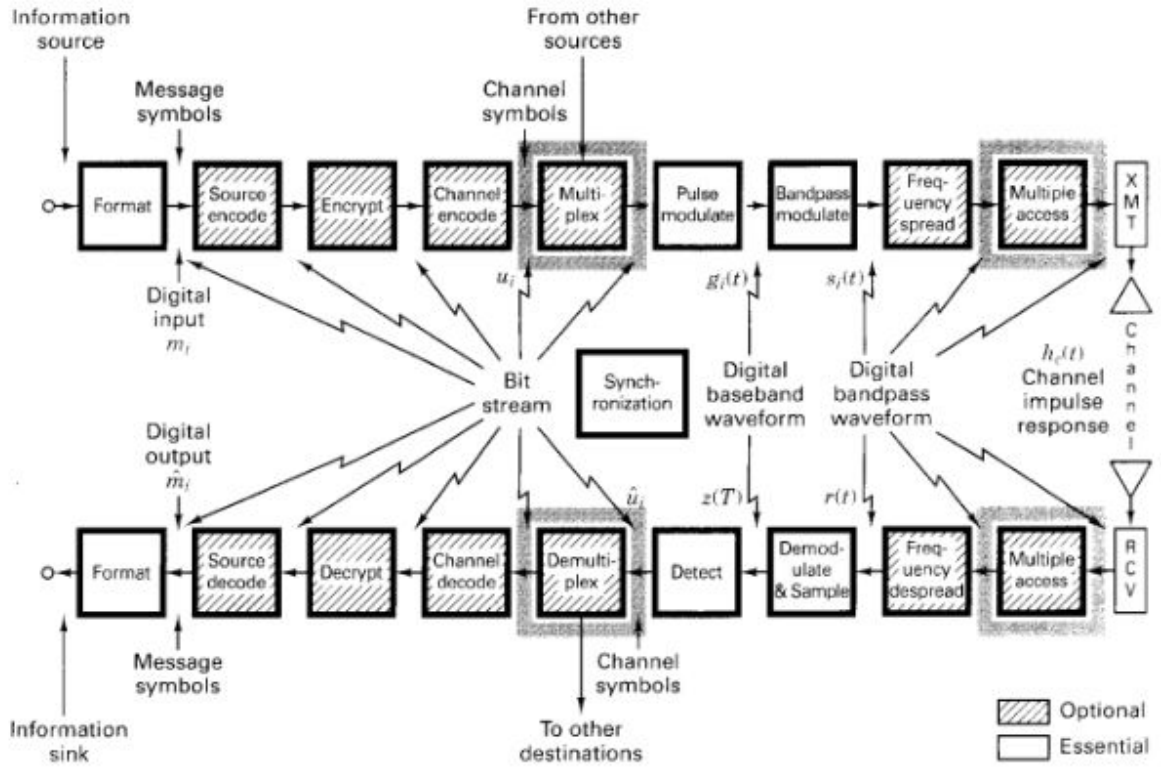
Métodos de Acceso

Capítulo 6: Jammer



En los principios del desarrollo de la técnica de espectro ensanchado se consideró al jammer como una interferencia malintencionada externa al sistema. La razón fundamental de este análisis era la aplicación militar para la cual estaba pensada la técnica de modulación. Sin embargo, en aplicaciones comerciales donde se utiliza esta forma de acceso, se considera jammers a todo el resto de usuarios que están presentes en el sistema, que si bien no son malintencionados, al compartir el recurso de comunicación (tiempo y frecuencias) generan potenciales interferencias entre sí.

Para entender cómo pueden afectar las diferentes interferencias a la performance del sistema se debe retornar a los conceptos de jammer desarrollados dentro del marco militar. ¿Por qué? Porque se estudió y desarrolló conceptos acerca de las diferentes técnicas que podían emplear estos dispositivos para degradar la calidad de un sistema. De esta forma, se podía entender cómo lo afectaba y con que recursos importantes contaba el diseñador para evitarlos.

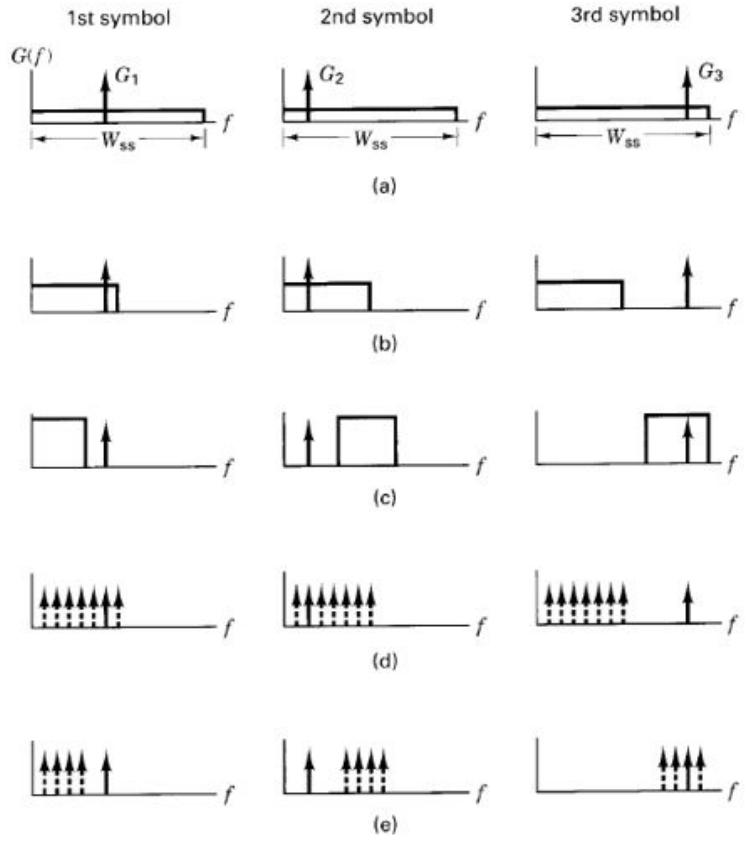
En este contexto, el principal objetivo del jammer consiste en degradar las comunicaciones confiables a su adversario al menor costo posible y el objetivo del comunicador es desarrollar un sistema de comunicación robusto a las interferencias, entendiendo que:

→ La invulnerabilidad completa no es posible (se puede vulnerar pero tendría un costo elevado para el jammer)

→ El jammer tiene conocimiento a priori de las bandas de frecuencias utilizadas, el timing y tráfico.

→ Lo que desconoce el jammer es el código PN que está utilizando el transmisor que desea interrumpir.

Es mediante estas consideraciones que se plantean distintas formas de onda utilizadas por los jammer para un sistema con FH-MFSK, habiendo 5 potenciales casos dentro de los cuales se puede destacar al: Ruido de banda completa, ruido de banda parcial y ruido de a paso. Estas 3 formas de interferencia ocupan un determinado ancho de banda respecto al utilizado por el transmisor que puede ser parcial o total pero también existen otros 2 casos que consisten en la implementación de tonos y se los conoce como: Tonos de banda parcial y tonos de a paso. Para poder observar cómo afectan estas distintas formas de onda, se grafican las densidades espectrales de potencia tanto para jammer como para señal suponiendo la transmisión de 3 símbolos para ver cómo interactúa o afecta el jammer para los distintos símbolos.



