

Simulador de Entornos DSSS-CDMA

Anthony A. Thomas T.

Universidad Tecnológica de Panamá, estudiante
anthomas8@gmail.com

Resumen- En la actualidad, las técnicas de modulación de espectro expandido proveen una solución ingeniosa ante la saturación del espectro y la creciente necesidad de transmisiones seguras. Es por esto que resulta sumamente útil contar con una herramienta computacional capaz de simular los principales componentes de un sistema de espectro expandido mediante secuencia directa, que permita observar de forma rápida y sencilla, cómo la variación de ciertos parámetros afecta el desempeño, así como comprobar algunos de los aspectos teóricos asociados a estos sistemas.

En este artículo se describe un simulador para sistemas de espectro expandido mediante secuencia directa, desarrollado en Simulink¹, teniendo como principal objetivo el servir como alternativa experimental, que facilite la comprensión de los conceptos teóricos sobre los que se fundamentan los sistemas de espectro expandido, aprovechando los bajos costos, el ahorro de tiempo y la flexibilidad asociada al uso de software de simulación.

Palabras Claves- Espectro expandido, DSSS-CDMA, simulación, Simulink.

1. Espectro Expandido por Secuencia Directa

En un sistema de espectro expandido mediante secuencia directa (DSSS – *Direct Sequence Spread Spectrum*), la señal portadora de la información es multiplicada por una secuencia pseudo aleatoria compuesta de *chips*, cuya duración es una fracción del tiempo requerido por un bit de información. Como consecuencia, se obtiene una nueva señal que presenta variaciones con mayor rapidez que la señal original, y por ende ocupa un espectro más amplio, que aumenta de manera proporcional a la cantidad de chips utilizados para representar un bit de información. Esta nueva señal de espectro expandido es transmitida a través del canal, y es recuperada en el receptor multiplicándola nuevamente por una réplica sincronizada de la secuencia pseudo aleatoria. Esta segunda multiplicación comprime el ancho de banda de la señal a su tamaño original, permitiendo así recuperar la información. La Figura 1. muestra un diagrama de un sistema de comunicación DSSS básico.

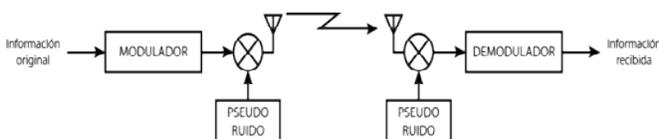


Figura 1. Sistema DSSS básico.

¹Simulink, desarrollado por The MathWorks, es una herramienta para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos en múltiples dominios. Utiliza una interfaz gráfica y diagramas de bloques para construir los sistemas.

2. Simulador de entornos DSSS-CDMA

Los modelos para simular un sistema DSSS-CDMA fueron desarrollados en Simulink, y tienen como objetivo simular el comportamiento de los componentes básicos de un entorno DSSS-CDMA, con el propósito de observar de forma rápida y sencilla los resultados obtenidos al variar diversos parámetros en los códigos de expansión, los canales de transmisión, la codificación de canal y los tipos de receptores empleados. Los resultados obtenidos demuestran la importancia de utilizar secuencias de expansión con características y longitudes adecuadas, además de ilustrar las ventajas que presentan las técnicas de espectro expandido frente a las interferencias causadas por el acceso múltiple y la diversidad de trayectorias existentes en los canales inalámbricos. El simulador consta de 4 módulos independientes:

- Módulo conceptual.
- Módulo de entorno DSSS-CDMA.
- Módulo de codificación de canal.
- Módulo graficador de funciones de correlación.

Tal y como su nombre lo indica, el módulo conceptual permite apreciar el concepto de espectro expandido mediante secuencia directa, mostrando cómo se afecta la señal transmitida, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. Por otra parte, el segundo módulo simula un entorno DSSS-CDMA completo, donde el usuario posee control sobre los parámetros de la simulación, y los resultados pueden ser graficados a través de curvas de razón de error de bit. El tercer módulo permite apreciar los beneficios obtenidos al codificar la información por medio de códigos convolucionales, mientras que el último módulo es una herramienta complementaria para graficar funciones de correlación entre pares de códigos de expansión, con el propósito de facilitar la comprensión del concepto de ortogonalidad entre secuencias.

