

PROBLEMAS RESUELTOS

Intermodulación

Dos amplificadores, conectados en cascada funcionan con una señal de entrada de -10 dBm a una frecuencia de 535.25 MHz y ancho de banda de 8 MHz. El nivel de ruido medido a la entrada es de -60 dBm. Los parámetros de los amplificadores son los siguientes:

	Ganancia (dB)	P. compresión 1 dB	NF (dB)	IIP3
1er. amplificador	9	+2 dBm	3	+14.5 dBm
2ª amplificador	8.5	+4.5 dBm	6.5	+17 dBm

Calcule: (a) Rango dinámico libre de espurios. (b) Rango dinámico en las condiciones de funcionamiento con las señales de entrada. (c) Nivel de señal de salida sin compresión. (d) Nivel de salida considerando la compresión. (e) Nivel de espurios en las condiciones de funcionamiento indicadas.

Solución.

Para encontrar el rango dinámico libre de espurios hay que calcular el punto de intercepción equivalente, para lo que se puede utilizar la expresión:

$$\frac{1}{IIP_3} = \left[\left(\frac{1}{IIP_1} \right)^q + \left(\frac{G_1}{IIP_2} \right)^q \right]^{1/q}$$

donde $q = \frac{m-1}{2}$ y m es el orden del producto de intermodulación, en este caso 3. Los valores de IIP_1 e IIP_2 , así como G_1 deben expresarse en unidades básicas, no en logarítmicas (dB). Así:

$$\begin{aligned} IIP_1 &= 14.5 \text{ dBm (28.18 mw)} \\ IIP_2 &= 17 \text{ dBm (50.11 mw)} \\ G_1 &= 9 \text{ dB (7.94)} \end{aligned}$$

Substituyendo los valores en la ecuación anterior y efectuando el cálculo se tiene que:

$$(IIP_3)_{\text{equivalente}} = 5.16 \text{ mw} \rightarrow 7.123 \text{ dBm}$$

Conocido el punto de intercepción de tercer orden, se puede calcular ahora el punto de cruce de la recta de tercer orden con el eje vertical, es decir, el factor K_3 . Para ello se tienen las ecuaciones de las rectas correspondientes a la fundamental y al producto de tercer orden:

$$P_{01} = P_i + G_{TOTAL}$$

$$P_{03} = 3P_i + K_3$$

donde G_{TOTAL} es la ganancia del conjunto de los dos amplificadores en cascada, es decir:

$$G_{TOTAL} = G_1 + G_2 = 9 + 8.5 = 17.5 \text{ dB}$$

En el punto de intercepción $P_{01} = P_{03}$, con lo que de las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$K_3 = G_{TOTAL} - 2P_i$$

en que, substituyendo $P_i = 7.123$, el nivel de potencia del punto de intercepción equivalente, y $G_{TOTAL} = 17.5$, se tiene que:

$$K_3 = 3.25$$

Se calcula ahora el factor de ruido equivalente mediante la fórmula:

$$F_{eq} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} = 2 + \frac{4.467 - 1}{7.94} = 2.436$$

y la figura de ruido equivalente:

$$NF_{eq} = 10 \log (F_{eq}) = 3.87 \text{ dB}$$

Se puede ahora calcular el nivel de ruido de umbral, es decir, la señal mínima detectable (SMD):

$$\begin{aligned} N_u &= -174 + NF_{eq} + 10\log(B) \\ &= -174 + 3.87 + 10\log(8 \times 10^6) \\ &= -101.1 \text{ dBm} \end{aligned}$$

y el fondo o piso de ruido:

$$N_{floor} = N_u + G_{TOTAL}$$

con lo que

$$N_{floor} = -101.1 + 17.5 = -83.6 \text{ dBm}$$

El significado de los valores anteriores se aprecia mejor en la figura 1.

Rango dinámico libre de espurios (SFDR). Para hallar el rango dinámico libre de espurios es necesario determinar el punto en que la recta del tercer producto corta el fondo de ruido. Para ello se parte de la ecuación de dicha recta:

$$P_{03} = 3P_i + K_3 = -83.6$$

y, despejando P_i se tiene el valor de la potencia de entrada a la que empiezan a aparecer espurios a la salida:

$$P_i = -28.95 \text{ dBm}$$

con lo que el rango dinámico libre de espurios es:

$$\underline{SFDR = -28.95 - (-101.1) = 72.15 \text{ dBm}}$$

A continuación, es necesario determinar el rango dinámico en las condiciones de funcionamiento de acuerdo a los niveles de la señal y ruido a la entrada.

Una forma de calcularlo es calculando el fondo de ruido en las condiciones de funcionamiento, dado en dB por:

$$N_0 = N_i + G + NF$$

$$N_0 = -60 + 17.5 + 3.87 = -38.63 \text{ dBm}$$

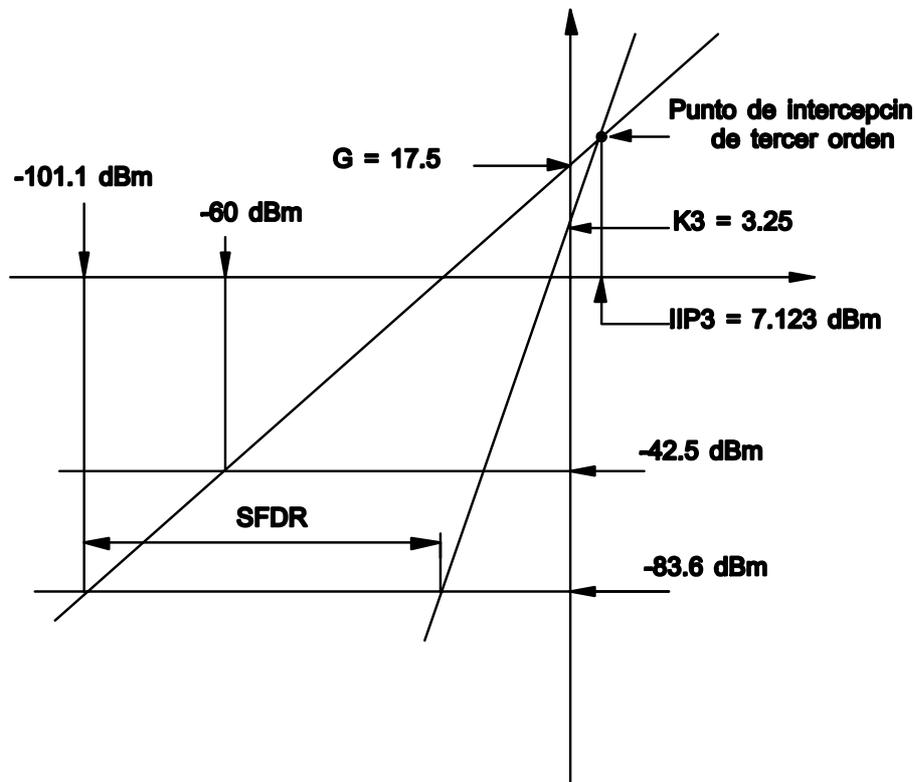


Fig. 1

Aún cuando no se pide en el problema, es interesante calcular la relación señal a ruido a la salida:

El nivel de potencia de la señal de salida es:

$$S_o = G_{TOTAL} + S_i = 17.5 + (-10) = 7.5 \text{ dBm}$$

y la relación señal a ruido a la salida:

$$SNR_o = 7.5 - (-38.63) = 46.13 \text{ dB}$$

en tanto que la relación señal a ruido en la entrada es:

$$SNR_i = -10 - (-60) = 50 \text{ dB}$$

Otra forma de calcular esto es por la propia definición de la relación señal a ruido que, en dB, se expresa como:

$$NF = SNR_i - SNR_o$$

con lo que:

$$SNR_0 = SNR_i - NF = 50 - 3.87 = 46.13 \text{ dB}$$

Volviendo a lo solicitado en el problema, para calcular el rango dinámico libre de espurios en las condiciones indicadas para la señal y ruido de entrada, hay que conocer el punto de cruce de la recta de tercer orden con el fondo de ruido debido al ruido de entrada de -60 dBm y, procediendo como antes, a partir de la ecuación de la recta de tercer orden, se obtiene el nuevo valor del nivel de entrada como:

$$P_i = -13.96 \text{ dBm}$$

con lo que el rango dinámico libre de espurios es:

$$\underline{SFDR' = -13.96 - (-60) = 46.04 \text{ dB}}$$

Nivel de la señal de salida sin compresión.

