

Modulación en frecuencia

La modulación en frecuencia se desarrolló originalmente para combatir el ruido molesto asociado con la señal deseada al emplearse la modulación en amplitud. Mucho del ruido apareció como una modulación en amplitud adicional en la señal.

Cuando se modula en frecuencia a una portadora la información se sitúa sobre ella variando su frecuencia y manteniendo fija su amplitud. Durante la recepción se eliminan las variaciones en amplitud antes de la demodulación sin afectar al contenido de información que va en las variaciones de frecuencia, eliminándose así cualquier ruido que pudiera aparecer como una modulación en amplitud de la portadora. Véase la figura 2-1.

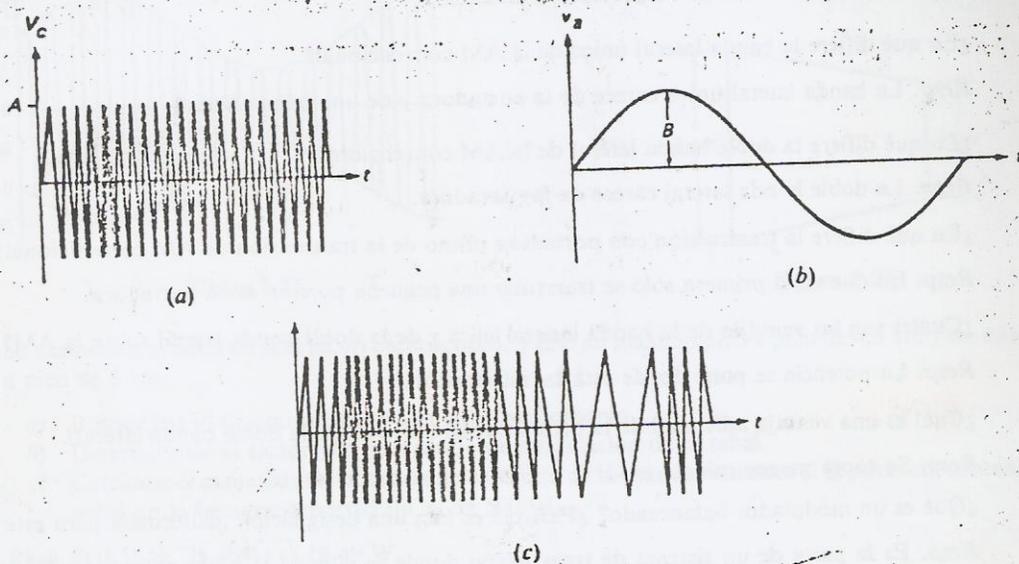


Figura 2-1

La portadora no modulada se describe como

$$v_c = A \sin 2\pi f t$$

La señal de audio o moduladora se puede anotar

$$v_a = B \sin 2\pi f_a t$$

La frecuencia portadora f variará alrededor de una frecuencia de reposo f_c , así:

$$f = f_c + \Delta f \sin 2\pi f_a t$$

La onda modulada en frecuencia tendrá la siguiente descripción:

$$v = A \sin [2\pi(f_c + \Delta f \sin 2\pi f_a t)t]$$

En esta situación, modulación en frecuencia, Δf es el cambio máximo en frecuencia que la onda puede experimentar y es conocido como *desviación de frecuencia*. A la variación total en frecuencia desde la más baja hasta la más alta se la conoce como *oscilación de portadora*. Así, para una señal

moduladora que tiene picos positivos y negativos, tal como una onda senoidal pura, la oscilación de la portadora es igual a dos veces la desviación de frecuencia.

$$\Delta f = \text{desviación de frecuencia}$$

$$\text{Oscilación de portadora} = 2 \times \text{desviación de frecuencia}$$

Se puede demostrar que la ecuación para la onda modulada en frecuencia es manejable dentro de la siguiente expresión

$$v = A \sin \left(2\pi f_c t + \frac{\Delta f}{f_a} \cos 2\pi f_a t \right)$$

Sin embargo, ésta se presenta sin demostración puesto que las matemáticas necesarias para su deducción requieren del cálculo.