Como se muestra en las imágenes anteriores, en los tres primeros casos, la densidad espectral de potencia de jammer tiene una forma muy similar a la del ruido blanco gaussiano de banda limitada. Sin embargo, puede observarse que a medida que el ancho de banda ocupado por el interferente es cada vez menor, la densidad espectral de potencia crece en amplitud, debido a que en los tres casos el jammer tiene una potencia fija.
Con esta limitante, el jammer puede tomar diversas decisiones. Si decide ocupar todo el ancho de banda de la señal spread spectrum se asegura de interferir a todos los símbolos transmitidos pero debe distribuir la misma potencia en un ancho de banda mucho mayor, lo que genera que las interferencias para el sistema si bien están presentes todo el tiempo, son muy pequeñas. Esto último motiva a considerar otra estrategia como lo es la interferencia por banda parcial, en donde mediante un estudio previo, el jammer opta por interferir una fracción del ancho de banda total inicial, con la finalidad de generar una

interferencia mayor sobre la banda que supone que se encontraran la mayor parte del tiempo las señales del transmisor a corromper. Teniendo presentes que la potencia utilizada es siempre la misma, al encontrarse en un ancho de banda menor, la interferencia será más nociva. Esto deja en evidencia que teniendo como limitación a la potencia transmitida, la utilización de mayor ancho de banda para lograr interferir a todos los símbolos del sistema durante todo el tiempo no logra los mismos efectos nocivos que implementar un pequeño ancho de banda. A costas de introducir interferencias en fracciones de tiempo. Es por este motivo que el jammer puede implementar un ruido de banda parcial pero de paso. Esto implica combinar la interferencia en un ancho de banda limitado con una densidad espectral de potencia más alta con variaciones del espectro en el tiempo. De esta forma, el jammer busca a lo largo del tiempo enganchar en el dominio de la frecuencia una mayor cantidad de saltos de frequency hopping para interferir.

¿Logra el jamming con esta técnica generar la mayor cantidad de daño al sistema? Lo logra de alguna manera pero de forma ineficiente. Ya que los receptores de frequency hopping trabajan con procesos de heterodinaje con la señal de hopping y receptores no coherentes que están basados en el uso de filtros de banda de paso y detectores de energía. Entonces al utilizar una densidad espectral de potencia similar a la del ruido blanco gaussiano si bien logra interferencias, no logra inyectar la mayor cantidad de energía dentro de los filtros del receptor. ¿Qué sería lo ideal? Que el jammer pudiera ocupar todo el ancho de banda de la señal de spread spectrum con una densidad espectral de potencia en forma de tonos separados en frecuencia según la inversa del Thopping de manera tal, que cualquier salto realizado por el sistema spread spectrum generaría presencia de la mayor cantidad de interferencia. Sin embargo, el jammer debido a las limitaciones de potencia transmitida, decide abarcar una región espectral menor y variable en el tiempo utilizando una mayor densidad espectral de potencia.

Más allá de las formas que se puede aplicar un jammer para interferir a otro sistema, se puede volcar todos estos casos en las aplicaciones comerciales y teniendo siempre como sistema transmisor un esquema FH-SS, las siguiente relaciones:

. *Ruido banda ancha*: Se puede pensar 2 sistemas que utilicen Spread Spectrum, en donde el jammer que afecta al sistema es un DS-SS con un ancho de banda ensanchado Wss igual al que utiliza el FH-SS

. *Ruido de banda parcial*: Para este caso ya no se considera estrictamente al jammer con una implementación de SS, sino que mediante alguna modulación del tipo PSK básica, la cual ocupe un menor ancho de banda y afecte al FH-SS en los casos que las frecuencias coinciden. Siempre teniendo en cuenta que la representación real entre el ejemplo planteado y las densidades espectrales de un PSK no coinciden estrictamente en forma.

.*Ruido de a paso o salto*: Pensando nuevamente al jammer con un sistema SS pero de combinación híbrida entre técnicas DS/FH. Esta interferencia produce que el ancho de banda del jammer se desplace según la portadora que se le asigne, dando la posibilidad de una interferencia en el caso de que ambos sistemas coinciden en el rango de frecuencias utilizadas para ese momento temporal.

.*Ruido de tonos de banda parcial:* Si se piensa la implementación de múltiples sistemas FSK o un sistema OFDM como jammer, sucederá que los tonos transmitidos se encontraran ocupando un cierto ancho de banda, en donde dada la coincidencia de bandas de frecuencias utilizadas, será totalmente nocivo para el sistema transmisor.

Ruido de tonos de a paso: Este es tal vez es el esquema más sofisticado, en donde el jammer consiste en OFDM con una etapa de ensanchamiento FH, haciendo que la ocupación espectral varía según la asignación del FH. Dando la posibilidad nuevamente, que ante la coincidencia de los tonos utilizados por el transmisor y el jammer, el efecto sea totalmente destructivo o la información irrecuperable.

¿Cómo puede el diseñador de sistemas de comunicación solucionar las dificultades presentadas por los diferentes jammer?

→ Utilizando la diversidad de frecuencias (uso de DS-SS y FH- SS)

→ La diversidad de tiempo, por el uso de tiempo de hopping (aplicar Fast Frequency hopping)

→ La discriminacion espacial, por el uso de una antena direccional muy bien diseñada (ancho de haz principal estrecho, buena relación frente espalda y lóbulos laterales pequeños). Significa que la antena capte señales con buena relación señal a ruido de una única posición.

→ Combinación de todas las opciones presentadas anteriormente.

Esto genera un aumento de las exigencias hacia el jammer para lograr compensar las mejoras introducidas por el sistema transmisor. Lo que se traduce en una extensión del uso de sus recursos disponibles:

→ Extender el rango de frecuencias utilizadas para interferir.

→ Aumentar el tiempo de interferencia.

→ En una diversidad de sitios

Sin embargo, uno puede cuestionarse más allá del punto de vista cualitativo, cuánto influyen estas mejoras introducidas por el diseñador de sistemas de comunicaciones de forma cuantitativa a la performance del sistema y que será el análisis que dé fundamento a la implementación de una técnica o otra. Es decir, considerar el rendimiento de un enlace de comunicaciones con la presencia de una fuente de ruido compuesta (ruido térmico (No) e interferencia de otros sistemas (Jo)). Por lo tanto, la relación señal a ruido (SNR) de interés es $\frac{Eb}{(N_o+J_o)}$, donde Jo es la densidad espectral de potencia del ruido debido a interferencias y se asume que es igual a la potencia utilizada por el jammer dividido el ancho de banda $\frac{J}{W_{ss}}$. ¿De donde proviene esta ecuación? Se sabe que la potencia puede calcularse a partir de una integral en el dominio de la frecuencia asociada a la función densidad espectral de potencia. Por lo tanto, desde un punto de vista genérico la potencia del jammer está asociada a la siguiente ecuación $J = J_o W ss$. Por lo general, dicha potencia resulta ser mucho mayor, que la potencia asociada al ruido térmico (N_o*Wss) presente en el *enlace de comunicación para un esquema con interferencias en el canal*, lo que lleva a replantear la ecuación de la performance del sistema y despreciar los efectos del ruido térmico. La SNR de interes sera $\frac{Eb}{Jo}$.

Esta expresión es importante porque se toma como parámetro para diseñar un sistema de comunicaciones. Se define $\left(\frac{E_b}{J_o}\right)_{req}$ a la relación entre energía de bit por densidad

espectral de potencia de interferencia necesaria o requerida para mantener el enlace con una probabilidad de error especificada. Este parámetro se mide a la entrada del demodulador luego de realizar las operaciones de despreading correspondientes a la etapa intermedia entre la recepción de la señal y la entrada al demodulador. En términos generales la energía de bit puede expresarse como:

$$Eb = STb = \frac{S}{R_b}$$

donde “S” es la potencia de la señal de interés que se recibe y “Tb” es la duración de un bit de información. Entonces, en función de estos parámetros y conociendo la expresión de Jo, puede plantearse:

$$\left(\frac{E_b}{J_o}\right)_{req} = \left(\frac{\frac{S}{R}}{\frac{J}{W_{ss}}}\right)_{req} = \frac{\frac{W_{ss}}{R}}{\left(\frac{J}{S}\right)_{req}} = \frac{G_p}{\left(\frac{J}{S}\right)_{req}}$$

donde G_p es la ganancia de procesamiento y $(J/S)_{req}$ puede escribirse como:

$$\left(\frac{E_b}{J_o}\right)_{req} = \frac{G_p}{\left(\frac{J}{S}\right)_{req}}$$

