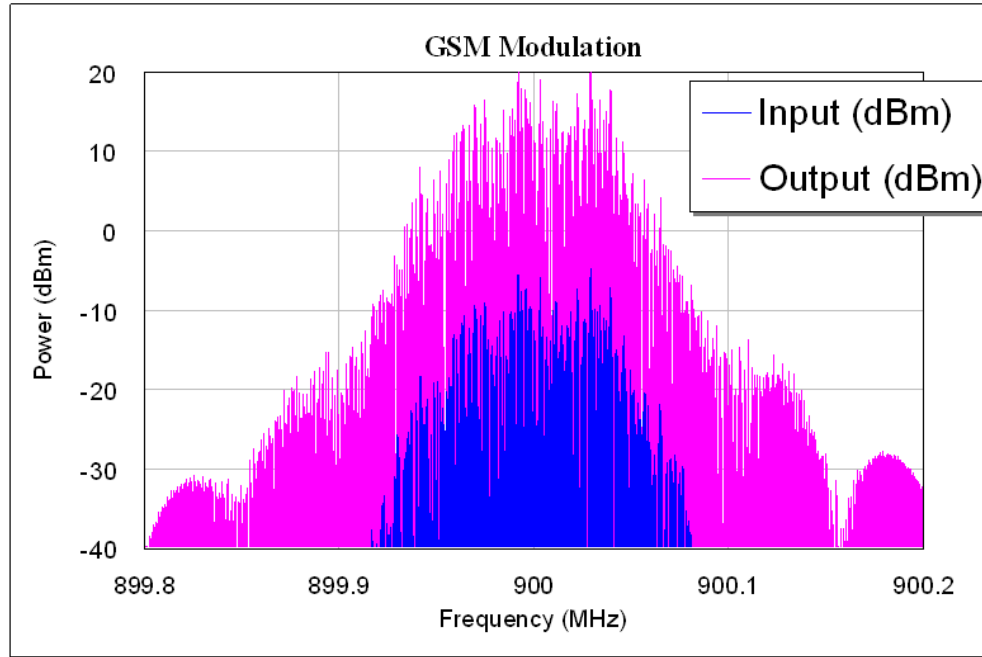


Moduladores



Universidad Tecnológica Nacional de Argentina - F. R.
Córdoba Departamento de Electrónica - Electrónica
Aplicada III

Daniel Rabinovich drabinovich@electronica.frc.utn.edu.ar

Ramón Oros roros@electronica.frc.utn.edu.ar

Claudio Paz cpaz@frc.utn.edu.ar

Año 2015

Referencias

- [1] François de Dieuleveult, Olivier Romain; Électronique Appliquée aux Hautes Fréquences, Dunod, Paris, 2008
- [2] Michael P. Fitz, Fundamentals of Communication Systems, McGraw-Hill, 2007
- [3] Manuel S. Pérez, Belé G. Iragüen, José L. Fernández Jambrina, Manuel S. Castañer, Electrónica de Comunicaciones, Pearson Prentice Hall; August 1953
- [4] Paul Tobin, PSpice for Analog Comm Eng, Morgan & Claypool, 2007
- [5] Paul Tobin, PSpice for Digital Comm Eng, Morgan & Claypool, 2007
- [6] Jon B. Hagen, Radio-Frequency Electronics, Circuits, Cambridge University Press, 2009
- [7] H.C Krauss, C.W. Bostian, F.H Raab, Solid State Radio Engineering, John Wiley & Sons, 1980
- [8] Grahame Smillie, Analogue and Digital Communication Techniques; Newnes, 1999
- [9] Wayne Tomasi, Electronic Communications Systems: Fundamentals Through Advanced, Fourth Edition; Prentice Hall, 2001

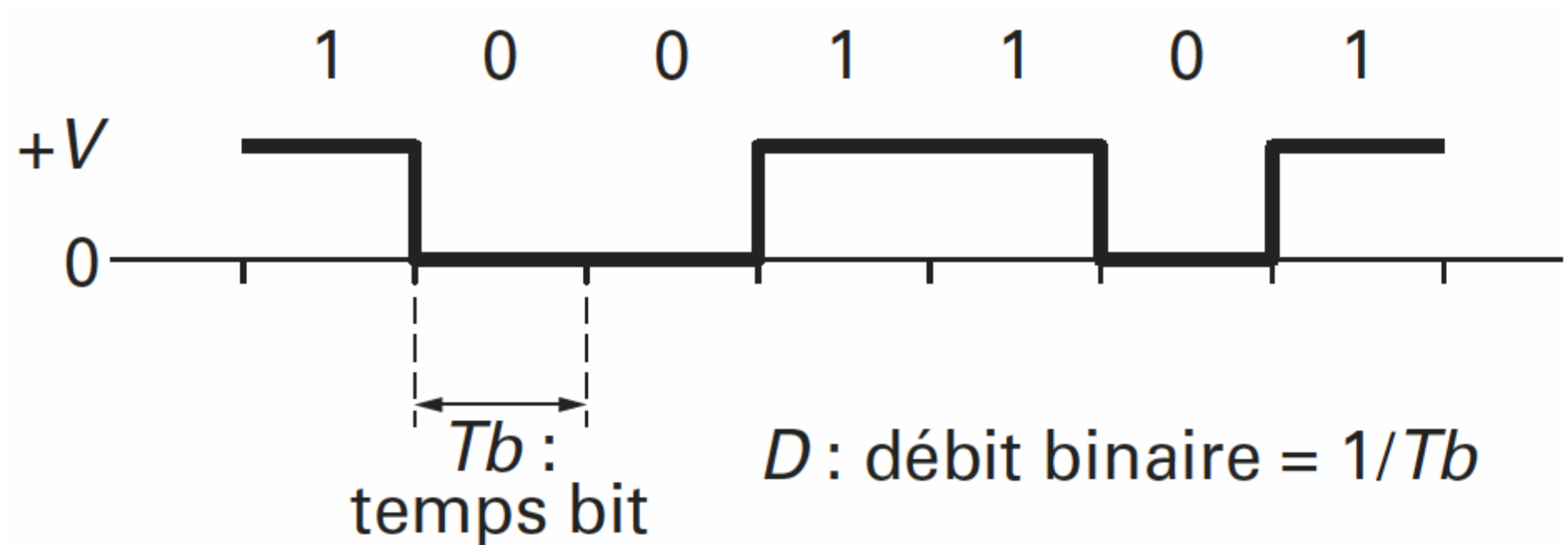
Moduladores

Moduladores Digitales

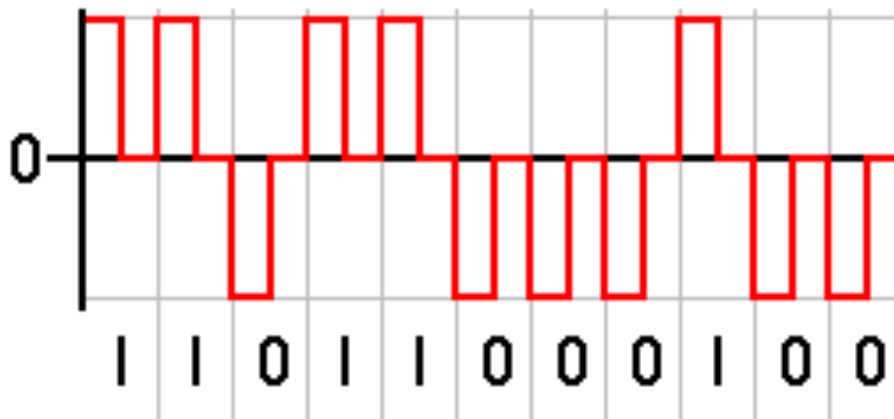
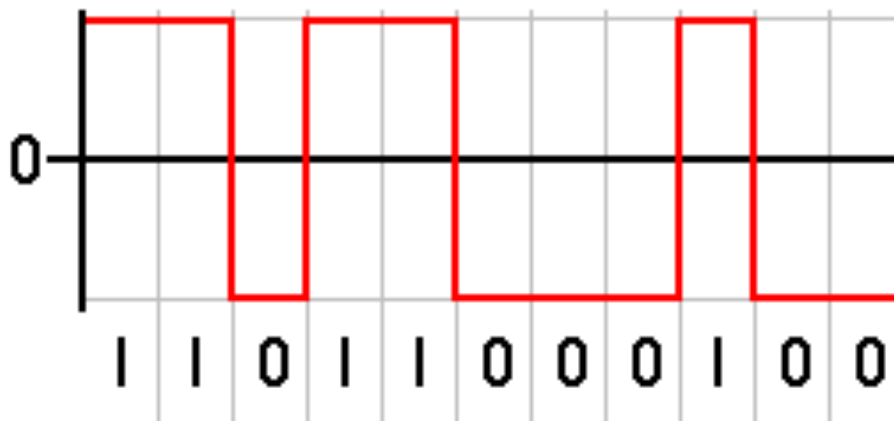
Moduladores

Definición de términos

Definición de la señal digital NRZ



Moduladores



Representación temporal de la señal NRZ unipolar y bipolar [1] y RTZ (return to zero).

Moduladores

Donde T_b es el tiempo durante el cual es transmitido un bit.
 D es el flujo binario, y vale

$$D = \frac{1}{T_b}$$

T_b en segundos y D en bits/s o baudios.

Moduladores

Tasa de error binario (Bit Error Rate).

$$BER = \frac{\textit{Numero de elementos binarios erroneos}}{\textit{numero de elementos binarios emitidos}}$$

Eficacia espectral.

$$\eta = \frac{\textit{flujo}}{\textit{banda ocupada}} = \frac{D}{B} (\text{bit/s/Hz})$$

$$2 \leq \eta \leq 8$$

Moduladores

Función Error y Error complementario.

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty e^{-t^2} dt = 1 - \operatorname{erf}(x)$$

Moduladores

Relación entre el flujo, el ancho de banda y el ruido.

Si en cada intervalo de tiempo, hay n niveles, el caudal máximo entonces aumentará.

Al cambiar la señal puede tener un nivel de n .

El flujo es entonces:

$$D = 2 B \log_2(n)$$

Moduladores

En consecuencia, el ruido pone un límite a la capacidad máxima de un canal dado el ancho B . La velocidad máxima teórica para la que se realiza la transmisión sin error en un ancho de canal B está dada por la ley de Hartley- Shannon de 1948.

$$C = D_{\max} = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = B \frac{\ln \left(1 + \frac{S}{N} \right)}{\log 2}$$

Moduladores

Ejemplo 7.8: Capacidad del canal

Sea un canal con un ancho de banda $B=10\text{kHz}$, en el que la relación señal/ruido vale:

$$S/N=15\text{dB}$$

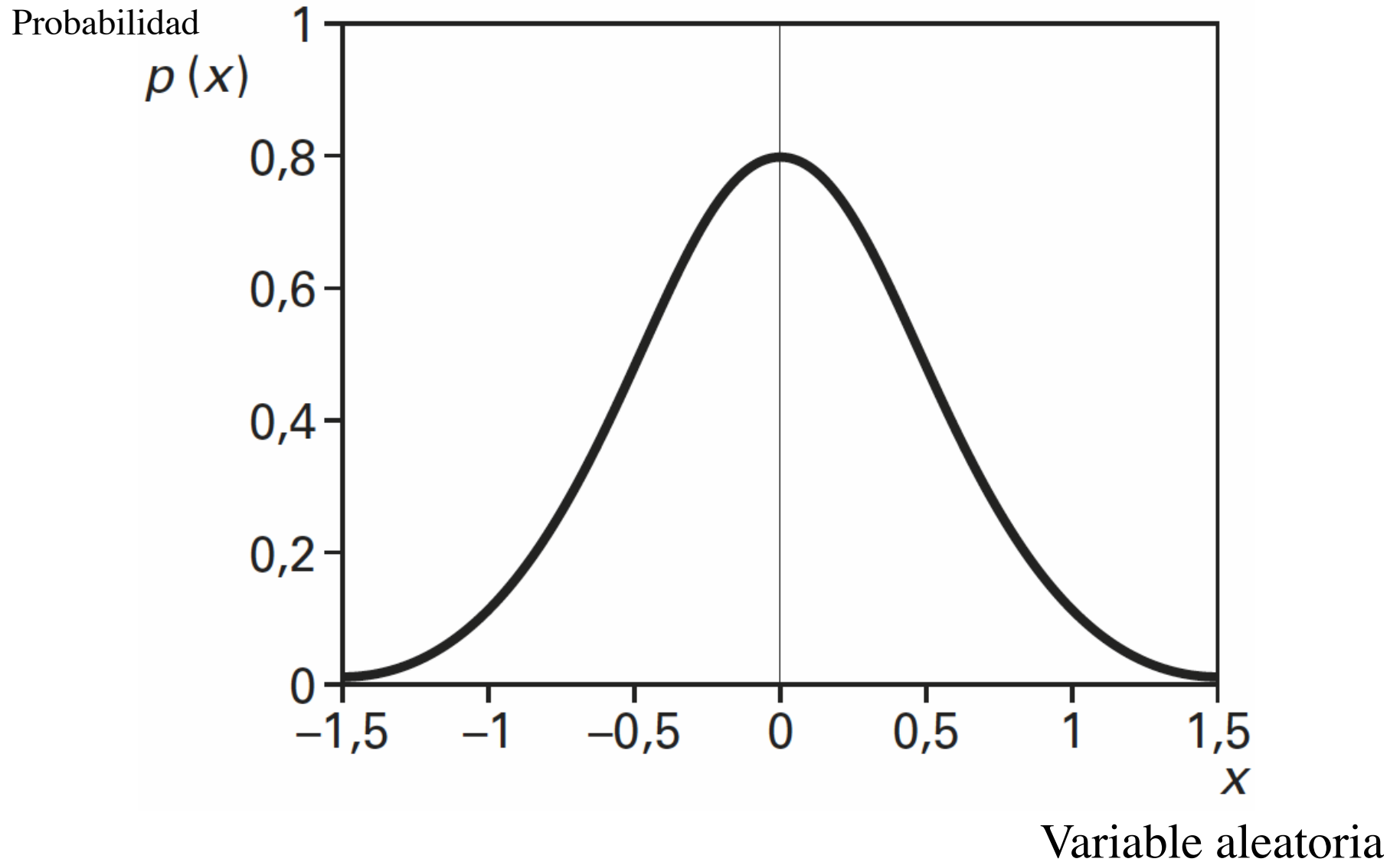
Determinar la capacidad máxima del canal.

Respuesta:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = 10.000 \log_2 (32.622) = 50.288 \text{ bits.s}^{-1}$$

Moduladores

Ruido en sistemas de comunicación digital



Moduladores

Interferencia intersimbólica (ISI) y su influencia sobre el flujo

La interferencia intersimbólica (intersymbol interference, ISI) es el nombre dado al fenómeno por el cual se produce una identificación errónea de un bit.

La señal de banda de base es de banda limitada para limitar la ocupación espectral alrededor de la frecuencia portadora.

Moduladores

Esto significa que tratamos de optimizar el parámetro de eficacia de modulación:

$$\eta = \frac{D}{B}$$

Moduladores

Si se limita la banda de la señal digital en banda base antes de modular la señal de portadora, esta señal tendrá el aspecto que se muestra en la Fig. 7.79.a, por ejemplo.

Este mensaje es el enviado y el recibido.

La señal NRZ se reconstituye mediante la colocación de por ejemplo, un comparador por umbral.

Moduladores

Las Fig. 7.79.b y Fig.7.79.c son las señales recibidas en casos separados.

La Fig. 7.79.b, la velocidad de flujo es lo suficientemente alta de modo que el comparador no puede recuperar el mensaje.

En el caso de la Fig. 7.79.c, el mensaje se recupera sin error.

Esto pone de manifiesto el fenómeno de la interferencia intersimbólica.

Moduladores

Hay un límite teórico propuesto por Shannon y existen limitaciones establecidas por los procedimientos utilizados y su aplicación para evitar la interferencia intersimbólica.

Moduladores

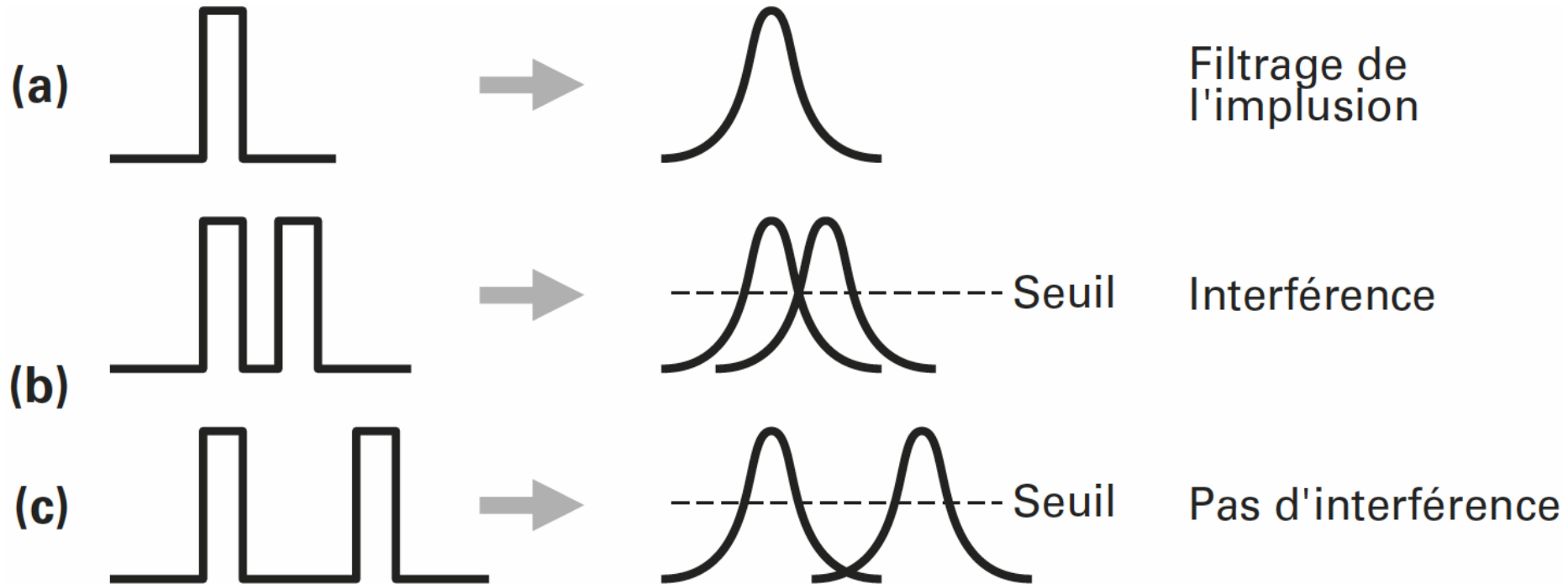


Fig. 7.79. Interferencia intersimbólica resultante del filtrado (seuil=umbral) [1]

Moduladores

Relación entre S/N y Eb/No

La señal que se recibe tiene una potencia total S .