Nótese que en esta ecuación el término cosenoidal está precedido del término $\Delta f/f_a$. A esta magnitud se la conoce como el *índice de modulación* y se denota por m_f .

$$\text{Índice de modulación } m_f = \frac{\Delta f}{f_a}$$

en donde Δf es la desviación de frecuencia.

La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de los Estados Unidos especifica que debe emplearse la modulación en frecuencia como la técnica de modulación en la banda de frecuencias entre los 88 y los 108 MHz. Esta banda se llama *banda de radiodifusión para FM*.

También se ha dispuesto que sea la modulación en frecuencia la técnica de modulación requerida para la porción de audio de la banda de difusión de TV.

La FCC estipula una desviación máxima de frecuencia de 75 kHz para estaciones de difusión de FM en la banda de los 88 a los 108 MHz.

En la porción de sonido para difusión de TV se permite un máximo de desviación de frecuencia de 25 kHz.

PORCENTAJE DE MODULACIÓN

La expresión "porcentaje de modulación" tal como se la emplea en relación con la FM se refiere a la razón de la desviación de frecuencia efectiva con la desviación de frecuencia máxima permisible. Así, una modulación de 100% corresponde a 75 kHz para la banda de difusión de FM comercial y a 25 kHz para televisión.

$$\text{Porcentaje de modulación } M = \frac{\Delta f_{\text{efectiva}}}{\Delta f_{\text{máx}}} \times 100$$

BANDAS LATERALES

Al analizar una onda modulada en frecuencia se encuentra que a diferencia de la onda modulada en amplitud, en la cual se tienen sólo dos frecuencias laterales por cada frecuencia moduladora, la señal de

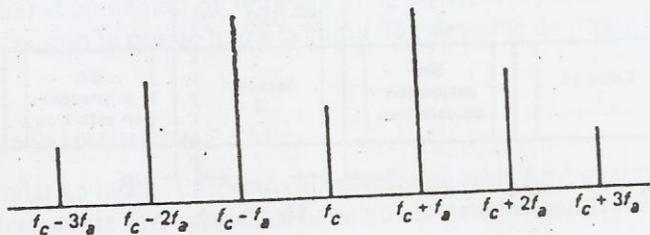


Figura 2-2

MODULACIÓN EN FRECUENCIA

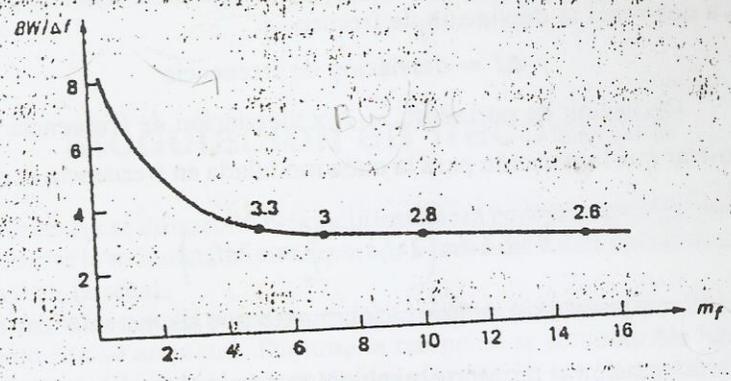


Figura 2-3

FM tiene un número infinito de frecuencias laterales espaciadas en f_c a ambos lados de la frecuencia en reposo. Véase la figura 2-2. Sin embargo, la mayor parte de las frecuencias laterales no contienen cantidades significativas de potencia.

El análisis de Fourier indica que el número de frecuencias laterales que contiene una magnitud significativa de potencia, y en consecuencia el ancho de banda efectivo de la señal de FM, depende del índice de modulación de la onda modulada, $\Delta f/f_c$.

Schwartz* desarrolló una gráfica para determinar el ancho de banda de una señal de FM cuando se conoce el índice de modulación. Esta gráfica es como la que se observa en la figura 2-3. Schwartz empleó el criterio de la regla práctica que establece que cualquier frecuencia componente con una intensidad de señal (voltaje) menor del 1% en relación con la portadora no modulada se considerará muy pequeña como para ser significativa.