Es, simplemente:

$$\underline{S_0 = S_i + G_{TOTAL} = -10 + 17.5 = 7.5 \text{ dBm}}$$

Se puede fácilmente resolver la cuestión (e) del problema, es decir, calcular el nivel de espurios en las condiciones de funcionamiento. Para ello es necesario calcular la potencia de entrada correspondiente al punto de cruce de la recta de tercer orden con el fondo de ruido y, nuevamente de la ecuación de dicha recta:

$$P_{03} = 3P_i + K_3$$

con $P_i = -38.63$ y $K_3 = 3.25$:

$$P_i = -13.96 \text{ dBm}$$

con lo que, para una entrada de -10 dBm, el nivel de espurios de tercer orden es:

$$\underline{P_{03} = 3 \times (-10) + 3.25 = -26.75 \text{ dBm}}$$

Nivel de salida considerando la compresión. Si se analiza cada amplificador por separado, se observa que las señales manejadas están por debajo del nivel de compresión de los respectivos amplificadores, con lo que estos niveles son los mismos que se calcularon ignorando el efecto de la compresión.

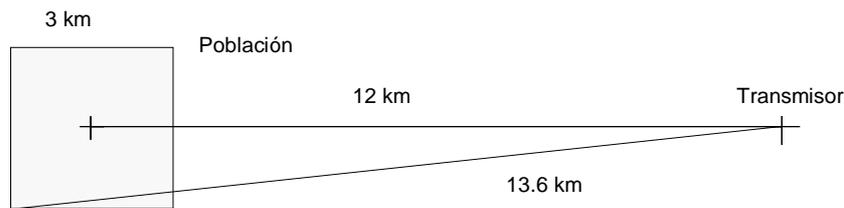
Diseño de un sistema radioeléctrico de comunicaciones

Se desea instalar una emisora de FM que debe operar en la frecuencia de 103.8 MHz para dar servicio a una población de 50 000 habitantes cuya extensión aproximada es de $3 \times 3 \text{ km}$ (9 km^2) y no hay otras poblaciones cercanas a las que interese dar servicio. La ubicación de la emisora será en una colina de 100 m de altura sobre el área de servicio, localizada a 12 km del centro de la población y se pretende instalar la antena, de polarización circular, sobre una torre arriostrada, de sección triangular, 30 m de altura y a 10 m de la caseta de transmisión. La intensidad de campo deseada en la población a servir es de $66 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ y la atenuación en la trayectoria de propagación sigue una ley del tipo proporcional a $d^{-2.2}$ donde d es la distancia en metros entre la antena transmisora y el punto de recepción. Diseñe el sistema transmisor indicando

todos los componentes necesarios así como la marca y modelo en la medida posible: línea, sistema de antenas, divisores, conectores, etc. utilizando la información de catálogo que se le ha proporcionado en el curso. Las potencias de los transmisores disponibles que se pueden utilizar son: 10 w, 50 w, 500 w y 1 kw. De acuerdo a su diseño, calcule luego la verdadera potencia radiada y la intensidad de campo recibida en el borde de la zona de cobertura.

Solución.

Supóngase la geometría del sistema mostrada en la figura.



El primer paso es determinar la potencia radiada necesaria para tener una intensidad de campo de 66 dB μ V/m en el borde del área de cobertura, que en la figura anterior se estima en 13.6 km. Para ello, se calculará primero la potencia recibida sobre una antena isotrópica y la atenuación en la trayectoria de propagación que, en este caso, no se puede considerar como espacio libre, ya que se indica que la atenuación depende inversamente de la distancia elevada a una potencia de 2.2.

Potencia isotrópica recibida.

Partiendo de la intensidad de campo en V/m, se calcula la densidad de flujo de potencia, S y luego la potencia isotrópica multiplicando la densidad de flujo de potencia por el área efectiva de la antena isotrópica:

$$E = 66 \text{ dB}\mu\text{V/m} \rightarrow 2 \times 10^{-3} \text{ V/m}$$

$$S = \frac{E^2}{Z_0} = \frac{(2 \times 10^{-3})^2}{120\pi} = 1.06 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2$$

donde $Z_0 = 120\pi \Omega$ es la impedancia característica del aire o del espacio libre. La potencia isotrópica recibida está dada por:

$$P_{iso} = SA_{iso}$$

donde A_{iso} es el área efectiva de la antena isotrópica, dada por:

$$A_{iso} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \text{ m}^2$$

y, para este caso, $\lambda = 2.89 \text{ m}$, con lo que:

$$P_{iso} = 7.05 \times 10^{-9} \text{ w} \rightarrow -81.52 \text{ dBw}$$

Atenuación en la trayectoria de propagación.

Como la atenuación no sigue la ley de espacio libre, sino que obedece una ley del tipo $d^{-2.2}$, la atenuación puede calcularse como:

$$L = 10 n \log(d) + L_0$$

donde d es la distancia en metros entre transmisor y receptor y L_0 está dada por:

$$L_0 = 20 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)$$

λ es la longitud de onda que, para la frecuencia de 103.8 MHz es de 2.89 m, con lo que

$$L_0 = 12.766 \text{ dB}$$

y

$$L = 10 \times 2.2 \times \log(13600) = 103.7 \text{ dB}$$

en que la distancia (13.6 km) corresponde al punto más alejado del borde del área de servicio.

Potencia radiada necesaria.

La potencia isotrópica recibida está dada por:

$$P_{iso} = P_{rad} - L$$

con lo que la potencia radiada resulta:

$$P_{rad} = P_{iso} + L = -81.52 + 103.7 = 22.18 \text{ dBw} \rightarrow 165.3 \text{ w}$$

Ahora bien, la potencia radiada está dada por:

$$P_{rad} = P_{TX} - L_L - L_{AC} + G_{TX}$$

donde P_{TX} es la potencia de salida del transmisor, L_L la atenuación en la línea de transmisor que conecta al transmisor con la antena, L_{AC} las pérdidas por acoplamiento, incluyendo conectores, pérdidas por ROE, pérdidas en divisores si los hay, etc. y G_{TX} es la ganancia de la antena transmisora.

De lo anterior sólo se conocen las posibles potencias que puede tener el transmisor (10, 50, 500 o 1000 w) y las demás deben calcularse de acuerdo a la línea y antena que se elijan. Para ello, una forma de proceder es ignorar de momento las pérdidas en la línea y las de acoplamiento y buscar un tipo de antena adecuado. Se proponen aquí dos alternativas: utilizar un transmisor de 10 w o uno de 50 w.

Si se utiliza un transmisor de 10 w (10 dBw), la ganancia necesaria de la antena debe ser:

$$G_{TX} = P_{rad} - P_{TX} = 22.18 - 10 = 12.18 \text{ dB.}$$

y, si se utiliza uno de 50 w (17 dBw):

$$G_{TX} = P_{rad} - P_{TX} = 22.18 - 17 = 5.18 \text{ dB.}$$

Supóngase primero esta segunda alternativa (50 w). Se trata de buscar una antena de polarización circular, cuya ganancia sea algo mayor que 5.18 dB para compensar las pérdidas en la línea (aún no definida) y las de acoplamiento, aún no conocidas. En el catálogo de antenas RYMSA¹ se localizan dos posibles antenas: AT12-303 y AT12-592, cuyas características se anexan. La primera tiene una ganancia, respecto al dipolo de $\lambda/2$, de 4.35 dB y la segunda, de 5.2 dB. Las respectivas ganancias respecto al isotrópico, ya que es la antena patrón utilizada en los cálculos de este ejercicio, se obtienen sumando 2.15 dB a las ganancias anteriores. Así, para la AT12-303, la ganancia respecto al isotrópico es de 6.5 dB y, para la AT12-592, de 7.35 dB. Cada una de estas antenas puede soportar una potencia de 2.5 kw, por lo que este parámetro no constituye una preocupación aquí.