Todos los módulos fueron desarrollados teniendo como prioridad ofrecer una interfaz gráfica lo más simple posible, permitiendo así que el usuario enfoque su atención exclusivamente en los conceptos e ideas que se tratan de demostrar en cada caso.

Este artículo centrará su atención en el módulo de entorno DSSS-CDMA, ya que gracias a la gran cantidad de parámetros variables que posee, es posible recrear un número elevado de escenarios distintos, obteniendo así resultados más interesantes, lo cual lo convierte sin duda alguna en el módulo principal del simulador.

Con este módulo es posible emular un entorno de hasta 5 pares simultáneos de transmisores y receptores de espectro expandido mediante secuencia directa. Con la ayuda de una interfaz de usuario sumamente simple, es posible variar de forma rápida y sin ningún tipo de inclusión o remoción de bloques por parte del usuario, parámetros de interés tales como: el tipo y longitud de los códigos de expansión, el número de trayectorias del canal de transmisión y la clase de receptores utilizados para recuperar la información. Al profundizar un poco más dentro de las variables del sistema, es posible controlar detalles como las atenuaciones y retrasos asociados a las distintas trayectorias del canal.

Al integrar la herramienta BERTool de MATLAB, es posible obtener gráficas de razón de error de bit para cada uno de los escenarios obtenidos al variar los parámetros mencionados previamente, lo cual permite comparar las diferencias en el desempeño y

comprobar algunos aspectos teóricos de los sistemas de espectro expandido. La herramienta también permite trazar curvas teóricas, lo cual resulta sumamente útil a la hora de analizar cualquier sistema de comunicación.

2.1. Transmisores

En la Figura 2 se muestra el diagrama de bloques correspondiente a los transmisores utilizados en el módulo de entorno DSSS-CDMA. En primera instancia, se tiene la fuente binaria de información que genera una secuencia aleatoria a razón de $1/T_b$ bits por segundo, que luego es modulada por el bloque *Modulador BPSK* incluido en el *communications toolbox* de Simulink. Debajo de la fuente binaria de información, se encuentra un *subsistema variable* (bloque de uso múltiple asociado a una librería de bloques), capaz de asumir las funciones de generador de códigos aleatorios, Walsh o Gold, según seleccione el usuario. Las tramas de longitud SpF emitidas por el subsistema atraviesan un bloque de ganancia $1/\sqrt{SpF}$, con el propósito de normalizar la potencia de las señales resultantes al multiplicar el código de expansión y la representación banda base de la señal modulada.

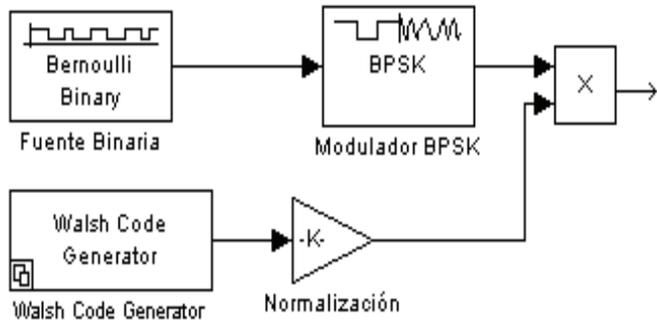


Figura 2. Transmisor del módulo de entorno DSSS-CDMA

2.2. Canales

Luego de ser modulada y expandida, la información ingresa al canal de transmisión, donde un nuevo subsistema variable da la posibilidad de elegir entre un canal de trayectoria simple, o un canal de tres trayectorias independientes con sus respectivos retrasos y atenuaciones. Mientras que la trayectoria directa es representada mediante un simple bloque de ganancia unitaria, la Figura 3 ilustra el esquema utilizado para modelar las trayectorias múltiples.

