

# INFORME DE LABORATORIO

## RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE

### LABORATORIO N° 8

Estudiantes: Carrión Andrés, Guzmán Mishel, Nupan Germán

Docente: Msc. Edgar Maya

Docente de Laboratorio: Msc. Alejandra Pinto Erazo

17 de junio de 2024

## 1. TÍTULO

Comunicaciones de Espectro Ensanchado

## 2. INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones de espectro ensanchado son una técnica avanzada utilizada en sistemas de telecomunicaciones para mejorar la resistencia a las interferencias y el uso eficiente del espectro. Estas técnicas, que incluyen el espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS) y el espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS), distribuyen la señal transmitida en un ancho de banda mucho mayor que el necesario para la transmisión de la información. Utilizando Matlab Simulink, una potente herramienta de simulación y modelado, se puede visualizar y analizar el comportamiento de los sistemas de espectro ensanchado, permitiendo a los ingenieros diseñar y optimizar estos sistemas para aplicaciones críticas en comunicaciones inalámbricas, como redes móviles, sistemas de GPS y comunicaciones militares.

## 3. OBJETIVOS

### 3.1. Objetivo General

- Comprender la aplicación de sistemas de comunicación de espectro ensanchado mediante técnicas de DSSS y hardware SDR, con un enfoque en aplicaciones como GPS y 3G CDMA.

### 3.2. Objetivos Específicos

- Comprender los principios básicos y la importancia de las técnicas de espectro ensanchado de secuencia directa en sistemas modernos de comunicación.
- Simular sistemas DSSS para experimentar con la sincronización de códigos y multiplexación por división de código.
- Construir y verificar los receptores de espectro ensanchado utilizando hardware SDR en condiciones reales.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. Espectro Ensanchado

El término espectro ensanchado se refiere a un método de transmisión de una señal en el que la señal se difunde variando intencionadamente la frecuencia a la que se envía. Esto tiene varias ventajas, incluido un ancho de banda más amplio y evitar objetos u otras frecuencias que puedan interferir con la señal original. El uso de un espectro extendido también puede hacer que la señal sea más segura y evitar que sea interceptada. (Sánchez Ponz, 2000)

### 4.2. Tipos de Espectro Ensanchado

#### 4.2.1. Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS)

El Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS) es una técnica de modulación donde una señal se distribuye a través de un ancho de banda mucho mayor al requerido para transmitir los datos originales. Esto se logra multiplicando la señal de datos con un código de secuencia de bits pseudoaleatorio (PN). Este proceso de ensanchado reduce la densidad espectral de potencia, lo que hace que la señal sea menos susceptible a las interferencias y más difícil de interceptar. DSSS se utiliza ampliamente en sistemas como el GPS y en tecnologías de comunicación inalámbrica como Wi-Fi (IEEE 802.11b). (Borges, 2000)

##### Ventajas de DSSS:

- Mejora de la resistencia a las interferencias.
- Aumento de la privacidad y seguridad.
- Capacidad de corrección de errores.

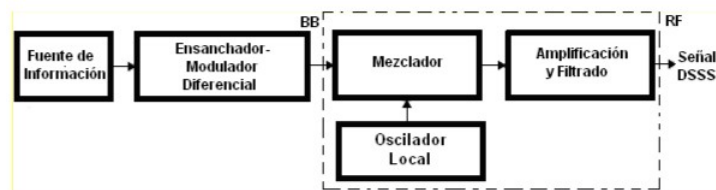


Figura 1: Diagrama general de bloques para un transmisor DSSS utilizando modulación directa

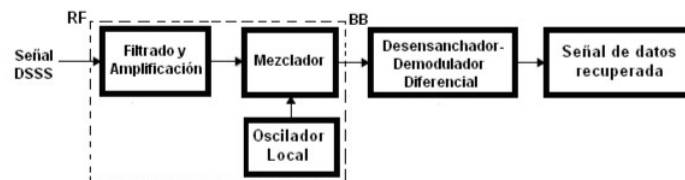


Figura 2: Diagrama general de bloques para un receptor DSSS utilizando modulación directa

### 4.3. Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia (FHSS)

El Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia (FHSS) es otra técnica de modulación en la que la frecuencia portadora de la señal cambia según una secuencia pseudoaleatoria conocida tanto por el transmisor como por el receptor. La señal "salta" entre diferentes frecuencias dentro de un rango amplio, lo que proporciona robustez contra interferencias y

permite múltiples transmisiones simultáneas en el mismo espectro sin interferencia significativa entre ellas.([Amaya Ocampo, 2008](#))

- Alta resistencia a las interferencias y al ruido.
- Mejor seguridad contra la interceptación.
- Reducción del impacto de la interferencia de banda estrecha.

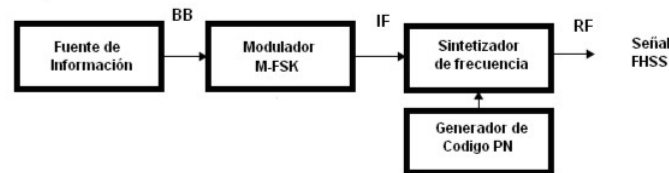


Figura 3: Diagrama general de bloques para un transmisor FHSS

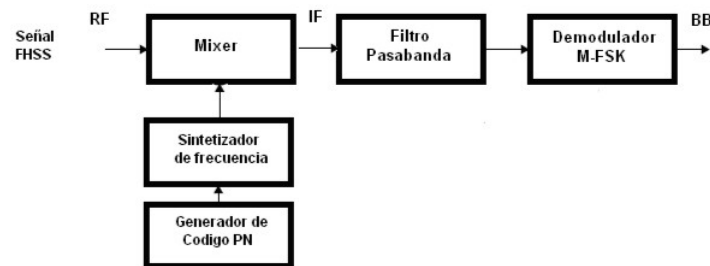


Figura 4: Diagrama general de bloques para un Receptor FHSS

#### 4.4. Tecnología de Radio Definida por Software (SDR)

La tecnología de Radio Definida por Software (SDR) permite que los componentes de radiofrecuencia que tradicionalmente se implementan en hardware (como mezcladores, filtros y moduladores/demoduladores) se implementen mediante software en un ordenador o en hardware reconfigurable. Esto proporciona una flexibilidad tremenda, ya que un solo hardware SDR puede soportar múltiples estándares de comunicación mediante actualizaciones de software.([Zafra, 2000](#))

##### 4.4.1. Ventajas de utilizar SDR en comunicaciones de espectro ensanchado

- Flexibilidad y reconfigurabilidad: Permite cambiar fácilmente los parámetros del sistema (frecuencia, modulación, etc.) mediante software.
- Desarrollo y prototipado rápidos: Facilita la experimentación y desarrollo de nuevos protocolos y tecnologías sin necesidad de cambiar el hardware.
- Compatibilidad multiestándar: Un único dispositivo puede soportar múltiples estándares de comunicación, lo que reduce costes y complejidad.([Zafra, 2000](#))

Figura 5: Frecuencias del espectro radioeléctrico.

## 5. Diagrama de Bloques

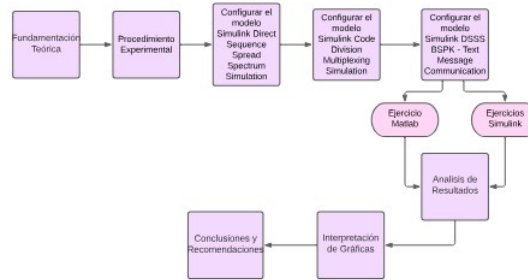


Figura 6: Diagrama de proceso

## 6. Materiales

- PC portátil
- Matlab
- Simulink
- RTL-SDR

## 7. DESARROLLO

Para empezar con el desarrollo de la práctica de este laboratorio, se utiliza lo que sería el software de Matlab, lo primero que vamos a hacer es simular la transmisión y recepción de un mensaje binario utilizando un código de secuencia pseudoaleatoria (PN) para la correlación, que es una técnica común en comunicaciones digitales y sistemas de espectro ensanchado.

