

Modulaciones Digitales para Canales de Banda Pasante

Autor

Gerez Jimenez, Juan Jose Armando

Resumen

Este trabajo explora las técnicas de modulación digital para la transmisión de datos en canales de banda pasante, abordando modulaciones en amplitud, frecuencia y fase, como ASK, FSK, MSK, GMSK, BPSK, QPSK, 8-PSK y 16-QAM. Se investigan los principios de operación y ventajas de cada tipo de modulación, especialmente en canales afectados por ruido blanco gaussiano aditivo y otros impedimentos como la atenuación y el desfasaje. Además, se desarrollan simulaciones para evaluar la tasa de error de bit (BER) en diversas condiciones de canal. Los resultados de las simulaciones muestran cómo la elección de la modulación y el diseño de sincronización afectan el desempeño de los sistemas de comunicación digital.

Introducción

La evolución de las telecomunicaciones ha llevado a una demanda creciente de métodos de modulación eficientes para transmitir grandes cantidades de datos de manera confiable y rápida. Las modulaciones digitales, especialmente en canales de banda pasante, son esenciales en sistemas modernos de comunicación debido a su capacidad para mejorar la "eficiencia espectral" y la resistencia al ruido y otros efectos indeseados. Los métodos de modulación en amplitud, fase y frecuencia se adaptan a los distintos requerimientos de los sistemas, ya sea optimizando la tasa de datos, minimizando el uso de ancho de banda o incrementando la robustez frente a la interferencia.

El propósito de esta monografía es analizar en profundidad las características de los principales esquemas de modulación digital utilizados en canales de banda pasante. Además, se desarrolla una serie de simulaciones que modelan condiciones realistas de transmisión con ruido y se mide el rendimiento en términos de la tasa de error de bit (BER), lo cual permite evaluar la eficacia de cada esquema en un contexto práctico de comunicaciones digitales.

Desarrollo

1. Modulaciones Digitales en Amplitud, Fase y Frecuencia

Modulación ASK (Amplitude Shift Keying)

La modulación ASK representa datos digitales variando la amplitud de una señal portadora fija (ver fig. 1). Este esquema es sencillo en términos de implementación, pero sufre de baja resistencia al ruido y es sensible a variaciones de amplitud causadas por el canal. ASK se emplea principalmente en aplicaciones donde la simplicidad es prioritaria y el canal es controlado y menos ruidoso. La eficiencia de ASK es limitada, lo que la hace menos ideal para aplicaciones que requieren alta fidelidad y resistencia al ruido.

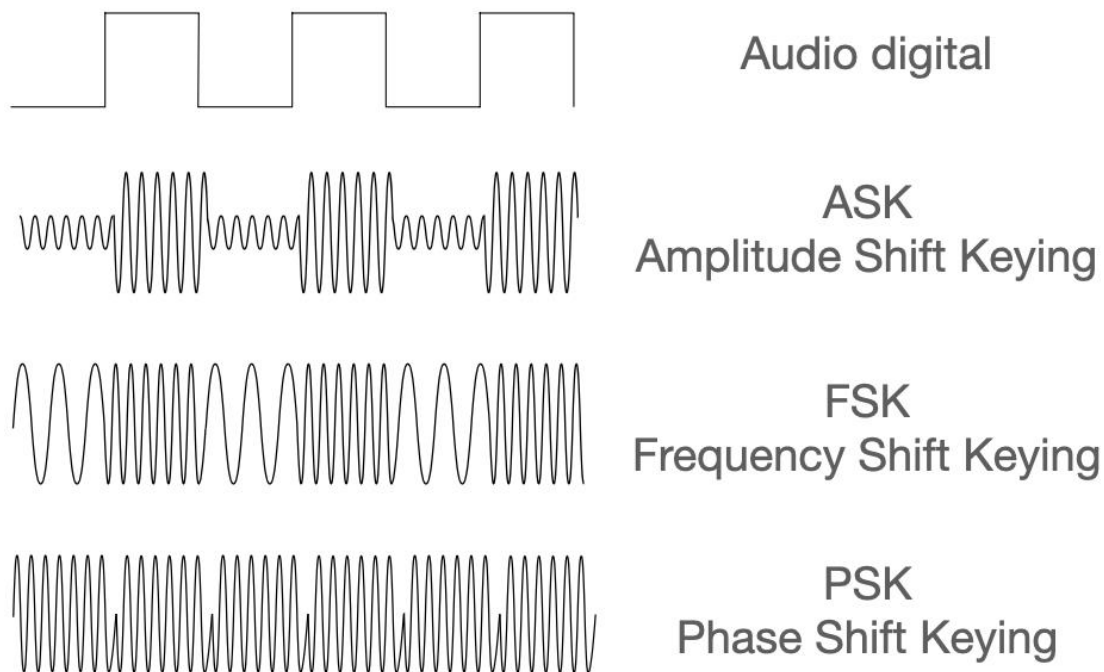


Fig. 1: Formas de onda de distintas modulaciones.