La señal proveniente del transmisor ingresa a través del puerto de entrada y es distribuida a 3 ramas paralelas, correspondientes a las 3 trayectorias no correlacionadas. La rama superior solamente introduce una ganancia A_0 a la señal original, mientras que las otras 2 ramas introducen ganancias A_1 y A_2 respectivamente, junto con retrasos temporales relativos a la rama superior equivalentes a D_1 y D_2 cantidad de chips. Los vectores resultantes son concatenados y sumados, obteniendo como resultado una nueva señal distorsionada en el puerto de salida. Por último, se suman las señales provenientes de cada uno de los transmisores, generando así la interferencia de acceso múltiple, y justo antes de ingresar a los receptores, la señal resultante atraviesa un bloque AWGN de Simulink que se encarga de añadir el nivel de ruido necesario.

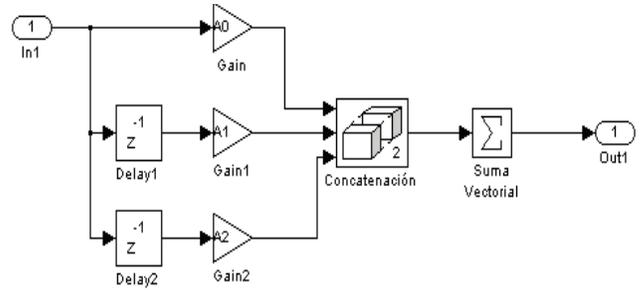


Figura 3. Representación de trayectorias múltiples.

2.3. Receptores

Gracias a otro subsistema variable, el módulo permite elegir entre 2 tipos de receptores para llevar a cabo la restauración del espectro, demodulación y estimación de las señales transmitidas.

En la Figura 4 se muestra el esquema correspondiente al bloque *Receptor Simple*. A través del puerto de entrada 1 ingresa la señal recibida del canal, mientras que el puerto 2 sirve de entrada al código de expansión generado en el transmisor. En la práctica, el receptor generaría localmente una réplica exacta del código de expansión; sin embargo, en este simulador tanto el transmisor como el receptor utilizan el código procedente del mismo generador, con el propósito de ahorrar recursos y disminuir el tiempo requerido por cada simulación.

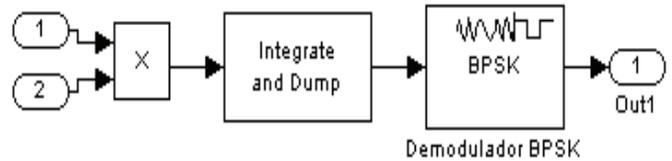


Figura 4. Receptor simple del módulo DSSS-CDMA

Al multiplicar la señal recibida por el código de expansión correspondiente, el ancho de banda de la señal original es restaurado, mientras que la interferencia ocasionada por la presencia de otros usuarios y la existencia de trayectorias múltiples sigue teniendo características similares a las del AWGN. La señal resultante atraviesa un filtro de integración y descarga de periodo SpF muestras, que detecta los símbolos que luego serán demodulados por el bloque *Demodulador BPSK* de Simulink.

El segundo bloque disponible a través del subsistema de receptores es el *Receptor RAKE*. En la Figura 5 es posible observar que consta de 3 ramas paralelas, encargadas de realizar de forma simultánea la operación realizada por el *Receptor Simple*, sacando provecho de la diversidad de trayectorias y aprovechando una fracción mayor de la potencia total transmitida.

Se puede apreciar que la señal proveniente del canal entra a través del puerto de entrada 1, mientras que el código de expansión lo hace a través del puerto 2. Ambas señales son distribuidas hacia las 3 ramas del receptor, con la diferencia de que 2 versiones de la secuencia de expansión son retrasadas para compensar el retraso introducido por las trayectorias más "lentas". Luego de realizarse cada una de las multiplicaciones correspondientes en cada rama, un nuevo par de bloques de atraso se encarga de alinear temporalmen-

te los 3 vectores resultantes que atravesarán el filtro de integración y descarga de periodo SpF muestras. Los símbolos detectados son escalados por factores iguales a la atenuación ocasionada por la trayectoria asociada a cada rama, antes de ser sumados e ingresar al bloque *Demodulador BPSK*, encargado de recuperar la información transmitida.