### 7.1. EJERCICIO 1

Como primera parte del código utilizado para el desarrollo de la práctica es la generación del mensaje binario, en esta parte se ha agregado primero un texto en ASCII para luego transformarlo a binario e imprimir dicho mensaje.

```
% Generación del mensaje binario
close all;
clear all;

% Crear mensaje.
mensaje = dec2bin('MSOE University\n', 8);
numCaracteres = size(mensaje, 1);
fprintf('Mensaje original:\n%s\n', char(bin2dec(mensaje)));
```

Figura 7: Generación del mensaje binario.

La siguiente parte del código es la conversión del mensaje binario a vector de bits, en esta parte se construye una matriz y se la organiza en un vector columna además de eso se agrega una parte importante que es la secuencia del preámbulo al inicio del mensaje para una mayor facilidad de recepción.

```

% Convertir cadenas binarias en vectores
mensaje = mensaje - '0';

% Reformar en un vector de bits; 8 bits por carácter
mensaje = reshape(mensaje.', 8*numCaracteres, 1);

% Asegurarse de que 'pre' sea un vector columna
pre = [0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1].';
mensaje = [pre; mensaje]; % Concatenar como vectores columna
numSimbolosTotales = length(mensaje);

disp('Paquete de mensaje:');
disp(mensaje.');

```

Figura 8: Conversión del Mensaje Binario a Vector de Bits.

A continuación, se define un código PN (Secuencia Pseudoaleatorio) que se usará para la correlación y este esta alternando entre -1 y 1.

```

% Especificar el código PN para la correlación
codigo = [-1 1 -1 1 1 -1 1 -1 -1 1 -1 -1 1 1];
M = length(codigo);

```

Figura 9: Especificación del Código PN.

En el siguiente punto vamos a definir una secuencia de transmisión, en donde también vamos a aplicar un factor de expansión a la secuencia, utilizando el código PN que se creó anteriormente, además de eso vamos a añadir un ruido blanco gaussiano a la señal transmitida con una relación señal-ruido de 10 dB, simulando un canal de transmisión ruidoso.

```

% Simular transmisión y correlación en tiempo real
% Suponer un factor de expansión de M
m = [1 1 -1 1];
senal_transmitida = kron(m, codigo);

% Agregar ruido a la señal transmitida (opcional)
senal_ruidosa = awgn(senal_transmitida, 10); % Relación señal-ruido de 10 dB

```

Figura 10: Simulación de Transmisión y Correlación en Tiempo Real.

Ahora vamos a realizar la correlación cruzada entre la señal ruidosa recibida y el código PN, lo cual ayuda a detectar la presencia del mensaje en la señal ruidosa y determinar el desfase temporal.

```

% Correlación en tiempo real
[correlacion, desfase] = xcorr(senal_ruidosa, codigo);

```

Figura 11: Correlación en Tiempo Real.

Finalmente vamos a crear los gráficos para visualizar los resultados, el primer subgráfico muestra la correlación en función del desfase, indicando dónde se alinea mejor el código PN con la señal ruidosa y el segundo subgráfico muestra la señal transmitida con ruido a lo largo del tiempo.

```

% Visualizar resultados
figure;
subplot(2,1,1);
stem(desfase, correlacion);
title('Correlación con el código PN');
xlabel('Desfase');
ylabel('Correlación');
grid on;

subplot(2,1,2);
plot(senal_ruidosa);
title('Señal transmitida con ruido');
xlabel('Tiempo');
ylabel('Amplitud');
grid on;

```

Figura 12: Visualización de Resultados.

En la sección de resultados se mostrara los gráficos que se consiguió con esta simulación y también el respectivo análisis de las mismas.

## 7.2. EJERCICIO 2

Sistema de comunicación utilizando Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS) con modulación BPSK (Binary Phase-Shift Keying).

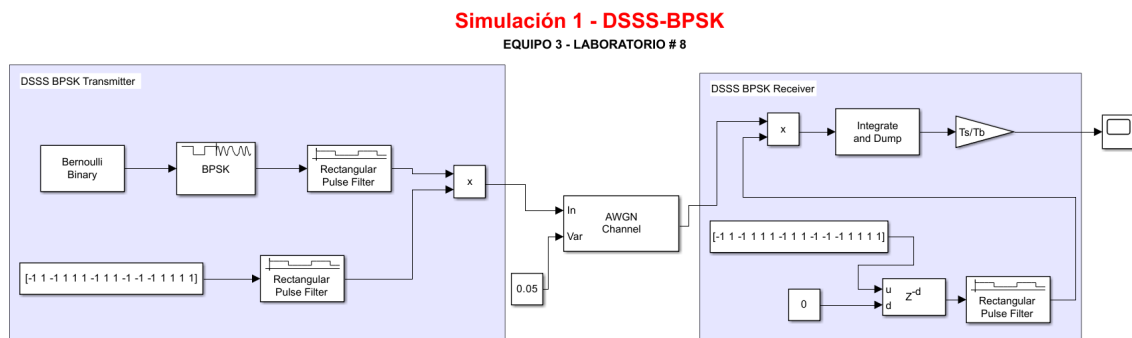


Figura 13: Simulación DSSS.

Este sistema utiliza una técnica de espectro ensanchado para mejorar la resistencia al ruido y las interferencias, y emplea modulación BPSK para la transmisión de datos binarios. El proceso de transmisión implica la modulación y ensanchado de la señal, mientras que el proceso de recepción incluye la correlación y demodulación para recuperar la información original.

Configuración de las funciones de inicialización del modelo que permite definir funciones que se ejecutan en momentos específicos durante la simulación del modelo.

Componente	Función	Transmisor/Receptor
Bernoulli Binary Source	Genera bits binarios aleatorios.	Transmisor
BPSK Modulator	Modula bits en señal BPSK.	Transmisor
Rectangular Pulse Filter	Da forma a la señal modulada.	Ambos
Spread Spectrum Sequence	Ensancha el espectro de la señal.	Transmisor
Multiplicador (x)	Mezcla señal modulada con secuencia.	Ambos
AWGN Channel	Modelo de canal con ruido.	Canal
Integrate and Dump	Integra y promedia la señal.	Receptor
Delay ( $Z^{-d}$ )	Sincroniza la secuencia de ensanchado.	Receptor
Decision Block ( $T_s/T_b$ )	Decide si el bit es 0 o 1.	Receptor
Output	Recupera el mensaje original.	Receptor

Cuadro 1: Componentes del Transmisor y Receptor DSSS BPSK

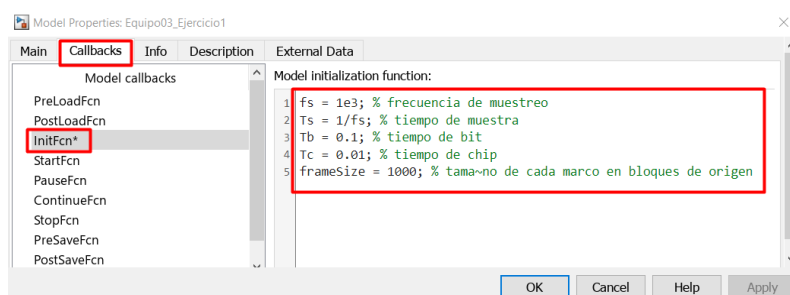


Figura 14: Parámetros para InitFcn.

