

Transmisor y receptor FM elaborado en GNU Radio

Alfredo Valdés Cárdenas

4 de Mayo de 2016

Parte I

Introducción a los sistemas de comunicaciones

El objetivo fundamental de un sistema electrónico de comunicaciones es transferir información de un lugar a otro. Sin embargo, todas las formas de información se deben convertir en energía electromagnética antes de ser propagadas a través de un sistema electrónico de comunicaciones. Empecemos por establecer un sistema básico de comunicación:

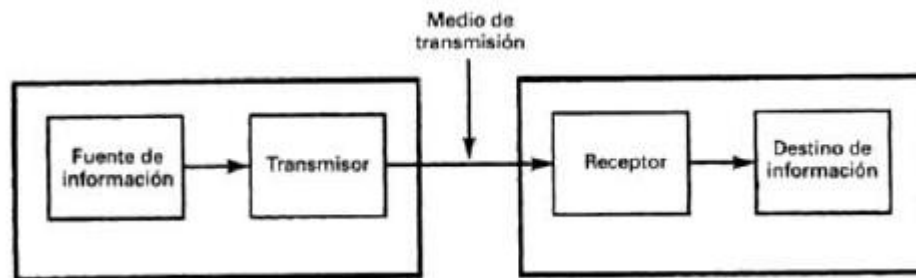


Figura 1: Esquema básico de un sistema de comunicación

Este esquema se aplica de la siguiente manera en un sistema electrónico de transmisión y de recepción:

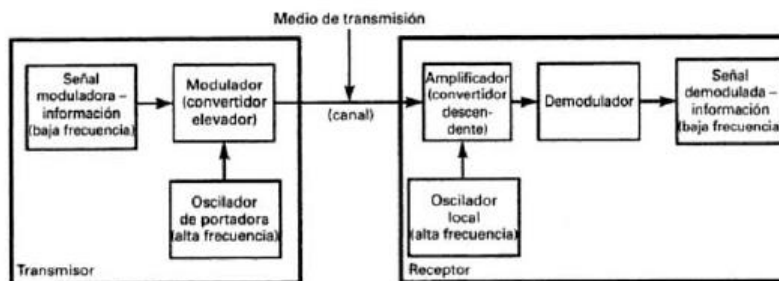


Figura 2: Esquema básico de un sistema de comunicación electrónico

Un transmisor es un conjunto de uno o más dispositivos o circuitos electrónicos que convierte la información de la fuente original en una señal. El medio de transmisión transporta las señales desde el transmisor hasta el receptor. El receptor es un conjunto de dispositivos y circuitos eléctricos que acepta del medio de transmisión las señales transmitidas y las reconvierte a su forma original.

Una señal portadora transporta la información a través del sistema, la señal de información modula a la portadora, cambiando su fase, amplitud o frecuencia, por lo que podemos definir la modulación como el proceso de cambiar una o más propiedades de la señal portadora.

Existen diferentes tipos de modulación, con diferencias entre modulación digital y analógica, determinadas por la variación en amplitud, frecuencia o fase.

Modulación digital:

- ASK, Amplitude Shift Keyring o Modulación por conmutación de amplitud.
- FSK, Frequency Shift Keyring o Modulación por conmutación de frecuencia.
- PSK, Phase Shift Keyring o Modulación por conmutación de fase.

Al variar al mismo tiempo amplitud y fase se obtiene un cuarto tipo de modulación digital:

- QAM, Quadrature Amplitude Modulation o Modulación de amplitud en cuadratura.

Modulación analógica:

- AM, Amplitude Modulation o Modulación de amplitud.
- FM, Frequency Modulation o Modulación de frecuencia.
- PM, Phase Modulation o Modulación de fase.