Modulación FSK (Frequency Shift Keying) y MSK. (Minimum Shift Keying) (*J. Proakis, McGraw-Hill, 1995.*)

FSK modula la frecuencia de la portadora según los datos binarios (ver fig. 1), ofreciendo mayor resistencia al ruido en comparación con ASK. Este tipo de modulación se emplea en ambientes con alta interferencia y en sistemas que priorizan la integridad de la señal sobre la eficiencia espectral. Por otro lado, MSK es una forma optimizada de FSK que minimiza la separación entre frecuencias (ver fig. 2), reduciendo la banda ocupada y ofreciendo una transición continua entre símbolos, lo que mejora la eficiencia en términos de ancho de banda.

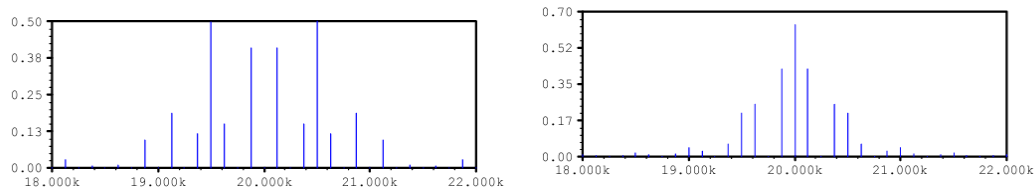


Fig. 2: Espectro FSK vs MSK

Modulación PSK (Phase Shift Keying) y QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) (*J. Proakis, McGraw-Hill, 1995.*)

PSK utiliza cambios en la fase de la portadora para representar datos digitales (ver fig. 1). Este método es particularmente robusto frente al ruido y permite múltiples variantes (como BPSK, QPSK y 8-PSK) que incrementan la cantidad de datos transmitidos al utilizar más de una fase de la portadora. QPSK es uno de los métodos de PSK más comunes y eficientes, ya que permite transmitir dos bits por símbolo mediante el uso de cuatro fases, duplicando así la tasa de datos en comparación con BPSK, sin requerir un incremento de ancho de banda significativo.

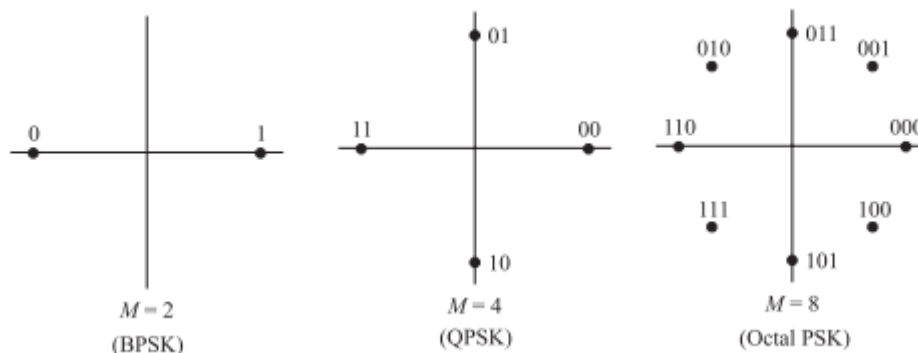


Fig. 3: Constelaciones de BPSK, QPSK y 8PSK.

Modulación QAM (Quadrature Amplitude Modulation) (*R. G. Gallager, 2008*)

QAM combina variaciones en la amplitud y en la fase para representar datos, lo que permite una alta eficiencia espectral. Las modulaciones de orden superior, como 16-QAM (ver fig. 4) y 64-QAM, transmiten múltiples bits por símbolo, lo que las hace ideales para sistemas de alta velocidad de transmisión y ancho de banda limitado. Sin embargo, las modulaciones QAM son más susceptibles al ruido y la distorsión que otros esquemas, ya que cualquier alteración en la amplitud o fase afecta la calidad de la señal recibida.