### 7.3. EJERCICIO 3

Sistema de comunicación utilizando Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS) con modulación BPSK (Binary Phase-Shift Keying) para dos usuarios.

#### Simulación 2 - Multiplexación

EQUIPO 3 - LABORATORIO # 8

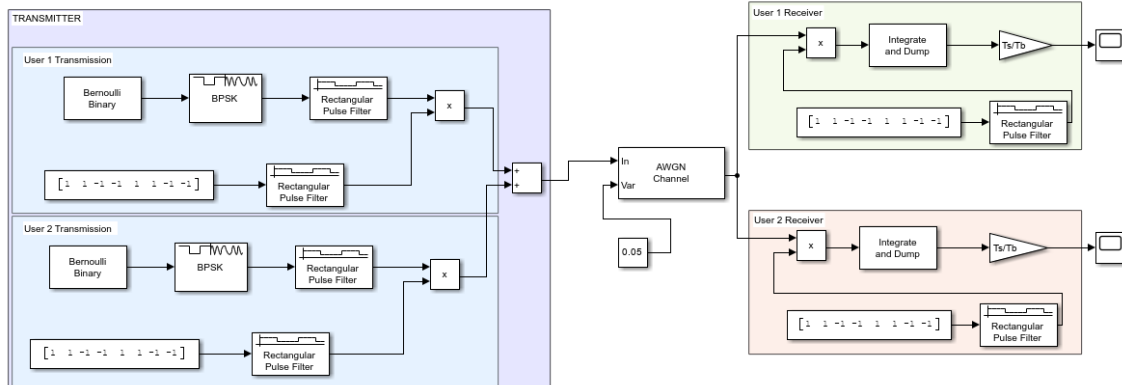


Figura 15: Simulación DSSS - Multiplexación.

Este sistema muestra cómo dos usuarios pueden transmitir simultáneamente sus señales utilizando DSSS y BPSK, y cómo estas señales se pueden recuperar independientemente en el receptor a pesar de la presencia de ruido en el canal. Cada usuario utiliza una secuencia de ensanchado única que permite la correcta identificación y recuperación de sus datos en el receptor.

Componente	Función	Ubicación
Bernoulli Binary Source	Genera bits binarios aleatorios.	Transmisor (Usuario 1 y Usuario 2)
BPSK Modulator	Modula bits en señal BPSK.	Transmisor (Usuario 1 y Usuario 2)
Rectangular Pulse Filter	Da forma a la señal modulada.	Transmisor (Usuario 1 y Usuario 2), Receptor (Usuario 1 y Usuario 2)
Spread Spectrum Sequence	Ensancha el espectro de la señal.	Transmisor (Usuario 1 y Usuario 2)
Multiplicador (x)	Mezcla señal modulada con secuencia.	Transmisor (Usuario 1 y Usuario 2), Receptor (Usuario 1 y Usuario 2)
AWGN Channel	Modelo de canal con ruido.	Canal
Integrate and Dump	Integra y promedia la señal.	Receptor (Usuario 1 y Usuario 2)
Decision Block (Ts/Tb)	Decide si el bit es 0 o 1.	Receptor (Usuario 1 y Usuario 2)
Output	Recupera el mensaje original.	Receptor (Usuario 1 y Usuario 2)

Cuadro 2: Componentes del Transmisor, Canal y Receptor del Sistema DSSS BPSK

Configuración de las funciones de inicialización del modelo que permite definir funciones que se ejecutan en momentos específicos durante la simulación del modelo.

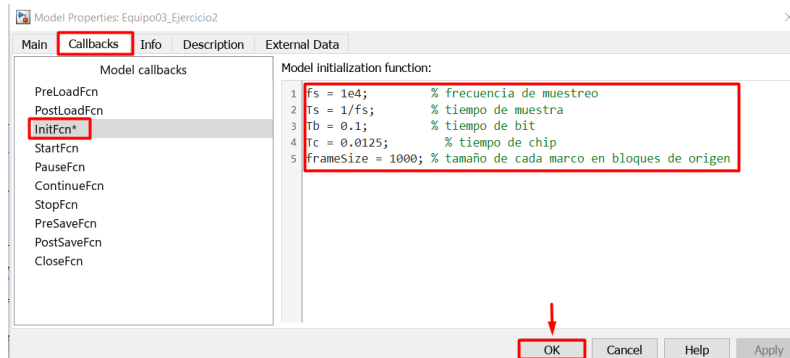


Figura 16: Parámetros para InitFcn.

## 7.4. EJERCICIO 4

### DSS BPSK TRASMITTER



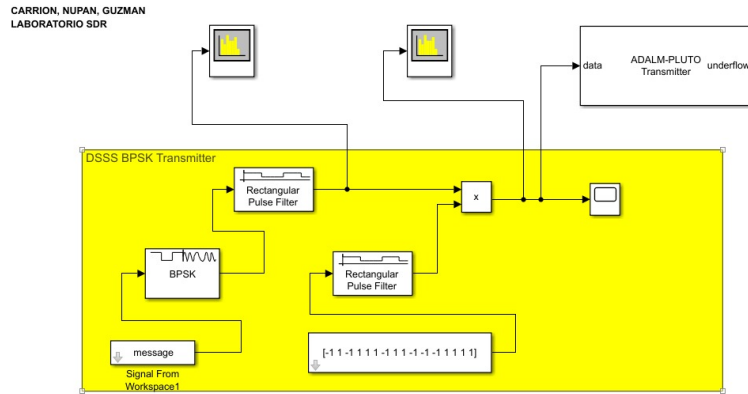


Figura 17: Diagrama de Bloques

Se añade un bloque de "BPSK Modulator Baseband" para modular la señal ensanchada.

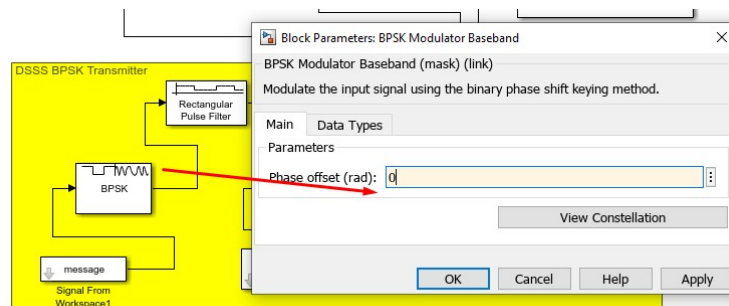


Figura 18: PBloque BPSK Modulator Baseband

Configuración del Filtro FIR

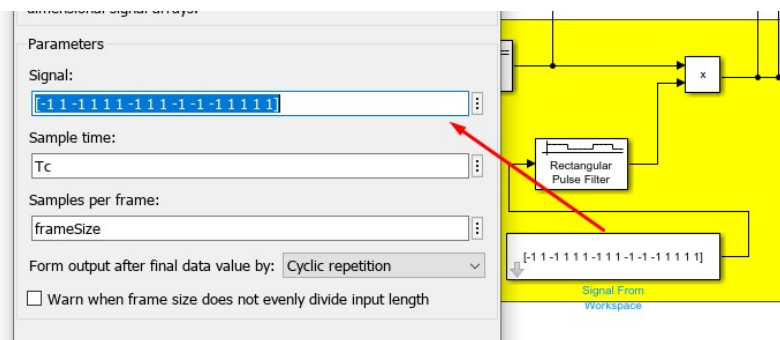


Figura 19: Ingreso de la señal.