Es necesario ahora hacer las consideraciones pertinentes sobre el patrón de radiación necesario. En este caso el problema es muy simple ya que se trata de dar servicio sólo a una población y la antena transmisora se encuentra alejada de ésta, de modo que el patrón de radiación sólo requiere un lóbulo con un ancho de haz suficiente como para abarcar todo el ángulo subtendido por la población según se ve desde el transmisor. No es, por tanto necesario recurrir a un arreglo de antenas alrededor de la torre para conformar un patrón de radiación diferente y basta con montar la o las antenas sobre una sola cara en dirección a la población. En el caso del transmisor de 50 w, tampoco parece necesario recurrir a un apilamiento vertical, ya que alguna de las dos antenas mencionadas en el párrafo anterior tiene ganancia que parece ser suficiente. Para determinar esto, ahora es necesario definir una línea de transmisión adecuada.

La potencia promedio que debe manejar la línea es, como máximo 50 w, de modo que prácticamente cualquier línea puede servir para este propósito. La longitud de la línea debe ser igual, aproximadamente, a la altura de la torre más la distancia entre la torre y la caseta. De acuerdo a los datos del problema, la longitud se estima, por consecuencia, en 40 m.

De los datos del catálogo ANDREW² se eligió en este caso la línea LDF2-50³ de 3/8" de diámetro e impedancia característica de 50 Ω , para utilizar con conectores "N". La potencia promedio que puede soportar esta línea, a 108 MHz, es de 2.15 kw y su atenuación, a esa frecuencia, es de 3.59 dB/100 m. Desde el punto de vista de potencia, la línea está ampliamente sobrada y la atenuación en 40 m es:

$$L_L = 3.59 \times 40/100 = 1.44 \text{ dB.}$$

Como no hay divisores ni otros elementos de acoplamiento en este caso, las únicas pérdidas serán las debidas la ROE y conectores. La ROE de la antena, según el catálogo del fabricante, es de 1.2 para cualquiera de las dos antenas, lo que se traduce en una pérdida de 0.03 dB. En los conectores entre el transmisor y la línea y entre la línea y la antena, la pérdida puede ser de ese orden. Estas pérdidas son, realmente, muy poco significativas. Sin embargo, en la práctica suele estimarse una pérdida del orden de 1 dB adicional, como protección por posibles desacoplamientos causados por problemas no detectados durante la instalación o ligeros desajustes del transmisor. En estas condiciones la pérdida total entre el transmisor y la antena resulta de 2.44 dB, con lo que la potencia "verdadera" entregada a la antena será:

$$P_{\text{antena}} = 17 - 2.44 = 14.56 \text{ dBw}$$

y la potencia radiada, usando la antena AT12-303:

$$P_{\text{rad}} = 14.56 + 6.5 = 21.06 \text{ dBw}$$

¹ Broadcast Radio and TV Antennas. Radiación y Microondas, S.A. Ctra. Campo Real, Km 2,100. 28500, Arganda del Rey, Madrid.

² Catalog 37, Andrew Corporation. 10500 West 153rd Street. Orland Park, IL U.S.A. 60462.

³ Usted puede haber elegido alguna otra igualmente adecuada.

y, con la antena AT12-592:

$$P_{rad} = 14.56 + 7.35 = 21.91 \text{ dBw}$$

La diferencia con la potencia radiada teórica deseable, es de 1.12 dB con la primera antena y 0.27 dB con la segunda. El resultado es enteramente aceptable en ambos casos y la decisión sobre cual de las dos antenas se debe utilizar dependerá de otros factores, como costo, carga de viento, peso, resistencia a corrosión, tipo de soporte, etc.

Transmisor de 10 w.

Otra alternativa posible al problema propuesto es la utilización de un transmisor de 10 w (10 dBw), en cuyo caso la ganancia de la antena debe ser, por lo menos de:

$$G_{TX} = P_{rad} - P_{TX} + L_L + L_{AC} = 22.18 - 10 + 1.44 + 1 = 14.62 \text{ dB}$$

Para conseguir esta ganancia es necesario un apilamiento de antenas, cuya ganancia está dada por:

$$G_{TX} = G_0 + 10\log(n)$$

donde n es el número de antenas apiladas verticalmente sobre una cara de la torre y G_0 la ganancia de un elemento, es decir, alguno de los tipos de antena anteriores. Supóngase que se opta por la antena AT12-592 ($G_0 = 7.35$ dB). Despejando n de la ecuación anterior:

$$n = \log_{10}^{-1} \left(\frac{14.62 - 7.35}{10} \right) = 5.33$$

En número de elementos por cara sólo puede ser entero, de modo que es necesario evaluar la ganancia con 5 y con 6 elementos. En el primero caso, la ganancia resulta de 14.34 dB y de 15.13 dB con 6 elementos. Si se asumen, tentativamente, las mismas pérdidas que en el caso del transmisor de 50 w, las potencias radiadas se pueden calcular como:

$$P_{rad} = P_{TX} - L_L - L_{AC} + G_{TX}$$

así, con 5 elementos:

$$P_{rad} = 10 - 1.44 - 1 + 14.34 = 21.9 \text{ dB}$$

y, con 6 elementos:

$$P_{rad} = 10 - 1.44 - 1 + 15.13 = 22.69 \text{ dB}$$

La diferencia, como se ve, es poco significativa y el empleo de 5 elementos resulta satisfactorio y muy semejante al obtenido con el transmisor de 50 w.

Nuevamente aquí son necesarias consideraciones de tipo práctico sobre la alternativa a elegir, es decir, la de usar un transmisor de 50 w o uno de 10 w, aunque los resultados en lo que respecta a la cobertura con el nivel de señal especificado sean prácticamente iguales.

Si se usa un transmisor de 10, el sistema de antenas es más complejo y, desde el punto de vista de costo, cinco veces más caro, al requerir seis antenas del mismo tipo para obtener la ganancia necesaria que proporcione la misma potencia radiada que el sistema con el transmisor de 50 w y una sola antena. En tanto que éste último no requiere de divisores de potencia, el empleo del

transmisor de 10 w requiere de éstos y la solución de cinco antenas, aunque numéricamente aceptable no es buena desde el punto de vista práctico, ya que es difícil conseguir una división de potencia entre cinco y en general, a enteros impares, ello sin contar con que las pérdidas por acoplamiento también se verán aumentadas. Otra consecuencia muy importante es que el peso que debe soportar la torre y, sobre todo la carga de viento, es considerablemente mayor con cinco antenas que con una, lo que obliga a construir una torre más robusta, lo que seguramente aumenta el costo de manera importante.

Intensidad de campo de acuerdo a los parámetros calculados.

La última parte del problema requiere calcular la intensidad de campo en términos de la "verdadera" potencia radiada. Para ello se procede ahora a la inversa, calculando primero la potencia isotrópica recibida a 13.5 km del transmisor.

$$P'_{iso} = P'_{rad} - L = 21.06 - 103.7 = -82.64 \text{ dBw} \rightarrow 5.45 \times 10^{-9} \text{ w}$$

donde se ha utilizado el menor valor de potencia radiada de los calculados, simulando las peores condiciones.

La densidad de flujo de potencia correspondiente a esa potencia isotrópica será:

$$S = \frac{P'_{iso}}{A_{iso}} = \frac{5.45 \times 10^{-9}}{0.6646} = 8.2 \times 10^{-9} \text{ w/m}^2$$

con lo que la intensidad de campo resulta:

$$E = \sqrt{SZ_0} = 1.76 \times 10^{-3} \text{ V/m} \rightarrow 64.9 \text{ dB}\mu/\text{m}$$

La diferencia es de 1.1 dB respecto a la intensidad de campo teórica deseable.

Es importante notar que el resultado anterior se puede obtener de forma mucho más simple si se observa que la potencia radiada disminuyó, en el cálculo anterior 1.12 dB respecto a la teórica, es decir, la misma magnitud que disminuyó la intensidad de campo. Esta regla es válida siempre que se emplean unidades logarítmicas (dB).

