17. Modulación

Ing. Juan C. Bonello, Ing. Pedro Castro, Ing. Fernando Ubiría

17.1 Traslación de frecuencia

La información representa cierto *cambio* de un estado anterior, cuanto más rápidos son los cambios, mayor es la cantidad de información generada por unidad de tiempo. En la mayoría de los casos, la información original no se encuentra en una forma que permita su fácil transporte hasta el receptor, sino que primero debe sufrir una cierta transformación o proceso de codificación. Una cierta clase de codificación recibe el nombre de *Modulación*.

En el caso de la radiodifusión, por ejemplo, no es posible irradiar directamente las audiofrecuencias. Para poder funcionar eficientemente, la longitud de la antena debe ser alrededor de un cuarto de la longitud de onda a emitir, para 1 KHz esa longitud serían unos 75 Km. Además, dicha antena no sería adecuada para radiar eficazmente las frecuencias correspondientes a la mitad o al doble de su longitud de onda natural. Obviamente, tampoco podría transmitir la banda mínima de 300 a 3400 Hz necesaria para la inteligibilidad de la palabra. En consecuencia, dicha banda mínima debe ser "trasladada" a una banda de frecuencias más elevadas, apta para ser radiada por una antena.

La *modulación* es un proceso mediante el cual una característica determinada de la llamada *onda portadora*, de frecuencia mayor que cualquier componente de la señal, es modificada de acuerdo con la variación temporal de la señal. A una onda portadora senoidal, expresada en forma general mediante la ec. (1), se le pueden aplicar los dos grupos de métodos de modulación siguientes:

$$v_p = V_p \operatorname{sen}(\omega_p t + \theta_p) \qquad (1)$$

1. Modulación de amplitud, en la que se varía V_p

2. Modulación angular, en la que se varía la frecuencia ω_p o la fase θ_p

17.2 Modulación de amplitud - AM

Modular una onda en amplitud, consiste en variar su amplitud en torno a un valor medio en forma proporcional al valor instantáneo de la señal de información. Dicho de otro modo, dada una onda portadora senoidal $v_p(t)$, se varía la longitud del fasor V_p en torno a su valor central en función de la señal $v_s(t)$, dejando constantes la frecuencia ω_p y el ángulo de fase inicial θ_p. La longitud del fasor es ahora $[V_p + v_s(t)]$, a este término se lo llama *envolvente de modulación.*

$$v_{mod} = [V_p + v_s(t)]\ \text{sen}(\omega_p t + \theta_p) \quad (2)$$

Se define el *Indice de Modulación de Amplitud* M_A como el cociente entre los *valores de pico* de tensión de la señal moduladora y de la onda portadora.

$$M_A = \frac{V_s}{V_p} \quad (3)$$

Introduciendo M_A, la ec.(2) deviene:

$$v_{mod} = V_p[1 + M_A \cdot f(t)]\ \text{sen}(\omega_p t + \theta_p) \quad (4)$$

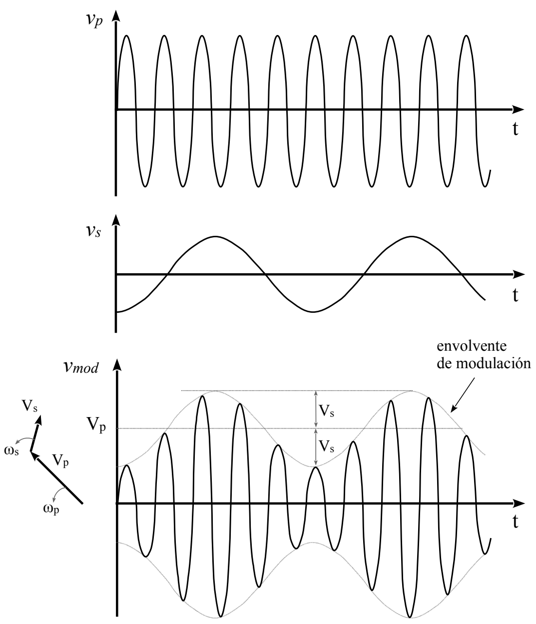

fig. 1

La amplitud de una onda no puede ser negativa. En consecuencia, se debe elegir $|M_A \cdot f(t)| \leq 1$.

