

ADAPTACIÓN DEL ALGORITMO SCHMIDL & COX A SISTEMAS DE PORTADORA ÚNICA EN UN CANAL INALÁMBRICO

ADAPTATION OF THE SCHMIDL & COX ALGORITHM TO SINGLE-CARRIER SYSTEMS IN A WIRELESS CHANNEL

Wellington Espinoza¹, Maricela Freire², Tanny Chávez³, Jorge Gómez⁴ y Boris Ramos⁵

Resumen

Actualmente los sistemas de telecomunicaciones manejan tasas de velocidad muy elevadas, debido al gran aumento de la demanda de los mismos. Este aumento de demanda de información ha desembocado en utilizar equipos más rápidos, ya que a mayor demanda, se necesitan equipos de mayor velocidad. Por lo cual para poder identificar las tramas de datos es necesario el uso de algoritmo de sincronización, pero actualmente dichos algoritmos no ofrecen la robustez necesaria cuando se reciben las señales en un medio no favorable (ciudades con gran concentración de edificios).

Abstract

Telecommunication systems are currently handling very high speed rates, due to the large increment in demand thereof. This increased demand for information has led to use faster devices, since the higher demand, higher speed devices are needed. Whereby to identify a data frame it is necessary to use a synchronization algorithm, but now these algorithms do not provide the necessary strength when signals are received in an unfavorable environment (cities with large buildings concentration).

¹Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones – Escuela Superior Politécnica del Litoral – Guayaquil, Ecuador.

²Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones – Escuela Superior Politécnica del Litoral – Guayaquil, Ecuador.

³Estudiante de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, Asistente del Laboratorio de Simulación de Telecomunicaciones – Escuela Superior Politécnica del Litoral – Guayaquil, Ecuador.

⁴Estudiante de Maestría en Telecomunicaciones, ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, investigador Junior de CIDIS – Escuela Superior Politécnica del Litoral – Guayaquil, Ecuador.

⁵Doctorado Interdisciplinario en Telecomunicaciones y Dinámica de Sistemas, maestría en Ciencias de la Computación, magíster en Administración de Empresas, ingeniero en Electricidad especialidad Electrónica, Director del grupo IRNI y coordinador de la carrera de Telecomunicaciones – Escuela Superior Politécnica del Litoral – Guayaquil, Ecuador..

Autor para correspondencia ✉: wespinoza, mfreire, tchavez, jolugome,bramos@espol.edu.ec

Recibido: 26-02-2015, aprobado tras revisión: 18-06-2015.

Forma sugerida de citación: Espinoza, W.; Freire, M.; Chávez, T.; Gómez, J.; Ramos, B. (2015). “Adaptación del algoritmo Schmidl & Cox a sistemas de portadora única en un canal inalámbrico”. INGENIUS. N.º14, (Julio-Diciembre). pp. 35-43. ISSN: 1390-650X.

Este tipo de medio puede ser modelado usando una variable de tipo Rayleigh la cual se asemeja al comportamiento de las múltiples trayectorias que una señal tiene en un ambiente con edificios, el mismo que puede generar desplazamiento de frecuencia. En el presente trabajo se analiza los cambios necesarios para adaptar el algoritmo Schmild & Cox, diseñado para la corrección del desplazamiento de trama y de frecuencia en los sistemas multiportadora OFDM, a sistemas de una sola portadora. El algoritmo adaptado sincroniza apropiadamente la trama de datos y corrige efectivamente el desplazamiento de frecuencia generado por el efecto Doppler y por el desfase que se introduce en el proceso de conversión analógico-digital de los dispositivos de transmisión y recepción utilizados.

Palabras clave: Secuencia de entrenamiento, sincronización, Rayleigh.

This kind of medium can be modeled using a Rayleigh variable which resembles the behavior of multiple paths that a signal has in an environment with buildings, which can generate frequency offset. In this paper we analyze the changes needed to adapt the Schmild & Cox algorithm, designed to correct the frame offset and frequency offset in OFDM multi-carrier systems, to be used in single carrier systems. The adapted algorithm synchronizes the data frame properly and effectively corrects the frequency offset generated by the Doppler shift and the phase shift which is introduced in the process of analog - digital conversion of the transmitting and receiving devices.