En un sistema con M estados, la energía por bit E_b está relacionada con la energía total E por medio de la expresión:

$$E_b = \frac{E}{\log_2 M}$$

Moduladores

Siendo la potencia la relación de energía con respecto al tiempo, se puede escribir:

$$\frac{S}{N} = \frac{E}{T_b N_0 B}$$

Donde E_b / N_0 es un valor independiente del proceso de modulación.

T_b = Tiempo de bit

E_b = Energía por bit

N_0 = Energía, o densidad de ruido

B = Ancho de banda

D = Flujo Binario

Moduladores

D=flujo binario, y equivale a

$$D = \frac{1}{T_b} \quad \text{y} \quad \eta = \frac{D}{B}$$

$$\frac{S}{N} = \eta \log_2 M \frac{E_b}{N_0}$$

Moduladores

7.5.5. **Modulación de amplitud ASK** (Amplitude shift Keying)

La señal digital modula directamente la portadora $n(t)$. La señal resultante tiene por expresión:

$$n(t) = a_k A \sin(\omega t + \varphi)$$

Moduladores

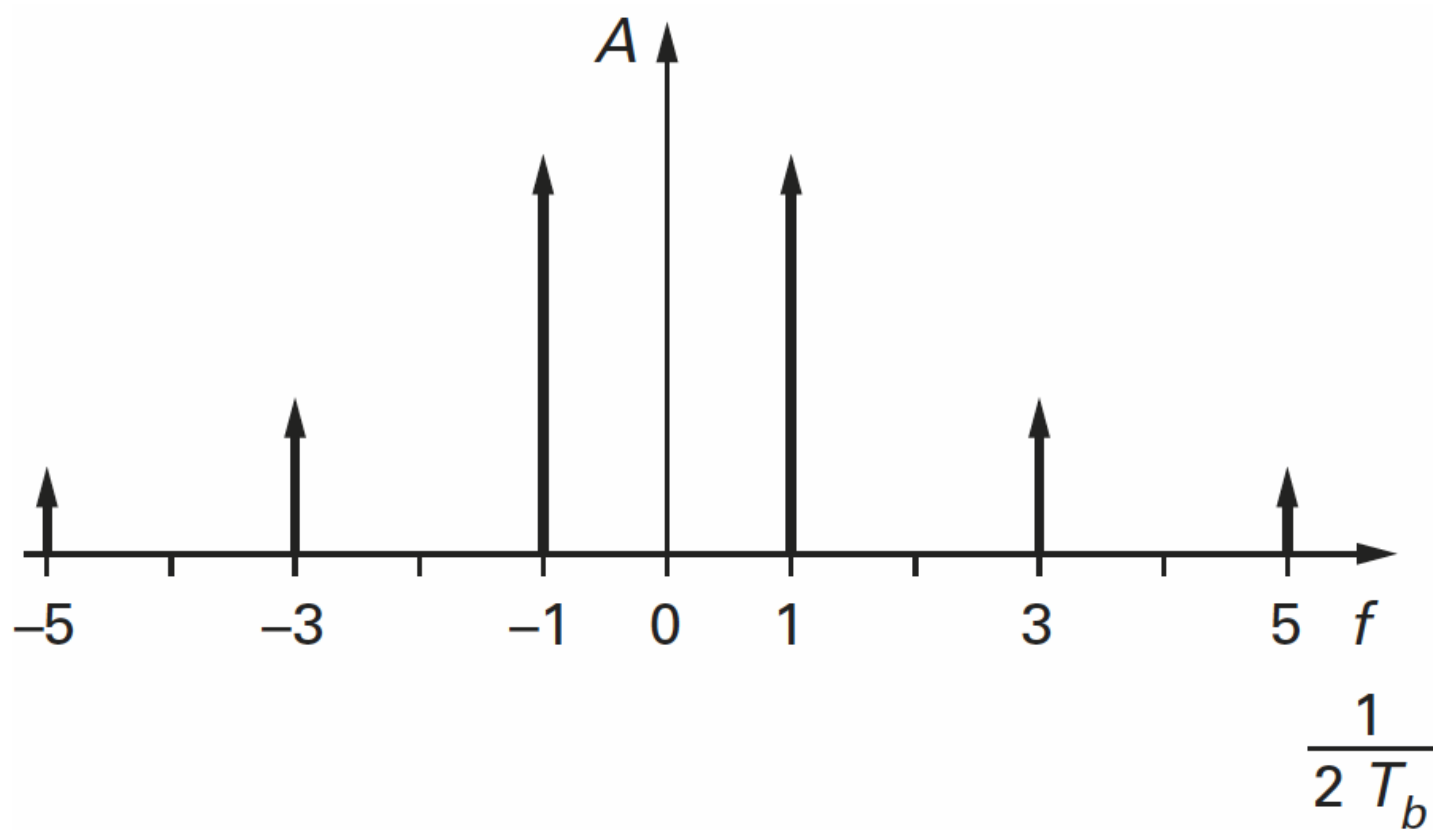


Fig. 7.80. Descomposición en una serie de
Una señal rectangular normalizada a $1/2T_b$ [1]

Moduladores

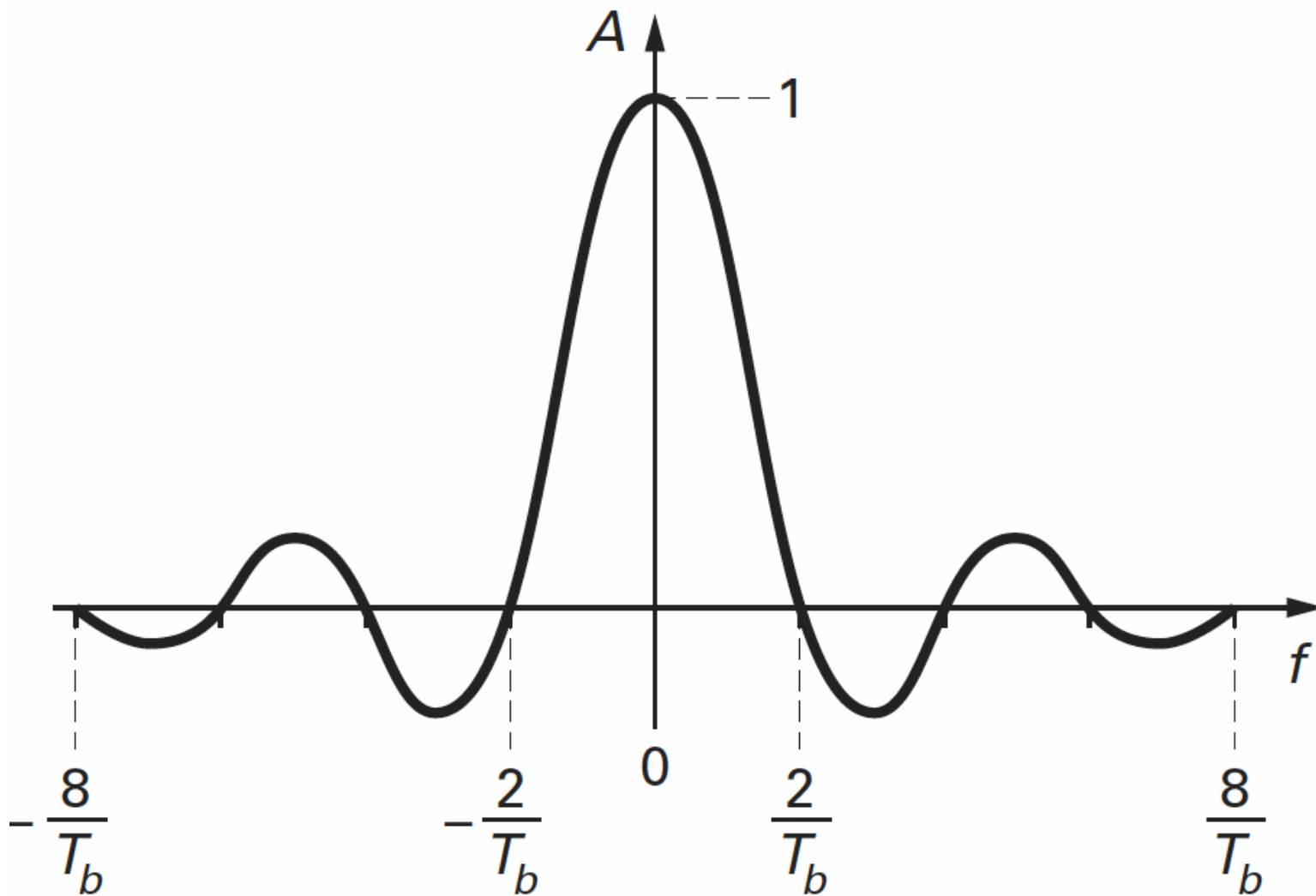


Fig. 7.81. Representación espectral de una señal digital NRZ con un flujo $D = 1/T_b$ [1]

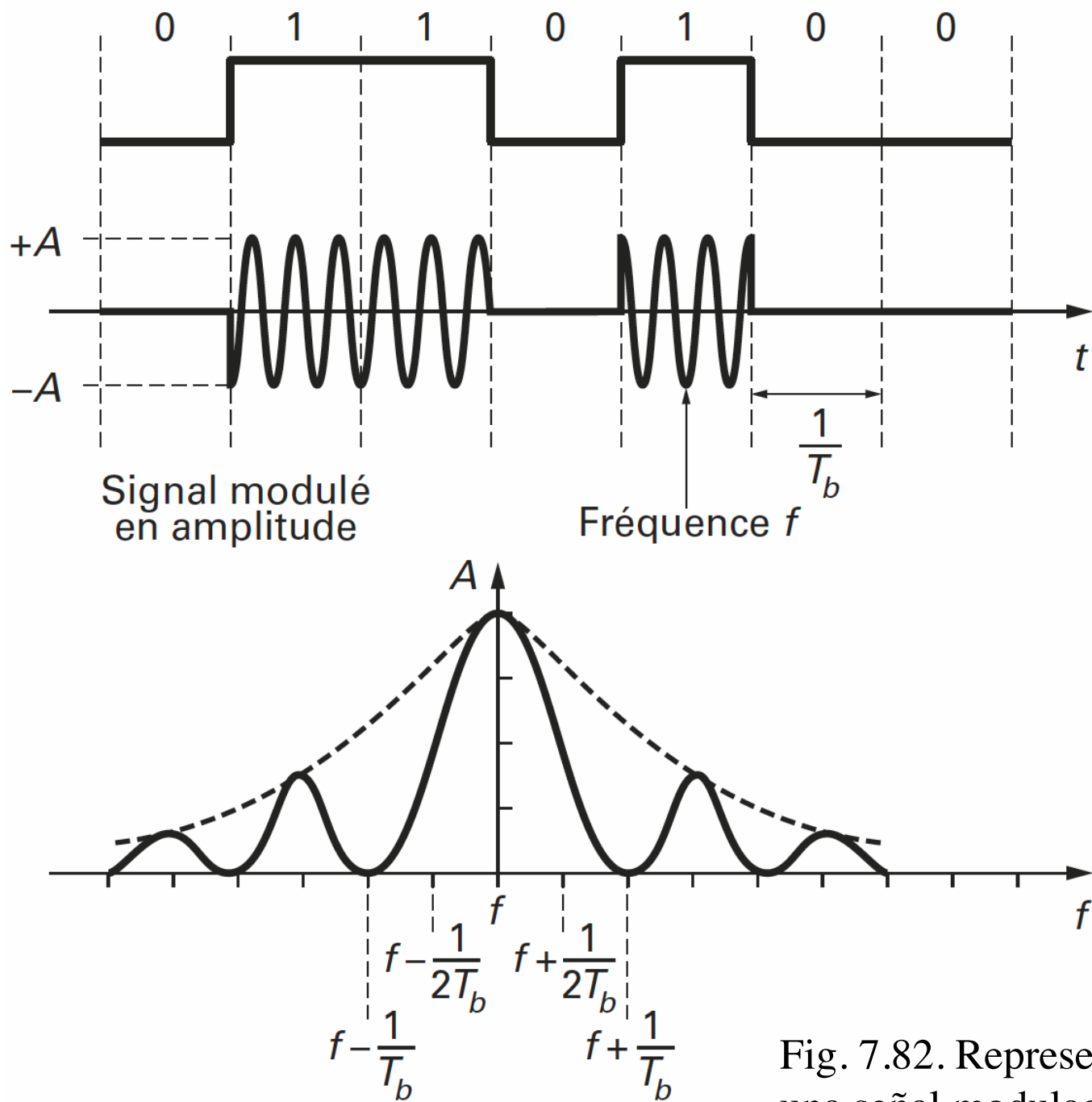


Fig. 7.82. Representación espectral de una señal modulada ASK [1]

Moduladores

Cuando el espectro está limitado a los valores

$$f - \frac{1}{T_b}, \quad f + \frac{1}{T_b}$$

La distribución alrededor de la portadora vale:

$$B = \frac{2}{T_b}$$

El flujo binario D equivale a $D = \frac{1}{T_b}$

Eficacia espectral es $\eta = \frac{D}{B} = \frac{1}{T_b} T_b = 1$

Moduladores

Una limitación entre las frecuencias

$$f - \frac{2}{Tb}, f + \frac{2}{Tb}$$

Lleva a una eficacia reducida a la mitad

$$\eta = \frac{1}{2}$$

ASK se clasifica entre las menos eficaces.

Moduladores

7.5.5.1. Modulador ASK

La Fig. 7.83 muestra el esquema del modulador ASK, donde el oscilador es cortado al ritmo de la señal NRZ.

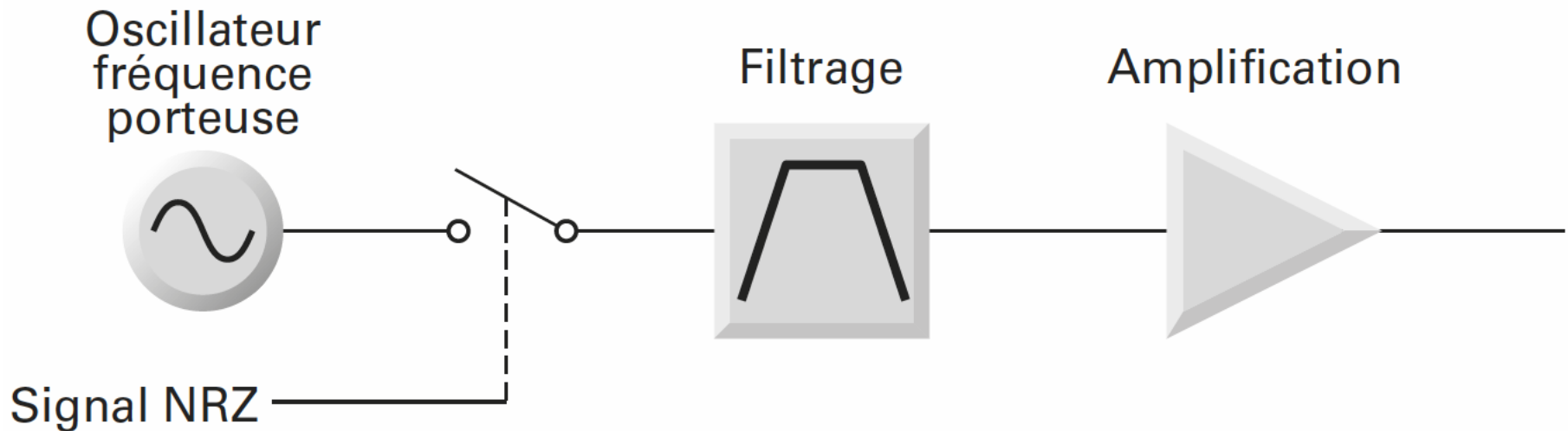


Fig. 7.83. Modulador ASK [1]

Moduladores

La limitación sobre la frecuencia portadora es proporcionada por un filtro de paso de banda alrededor de la frecuencia central.

Filtrado alrededor de la frecuencia central será más complejo cuanto la frecuencia central sea alta y el flujo binario sea mas lento.

La frecuencia central f_c y la tasa de bits $1 / T_b$ actúan directamente sobre el coeficiente de sobretensión Q necesario para la restricción a una banda B alrededor de la portadora.

Moduladores

$$B = \frac{\alpha}{2T_b}$$

$$Q = \frac{f_c}{B} = \frac{2f_c T_b}{\alpha}$$

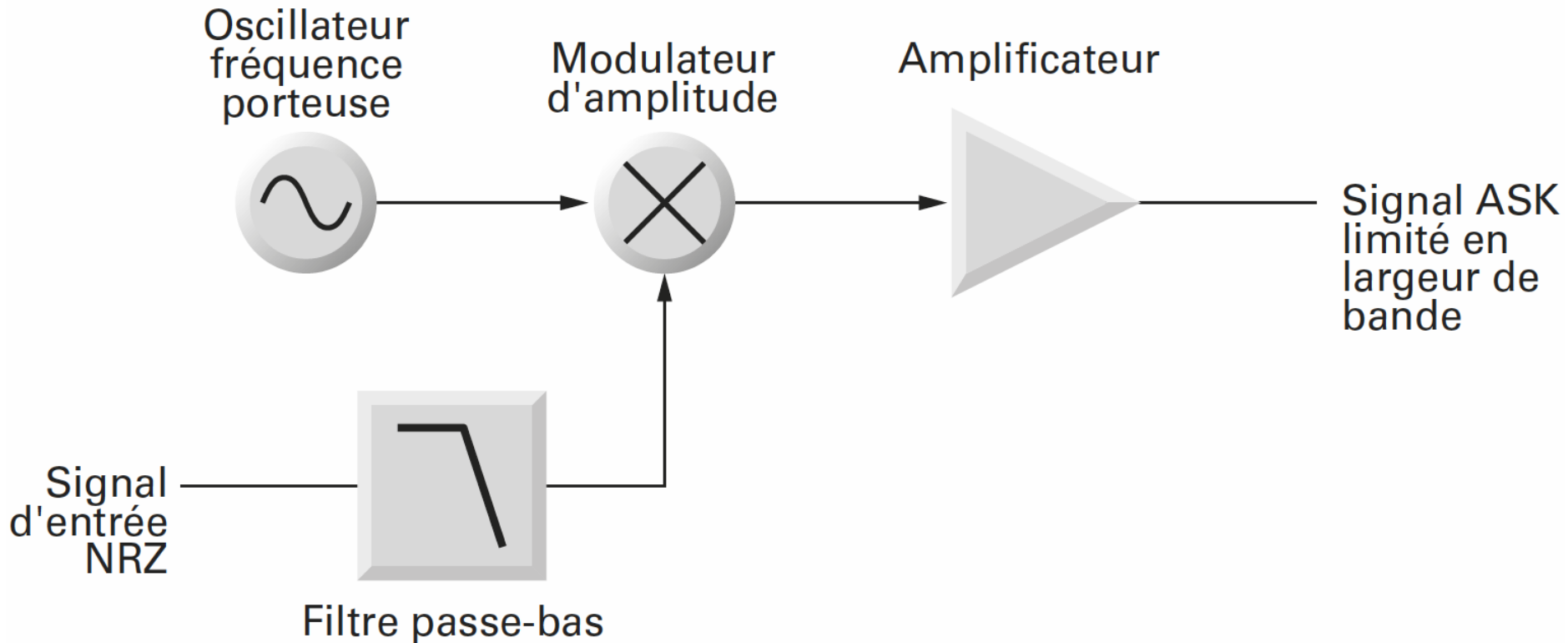


Fig. 7.84. Modulador ASK [1]

Moduladores

El diagrama de bloques de la Fig. 7.84 hace que sea posible eludir este problema mediante la limitación del espectro de la señal NRZ a la banda base.