El filtro de pulso rectangular se utiliza para dar forma a los pulsos en el dominio del tiempo, lo cual es útil para reducir el ancho de banda de la señal y mejorar la eficiencia espectral. El filtro FIR se configura para emplear una ventana rectangular, lo que se puede lograr ajustando manualmente los coeficientes del filtro. Si  $T_b$  representa el tiempo de bit y  $T_s$  el tiempo de muestreo, el número de muestras por bit será  $T_b$  dividido por  $T_s$ . Además, se configura el valor de la longitud del vector.

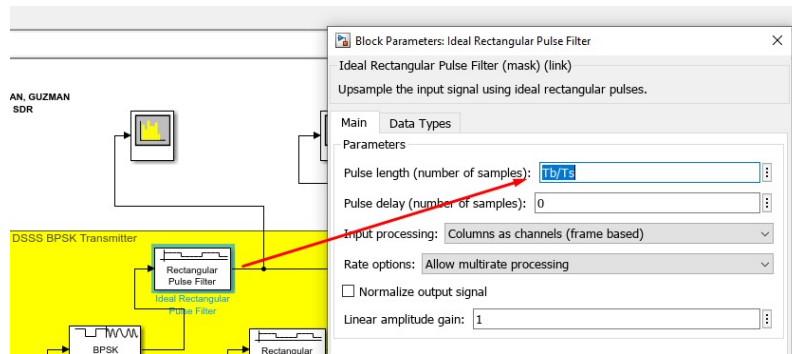


Figura 20: Rectangular pulse filter  $T_b/T_s$

Se configura el filtro FIR para utilizar una ventana rectangular, lo cual se puede lograr ajustando manualmente los coeficientes del filtro. Si  $T_c$  representa el tiempo de chip y  $T_s$  el tiempo de muestreo, el número de muestras por chip será  $T_c$  dividido por  $T_s$ .

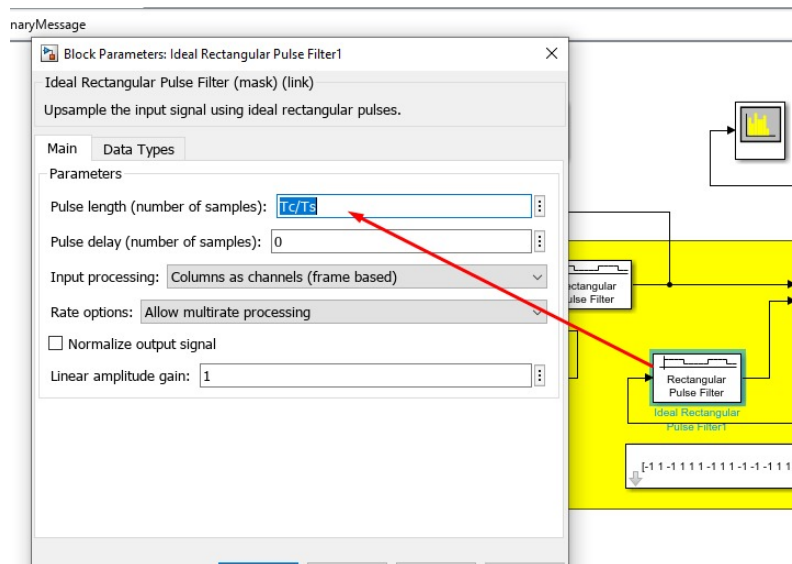


Figura 21: Rectangular pulse filter  $T_c/T_s$

Se define el  $T_b$  como el tiempo de bit (el tiempo que dura cada bit en la secuencia de datos).

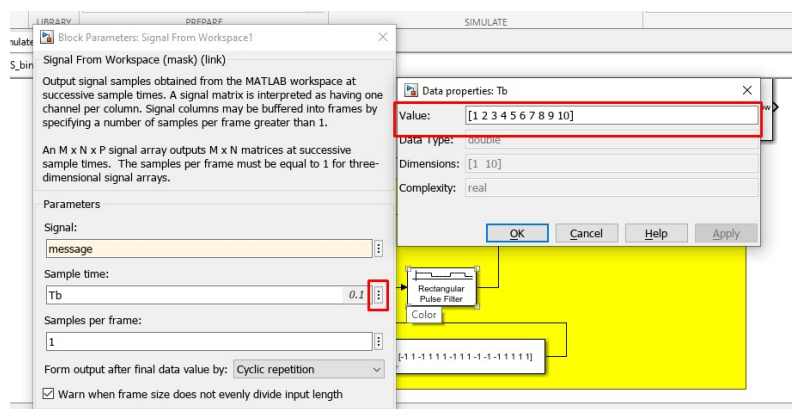


Figura 22: Definición del Tiempo de bit

## 8. RESULTADOS

### 8.1. Ejercicios en Matlab

#### 8.1.1. Ejercicio 1

##### Análisis de Resultados de Correlación y Transmisión

La correlación cruzada entre una señal ruidosa y un código pseudoaleatorio (PN) revela cómo detectar y sincronizar la señal transmitida en ambientes con interferencias. Un pico notable en la correlación cerca del desfase cero confirma que el código PN está bien alineado con la señal ruidosa, indicando que se ha logrado identificar la señal transmitida a pesar del ruido. El gráfico de la señal transmitida con ruido ilustra cómo el ruido blanco gaussiano, con una relación señal-ruido de 10 dB, afecta la señal original. A pesar de las variaciones significativas en la amplitud debido al ruido, el patrón general de la señal permanece reconocible, lo que permite una correlación efectiva con el código PN. Este experimento demuestra la eficacia del uso de códigos PN para la transmisión y detección de señales, destacando su capacidad para preservar la integridad del mensaje en entornos ruidosos. Esto es especialmente beneficioso en comunicaciones digitales y sistemas de espectro ensanchado donde la resistencia al ruido es crucial.

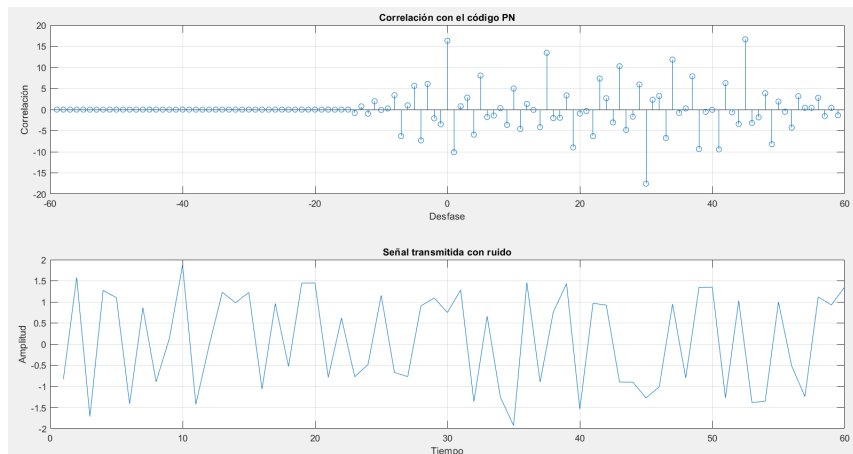


Figura 23: Gráficos obtenidos de la simulación del Ejercicio 1.

### 8.2. EJERCICIO 2

La gráfica de la simulación muestra la amplitud de la señal en función del tiempo.

- **Línea Amarilla:** Representa la señal BPSK modulada y ensanchada que se transmite a través del canal.
- **Línea Azul:** Posiblemente representa la señal desensanchada en el receptor después del proceso de correlación. Esta señal debería mostrar menos ruido debido a la integración y filtrado realizados en el receptor.

El sistema DSSS BPSK es muy eficiente para la transmisión de señales en entornos ruidosos. Una vez que una señal se ha propagado y transmitido a través de un canal ruidoso, se puede recuperar en el receptor mediante el proceso de descomposición. Esta figura muestra que aunque la señal se ve afectada por el ruido durante la transmisión, el diseño del receptor, incluida la correlación, la integración y el filtrado, puede recuperar eficazmente la señal original.