Keywords: Training Sequences, Synchronization, Rayleigh.

1. Introducción

Actualmente los sistemas de telecomunicaciones manejan tasas de velocidad muy elevadas, debido al gran aumento de la demanda de los mismos y los requerimientos de servicios con mayor valor agregado, el cual requiere una mayor cantidad de datos para poder ofrecer la calidad que el cliente necesita.

Cada día el avance de la tecnología obliga a tener equipos con mayor capacidad de transmisión de información, más robusta y confiable, ya que el proceso de recepción debe tener la menor cantidad de procesos posibles. Las tecnologías de transmisión de datos, tanto alámbrica como inalámbrica, han ido evolucionando con el pasar del tiempo.

A medida que los requerimientos del cliente iban evolucionando, la tecnología también estuvo en la obligación de suplir dichas necesidades, por lo cual, en el campo de las comunicaciones inalámbricas se ha observado la transformación de la tecnología desde GSM hasta LTE (4G), en donde el primero solo podía ofrecer servicios de voz y SMS con unos pocos kbps de velocidad y el último puede ofrecer velocidades en el orden de los Gbps, con lo cual ofrecer servicios multimedia de alta calidad no resulta un problema.

Por otra parte, tomando en consideración las redes inalámbricas, estas han tenido problemas por el desarrollo de las urbes metropolitanas, debido al incremento de edificios y aumento de zonas de alta reflexión. Estos factores generan un problema común en los sistemas inalámbricos llamado multitrayectoria, el cual puede generar múltiples inconvenientes al momento de recibir la señal, por un desvanecimiento de la misma, que puede ser, plano o selectivo dependiendo de las características de la señal y el medio de transmisión. Las características del medio ofrecen patrones, tanto en amplitud como en fase a las trayectorias generadas, los cuales se pueden modelar usando variables estadísticas como Rayleigh, Rician y Nakagami-N; dichas variables representan el comportamiento que tiene la amplitud una componente del canal de multitrayectoria (CM).

Muchos sistemas de telecomunicaciones se han creado para que puedan enfrentar este problema, y esto exige nuevas técnicas de sincronización, para encontrar el inicio de la trama y sincronizar transmisor (Tx) y receptor (Rx), y ecualización para recuperar la señal y mitigar el efecto del canal por el cual pasa la onda. Este trabajo se enfoca en los algoritmos utilizados para corregir los desplazamientos de trama y de frecuencia aplicados en los sistemas de comunicación inalámbricos de una sola portadora. Por esto se diseñó un nuevo algoritmo que corrige los desplazamientos de trama y de frecuencia basado en el algoritmo de Schmidl & Cox aplicado en los sistemas OFDM que utilizan múltiples portadoras. Enfrentamos el reto de buscar la viabilidad de adaptar dicho algoritmo a sistemas de portadora única, y evaluar su efectividad para la sincronización

de trama y su correspondiente corrección del desplazamiento de frecuencia usando la plataforma NI USRP en presencia de ruido y de un canal Rayleigh, que representa el comportamiento real de un canal multitrayectoria inalámbrico.

En esta investigación se analiza el desempeño del algoritmo Schmidl & Cox adaptado que se ha implementado usando la plataforma NI USRP [1]. Inicialmente se observa la capacidad del algoritmo en sincronizar la trama de datos, específicamente se mide la tasa de error binaria real que se obtiene en un sistema de comunicación con diferentes esquemas de modulación digital, que es afectado por el ruido AWGN y por el canal multitrayectoria Rayleigh.

Posteriormente se determina la capacidad del algoritmo en corregir el desplazamiento de frecuencia, encontrando la tasa de error binaria para diferentes valores de frecuencias que puede corregir el algoritmo. Finalmente, se analiza el impacto de las propiedades de correlación de la secuencia de entrenamiento en el desempeño del algoritmo.