En los casos de las Figs. 7.83 y 7.84, la linealidad del amplificador de salida no es un parámetro importante.

Los amplificadores de salida pueden trabajar en clase C o clase AB para obtener un buen rendimiento.

Moduladores

7.5.5.2. Demodulador ASK

Idem AM, demodulación coherente o no coherente.

Demodulación por detección de envolvente

Hay un circuito de decisión, el comparador, la salida del detector. El diagrama de bloques del demodulador se muestra en la Fig. 7.85.

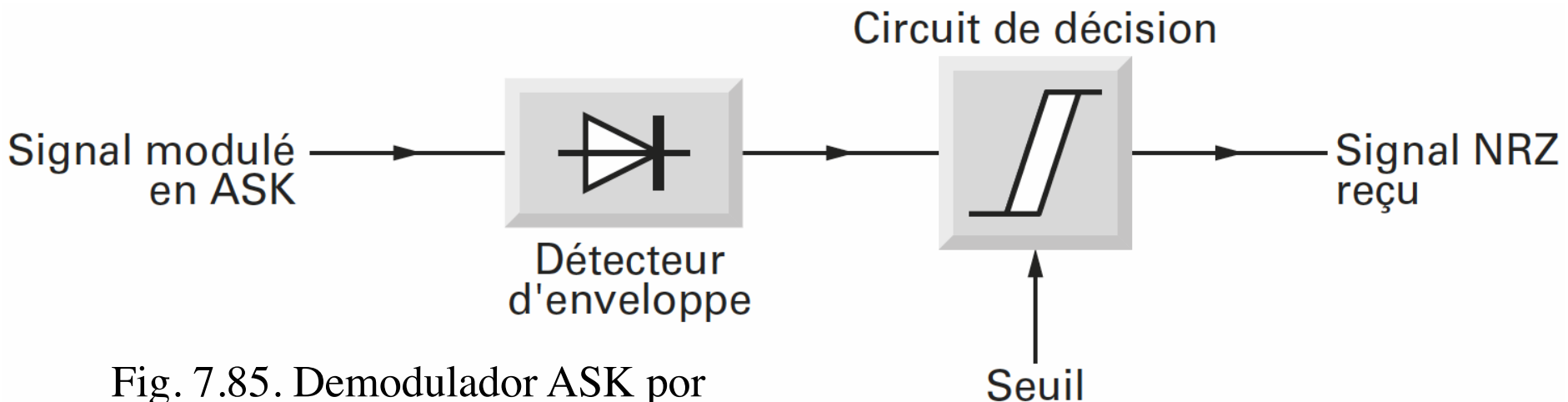


Fig. 7.85. Demodulador ASK por detección de envolvente [1]

Moduladores

Demodulación coherente

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{2N_0}}$$

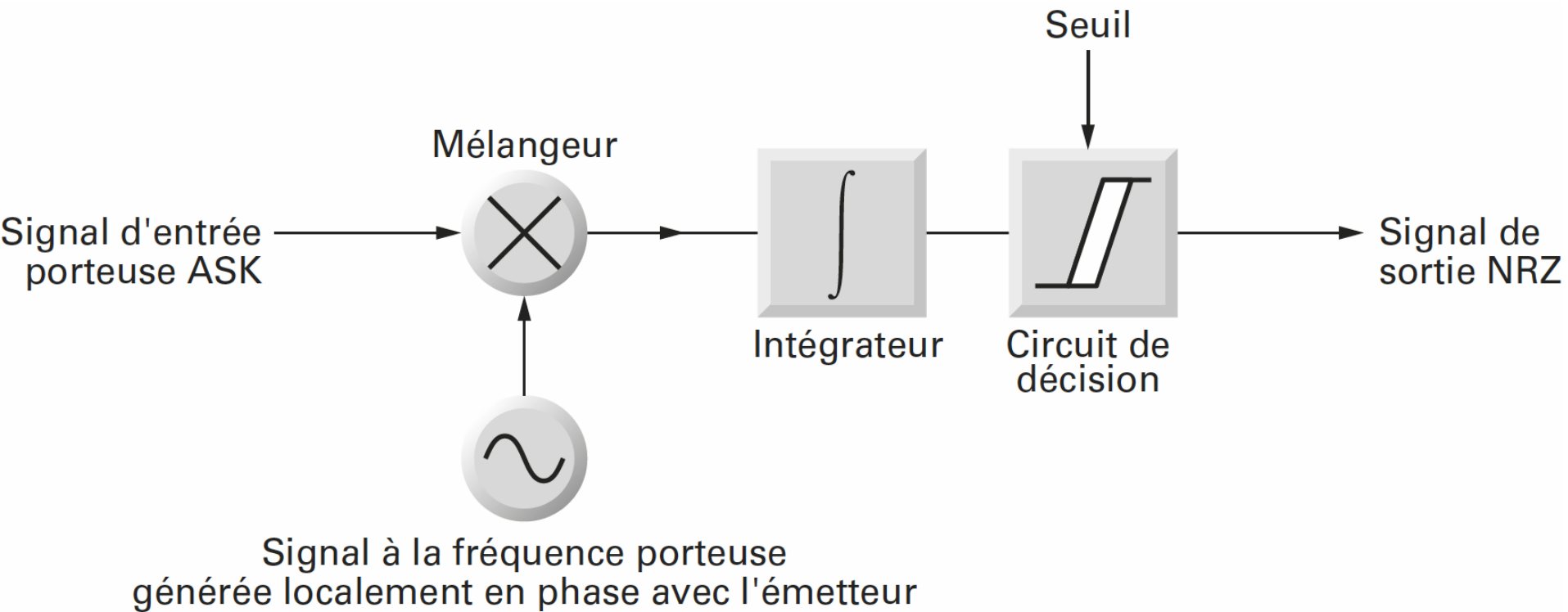


Fig. 7.86. Demodulador ASK coherente [1]

Moduladores

7.5.6. Modulación de frecuencia FSK

FSK (Frequency Shift Keying) podría asimilarse como una doble ASK, donde se conmutan dos frecuencias con la señal modulante. La Fig. 7.87 muestra la modulación FSK.

Moduladores

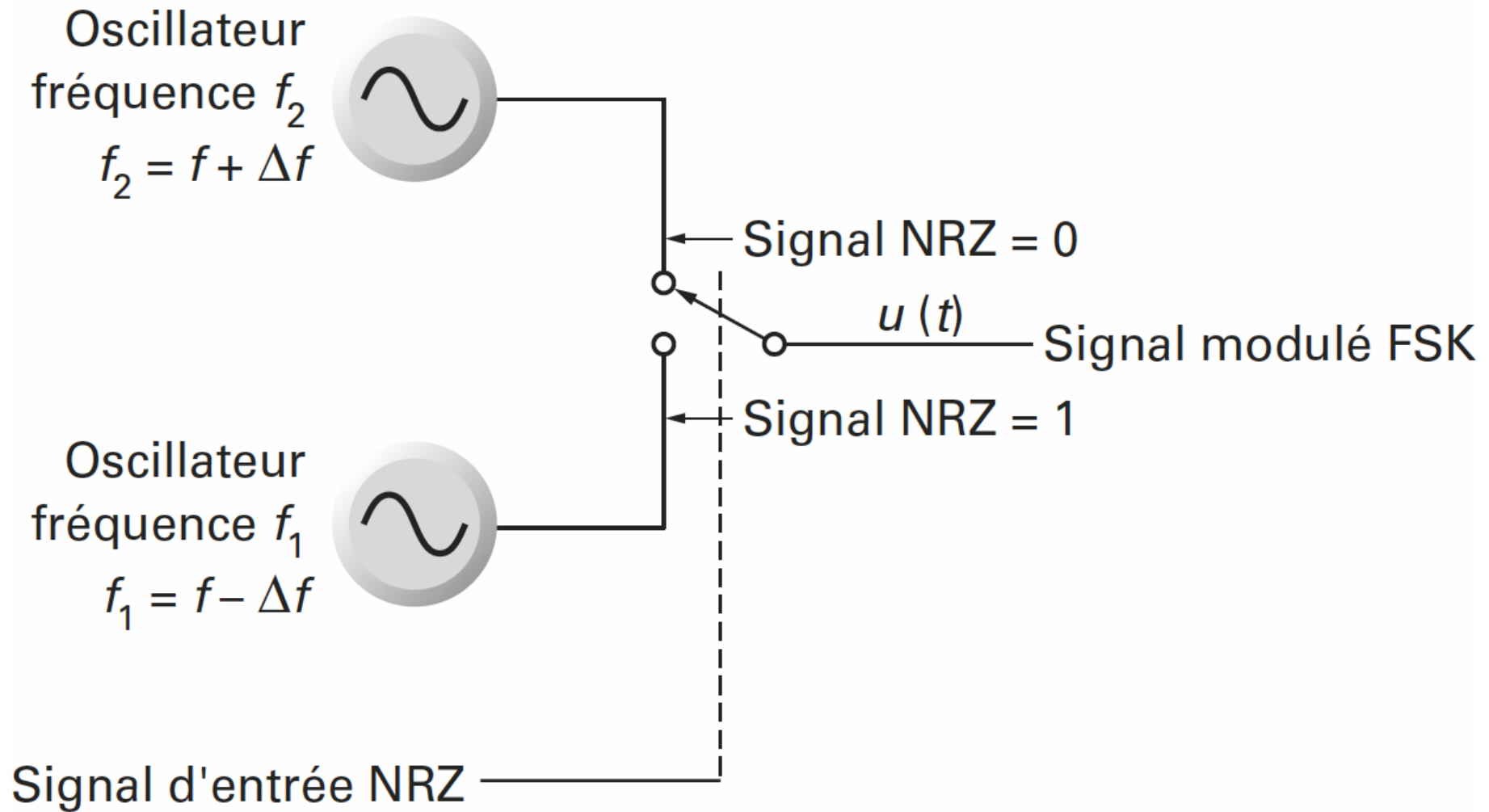


Fig. 7.87. Modulación FSK de fase continua [1].

Moduladores

La señal de salida del modulador FSK es:

$$n(t) = A \sin \left[\omega + (a_k - 1) \Delta \omega \right] t$$

donde a_k puede tomar los valores de 0 o 2.

Si B_1 es la distribución espectral de la señal NRZ alrededor de cada portadora, la representación espectral de la Fig. 7.88 permite llegar a un valor aproximado de la distribución espectral de la señal FSK:

$$B_2 = 2(B_1 + \Delta f)$$

B_1 es el ancho de banda máximo de la señal de la portadora;
 Δf es la excursión de la frecuencia.

Relación, análoga a la fórmula de Carson.

Moduladores

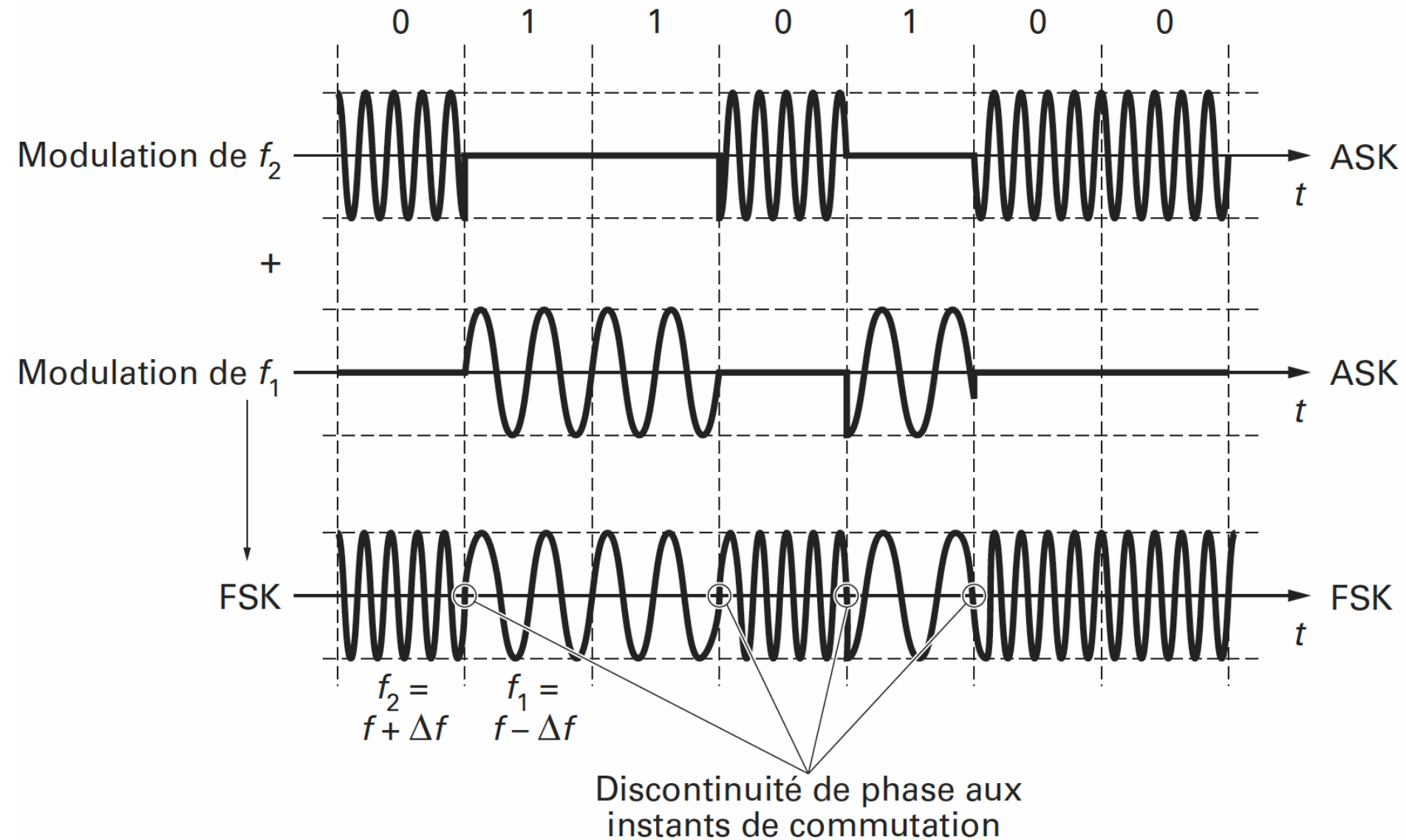


Fig. 7.88. Representación temporal de la modulación FSK [1].

Moduladores

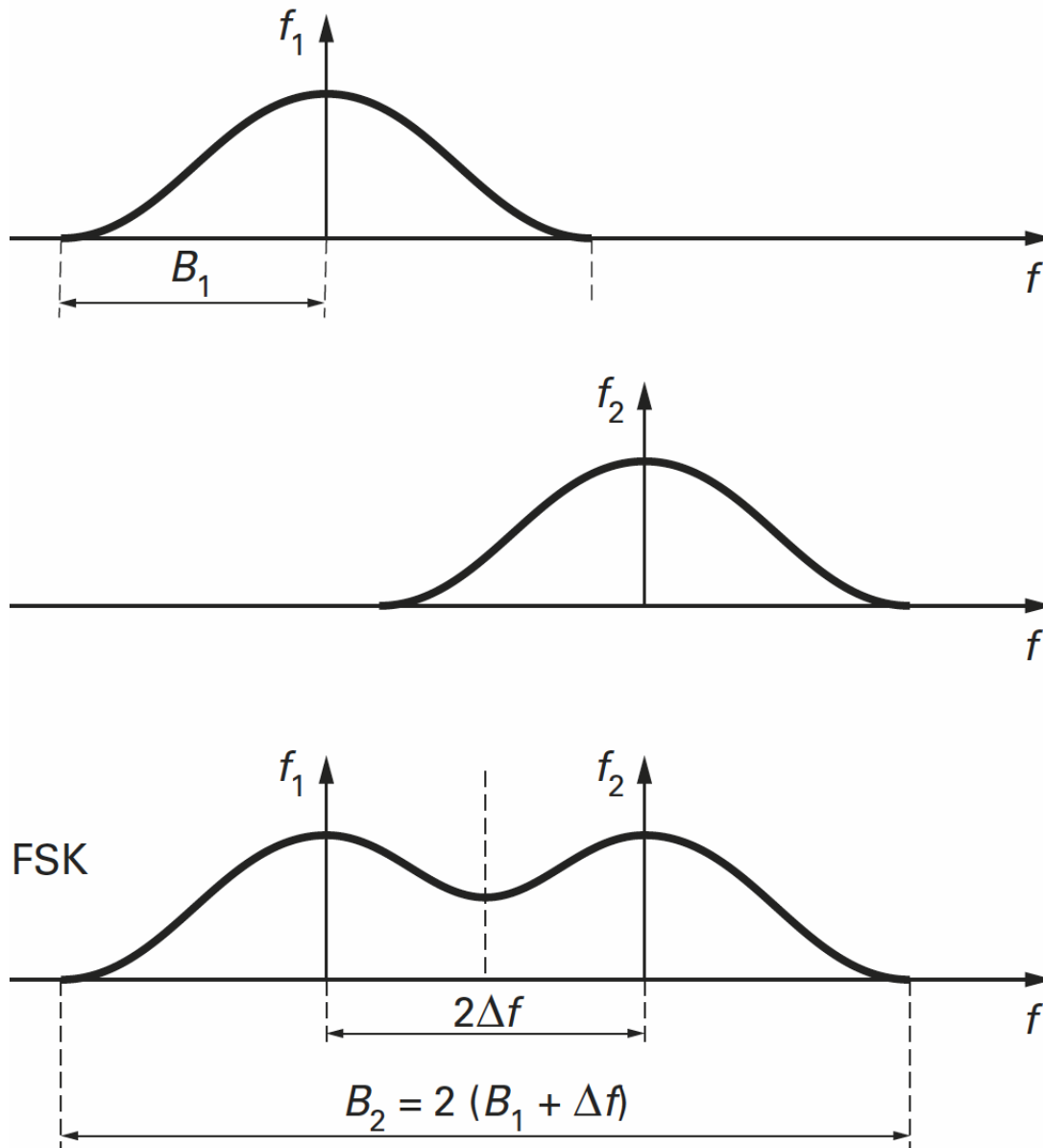


Fig. 7.89. Representación espectral aproximada de la señal FSK [1].

Moduladores

7.5.6.1. Modulación FSK de fase continua, CPFSK

CPFSK = Continuous Phase Frequency Shift Keying.