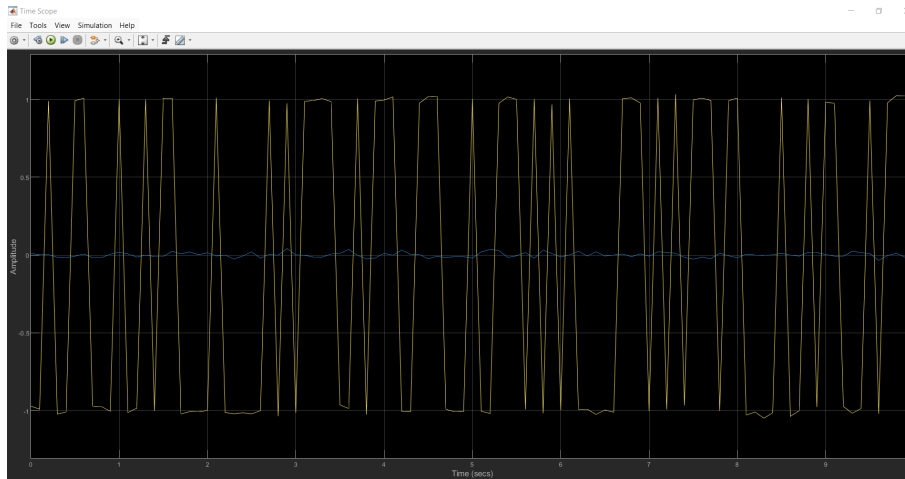


Figura 24: Resultado Scope.

### 8.3. EJERCICIO 3

La gráfica muestra la amplitud de la señal en función del tiempo, con señales combinadas de ambos usuarios y la recuperación de cada señal individualmente en sus respectivos receptores.

- **Línea amarilla:** Representa la señal combinada de ambos usuarios transmitida a través del canal con ruido.
- **Línea Azul (en ambas gráficas):** Representa la señal desensanchada en cada receptor después del proceso de correlación. Esta señal debe mostrar menos ruido debido a la integración y filtrado realizados en el receptor.

Un sistema DSSS reutilizable permite la transmisión simultánea de múltiples señales de diferentes usuarios a través de un solo canal utilizando una secuencia de dispersión específica para cada usuario. A pesar del ruido del canal, los procesos de dispersión y correlación cruzada en el receptor contribuyen a la recuperación efectiva de la señal original para cada usuario. Esta figura muestra que el diseño del receptor (incluida la correlación, la integración y el filtrado) puede recuperar eficazmente la señal original, separar la señal combinada y reducir el efecto del ruido.



Figura 25: Resultado Scope 1.

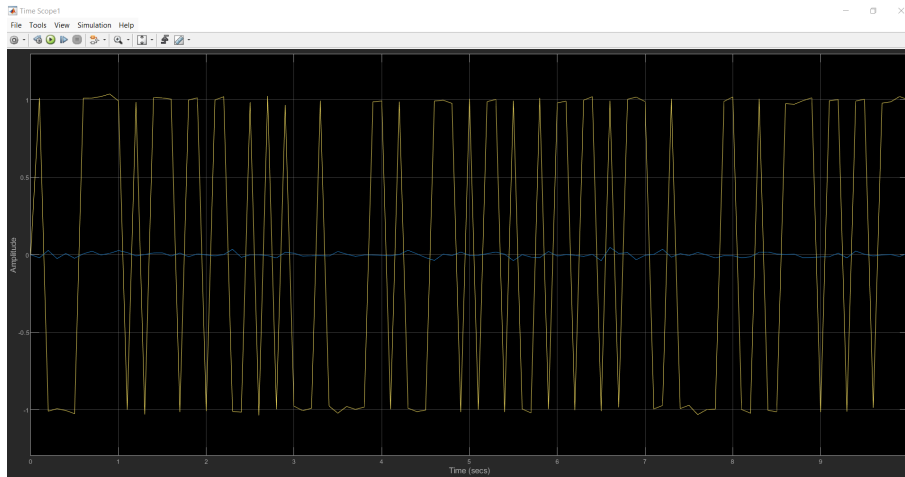


Figura 26: Resultado Scope 2.

#### 8.4. EJERCICIO 4

Se Configura un transmisor DSSS BPSK en Simulink que permite observar y analizar el proceso completo de transmisión de datos utilizando técnicas de espectro ensanchado y modulación por desplazamiento de fase binaria.

##### ■ Entrada

La señal de entrada se crea como una secuencia de bits binarios, la cual es multiplicada por una secuencia pseudoaleatoria para expandir su espectro. Posteriormente, esta señal ensanchada pasa por un filtro de pulso rectangular y se somete a modulación de fase. Utilizando herramientas como Time Scope y Spectrum Analyzer, se pueden observar estas señales tanto en el dominio del tiempo como en el espectro, lo que facilita la comprensión y validación del diseño y el rendimiento del sistema de comunicación.

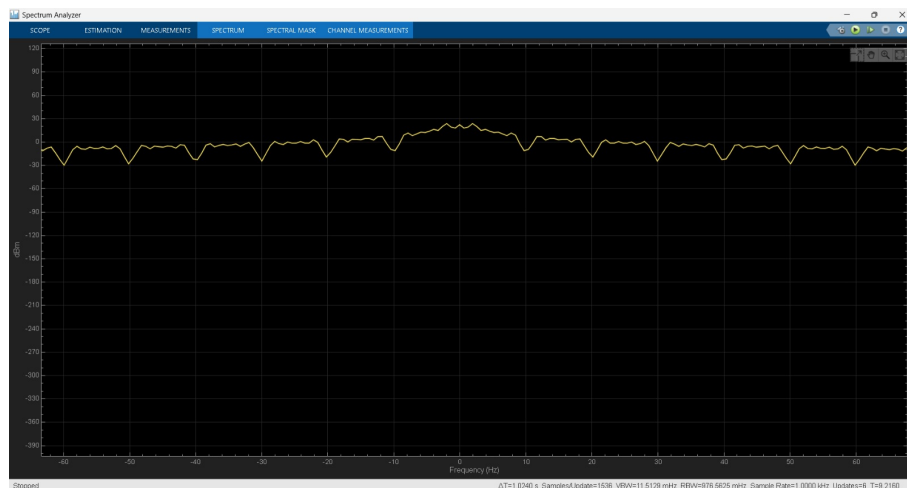


Figura 27: DSS BPSK TRASMITTER- Señal de entrada

##### ■ Salida

La señal de salida de un transmisor DSSS BPSK en Simulink es una onda modulada en fase que combina la secuencia de datos original con una pseudoaleatoria ensanchada. Gracias al filtrado por un pulso rectangular, las transiciones entre bits son suaves, y los cambios de fase representan los bits.

El Time Scope permite observar la modulación en fase y el ensanchamiento del espectro, mientras que el Spectrum Analyzer muestra la energía distribuida en una banda más amplia, destacando la robustez del sistema DSSS frente a interferencias.