En la fig. 1, se ha representado la onda modulada para el caso en el que la señal moduladora es también una onda senoidal.

$$v_p = V_p\ \text{sen}(\omega_p t + \theta_p) \qquad \omega_p \gg \omega_s$$
$$v_s = V_s\ \text{sen}(\omega_s t + \theta_s)$$

Como puede verse en la fig. 1, la envolvente de modulación es la curva imaginaria que une las crestas de la onda modulada y tiene la misma forma que la señal moduladora.

Análisis espectral de la onda modulada en amplitud

La onda modulada no es una onda senoidal, sino que se ha transformado en una mezcla de varias ondas de diferentes frecuencias, superpuestas las unas a las otras. Como los ángulos iniciales θ_p y θ_s son constantes, podemos despreciarlos al desarrollar la ec.(2) sin introducir errores conceptuales en el resultado final:

$$v_{mod} = [V_p + V_s \operatorname{sen}(\omega_s t)] \cdot \operatorname{sen}(\omega_p t) = V_p\,[1 + M_A \operatorname{sen}(\omega_s t)]\,\operatorname{sen}(\omega_p t)$$

Aplicando la identidad del producto de senos:

$$\operatorname{sen}\alpha \cdot \operatorname{sen}\beta = \frac{\cos(\alpha-\beta)}{2} - \frac{\cos(\alpha+\beta)}{2}$$

$$v_{mod} = V_p \operatorname{sen}\omega_p t + \frac{V_p \cdot M_A}{2}\cos(\omega_p - \omega_s)t - \frac{V_p \cdot M_A}{2}\cos(\omega_p + \omega_s)t \qquad (5)$$

La ec.(5) demuestra que una onda modulada en amplitud por una onda senoidal, o sea, por una única frecuencia, puede descomponerse en tres componentes:

i) Una de igual amplitud y frecuencia que la portadora sin modular.

ii) Una cuya amplitud es la mitad que la señal de información y cuya frecuencia es $f_p + f_s$, llamada *frecuencia lateral superior*

iii) Una cuya amplitud es la mitad que la señal de información y cuya frecuencia es $f_p - f_s$, llamada *frecuencia lateral inferior*

Estas frecuencias laterales son quienes contienen la información transmitida. Sí la señal moduladora fuera una onda compleja, existiría un par de frecuencias laterales correspondiente a cada frecuencia contenida en la señal moduladora. El análisis espectral mostraría la presencia de dos bandas de frecuencias laterales, cada una de ellas con un ancho de banda igual al de la señal original, fig. 2. Ni la portadora ni las bandas laterales son una ficción matemática, sino que son reales y se las puede separar mediante filtros. Una onda de AM ocupa un ancho de banda total centrado en la frecuencia de la portadora f_p e igual a:

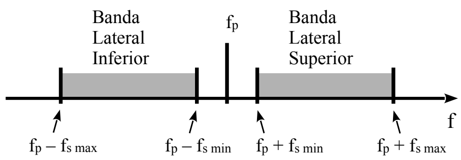

fig. 2

$$AB_{total} = f_p + f_{s\,max} - (f_p - f_{s\,max}) = 2 \cdot f_{s\,max} \qquad (6)$$

A modo de ejemplo, la gama de frecuencias que abarca un programa de radiodifusión de AM típico es de 100 Hz a 5 KHz.

La energía contenida en una onda modulada es la suma de las energías de las distintas componentes de frecuencia y aumenta por consiguiente con la modulación, debido al aporte de energía de las bandas laterales. Analizaremos el caso de la portadora modulada por una sola frecuencia, descripta por la ec. (5).