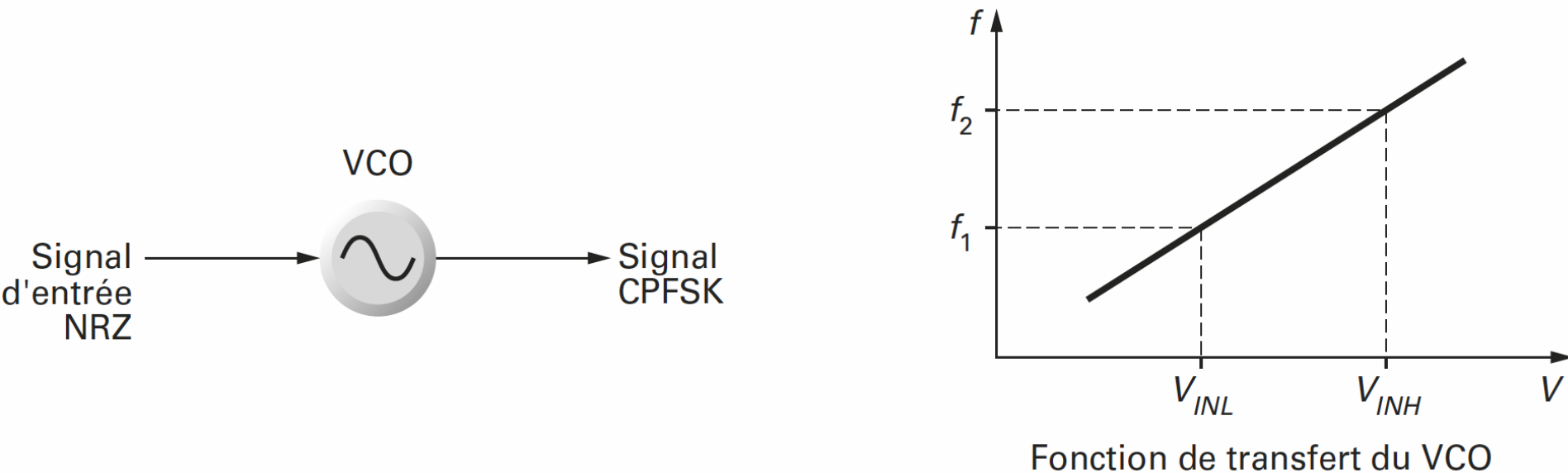


Fig. 7.90. Modulación por fase continua CPFSK [1].

En estas condiciones, las discontinuidades de fase visibles en la Fig. 7.88, los instantes de conmutación desaparecen.

Moduladores

La PSD (Power Spectral Density) de la señal CPFSK no representan ya ninguna raya discreta en las frecuencias f_1 y f_2 .

La envolvente de la PSD tiene picos espaciados en aprox. $f_2 - f_1 = 2\Delta f$ y tanto más acentuada cuanto mayor sea Δf en comparación con B_1 , por tanto al flujo binario $1/T_b$.

Así se tiene:

$$x = \frac{f_2 - f_1}{D} = \frac{2\Delta f}{D}$$

Moduladores

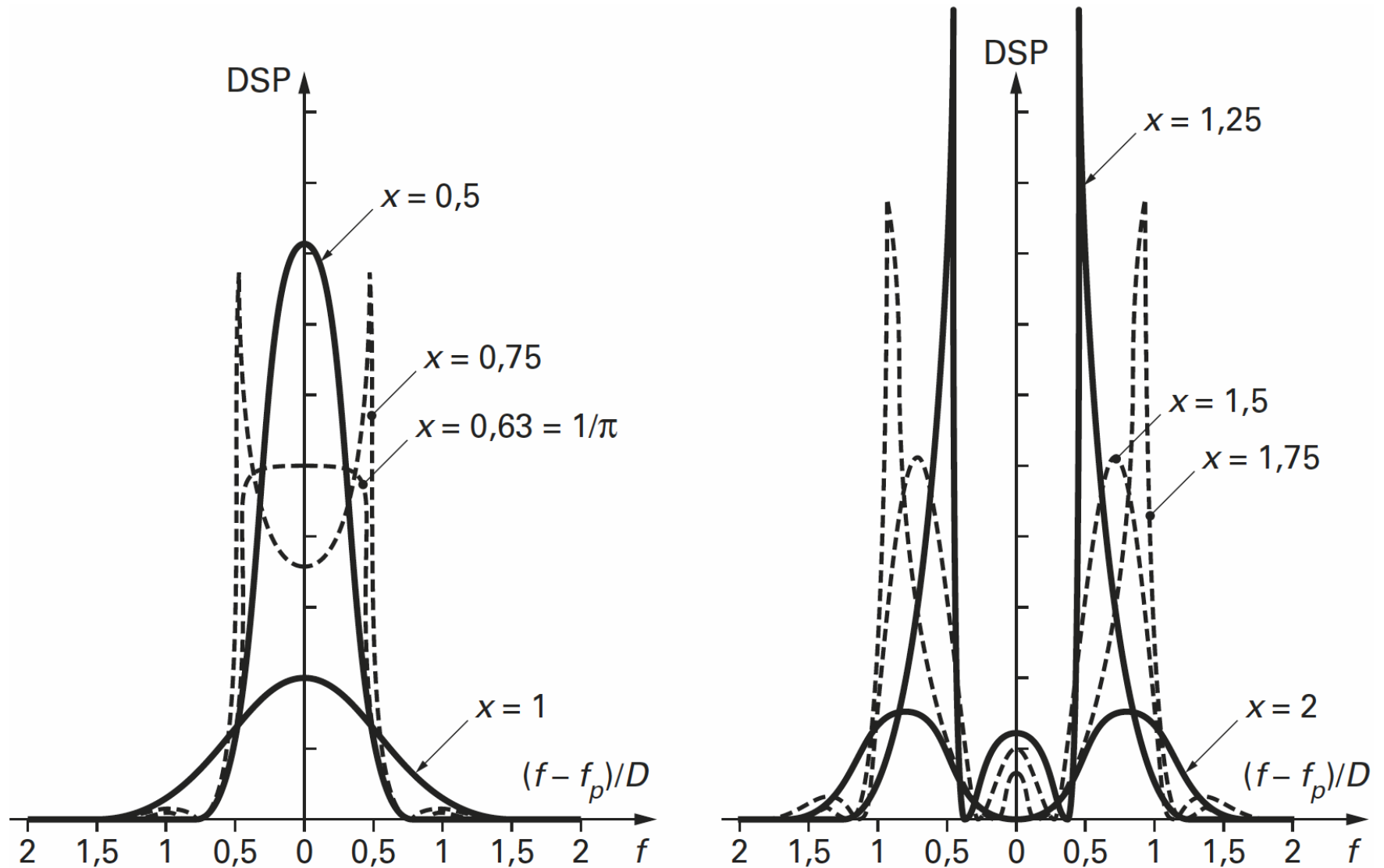


Fig. 7.91. PSD de las señales FSK en función de $(f_2 - f_1)/D$ [1].

Moduladores

Se pretende enfocar la energía en toda la portadora y minimizar el espacio espectral.

Por lo tanto, se optimiza el parámetro η .

7.5.6.2. Modulación MSK

MSK es la abreviatura de Minimum Shift Keying, y corresponde al caso de $x=0.5$ sobre las curvas de la Fig. 7.91.

La Fig. 7.92 muestra la representación temporal de la señal MSK. En este caso la velocidad de transmisión D es de 1200 Baudios, y las dos frecuencias valen, 1900 y 1200.

Moduladores

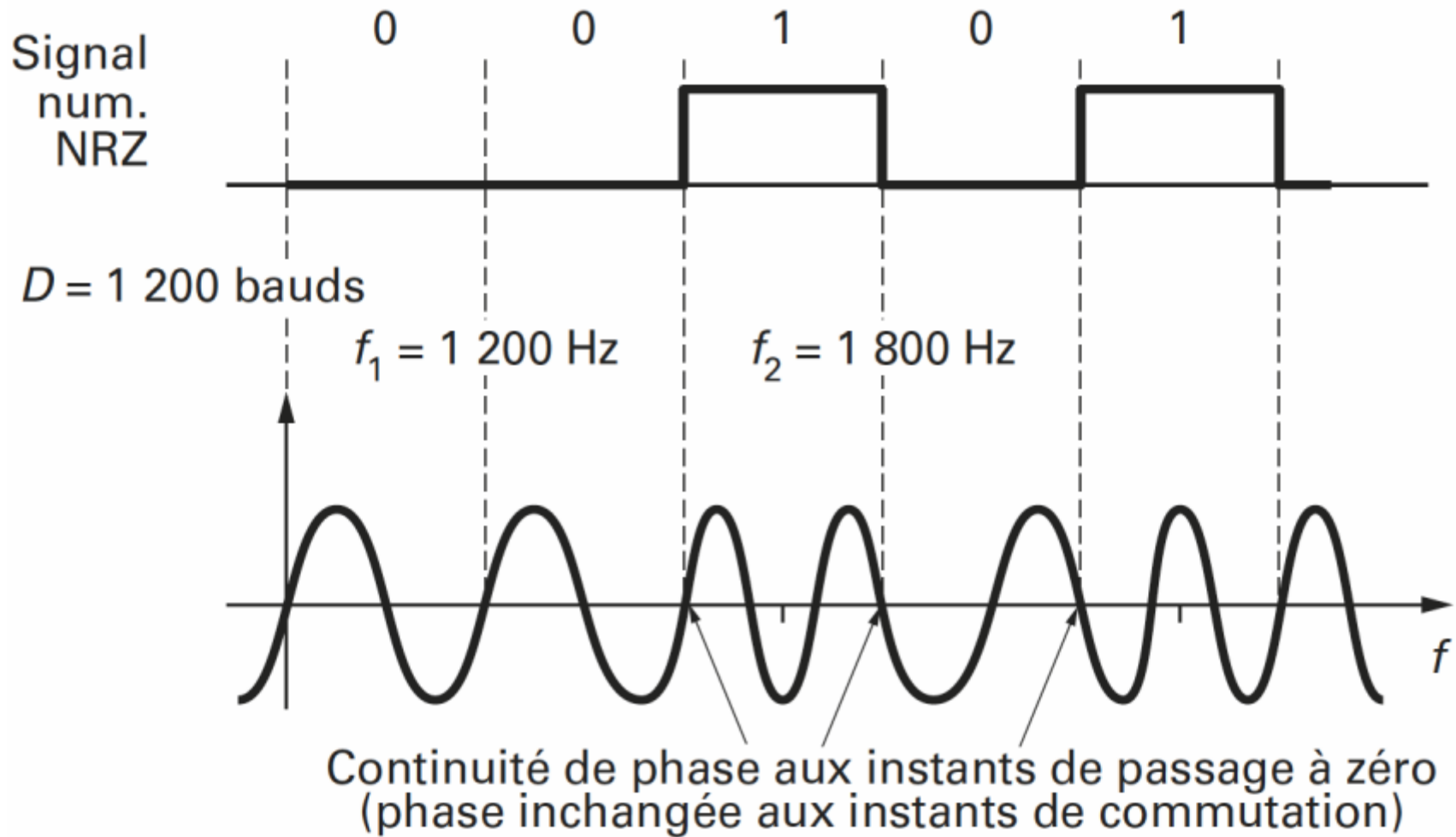


Fig. 7.92. Representación temporal de la señal MSK [1].

Moduladores

La modulación MSK es un caso particular de la modulación CPFSK, donde

$$x = \frac{f_2 - f_1}{D} = \frac{2\Delta f}{D} = 0.5 \rightarrow f_2 - f_1 = 0.5D$$

7.5.6.3. Modulación GMSK

GMSK Gaussian Minimum Shift Keying.

Para minimizar la importancia de los lóbulos secundarios de la señal de MSK en el camino de la señal NRZ, se coloca un *filtro limitador de banda*. Este filtro debe tener como característica esencial, la limitación de frecuencia de la señal NRZ.

Moduladores

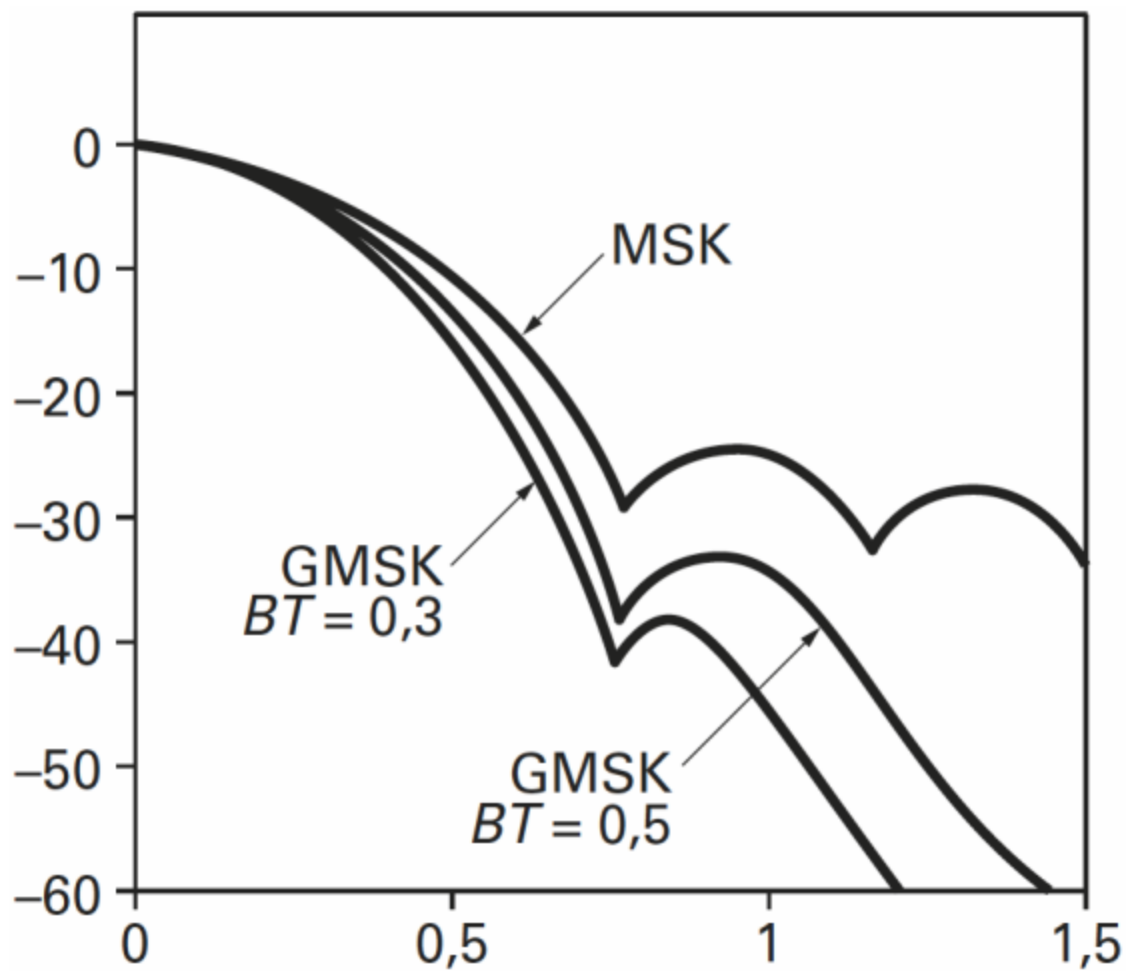


Fig. 7.95. PSD de las modulaciones MSK y GMSK [1].

Moduladores

7.5.6.4. Moduladores FSK, MSK y GMSK

El núcleo del modulador FSK es un VCO.

Como en FM, el índice de modulación es una función de la excursión de frecuencia y el ancho de banda máximo de la señal moduladora.

La configuración representada en la Fig. 7.90 permite satisfacer todos los tipos CPFSK, de las que forman parte las modulaciones MSK y GMSK.

Con un índice de modulación cualquiera, la modulación es del tipo CPFSK, mientras que con un índice de modulación de 0.5, la modulación es MSK.

Moduladores

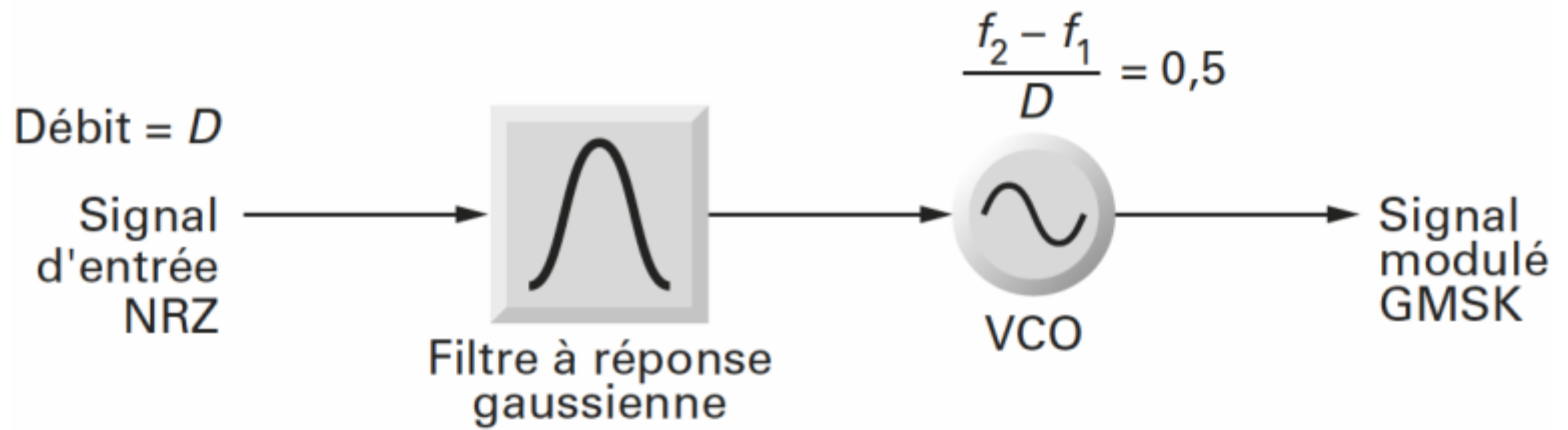


Fig. 7.97. Modulador GMSK [1].