Los dos tipos de modulación responden a una misma ecuación:

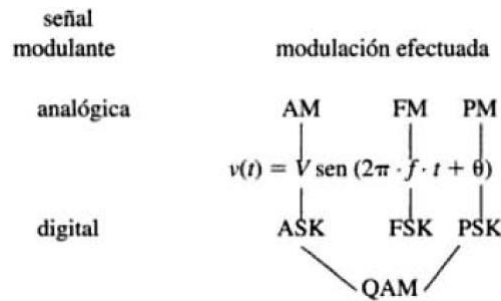


Figura 3: Ecuaciones de modulación

El proceso de modulación y demodulación es vital para el uso de las telecomunicaciones, ya que la mayoría de los medios transmiten a mismas frecuencias, además de que es más difícil transmitir a bajas frecuencias. Las dos limitaciones más importantes en el funcionamiento de un sistema de comunicaciones son el ruido y el ancho de banda. La capacidad de información es una medida de cuanta información se puede transferir a través de un sistema de comunicaciones en un determinado tiempo.

Modos de transmisión

- Simplex: las transmisiones son en una sola dirección.
- Semiduplex: las transmisiones se pueden hacer en ambas direcciones, pero no al mismo tiempo.
- Duplex total: las transmisiones son en ambas direcciones al mismo tiempo.
- Duplex total/general: con esta operación es posible transmitir y recibir en forma simultánea, pero no necesariamente entre las mismas estaciones.

El circuito de interfaz híbrida o equipo terminador se utiliza para compensar impedancias y proporcionar aislamiento entre las dos de flujo de la señal.

Propiedades de las señales

El análisis de señal implica la relación de análisis matemático de frecuencias, longitud de onda y valor de voltaje de una señal. El uso de una función seno o coseno para representar una señal es completamente arbitraria y de cual se escoge como referencia:

$$v(t) = V \text{sen}(2\pi ft + \theta^\circ) = V \cos(2\pi ft + \theta^\circ - 90^\circ)$$

$$v(t) = V \cos(2\pi ft + \theta^\circ) = V \text{sen}(2\pi ft + \theta^\circ + 90^\circ)$$

Estas fórmulas son para una onda periódica y se pueden analizar en el dominio del tiempo o de frecuencia.

La onda de la señal en un osciloscopio muestra la forma y la magnitud instantánea de la señal con respecto al tiempo.

- Onda no senoidal o periódica compleja es toda onda repetitiva formada por más de una onda senoidal o cosenoidal relacionada armónicamente.
- Frecuencia armónica: es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. La frecuencia fundamental es la primera armónica y es igual a la frecuencia de la forma de onda.
- Simetría de la onda: es la simetría de una forma de onda en el dominio del tiempo.
- Simetría especular: la onda periódica de voltaje es simétrica respecto al eje de la amplitud.
- Simetría puntual: es cuando una forma periódica de onda de voltaje es simétrica respecto a una línea intermedia entre el eje vertical y el horizontal negativo.
- Simetría de media onda: es la onda tal que el primer medio ciclo se repite, pero con signo contrario, durante el segundo medio ciclo.

El ciclo de trabajo es la relación del tiempo activo del pulso entre el periodo de la onda

$$DC = \frac{\tau}{T}$$

donde DC es duty cycle o ciclo de trabajo, τ es el ancho de pulso de la onda y T es el periodo de la onda.

La potencia es la rapidez con la que se disipa la energía y es una función del cuadrado del voltaje o la corriente.

Un filtro ideal de fase lineal es como un canal de comunicaciones con un ancho de banda finito. Al limitar una banda de una señal cambia el contenido de

frecuencias y por consiguiente la forma de onda. La suma lineal es cuando las señales se combinan de tal manera que no se producen nuevas frecuencias; la mezcla no lineal es cuando se combinan dos o más señales en un dispositivo no lineal como un diodo o un amplificador.

La amplificación no lineal de una frecuencia única causa la generación de múltiplos de una frecuencia, o armónicos.