La potencia de la portadora es el cuadrado de su tensión eficaz multiplicado por una constante de proporcionalidad K , o sea: $P_P = K \cdot \frac{V_p^2}{2}$

La potencia de cada banda lateral es $(M_A/2)^2$ veces la potencia de la portadora, siendo así la potencia total de la onda modulada en amplitud:

$$P_{TM} = P_p\left(1 + \frac{M_A^2}{2}\right) \qquad (7)$$

Vemos que la potencia de las bandas laterales aumenta con el cuadrado del índice de modulación. Es claro que para una transmisión eficiente, el índice de modulación debe ser lo más cercano posible a la unidad. Con $M_A = 1$, o sea, con una modulación del 100 %, $P_P = 66{,}6$ % de P_{TM} y $P_{TL} = 33{,}3$ % de P_{TM}

En los picos de modulación positivos, la tensión de la onda modulada es el doble de la tensión de pico de la portadora V_p , de modo que *la potencia de pico de la onda modulada es 4 veces la potencia de la portadora sin modular.*

Como la portadora no contiene información, en algunos sistemas se la suprime a fines de ahorrar energía y se transmiten sólo las bandas laterales. Un ahorro adicional de energía, así como de ancho de banda, se logra suprimiendo también una de las bandas laterales, aprovechando que ambas contienen la misma información. El precio que se paga por no transmitir la portadora, es el de una mayor complejidad en el receptor.

En la modulación normal de AM se cumple que $M_A \leq 1$. Sí no fuere así, la envolvente de modulación no reproduciría exactamente la forma de la señal, sino que contendría componentes de frecuencia que no existen en la señal moduladora. Se estaría ante una *distorsión de amplitud* provocada por una *sobremodulación*. En general, la distorsión de la envolvente no es aparente en una observación directa. Si se conecta la onda modulada υ_m al canal vertical del osciloscopio y la señal moduladora υ_s al horizontal, se verá en la pantalla un trapezoide. Como la envolvente es una función lineal de υ_s , si no hay distorsión los lados superior e inferior serán lineas rectas. Esta figura permite además medir el índice de modulación:

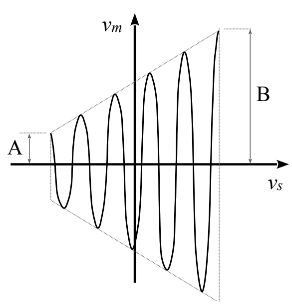

fig. 3

$$\begin{aligned} A &= V_p - V_s \\ B &= V_p + V_s \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad M_A = \frac{B - A}{B + A} \qquad (8)$$

Doble banda lateral con portadora suprimida (DSB-SC)

Sean la señal moduladora *s*(*t*), cuya transformada de Fourier es *S*(ω) y la portadora $1 \cdot \cos(\omega_p t)$. Haciendo el producto de ambas y aplicando la fórmula de Euler resulta:

$$s_{mod}(t) = s(t)\cos(\omega_p t) = s(t)\frac{e^{j\omega_p t} + e^{-j\omega_p t}}{2} \quad (9)$$

Aplicando la propiedad de traslación en frecuencia de la TF se obtiene:

$$S_{mod}(\omega) = \frac{1}{2}\,S(\omega + \omega_p) + \frac{1}{2}\,S(\omega - \omega_p) \quad (10)$$

El espectro de frecuencia de la señal se ha trasladado en ± ω_p rad/s, pero su forma ha permanecido inalterada. Este tipo de modulación de amplitud se llama de *portadora suprimida* porque la densidad espectral de $s_{mod}(t)$ no presenta una portadora identificable, aunque el espectro se centre en la frecuencia ω_p. Se ahorra la potencia necesaria para transmitir la portadora, la cual no contiene información.

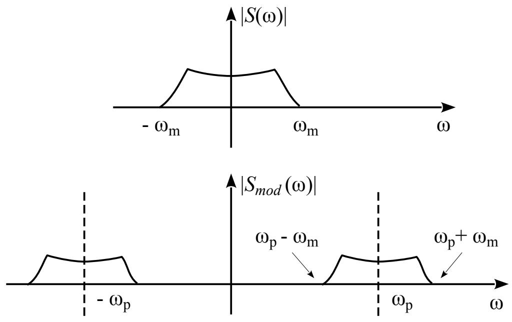

fig. 4

Banda lateral única (SSB)

Se puede lograr un ahorro aún mayor de potencia transmitida y al mismo tiempo reducir el espectro de frecuencia ocupado, suprimiendo la banda lateral superior o la inferior de una señal de AM de portadora suprimida, obteniendo así una señal de AM de *banda lateral única*. Esta supresión se puede lograr mediante un filtro lo suficientemente selectivo como para atenuar una de las bandas sin distorsionar la otra en magnitud o en fase. Para la modulación SSB de voz, se suelen usar filtros mecánicos, de cristal o cerámicos.