ó

$$\left(\frac{E_b}{J_o}\right)_{req} = G_p\left(\frac{S}{J}\right)_{req}$$

$$\left(\frac{J}{S}\right)_{req} = \frac{G_p}{\left(\frac{E_b}{J_o}\right)_{req}}$$

¿Qué significan estas expresiones? Que al diseñar un sistema de comunicaciones, en función de un requerimiento de calidad, es decir, una probabilidad de error de bit determinada, uno elige el esquema de modulación y demodulación a implementar para así obtener de las gráficas “probabilidad de error de bit versus razón de energía de bit (Eb) y densidad espectral de potencia de ruido(No)” la relación Eb/No necesaria a la entrada del demodulador para satisfacer los requerimientos de servicio. En un sistema de comunicación convencional estos requerimientos de Eb/No se transforman directamente en requerimientos de SNR ($\frac{S}{N}$) a la entrada de la antena receptora. Sin embargo, en un *sistema que aplica spread spectrum* existe un paso intermedio antes de hablar de SNR. Esta instancia permite que los requerimientos de SNR a la entrada de la antena receptora

sean mucho más bajos que los solicitados para un esquema convencional. Esto se logra gracias a la ganancia de procesamiento que aporta un factor importante para la reducción de las exigencias necesarias para la correcta transmisión y, sobre todo, recepción de la información transmitida. De esta forma, concluimos que mientras más grande es la ganancia de procesamiento, menores son las exigencias de $(\frac{S}{J})$ en la entrada del receptor para que el sistema funcione. ¿Pero qué implica? Que a pesar de la baja relación señal útil a señal interferente, es decir, se plantea la existencia de una interferencia muy alta, el sistema es robusto y funciona igual. Por lo tanto es lógico pensar que la relación $(\frac{J}{S})$ la cual representa la energía del jammer necesaria para arruinar las comunicaciones en función de la energía de la señal transmitida es muy alta. Lo más importante de las aplicaciones de spread spectrum es que modificando la ganancia de procesamiento (factor dinámico) logran adaptar las exigencias del canal para mantener la performance y funcionamiento óptimo del sistema. ¿Cómo es posible? Para sistemas de DS básicamente consiste en reducir la tasa de datos a transmitir (Rb), esto permite que por cada bit de información, se hagan presente mayor cantidad de bits de código pseudoaleatorio o comúnmente conocidos como chips. Al ser $G_p = \frac{W_{ss}}{W_s} = \frac{Rch}{Rb}$, se mantiene el ancho de banda W_{ss} utilizado para realizar spreading ó “Rch”, se disminuye la tasa de información “Rb” y como consecuencia aumenta G_p.

En resumen, la razón $(\frac{J}{S})_{req}$ es una figura de mérito que proporciona una medida de qué modo es invulnerable un sistema a la interferencia. Mientras más grande $(\frac{J}{S})_{req}$, es mayor la capacidad de rechazo de ruido del sistema. Entonces, el diseñador se enfoca en emplear técnicas que no le permitan sacar ventajas al jammers con técnicas diferentes a las de un ruido blanco gaussiano de banda ancha.

Formalmente, el parámetro $(\frac{J}{S})_{req}$ se denomina *Margen anti-jam* (MAJ) cuando se aplica un sistema spread spectrum, ya que caracteriza la capacidad del sistema frente a interferencias. Dada la situación de implementaciones que no hagan un ensanchamiento y por lo tanto no exista ganancia de procesamiento, el MAJ tiene una relación 1 a 1 o lo que es lo mismo, considerar que no existe. El MAJ es el margen de seguridad contra una amenaza o interferencia particular y se expresa como:

$$M_{AJ}(dB) = (\frac{E_b}{J_o})_r\,(dB) \; - \; (\frac{E_b}{J_o})_{req}(dB)$$

Esta ecuación presta a confusiones porque indica que se va a tratar en decibeles una resta, donde cada término puede expresarse en función de la relación potencia de jammer frente a potencia de señal útil y ganancia de procesamiento.

$$(\frac{E_b}{J_o})_r = \frac{G_p}{(\frac{J}{S})_r} \quad \text{y} \quad (\frac{E_b}{J_o})_{req} = \frac{G_p}{(\frac{J}{S})_{req}}$$

Entonces operando matemáticamente se llega a:

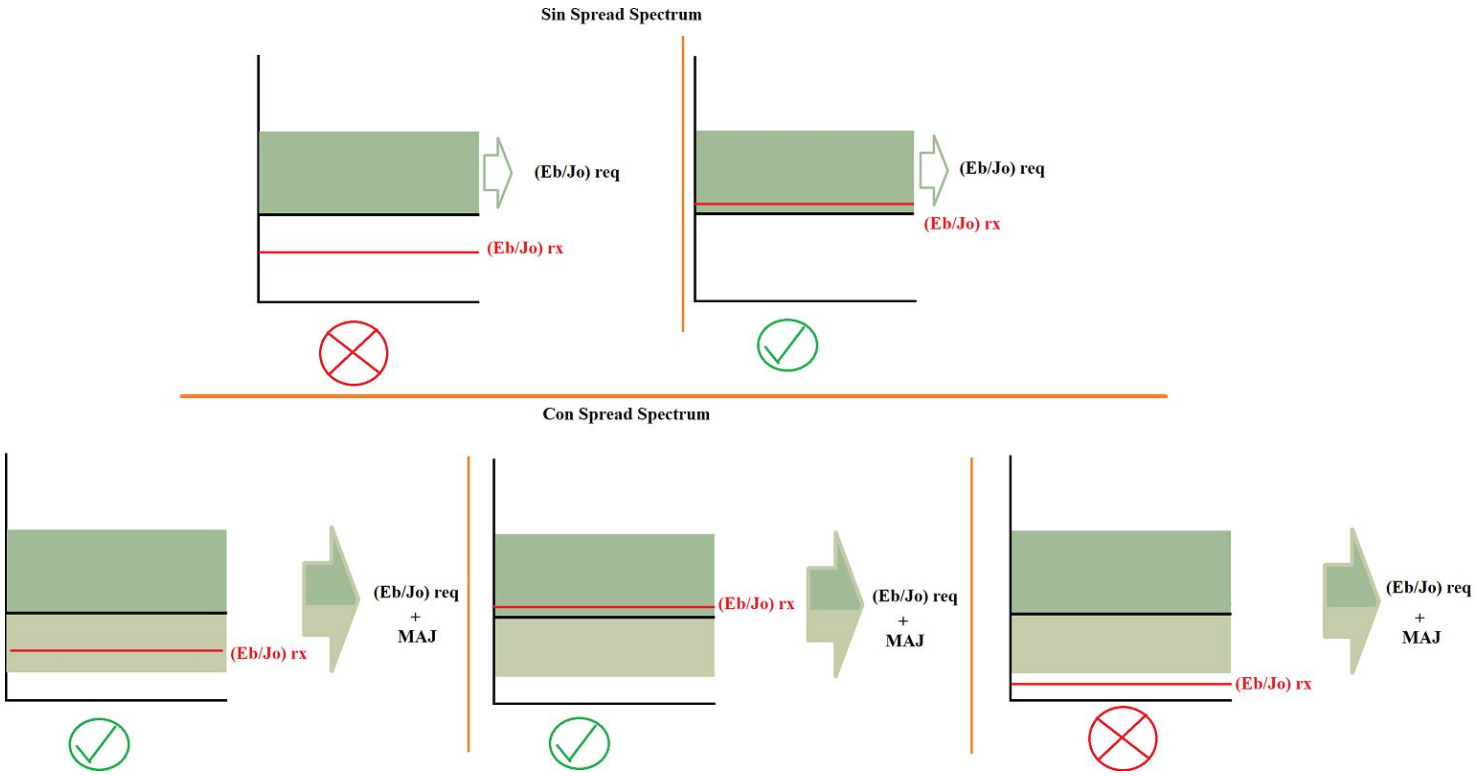
$$M_{AJ}(dB) = \frac{G_p}{(\frac{J}{S})_r}\,(dB) \; - \frac{G_p}{(\frac{J}{S})_{req}}(dB)$$