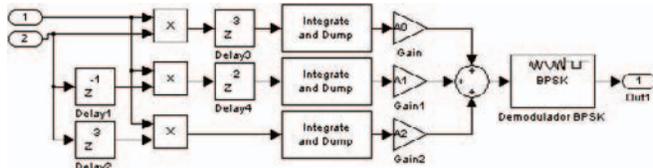


Figura 5. Receptor RAKE del módulo DSSS-CDMA.

3. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos al hacer uso del módulo de entorno DSSS-CDMA para demostrar algunos de los conceptos teóricos asociados a los sistemas de espectro expandido mediante secuencia directa.

3.1. Desempeño en presencia de AWGN

La teoría nos indica que las señales transmitidas en un sistema de espectro expandido mediante secuencia directa, no presentan ningún tipo de inmunidad frente a la interferencia ocasionada por el ruido blanco gaussiano aditivo, debido a que la densidad espectral de potencia del ruido permanece invariable a lo ancho de todo el espectro.

En la Figura 6 se puede apreciar en color azul la curva teórica asociada a la transmisión de señales utilizando un esquema de modulación BPSK simple, a través de un canal AWGN donde la probabilidad de error, P_e , corresponde a la ecuación

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right). \quad (1)$$

Por otra parte, el símbolo (o), representa los valores obtenidos al utilizar el módulo de entorno DSSS-CDMA para simular la comunicación entre un par transmisor/receptor simple, utilizando un código de expansión aleatorio de longitud 512, a través de un canal AWGN de trayectoria directa. Como era de esperarse, los puntos obtenidos a través de la simulación coinciden con la curva teórica, lo cual comprueba la teoría mencionada previamente.

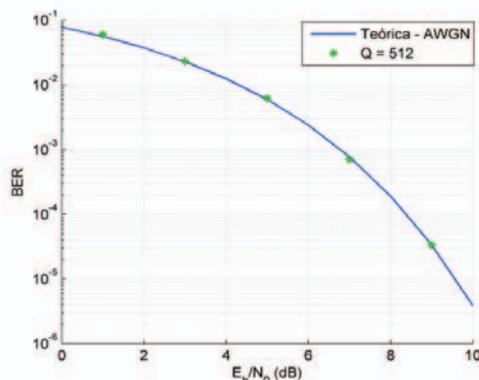


Figura 6. Desempeño en presencia de AWGN.

3.2. Efecto de la longitud de las secuencias de expansión aleatorias

En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos al simular un entorno DSSS-CDMA de 5 pares transmisor/receptor simples, que utilizan códigos de expansión completamente aleatorios de longitud Q y transmiten las señales a través de un canal AWGN de trayectoria directa. Además de los puntos obtenidos, también se muestra nuevamente la curva teórica de la Figura 6 a manera de referencia.

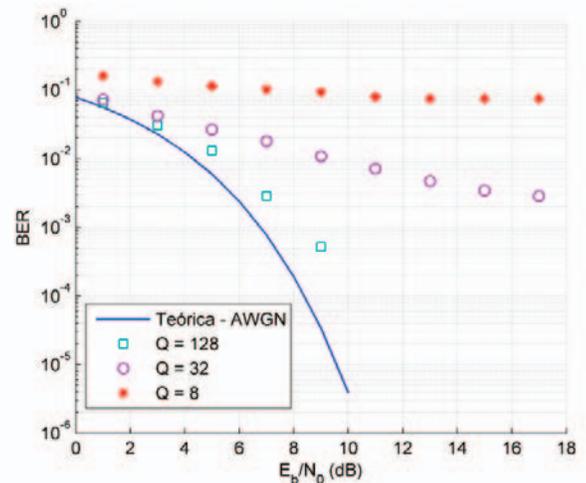


Figura 7. Efectos de la longitud de los códigos aleatorios.