Banda lateral vestigial (VSB)

Sí se desea conservar el espacio espectral pero la señal moduladora es de banda ancha o no pueden despreciarse los componentes de baja frecuencia, se transmite una onda formada por la portadora y una de las bandas laterales, suprimiendo la otra banda lateral. Se puede obtener aproximadamente ese resultado, pasando una señal normal de AM a través de un filtro diseñado de modo tal, que el borde de la banda pasante del filtro coincida con la frecuencia portadora.

Técnicas para la modulación en amplitud

En general, hay cuatro métodos básicos para modular una onda en amplitud:

Multiplicador analógico: Se trata de un dispositivo cuya salida es directamente proporcional a dos entradas $v_o(t) = K \cdot v_1(t) \cdot v_2(t)$, K suele ser menor que la unidad y su dimensión ser 1/V. Mediante este dispositivo es posible implementar directamente la ec. (2).

A la señal $v_s(t)$ se le suma una tensión continua V_p . La envolvente así obtenida es luego multiplicada por la portadora $v_p(t)$ y el factor de proporcionalidad K.

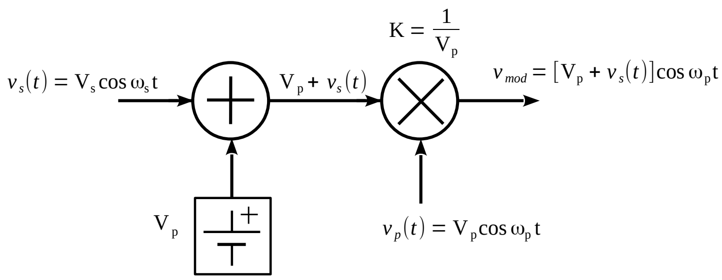

fig. 5

Modulación por conmutación (chopper modulation) Esta modulación se efectúa tomando muestras de la señal $v_s(t)$ a una frecuencia f_p dada por la portadora. El interruptor, controlado por la función $A \cdot \cos \omega_p t$, permanece abierto mientras $\cos \omega_p t \geq 0$ y se cierra mientras $\cos \omega_p t < 0$.

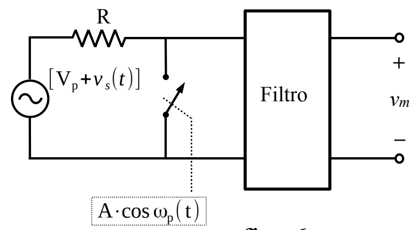

fig. 6

Esto equivale a multiplicar la señal $v_s(t)$ por una señal periódica $P(t)$, consistente en pulsos rectangulares de amplitud uniforme y período $T = 2\pi/\omega_p$.

$$P(t) = \begin{cases} 1 \ , & \cos \omega_p t \geq 0 \\ 0 \ , & \cos \omega_p t < 0 \end{cases}$$

$P(t)$ es una onda rectangular y su desarrollo en serie de Fourier contiene las armónicas impares de f_p . En consecuencia, lo que se obtiene es una superposición de la propia señal moduladora y de ondas de AM centradas en f_p , $3f_p$, $5f_p$, ... Es necesario filtrar las componentes de baja frecuencia de $v_s(t)$ y las componentes de AM centradas en $3f_p$, $5f_p$, ... Nótese que este tipo de modulación, solamente se puede usar si no hay superposición espectral entre la onda de AM deseada y las otras componentes.

$$P(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega_p t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_p t + ...$$

Modulación mediante dispositivos no lineales La modulación se efectúa sumando primero la señal y la portadora, aplicándolas a un dispositivo no lineal con característica cuadrática y pasando su salida a través de un filtro pasabanda para extraer la onda de AM. Supongamos que la función de transferencia no lineal es:

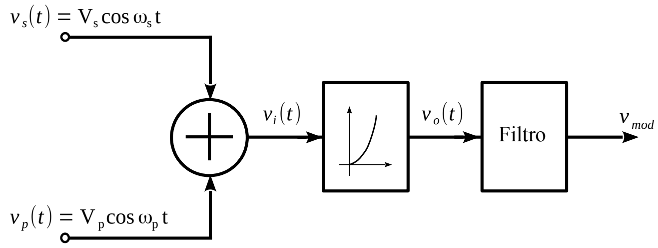

fig. 7

$$v_o(t) = a_0 + a_1 \cdot v_i(t) + a_2[v_i(t)]^2$$

Sustituyendo $v_i(t)$ en la función y desarrollándola, se obtiene:

$$v_o(t) = a_0 + a_1(v_p+v_s) + a_2(v_p+v_s)^2 = a_0 + a_1(v_p+v_s) + a_2(v_p^2+2v_p v_s+v_s^2)$$

Los términos útiles son: $a_1 v_p = a_1 V_P \cos(\omega_p t)$ y $2 \cdot a_2 v_p v_s = 2 \cdot a_2 v_s(t) \cdot V_p \cos(\omega_p t)$

La suma de ambos tiene una forma similar a la ec. (4) de la onda de amplitud modulada:

$$a_1 v_p + 2 \cdot a_2 v_p v_s = a_1 V_p \left[1 + \frac{2 \cdot a_2}{a_1} v_s(t)\right] \cos \omega_p t$$

Los demás términos corresponden a frecuencias superiores o inferiores a la onda de AM y serán filtradas por el filtro pasabanda. Tanto la característica i_d/v_d del diodo como la característica de transferencia i_C/v_{BE} del BJT son exponenciales, pero pueden ser aproximadas satisfactoriamente mediante una parábola, en tanto que la característica de transferencia del FET es cuadrática. Por ello, los tres dispositivos se pueden emplear en este método de modulación.

Modulación directa de un amplificador sintonizado

Los tres métodos de modulación anteriormente descriptos operan en bajo nivel, por lo que la onda modulada debe ser posteriormente amplificada para su transmisión. Esta en cambio es una técnica de modulación en alto nivel. La envolvente $[V_p + v_s(t)]$ es amplificada mediante un amplificador de audio de alta potencia y utilizada para variar la tensión de alimentación del amplificador sintonizado clase C de salida del transmisor.

17.3 Modulación Angular

En la modulación angular, la frecuencia instantánea de la portadora varía en función de la señal a transmitir, manteniendo constante la amplitud. Podemos escribir una onda de AC en forma generalizada como: $v_p = \mathrm{V_p}\ \mathrm{sen}\ \Phi(t) \quad (11)$

La velocidad angular instantánea ω_i es entonces por definición, la derivada del desplazamiento angular: $\omega_i = 2\pi f_i = \dfrac{d\,\Phi(t)}{d\,t} \quad (12)$

Para una onda senoidal de frecuencia constante, la aplicación de la ec. (12) da: $\Phi(t) = \omega_p \cdot t + \theta_0 \quad \Rightarrow \quad \omega_i = \omega_p$

Modulación de fase (PM)

Sí el ángulo de fase $\Phi(t)$ varía linealmente con la señal moduladora, podemos escribir: $\Phi(t) = \omega_p \cdot t + k_p \cdot s(t) + \theta_0 \quad (13)$

Por la ec. (12), la frecuencia instantánea es: $\omega_i = \omega_p + k_p \dfrac{d\,s(t)}{d\,t}$

De sustituir la ec. (13) en la ec. (11), se obtiene la portadora modulada en fase: $v_{mod} = \mathrm{V_p}\ \mathrm{sen}[\omega_p \cdot t + k_p \cdot s(t) + \theta_0] \quad (14)$

Se define el *Indice de Modulación de Fase* $\mathrm{M_P}$ como el valor máximo de $k_p \cdot s(t)$

$\mathrm{M_P}$ es el máximo número de radianes en que la fase de la portadora se modifica durante la modulación. Sí $s(t)$ es sinusoidal: $\mathrm{M_P} = \Delta\theta_{max} \quad (15)$

$$v_{mod} = \mathrm{V_p}\ \mathrm{sen}\ (\omega_p \cdot t + \mathrm{M_P}\ \mathrm{sen}\,\omega_s \cdot t + \theta_0) \quad (16)$$

Modulación de frecuencia (FM)

En este tipo de modulación, se hace variar la *frecuencia instantánea* respecto del valor medio ω_p en proporción al valor instantáneo de la señal: $\omega_i = \omega_p + k_f \cdot s(t)$

El valor máximo de $k_f \cdot s(t)$, es la desviación máxima de la frecuencia instantánea de la onda modulada respecto de la frecuencia f_p de la onda no modulada y se la llama *desviación de frecuencia ,* Δf .