Aplicando propiedades al trabajar con logaritmos:

$$M_{AJ} = (G_p - (\frac{J}{S})_r) - (G_p - (\frac{J}{S})_{req})$$

$$M_{AJ} = (\frac{J}{S})_{req} - (\frac{J}{S})_r \quad (dB)$$

En primer lugar ¿Por que el margen anti jam se plantea como una resta? Porque al diseñar un sistema de comunicaciones se definen dos parámetros importantes. Por un lado la relación energía de bit versus densidad espectral de potencia de ruido mínima (en este caso interferencia) requerida para cumplir con las especificaciones del enlace pero no se trabaja con dicho parámetro directamente. ¿Por qué? porque ante cualquier desperfecto o contratiempo presente en el enlace, no se cumplirían los requerimientos especificados. No se trabaja al límite, se sobredimensionan las capacidades del enlace. Definiendo una segunda variable para el diseño que representa un margen de seguridad. Siempre se busca cumplir con esta última variable, aunque internamente el diseñador sabe que si no se dan las condiciones necesarias para la misma, el enlace puede seguir funcionando. A eso se refiere con $(\frac{E_b}{J_o})_r$. Entonces, queda un margen de trabajo seguro para el sistema de comunicación. En segundo lugar ¿Cómo aporta positivamente la ganancia de procesamiento? . La ganancia de procesamiento hace que los requerimientos de potencia del jammer respecto a la potencia de señal útil necesarios para perjudicar las comunicaciones sean cada vez más altos. Esto se traduce en unas exigencias mínimas de funcionamiento para el sistema cada vez más chicas, lo que implica una $(\frac{E_b}{J_o})_{req}$ menor a la diseñada sin spreading. La ganancia de procesamiento hace de soporte para que los valores de $(\frac{E_b}{J_o})_r$ que estén por debajo del umbral diseñado originalmente puedan llegar por lo menos a dicho valor. ¿Cuando tendrá problemas el enlace? Cuando los valores de $(\frac{E_b}{J_o})_r$ estén por debajo del nuevo umbral mínimo $\frac{(\frac{E_b}{J_o})_{req}}{G}$, ya que al multiplicar dicha relación por la ganancia de procesamiento no se llegará ni siquiera a los valores de $(\frac{E_b}{J_o})_{req}$ diseñados originalmente.



Un ejemplo del concepto expuesto anteriormente puede visualizarse en la siguiente figura, la cual ilustra una situación de jamming de satélite. El terminal del avión está provisto con un sistema FH-SS que transmite con una $PIRE_T$ de 20 dBW. En sistemas de Radiocomunicación, la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) es la cantidad de potencia que emitirá una antena isotrópica teórica (aquella que distribuye la potencia exactamente igual en todas direcciones) para producir la densidad de potencia observada en la dirección de máxima ganancia de una antena. La PIRE tiene en cuenta las pérdidas de la línea de transmisión y en los conectores e incluye la ganancia de la antena.

$$PIRE = P_T - L_c + G_a$$

La tasa de datos es R=100 bits/seg. El jammer está transmitiendo ruido gaussiano de banda ancha, continuamente, con una $PIRE_J$=60 dBW. Asuma que $(E_b/J_o)_{req}$=10 dB y que la pérdida del camino es idéntica para el terminal del avión y el jammer.
¿Los diseñadores de sistemas de comunicación deben estar más preocupados por las interferencias introducidas por el jamming en el uplink (Usuarios hacia el satélite) o en el downlink (Satélite a los diferentes usuarios)?

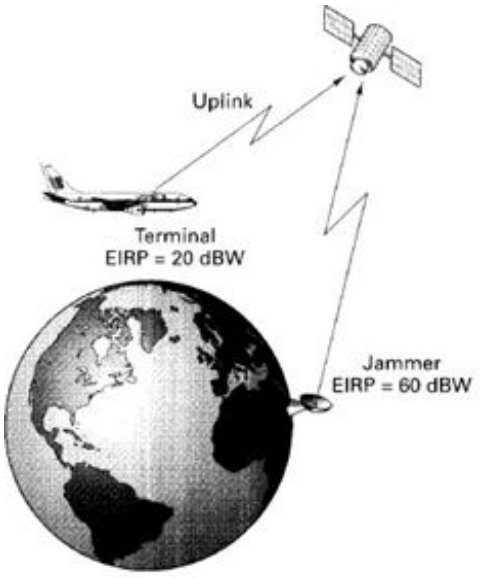


Figure 12.26 Satellite jamming scenario.

La respuesta muchas veces presta a confusiones pero tiene que quedar claro que las interferencias se hacen presentes en los receptores, no en los transmisores. El fenómeno puede entenderse como una charla entre dos personas, donde una de ellas habla y la otra que está intentando escuchar tiene otras personas alrededor susurrando. Si los susurros están alrededor de la persona que habla no afecta a la que quiere escuchar.

Al tratarse de un sistema satelital, el uplink implica que los equipos le transmiten información a un único punto concentrador de información (Satélite) que en este caso es el receptor, si el jammer enfoca su trabajo en interferir el receptor satelital perjudicaría todas las comunicaciones de todos los equipos. En cambio si el jammer quisiera dañar el enlace de downlink debería perjudicar cada dispositivo presente en tierra en múltiples ubicaciones espaciales, porque ellos son los receptores.

En búsqueda de un cierto requerimiento con respecto a MAJ se puede analizar el Wss necesario. En donde el MAJ queda asociado, como ya se comentó antes, a la relación de potencias requeridas y recibidas, considerando el conocimiento de las PIRE para con la recepción, se obtiene:

$$MAJ(db) = (J/S)_{reqd}(dB) - (J/S)_r(dB)$$

$$MAJ(db) = (J/S)_{reqd}(dB) - (PIRE_J(dBW) - PIRE_T(dBW))$$

Con respecto a la relación de potencias requeridas, se puede obtener mediante:

$$(J/S)_{reqd}(dB) = Gp(dB) - (Eb/Jo)_{reqd}(dB)$$

$$MAJ(dB) = Gp(dB) - (Eb/Jo)_{reqd}(dB) - (PIRE_J(dBW) - PIRE_T(dBW))$$

Considerando que todos los parámetros son conocidos a excepción de Wss y que es lo que se desea obtener, se despeja:

$$Gp(dB) = MAJ(dB) + (Eb/Jo)_{reqd}(dB) + (PIRE_J(dBW) - PIRE_T(dBW))$$

$$Wss = Gp(db) + R(db - Hz)$$

Jammer de Ruido de Banda Ancha

En este caso, la señal de bloqueo o señal de jammer se modela como una señal de ruido gaussiano estacionario de sentido amplio (WSS) de media cero y densidad espectral de potencia plana sobre el rango de frecuencias de interés, entonces para una potencia recibida “J” por parte del receptor producto de la interferencia, la densidad espectral de potencia Jo es igual a J/W, donde W es el ancho de banda ocupado por el jammer para interferir. Si el jammer decide ocupar todo el ancho de banda utilizado por el sistema con su potencia fija se denomina *jammer de banda ancha, es decir, utiliza su potencia J en el ancho de banda Wss.*

Al considerar que el receptor que está recibiendo la interferencia es un sistema BPSK detectado coherentemente, la probabilidad de error de bit está descrita por la siguiente ecuación:

$$P_B = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \qquad (12.45)$$

Donde “No” representa la densidad espectral de potencia asociada a ruido térmico. Pero en este caso, existe un jammer interferente, por lo tanto la fuente de ruido está compuesta, haciendo que la densidad espectral de potencia de ruido aumente a (No + Jo).