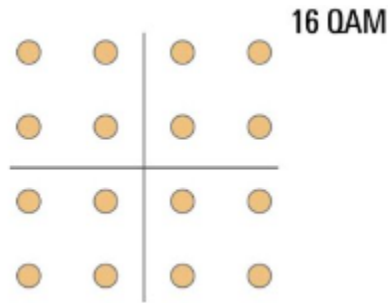


Fig. 4: Constelacion de 16QAM.

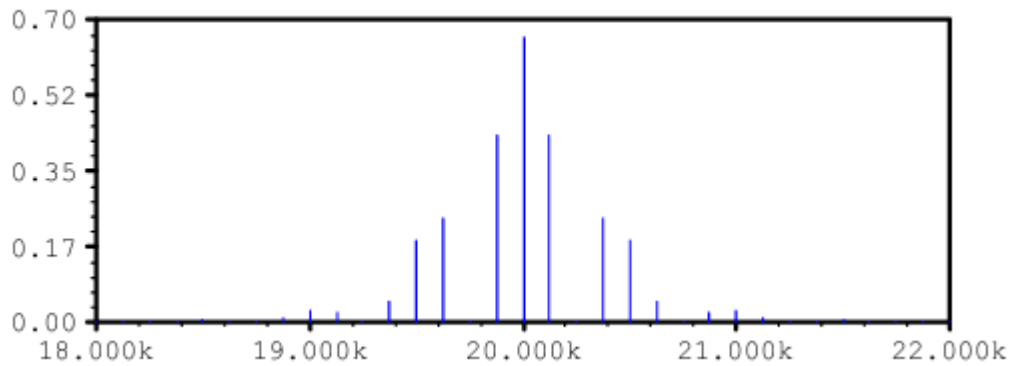


Fig. 5: Espectro GMSK.

2. Moduladores y Demoduladores para Canales de Banda Pasante

Los moduladores y demoduladores son componentes clave en los sistemas de comunicación digital de banda pasante. Los moduladores convierten las secuencias de bits en señales moduladas adecuadas para la transmisión a través del canal, mientras que los demoduladores realizan el proceso inverso. Estos componentes

deben ser diseñados teniendo en cuenta las características del canal y los posibles efectos de interferencia, como ruido y desfase de fase.

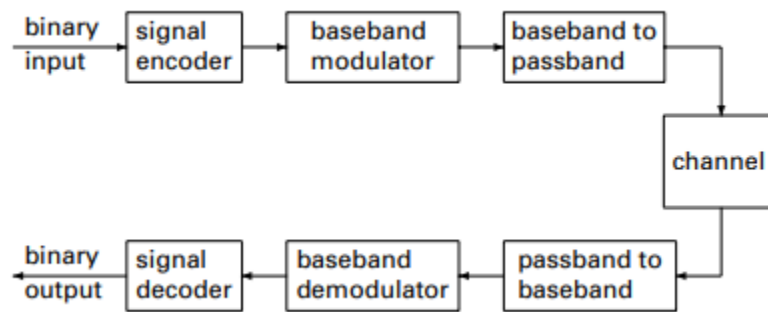


Fig. 5: Modulador/demodulador QAM

%%% Ver en Bilbao más detalladamente...

Demoduladores Sincrónicos y Asincrónicos

Los demoduladores sincrónicos dependen de la sincronización precisa entre el transmisor y el receptor, lo que permite una detección de fase y frecuencia exacta de la señal. En contraste, los demoduladores asincrónicos no requieren una referencia de fase exacta, lo que los hace más adecuados para canales donde la sincronización puede ser difícil de mantener. Sin embargo, los demoduladores asincrónicos tienden a tener un mayor índice de error debido a la falta de exactitud en la recuperación de la señal.

3. Control Automático de Frecuencia y Ganancia

Los sistemas de comunicación digital frecuentemente implementan **control automático de frecuencia (AFC)** y **control automático de ganancia (AGC)** para corregir variaciones de la señal durante la transmisión. El AFC ajusta la frecuencia del oscilador local para igualar la frecuencia de la señal recibida, compensando posibles desviaciones en la transmisión y evitando errores en la demodulación. El AGC, por su parte, ajusta la amplitud de la señal de entrada para asegurar que el nivel de la señal esté dentro de un rango óptimo para la demodulación, lo cual es crucial en escenarios donde la señal sufre atenuación significativa.