2. Sincronización de trama y desplazamiento de frecuencia

2.1. Diseño del dispositivo

Como sabemos, toda señal transmitida posee una estructura preestablecida, ya sea por diseño de proveedor o basándose en algún estándar de transmisión, que debe ser conocida por el receptor. El objetivo de la sincronización de trama es resolver los múltiples retardos en los periodos de símbolos, determinando la estructura de la trama, ubicado al inicio de la misma.

Para realizar la búsqueda del inicio de la trama se utiliza una palabra codificada o como la llamaremos una secuencia de entrenamiento. Como se vio en la revisión del sistema digital la inserción de dicha secuencia se la realiza en el transmisor delante de la trama de datos.

Una vez transmitida la señal, el receptor recibe la señal y después del proceso de RF, el filtro de acoplamiento y el *downsampling*, se ejecuta el proceso de sincronización de trama. La señal antes del sincronizador es:

$$y[n] = h_s[n - d] + v[n] \quad (1)$$

donde h es un coeficiente complejo del canal y d es el desplazamiento de trama que deseamos corregir.

El desplazamiento de frecuencia es generado porque los osciladores en el transmisor y receptor no tienen la misma frecuencia de portadora.

Otras razones de desplazamiento de frecuencia incluyen el *Doppler Shift* causado por el movimiento relativo entre el transmisor y el receptor, y la fase de ruido introducido por un canal no lineal.

El desplazamiento de frecuencia causa una rotación de fase en la constelación de símbolos recibidos, provocando que los símbolos no se ubiquen en sus respectivas regiones, lo cual en sistemas de una sola portadora tiene como efecto degradar la señal recibida lo que se aprecia en el *bit error rate*.

Desde la perspectiva de una señal banda base, el problema del desplazamiento de frecuencia puede ser visualizada usando el modelo de señal de la Figura 1 donde el desplazamiento de frecuencia es f_0 . El efecto del desplazamiento es rotar la señal recibida por $e^{j2\pi f_0 t}$. Cuanto más grande es el desplazamiento, más rápido rotará la señal recibida. El no estar sincronizada la frecuencia de portadora complica la mayor parte de las funciones de procesamientos del receptor incluyendo la sincronización de trama, la estimación de canal y la ecualización.

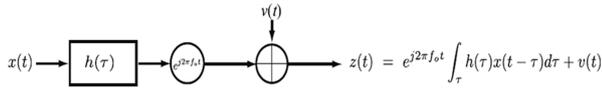


Figura 1. Diagrama de bloques con desplazamiento de frecuencia [1].

3. Sincronizador de trama y de frecuencia Schmidl & Cox

Timothy M. Schmidl y Donald C. Cox presentaron un método robusto de sincronización aplicado a sistemas OFDM [1], en donde aprovechaban una secuencia de entrenamiento muy larga para realizar la búsqueda del inicio de la trama.

El transmisor OFDM inserta dos secuencias de entrenamiento, de igual longitud, las cuales son insertadas al inicio de la trama en el transmisor. Otorgándonos una gran similitud con la trama del sistema de portadora única facilitado la adaptación del método.

El método Schmidl & Cox (SAC) es descrito por:

$$R[d] = \sum_{n=0}^{N-1} y^*[n+d] y[n+d+L] \quad (2)$$

La ecuación representa el producto de dos muestras diferentes de la señal de entrada. Donde d es el índice en el tiempo donde empieza la secuencia de entrenamiento. L es la longitud de la primera mitad de la secuencia de entrenamiento y N es el número de subportadoras en OFDM. Luego determinamos la energía de la segunda muestra:

$$P[d] = \sum_{n=0}^{N-1} |y[n+d+L]|^2 \quad (3)$$

Y calculamos la métrica de tiempo:

$$M[d] = \left| \frac{R[d]}{P[d]} \right|^2 \quad (4)$$

La cual nos permite estimar el desplazamiento de trama producido por el canal, por medio de:

$$\hat{d} = \underset{d}{\operatorname{argmax}} M[d] \quad (5)$$

donde \hat{d} es el inicio de nuestra trama. Si el desplazamiento de frecuencia es pequeño y un muestreo suficiente es empleado, luego la señal discreta en el tiempo en el receptor después de filtro de acoplamiento y del *downsampling* puede escribirse como:

$$y[n] = e^{j2\pi\epsilon n} \sum_{i=0}^L h[i] s[n-i] + v[n] \quad (6)$$

donde $\epsilon = f_0 T$. El objetivo de la sincronización de la frecuencia es el estimar el parámetro ϵ . Dando un estimador $\hat{\epsilon}$, elimina el desplazamiento de frecuencia realizando lo siguiente:

$$\bar{y}[n] = e^{-j2\pi\epsilon n} y[n] \quad (7)$$

Hay diferentes algoritmos para estimación de frecuencia de desplazamiento usando diferentes propiedades de la señal transmitida tales como periodicidad. Uno de los métodos más usados fue propuesto por Moose [2] y desde entonces ha sido estudiado ampliamente. Este método se basa en una especial secuencia de entrenamiento periódica. Además, otro algoritmo empleado fue el de Schmidl & Cox [3].

4. Doppler Shift

Doppler Shift f_d es proporcional a la frecuencia de portadora f_c , y está dada por:

$$f_d = \frac{v f_c}{c} \cos \alpha \quad (8)$$

tal que, v es la velocidad relativa entre las dos antenas transmisor y receptor, f_c es la frecuencia de portadora, c es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s) y $\alpha \in [0, \pi]$ es el ángulo del vector velocidad. La máxima f_d ocurre cuando $\alpha = 0$.

$$\max(f_d) = \frac{v f_c}{c} \quad (9)$$

Si asumimos $\alpha = 0^\circ$, el valor de f_d para 915 MHz de portadora se muestra en la Tabla 4 para varios valores de velocidad.

Tabla 1. Doppler Shift para varias velocidades.

V(km/h)	f_d (Hz) ($f_c = 915$ MHz)
1	3.05
5	15.25
10	30.50
20	61.00
30	91.50
40	122.00
50	152.50
60	183.00
70	213.50
80	244.00
90	274.50
100	305.00
150	457.50
200	610.00

5. Adaptación de Schmidl & Cox

El algoritmo de Schmidl & Cox se desarrolló para sistemas OFDM, basándose en las múltiples portadoras presentes en ese sistema. Para la implementación en nuestro sistema se buscó una relación entre ciertos valores para poder resolver la ecuación (1) [4].

L deberá ser referenciado a otro parámetro de nuestra trama original en el sistema de portadora única.

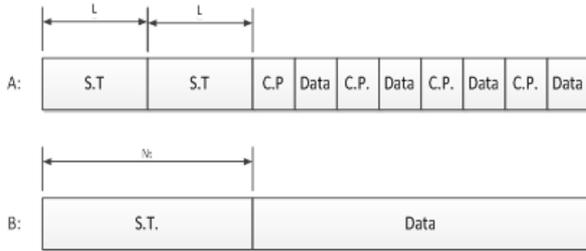


Figura 2. a) Trama OFDM compuesta por dos secuencias de entrenamiento (ST), el prefijo cíclico (CP) y los datos
b) Trama de un sistema de una sola portadora.

Como se muestra en la Figura 2, la estructura de la trama de cada sistema tiene una similitud, por lo que podemos plantear:

- $N_t = 2L$, se iguala las dimensiones de las secuencias de entrenamiento.
- N , es la cantidad de la ventana de operación (número de muestras) el cual tendrá una dimensión de $\frac{N_t}{2}$, la mitad de la dimensión de la secuencia insertada.

Quedando la expresión:

$$R[d] = \sum_{i=0}^{\frac{N_t}{2}} y^* [i+d] y \left[i+d + \frac{N_t}{2} \right] \quad (10)$$

$$P[d] = \sum_{i=0}^{\frac{N_t}{2}} \left| y \left[i+d + \frac{N_t}{2} \right] \right|^2 \quad (11)$$

donde se toma en consideración:

$$d[0, 1, 2, \dots, Z-1] \quad (12)$$

$$Z = \left\lfloor \frac{P}{N_t} - 1 \right\rfloor \frac{N_t}{2} \quad (13)$$

Siendo Z el valor que limita a la correlación, ya que se toman muestras de igual dimensión y se calcula su correlación, luego se obtiene la métrica con la ecuación 3 y el inicio de trama con la ecuación 4.