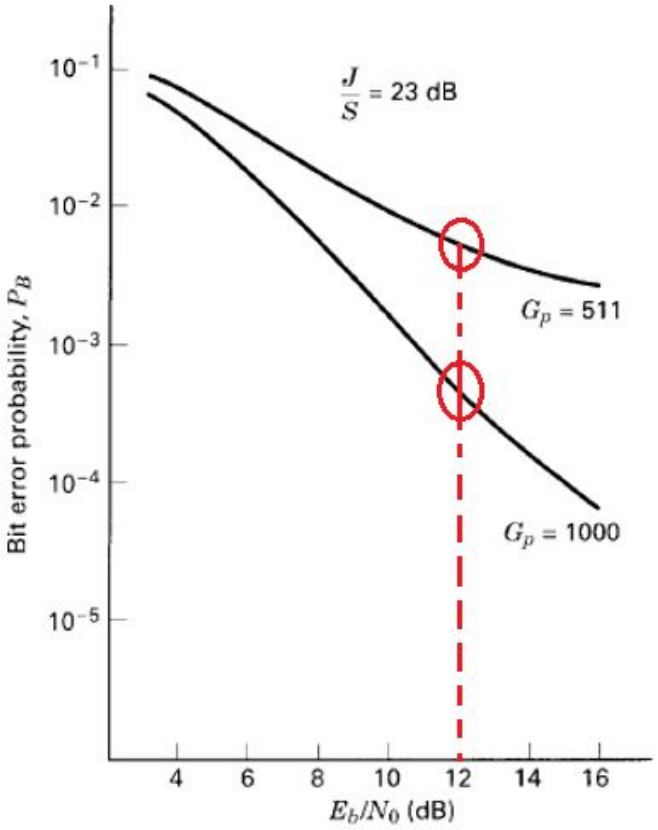
En estas condiciones, la probabilidad de error de bit de un sistema BPSK detectado coherentemente ante la presencia de interferencia Jo resulta:

$$J0 = \frac{Eb * (\frac{J}{S})}{Gp}$$

$$P_B = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0 + J_0}}\right) = Q\left[\sqrt{\frac{2E_b/N_0}{1 + (E_b/N_0)(J/S)/G_p}}\right]$$

Matemáticamente hablando, el proceso de demostración consiste en sacar factor común “No” en ambos términos dentro de la expresión de Q(x) y luego reemplazar Jo por la expresión equivalente que se observa en la figura anterior.

A continuación se grafica P_B vs E_b/N_o para una razón dada de $(J/S)_r$ fija, lo cual es interesante de analizar cuando la G_p aumenta. No hay que perder de vista que la potencia de jammer que se está considerando es 200 veces mayor que la potencia de la señal útil. Detalle no menor.



Gp ↑
=
Rendimiento ↑

En esta situación, al considerar la utilización de un sistema de espectro ensanchado con una Gp de 511, se grafica la probabilidad de error de bit. Sin embargo, para la relación Eb/No disponible la probabilidad de error es demasiado alta, lo que lleva a que no se cumplan los requerimientos del sistema. En esta situación, cualquier sistema, si tiene solucionada la mayoría de los inconvenientes posibles, es decir, requerimientos de ancho de banda, ecualizaciones de canal y demás, tendería a aumentar la potencia transmitida de manera tal que con una Eb/No recibida mayor, la probabilidad de error disminuya. Pero en esta situación al aumentar potencia, la probabilidad de error no disminuye, por lo que se trata de un problema característico de interferencia. Como conclusión si con valores de Eb/No cada vez más grandes la probabilidad de error de bit no disminuye, habiendo solucionado el resto de inconvenientes, es porque la ganancia de procesamiento para hacer frente al jammer no es suficiente. ¿Solución? Aumentar nuevamente la Gp pasando a la segunda curva en donde su valor pasa a ser 1000. Considerado este caso se puede ver como ahora el sistema cuenta con la capacidad de que alterando sus parámetros como lo son la potencia o modificando sus antenas, puede mejorar el desempeño del sistema alcanzando rendimientos aún mayores, situación que para el anterior valor de Gp, se encontraba muy cerca de alcanzar el máximo rendimiento posible, sin importar los parámetros que se modificaran en el sistema.

Jammer de Ruido de Banda Parcial

Hasta el momento se vio el efecto del jamming presente en todo el ancho de banda Wss pero existen otras técnicas que pueden ser más nocivas utilizando igual potencia que en el caso anterior pero mediante un criterio que disminuya el ancho de banda al cual interferir, asociando esta disminución a un factor "ρ", el cual expresa el porcentaje de Wss que se utilizara para interferir. Por lo que el factor varía entre $0<\rho\leq 1$, siendo el caso de ρ = 1 un jamming de banda ancha.
Para poder interpretar mejor la efectividad de esta interferencia, se considera un sistema transmisor/receptor del tipo FH-BFSK detectado no coherente, por lo que la performance viene dada por la siguiente ecuación de probabilidad de error de bit:

$$P_B = \frac{1}{2}\exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right)$$

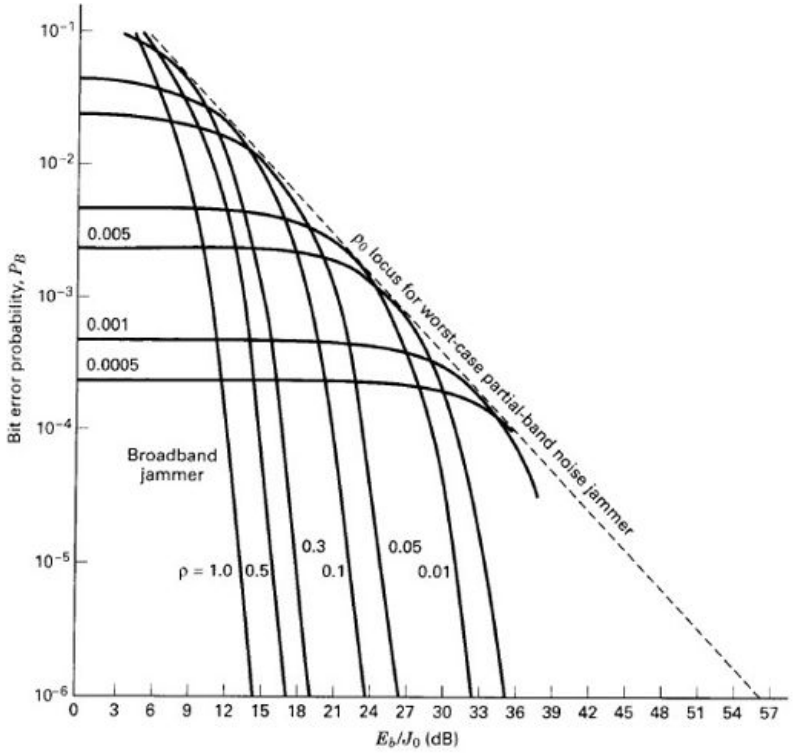
Esta ecuación expresa la performance del sistema para un escenario donde sólo coexisten señal y ruido térmico, pero en la presencia de interferencias de otros sistemas o de usuarios no autorizados, entra en juego el factor "ρ". ¿Como? Una fracción del ancho de banda utilizado por el sistema FH estará ocupado por el jammer con una densidad espectral de potencia mayor que la del ruido de banda ancha, ya que la potencia es la misma. Se sabe que la potencia es la integral en el dominio de la frecuencia de la función densidad espectral de potencia, por lo tanto, si disminuye el ancho de banda ocupado, para mantener los mismos niveles de potencia, es necesario que la densidad espectral de potencia crezca en el mismo factor. Entonces de la ecuación $J = W\ .J_o$ con $W = \rho.W_{ss}$ es necesario un valor $J_o = J_{o(inicial)}/\rho$. La presencia de una densidad espectral de potencia elevada por parte del jammer en la región espectral donde se transmite un símbolo determinado, genera muchos problemas de interferencia, por lo tanto, el jammer tiene certezas de generar serios problemas al sistema FH/BFSK.
Pero todo no es ventaja en esta técnica, como se utilizara una franja para interferir, también habrá un (1-ρ) que queda libre de interferencia. De esta forma, como el jammer interpreta que los hopping se distribuyen uniformemente a lo largo del ancho de banda de espectro expandido W_{ss}, asocia que los símbolos sin interferir tendrán una probabilidad de (1-ρ) y para aquellos que sí sean interferidos tendrán una probabilidad asociada de ρ, que están afectados por la densidad espectral J_o/ρ. Considerando estos detalles es que la nueva Pb es:

$$P_B = \frac{1-\rho}{2}\exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right) + \frac{\rho}{2}\exp\left[-\frac{E_b}{2(N_0 + J_0/\rho)}\right]$$