La FCC especifica un máximo de frecuencia de la señal moduladora limitado a 15 kHz tanto en la banda de difusión de FM como en la banda de la televisión comercial (la porción de sonido en la transmisión de televisión es una señal modulada en frecuencia).

$f_{a, \max} = 15 \text{ kHz}$ para la banda de 88 a 108 MHz y para TV

FRECUENCIA CENTRAL Y ASIGNACIONES DE ANCHOS DE BANDA

A cada estación comercial de difusión de FM en la banda de 88 a 108 MHz se le asigna un canal de 150 kHz más una banda de seguridad de 25 kHz en los extremos superior e inferior de la asignación que de la estación hace la FCC. Por lo que a cada estación en la banda de difusión de FM comercial se le asigna un ancho de canal de 200 kHz.

150 kHz + 2(25 kHz) = 200 kHz

Además de esta combinación de ancho de banda grande y bandas de seguridad (200 kHz) sólo se asignan canales alternados dentro de alguna área geográfica en particular. En la banda de UHF, de la cual es

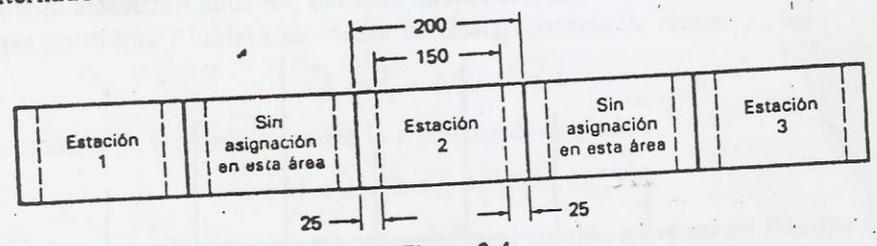


Figura 2-4

* Mischa Schwartz, *Information Transmission, Modulation, and Noise*, McGraw-Hill, Nueva York, 1959.

una parte la banda de difusión de FM comercial, se limita la recepción a distancias ligeramente mayores del horizonte. Así, asignando sólo canales alternados en determinada área geográfica se disminuye la posibilidad de interferencia (véase la figura 2-4).

RAZÓN DE DESVIACIÓN

El índice de modulación extremo en el cual se emplea la máxima desviación de frecuencia permitida y la máxima frecuencia de audio permitida se conoce como *razón de desviación*.

$$\text{Razón de desviación} = \frac{\Delta f_{\text{máx}}}{f_{a, \text{máx}}}$$

Así, la razón de desviación para estaciones en la banda de difusión de FM comercial es

$$\text{razón de desviación, 88-108 MHz} = \frac{75 \text{ kHz}}{15 \text{ kHz}} = 5$$

y para la porción de sonido de la televisión comercial,

$$\text{Razón de desviación, TV} = \frac{25 \text{ kHz}}{15 \text{ kHz}} = 1.67$$

FM DE BANDA ANGOSTA CONTRA FM DE BANDA ANCHA

Al examinar la curva de ancho de banda de Schwartz de la figura 2-3 se aprecia que para altos valores de m_f , la curva tiende hacia una asíntota horizontal y para valores bajos tiende hacia la vertical. Un estudio matemático detallado indicaría que el ancho de banda de una señal de FM para la cual m_f es menor que $\pi/2$ depende principalmente de la frecuencia de la señal moduladora y es totalmente independiente de la desviación de frecuencia. Un análisis más completo demostraría que el ancho de banda de una señal de FM en la cual m_f es menor que $\pi/2$ es igual a dos veces la frecuencia moduladora.

$$\text{Ancho de banda} = 2f_a \text{ para } m_f < \pi/2$$

Tal como en la AM y a diferencia de la situación en la cual $m_f > \pi/2$ por cada frecuencia moduladora aparecen dos frecuencias laterales, una por encima y otra por debajo de la frecuencia de la portadora, espaciada cada una f_a fuera de ella. Dado lo limitado del ancho de banda de señales de FM con $m_f < \pi/2$, a tales modulaciones se las designa como *FM de banda angosta* y a las señales de FM con $m_f > \pi/2$ *FM de banda ancha*.