En el caso de que la señal $s(t)$ sea una onda senoidal de frecuencia f_s , la frecuencia instantánea de la onda modulada será: $f_i = f_p + \Delta f \cdot \cos\omega_s \cdot t \quad (17)$

Multiplicando la ec. (17) por 2π e igualándola con la ec (12) se obtiene: $\omega_i = \dfrac{d\,\Phi}{d\,t} = \omega_p + 2\pi\Delta f \cdot \cos\omega_s \cdot t$

Integrando obtenemos: $\Phi(t) = \int (\omega_p + 2\pi\Delta f \cdot \cos\omega_s \cdot t)\ d\,t = \omega_p \cdot t + \dfrac{2\pi\Delta f}{\omega_s}\ \mathrm{sen}\,\omega_s \cdot t + \theta_0 \quad (18)$

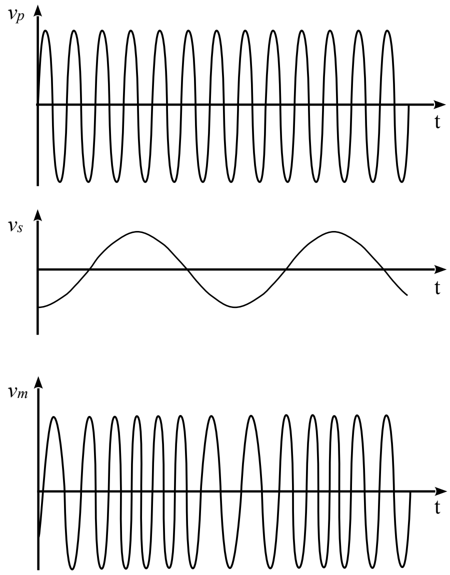

fig. 8

Sustituyendo $\Phi(t)$ en la ec. (11), ésta deviene la ecuación de la onda modulada en frecuencia por una señal senoidal de la figura (8):

$$v_{mod} = V_p \operatorname{sen}\left(\omega_p \cdot t + \frac{\Delta f}{f_s} \operatorname{sen} \omega_s \cdot t + \theta_0\right) \quad (19)$$

Se le llama *Indice de Modulación de Frecuencia* M_F a la razón

$$M_F = \frac{\Delta f}{f_s} \quad (20)$$

Aunque las ec. (16) y (19) muestran que hay una estrecha relación entre la PM y la FM, también hay características que las distinguen:

La ec. (13) muestra que en la PM, el ángulo de fase de la señal portadora varía *linealmente* con la señal moduladora y la (18) muestra que en la FM, el ángulo de fase de la señal portadora varía *linealmente con la integral* de la señal moduladora.

Sí varía la frecuencia pero es constante la amplitud de la señal moduladora, M_P *es constante en la PM y* Δf *es constante en la FM.*

La ec. (19) muestra, que en la FM la desviación de fase es inversamente proporcional a ω_s . De la ec.(16) resulta que en la PM $\omega_i = \omega_p + \omega_s M_P \cdot \cos \omega_s t$, o sea que la desviación de frecuencia es directamente proporcional a ω_s .

Análisis espectral de la onda modulada en frecuencia

Desarrollando la onda modulada en frecuencia de la ec. (19) mediante la identidad $\operatorname{sen}(\alpha + \beta) = \operatorname{sen}\alpha \cdot \cos\beta + \cos\alpha \cdot \operatorname{sen}\beta$, la misma deviene:

$$\Rightarrow \quad v_{mod} = V_p \operatorname{sen} \omega_p t \cdot \cos(M_F \operatorname{sen} \omega_s t) + V_p \cos \omega_p t \cdot \operatorname{sen}(M_F \operatorname{sen} \omega_s t) \quad (21)$$

La ec.(21) muestra la superposición de dos ondas de frecuencia ω_p, la primera multiplicada por $\cos(M_F \operatorname{sen} \omega_s t)$ y la segunda por $\operatorname{sen}(M_F \operatorname{sen} \omega_s t)$. Estos dos términos pueden ser desarrollados directamente[1] en serie de Fourier[2] y luego multiplicados por $V_p \operatorname{sen} \omega_p t$ y $V_p \cos \omega_p t$ respectivamente.

