



POSGRADOS

Maestría en **TELEMÁTICA**

RPC-SO-01-NO.025-2021

Opción de Titulación:

Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo

Tema:

Desarrollo de un algoritmo de Modulación en Espacio, Tiempo y Frecuencia Ortogonal (OTFS) en un Software Definido por Radio (SDR).

Autor:

Gino Geovanny Jaramillo Pizarro

Director:

Paúl Andrés Chasi Pesántez

CUENCA – ECUADOR
2023

Autor:



Gino Geovanny Jaramillo Pizarro

Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones.

Candidato a Magíster en Telemática por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

gjaramillo1@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Paúl Andrés Chasi Pesántez

Doctor en Ingeniería de Sistemas Electrónicos.

Master en Ingeniería en Telecomunicaciones.

Ingeniero Electrónico.

pchasi@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2023 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA– ECUADOR – SUDAMÉRICA

GINO GEOVANNY JARAMILLO PIZARRO

Desarrollo de un algoritmo de modulación en espacio, tiempo y frecuencia ortogonal (OTFS) en un software definido por radio (SDR).

Índice General

Índice General	III
Índice de Figuras	V
Índice de Tablas	VII
Resumen	VIII
Abstract	X
Agradecimientos	XII
Dedicatoria	XIII
1. Introducción	1
2. Estado del arte	4
2.1. Fundamentos teóricos	5
2.1.1. Modulación OTFS	5
2.1.2. Recepción de señal y canal variante en el tiempo . . .	6
2.1.3. Demodulación OTFS	6
2.1.4. Señal de pulsos OTFS	7
2.2. Trabajos relacionados	8
3. Diseño e Implementación de la Modulación OTFS en SDR	9
3.1. Trama de bits en Tx	10
3.2. Modulación PSK	11
3.3. Inserción de pilotos	11
3.4. Modulación OTFS	12
3.4.1. Transformada Inversa Simpléctica Rápida de Fourier .	12
3.4.2. Transformada de Heisenberg	14

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	IV
3.5. Prefijo Cíclico	15
3.6. Preámbulo Transmisor - Receptor	15
3.7. Sincronización de trama	17
3.8. Demodulación OTFS	18
3.8.1. Transformada de Wigner	18
3.8.2. Transformada Simpléctica Rápida de Fourier	19
3.9. Eliminación de Pilotos	20
3.10. Demodulación PSK	20
3.11. Trama de bits en Rx	21
4. Análisis de resultados	23
5. Conclusiones	31

Índice de Figuras

2.1. Diagrama de modulación y demodulación OTFS.	5
3.1. Diagrama de bloques del sistema	9
3.2. Fuente de información a ser transmitida (conversión de texto a bits).	10
3.3. Modulación PSK (conversión de bits a símbolo).	11
3.4. Inserción de símbolos pilotos.	12
3.5. FFT aplicada a las columnas de la matriz de símbolos.	13
3.6. FFT aplicada a las filas de la matriz de símbolos.	13
3.7. Ceros añadidos a la Matriz ISFFT.	14
3.8. Transformada de Heisenberg.	14
3.9. Inserción de prefijo cíclico.	15
3.10. Preámbulo transmisor y receptor.	16
3.11. Filtro Pulse Shaping.	16
3.12. Tramas enviadas desde el transmisor.	17
3.13. Proceso para la sincronización de Tramas.	17
3.14. Transformada de Wigner.	18
3.15. Eliminación de ceros.	19
3.16. FFT aplicada a las filas de la matriz de símbolos.	19
3.17. IFFT aplicada a las columnas de la matriz de símbolos.	20
3.18. Eliminación de símbolos pilotos.	20
3.19. Demodulación PSK (conversión de símbolos a bits).	21
3.20. Mensaje recibido (conversión de bits a texto).	22
4.1. Parámetros de Configuración del USRP para el transmisor.	23
4.2. Parámetros de Configuración del USRP para el receptor.	24
4.3. Texto base para procesar y transmitir.	25
4.4. Comparación de bits entre Transmisor vs Receptor.	26
4.5. Texto obtenido en el receptor.	26