Aunque pudieran parecer iguales los espectros de una señal de AM y de una de FM de banda angosta, por medio del análisis de Fourier se demuestra que las relaciones de magnitud y fase para AM y FM son del todo diferentes. En la figura 2-5 se puede apreciar el espectro de frecuencia de una señal de FM de banda angosta.

Muchas de las ventajas que se obtienen con la FM de banda ancha, tal como la reducción de ruido, no se encuentran en la FM de banda angosta. ¿Por qué entonces es deseable el empleo de la FM de banda angosta más que la AM? Una razón es que en la FM de banda angosta (así como también en la FM de banda ancha) el contenido de potencia en la frecuencia portadora disminuye conforme se incrementa la modulación, con lo que se logra la condición deseable de poner la potencia donde está la información.

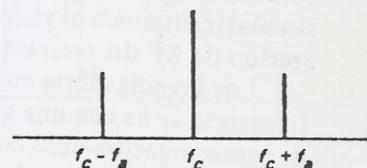


Figura 2-5

RECEPTORES Y TRANSMISORES DE FM

El receptor de FM es similar en muchos aspectos al receptor de AM. Ambos son por lo general receptores superheterodinos. El receptor de FM comercial tiene por lo general una frecuencia intermedia de 10.7 MHz. Véase la figura 2-6.

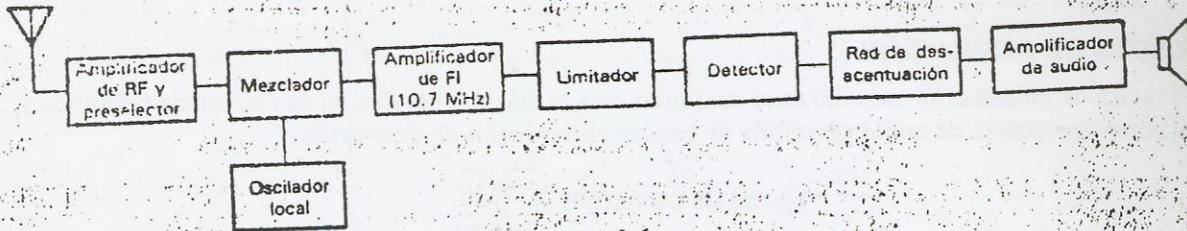


Figura 2-6

Por supuesto que el circuito de demodulación de los receptores de FM será por completo diferente al que se emplea en los receptores de AM. Otras diferencias entre los receptores de AM y de FM consisten en la inclusión de una sección conocida como el *limitador* y otra denominada *red de desacentuación* en el receptor de FM.

El limitador

El propósito del circuito limitador es recortar todas las variaciones de amplitud que puedan existir en la señal a medida que llega a esta parte del sistema. Este recorte remueve cualquier ruido de AM que pudiera haber llegado a ser parte de la señal. Con ello el limitador elimina el ruido pero no afecta al contenido de información de la señal ya que la información está contenida en las variaciones de frecuencia y no en las variaciones de amplitud.

La red de desacentuación

La red de desacentuación que aparece en el diagrama a bloques del receptor de FM es sólo la mitad de un sistema que consta de una red de preacentuación y otra de desacentuación, estando localizada la red de preacentuación en el transmisor. La red de preacentuación origina que el contenido de información de alta frecuencia de la señal de audio en el transmisor se amplifique más que la información de baja frecuencia. La red de desacentuación compensa esto reduciendo la ganancia de la señal de audio de alta frecuencia. La razón para la inclusión de tal sistema es reducir el ruido modulado en frecuencia que entra a la señal transmitida al viajar del transmisor al receptor, así como cualquier ruido que pudiera entrar a la sección de RF del receptor.

Los investigadores encontraron que el ruido que se incorpora a la señal como una modulación en frecuencia se da con una gran probabilidad y desorden en las altas frecuencias de audio; así, el sistema de preacentuación-desacentuación, funciona para reducir el ruido modulado en frecuencia.