Una vez estimado el inicio de trama se procede a corregir el desplazamiento de frecuencia para lo cual se propone lo siguiente.

Se parte del primer paso del algoritmo para la sincronización trama, donde se calculó la correlación entre las dos mitades del símbolo $R[d]$ de forma que se han cancelado los efectos del canal.

Se calcula el desplazamiento en frecuencia de la siguiente forma:

$$\phi = \angle(R[d]) \quad (14)$$

$$\hat{f}_e = \frac{\phi}{\pi T} \quad (15)$$

ϕ : es la fase que forma la correlación $R[d]$.

\hat{f}_e : es la desviación en frecuencia que ha sufrido la señal y que habrá que corregir.

ϵ : es \hat{f}_e pero normalizada.

De esta forma, cuando la métrica temporal supere el umbral de detección se habrá estimado que la trama acaba de empezar y, cuando supere el de estimación, se tomará en ese instante el valor correspondiente de ϵ y ese será el *offset* de frecuencia a corregir en el resto de la trama.

Un punto importante en la corrección de desplazamiento de frecuencia, es que gracias a la periodicidad de la exponencial de tiempo discreto, la estimación de ϵ solo será exacta para $|\epsilon N_t| \leq \frac{1}{2}$ o de forma equivalente:

$$|\epsilon| \leq \frac{1}{2N_t} \quad (16)$$

$$|f_e| \leq \frac{1}{2T N_t} \quad (17)$$

Esto revela una interesante compensación para el estimador de correlación. Escoger un grande mejora la estimación, pero reduce el rango de compensación que pueden ser corregidos. Una forma de resolver este problema es utilizar múltiples repeticiones de una secuencia de entrenamiento corta.

6. Secuencias de entrenamiento

Las secuencias de entrenamiento son tramas de bits que poseen grandes propiedades de auto correlación y correlación cruzada. Estas son utilizadas para la sincronización y la estimación de canal.

La secuencia es conocida tanto en el transmisor como en el receptor. Se inserta al inicio de la trama de los datos modulados antes de ser enviados al canal.

Tabla 2. Código Barker y Willard Longitud 11 [3].

Longitud del código	Secuencia Barker
11	[- - - + + + - + + - +]
Longitud del código	Secuencia Willard
11	[+ + + - + + - + - - -]

Se utilizarán cuatro secuencias de Barker y cuatro de Willard, ambas de longitud 11, Tabla 6. Las cuales se modularán con igual método que la modulación de los bits de datos.

Cabe considerar que el símbolo modulado de la secuencia de entrenamiento debe conservar las mismas propiedades de la secuencia.

7. Resultados

Una vez implementados los algoritmos de sincronización de trama y desplazamiento de frecuencia, se procedió a realizar las gráficas mediante el programa Labview en donde se muestran cómo funcionan dichos algoritmos ante la presencia de un canal AWGN y otro Rayleigh con secuencia de entrenamiento Barker; tanto para simulación como en transmisión real para diferentes esquemas de modulación.

En la Figura 3 se muestra que para un canal AWGN con esquema 4 QAM se presenta una gran variación de la simulación con respecto a transmisión real, mientras que en esquemas como 16 y 64 QAM las curvas solo presentan una ligera variación.



Figura 3. SNR vs. BER de un canal AWGN transmisión real y simulación.

En la Figura 4 al cambiar el tipo de canal a Rayleigh el mismo comportamiento que en el caso de un canal AWGN tanto para simulación como para transmisión real.

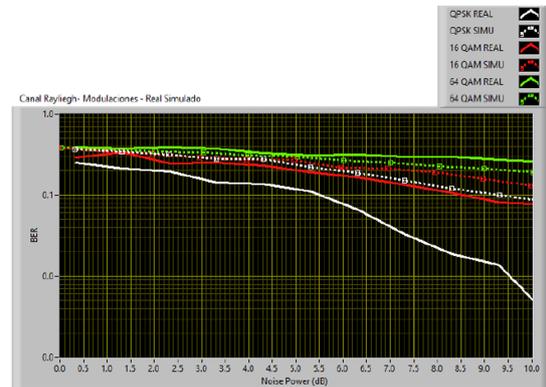


Figura 4. SNR vs. BER de un canal Rayleigh transmisión real y simulación.