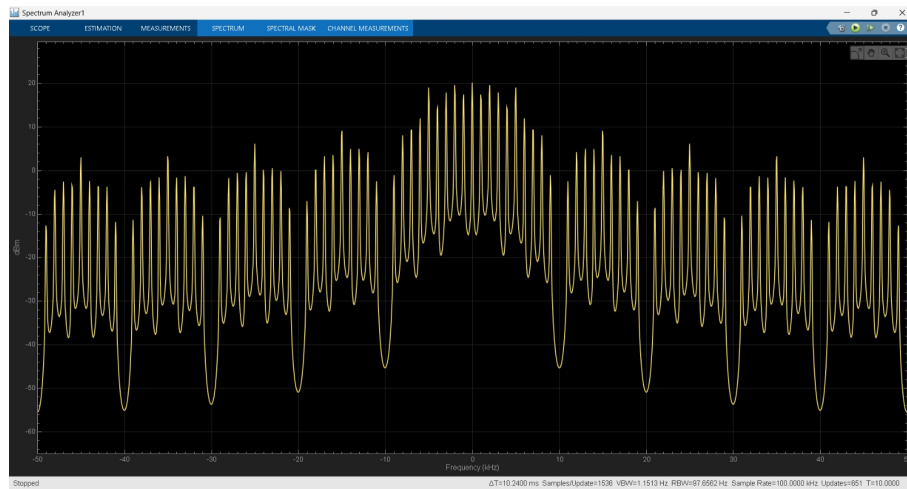


Figura 28: DSS BPSK TRASMITTER- Señal de salida

- Cuadrícula En un transmisor DSSS BPSK en Simulink, la señal cuadrícula se refiere a la secuencia inicial de bits binarios, representada como una onda discreta en el dominio del tiempo. Cada punto en esta cuadrícula corresponde a un bit, con una duración específica ( $T_b$ ). Al multiplicar esta secuencia con una pseudoaleatoria generada por un PN Sequence Generator, se obtiene una señal ensanchada que mejora la resistencia a interferencias y la seguridad en las comunicaciones.

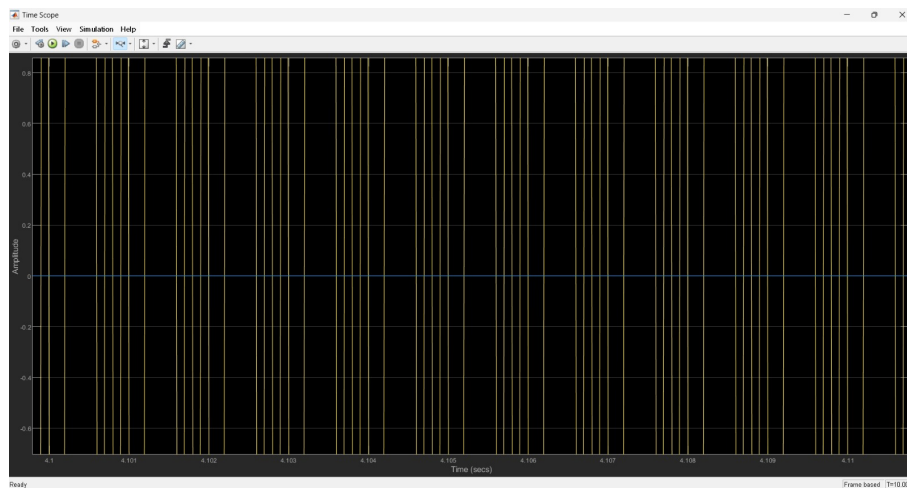


Figura 29: DSS BPSK TRASMITTER- Señal cuadrícula.

## 8.5. Preguntas

### 8.5.1. ¿Cuáles son las ventajas de utilizar sistemas de comunicación de espectro ensanchado?

Ventaja	Descripción
Resistencia a interferencias	Distribuye la energía de la señal en un amplio rango de frecuencias, reduciendo la vulnerabilidad a interferencias.
Seguridad y privacidad	Dificulta la interceptación y descifrado por receptores no autorizados, mejorando la seguridad.
Capacidad anti-jamming	Recupera la señal original incluso con partes del espectro bloqueadas, protegiendo contra interferencias intencionadas.
Uso eficiente del espectro	Permite que múltiples usuarios compartan el mismo ancho de banda sin causar interferencias significativas.
Robustez en entornos de múltiples trayectorias	Mejora el rendimiento en entornos con múltiples rutas de señal, reduciendo los efectos del desvanecimiento.

Cuadro 3: Ventajas de los sistemas de comunicación de espectro ensanchado

### 8.5.2. ¿Qué son las secuencias pseudo-aleatorias y qué propiedades estadísticas deben cumplir para ser utilizadas como señales de código?

Las secuencias pseudoaleatorias (PRBS) son aquellas series numéricas que se producen por algoritmos deterministas que, sin embargo, aparentan ser aleatorias. Para que estas secuencias sean efectivas como señales de codificación en sistemas de espectro ensanchado, es necesario que cumplan con ciertas características estadísticas:

Propiedad	Descripción
Período largo	La secuencia debe repetirse después de un largo período para garantizar alta aleatoriedad.
Equilibrio de 1s y 0s	La secuencia debe tener cantidades similares de 1s y 0s para evitar patrones predecibles.
Baja autocorrelación	La autocorrelación debe ser baja (excepto en cero) para reducir interferencia y facilitar la sincronización.
Baja correlación cruzada	Diferentes secuencias deben tener baja correlación cruzada para minimizar interferencias entre usuarios.

Cuadro 4: Propiedades necesarias de las secuencias pseudoaleatorias (PRBS)

**8.5.3. Qué diferencia hay entre las técnicas de espectro expandido de secuencia directa (DSSS) y de salto de frecuencia (FHSS)?**

Propiedad	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)	FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)
Principio	La señal de datos se multiplica por una secuencia de bits de alta tasa para ensanchar su espectro.	La portadora de la señal cambia frecuencias dentro de un ancho de banda amplio siguiendo una secuencia pseudoaleatoria.
Ancho de banda	El ancho de banda se ensancha proporcionalmente a la tasa de chips.	El ancho de banda total es el rango de frecuencias por donde salta la portadora.
Interferencia	Mejor resistencia a interferencia continua de banda estrecha.	Más eficaz contra interferencia intencionada (jamming).
Sincronización	Requiere sincronización precisa de la secuencia de chips entre transmisor y receptor.	Requiere sincronización precisa de la secuencia de salto de frecuencias entre transmisor y receptor.

Cuadro 5: Comparación entre DSSS y FHSS

**8.5.4. ¿Qué es la modulación BPSK y cómo se realiza la operación de despreading en un sistema DSSS?**

La modulación BPSK es una tecnología de modulación digital que utiliza dos fases diferentes de una señal portadora para representar bits binarios. En BPSK, los bits "0" están representados por una fase de 0 grados, mientras que los bits "1" están representados por una fase de 180 grados (y viceversa).

▪ Operación de despreading en un sistema DSSS:

El despreading es el proceso mediante el cual el receptor recupera la señal de datos original. En un sistema DSSS, la señal recibida se multiplica nuevamente por el mismo orden de dispersión utilizado por el transmisor.

**8.5.5. ¿Qué es la multiplexación por división de código (CDM) y qué códigos se utilizan para la separación de señales?**

La multiplexación por división de código (CDM) es una tecnología utilizada en sistemas de comunicación que permite transmitir múltiples señales de datos simultáneamente en un solo canal. Para lograr esto, cada señal se codifica con un código único que facilita al receptor separar y reconstruir señales individuales. Esta tecnología es la base de tecnologías como CDMA (Acceso múltiple por división de código), que se utilizan ampliamente en las comunicaciones móviles.



<b>Tipo de Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Propiedades</b>	<b>Uso</b>
Códigos de Walsh	Secuencias ortogonales que forman matrices de Hadamard.	Ortogonales, baja correlación cruzada.	Separar usuarios en CDMA.
Secuencias de Gold	Combinan dos secuencias de máxima longitud mediante XOR.	Buena autocorrelación y baja correlación cruzada.	Comunicaciones por satélite y CDMA.
Secuencias de Kasami	Secuencias pseudoaleatorias con baja correlación.	Buena autocorrelación, baja correlación cruzada (no tan baja como Gold).	Aplicaciones con moderado número de señales.