Ruido

- Ruido externo: es el que se genera fuera del dispositivo o circuito.
- Ruido atmosférico: se origina en perturbaciones eléctricas naturales dentro de la atmósfera terrestre.
- Ruido extraterrestre: consiste en señales eléctricas que se originan fuera de la atmósfera terrestre.
- Ruido solar: lo genera una forma directa de calor solar.
- Ruido interno: es la interferencia eléctrica generada dentro de un dispositivo o circuito.
- Ruido de disparo: se debe a la llegada aleatoria de portadoras al elemento de salida de un dispositivo.
- Ruido de tiempo de transito: es cualquier modificación a una señal portadora cuando pasan de la entrada a la salida.
- Ruido térmico: se asocia con el movimiento rápido y aleatorio de los electrones dentro de un conductor.
- Ruido correlacionado: es aquel que se relaciona mutuamente con la señal y no puede estar en un circuito a menos que exista una señal de entrada.
- Producto cruzado: se produce cuando tanto las frecuencias armónicas como las fundamentales se mezclan en un dispositivo no lineal.
- Ruido impulsivo: se caracteriza por tener picos de gran amplitud y corta duración dentro del espectro total del ruido.
- Interferencia: es una forma de ruido externa y como el nombre lo indica, este perturba o estorba.
- Factor de ruido: es un cociente de relaciones de potencia de señal a ruido en la entrada entre la relación de potencia de señal a ruido en la salida.

Parte II

Introducción al procesamiento de señales y su relación con la transformada de Fourier

Procesamiento de señales: Fundamentos

- DSP: Es una disciplina identificada por el acrónimo en Inglés de “Digital Signal Processing”. Comprende los fundamentos matemáticos y algorítmicos que describen como procesar, en un ambiente de cómputo digital, información asociada a señales provenientes del mundo real.
- Digital: Sistema electrónico (digital) que opera con datos discretos representados en binario y de precisión finita.
- Señal: Un parámetro variable por medio del cual la información es transmitida en un sistema electrónico.
- Procesamiento: la realización de operaciones en los datos mediante una secuencia de instrucciones programadas de acuerdo a un algoritmo que modifica dichos datos o extrae información de los mismos.

Transformada de Fourier

En matemáticas, la transformada de Fourier, denominada así por Joseph Fourier, es una aplicación que hace corresponder a una función f , con valores complejos y definidos en la recta, con otra función g definida de la manera siguiente:

$$g(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$$

Sea $f(t)$ una función localmente integrable cuya integral valor absoluto está acotada en \mathbb{R} . Se define su transformada de Fourier como:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$$

Siendo la anti-transformada o transformada inversa:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{j\omega t} d\omega$$

La Transformada discreta de Fourier

En matemáticas, la transformada discreta de Fourier o DFT es un tipo de transformada discreta utilizada en el análisis de Fourier. Transforma una función matemática en otra, obteniendo una representación en el dominio de la frecuencia, siendo la función original una función en el dominio del tiempo. Pero la DFT requiere que la función de entrada sea una secuencia discreta y de duración finita. Dichas secuencias se suelen generar a partir del muestreo de una función continua, como puede ser la voz humana. Al contrario que la transformada de Fourier en tiempo discreto (DTFT), esta transformación únicamente evalúa suficientes componentes frecuenciales para reconstruir el segmento finito que se analiza. Utilizar la DFT implica que el segmento que se analiza es un único período de una señal periódica que se extiende de forma infinita; si esto no se cumple, se debe utilizar una ventana para reducir los espurios del espectro. Por la misma razón, la DFT inversa (IDFT) no puede reproducir el dominio del tiempo completo, a no ser que la entrada sea periódica indefinidamente. Por estas razones, se dice que la DFT es una transformada de Fourier para análisis de señales de tiempo discreto y dominio finito. Las funciones sinusoidales base que surgen de la descomposición tienen las mismas propiedades.

Análisis espectral de señales.

La transformada discreta/rápida de Fourier se usa de modo masivo en multitud de temas relacionados con el procesamiento digital de señales analógicas. De obligada mención son los análisis y síntesis espectrales de señales, la correlación cruzada de señales o la convolución de señales. Una señal analógica es una función continua del tiempo $t \in \mathbb{R} \rightarrow f(t) \in \mathbb{R}$ que representa información, como el sonido de una voz, la presión sanguínea, etc. Para procesar esta información con un computador, se toma una muestra de la señal cada T segundos y así se genera una cierta señal digitalizada.