Mediante estas pruebas se demuestra que la adaptación del algoritmo fue correcta y el sistema tiene la misma funcionalidad como si se trabajara con el algoritmo *Sliding Correlator* implementado en el libro *Digital Communications: Physical Layer Lab using the NI USRP Platform* [1]; estas pruebas se compararon con los resultados del algoritmo Sliding Correlator mostrando el mismo comportamiento con nuestras gráficas de SNR vs. BER.

El sincronizador basado en correladores necesita en el receptor reconocer una secuencia patrón lo que lo hace ineficiente frente al sincronizador Schmid & Cox que solo trabaja con la señal que llega al receptor.

Una vez corregido el inicio de trama y estimado $R[d]$, se procede a la detección y corrección del desplazamiento de frecuencia entre el transmisor y receptor, provocando una rotación en la constelación.

En la Figura 5 se muestra el efecto de desplazamiento de frecuencia, al colocar en el transmisor una frecuencia de desplazamiento de 150 Hz; se puede observar que el canal Rayleigh es más robusto a los desplazamientos de frecuencia, ya que aún se definen las regiones de constelación 4QAM; sin embargo, el canal AWGN es más propenso a generar mayor tasa de error a grandes desplazamientos de frecuencia.

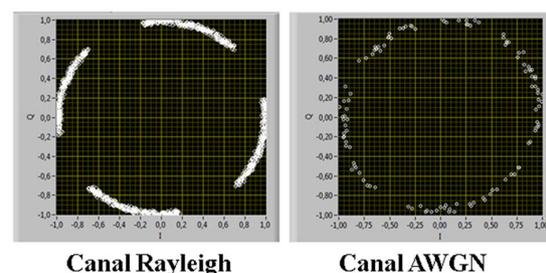


Figura 5. Efectos del desplazamiento de frecuencia en la constelación.

En la Figura 5 podemos observar que la constelación QPSK transmitida a través de un canal AWGN es mayormente afectada por el desplazamiento de frecuencia, mientras que el canal Rayleigh es más robusto frente a dicho desplazamiento.

En la Figura 6 también se puede observar como el canal Rayleigh es más robusto a desplazamientos de frecuencia mostrando un BER menor al que genera un canal AWGN. Una vez realizada la corrección de frecuencia mediante el algoritmo adaptado observamos los cambios en la constelación así como en el *bit error rate* del sistema.

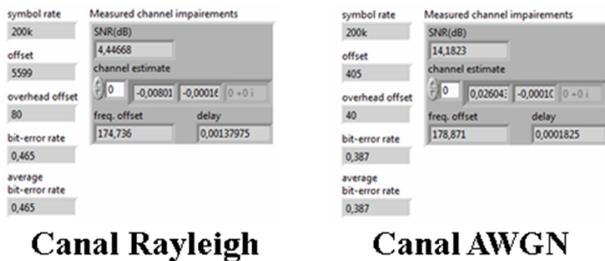


Figura 6. Parámetros afectados por el desplazamiento de frecuencia.

En las Figuras 7 y 8 se muestra la corrección del desplazamiento de frecuencia utilizando el algoritmo SAC, por lo que el sistema de detección y corrección del desplazamiento de frecuencia funciona correctamente tanto en un canal Rayleigh como en AWGN mostrando un BER de 0.

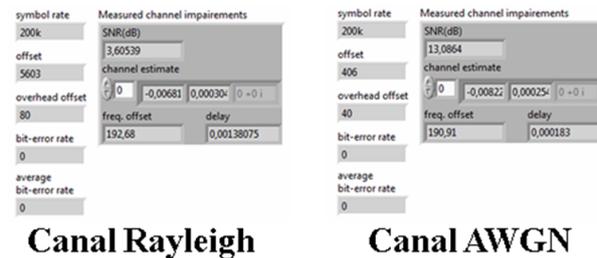


Figura 7. Después de corregir la frecuencia de desplazamiento.