Cuadro 6: Tipos de códigos utilizados para la separación de señales en CDM

#### 8.5.6. ¿Cómo se logra la resistencia a interferencias en los sistemas de comunicación de espectro ensanchado?

La inmunidad a los sistemas de comunicaciones de espectro ensanchado se logra distribuyendo la energía de la señal en una gama de frecuencias más amplia que la que requiere la señal original. Esta expansión se logra utilizando secuencias de código (también llamadas secuencias extendidas o secuencias de chips). Las principales razones para mejorar las capacidades antiinterferencias son:

<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>
Dispersión del ruido	La señal se distribuye en un amplio ancho de banda, diluyendo el ruido y las interferencias, y permitiendo una recepción clara de la señal.
Capacidad anti-jamming	Menos vulnerable a interferencias intencionadas; la señal original se puede recuperar incluso si parte del espectro está bloqueado.
Recuperación de la señal	El receptor usa la misma secuencia para filtrar ruido e interferencias, recuperando la señal original con claridad.

Cuadro 7: Características de los sistemas de espectro ensanchado

**8.5.7. ¿Qué función cumplen los bloques que realizan la correlación cruzada en el receptor de un sistema DSSS?**

Función	Descripción
Desensanchado	La señal recibida se multiplica por la misma secuencia de ensanchado del transmisor para recuperar la señal original.
Filtrado de ruido	La correlación cruzada filtra el ruido y las interferencias no correlacionadas, mejorando la relación señal-ruido (SNR).
Sincronización	Facilita la sincronización del receptor con el transmisor mediante un pico claro en la autocorrelación de la secuencia de ensanchado.
Demodulación	Después de la correlación cruzada, la señal resultante se integra y decodifica para recuperar los datos originales.

Cuadro 8: Funciones de los sistemas de espectro ensanchado

**8.5.8. ¿Cómo se implementa en software un bloque que realiza la correlación cruzada para sistemas DSSS?**

La implementación de módulos en software para realizar correlación cruzada para sistemas DSSS implica el uso de técnicas de procesamiento de señales digitales para multiplicar la señal recibida por la secuencia de chip adecuada y luego integrar y evaluar los resultados.

**8.5.9. ¿Cómo se podría implementar un sistema híbrido FH/DS mediante radio definida por software?**

Para crear un sistema híbrido FH/DS (salto de frecuencia / secuencia directa) usando radio definida por software (SDR), puedes seguir estos pasos:

- Crea un código pseudoaleatorio (PN) que se usará para la secuencia directa. Este código se mezclará con la señal de datos para ensanchar su espectro.
- Configurar un SDR y asegúrate de que el software necesario esté instalado y funcionando correctamente.
- Modular la señal de datos con el código PN. Esto se hace para que la señal ocupe un ancho de banda más amplio, lo que la hace más resistente a interferencias y ruido.
- Definir un patrón de salto de frecuencia. Este patrón debe ser conocido tanto por el transmisor como por el receptor. El sistema cambiará de frecuencia de acuerdo con este patrón durante la transmisión.
- Transmitir la señal modulada y saltada en frecuencia a través del SDR.
- En el receptor, utiliza el mismo patrón de salto de frecuencia y el mismo código PN para recibir y desmodular la señal. Esto recuperará la señal original de datos.
- Asegúrate de que el transmisor y el receptor estén perfectamente sincronizados en términos de tiempo y frecuencia para que el proceso de salto de frecuencia y desmodulación funcione correctamente.

#### **8.5.10. ¿Qué es el dwell time y cómo afecta al rendimiento de un sistema FHSS?**

El dwell time (tiempo de permanencia) en un sistema de salto de frecuencia (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS) se refiere al intervalo de tiempo que el transmisor y el receptor permanecen en una frecuencia específica antes de saltar a la siguiente frecuencia en la secuencia de salto.

El dwell afecta al rendimiento de un sistema FHSS de la siguiente manera:

- Puede aumentar la latencia debido a la necesidad de sincronización y estabilización frecuentes.
- Un tiempo de permanencia largo aumenta la exposición a interferencias en una frecuencia específica, lo que puede degradar el rendimiento del sistema si la interferencia está presente durante el tiempo de permanencia.
- Algunos estándares y regulaciones pueden imponer restricciones en el dwell time para evitar la monopolización de frecuencias y asegurar un uso justo del espectro.
- Los saltos de frecuencia frecuentes pueden aumentar el consumo de energía debido a la necesidad de reconfiguración constante del transceptor.

#### **8.5.11. ¿Qué es un generador de números pseudoaleatorios y qué tipos de circuitos se pueden utilizar para implementarlo?**

Un generador de números pseudoaleatorios (PRNG) es un algoritmo diseñado para crear una secuencia de números que aparentan ser aleatorios. Sin embargo, esta secuencia es en realidad determinista y se puede reproducir completamente si se conoce el estado interno del generador. Aunque los números generados parecen aleatorios, están definidos por una fórmula matemática específica, lo que los hace "pseudoaleatorios".

Los tipos de circuitos que se pueden implementar en PRNG, son los siguientes:

- LFSR (Linear Feedback Shift Register)
- Contadores con Salidas No Lineales
- Osciladores de Reloj Desfasados
- Generadores Congruenciales
- Generadores Basados en Suma de Caos

#### **8.5.12. ¿Qué es un circuito de correlación y cómo se utiliza para sincronizar la señal de código en el receptor?**

Un circuito de correlación es esencial en receptores de señales, como GPS y sistemas de comunicación con secuencias codificadas. Su función principal es identificar el tiempo de llegada de una señal en relación con una referencia temporal del receptor, utilizando multiplicaciones y sumas para detectar el desplazamiento temporal. Esto asegura la sincronización necesaria para la correcta decodificación y análisis de la señal recibida.

#### **8.5.13. ¿Qué es un hardware SDR y qué ventajas ofrece para implementar un receptor de espectro expandido?**

Un hardware SDR (Software Defined Radio) es un dispositivo que permite la recepción y transmisión de señales de radio utilizando componentes hardware programables y software configurables. Las ventajas que ofrece para implementar un receptor de espectro expandido incluyen:

- Flexibilidad: Puede sintonizar y procesar una amplia gama de frecuencias y modulaciones.
- Reconfigurabilidad: Permite cambiar entre diferentes bandas de frecuencia y estándares de comunicación mediante software.
- Eficiencia: Reduce costos y complejidad al reemplazar múltiples dispositivos de hardware dedicados. (Rodríguez de Haro y cols., 2017)

#### 8.5.14. ¿Qué función del bloque "Ideal Rectangular Filter" en el transmisor DSSS y como contribuye a la generación de la señal de propagación?

En un transmisor DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), el bloque Ideal Rectangular Filter se encarga de aplicar un filtro rectangular a la señal modulada. Esto limita el ancho de banda de la señal, garantizando que cumpla con las especificaciones necesarias para una propagación eficiente y efectiva dentro del sistema DSSS. Este filtro contribuye a la correcta generación de la señal de propagación. (Yi, Wei, Jaouen, y Hu, 2015)

#### 8.5.15. ¿Qué función cumple el bloque "Sum" en el transmisor CDM?

En un transmisor CDM (Code Division Multiplexing), el bloque "Sum" tiene la función de combinar las señales moduladas por código de diferentes canales o usuarios antes de la transmisión. Esto permite que múltiples señales, cada una modulada con un código ortogonal o pseudoaleatorio, se transmitan simultáneamente a través del mismo canal de comunicación. Al hacerlo, se utiliza el espectro de manera eficiente y se posibilita la separación de las señales en el receptor mediante técnicas de correlación con los códigos correspondientes. (Matlab, 2021)

#### 8.5.16. ¿Cuál es la función del bloque de retardo y cómo se configura?

En sistemas de comunicaciones, el bloque de retardo introduce un desfase temporal controlado en la señal para lograr sincronización, alineación temporal o corrección de fase. Este bloque se ajusta configurando el tiempo de retardo necesario, que puede ser fijo o variable según los requisitos específicos de la aplicación y el diseño del sistema.