Comunicaciones por satélite

Determine el diámetro mínimo necesario de una antena con reflector parabólico de foco primario que opera en la banda K_u , para recibir las emisiones de un satélite localizado en la posición 19.2°E (Astra), si las coordenadas de la estación terrestre son 43.2°N y 3.8°W y si la relación C/N mínima deseada a la entrada del receptor es de 12 dB. La temperatura de ruido de la antena es de 8 K y la temperatura equivalente de ruido del LNB es de 100 K. Se sabe que el transpondedor a bordo del satélite transmite una señal de televisión modulada en FM, con un ancho de banda de 36 MHz con una potencia de salida de 10 w y la ganancia de la antena del satélite es de 36.2 dB. La atenuación máxima esperada por gases atmosféricos y lluvia es de 11 dB en las peores condiciones. Se asume que no se aplican las recomendaciones que limitan la potencia radiada en el enlace descendente, que el factor de mejora por preénfasis es de 4.5 dB, que no hay pérdidas en guías de onda ni otros elementos de acoplamiento y que la eficiencia de la antena terrestre es del orden de 65%.

Solución.

En este ejercicio se usará la frecuencia de 11 GHz ($\lambda = 0.0273$ m) como representativa de esa banda, para todos los cálculos.

El primer paso es calcular la atenuación en la trayectoria de propagación, para lo cual es necesario conocer la distancia al satélite, que puede determinarse mediante la fórmula:

$$d \approx 35786 \sqrt{1 + 0.41999(1 - \cos \beta)} \quad km$$

$$\beta = \cos^{-1}(\cos \phi_r \cos L)$$

donde ϕ_r es la latitud de la estación terrestre y L, la diferencia de longitudes entre la posición del satélite y la longitud de la estación terrestre. Para el problema:

$$\phi_r = 43.2^\circ$$

$$L = 19.2 + 3.8 = 23^\circ$$

con lo que

$$\beta = 47.86^\circ$$

y

$$d \approx 38179 \quad km$$

Atenuación en el espacio libre:

$$L_{EL} = 32.45 + 20\log(d_{km}) + 20\log(f_{MHz}) = 204.91 \quad dB.$$

Atenuación total:

$$L_{TOTAL} = L_{EL} + L_{lluvia} = 204.91 + 11 = 215.914 \quad dB$$

Potencia isotrópica equivalente radiada por el satélite:

$$P_{SAT} = 10 + 36.2 = 46.2 \quad dBw$$

Potencia isotrópica recibida en tierra.

$$P_{iso} = P_{SAT} - L = 46.2 - 215.914 = -169.714 \quad dBw$$

Se calcula ahora la señal mínima detectable (umbral). Para ello es necesario hallar la temperatura de ruido del sistema:

$$T_{SIST} = T_{ANT} + T_{RECEPTOR} = 8 + 100 = 108 \quad K.$$

El factor de ruido es:

$$F = 1 + 108/290 = 1.3724$$

y la figura de ruido:

$$NF = 10\log(F) = 1.375 \quad dB$$

La señal mínima detectable es, por consecuencia:

$$SMD = -204 + 1.375 + 10\log(36 \times 10^6) = -127.05 \text{ dBw}$$

La potencia isotrópica recibida más la ganancia de la antena receptora, debe ser igual a la señal mínima detectable, más la relación portadora ruido, menos los factores de mejora por FM y preénfasis, es decir:

$$P_{iso} + G_R = SMD + C/N - FM - PE$$

donde FM es el factor de mejora de FM (10 dB) y PE el factor de mejora por preénfasis (4.5 dB). Despejando G_R de la ecuación anterior y substituyendo los valores numéricos se tiene que:

$$G_R = 40.164 \text{ dB (10384)}$$

El diámetro de la antena se obtiene de la fórmula de la ganancia para una antena con reflector parabólico:

$$D = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{G}{\eta}} = \frac{0.0273}{\pi} \sqrt{\frac{10384}{0.65}} = 1.098 \text{ m}$$

Modulación de frecuencia

Un sistema de FM de banda estrecha transmite una señal senoidal de frecuencia f_m que produce una desviación de frecuencia de la portadora de $0.1f_m$. Estime el ancho de banda necesario y las amplitudes relativas de la portadora y de las bandas laterales significativas.

Solución

En este caso el índice de modulación es:

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{0.1f_m}{f_m} = 0.1$$

Las amplitudes relativas de las bandas laterales están dadas por las funciones de Bessel $J_n(\beta)$. Los valores de estas funciones pueden obtenerse de tablas o mediante el programa MATLAB®. Usando este programa se obtiene, para las dos primeras bandas laterales:

$$\begin{aligned} J_0(0.1) &= 0.9975 \\ J_1(0.1) &= 0.0499 \\ J_2(0.1) &= 0.0012 \end{aligned}$$

La potencia total es:

$$P_{FM} = J_0^2(0.1) + 2[J_1^2(0.1) + J_2^2(0.1)] \cong J_0^2(0.1) + 2J_1^2(0.1) = 1.0$$

Ya que la contribución de J_2 no es significativa.

El ancho de banda, por consecuencia, es de $2f_m$. Se trata, por tanto, de un sistema de FM de banda estrecha.

Telefonía multicanal

Calcular el ancho de banda requerido para la transmisión de 24 señales telefónicas. Cada señal está limitada en banda entre 300 y 3400 Hz, con bandas de guarda efectivas de 0.9 KHz entre canales adyacentes. Se utiliza modulación en banda lateral única y multiplexado por división de frecuencia.

Solución

Cada canal o ocupa un ancho de banda de:

$$(3.4 - 0.3) + 0.9 = 4 \text{ kHz.}$$

El ancho de banda total necesario es, por tanto:

$$24 \times 4 = 96 \text{ kHz}$$

Modulación e interferencia

Una señal de forma $A\cos(\omega_c t)$ sufre interferencia aditiva con una señal $N\cos(\omega_c + \omega_N)t$. Determinar la amplitud resultante y la desviación de frecuencia de las señales combinadas, suponiendo que $A \gg N$. Calcular, además, la potencia de salida normalizada cuando la señal deseada y la de interferencia, combinadas, se procesan mediante:

- Un receptor de AM, con detector de envolvente y sensibilidad tal que, cuando recibe una señal modulada con una profundidad de modulación de $m=1$, la salida del detector es de $1 \text{ V}_{\text{pico}}$.
- Un receptor de FM tal que, cuando la desviación de frecuencia de la señal de entrada es f_D , su demodulador entrega una salida de 1 V .
- De lo anterior, demuestre que para la señal interferente en este caso, el receptor de FM es superior al de AM si $f_D/f_m > 1$, donde f_m es la frecuencia máxima de la señal en banda base que pasa por las etapas posteriores a la detección.

Solución

Primero es necesario determinar las características de la señal combinada, es decir de la suma de las señales deseada e indeseada (interferente). Esta señal combinada puede expresarse como:

$$\begin{aligned} v(t) &= A\cos\omega_c t + N\cos(\omega_c + \omega_N)t \\ &= A\cos\omega_c t + N\cos\omega_c t \cos\omega_N t - N\sin\omega_c t \sin\omega_N t \\ &= (A + N\cos\omega_N t)\cos\omega_c t - N\sin\omega_c t \sin\omega_N t \\ &= V\cos(\omega_c t + \phi) \end{aligned}$$

Donde:

$$V = \sqrt{(A + N \cos \omega_N t)^2 + N^2 \sin^2 \omega_N t}$$

$$= \sqrt{A^2 + 2AN \cos \omega_N t + N^2}$$

y

$$\phi = \text{tg}^{-1} \left[\frac{N \sin \omega_N t}{A + N \cos \omega_N t} \right]$$

Si $A \gg N$,

$$V \cong A \left(1 + \frac{N}{A} \cos \omega_N t \right)$$

$$\phi \cong \text{tg}^{-1} \left(\frac{N}{A} \sin \omega_N t \right) \cong \frac{N}{A} \sin \omega_N t$$