1 M. Abramowitz, Handbook of Mathematical Functions – Ecuaciones 9.1-42 y 9.1-43 , pág. 361

$$\cos(M_F \operatorname{sen}\omega_s t) = J_0(M_F) + 2[J_2(M_F)\cos 2\omega_s t + J_4(M_F)\cos 4\omega_s t + ...] \qquad (22)$$

$$\operatorname{sen}(M_F \operatorname{sen}\omega_s t) = 2[J_1(M_F)\operatorname{sen}\omega_s t + J_3(M_F)\operatorname{sen} 3\omega_s t + J_5(M_F)\operatorname{sen} 5\omega_s t + ...] \qquad (23)$$

donde las $J_n(M_F)$ son las funciones de Bessel de primera especie y orden n, definidas por las series infinitas de la ec. (24). En la fig. 9 están graficadas J_0 a J_4

$$J_n(M_F) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!(k+n)!}\left(\frac{M_F}{2}\right)^{n+2k} \qquad (24)$$

Utilizando las identidades del producto de arcos, se multiplica V_p sen $\omega_p t$ por la ec. (22) y V_p cos $\omega_p t$ por la ec. (23)

$$\operatorname{sen}\alpha \cdot \cos\beta = \frac{1}{2}[\operatorname{sen}(\alpha+\beta) + \operatorname{sen}(\alpha-\beta)]$$

$$\cos\alpha \cdot \operatorname{sen}\beta = \frac{1}{2}[\operatorname{sen}(\alpha+\beta) - \operatorname{sen}(\alpha-\beta)]$$

La onda modulada en frecuencia de la ec. (21) queda entonces:

$$\begin{aligned} v_{mod} = V_p\{ & J_0(M_F)\operatorname{sen}\omega_p t + J_1(M_F)[\operatorname{sen}(\omega_p+\omega_s)t - \operatorname{sen}(\omega_p-\omega_s)t] \\ & + J_2(M_F)[\operatorname{sen}(\omega_p+2\omega_s)t + \operatorname{sen}(\omega_p-2\omega_s)t] \\ & + J_3(M_F)[\operatorname{sen}(\omega_p+3\omega_s)t - \operatorname{sen}(\omega_p-3\omega_s)t] \\ & + J_4(M_F)[\operatorname{sen}(\omega_p+4\omega_s)t + \operatorname{sen}(\omega_p-4\omega_s)t] + ...\} \end{aligned} \qquad (25)$$

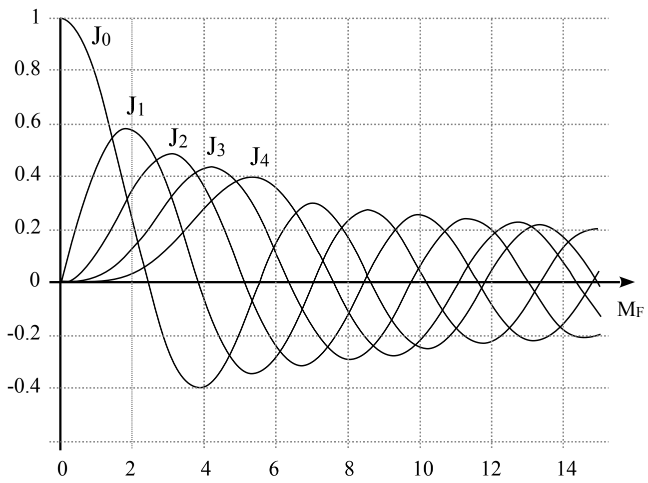

fig. 9

La ec. (25) demuestra que la onda modulada en frecuencia se compone de una frecuencia central f_p y de una cantidad infinita de frecuencias laterales a cada lado de la portadora, espaciadas con intervalos de frecuencia iguales a f_s .