Moduladores

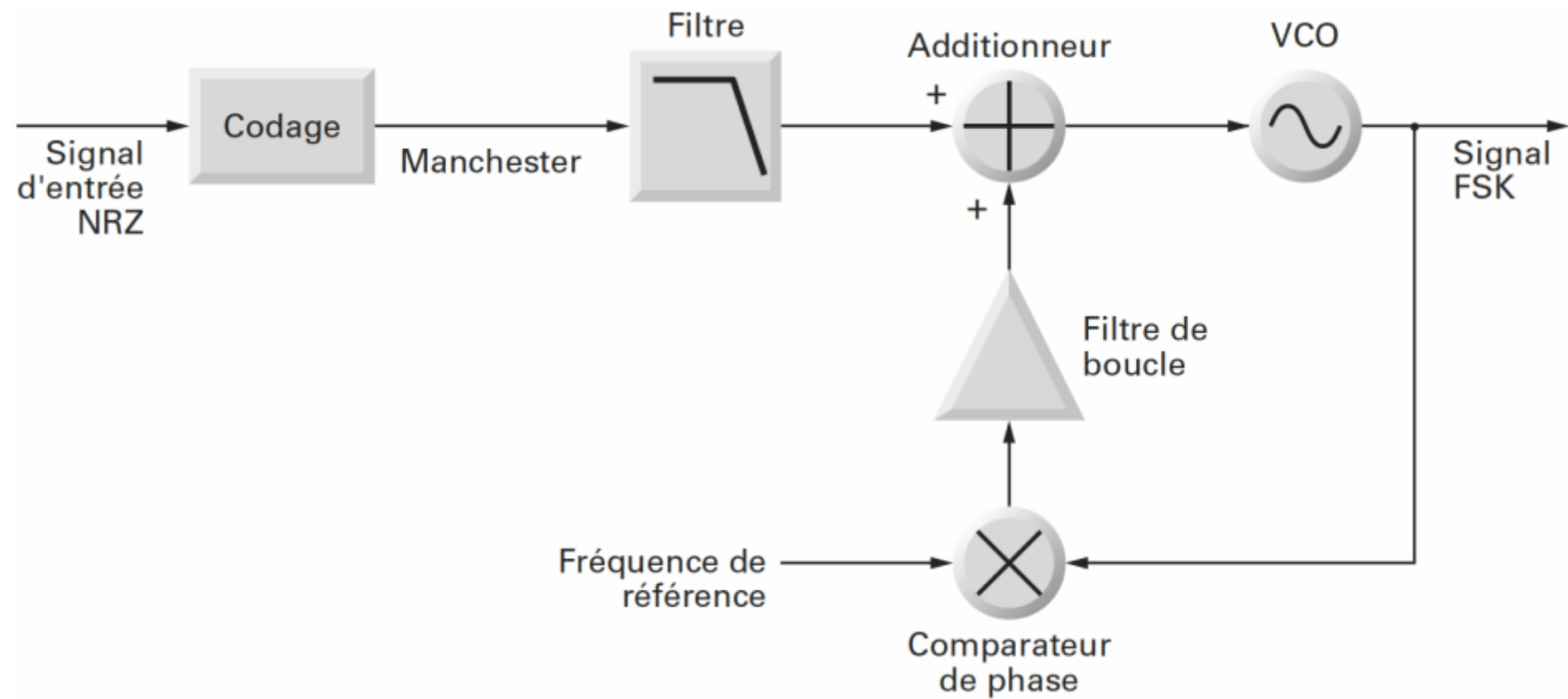


Fig. 7.98. Modulador FSK estabilizado por un PLL [1].

Moduladores

7.5.6.5. Demoduladores FSK, MSK y GMSK

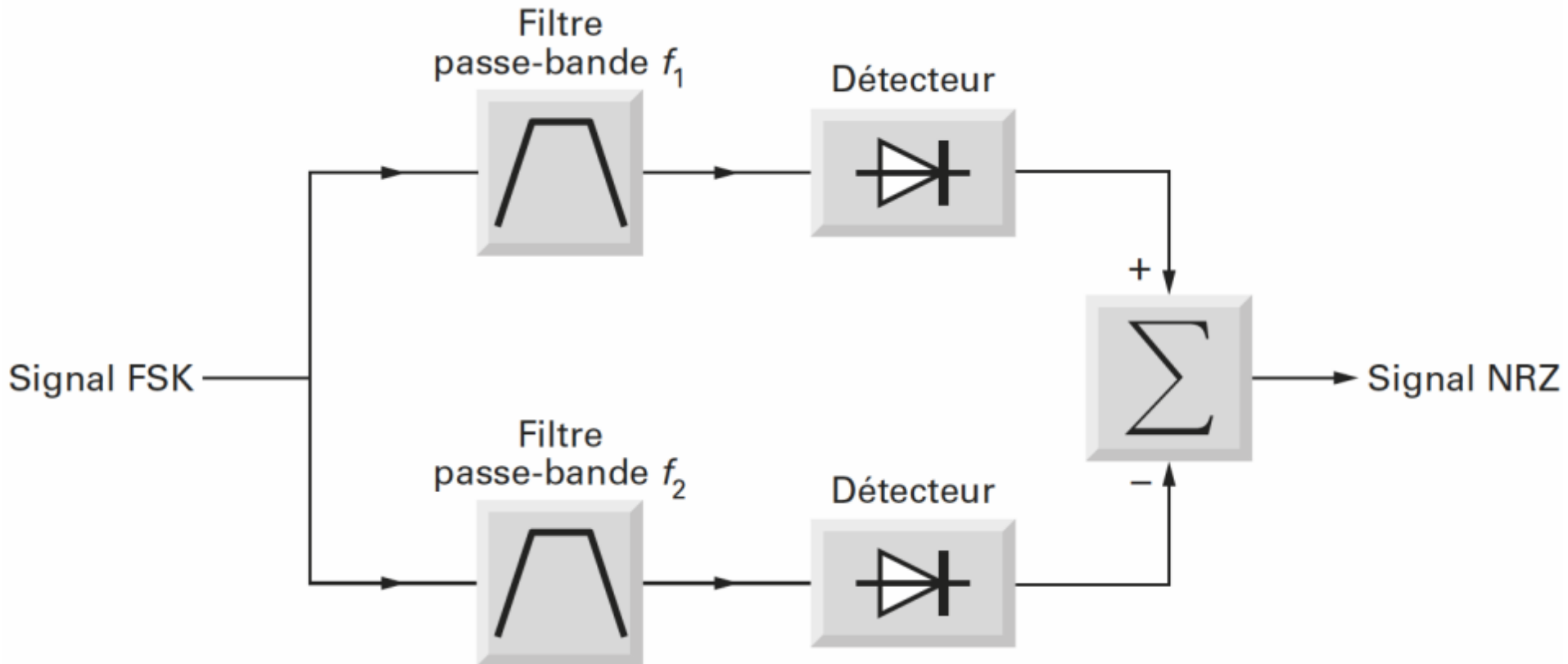


Fig. 7.101. Demodulación FSK no coherente [1].

Moduladores

7.5.6.5.1. Demodulador coherente

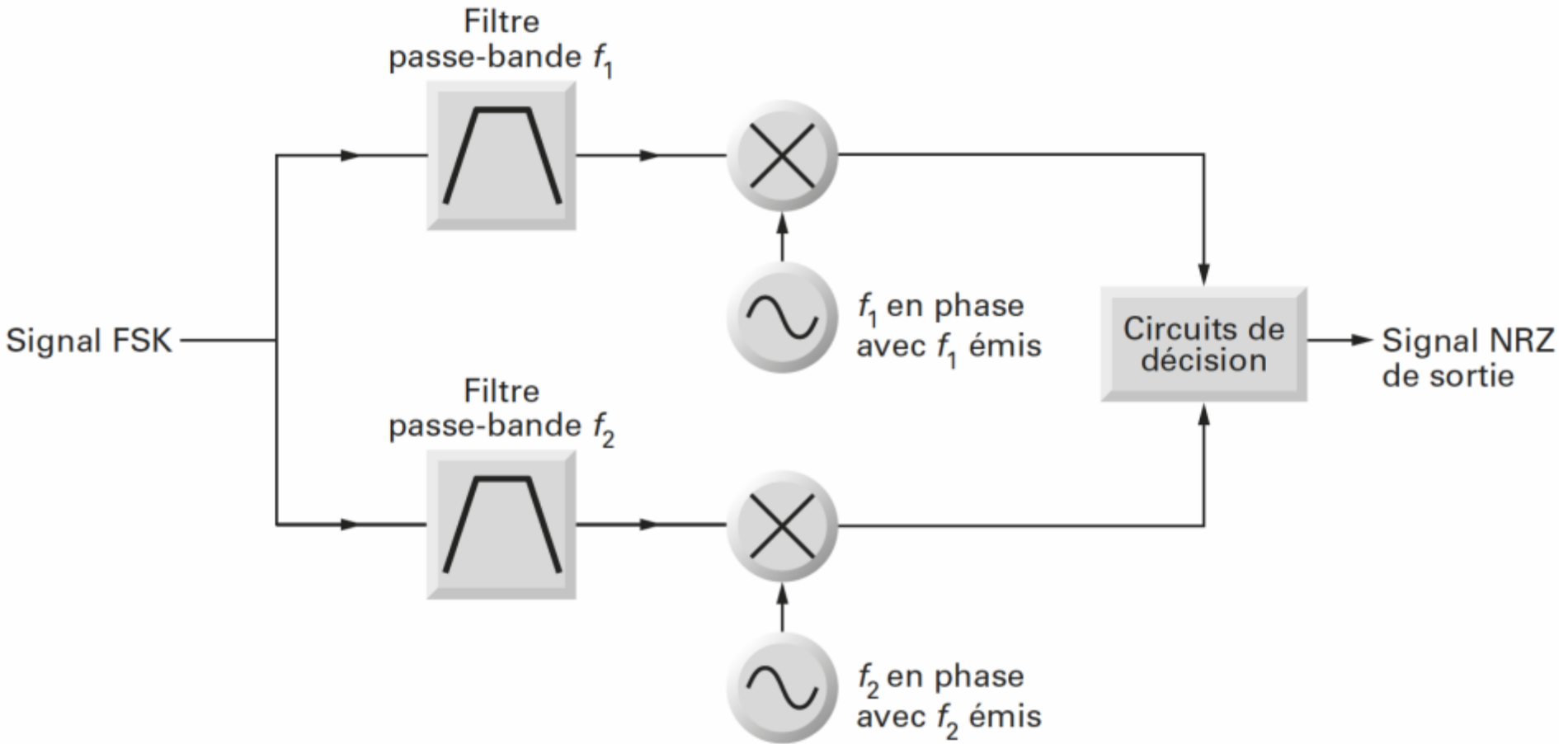
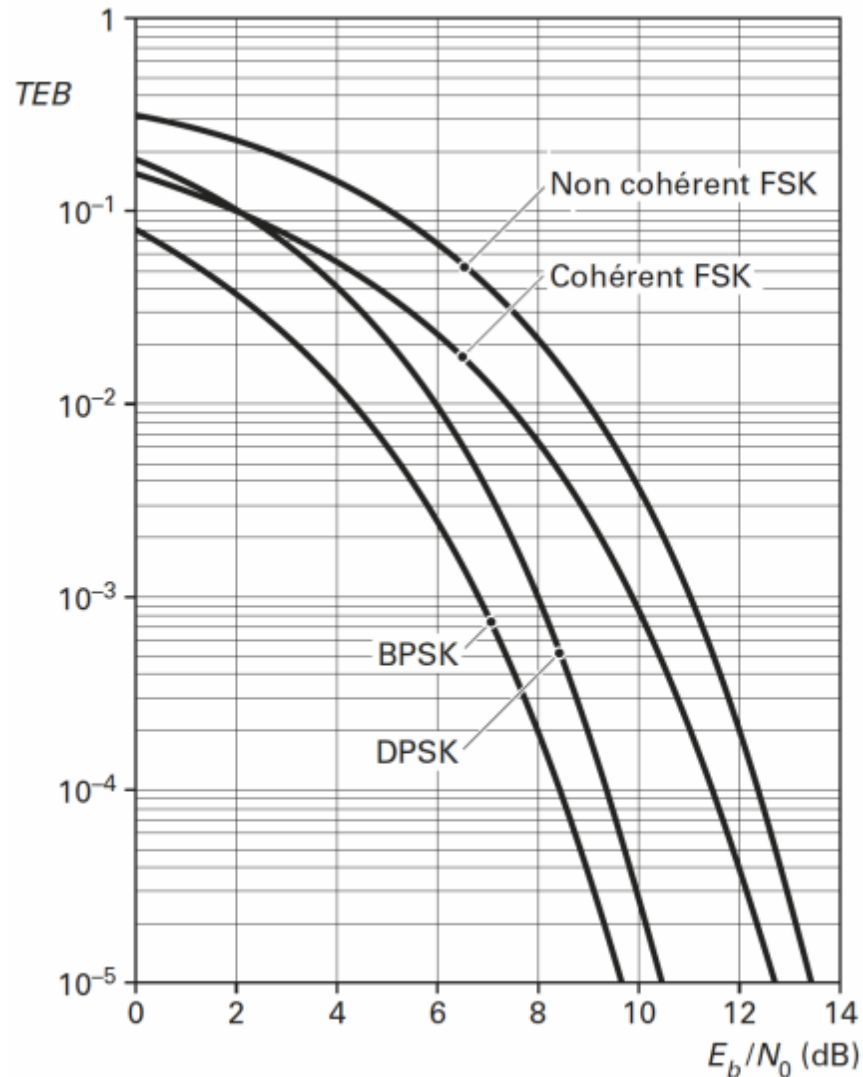


Fig. 7.102. Demodulador FSK coherente [1].

Moduladores

7.5.6.6. Tasa de error binario para modulaciones FSK, BPSK y BPSK



Moduladores

7.5.6.8. Aplicaciones

Varios son los sistemas de radiotelefonía celular que utilizan los procedimientos derivados de la FSK, como el GSM a 950MHz

- Radioteléfono GSM utiliza el GMSK.
- DCS 1.800 en Europa utiliza el procedimiento de modulación GMSK con $BT=0.3$.
- DECT en Europa y en China hace uso del procedimiento de modulación GFSK con $BT=0.5$.

Moduladores

7.5.7. Modulación de fase PSK

La modulación de fase PSK (Phase Shift Keying) es la mas importante, ya que reúnen interesantes prestaciones en términos de tasa de error y eficacia espectral.

La elección de una modulación de fase resulta inevitable especialmente cuando la velocidad de transmisión es importante y, sin duda, así es el caso de la radiodifusión y, sobre todo, en la televisión digital.

Moduladores

7.5.8. Modulación de fase BPSK

La modulación de frecuencia BPSK (Binary Phase Shift Keying) asocia dos estados de fase a los dos símbolos que hay que transmitir.

El aspecto de la señal modulada en función de la señal moduladora se muestra en la Fig. 7.104.

Moduladores

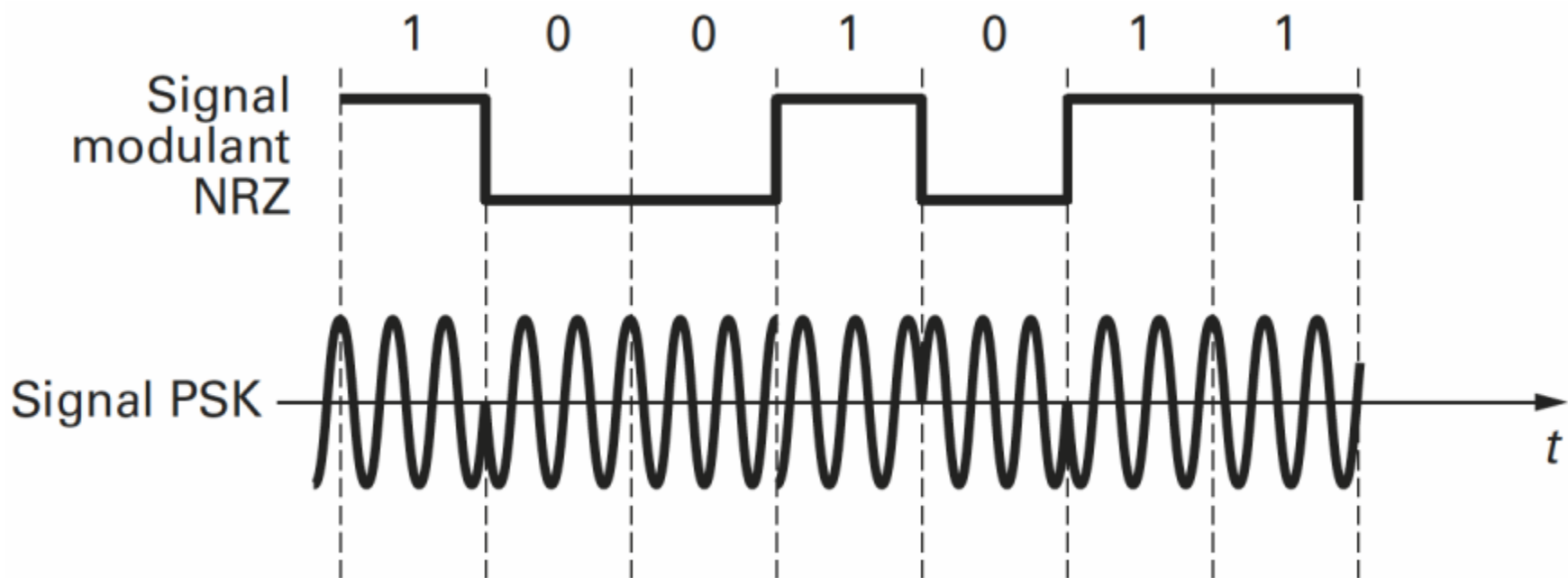


Fig. 7.104. Señal modulada en fase PSK [1].

Moduladores

Si la señal de modulación es una señal digital que tiene los valores 0 o 1, la señal de salida se expresa por cualquiera de las relaciones:

$$v_{RF} = B \cos \omega t \quad \text{para una señal NRZ=0}$$

$$v_{RF} = B (\cos \omega t + \pi) \quad \text{para una señal NRZ=1}$$

La portadora puede tomar dos valores de fase diferentes para cada tiempo de bit, 0 o π .

El espectro de la señal BPSK puede verse en la Fig. 7.107.

Moduladores

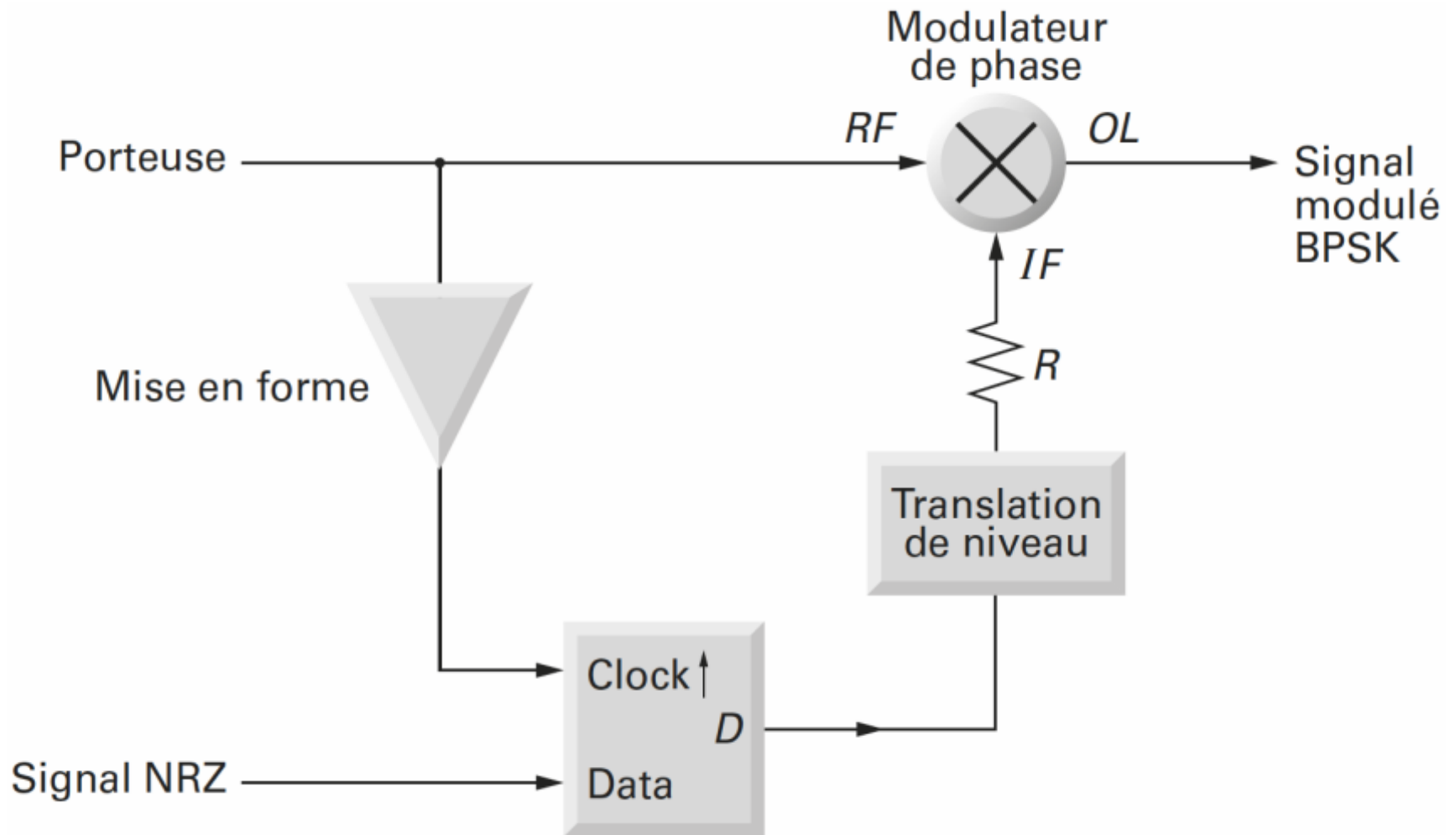


Fig. 7.105. Sincronización de los datos sobre la portadora [1].