La desviación instantánea de frecuencia de esta señal combinadas es:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} = \frac{N \omega_N}{2\pi A} \cos \omega_N t = \frac{N f_N}{A} \cos \omega_N t$$

Y, la desviación de frecuencia es:

$$\frac{N f_N}{A}$$

Con esta información, ahora es posible resolver las preguntas que se plantean.

a). Receptor de AM. En este caso, el demodulador de envolvente es insensible a las variaciones de fase y su voltaje de salida es igual a la variación de la envolvente de la señal modulada, es decir, a

$$\frac{N}{A} \cos \omega_N t$$

El valor pico de del voltaje es, por tanto $V_a = N/A$ y la potencia efectiva:

$$P_{AM} = \frac{1}{2} \left(\frac{N}{A} \right)^2 = \frac{N^2}{2A^2}$$

b) Receptor de FM

El detector de FM ignora las variaciones de amplitud y es sensible únicamente a la desviación de frecuencia. Su voltaje de salida es proporcional a dicha desviación, es decir, Nf_N/A . Ahora bien, como una desviación dada, de magnitud f_D produce 1 V de salida en el demodulador, la amplitud del voltaje será:

$$V_{FM} = \frac{N f_N}{A f_D}$$

Y la potencia efectiva en FM,

$$P_{FM} = \frac{N^2 f_N^2}{2A^2 f_D^2}$$

- d) **Condición para que el receptor de FM sea mejor que el de AM.** Para esto, en toda la banda de 0 a, digamos, f_{max} debe cumplirse que:

$$\frac{N^2 f_{max}^2}{2A^2 f_D^2} < \frac{N^2}{2A^2}$$
$$\frac{f_{max}^2}{f_D^2} < 1 \quad \text{o bien,} \quad \frac{f_D}{f_{max}} > 1$$

Modulación de frecuencia

Una portadora de 15 w se modula en frecuencia con una señal senoidal, tal que la desviación pico es de 6 kHz. La frecuencia de la señal moduladora es 1 kHz. Calcular la potencia de salida sumando las potencias de todas las bandas laterales. (*Roddy & Coolen, pag. 331*)

Solución.

La potencia de salida con modulación, en FM, es la misma que sin modulación. Esto puede comprobarse como sigue:

El índice de modulación es $\beta = \Delta f/f_m = 6/1 = 6$. En la tabla de funciones de Bessel, por ejemplo del texto de Roddy & Coolen, las funciones de Bessel significativas para $\beta = 6$ son de J_0 a J_{10} . La potencia total se puede calcular sumando las potencias de cada banda lateral;

$$P_T = P_c \left[\sum_{n=0}^{10} J_n^2(\beta) \right]$$

$$P_T = 15[0.15^2 + 2(0.28^2 + 0.24^2 + 0.11^2 + 0.36^2 + 0.25^2 + 0.13^2 + 0.06^2 + 0.02^2 + 0.01^2)] = 15(1.00) = 15 \text{ w.}$$

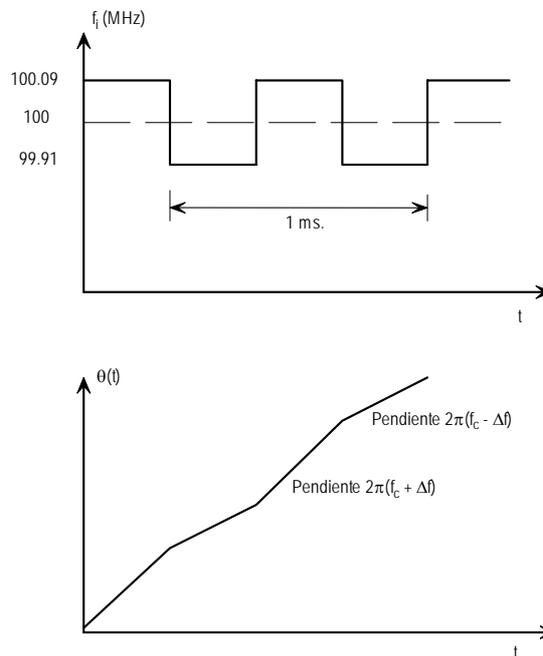
Modulación en frecuencia

Hacer una gráfica de $\theta(t)$ para una portadora de 1 MHz, modulada en frecuencia por una onda cuadrada de 1 KHz y voltaje de ± 20 V, es decir, sin componente de c.c. La constante de desviación de frecuencia es de 9 KHz/V.

Solución.

La desviación pico a pico de frecuencia es de $20 \times 9 = 180$ kHz y es simétrica respecto a la frecuencia central de 100 MHz, al no tener componente de c.c. De acuerdo a esto, $\Delta f = \pm 90$ kHz respecto a la frecuencia central (portadora). Durante los ciclos positivos, el término integral da $+\Delta f t$

y, durante los negativos, $-\Delta f$. El ángulo, por consecuencia es $\theta(t) = 2\pi(f_c \pm \Delta f)t$. La gráfica es la siguiente:



Modulación en frecuencia

Calcular el ancho de banda necesario para un sistema de radiodifusión de FM en que la máxima desviación permitida es ± 75 KHz y la máxima frecuencia de la señal moduladora no puede exceder los 15 kHz.

Solución

Aplicando la regla de Carson:

$$BW_{\max} = 2(\Delta f + f_m) = 2(75 + 15) = 180 \text{ kHz.}$$

Mediante la regla dada por Shajguldian⁴:

Indice de modulación:

$$\beta = \Delta f / f_m = 75 / 15 = 5$$

y, el ancho de banda:

$$BW_{\max} = 2(\beta + \sqrt{\beta + 1})f_m = 2(5 + \sqrt{5 + 1})f_m = 247 \text{ kHz.}$$

⁴ V.V. Shajguldian. *Transmisores de Radio*. Ed. Mir, Moscú, 1983.

Antenas

Calcular la atenuación entre dos antenas isotrópicas en el espacio libre.

Solución.

La potencia recibida por una antena isotrópica está dada por:

$$P_{iso} = S A_{iso} = \frac{P_{rad}}{4\pi d^2} \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

donde S es la densidad de flujo de potencia, igual a $P_{rad}/(4\pi d^2)$ y A_{iso} es el área efectiva de la antena isotrópica, igual a $\lambda^2/(4\pi)$. Asimismo P_{rad} es la potencia isotrópica equivalente radiada (PIRE), o simplemente potencia radiada. La distancia de separación es una longitud de onda, es decir, $d = \lambda$, y la atenuación:

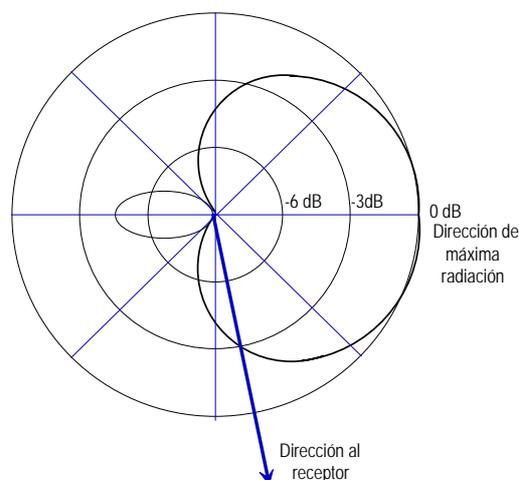
$$\alpha = \frac{P_{iso}}{P_{rad}} = \frac{1}{\lambda^2} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 = \frac{1}{(4\pi)^2} = 6.33 \times 10^{-3}$$

y, expresando la atenuación en dB como una magnitud positiva e igual a:

$$L = -10 \log_{10}(\alpha) = 21.98 \approx 22 \text{ dB}$$

Antenas

Una antena, cuyo diagrama de radiación se muestra en la figura, tiene una ganancia de 10 dB en la dirección de máxima radiación. La antena se alimenta con una potencia de 10 w a una frecuencia de 100 MHz. Calcular el voltaje en los terminales de un dipolo de media longitud de onda, terminado en su impedancia característica y localizado a 10 Km del transmisor, en condiciones de espacio libre.



Solución.