Puesto que tomamos muestras cada T segundos, hay $T-1$ muestras por segundo y, se dice entonces que la frecuencia de muestreo es de $T-1$ Hz. En la práctica, puede asumirse que las señales más utilizadas son las aperiódicas de banda limitada y las periódicas finitas, es decir, formadas por un número finito de armónicos. Si la correspondiente muestra consta de un total de N valores, entonces el n -ésimo valor es:

$$y_n = f(nT) \quad \begin{matrix} n = 0, 1, 2, \dots, n \\ n - 1 \\ n \end{matrix}$$

La transformada discreta/rápida de Fourier permite convertir la señal digital anterior y_n en el dominio del tiempo en un conjunto de puntos β_n que representan el contenido en frecuencia. Puesto que los puntos en los que tomamos las

muestras están igualmente espaciados en el intervalo temporal $[0, NT]$, los coeficientes calculados con la transformada discreta correspondiente a frecuencias separadas por NT^{-1} Hz.

Convolución

La convolución de 2 señales f y g se denota por $f * g$. Se define como la integral del producto de ambas funciones después de que una sea invertida y desplazada una distancia τ

$$(f * g)(t) = \int f(\tau)g(t - \tau)d\tau$$

Para las funciones discretas se puede usar una forma discreta de la Convolución. Esto es:

$$f[m] * g[m] = \sum_n f[n]g[m - n]$$

Teorema de Nyquist-Shannon

Considérese que a pesar de que los conceptos cubiertos en el teorema de Nyquist-Shannon, relacionados con el muestreo y la recuperación de una señal transmitida, no aplican de manera directa en este ejercicio, se debe tomar en cuenta el siguiente criterio de Nyquist:

$$F_s \geq 2f$$

La cual nos dice que la frecuencia de muestreo deberá ser por lo menos 2 veces mayor que la frecuencia base de la señal que se analice.

Parte III

Modulación de Frecuencia

La modulación de frecuencia, o frecuencia modulada (FM), es una técnica de modulación que permite transmitir información a través de una onda portadora variando su frecuencia. En aplicaciones analógicas, la frecuencia instantánea de la señal modulada es proporcional al valor instantáneo de la señal moduladora. Datos digitales pueden ser enviados por el desplazamiento de la onda de frecuencia entre un conjunto de valores discretos, una modulación conocida como modulación por desplazamiento de frecuencia.

La modulación de frecuencia es usada comúnmente en las radiofrecuencias de muy alta frecuencia por la alta fidelidad de la radiodifusión de la música y el habla. El sonido de la televisión analógica también es difundido por medio de FM. Un formulario de banda estrecha se utiliza para comunicaciones de voz en la radio comercial y en las configuraciones de aficionados. El tipo usado en la radiodifusión FM es generalmente llamado amplia-FM o W-FM (de las siglas en inglés “Wide-FM”). En la radio de dos vías, la banda estrecha o N-FM (de las siglas en inglés “Narrow-FM”) es utilizada para ahorrar ancho de banda. Además, se utiliza para enviar señales al espacio.

La modulación de frecuencia también se utiliza en las frecuencias intermedias de la mayoría de los sistemas de vídeo analógico, incluyendo VHS, para registrar la luminancia (blanco y negro) de la señal de video. La modulación de frecuencia es el único método factible para la grabación de video y para recuperar de la cinta magnética sin la distorsión extrema, como las señales de vídeo con una gran variedad de componentes de frecuencia - de unos pocos hertz a varios megahertz, siendo también demasiado amplia para trabajar con ecualizadores con la deuda al ruido electrónico debajo de -60 dB. La FM también mantiene la cinta en el nivel de saturación, y, por tanto, actúa como una forma de reducción de ruido del audio, y un simple corrector puede enmascarar variaciones en la salida de la reproducción, y que la captura del efecto de FM elimina a través de impresión y pre-eco. Un piloto de tono continuo, si se añade a la señal - que se hizo en V2000 o video 2000 y muchos formatos de alta banda - puede mantener el temblor mecánico bajo control y ayudar al tiempo de corrección.