4. Sincronización de Símbolo (J. Proakis, McGraw-Hill, 1995.)

La sincronización de símbolo es esencial para la recuperación precisa de la información en sistemas de comunicación digital. Este proceso asegura que el

receptor muestree la señal recibida en los instantes de tiempo correctos, maximizando así la probabilidad de detección precisa de los bits. Existen diversas técnicas de sincronización que, dependiendo del tipo de canal y las condiciones de ruido, pueden mejorar sustancialmente el desempeño del sistema en términos de BER.

Ver cap 5 proakis

5. Simulación de Desempeño con Ruido y Efectos de Canal

Para evaluar el desempeño de los sistemas de modulación digital en condiciones más “realistas”, se realizaron simulaciones de un canal con ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN), atenuación y desfasaje. Adicionalmente, se modeló la diferencia de frecuencia entre el oscilador local del receptor y el transmisor. Los resultados de las simulaciones, medidos en términos de la tasa de error de bit (BER), permiten observar cómo los distintos esquemas de modulación responden a los efectos de ruido y limitación de frecuencia.

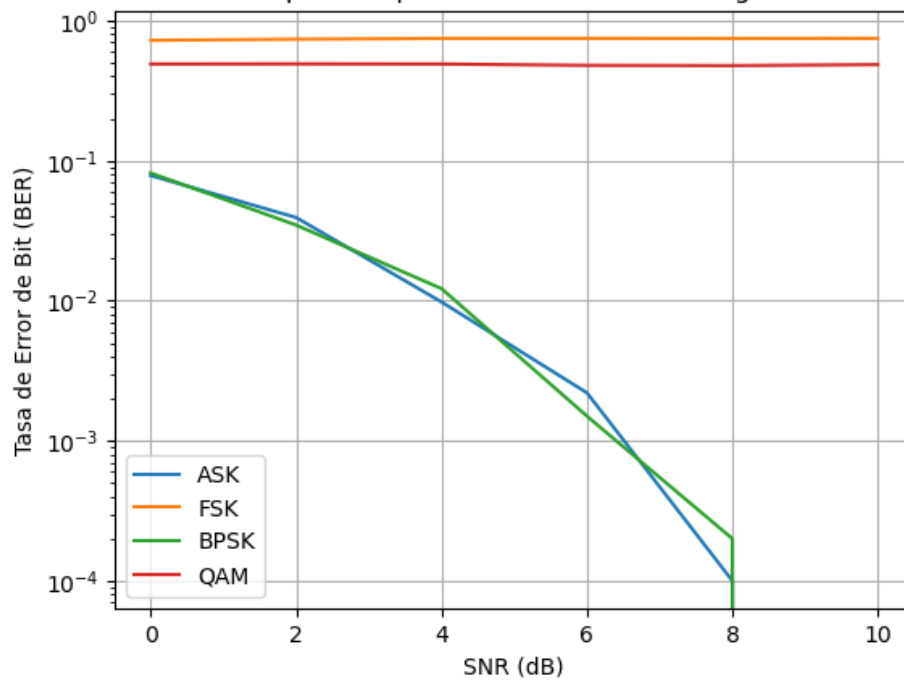
Resultados de la Simulación

ASK y BPSK: Ambas modulaciones tienen una mejoría significativa en la BER al aumentar el SNR, especialmente en el caso de BPSK. Esto es esperado, ya que BPSK es más robusto frente al ruido.

FSK: La modulación FSK muestra una BER alta constante en todos los niveles de SNR, lo cual indica que la implementación podría requerir ajustes en la simulación para reflejar de manera más precisa el comportamiento de FSK en un canal AWGN.

QAM: La modulación QAM tiene un rendimiento intermedio entre ASK y BPSK, aunque no muestra una mejoría tan notable como BPSK al incrementar el SNR. Esto es esperado, ya que QAM es más susceptible al ruido en comparación con BPSK debido a la variación en amplitud y fase.

Tasa de Error de Bit para Esquemas de Modulación Digital en Canal AWGN



Conclusiones

Referencias

“Principles of Digital Communication”, R. G. Gallager, Ed. Cambridge Univ. Press; 2008.

“Digital Communications”, J. Proakis, McGraw-Hill, 1995.

“Apuntes Senales Electricas” Bilbao, 2024.