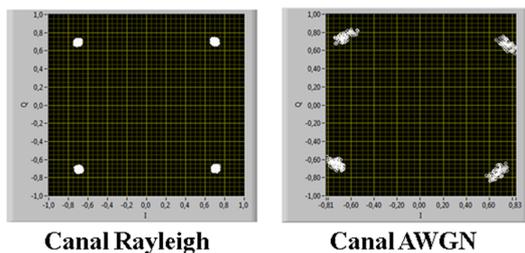


Figura 8. Constelación con corrección de frecuencia.

Para demostrar los máximos valores de corrección de frecuencia de desplazamiento al cambiar la secuen-

cia de entrenamiento se realizó las gráficas *Frequency Offset vs. BER* que se muestran a continuación.

En la Figura 9 se observan las gráficas de frecuencia de desplazamiento para una secuencia Barker y Willard de longitud 11 para el algoritmo de Schmidl & Cox, ya que la secuencia Willard (curva en blanco) presenta mejores propiedades de correlación para el algoritmo Schmidl and Cox, muestra una tasa de error menor a 0,1 en comparación con la secuencia Barker que se incrementa a 0,13 hasta una frecuencia de desplazamiento de 4500 Hz.

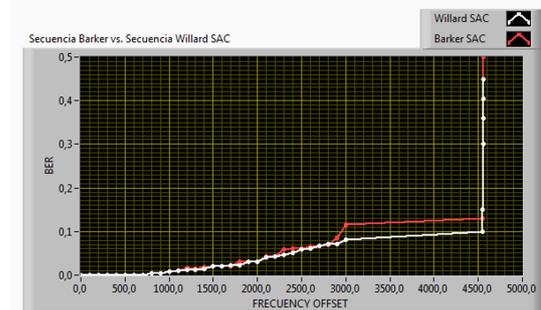


Figura 9. Secuencia Barker vs. Secuencia Willard en Schmidl and Cox.

Con las pruebas realizadas se obtuvo una mayor eficiencia utilizando el algoritmo Schmidl & Cox con secuencia de entrenamiento Willard o Barker con las cuales alcanza una corrección de 4500 Hz, superando a la frecuencia máxima corregida por Moose. Este valor máximo de corrección de frecuencia depende de varios parámetros tales como tipo de canal, *Oversample factor* y *sample rate*.

En la Figura 10 se realizó las curvas de BER vs. Noise Power con una secuencia Willard de longitud 11, para una frecuencia de desplazamiento de 500 Hz en este caso observamos un mejor BER cuando se utiliza el algoritmo Schmidl & Cox, lo mismo ocurre para una frecuencia de desplazamiento de 250 Hz.

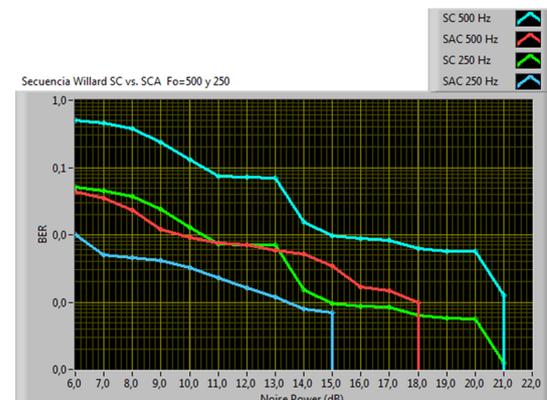


Figura 10. BER vs. Noise Power con varias frecuencias de desplazamiento.

Finalmente, se cambió el tamaño de la secuencia de Willard por una de longitud 13, en este caso al aumentar el tamaño de la secuencia de entrenamiento se disminuye el valor máximo de corrección de frecuencia 3846,15 Hz con un *Oversample* de 20 y *Sample Rate* 4 MHz en un canal Rayleigh, al cambiar uno de estos parámetros se ve afectada la máxima corrección de frecuencia de desplazamiento lo cual se puede demostrar mediante la relación

$$|f_e| \leq \frac{1}{2T N_t}; \quad T = \frac{\text{Oversample_Factor}}{\text{Sample_Rate}}$$

Al cambiar el tamaño de la secuencia de entrenamiento (mejores propiedades de autocorrelación) incrementa la robustez del algoritmo, siendo unos KHz (en el caso de Moose) hasta más de 100 KHz (en el caso de SAC). Dejando como indicio para futuros temas de investigación la búsqueda de una palabra que incremente la robustez y mejore los algoritmos de sincronización de trama y de frecuencia dentro de un sistema de comunicación.