Dentro de los avances más importantes que se presentan en las comunicaciones, la mejora de un sistema de transmisión y recepción en características como la relación señal – ruido, sin duda es uno de los más importantes, pues permite una mayor seguridad en las mismas. Es así como el paso de modulación de amplitud (AM), a la modulación de frecuencia (FM), establece un importante avance no solo en el mejoramiento que presenta la relación señal ruido, sino también en la mayor resistencia al efecto del desvanecimiento y a la interferencia, tan comunes en AM.

La modulación de frecuencia también se utiliza en las frecuencias de audio para sintetizar sonido. Esta técnica, conocida como síntesis FM, fue popularizada a principios de los sintetizadores digitales y se convirtió en una característica estándar para varias generaciones de tarjetas de sonido de computadoras personales.

Dentro de las aplicaciones de FM se encuentra la radio, en donde los receptores emplean un detector de FM y el sintonizador es capaz de recibir la señal más fuerte de las que transmiten en la misma frecuencia. Otra de las características que presenta FM, es la de poder transmitir señales estereofónicas, y entre otras de sus aplicaciones se encuentran la televisión, como sub-portadora de sonido; en micrófonos inalámbricos; y como ayuda en navegación aérea.

Edwin Armstrong presentó su estudio Un Método de reducción de Molestias en la Radio Mediante un Sistema de Modulación por Frecuencia, que describió por primera vez a la FM, antes que la sección neoyorquina del Instituto de Ingenieros de Radio el 6 de noviembre de 1935. El estudio fue publicado en 1935.

La FM de onda larga (W-FM) requiere un mayor ancho de banda que la modulación de amplitud para una señal moduladora equivalente, pero a su vez hace a la señal más resistente al ruido y la interferencia. La modulación de frecuencia es también más resistente al fenómeno del desvanecimiento, muy común en la AM. Por estas razones, la FM fue escogida como el estándar para la transmisión de radio de alta fidelidad, resultando en el término "Radio FM" (aunque por muchos años la BBC la llamó "Radio VHF", ya que la radiodifusión en FM usa una parte importante de la banda VHF).

Los receptores de radio FM emplean un detector para señales FM y exhiben un fenómeno llamado efecto de captura, donde el sintonizador es capaz de recibir la señal más fuerte de las que transmitan en la misma frecuencia. Sin embargo, la desviación por frecuencia o falta de selectividad puede causar que una estación o señal sea repentinamente tomada por otra en un canal adyacente. La desviación por frecuencia generalmente constituyó un problema en receptores viejos o baratos, mientras que la selectividad inadecuada puede afectar a cualquier aparato.

Una señal FM también puede ser usada para transportar una señal estereofónica. No obstante, esto se hace mediante el uso de multiplexación y demultiplexación antes y después del proceso de la FM. Se compone una señal moduladora (en banda base) con la suma de los dos canales (izquierdo y derecho), y se añade un tono piloto a 19 kHz. Se modula a continuación una señal diferencia de ambos canales a 38 kHz en doble banda lateral, y se le añade a la moduladora anterior. De este modo se consigue compatibilidad con receptores antiguos que no sean estereofónicos, y además la implementación del demodulador es muy sencilla.

Una amplificación de conmutación de frecuencias radiales de alta eficiencia puede ser usada para transmitir señales FM (y otras señales de amplitud constante). Para una fuerza de señal dada (medida en la antena del receptor), los amplificadores de conmutación utilizan menos potencia y cuestan menos que un

amplificador lineal. Esto le da a la FM otra ventaja sobre otros esquemas de modulación que requieren amplificadores lineales, como la AM y la QAM.