Calculemos primero la ganancia en la dirección del receptor.

$$G = G_{max} - 3 \text{ dB} = 10 - 3 = 7 \text{ dB}$$

La potencia radiada en la dirección del receptor es:

$$P_{rad} = 10 \text{ dBw} + G = 10 + 7 = 17 \text{ dBw}$$

La atenuación en el espacio libre a 10 Km de separación entre transmisor y receptor es:

$$\begin{aligned} L &= 32.45 + 20 \log(d_{km}) + 20 \log(f_{MHz}) \\ &= 32.45 + 20 \log(10) + 20 \log(100) \\ &= 92.45 \text{ dB} \end{aligned}$$

La potencia isotrópica recibida puede calcularse mediante:

$$P_{iso} = P_{rad} - L = 17 - 92.45 = - 72.45 \text{ dBw}$$

La potencia recibida en un dipolo de $\lambda/2$ será:

$$P_{\lambda/2} = P_{iso} + G_{\lambda/2} = - 72.45 \text{ dBw} + 2.15 \text{ dB} = - 73.3 \text{ dBw} \quad (4.68 \times 10^{-8} \text{ w}).$$

La parte real de la impedancia del dipolo de $\lambda/2$ es de 72Ω , con lo que el voltaje será:

$$V_{\lambda/2} = \sqrt{P_{\lambda/2} \times 72} = 1.84 \times 10^{-3} \text{ V} = 1.84 \text{ mV}$$

Antenas

Un vehículo espacial, con un transmisor de 10 w a 5 GHz y una antena de 30 dBi de ganancia, emite señales desde la cercanía del planeta Saturno. Calcular: (a) la densidad de flujo de potencia en la Tierra. (b) El nivel de potencia de señal a la entrada de un receptor conectado a una antena con reflector parabólico de 60 m de diámetro. Se supone, tanto en el transmisor, como en el receptor, que hay adaptación de impedancias y que las líneas o guías de onda entre las antenas y los equipos respectivos, no tienen pérdidas.

Solución.

La distancia media de Saturno a la Tierra es de 1.2×10^9 Km. (Este dato puede obtenerse en cualquier enciclopedia), de modo que la densidad de flujo de potencia se calcula mediante:

$$S = \frac{P_{rad}}{4\pi d^2}$$

Donde la potencia radiada por el vehículo espacial es:

$$P_{rad} = P_{TX} + G_T$$

P_{TX} es la potencia de salida del transmisor a bordo del vehículo espacial, es decir, 10 w o 10 dBw y G_T es la ganancia de la antena transmisora (30 dBi), con lo que:

$$P_{rad} = 10 + 30 = 40 \text{ dBw} \quad (10^4 \text{ w o } 10 \text{ Kw}).$$

y la densidad de flujo de potencia:

$$S = \frac{10^4}{4\pi \times (1.2 \times 10^{12})^2} = 5.52 \times 10^{-22} \text{ w / m}^2 \quad (-212.58 \text{ dBw / m}^2)$$

Para calcular la potencia de entrada al receptor es necesario conocer la ganancia de la antena receptora. Esta es de reflector parabólico, para la que se supone una eficiencia de $\eta = 0.55$ (55%) y cuya ganancia está dada por:

$$G_R = 10 \log \left[\eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right]$$

Donde, D es el diámetro del reflector parabólico (60 m), y $\lambda = c/f = 3 \times 10^8 / 5 \times 10^9 = 0.06$ m, la longitud de onda, con lo que:

$$G_R = 67.35 \text{ dB}$$

y, la potencia recibida:

$$P_r = S A_{iso} G_{Rn}$$

donde $G_{Rn} = 10^{G(dB)/10} = 5.428 \times 10^6$.

$$\begin{aligned} P_R &= 5.52 \times 10^{-22} \times \frac{(0.06)^2}{4\pi} \times 5.428 \times 10^6 \\ &= 8.57 \times 10^{-19} \text{ w} \quad (-180.67 \text{ dBw} = -150.67 \text{ dBm}) \end{aligned}$$

PROBLEMAS ADICIONALES

1. El diagrama de radiación de un dipolo eléctrico de longitud L está dado por:

$$f(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\beta L}{2} \cos\theta\right) - \cos\left(\frac{\beta L}{2}\right)}{\text{sen}\theta}$$

donde $\beta = 2\pi/\lambda$ y θ es el ángulo medido respecto al eje del dipolo, es decir, a lo largo de éste. Sabiendo que la ganancia del dipolo en la dirección de máxima radiación es de 2.15 dBi, calcule la ganancia de potencia, relativa a la dirección de máxima radiación, en una dirección a 30° de la normal al eje del dipolo, si su longitud es de $5\lambda/8$.

2. La tierra recibe del sol 2.2 cal/min-cm^2 . Calcular: (a) Magnitud del vector de Poynting sobre la tierra en w/m^2 . (b) Potencia radiada por el sol, suponiéndolo un radiador isotrópico. (c) Intensidad de campo en la tierra debida a la radiación solar, suponiendo que toda la energía radiada por el sol es monocromática (una misma frecuencia). Datos: Distancia de la tierra al sol: $149 \times 10^6 \text{ km}$. $1 \text{ w} = 14.33 \text{ cal/min}$.
3. Calcule la potencia recibida en los terminales de una antena con reflector diédrico de 90° (ganancia aproximadamente de 10 dBi), si se encuentra a una distancia de 20 km de un emisor cuya potencia isotrópica equivalente radiada es de 10 kw y se sabe que el factor de atenuación (exponente de la distancia) es de 2.35. Efectúe el mismo cálculo suponiendo un modelo de tierra plana y alturas de 100 m para el transmisor y de 10 m para el receptor. La frecuencia de operación es de 200 MHz. ¿Cuál es en cada caso la atenuación en exceso respecto a la atenuación en el espacio libre?.
4. Para las condiciones del problema anterior, calcule la relación señal a ruido a la entrada del receptor, si la señal transmitida tiene un ancho de banda de 6 MHz y la figura de ruido del receptor es de 15 dB. No se consideran las pérdidas en las líneas de transmisión.
5. Utilizando un programa de cálculo como MATLAB® o similar, trace el patrón de radiación de intensidad de campo para dipolos de las siguientes longitudes: 0.1λ , 0.25λ , 0.5λ , λ , 1.5λ , 2λ , 5λ , 10λ .
6. Estimar la ganancia a media potencia de una antena cuyo ancho del haz en el plano horizontal es de 10° y de 30° en el plano vertical.
7. Se desea establecer un sistema de comunicaciones móviles a 50 MHz, utilizando un transmisor cuya potencia de salida es de 100 w y se emplea una antena direccional para la cual la intensidad de campo radiada, en la dirección deseada, es tres veces mayor que la de un dipolo de media longitud de onda. La altura de la antena transmisora es de 50 m y la de la receptora de 2 m. La intensidad de campo mínima para recepción satisfactoria se estima en $100 \mu\text{V/m}$. (a) Calcular la distancia máxima de cobertura suponiendo tierra plana perfectamente conductora. Efectuar el mismo cálculo suponiendo que el factor de atenuación (exponente de la distancia) es de 2.3 y comparar los resultados.
8. Calcular la potencia máxima recibida a una distancia de 0.5 km en un circuito radioeléctrico a 1 GHz, en el que la antena transmisora tiene una ganancia de 25 dBi y la receptora de 20 dBi, si la potencia suministrada a la antena transmisora es de 150 w.
9. Dos vehículos espaciales separados 30 km tienen antenas iguales, con reflector parabólico de directividad $D=1000$ y eficiencia de radiación del 65%. La transmisión se realiza a 2.5 GHz. Si el receptor de uno de los vehículos requiere un nivel de 20 dBpw para recibir una señal "limpia", ¿Qué potencia debe suministrar el equipo transmisor a su antena?. Las pérdidas en líneas de transmisión se consideran insignificantes.
10. Calcular el horizonte radioeléctrico para una antena localizada a 100 m de altura sobre el suelo, a una frecuencia de operación de 50 MHz.
11. Suponiendo condiciones de tierra plana y alturas iguales para las antenas transmisora y receptora, obtenga una expresión para las alturas necesarias de las antenas en términos de la longitud de onda y de la distancia entre ellas, si debe mantenerse libre la primera zona de Fresnel.