Es posible notar cómo al aumentar la longitud de los códigos de expansión el desempeño tiende a mejorar hasta casi alcanzar el rendimiento correspondiente al de un solo par transmisor/receptor, representado por la curva teórica. Este fenómeno se debe a que al aumentar la longitud de las secuencias de expansión, las propiedades de autocorrelación y correlación cruzada de los códigos mejoran, haciendo que las distintas secuencias utilizadas se acerquen cada vez más a ser ortogonales entre sí, reduciendo así la interferencia de acceso múltiple.

Otro aspecto importante que puede ser destacado de esta gráfica, es el "piso" al que llegan los sistemas que utilizan secuencias de expansión con $Q = 8$ (*) y $Q = 32$ (o). Estos toques en el desempeño, donde no existe mejoría en el BER aún cuando aumenta la relación señal a ruido, se deben a los niveles de interferencia de acceso múltiple que no pueden ser superados debido al uso de códigos deficientes. El aumento de la relación señal a ruido no representa una solución, debido a que este se logra incrementando la potencia de transmisión, no sólo del transmisor de interés, sino de todos los transmisores del sistema, lo cual mantiene el nivel de interferencia de acceso múltiple constante.

3.3. Desempeño de las secuencias Walsh y Gold

Tanto los códigos Walsh como los códigos Gold presentan características que los hacen aptos para esquemas de acceso múltiple por división de código, siempre y cuando se den las condiciones de sincronización necesarias. En el módulo de entorno DSSS-CDMA, la sincronización perfecta de los códigos es simulada al transmitir las señales a través de un canal de trayectoria directa,

mientras que la no sincronización de los códigos se logra al utilizar el canal AWGN de trayectorias múltiples. El hecho de que las trayectorias presenten retrasos entre sí, trae como consecuencia que los códigos de expansión sean afectados por versiones desplazadas de sí mismos, lo cual pone a prueba sus propiedades de autocorrelación, y por versiones desplazadas de otros códigos, lo cual exige funciones de correlación cruzada adecuadas.

Los puntos de la Figura 8 fueron obtenidos a través del módulo de entorno DSSS-CDMA, al simular un sistema de tres pares transmisor/receptor simple, con códigos de expansión de longitud 128 (Walsh) y 127 (Gold). En primera instancia es posible observar cómo los transmisores, utilizando códigos Walsh (\square) y códigos Gold (∇) a través del canal de trayectoria directa, logran el desempeño correspondiente a un par transmisor/receptor, debido a las excelentes correlaciones cruzadas que presentan cuando existe sincronización perfecta. De hecho, los códigos de un conjunto Walsh sincronizado son ortogonales entre sí para cualquier valor de Q, y la función de correlación cruzada entre códigos Gold de longitud 127, posee un máximo de apenas el 13% en el peor caso [1].

Al transmitir las señales a través del canal AWGN de trayectorias múltiples, se puede apreciar que el uso de códigos Walsh (*) aumenta la probabilidad de error de los bits detectados hasta un 50% para cualquier relación señal a ruido, lo cual hace al sistema completamente inservible. Este resultado se debe a las deficientes propiedades de autocorrelación y correlación cruzada que presentan los códigos Walsh cuando no están en perfecta sincronía, lo cual genera niveles infranqueables de interferencia.

Por otra parte, si bien es cierto que al utilizar códigos Gold bajo las mismas condiciones (O) no se alcanza un rendimiento tan bueno como el del caso en sincronización perfecta, los resultados obtenidos son aceptables, y pueden ser mejorados mediante el uso de codificación de canal y/o receptores RAKE. Nuevamente, esto se debe a las buenas propiedades de autocorrelación y correlación cruzada de los códigos Gold, aún cuando la sincronización no es ideal.