#### 8.5.17. ¿Qué es el espectro ensanchado y cómo se implementa en el software definido por radio?

El espectro ensanchado es una técnica de modulación en la que una señal de información se expande en el dominio de la frecuencia mediante la utilización de una secuencia de código única. En el software definido por radio (SDR), el espectro ensanchado se implementa mediante algoritmos digitales que generan y modulan la secuencia de código sobre la señal de información antes de la transmisión. (Álvarez, 1999)

#### 8.5.18. ¿Cuáles son las técnicas de modulación de espectro ensanchado y como se utilizan para distribuir la información en un rango más amplio de frecuencias?

Las técnicas de modulación de espectro ensanchado incluyen:

- DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum): Utiliza una secuencia de código (o chip) para expandir la señal de información en un rango más amplio de frecuencias y la señal modulada parece ruido para los receptores que no conocen el código, pero puede ser recuperada por un receptor que conoce el código.

- FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum): La señal de información se transmite en diferentes frecuencias dentro de un rango amplio y se utiliza un patrón de salto de frecuencia predefinido que es conocido por el receptor para sincronizar y recibir la señal completa. (Zafra, 2000)

#### 8.5.19. ¿Qué es la multiplexación por división de código y cómo se utiliza en las telecomunicaciones y redes inalámbricas?

La multiplexación por división de código (CDM, por sus siglas en inglés, Code Division Multiplexing) es una técnica de multiplexación en la cual múltiples señales de información se transmiten simultáneamente sobre el mismo canal de comunicación utilizando códigos ortogonales o pseudorandomizados. Cada señal de usuario se modula con un código único que permite su separación en el receptor, aunque todas las señales ocupan el mismo ancho de banda simultáneamente. Esta técnica se utiliza ampliamente en telecomunicaciones y redes inalámbricas, como en sistemas CDMA (Code Division Multiple Access), para permitir la transmisión simultánea de múltiples usuarios con eficiencia espectral y resistencia a la interferencia. (Amaya Ocampo, 2008)

#### 8.5.20. ¿Cómo se puede implementar la operación de desparramamiento en una señal de fase binaria de desplazamiento de amplitud básica (BSPK)?

La operación de desparramamiento en una señal de desplazamiento de fase binaria (BPSK) se realiza multiplicando cada bit de la señal BPSK por una secuencia de código pseudoaleatorio. Esta secuencia actúa como una máscara, expandiendo la señal en el dominio de la frecuencia.

## 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 9.1. Conclusiones

- La correlación cruzada entre la señal ruidosa y el código PN es eficaz para detectar y sincronizar la señal transmitida, incluso en entornos con mucho ruido. El pico de correlación cerca del desfase cero confirma que el código PN está correctamente alineado con la señal recibida.
- A pesar de la adición de ruido blanco gaussiano con una relación señal-ruido de 10 dB, el patrón de la señal transmitida sigue siendo identificable. Esto subraya la robustez del método de correlación con códigos PN para mantener la integridad del mensaje en presencia de ruido.
- La modulación BPSK (Binary Phase-Shift Keying) es extremadamente eficaz para transmitir datos en entornos ruidosos. Su resistencia al ruido y la interferencia se deriva de su simplicidad y eficiencia en el uso del ancho de banda. Al codificar los bits con dos fases diferentes, BPSK facilita una recuperación confiable de los datos, incluso en canales con alta variabilidad y ruido aditivo.
- El uso de espectro ensanchado ha aumentado a lo largo de los años debido a la desregulación y se utiliza en una amplia gama de campos de telecomunicaciones y comunicaciones actualmente se ha utilizado en tecnologías inalámbricas, incluidos teléfonos móviles y redes inalámbricas.
- Los sistemas de comunicación de espectro ensanchado se caracterizan por el hecho de que la comunicación se realiza utilizando un ancho de banda muy superior (órdenes de magnitud) al mínimo necesario para los requisitos de velocidad de transmisión.

Ello implica una considerable reducción de la eficiencia espectral (bits por segundo por hercio).

- Un transmisor DSSS BPSK en Simulink es esencial para el diseño, análisis y validación de sistemas de comunicación modernos, proporcionando una plataforma eficaz para el aprendizaje y la experimentación en telecomunicaciones. Esta configuración no solo mejora la comprensión teórica, sino que también facilita el desarrollo de soluciones prácticas y eficientes en el campo de las comunicaciones inalámbricas.

## 9.2. Recomendaciones

- Implementar algoritmos avanzados para la detección del preámbulo puede aumentar la fiabilidad del sistema en la identificación y sincronización de la señal recibida, especialmente en entornos con altos niveles de ruido.
- Buscar información en fuentes bibliográficas confiables como Google Scholar, IEEE, Scopus y entre otras que permitan obtener información válida y de fácil comprensión.
- Es importante aprender los principios del espectro ensanchado (DSSS y FHSS) para diseñar sistemas robustos contra interferencias.
- Es necesario dominar herramientas como Time Scope y Spectrum Analyzer en Simulink para análisis detallado de señales en tiempo y frecuencia.

## Referencias

- Álvarez, J. R. V. (1999). *Contribución al estudio de las comunicaciones ópticas no guiadas con señales de espectro ensanchado* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Politécnica de Madrid.
- Amaya Ocampo, W. A. (2008). *Sistemas ópticos con multiplexación por división en código (ocdma) empleando redes de difracción de bragg sobre fibra óptica* (Tesis Doctoral no publicada). Universitat Politècnica de València.
- Borges, J. A. R. (2000). *Contribución al estudio de las comunicaciones ópticas difusas de alta velocidad mediante señales de espectro ensanchado* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Castellanos Domínguez, C. G. (1998). Comparación de las cualidades de autocorrelación aperiódica de las señales msk y bpsk con espectro ensanchado de secuencia directa. *Ingeniería Electrónica*.
- Gallego Martínez, S., y cols. (2008). Comparación de modelos teóricos para el análisis de las pérdidas por difracción múltiple de la señal radioeléctrica con medidas experimentales en entornos urbanos.
- Matlab, M. (2021). *Matlab & simulink*. Retrieved September.
- Ordóñez, J. L. (2012). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. *Manual formativo de ACTA*(62), 17–31.
- Rodríguez de Haro, J., y cols. (2017). Análisis software y hardware del sdr hackrf one.
- Sánchez Ponz, J. L. (2000). Cdma: comunicaciones de espectro ensanchado. *Buran*(16), 25–32.
- Sergienko, A. B. (2014). Software-defined radio in matlab simulink with rtl-sdr hardware. En *2014 international conference on computer technologies in physical and engineering applications (icctpea)* (pp. 160–161).
- Stewart, R. W., Barlee, K. W., y Atkinson, D. S. (2015). *Software defined radio using matlab & simulink and the rtl-sdr*. Strathclyde Academic Media.

- Yi, L., Wei, W., Jaouen, Y., y Hu, W. (2015). Ideal rectangular microwave photonic filter with high selectivity based on stimulated brillouin scattering. En *Optical fiber communication conference* (pp. Tu3F–5).
- Zafra, J. N. P. (2000). Espectro ensanchado. *Ingeniería*, 5(1), 71–78.