica no lineal, ante la excitación de una señal. Para poder controlarla es necesario recurrir a circuitos compensadores. En ausencia de la señal de entrada la distorsión desaparece. Adicionalmente, el canal introduce una distorsión a la señal siendo esta de forma o amplitud y en fase, modificando su frecuencia a través de un corrimiento de fase.

1.1.3. Interferencia

Es la contaminación por sobreposición o solapamiento de señales de la misma naturaleza que la señal de interés, causando pérdida de la legibilidad o interoperabilidad en el receptor. La única forma de combatir la interferencia es a través de la regulación.

1.1.4. Ruido

Existen diferentes tipos de ruido que serán abordados en el aparte del mismo nombre, más adelante. Por ahora, es definido el ruido térmico como aquel que se suma en el canal (aditivo) y tiene las características de ser blanco por encontrarse a todo lo largo de la franja de frecuencias utilizables hoy día por los sistemas de comunicaciones. También es Gausseano por tener una distribución probabilística de dicha naturaleza, es decir, que los valores más frecuentes se encuentran alrededor de la media. A este ruido se le conoce como Ruido Blanco Gausseano, AWGN (Additive white Gaussian noise) por sus siglas en inglés.

Es importante destacar que las limitaciones de un sistema de telecomunicaciones son de tipo físicas y regulatorias. Los últimos conceptos hacen referencia a las limitaciones físicas. En cuanto a la legislación, se presenta a continuación.

1.2. Unidades logarítmicas

En el área de ingeniería y con gran uso en el campo de la telecomunicación es empleado el término decibeles. El decibel (dB) es una unidad logarítmica que expresa la relación entre dos potencias [1]. Está definido por la ecuación:

$$P_{dB} = 10 \text{Log}_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (1.1)$$

Para que esta ecuación tenga validez tanto P_1 como P_2 deben ser cantidades homogéneas, es decir, que relacionen las mismas variables físicas y las mismas unidades [2]. La razón del nombre en esta unidad es debida a Alexander Graham Bell, a quien erróneamente se le atribuyó por mucho tiempo la invención del teléfono.

Los decibeles se emplean por dos razones principalmente: la primera es que en ingeniería se emplean con frecuencia un amplio rango de unidades. Es posible que un mismo plano se deban representar unidades por el orden de microvatios y unidades en el orden de vatios. Así, usando una escala logarítmica, su representación será más adecuada. En segundo lugar, las operaciones numéricas se simplifican ya que se reemplazan las multiplicaciones y divisiones por simples sumas o restas.

1.2.1. Unidades referidas

Cuando se emplean decibeles, usualmente se asocia a la ganancia/pérdida de un sistema y están relacionadas dos de las tres variables implicadas en la ecuación, es decir, la relación de dos magnitudes conocidas. Cuando se hace mención a una señal, se recurre a unidades referidas. Esto es, en la ecuación (1.1) se cambia por una unidad de referencia con valores absolutos [1], siendo el milivatio la cantidad más empleada para radiocomunicación. Así, una señal es posible expresarla en términos de referencia, como:

$$P_{dBm} = 10 * \log \left(\frac{P_1}{1mW} \right) \quad (1.2)$$

Cuyas unidades serán los dBm.

Potencia en términos de tensión

Es posible que en algunos sistemas, como la televisión o donde se manejen señales de campo eléctrico, se trabaja con decibeles expresados en términos de tensión. Para relacionar la tensión con la potencia se deben considerar las impedancias, según

$$P = \frac{V^2}{Z} \quad (1.3)$$

Y al reemplazar la ecuación (1.3) en (1.1) se tiene

$$P_{dBm} = 10 * \log \left(\frac{\frac{V_1^2}{R_1}}{\frac{V_2^2}{R_2}} \right) \quad (1.4)$$

Y bajo las propiedades de los logaritmos es posible llevar (1.4) a la forma

$$P_{dB} = 20 * \log \left(\frac{V_1}{V_2} \right) + 10 * \log \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \quad (1.5)$$

Si las impedancias son iguales, (1.5) se transforma en

$$P_{dB} = 20 * \log \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \quad (1.6)$$

Que se encuentra expresada en términos de tensiones y no de potencias. De forma análoga es posible encontrar otras unidades de referencia, por ejemplo, para campo eléctrico como dB (W/m²), dB (V/m), dB (μV/m), dB (A/m) y dB(μA/m). Algunos otros niveles pueden ser para expresar corriente, intensidad de campo y coeficiente de reflexión.

En telecomunicaciones, la unidad referida en términos de tensión más empleada es el dBμV. Aparece cuando en la ecuación V_2 toma unidades de 1 microvoltio (1 μV) y por ende V_1 bajo una misma impedancia determinada, la cual es normalmente 75Ω a menos que se indique lo contrario. La forma de calcular es la siguiente,

$$P_{dB\mu V} = 20 * \log \left(\frac{V_1(\mu V)}{1\mu V} \right) \quad (1.7)$$

1.3. El espectro electromagnético y entes reguladores

No siempre es viable tener un medio guiado como canal para el sistema de telecomunicaciones. Una alternativa es emplear la interfaz aire como medio o canal, usando ondas electromagnéticas como transporte de la información y empleando para tal fin enlaces de radiofrecuencia o radioenlaces.