Sí $M_F > 1$, la onda contiene importantes componentes laterales de orden superior, mien-

2 Como demostración alternativa, se puede desarrollar las funciones sen y cos en serie de potencias, como se expone en: W.L.Everitt, Ingeniería de Comunicaciones, Cap. 13 – Ed. Arbó 1947
El término sen contiene ω_s , sen^2 contiene las frecuencias 0 y $2\omega_s$, sen^3 contiene ω_s y $3\omega_s$, etc

$$\cos(M_F \operatorname{sen}\omega_s t) = 1 - \frac{M_F^2 \operatorname{sen}^2\omega_s t}{2!} + \frac{M_F^4 \operatorname{sen}^4\omega_s t}{4!} + ... = \frac{A_0}{2} + A_2\cos 2\omega_s t + A_4 \cos 4\omega_s t + ...$$

$$\operatorname{sen}(M_F \operatorname{sen}\omega_s t) = M_F \operatorname{sen}\omega_s t - \frac{M_F^3 \operatorname{sen}^3\omega_s t}{3!} + \frac{M_F^5 \operatorname{sen}^5\omega_s t}{5!} + ... = A_1 \operatorname{sen}\omega_s t + A_3 \operatorname{sen} 3\omega_s t + A_5 \operatorname{sen} 5\omega_s t + ...$$

tras que la portadora disminuye rápidamente y puede llegar hasta cero.

Una regla útil es que una onda modulada en frecuencia contiene componentes laterales de importancia sobre un intervalo de frecuencias centrado en f_p e igual a

$$AB_{total} = 2\left(\Delta f + f_{s\,max}\right) \qquad (26)$$

En la radiodifusión de FM, normalmente $\Delta f = \pm\ 75$ KHz y $f_{s\,max} = 15$ KHz, los receptores se diseñan en este caso con un ancho de banda de 200 KHz.

Para $M_F < 0{,}5$, los componentes de 2° orden y superiores son comparativamente pequeños y el ancho de banda necesario es $2 \cdot f_{s\,max}$.

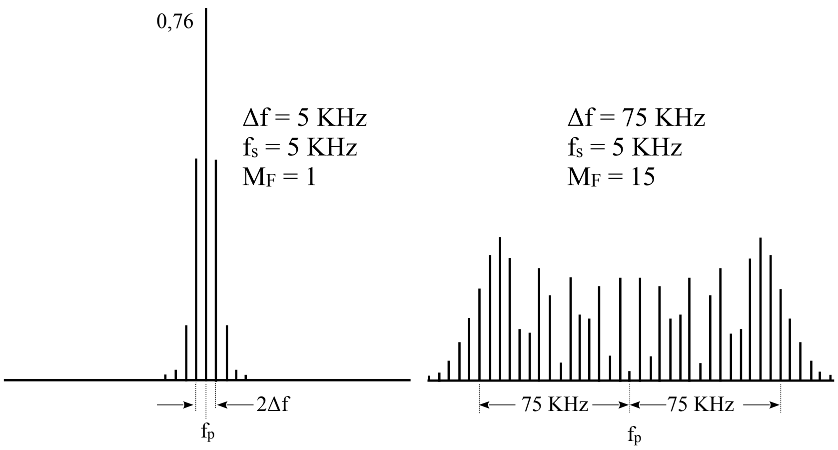

fig. 10

Sí la señal $v_s(t)$ contiene dos o más componentes de frecuencia, no es posible obtener el espectro de FM resultante por simple suma de los espectros individuales de las frecuencias componentes de la señal. Sin embargo, el espectro total quedará comprendido prácticamente dentro de los límites calculados tomando en cuenta sólo la componente de señal de mayor frecuencia.

Sí se diseña el receptor de modo que reaccione solamente ante señales de FM con un ancho de banda amplio y sea insensible ante las variaciones de amplitud de la señal, las interferencias aleatorias a la recepción debidas a las descargas eléctricas estáticas quedarán prácticamente suprimidas.

Bibliografía

Everitt y Anner, Ingeniería de Comunicaciones – Ed. Arbó 1961

John D. Ryder, Electrónica – Fundamentos y Aplicaciones

Frederick E. Terman, Ingeniería Electrónica y de Radio

Clarke y Hess, Communication Circuits: Analysis and Design