Transmisores de FM

El diagrama a bloques de un transmisor de FM es similar al de un transmisor de AM. Nótese en la figura 2-7 el diagrama a cuadros de un transmisor de FM, la red de preacentuación como se esperaba a partir del análisis de los receptores de FM y un cuadro denominado *excitador*. El excitador es aquella parte del transmisor de FM dentro de la cual ocurre la modulación.

Hay dos tipos de técnicas para la generación de una señal de FM. Una es conocida como el *método directo* y la otra como el *método indirecto*.

En el método directo se emplea un circuito sintonizado que contiene un dispositivo cuya capacitancia se puede hacer variar en forma directa con la amplitud de la señal moduladora. Se la pone en derivación con un circuito tanque RLC en paralelo. Los dispositivos que más se emplean en esta forma incluyen el *modulador de reactancia a transistor*, el *modulador de tubo reactancia* y los *diodos varactores* (varicaps).

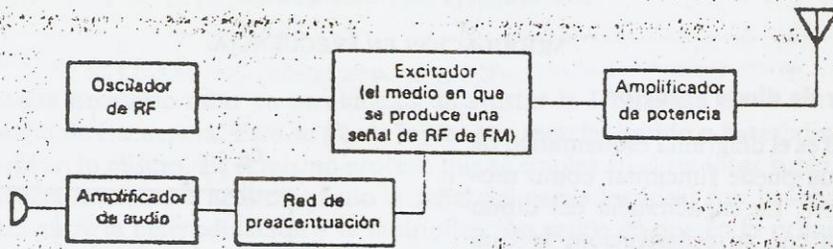


Figura 2-7

El modulador de reactancia a transistor

La figura 2-8 es el diagrama esquemático de un modulador de reactancia a transistor. La capacitancia que presenta este circuito es

$$C_{eq} = \frac{h_{fc} R_2 C_2}{h_{ie} + R_2}$$

La beta (β) del transistor h_{fc} , varía cambiando el punto de operación del transistor, el cual se determina por la señal de audio de entrada que varía en forma lenta.

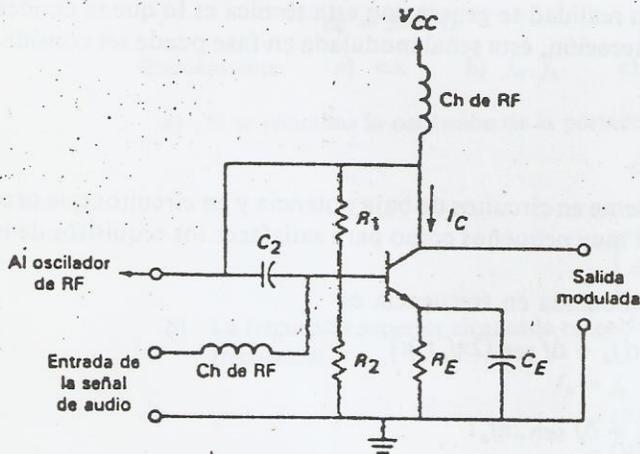


Figura 2-8

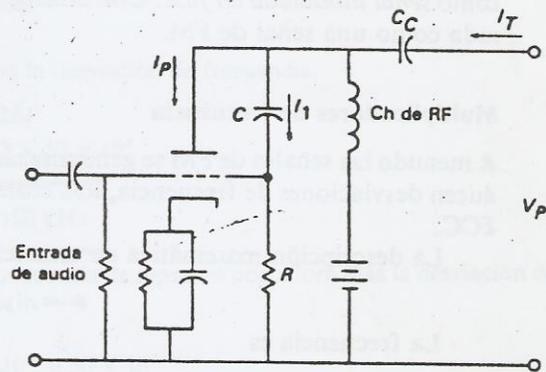


Figura 2-9

El modulador de tubo reactancia

La figura 2-9 es un diagrama esquemático de un modulador de tubo reactancia. La capacitancia que presenta este circuito es

$$C_{eq} = g_m RC$$

en donde g_m varía con la señal de audio. Por lo general se emplea un tubo de corte remoto puesto que la g_m del mismo es muy sensitiva al punto de operación del tubo.