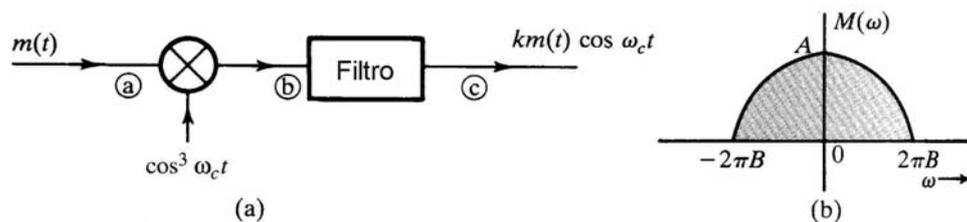
12. Calcular la mínima potencia de salida que debe entregar el transmisor de un radar pulsante, para detectar un blanco a 120 km, cuya área transversal, normal a la dirección de propagación, es de 10 m^2 . La frecuencia de operación es de 1.3 GHz, la ganancia de la antena de 34 dBi y la sensibilidad del receptor de -105 dBm . Se asume que el coeficiente de reflexión del blanco es 1 y que toda la energía incidente sobre él, se refleja en dirección del transmisor.
13. Calcular la directividad de una antena cuya ganancia de potencia es de 45 dBi y tiene una eficiencia de 90%.
14. Explique qué factores tienen que ver con la eficiencia de una antena.
15. Una antena direccional radia una potencia isotrópica equivalente de 1.1 kw cuando se alimenta con 90 W. Su resistencia de radiación es de 74Ω a resonancia y la corriente efectiva, medida en la antena, es de 1.088 A. Calcular: (a) La eficiencia de la antena. (b) La resistencia en el punto de alimentación (resistencia de terminal). (c) Las pérdidas en la antena. (d) La ganancia de la antena.
16. Calcular la corriente inducida en las terminales de una antena receptora vertical cuya ganancia es de 6 dBi, su impedancia de terminal es de 35Ω , la impedancia de carga también es de 35Ω y la intensidad de campo eléctrico en el punto donde se encuentra la antena es de $10 \mu\text{V/m}$ a una frecuencia de 7 MHz. Calcular también el área efectiva de la antena.
17. La corriente en los terminales de entrada de una antena es de $2\sqrt{11} \text{ A}$, cuando el voltaje en dichos terminales es de $100\sqrt{0} \text{ V}$. Calcular la impedancia de la antena. Asumiendo que la impedancia de la línea de transmisión que alimenta a esa antena es de 50 ohms, utilice los conceptos de teoría de circuitos y de teoría de líneas para determinar la potencia efectiva entregada a la antena y compare los resultados.
18. El coeficiente de reflexión de voltaje medido en el punto de conexión de una línea de transmisión de 50 ohms con una cierta antena es de $0.1\sqrt{5}$. Calcular la impedancia de la antena.
19. Una antena de impedancia $45-j10$ ohms se conecta directamente a una línea de transmisión de impedancia característica 50 ohms. Calcular la pérdida por acoplamiento (ROE) y la pérdida de reflexión.
20. Una antena tiene un reflector parabólico cuyo diámetro es de 100 longitudes de onda. Calcular la distancia a partir de la cual pueden despreciarse los efectos del campo cercano o de inducción si la frecuencia de funcionamiento es de 10 GHz.
21. En un cierto sistema de comunicaciones las antenas transmisora y receptora son dipolos de media longitud de onda. La antena receptora está polarizada en el plano de la onda incidente y el voltaje máximo inducido en ella es de $10 \mu\text{V}$. Calcular el voltaje inducido cuando la dirección de máxima radiación (recepción) antena receptora se coloca a 30° , 60° y 90° del frente de onda.
22. Una antena isotrópica radia una potencia de 100 w. Calcular la potencia radiada por unidad de ángulo sólido y la densidad de flujo de potencia a una distancia de 5 km de la antena.
23. Una antena isotrópica radia energía uniformemente en todas direcciones. La potencia total suministrada a esta antena es de 100 kw. Hacer una gráfica de la densidad de flujo de potencia, en w/m^2 y dBw/m^2 para distancias entre 100 m y 1000 km, en escalas horizontales lineal y semilogarítmica.

24. Calcular la directividad de las antenas para las que se dan las siguientes especificaciones: (a) Ganancia de potencia de 1000 y eficiencia de 90%. (b) Ganancia de potencia de 45 dB y eficiencia de 80%.
25. El diagrama de radiación de una cierta antena, en el plano horizontal está dado por $F(\theta) = \sin^4(\theta)$. Hacer la gráfica de esta función en coordenadas cartesianas y polares y determinar los anchos del haz a -3 dB y a -10 dB.
26. Una cierta antena tiene una ganancia de 15 dBi a 300 MHz. Calcular su área efectiva.
27. Calcular la longitud efectiva de una antena cuya ganancia en la dirección de máxima radiación es de 17 dBi y cuya resistencia de radiación es de 350 ohms a 144 MHz.
28. Un dipolo cuya longitud eléctrica es de 0.0625 longitudes de onda está alimentado por una corriente de 2.5 A (valor eficaz). Calcular la intensidad de campo en un punto localizado a 40 km de la antena, a un ángulo de 25° respecto a la dirección de máxima radiación.
29. Una antena directiva emite una potencia isotrópica efectiva (PIRE) de 1.1 kw cuando se alimenta en sus terminales con 90 w y su resistencia de radiación es de 74 ohms a resonancia. La corriente medida en la antena es de 1.008 A rcm. Calcular: (a) La eficiencia de la antena. (b) La resistencia en los terminales de la antena. (c) La pérdida por disipación en la antena. (d) La ganancia de la antena en dB, en la dirección de máxima radiación.
30. Calcular la corriente inducida en los terminales de una antena receptora vertical cuya ganancia directiva es de 6 dBi, su impedancia en los terminales es de 35Ω y la impedancia de carga también es de 35 ohms, si la intensidad de campo que produce es de $10 \mu\text{V/m}$ a una frecuencia de 7 MHz.
31. Calcular el área efectiva de la antena del problema anterior.
32. Una antena de espira está formada por 10 vueltas de alambre sobre un marco cuadrado de 1 metro de lado. Está localizada en un campo magnético de $0.015 \mu\text{T}$ a una frecuencia de 10 MHz y orientada en la dirección de máxima intensidad de señal. Hallar: (a) El voltaje en los terminales de la antena. (b) El voltaje en los terminales de la antena si está sintonizada a resonancia a 10 MHz, con una resistencia total en serie de 65 ohms en serie con un condensador de 25 pf.
33. Determinar el diámetro de un reflector parabólico para tener una ganancia de 75 dBi a 15 GHz. La eficiencia de la antena es de 0.65. Calcular, además, su área efectiva y el ancho de banda a media potencia.

Modulación de amplitud

34. Un transmisor de AM completa entrega una potencia de salida modulado al 100%. Calcular la potencia de salida: (a) Sin modulación. (b) A 60% de profundidad de modulación. (c) Si a 60% de modulación se suprime una de las bandas laterales y se reduce la potencia de la portadora en 26 dB.
35. El amplificador de potencia de un transmisor de AM completa puede entregar 10 Kw a una antena. El transmisor se modula al 40% por una señal senoidal. Comparar la potencia en las bandas laterales cuando se radian éstas y la portadora, o cuando se emplea BLU con piloto de portadora a -20 dB.