Esta es la expresión completa pero como ya se ha detallado, usualmente el nivel de interferencia que genera un jammer es mayor al que aporta el ruido térmico ($J_o >> N_o$), haciendo que la parte libre de jammer pero interferida por ruido térmico no sea considerada, permitiendo simplificar la ecuación a:

$$P_B \approx \frac{\rho}{2} \exp\left(-\frac{\rho E_b}{2J_0}\right)$$

En presencia de esta última expresión, es que el jammer considera probar un conjunto de valores diferentes de "ρ" para estudiar la performance del sistema. Su objetivo es muy claro, lograr que la probabilidad de error de bit del sistema sea lo más elevada posible. Entonces, con una la potencia fija "J" y como variable "ρ" estudia las diferentes curvas de performance del sistema asociadas a probabilidad de error de bit versus relación energía de bit recibida E_b y densidad espectral de potencia de jammer J_o para determinar el valor óptimo de ocupación espectral para interferir.



En la gráfica se analiza los distintos valores de "ρ" y su efectividad. Si realizamos el análisis considerando el aumento de Eb/J_0 recibido, teniendo en cuenta que el factor causante de este incremento es la potencia del transmisor ya que la potencia de jammer recibida es fija, la estación transmisora efectivamente está aumentando la potencia. Entonces partiendo de un valor bajo de Eb/J_0, que significa que la potencia del jammer es lo suficientemente nociva como para abarcar todo el ancho de banda Wss y afectar de la peor manera al transmisor, vemos que no es necesario una implementación de banda parcial ya que los valores de ρ=1 generan una probabilidad de error de bit elevada. Pero si se supone el aumento de potencia por parte del transmisor y contemplando que el jammer no puede variar y/o aumentar su potencia, surgen distintas curvas, en donde ya no es tan efectivo inyectar potencia en todo Wss sino que hay que analizar qué fracción ρ será más nociva. Con este criterio se traza la línea punteada que nos indica los valores de ρ_0 que generan el mayor daño y que lleva la relación de que cuanto más grande es Eb/J_0 menor debe ser el ρ_0 y por lo tanto el ancho de banda a interferir. Para poder obtener esta línea es que se realiza dPb/dρ = 0, dando como resultado ρ_0 y Pb_{max}:

$$\rho_0 = \begin{cases} \dfrac{2}{E_b/J_0} & \text{for } \dfrac{E_b}{J_0} > 2 \\ 1 & \text{for } \dfrac{E_b}{J_0} \leq 2 \end{cases} \qquad (P_B)_{\max} = \begin{cases} \dfrac{e^{-1}}{E_b/J_0} & \text{for } \dfrac{E_b}{J_0} > 2 \\ \dfrac{1}{2}\exp\left(-\dfrac{E_b}{2J_0}\right) & \text{for } \dfrac{E_b}{J_0} \leq 2 \end{cases}$$

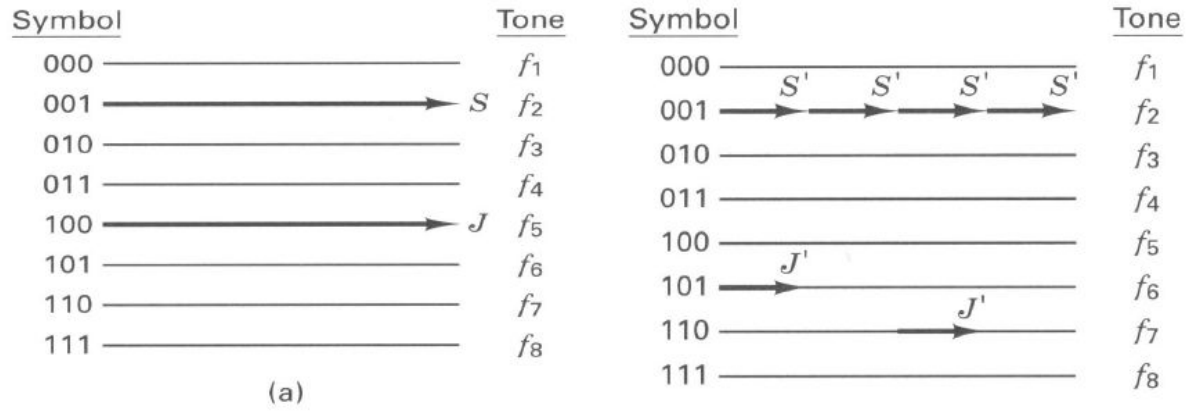
Este esquema de interferencia está optimizado para sistemas spread spectrum del tipo FH. ¿Por qué? por la manera en la cual realizan despreading. En los sistemas FH, el despreading está basado en tareas de heterodinaje con señales de hopping que tienen que estar perfectamente sincronizadas con las señales recibidas. De esta forma, de salto a salto, todas las componentes espectrales sufren un desplazamiento en el dominio de la frecuencia y son capturadas por los filtros no coherentes en las zonas de interés para detectar a los símbolos. Si el jammer logra insertar una densidad espectral de potencia en zonas aledañas a la frecuencia de hopping, lograra insertar potencia en los detectores no coherentes y generará errores en la demodulación. La forma de defenderse de los jammer de este estilo es mediante la aplicación de una combinación de codificación con corrección de errores (FEC) e interleaving, de manera tal que en lugar de perjudicar símbolos individuales se perjudiquen tramas que contienen los símbolos mezclados. Al separar nuevamente dichas tramas en el receptor y obtener la secuencia de símbolos transmitidos, se puede aplicar corrección de errores y evitar los efectos de las interferencias de a rafagas. Sin embargo, Direct Sequence ya presenta de antemano una gran robustez a este tipo de ruido aportado por el jammer, ya que el proceso de despreading es una multiplicación entre la forma de onda recibida y una versión del código de expansión generado localmente y perfectamente sincronizado. El proceso de despreading devuelve al ancho de banda original y levanta la densidad espectral de potencia de la waveform transmitida un factor Gp frente a cualquier señal que ingresa en el receptor. Si la señal que arriba al mismo, no es exactamente la señal transmitida modificada por el código de expansión, el proceso de despreading mantiene a las señales entrantes en un ancho de banda Wss con una densidad espectral muy pequeña. Si la señal interferente tiene gran densidad espectral en un ancho de banda reducido, el proceso de despreading sobre dicha señal genera el proceso inverso. Es decir, a dicha señal le realiza un spreading.