Una tarea importante en la planificación e implementación de un sistema inalámbrico implica la asignación de frecuencias radioeléctricas, la concesión de una licencia de espectro electromagnético en caso de requerirse, los estudios de compatibilidad y el desarrollo de un plan de frecuencias. Las asignaciones de frecuencias y licencias para operar enlaces de radio son reguladas y concedidas por la autoridad nacional de cada país, guiados por la reglamentación internacional, siendo la más representativa la Comisión Federal de Comunicaciones de los Estados Unidos.

Como un anexo a la Organización de las Naciones Unidas (ONU) se encuentra la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) en donde todos los países del mundo son miembros y por lo tanto son signatarios del Estatuto de Radiocomunicación expedido por este ente. La asignación de bandas de frecuencias se rige por el Reglamento de Radiocomunicaciones. En la actualidad se trabaja comercialmente con radioenlaces hasta los 55 GHz ya que la electrónica aún no ha incursionado en bandas de frecuencia superiores, dadas las limitaciones de ancho de banda en los dispositivos semiconductores y sus costos de fabricación.

Para la situación de Colombia, el regulador es la Agencia Nacional del Espectro (ANE) adscrita al Ministerio de Tecnologías para la Información y Comunicaciones (MinTIC), mediante sanción de la Ley 1341 del 30 de julio de 2009.

La distribución de las frecuencias se da por bandas, las cuales se clasificaron según dos aspectos evaluados y propuestos por la UIT:

- La necesidad de los sistemas de telecomunicaciones
- Las propiedades de las ondas electromagnéticas

Una visión general de esta clasificación es apreciada en la tabla 1.1.

Tabla 1.1
Clasificación del espectro electromagnético según la UIT

Banda	Longitud de onda (m)	Frecuencia (Hz)
Rayos gamma	<10 pm	>30 EHz
Rayos X	<10 pm	>30 PHz
Ultravioleta extremo	<200 nm	>1,5 PHz
Ultravioleta cercano	<380 nm	>789 THz
Luz Visible	<780 nm	>384 THz
Infrarojo cercano	<2,5 μ m	>120 THz
Infrarojo medio	<50 μ m	>6,00 THz
Infrarojo	<1 mm	>300 THz
Microondas	<30 cm	>1 GHz
Ultra Alta Frecuencia - Radio	<1 m	>300 MHz
Muy Alta Frecuencia - Radio	<10 m	>30 MHz
Onda Corta - Radio	<180 m	>1,7 MHz
Onda Media - Radio	<650 m	>650 kHz
Onda Larga - Radio	<10 km	>30 kHz
Muy Baja Frecuencia - Radio	<10 km	>30 kHz

En la tabla se realiza una ampliación en la franja de radiofrecuencia. Esta banda de frecuencia es fundamental en la transmisión de información en sistemas inalámbricos, de tal forma que se encuentra regulada y legislada por los entes anteriormente mencionados: la UIT a nivel mundial y a nivel regional por la ANE. Así, es mostrada la tabla 1.2 con el detalle de las bandas de frecuencias.

Tabla 1.2
Clasificación del espectro electromagnético según la UIT.

Nombre	Abreviatura inglesa	Banda ITU	Frecuencias	Longitud de onda
Extra baja frecuencia	ELF	1	3-30 Hz	100.000 - 10.000 km
Super baja frecuencia	SLF	2	30-300 Hz	10.000 - 1000 km
Ultra baja frecuencia	ULF	3	300-300 Hz	1000 - 100 km
Muy baja frecuencia	VLF	4	3-30 KHz	100 - 10 km
Baja frecuencia	LF	5	30-300 KHz	10 - 1 km
Media frecuencia	MF	6	300-300 KHz	1 km - 100 m
Alta frecuencia	HF	7	3-30 MHz	100 - 10 m
Muy alta frecuencia	VHF	8	30-300 MHz	10 - 1 m
Ultra alta frecuencia	UHF	9	300-300 MHz	1 m - 100 mm
Super alta frecuencia	SHF	10	3-30 GHz	100 - 10 mm
Extra alta frecuencia	EHF	11	30-300 GHz	10 - 1 mm

Cabe anotar que, por el uso de cada banda de frecuencias, es necesario tener una licencia de parte del ente regulador. De esta manera, cada servicio se encuentra sometido a una concesión por un tiempo finito que garantiza que no exista interferencia.

Dadas las necesidades de desarrollo y de investigación, existen algunas bandas de frecuencias que no requieren licenciamiento, son de libre uso a nivel internacional y poseen un requerimiento de potencia. A estas bandas de frecuencias se les denomina ISM por sus siglas en inglés *Industrial, Scientific & Medical* [3]. De ellas existen muchas opciones, distintas bandas en el espectro radioeléctrico. Para la situación de Colombia se rigen por la Resolución 689 de 2004 del MinTIC, que menciona el uso de frecuencias determinadas, el uso de tecnologías de espectro ensanchado y la modulación digital, de banda ancha y baja potencia [4].

1.4. Ancho de banda y capacidad de transmisión

Técnicamente, el ancho de banda se define como la diferencia entre en la frecuencia superior y la frecuencia inferior de una banda de paso, donde