Moduladores

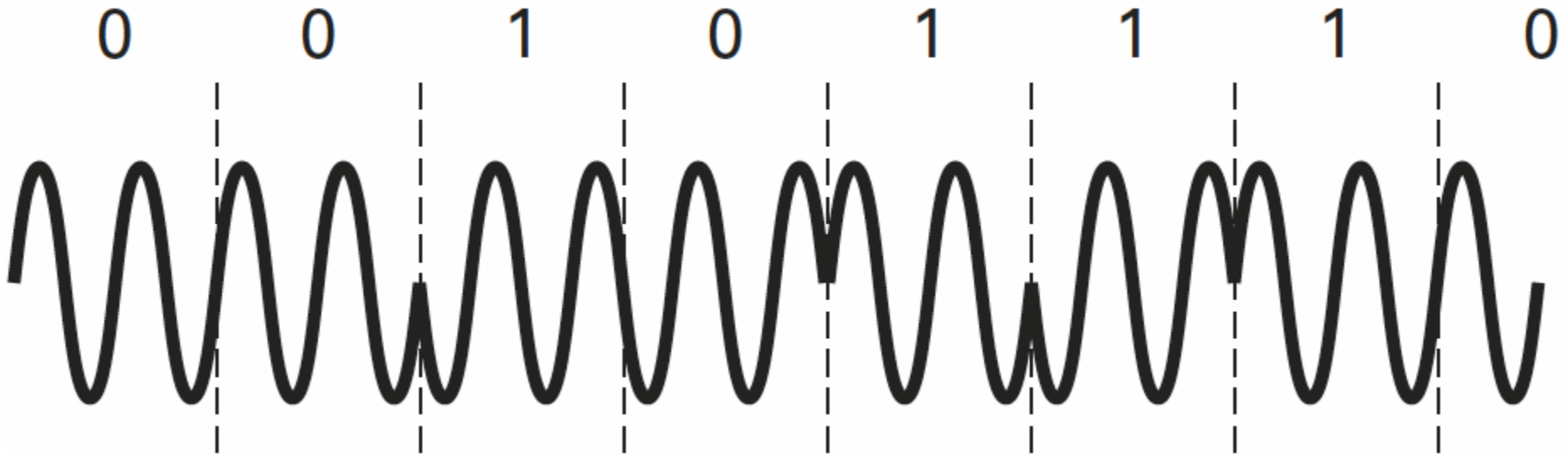


Fig. 7.106. Señal modulada BPSK con sincronización de la señal NRZ sobre la portadora [1].

Moduladores

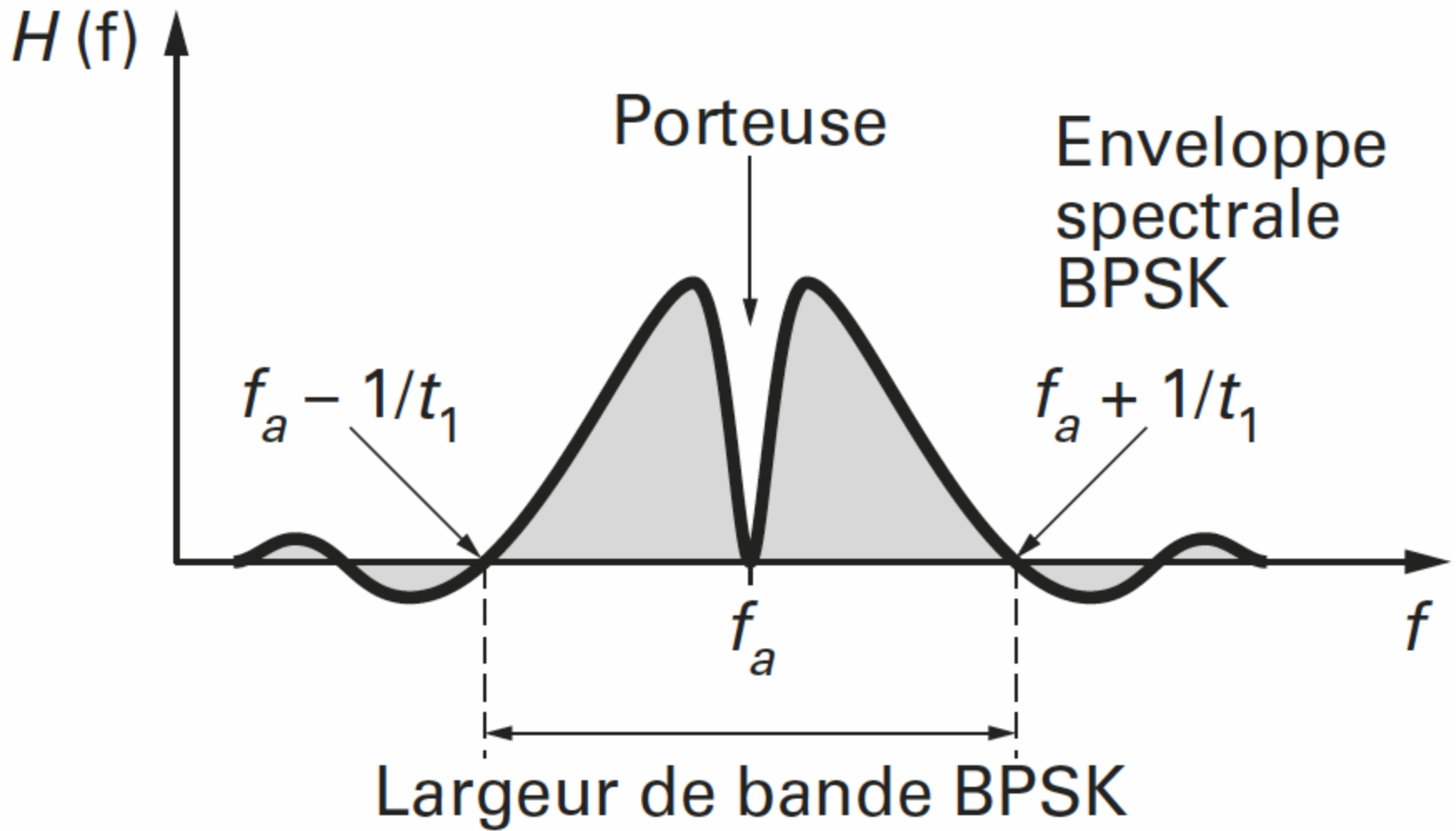


Fig. 7.107. Espectro de la señal BPSK [1]

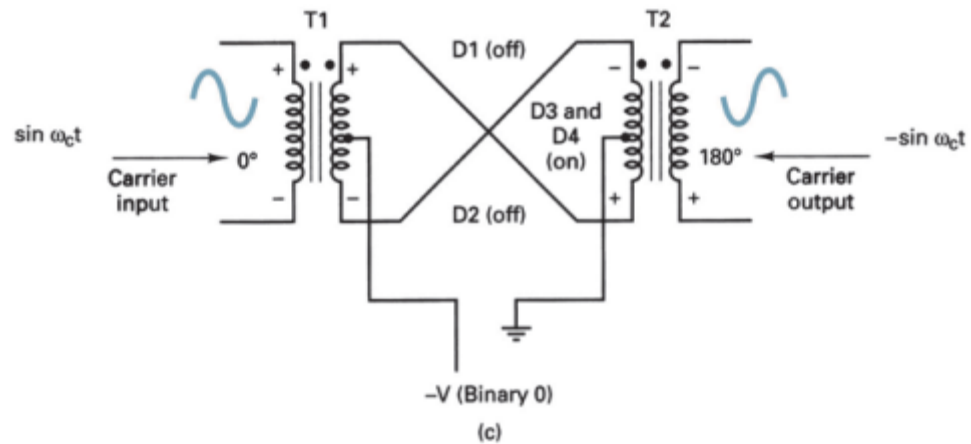
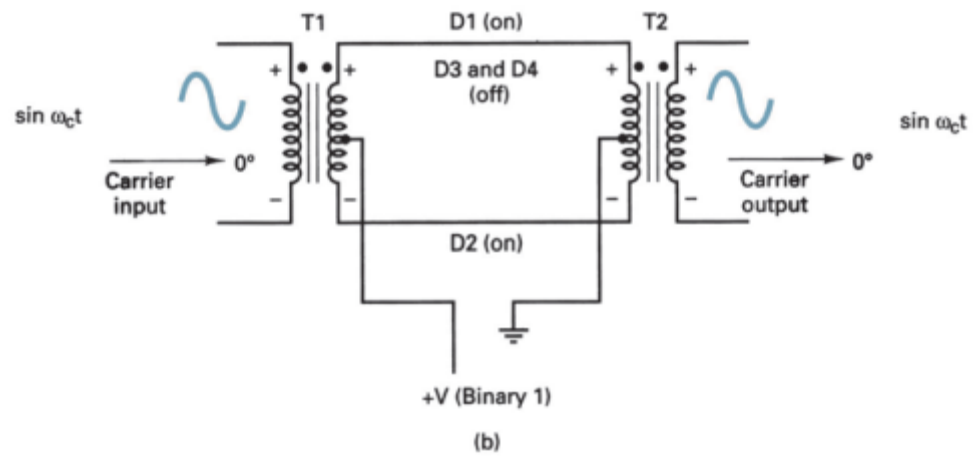
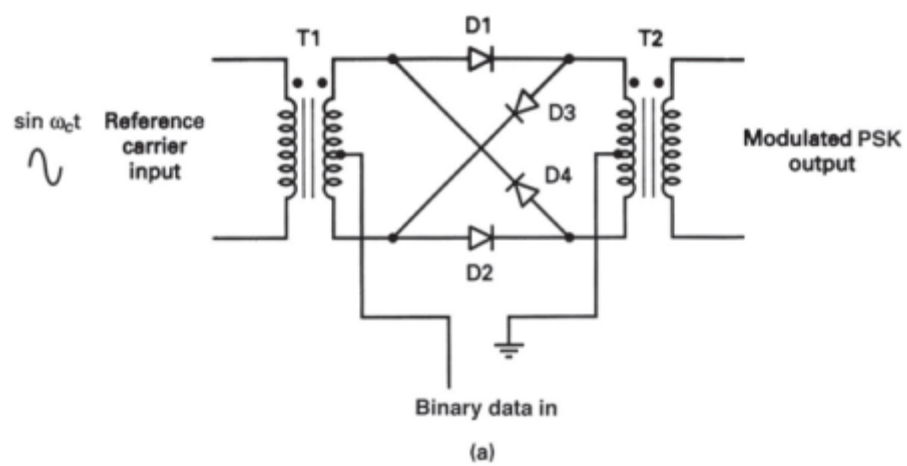
Moduladores

7.5.8.2. Modulador BPSK

Un mezclador balanceado o multiplicador pueden ser utilizados como modulador BPSK.

El diagrama en la Fig. 7.108 muestra la estructura interna del mezclador.

Fig. 7.108. Modulador BPSK de anillo balanceado;
(a) entrada de 1 lógico;
(b) entrada de 0 lógico [9]



Moduladores

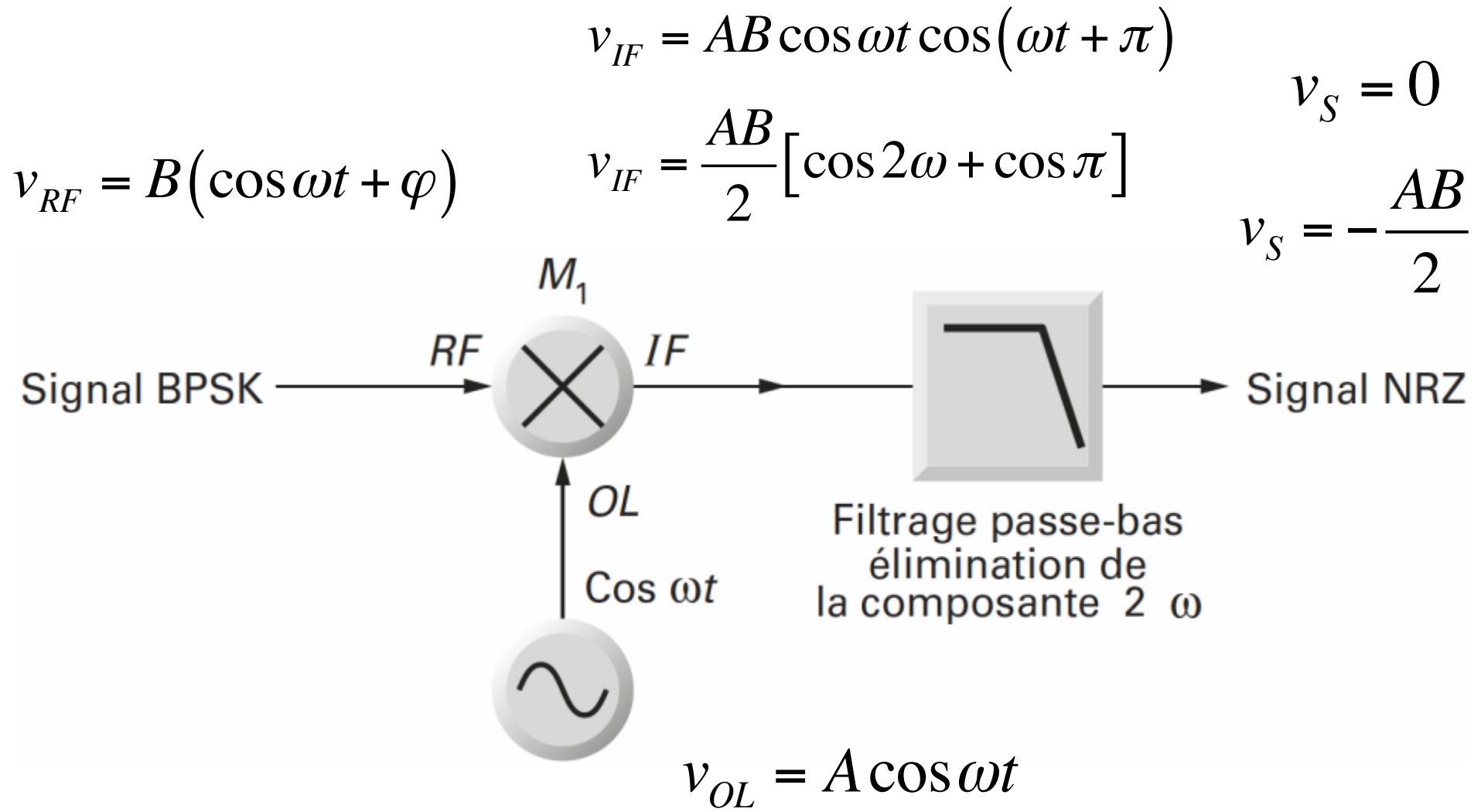
7.5.8.3. Demodulador BPSK

Hay dos métodos:

Demodulación coherente y demodulación no coherente.

7.5.8.4. Demodulador BPSK coherente

Modulateurs



Moduladores

7.5.9. Modulación diferencia de fase DBPSK

La modulación de frecuencia DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying) no transmite el bit 0 o el 1, sino una información relativa que se desprende de la comparación de dos bits sucesivos. Si estos dos bits sucesivos son idénticos, se transmite un 1, mientras que si son diferentes, se transmite el valor 0.