Jamming de múltiple tono

Para este caso el jammer ya no utiliza señales interferentes con característica de ruido gaussiano de media nula y densidad espectral de potencia plana en la frecuencia porque resulta ineficiente en cuestión de interferencia hacia detectores no coherentes mediante filtros. Entonces utiliza impulsos en el dominio de la frecuencia que pueden ser generados mediante tonos en el dominio del tiempo, cuya frecuencia está asociada a múltiplos de la inversa al tiempo de hopping del sistema FH/MFSK. Esto implica un conocimiento previo del sistema que está implementando frecuency hopping. Por lo tanto el jammer ahora distribuye su potencia entre una cierta cantidad de tonos, generando que a la hora del despreading por parte del FH-SS (heterodinaje con señal de hopping) y mediante sus detectores de envolvente, no sepa qué símbolo ha recibido debido a la presencia de energía en más de un

detector y haciendo que el efecto del jammer sea efectivo. Esta técnica le permite al jammer asegurarse de que por cada hopping del sistema dentro del ancho de banda a interferir, se inserte la mayor cantidad de potencia dentro de los filtros detectores.
Es por esta razón que el sistema transmisor para no verse tan afectado por el jammer, opta por subdividir el tono a transmitir en fracciones de tiempo y en diferentes saltos de frecuencia, de manera tal que a la hora del despreading, habrá tonos que fueron interceptados por el jammer y no se puede tomar una decisión individual, pero la suma de los distintos tonos transmitidos que referencian a un símbolo y en comparación con las otras frecuencias, la sumatoria de estos distintos tonos denotara una mayor cantidad energía que está asociada con el símbolo que realmente se quiso transmitir. ¿Qué significa? Que si bien la misma información está presente en múltiples saltos, luego del despreading, habrá un único detector de energía que acuse valor máximo. El resto de detectores de energía que presentan un valor distinto de cero y relativamente significativo, es producto del accionar del jammer al tratar de degradar los símbolos transmitidos.
El caso inicial y la opción por el fraccionamiento del símbolo en diferentes tonos que al realizar el despreading conforman al símbolo inicial, se puede observar en la siguiente figura:

Luego de realizado el despreading



A la imagen de la izquierda se le denomina frecuency hopping sin diversidad y a la imagen de la derecha se le denomina frecuencia y hopping con diversidad. Siempre es mejor por cuestiones de robustez del sistema implementar diversidad, por lo tanto, a lo largo del material de estudio se encuentra un esquema de demodulador FH que corresponde a dicha técnica.

Jamming de Pulso

La robustez de los sistemas direct sequence puede ser vulnerada con señales interferentes de corta duración que presentan un comportamiento de ruido gaussiano de media nula y densidad espectral de potencia plana en la banda de frecuencias que comprenden Wss. ¿Por qué de corta duración? Porque el jammer logra introducir durante pequeños lapsos de tiempo una señal cuya densidad espectral de potencia en el ancho de banda Wss es mucho mayor a la que podría insertar si trabajara con una señal interferente constante en el tiempo. El jammer aprovecha la diversidad temporal de su señal para aumentar las posibilidades de interferir utilizando la misma potencia promedio en tiempo. Este factor utilizado por el

jammer está parametrizado respecto a "ρ" tomando valores entre 0 y 1, indicando en este caso, la fracción de tiempo con la cual se hará presente una señal cuya densidad espectral de potencia contenga el valor J_o/ρ para el ancho de banda Wss. Es evidente que "J" representa la potencia de jammer, que resulta del producto entre W y J_o será mayor para estas señales de corta duración.
De esta forma, el rendimiento de un sistema DS-SS se ve disminuido de manera similar al que tenían los FH-SS ante un ruido de jammer de banda parcial. Para entender los efectos de este tipo de ruido puede considerarse que el sistema receptor está compuesto por un demodulador BPSK detectado coherentemente que no aplica codificación para corrección de errores.

$$P_B = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

Donde N_o representa la densidad espectral de potencia de ruido térmico que está presente a la entrada de la etapa para la toma de decisiones dentro del demodulador una vez atravesada la etapa de filtro acoplado. Sin embargo, esta ecuación tiene validez en un entorno sin interferencia, pero para los entornos de jammer de pulso, la densidad espectral de potencia total de ruido está conformada por el ruido térmico y el ruido introducido por el jammer ($N_o + J_o/\rho$) en aquellas fracciones de tiempo ρ donde el jammer se hace presente. Es decir, que la probabilidad de error de bits estaría compuesta por dos factores, dependiendo que fuente de ruido se haga presente en los diferentes tiempos. El jammer considera que el sistema direct secuence está transmitiendo todo el tiempo información, por lo tanto la probabilidad de afectar los símbolos transmitidos pueden ser directamente relacionados con el tiempo "ρ". ¿Por qué la aclaración? Porque si el sistema direct sequence no transmite todo el tiempo, quizás existirían fracciones de tiempo donde el jammer intenta interferir y el sistema no está transmitiendo, lo que no generaria interferencias.

$$P_B = (1-\rho)Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) + \rho Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0 + J_0/\rho}}\right)$$

Se asume que el ruido térmico es despreciable frente a los valores de densidad espectral de potencia de jammer.

$$P_B \approx \rho Q\left(\sqrt{\frac{2E_b\rho}{J_0}}\right)$$

Para estos casos, el jammer considera muchos valores posibles de ciclos de trabajo, es decir, de ρ para encontrar aquella fracción de tiempo, donde produzca la mayor cantidad de daño al sistema. Esto permite generar las siguientes gráficas que utiliza el jammer para tomar decisiones.

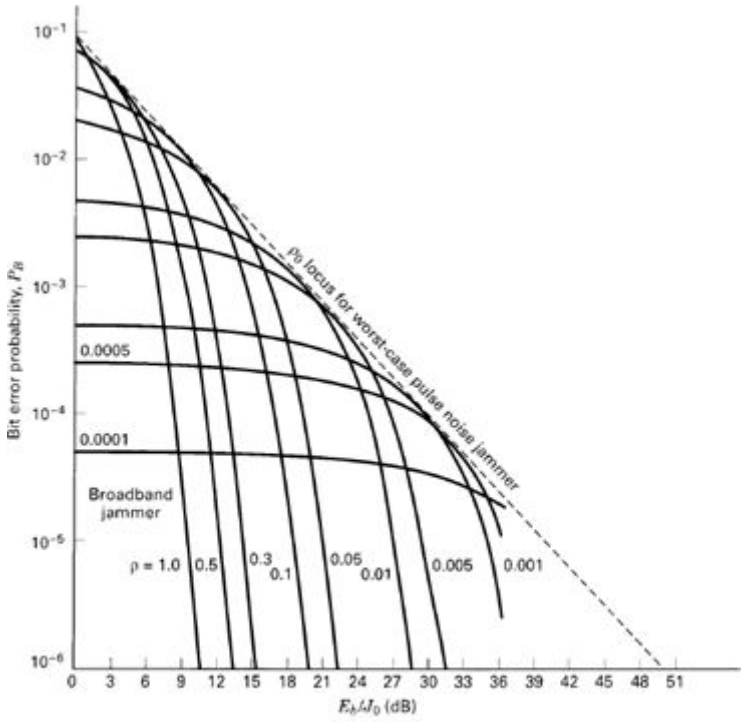


Figure 12.30 Pulse noise jammer (DS/BPSK signaling). (Reprinted from M. K. Simon, J. K. Omura, R. A. Scholtz, and B. K. Levitt, *Spread Spectrum Communications*, Vol. 1, Fig. 3.7, p. 150 © 1985, with permission of the publisher, Computer Science Press, Inc., 1803 Research Blvd., Rockville, Md. 20850 USA.)