La modulación de frecuencia encuentra aplicación en gran cantidad de sistemas de comunicación. Aparte de la FM de radiodifusión, entre 87 y 108 MHz, la separación entre dos canales adyacentes es de 200 kHz y la desviación por frecuencia $\Delta f = 75$ kHz. la FM se viene utilizando principalmente en las siguientes aplicaciones:

- **Televisión:**
 - **Subportadora de sonido:** La información de sonido modula en frecuencia la subportadora de sonido, que posteriormente se une a las restantes componentes de la señal de TV para modular en AM la portadora del canal correspondiente y se filtra para obtener la banda lateral vestigial. El sonido NICAM es digital y no sigue este proceso.
 - **SECAM:** El sistema de televisión en color SECAM modula la información de color en FM.
- **Micrófonos inalámbricos:** Debido a la mayor robustez de esta técnica ante las interferencias (ruidos radioeléctricos externos).
- **Ayudas a la navegación aérea.** Sistemas como el DVOR (VOR Doppler), simulan una antena giratoria que, por efecto Doppler, modula en frecuencia la señal transmitida.

Modulador de FM

La modulación de una portadora sobre FM, aunque se puede realizar de varias formas, resulta un problema delicado debido a que se necesitan dos características contrapuestas: estabilidad de frecuencia y que la señal moduladora varíe la frecuencia. Por ello, la solución simple de aplicar la señal moduladora a un oscilador controlado por tensión (VCO) no es satisfactoria.

- **Modulación del oscilador:** En oscilador estable, controlado con un cristal piezoeléctrico, se añade un condensador variable con la señal moduladora (varactor). Eso varía ligeramente la frecuencia del oscilador en función de la señal moduladora. Como la excursión de frecuencia que se consigue no suele ser suficiente, se lleva la señal de salida del oscilador a multiplicadores de frecuencia para alcanzar la frecuencia de radiodifusión elegida.
- **Moduladores de fase:** Un modulador de FM se puede modelar exactamente como un modulador de PM con un integrador a la entrada de la señal moduladora.
- **Modulador con PLL:** Vuelve a ser el VCO, pero ahora su salida se compara con una frecuencia de referencia para obtener una señal de error, de modo que se tiene una retroalimentación negativa que minimiza dicho error. La

señal de error se filtra para que sea insensible a las variaciones dentro del ancho de banda de la señal moduladora, puesto que estas variaciones son las que modulan la salida del VCO. Este método se ha impuesto con la llegada de los PLL integrados ya que ha pasado de ser el más complejo y costoso a ser muy económico. Presenta otras ventajas, como es poder cambiar de frecuencia para pasar de un canal a otro y mantiene coherentes todas las frecuencias del sistema.

Demodulador de FM

También es más complejo que el de AM. Se utilizan sobre todo dos métodos:

- Discriminador reactivo: Se basa en llevar la señal de FM a una reactancia, normalmente bobinas acopladas, de forma que su impedancia varíe con la frecuencia. La señal de salida aparece, entonces, modulada en amplitud y se detecta con un detector de envolvente. Existían válvulas específicas para esta tarea, consistentes en un doble-diodo-triodo. Los dos diodos forman el detector de envolvente y el triodo amplifica la señal, mejorando la relación señal/ruido.
- Detector con PLL: La señal del PLL proporciona la señal demodulada. Existen muchas variaciones según la aplicación, pero estos detectores suelen estar en circuitos integrados que, además, contienen los amplificadores de RF y frecuencia intermedia. Algunos son una radio de FM completa.

Ecuación característica

$$F_{fm} = \cos[\omega_c t + \alpha + k_f + \int f(t)dt]$$

Ancho de banda

Al contrario que en el caso de modulación de amplitud modulada, que se concentra en la frecuencia portadora y dos bandas laterales, el ancho de banda de una señal de FM se extiende indefinidamente teniendo como una amplitud estándar o de rango de transferencia de 58 kHz con 6 canales de transferencia, cancelándose solamente en ciertos valores de frecuencia discretos. Cuando la señal moduladora es una senoide el espectro de potencia que se tiene es discreto y simétrico respecto de la frecuencia de la portadora, la contribución de cada frecuencia al espectro de la señal modulada tiene que ver con las funciones de Bessel de primera especie J_n . A través de la regla de Carson es posible determinar el ancho de banda que se requiere para transmitir una señal modulada en FM (o PM). Mientras que la frecuencia AM contiene una amplitud del espectro de transferencia 38 kHz y un ancho de banda de 56 KB/s conteniendo 5 canales de transferencia.