Moduladores

Tabla. 7.10. Diferentes etapas de codificación y modulación del emisor

Mensaje		0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1
Codificación	1 previo	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
Fase BPSK emitida	π	0	0	0	0	π	π	0	π	0	0	0

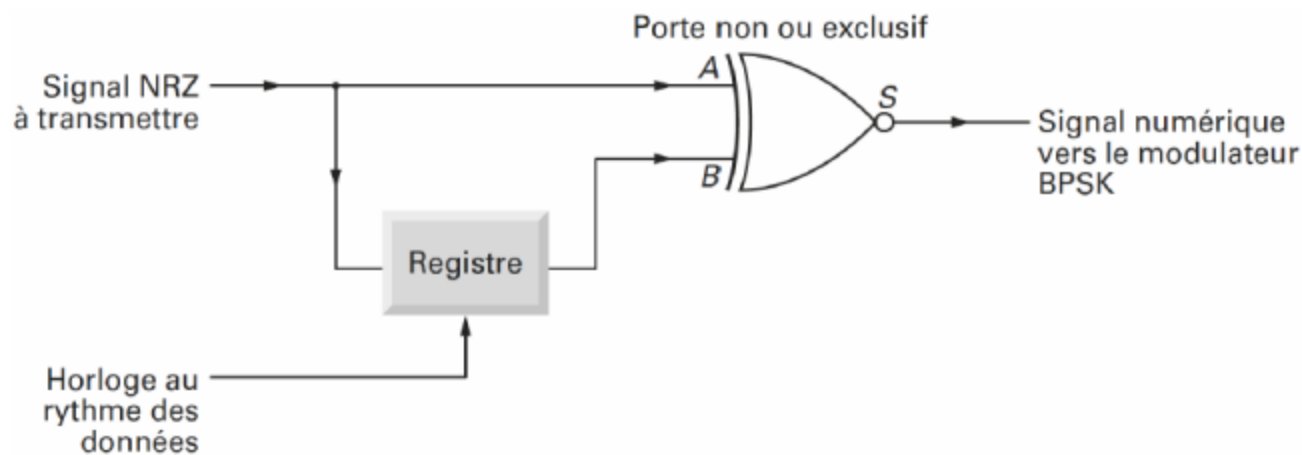


Fig. 7.111. Codificador para la señal DBPSK [1]

7.5.12. Esquema de un demodulador real BPSK

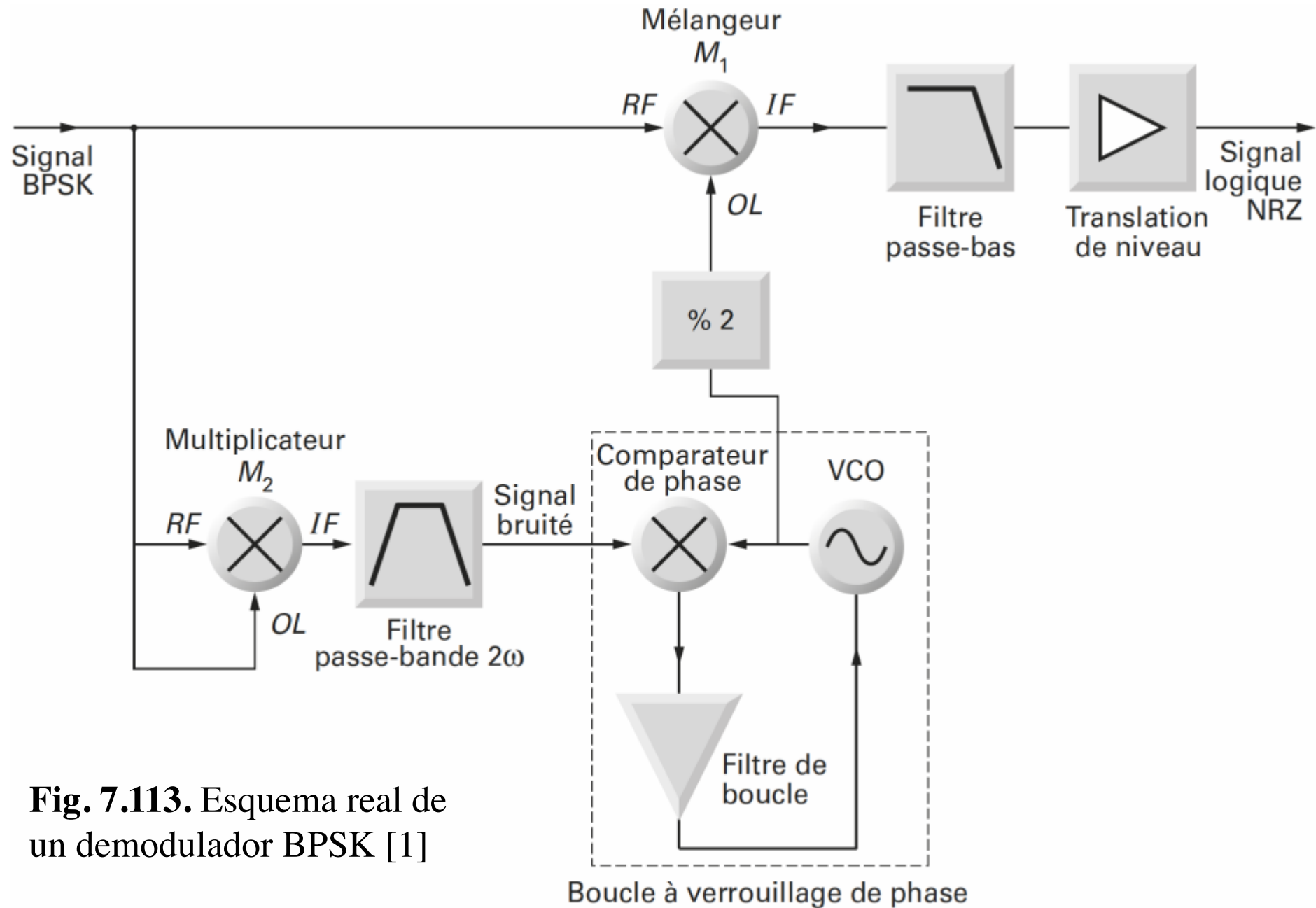


Fig. 7.113. Esquema real de un demodulador BPSK [1]

Moduladores

7.5.14. Modulación QPSK

QPSK es Quaternary Phase Shift Keying (QPSK), o Quadrature PSK.

La densidad espectral de potencia PSD de una señal modulada en fase no depende del número de estados posibles.

Cualquiera sea el número de estados, el PSD estará representado por la curva de la Fig. 7.114 y la banda se limitará a lo estrictamente necesario, o el valor de $1 / T$.

Moduladores

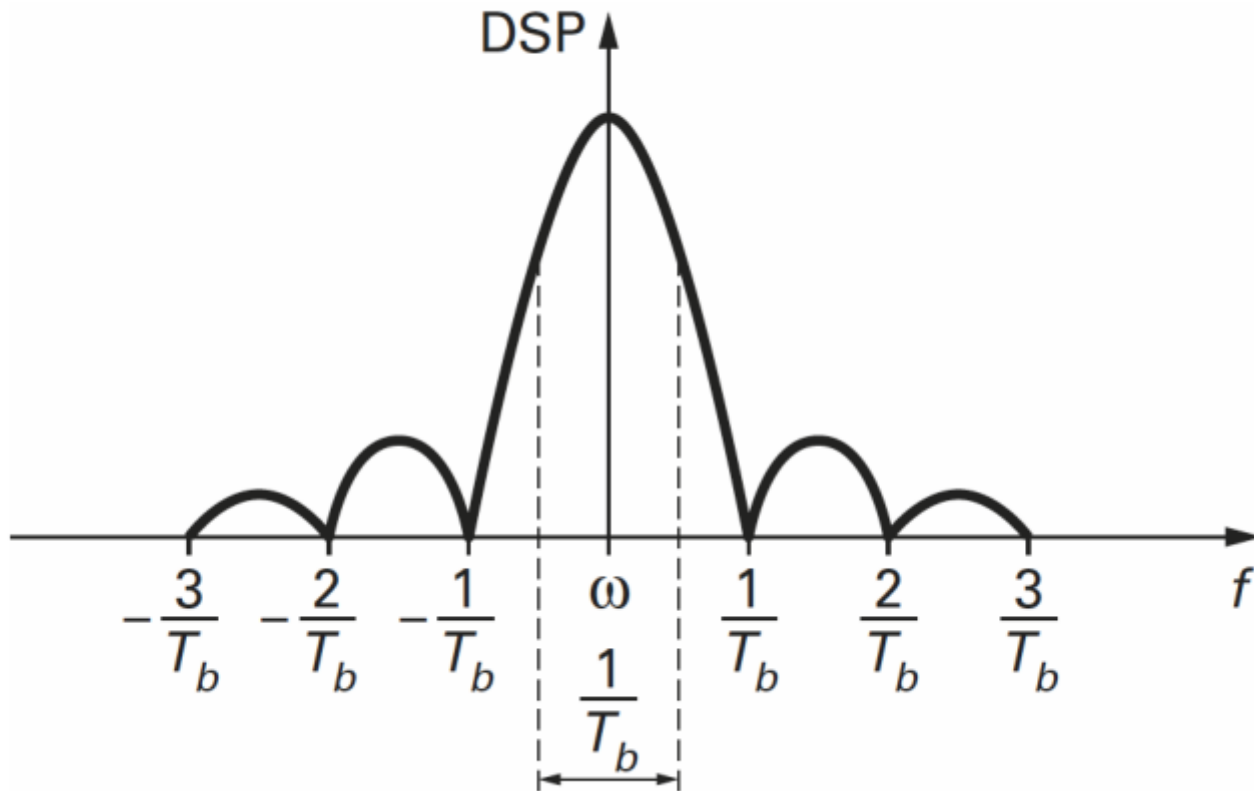


Fig. 7.114. Densidad espectral de potencia (PSD) de las señales PSK limitadas a la banda $1/T_b[1]$

Moduladores

7.5.15. Moduladores QPSK

La Fig. 7.115 muestra un diagrama en bloques de un modulador QPSK. Básicamente es una combinación de dos moduladores que reciben portadoras en cuadratura.

Moduladores

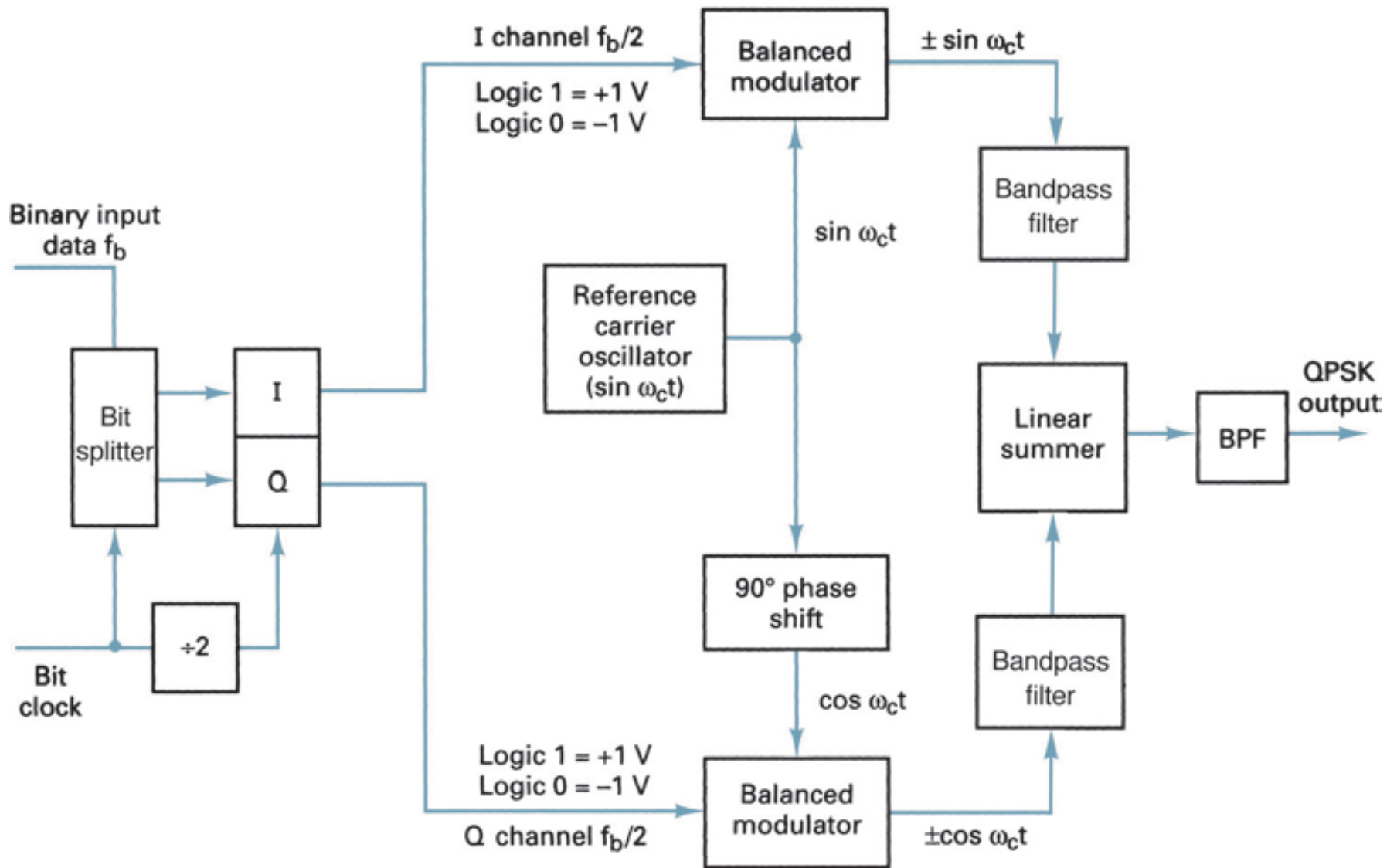


Fig. 7.115. Estructura del modulador QPSK [9]

Moduladores

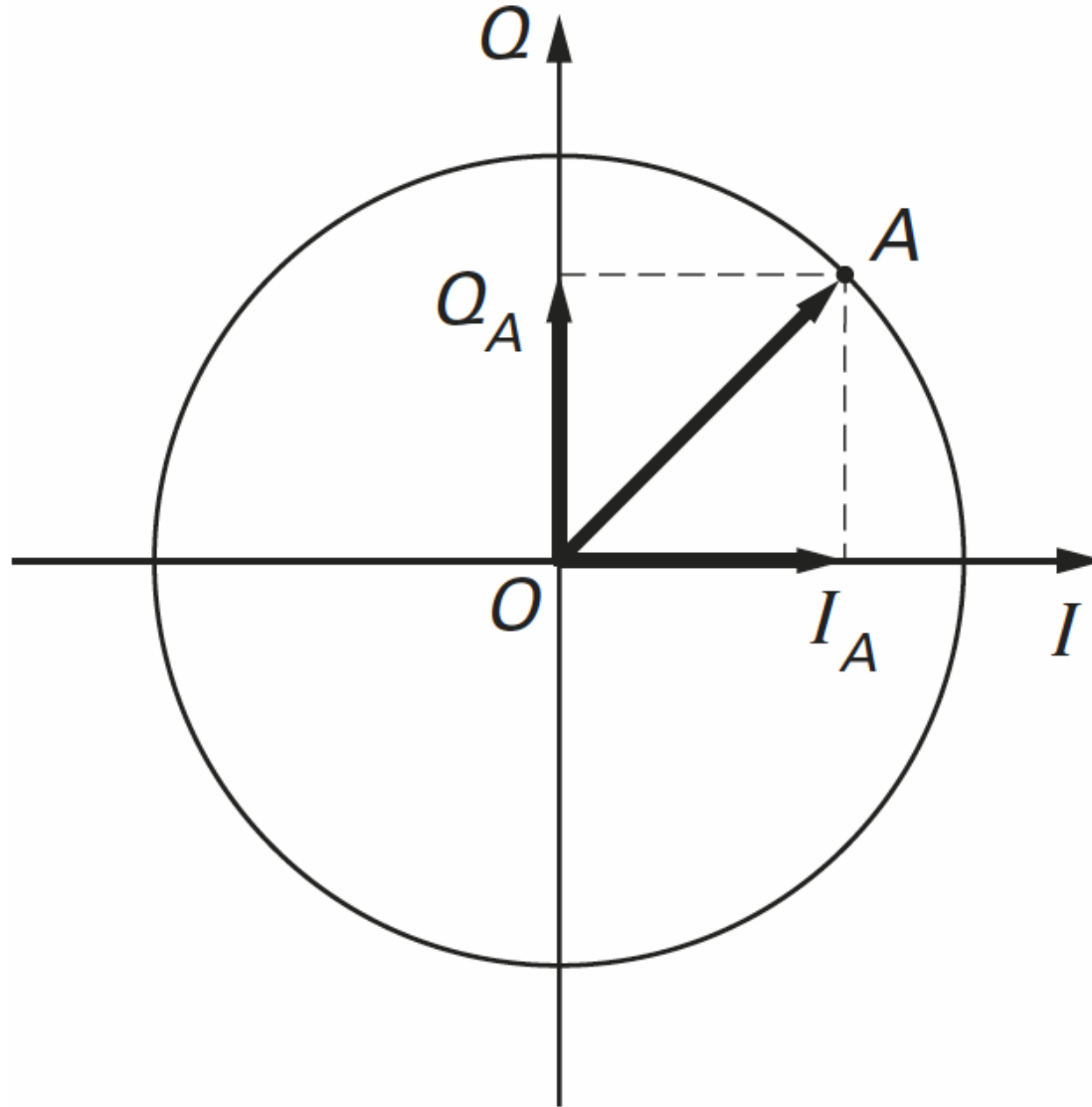


Fig. 7.116. Representación en coordenadas Polares de los datos IQ que se transmiten [1]

Moduladores

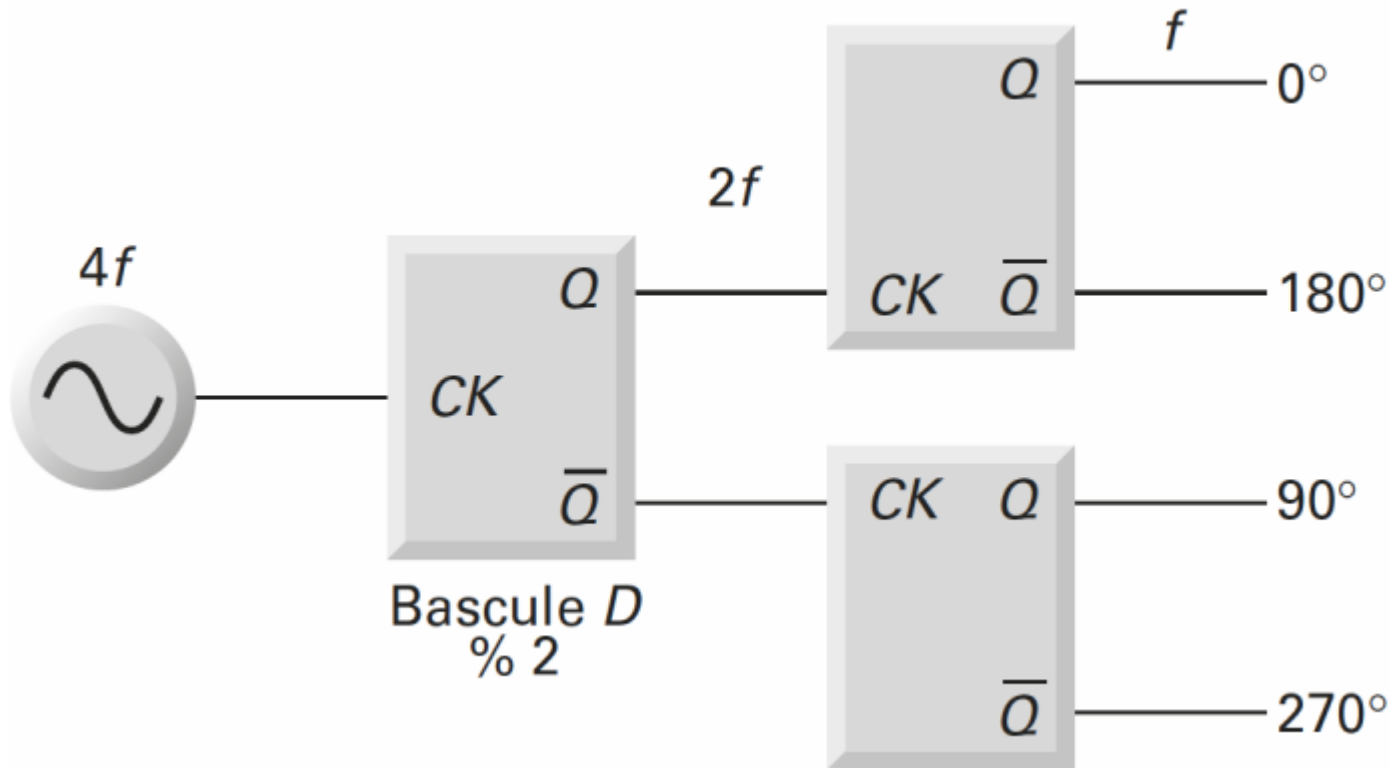


Fig. 7.117. Generación de dos portadoras en cuadratura por medio de captadores [1]