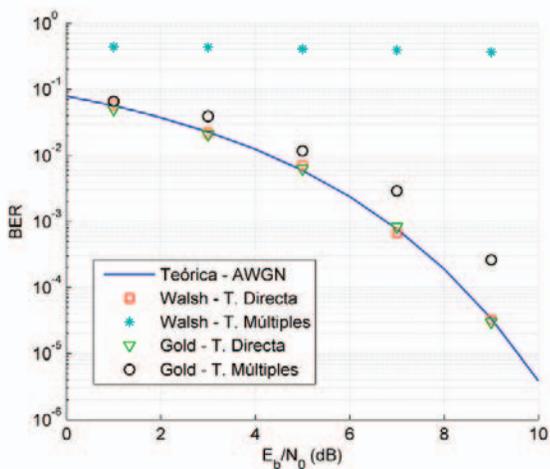


Figura 8. Desempeño de los códigos Walsh y Gold.

3.4. Desempeño al utilizar receptores RAKE

En la Figura 9 se pueden apreciar los resultados obtenidos al utilizar receptores RAKE, con el propósito de aprovechar la potencia

distribuida en las distintas trayectorias del canal AWGN, a través del cual se transmite una señal DSSS expandida mediante un código Gold de longitud 127.

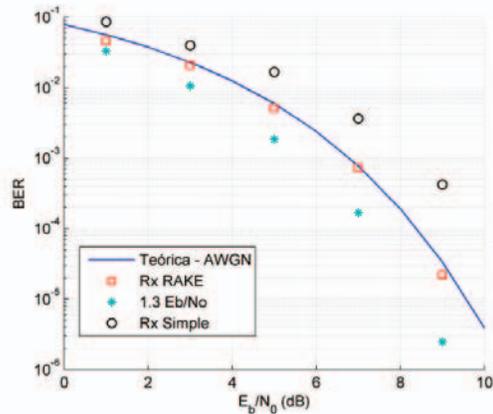


Figura 9. Desempeño al utilizar receptores RAKE.

La validez de los resultados obtenidos fue verificada mediante la ecuación

$$SNR = \frac{E_b}{N_o} \sum_{i=0}^{L-1} |\alpha_i|^2 \quad (2)$$

donde L es el número de trayectorias distintas consideradas y corresponde a la ganancia de cada una de las trayectorias. Según (2), es posible obtener el rendimiento equivalente al de un canal de trayectoria directa, si se utiliza un receptor capaz de estimar las ganancias y retrasos correspondientes a cada una de las trayectorias que serán tomadas en consideración, para poder procesar las señales recibidas de forma adecuada.

En primer lugar, los puntos (O) fueron obtenidos al utilizar un receptor simple que solamente considera la trayectoria principal a la hora de detectar las señales. Por defecto, la ganancia correspondiente a la primera trayectoria es $\sqrt{0.7}$, lo cual se traduce en siete decimos de la potencia total transmitida. Al calcular la SNR en decibeles, es posible estimar el desplazamiento de los puntos obtenidos con respecto a la curva teórica

$$SNR_{dB} = 10 \log(SNR) = 10 \log\left(0.7 \frac{E_b}{N_o}\right) \quad (3)$$

$$SNR_{dB} = 10 \log\left(\frac{E_b}{N_o}\right) + 10 \log(0.7) = \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{dB} - 1.594$$

lo cual representa una pérdida de 1.594 dB y coincide con lo observado en la Figura 9.

Por otra parte, al utilizar el receptor RAKE (\square) es posible sacar provecho de la potencia presente en las otras 2 trayectorias. Al evaluar (2) con las ganancias presentadas asignadas por defecto se obtiene

$$SNR = \frac{E_b}{N_o} \sum_{i=0}^{L-1} |\alpha_i|^2 = \frac{E_b}{N_o} \sum_{i=0}^2 |A_i|^2 \quad (4)$$

$$SNR = \frac{E_b}{N_o} (\sqrt{0.7}^2 + \sqrt{0.3}^2 + \sqrt{0.1}^2) = \frac{E_b}{N_o}$$

En este caso, debido a que la totalidad de la potencia transmitida se encuentra distribuida en las tres trayectorias consideradas, el receptor RAKE y las buenas propiedades de correlación de los códigos Gold, permiten lograr un rendimiento óptimo, idéntico al obtenido al transmitir las señales a través de un canal AWGN de trayectoria directa.