ÍNDICE DE FIGURAS

4.6. Diagrama de constelación de símbolos en el transmisor. 27

4.7. Diagrama de constelación de símbolos en el receptor. 27

4.8. Trama enviada desde el transmisor (Parte real) con el
Preámbulo (Código Barker). 29

4.9. Trama recibida por el USRP(Parte real). 29

4.10. Detección del índice entre la correlación del preámbulo y la
trama recibida. 30

4.11. Trama de de recepción recuperada (Parte real). 30

Índice de Tablas

4.1. Valores base del sistema.	25
--	----

Resumen

Considerando el constante avance en el área de las comunicaciones inalámbricas, nuevos tipos de técnicas se gestan constantemente con el objetivo de aumentar la eficiencia de los sistemas. Tal es el caso de la modulación en el Espacio de Tiempo-Frecuencia Ortogonal (OTFS), que está siendo utilizada en la quinta generación de comunicaciones móviles (5G). Esta modulación presenta notables ventajas con respecto a la modulación en Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM), que tuvo gran influencia en el desarrollo de la cuarta generación de comunicaciones (4G). Las principales ventajas se describen a continuación:

- Se destaca que la modulación OTFS puede transformar un canal que se desvanece aleatoriamente en uno estacionario, sin desvanecimiento y no aleatorio.
- Soluciona los problemas de estimación de canales en sistemas actuales y futuros de antenas múltiples y MIMO (por sus siglas en inglés *Multiple-input Multiple-output*).
- Otra ventaja es su capacidad para operar en canales Doppler extremos, lo que la hace útil para comunicaciones de alta movilidad y para sistemas en la banda de frecuencia de onda milimétrica.

La robustez de esta técnica es indiscutible. Por lo tanto, es preciso contar con entornos donde se puedan realizar implementaciones y pruebas experimentales que deriven en notables aportes a esta área específica. En este contexto, el presente documento recopila la fundamentación teórica, metodología y resultados de la implementación de una modulación OTFS en un Software Defined Radio (SDR), en los laboratorios de telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.

Para empezar, el Capítulo 1 presenta una breve introducción donde se describen los antecedentes y justificación del problema de estudio, así como

una breve descripción de como los sistemas de comunicaciones inalámbricos han ido evolucionando hasta llegar a 5G y, consecuentemente, a OTFS. Luego, en el Capítulo 2, se describe el estado del arte de la modulación OTFS, la fundamentación teórica (incluido el desarrollo de las ecuaciones matemáticas de la modulación), y algunos trabajos relacionados relevantes que emplean OTFS en distintos escenarios y aplicaciones. Posteriormente, el Capítulo 3, describe a detalle la implementación de OTFS en el entorno de programación Labview NXG 3.1 de la empresa National Instruments. El hardware empleado fue el NI USRP 2920, con un rango de funcionamiento de 50 MHz a 2,2 GHz y un ancho de banda 20 MHz. Este capítulo incluye los diagramas de programación que permiten la replica total del programa, como un aporte de los autores hacia la comunidad científica y de desarrolladores. Luego, el Capítulo 4 describe los parámetros de configuración de los equipos y las variables establecidas dentro de OTFS. Se consideró un escenario con una frecuencia de portadora de 1,2 GHz (frecuencia de resonancia de las antenas existentes en el laboratorio), la ganancia en el transmisor es de 10dB y en el receptor de 5 dB. Se calculó un valor de I/Q rate de 800 Ksamples en base al ancho de banda utilizado que es de 100 KHz. En este capítulo también se analizan y discuten los resultados en función de la comparación de la información transmitida y recibida. Finalmente, el Capítulo 5 recoge las principales conclusiones generadas a partir del trabajo realizado y se proponen algunos trabajos a futuro para que los investigadores que se interesen por continuar con este trabajo, puedan abordar.

Palabras clave: *Orthogonal Time Frequency Space, Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, Software Defined Radio, Labview NXG, Inverse Scaled Fast Fourier Transform, Sparse Fast Fourier Transform, Fast Fourier Transform, Inverse Fast Fourier Transform.*

Abstract

Considering the constant evolution in wireless communications area, new techniques types are constantly being developed with the aim of increasing system efficiency. Such is the case of Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) modulation, which is being used in the fifth generation of mobile communications (5G). This modulation presents notable advantages over Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) modulation, which had a great influence on development of fourth generation of communications (4G). The main advantages are described below:

- The OTFS modulation can transform a fades channel randomly into a stationary one, free from fading and non-random.
- Addressing channel estimation issues in current and future multiple-antenna and MIMO *Multiple-input Multiple-output*) systems.
- Another advantage is its ability to operate in extreme Doppler channels, making it useful for high-mobility communications and millimeter-wave frequency band systems.