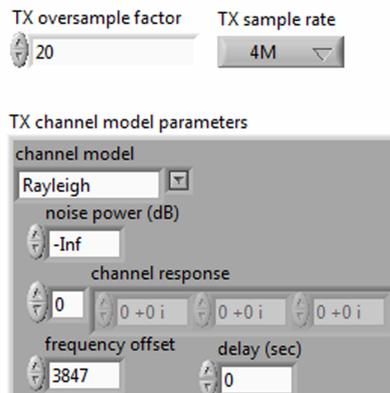


Figura 11. Parámetros de configuración en el transmisor.

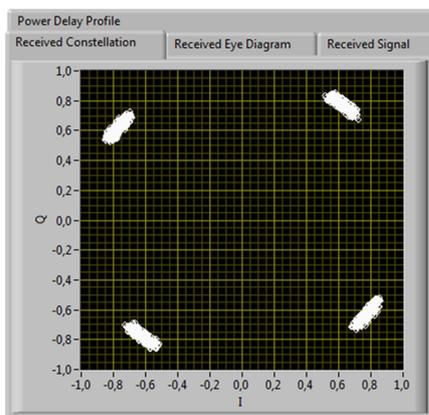


Figura 12. Constelación con corrección de frecuencia utilizando algoritmo Schmidl & Cox.

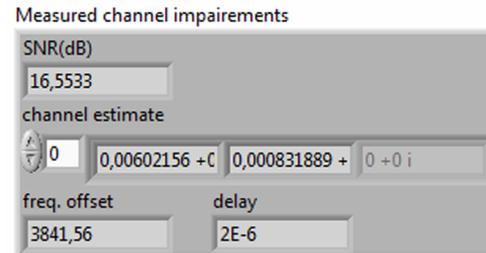


Figura 13. Estimación de frecuencia de desplazamiento corregida.

8. Conclusión y comentario

De los resultados obtenidos para el esquema diferentes esquemas de modulación en un canal Rayleigh se concluye que:

- La sincronización de trama en un sistema de comunicación tiene como propósito resolver retardos que no pueden ser corregidos por el sincronizador de símbolo ya que este no es capaz de corregir retardos que son múltiplos del periodo de símbolo, por tal motivo se utilizan los sincronizadores de trama:
- Dada la relación, para lograr una mayor corrección de frecuencia de desplazamiento se debe seleccionar pequeño, pero esto a su vez reducirá la estimación de trama por lo tanto lo que se debe hacer es utilizar múltiples repeticiones de una secuencia de entrenamiento corta.
- Se puede observar que el sistema de sincronización funciona perfectamente hasta una frecuencia de 500 Hz (163.93 km/h) en la cual no agrega ningún porcentaje de error al sistema. Lo cual indica que el sincronizador funcionaría en el caso de una persona que se traslada en un automóvil a alta velocidad.
- Cabe recalcar que el sistema puede operar hasta 4500 Hz como máximo en el cual puede corregir la frecuencia, pero a consecuencia de poder corregir la frecuencia puede agregar hasta un 10 % de error en el sistema lo cual afectaría al sistema de comunicación.

Referencias

- [1] R. Heath, *Digital Communications: Physical Layer Lab using the NI USRP Platform*. National Technology and Science Press, 2012.
- [2] B. Lathi, *Modern Digital and Analog Communication System*. Oxford University Press, 1998.

- [3] T. Schmidl and D. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for ofdm," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 45, no. 12, pp. 1613–1621, Dec 1997.
- [4] J. Hamad-Ameen, "Proposed sets of polyphase spreading sequences for DS-CDMA system," in *Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Telecommunications and Informatics*, Turkey, 2006.