3.5. Desempeño al utilizar codificación de canal

Al utilizar el módulo de codificación de canal es posible observar las mejoras en el desempeño asociadas al uso de códigos convolucionales. En la Figura 10 se puede apreciar que los resultados obtenidos al codificar las señales utilizando un código convolucional generado con los vectores $V_1 = [1 \ 0 \ 1]$ y $V_2 = [1 \ 1 \ 1]$, a una tasa de código de 1/2 y restricción de longitud 3, coinciden con el límite superior teórico mostrado en color rojo.

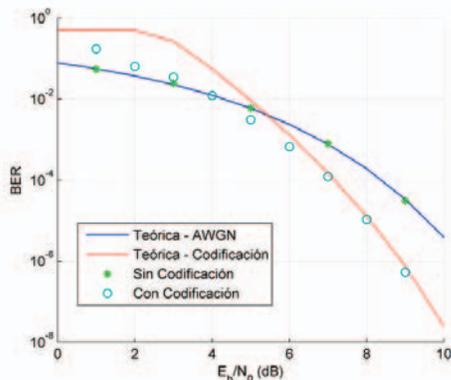


Figura 10. Desempeño al utilizar codificación de canal.

Los resultados obtenidos resultan de gran importancia, debido a que actualmente la codificación de canal es una parte fundamental, no sólo de los sistemas de comunicación de espectro expandido mediante secuencia directa, sino de la gran mayoría de los sistemas de comunicación en general.

4. Conclusiones

Haciendo uso del simulador desarrollado fue posible demostrar algunos de los conceptos teóricos más significativos de los sistemas de espectro expandido mediante secuencia directa. Esto no sólo comprueba que el simulador de hecho funciona correctamente bajo diversas circunstancias, sino que es una muestra de la alta flexibilidad que presentan las herramientas de simulación a la hora de recrear diversas situaciones prácticas, lo cual las convierte en recursos sumamente útiles, que facilitan la comprensión de conceptos matemáticamente complejos a través de la experimentación.

Referencias

- [1] A. Thomas, "Simulador de Entornos DSSS-CDMA," tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Panamá, Ciudad de Panamá, Panamá, 2010.
- [2] S. Haykin and M. Moher, *Modern Wireless Communications*, 1st ed. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education, 2005.
- [3] J. Meel, "Spread Spectrum (SS)," De Nayer Instituut, 1999.
- [4] V. Ipatov, *Spread Spectrum and CDMA*, Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd., 2005.
- [5] B. Sklar, *Digital Communications*, 2nd ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall PTR, 2001.
- [6] J. Proakis, *Digital Communications*, 3rd ed. Boston, Massachusetts: McGraw-Hill, 1995.



FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Oferta Académica

La Universidad Tecnológica de Panamá, a la vanguardia con el incesante crecimiento de nuestro país; se ha destacado, durante los últimos años, por ser una de las universidades más sobresalientes y reconocidas internacionalmente por preparar óptimos y competentes profesionales en las áreas de ciencias y tecnología.

- Licenciatura en Ingeniería Industrial.
- Licenciatura en Ingeniería Mecánica Industrial.
- Licenciatura en Mercadeo y Comercio Internacional.
- Licenciatura en Recursos Humanos y Gestión de la Productividad / Título intermedio de Técnico en Recursos Humanos y Gestión de la Productividad.
- Licenciatura en Gestión de la Producción Industrial / Título intermedio de Técnico en Ingeniería con espec. en Gestión de la Producción Industrial.
- Licenciatura en Logística y Transporte Multimodal / Título intermedio de Técnico en Logística y Transporte Multimodal.
- Licenciatura en Gestión Administrativa / Título intermedio de Técnico en Administración.