36. Un transmisor de AM completa entrega 5 Kw a la antena cuando se modula al 95% por un tono senoidal. Si luego se modula por una señal de voz cuya profundidad de modulación media es de 20 % y se suprime la portadora y una de las bandas laterales, calcular la potencia de salida en estas condiciones.
37. Asumiendo que el ancho de banda máximo de la señal de audio aplicada al modulador de un transmisor de radiodifusión de AM en la banda de MF (ondas medias) es de 5 KHz y que la banda de guarda mínima entre estaciones adyacentes es de 5 KHz, determine el número de estaciones de este tipo que podrían funcionar en la banda ocupada por un canal de televisión cuyo ancho de banda es de 6 MHz.
38. Una portadora de 1 MHz modulada al 40% con un tono de 4 KHz se aplica a un circuito resonante sintonizado a la frecuencia de la portadora y cuya Q es de 140. Calcule el porcentaje de modulación de la onda después de pasar por ese circuito.
39. En el caso de modulación de AM completa, y suponiendo eficiencias de placa de 75, 60 y 40% para funcionamiento típico en clase C, B y AB respectivamente, estime la potencia de CC necesaria en el modulador y en el amplificador modulado, cuando la potencia de la portadora es de 1 Kw y la profundidad de modulación es 0 y 100%, para: (a) Amplificador clase C modulado en placa. (b) Amplificador clase B. (c) ¿Que porcentaje de la potencia suministrada se pierde en forma de calor en cada caso?.
40. Se requiere diseñar un modulador de AM-DSB-SC (doble banda lateral sin portadora), para generar una señal modulada de forma $k m(t) \cos \omega_c t$, donde $\omega_c = 2\pi \times 10^6$ rad/seg y $m(t)$ es una señal de paso bajo, limitada en banda a 5 KHz, de acuerdo al esquema de la figura P.7. El oscilador disponible para generar la portadora genera, no $\cos \omega_c t$, sino $\cos^3 \omega_c t$. Explique si es posible generar la señal deseada utilizando solamente estos componentes.



41.

42. Fig. P.7

¿Qué clase de filtro se requiere?. Determine el espectro de la señal en los puntos b y c , e indique las bandas de frecuencia ocupadas por esta señal. ¿Funcionaría el esquema anterior si la señal del oscilador fuera del tipo $\cos^2 \omega_c t$?. Explique su respuesta.

43. Proponga un método para insertar a la señal modulada, un piloto de la portadora a una amplitud de 20 dB por debajo del nivel de la portadora.
44. Demuestre que, con el esquema de la figura P.8, es posible generar una señal de banda lateral única.

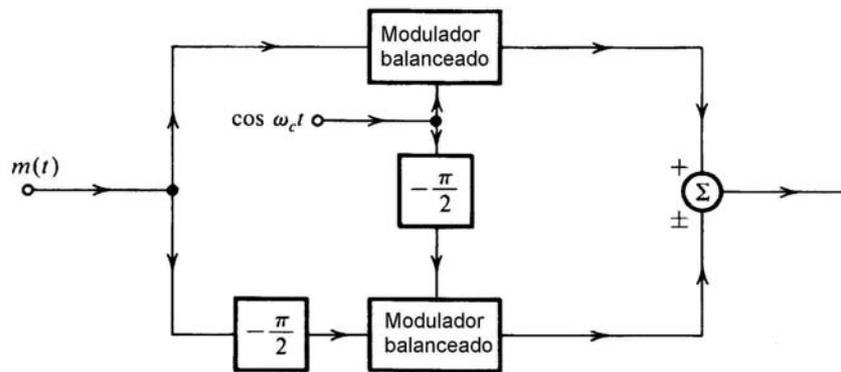


Fig. P.8

45. Dos señales $m_1(t)$ y $m_2(t)$, ambas limitadas en banda a 800 Hz, se transmiten simultáneamente por un mismo canal mediante el sistema de multiplexado de la figura P.9. La señal en el punto b es la señal multiplexada que, a su vez, modula a una portadora de 20 Krad/s y la señal en el punto c es la salida transmitida al canal.

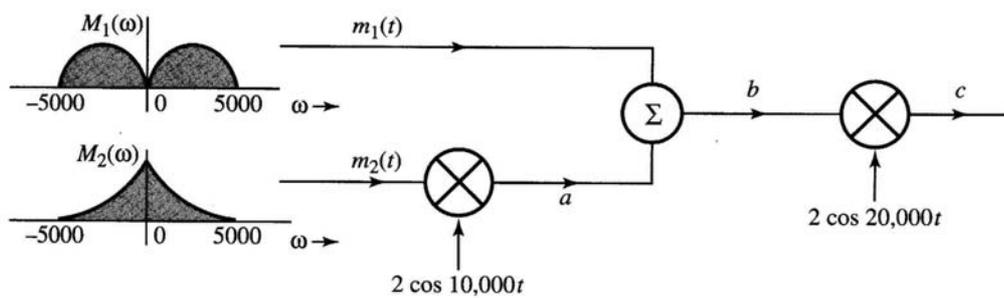


Fig. P.9

Haga un esquema del espectro de las señales en los puntos a , b y c . ¿Cuál debe ser el ancho de banda del canal? Diseñe un receptor para recuperar las señales $m_1(t)$ y $m_2(t)$ a partir de la señal modulada del punto c .

46. Una señal DSB-SC (doble banda lateral con portadora suprimida) está representada por:
 $m(t) = \cos(2\pi \times 10^6 t)$. La frecuencia de la portadora de esta señal debe cambiarse a 400 KHz. El equipo disponible para hacerlo es un modulador balanceado, un filtro pasabanda centrado a 400 KHz y un generador de onda senoidal cuya frecuencia puede variar entre 100 y 300 KHz. Demuestre cómo puede hacerse.
47. En la figura P.11 se muestra un esquema a bloques de un demodulador síncrono. Demuestre que con este demodulador es posible detectar una señal de AM completa.



Fig. P.11

48. El voltaje de una señal moduladora tiene la expresión: $v_m(t) = \text{sen}(2\pi \times 10^5 t) + 3 \text{sen}(6\pi \times 10^6 t)$ y el de la portadora, $v_c(t) = 10 \text{sen}(8\pi \times 10^3 t)$. Utilizando MATLAB® haga una gráfica de la señal modulada y determine además, (a) Potencia de la portadora. (b) Cada una de las frecuencias en las bandas laterales. (c) La señal modulada. La impedancia de carga es de 50Ω .
49. Explique el funcionamiento de un amplificador de estado sólido, en clase C y modulado en colector. Si la potencia suministrada al colector es de 50 W, ¿Qué potencia debe suministrar el modulador para modulación al 100%?.

Modulación angular

50. Un cierto transductor genera una señal de corriente, modulada en frecuencia, de forma

$$i(t) = I_m \text{sen}(\omega_c t + K \cos \omega_m t)$$

Determine las desviaciones pico de fase y frecuencia.

51. Si esta corriente pasa por una bobina de inductancia L , obtenga una expresión para el voltaje producido en el inductor y demuestre que tiene la forma de una señal modulada en amplitud, con doble banda lateral. Determine el índice de modulación de ésta.
52. Una señal modulada en frecuencia tiene la forma

$$v(t) = A \cos(\omega_c t + 5 \cos \omega_m t)$$

Calcule la potencia contenida en las bandas laterales como porcentaje de la potencia total.

53. Una portadora de 25 MHz está modulada por una señal senoidal de 400 Hz. Si el voltaje pico de la portadora es de 5 V y la desviación máxima de frecuencia es de 10 KHz, (a) obtenga una ecuación para la señal modulada, tanto en fase como en frecuencia. (b) Si se cambia la frecuencia de la señal moduladora a 2 KHz, manteniendo constantes los demás parámetros, obtenga la ecuación correspondiente. ¿Cuál es el ancho de banda requerido en cada caso?.
54. Una señal moduladora de 500 Hz aplicada a un modulador de fase produce una desviación de frecuencia de 2.25 KHz. ¿Cuál es el valor del índice de modulación?. Si la amplitud de la señal moduladora se mantiene constante, pero se aumenta su frecuencia a 6 KHz, ¿Cuál es la desviación de frecuencia y el índice de modulación?. Determine el espectro de la señal modulada en cada caso y estime el ancho de banda.
55. En un sistema de FM, cuando la frecuencia de la señal moduladora es de 400 Hz y su voltaje de 2.4 V, el índice de modulación es 60. Calcule la desviación máxima de frecuencia, ¿Cuál es el índice de modulación si la frecuencia de la señal moduladora se reduce a 250 Hz y, simultáneamente, el voltaje de modulación aumenta a 3.2 V?