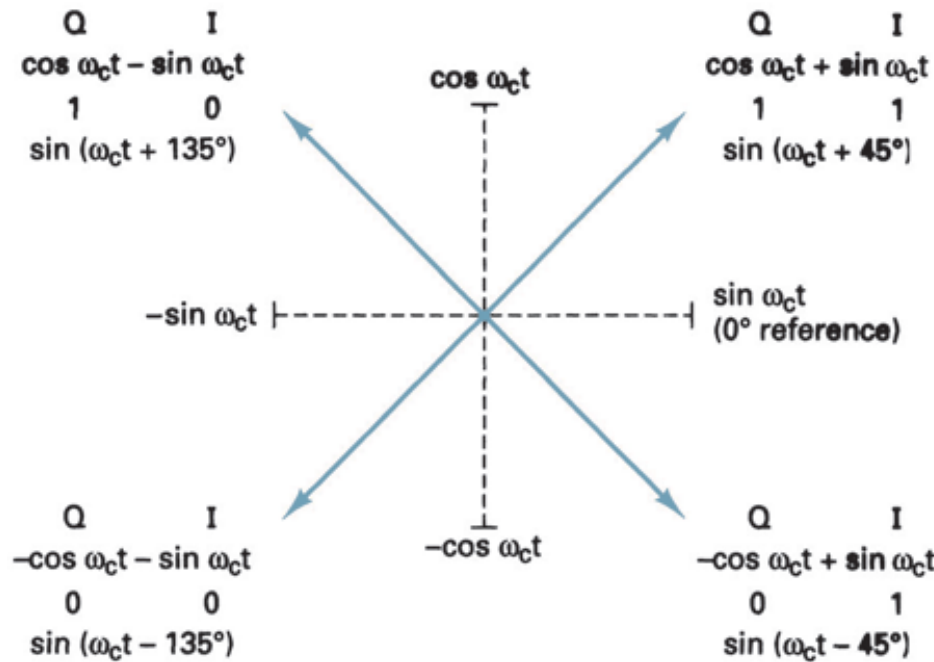
Moduladores

Tabla. 7.12. Modulación QPSK para un alfabeto de 2 bits y cuatro puntos

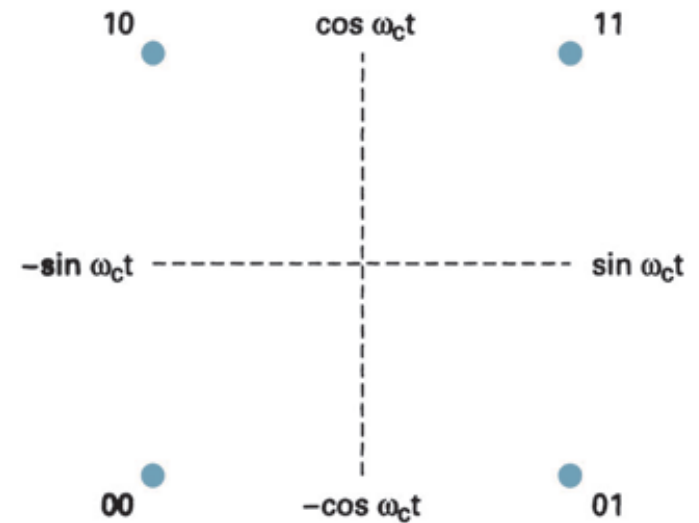
Alfabeto de 2 bits a transmitir	I	Q	φ
11	$A \frac{\sqrt{2}}{2}$	$-A \frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{7\pi}{4}$
10	$-A \frac{\sqrt{2}}{2}$	$-A \frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{5\pi}{4}$
00	$-A \frac{\sqrt{2}}{2}$	$A \frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{3\pi}{4}$
01	$A \frac{\sqrt{2}}{2}$	$A \frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\pi}{4}$

Binary input		QPSK output phase
Q	I	
0	0	-135°
0	1	-45°
1	0	+135°
1	1	+45°

(a)



(b)



(c)

Fig. 7.118. Ejemplos de constelación para la modulación QPSK de dos bits y cuatro puntos [9]

Moduladores

7.5.17. Demodulador QPSK

El diagrama de bloques del modulador de QPSK se muestra en la Fig. 7.121. Este demodulador es aplicable a toda la modulación PSK cualquiera que sea el número de estados.

La demodulación es coherente y suponemos que el oscilador local se sincroniza con la señal transmitida.

Moduladores

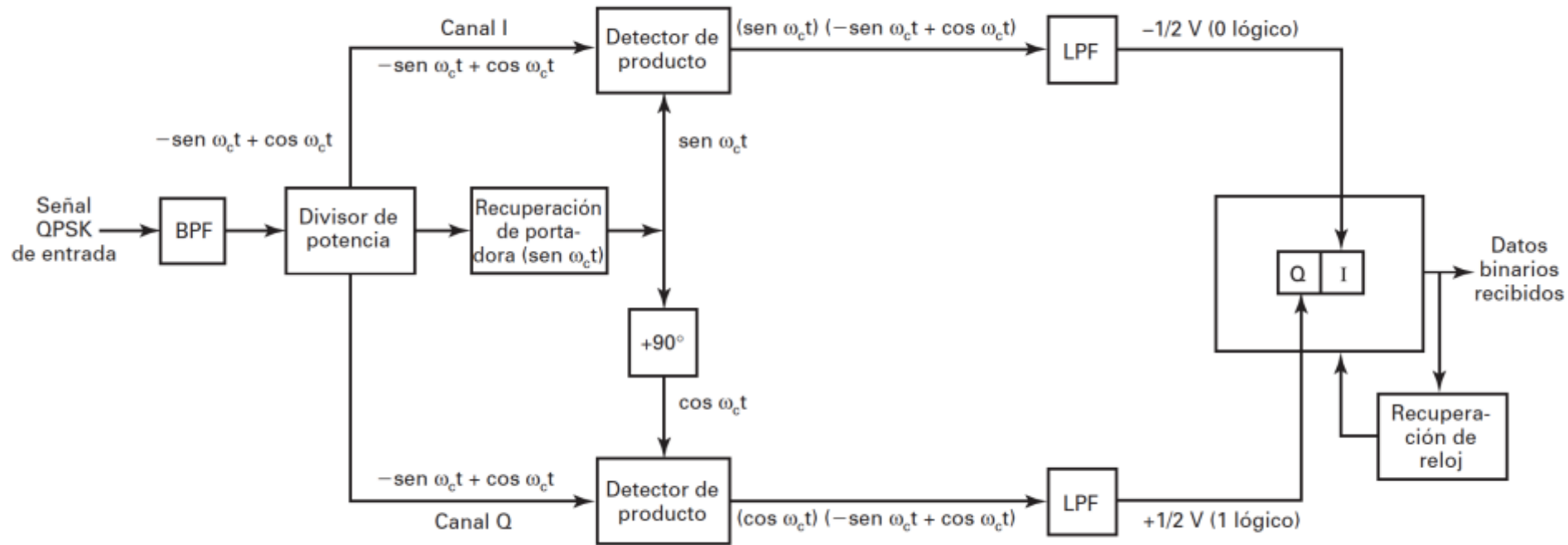


Fig. 7.121. Diagrama en bloques de un demodulador IQ, o QPSK [9]

Moduladores

7.5.23. 16-PSK

Bits de código	Fase	Bits de código	Fase
0000	11.25°	1000	191.25°
0001	33.75°	1001	213.75°
0010	56.25°	1010	236.25°
0011	78.75°	1011	258.75°
0100	101.25°	1100	281.25°
0101	123.75°	1101	303.75°
0110	146.25°	1110	326.25°
0111	168.75°	1111	348.75°

Moduladores

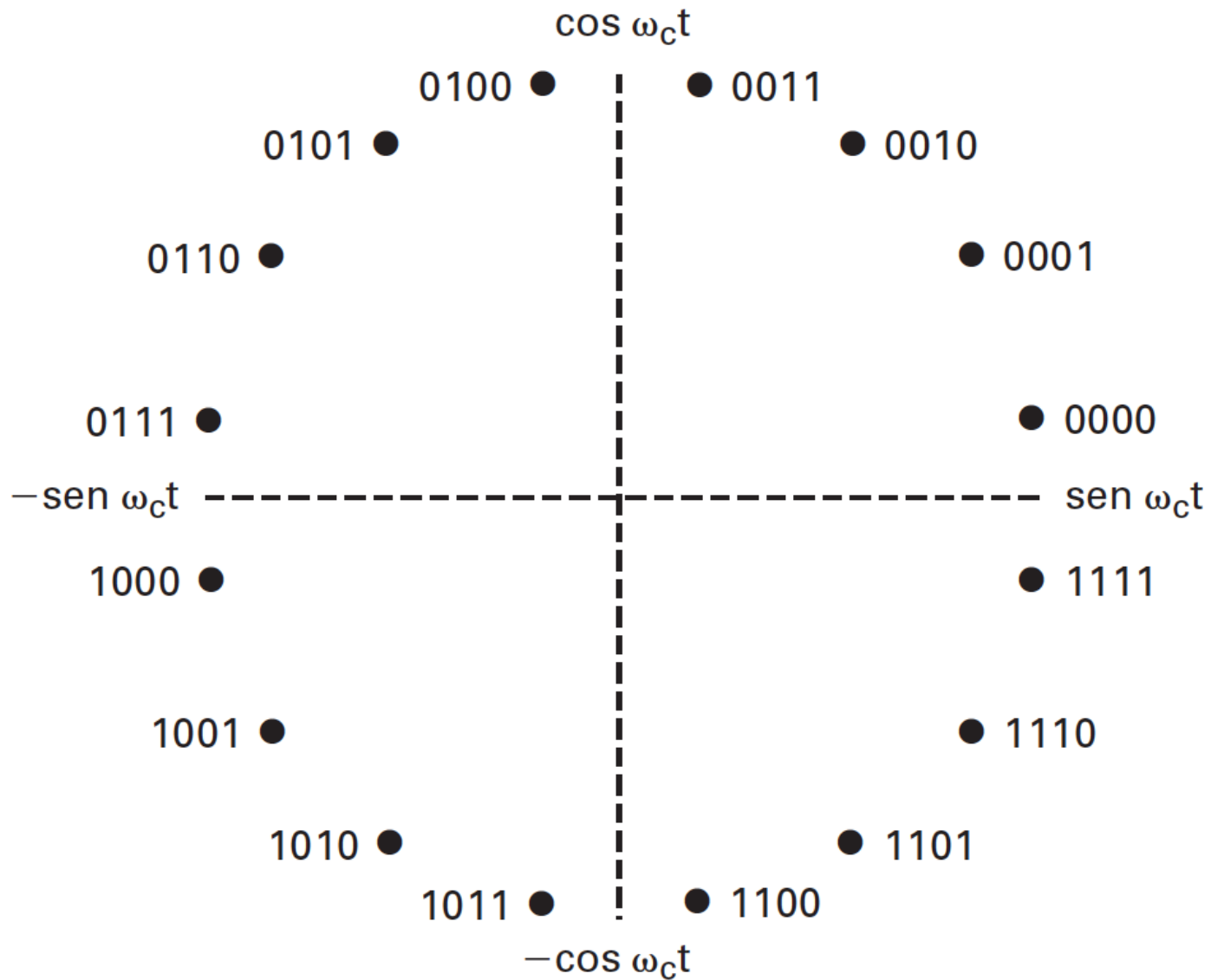


Fig. 7.129. Modulador 16-PSK. (a) tabla de verdad, (b) diagrama de constelación [9].

Moduladores

7.5.25. Modulación en amplitud de dos portadoras en cuadratura QAM

QAM, o Quadrature Amplitud Modulation, o modulación de amplitud en cuadratura.

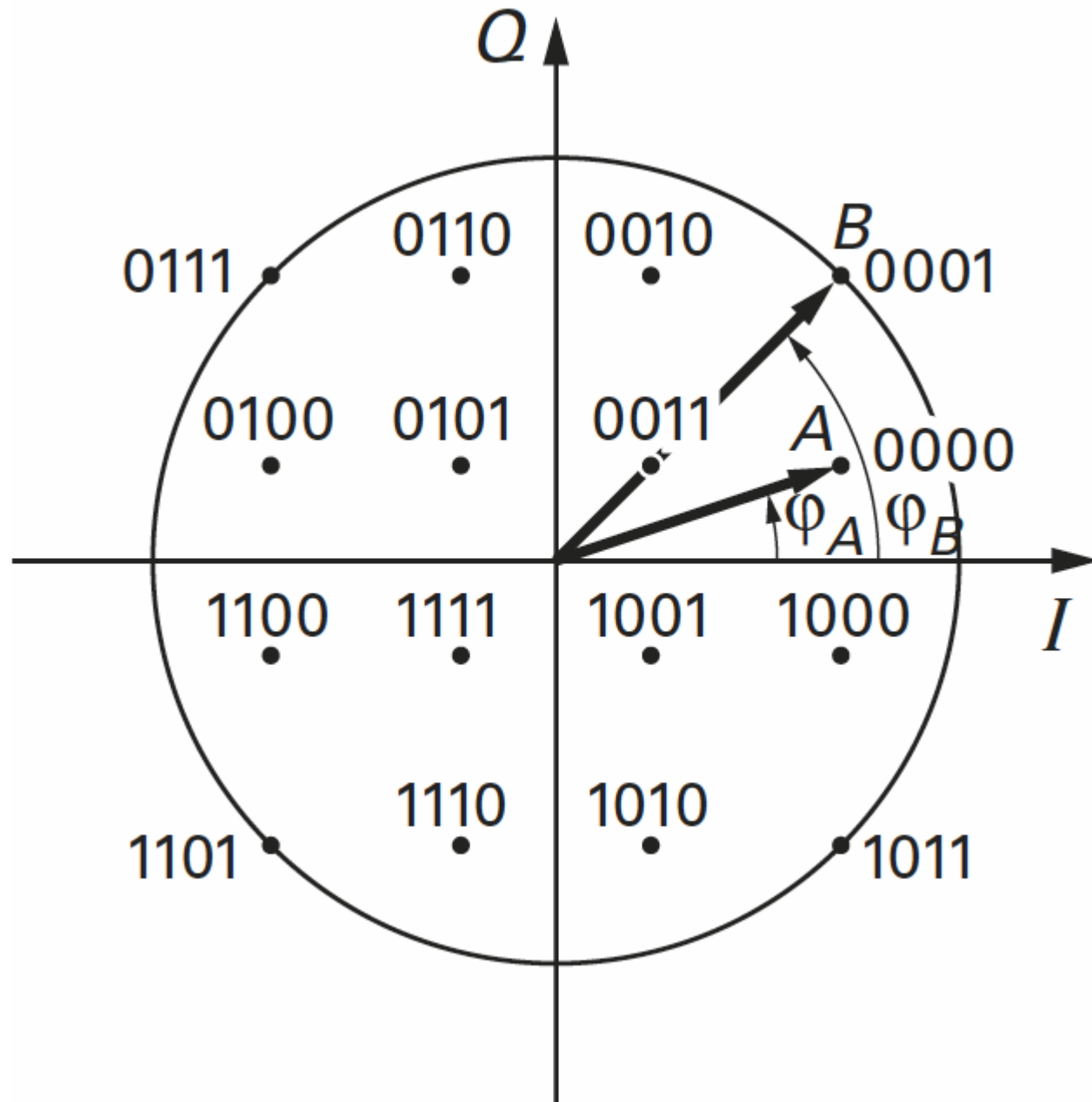
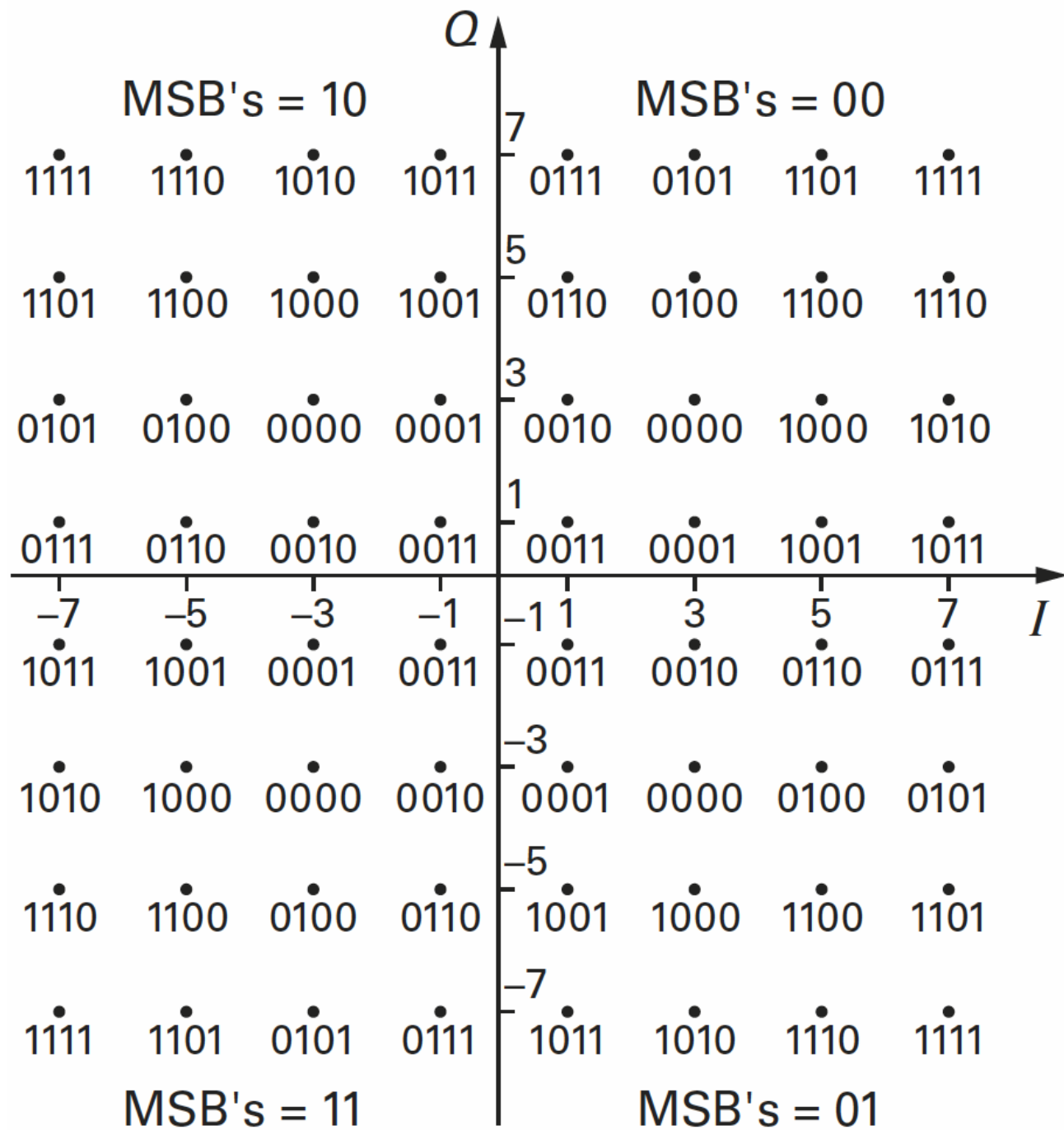


Fig. 7.132. Constelación para una Modulación 16QAM [1] modulación 64QAM [1]



Moduladores