Sin embargo, matemáticamente es posible encontrar aquel valor de ρ que maximiza la probabilidad de error de bit. El jammer realiza una derivada primera de la función probabilidad de error de bit en relación a ρ e iguala a 0. Esto le permite encontrar un máximo para el parámetro que está analizando.

$$\rho_0 = \begin{cases} \dfrac{0.709}{E_b/J_0} & \text{for } \dfrac{E_b}{J_0} > 0.709 \\ 1 & \text{for } \dfrac{E_b}{J_0} \le 0.709 \end{cases} \qquad (P_B)_{\max} = \begin{cases} \dfrac{0.083}{E_b/J_0} & \text{for } \dfrac{E_b}{J_0} > 0.709 \\ Q\left(\sqrt{\dfrac{2E_b}{J_0}}\right) & \text{for } \dfrac{E_b}{J_0} \le 0.709 \end{cases}$$

¿Qué le permiten deducir estas expresiones al jammer? Que si la densidad espectral de potencia de la señal de spreading asociada al sistema DS-SS tienen unos valores de E_b/J_0 pequeños, él puede interferir al sistema todo el tiempo. Esto implicaría que su densidad espectral de potencia estaría presente todo el tiempo con valores bajos para mantener la potencia promedio constante, pero como el sistema no presenta valores relativamente altos en comparación a él, puede interferir todo el tiempo y dañar al máximo al sistema. Sin embargo, en el caso contrario, cuando el sistema DS en el ancho de banda Wss presenta una densidad espectral de potencia alta, obliga al jammer a jugar con el tiempo para lograr en determinados intervalos de tiempo insertar niveles de densidad espectral de potencia muy altos y luego desaparecer por un rato o lo que es lo mismo decir (1-ρ). ¿Solución? Igual a la implementada en FH-BFSK en presencia de ruido de banda parcial, codificación con corrección de errores e interleaving asignando estratégicamente los tiempos de trama.

Repeat back jammer

El análisis de las diversas formas de jammer considera, en la mayoria de los casos, la presencia de un jammer “tonto” frente a un sistema de espectro ensanchado. ¿Qué significa esto? Que en un estudio sencillo del ancho de banda Wss utilizado por el sistema spread spectrum, el jammer hace uso de su densidad espectral de potencia y tiempo necesario para interferir pero no cambia jamás dicha condición. En este entorno de análisis, para los sistemas FH-SS no influye la rapidez de salto, entonces da lo mismo saltar muchas veces por segundo a saltar una sola vez por cada diez minutos. La verdad de las interferencias en los sistemas frecuency hopping está lejos de este análisis, ya que existen casos de jammer “inteligentes” denominados Repeat Back Jammer, cuyas capacidades le permiten el monitoreo de la señal que se está transmitiendo por algún lóbulo secundario de la antena transmisora y de esta forma generar señales interferentes dedicadas que son mucho más nocivas para el tiempo de análisis.
Esto significa que el jammer ahora tomará decisiones sobre el momento, buscando ser lo más nocivo posible, en diferencia a todos los casos anteriores en donde el jammer mediante un estudio previo se situaba en una parte del ancho de banda utilizado por el sistema transmisor y actuaba de una manera ya predefinida sin seguir analizando constantemente como se comportaba el sistema a interferir.
Para poder realizar esta implementación, el jammer se pone en modo de escucha y en cuanto detecta la presencia del transmisor, envía tonos en ese rango de frecuencia, lo cual para los sistemas FH serían totalmente nocivos, ya que en más de un detector de envolvente, luego del despreading, acusaría la presencia de un símbolo y no se sabría optar por cual símbolo se ha enviado. Es frente a este modo de interferencia que se propone una solución, saltar mucho más rápido. Lo que se traduce en achicar la duración de los tonos transmitidos y considerar la distancia a la cual se encuentra el sistema del interferidor, de forma que el jammer al realizar la detección y tratar de interferir en las cercanías del tono transmitido, el sistema tanto transmisor como receptor ya se encuentren en plena comunicación en otra ubicación espectral. Entonces, en esa situación, al realizar el despreading el tono del jammer quede fuera del rango de los detectores de envolvente y obligue al jammer a desistir en esta técnica.

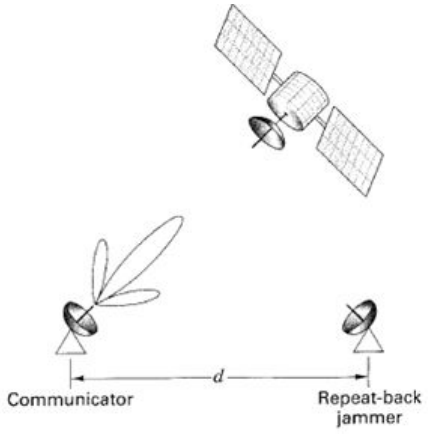


Figure 12.31 Example of fast hopping to evade the repeat-back jammer.

Un ejemplo ilustra este concepto. Considerando la presencia de un sistema FH-MFSK que se encuentra afectado por un jammer del estilo Repeat Back a una distancia de 30 km. El

retardo de propagación entre ambos sistemas es $d/c = \frac{30*10^3 m}{3*10^8 m/s} = 10^{-4} seg$. Considerando que el jammer puede realizar un barrido prácticamente instantáneo en frecuencia para determinar la frecuencia de hopping del transmisor y que el retardo de propagación es nulo en el enlace de subida de jammer a satélite. El jammer tardará $10^{-4} seg$ en inyectar una señal interferente en el satélite. Si el sistema FH permanece un tiempo igual o mayor a este retardo de propagación en la misma frecuencia de hopping se verá afectado por la señal interferente, por lo tanto debe saltar más rápido que el retardo de propagación entre transmisor y jammer. Concluyendo que $Thops \leq 10^{-4} seg$

Sistema BLADES

Una forma de hacer frente al Repeat Back Jammer sin acudir a hacer los saltos en frecuencia para los hopping cada vez más pequeños, es mediante el sistema BLADES. La primer alternativa (saltos más rápidos) dificulta la implementación electrónica del transmisor, ya que se deben generar circuitos electrónicos muy precisos y rápidos, además, las frecuencias utilizadas para el sistema son cada vez más altas porque las señales MFSK tienen que ser mutuamente ortogonales durante un "T_{hop}" lo que genera un menor alcance de la estación base, reduciendo el radio de cobertura. La atenuación en espacio libre es directamente proporcional al cuadrado de la distancia y la frecuencia, haciendo que la pérdida por espacio libre representa la mayor parte de la atenuación total causada por efectos de propagación de la onda electromagnética. Por otro lado, dificulta la tarea de sincronismo, porque es necesario un desfase de "T_{hop}" entre la secuencia de saltos recibida y la generada localmente para que el receptor ya no pueda detectar la información. Si los saltos se hacen cada vez más rápidos, es más fácil que de un momento a otro el receptor quede desincronizado, generando muy poco margen de error.
Es por todas las características recién mencionadas que el sistema BLADES propone mantener un "T_{hop}" relativamente alto o con el cual es capaz de funcionar (lo que permitiría una detección por parte de un repeat back jammer), aportando una modificación estructural de la forma en la cual se plantea la modulación MFSK sobre la que se hará frecuency hopping. En este esquema tanto transmisor como receptor para cada salto, estarán sincronizados en una determinada frecuencia dentro del espectro de banda extendida "Wss" con la diferencia de que si se quiere transmitir una información binaria correspondiente a uno o cero no es necesario dos frecuencias alrededor de la frecuencia de hopping. Solo es necesaria una de ellas, ya que para el caso de transmitir un uno binario se inyecta energía en dicha región espectral y en el caso de querer transmitir un cero binario, no se inyectará energía, es decir, no se transmite nada en dicho salto. Esto hace que no exista una estructura de modulación como tal, confundiendo al jammer y haciendo de alguna manera que aporte a la detección del receptor en lugar de perjudicarlo. ¿Cómo? Al analizar la señal transmitida desde un lóbulo secundario de la antena transmisora, cuando el jammer detecta la región espectral donde existe la presencia de energía, inyecta mayor cantidad de energía en la región espectral aledaña. Sin embargo, los filtros detectores del receptor, no están esperando selectivamente en frecuencia energía para decidir el símbolo transmitido, solo están detectando la presencia o ausencia de energía para decidir si es uno o cero binario, entonces la energía del jammer aporta a la detección. Con este esquema y lógica podría plantearse directamente no transmitir al receptor, solo transmitir al jammer que está en

teoría en una distancia intermedia entre ambos con una potencia mucho menor de la que se utilizaría para transmitirle al receptor y esperar que el jammer auspicie como repetidor haciendo el trabajo del transmisor.
¿Cuál es la desventaja? La transmisión de un bit de información por cada salto en frecuencia, es decir, queda totalmente limitado a sistemas binarios.