Among other advantages, it is possible to highlight that OTFS modulation can transform a channel that fades randomly into a stationary, non-fading and non-random one. There are also advantages in solving channel estimation problems in current and future multiple antenna and MIMO systems. The main advantage of OTFS modulation is its ability to operate in extreme Doppler channels, making it useful for high mobility communications and for systems in millimeter wave frequency band.

Robustness of this technique makes it possible to address new challenges in terms of more efficient communications, and it is essential to have environments where experimental implementations and testing can result in notable contributions to this specific area. In this context, this document compiles theoretical foundation, methodology, and results of

OTFS modulation implementation in a Software Defined Radio (SDR), in telecommunications laboratories of Salesian Polytechnic University, Cuenca campus.

To begin, Chapter 1 presents a brief introduction describing the background and justification of research problem, as well as a brief description of how wireless communication systems have evolved to 5G and consequently to OTFS. Then, Chapter 2 describes the OTFS modulation state of the art, theoretical foundation (including the development of mathematical equations for modulation), and some relevant related works that employ OTFS in different scenarios and applications. Subsequently, Chapter 3 describes in detail the implementation of OTFS in Labview NXG 3.1 programming environment of National Instruments. Hardware used was NI USRP 2920, with an operating range from $50MHz$ to $2,2GHz$ and a bandwidth of $20MHz$. This chapter includes programming diagrams that allow for complete replication of program as a contribution from the authors to scientific and developer community. Then, Chapter 4 describes equipment configuration parameters and variables established within OTFS. A scenario with a carrier frequency of $1,2GHz$ (resonant frequency of existing antennas in laboratory) was considered, with a transmitter gain of $10dB$ and a receiver gain of $5dB$. An I/Q rate value of $800Ksamples$ was calculated based on bandwidth used, which is $100KHz$. In this chapter, results are also analyzed and discussed in terms of transmitted and received information comparison. Finally, Chapter 5 summarizes main conclusions generated from the work carried out and proposes some future work for researchers interested in continuing with this work.

Keywords: *Orthogonal Time Frequency Space, Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, Software Defined Radio, Labview NXG, Inverse Scaled Fast Fourier Transform, Sparse Fast Fourier Transform, Fast Fourier Transform, Inverse Fast Fourier Transform.*

Agradecimientos

Con la culminación de este proyecto de titulación deseo agradecer a los ingenieros y grandes amigos:

Diego Cuji, por todas sus cátedras magistrales dictadas en cada reunión que manteníamos por largas horas y varios días, compartiéndonos sus conocimientos y demostrándonos que todo se puede lograr con dedicación y perseverancia.

Quiero realizar un agradecimiento muy especial a Paúl Chasi, que aparte de ser mi profesor en la maestría, fue valiente para ser mi tutor de tesis y con el pasar del tiempo, hoy lo considero como un gran amigo que me supo demostrar con su conocimiento, optimismo, dedicación y buenas actitudes que se puede alcanzar los objetivos planteados.

A Fernando Guerrero por todo tiempo dedicado y compromiso adquirido con este proyecto para aportar con sus conocimientos y lograr cumplir los objetivos planteados.

A la universidad por todo el apoyo brindado con el uso de las instalaciones y laboratorios para la implementación del proyecto y uso de sus equipos para realizar pruebas con los equipos.

Dedicatoria

Deseo dedicar este proyecto a mi esposa y familia porque siempre tuve el apoyo incondicional durante todo este proceso de aprendizaje.

A mis verdaderos amigos porque en cada momento tuve el apoyo de ellos, desde el inicio de esta maestría.

Y quiero dedicar este trabajo a mi gran amigo, al que lo considero como un hermano, *Fernando Guerrero*, quien fue la persona que estuvo apoyándome desde el inicio de la maestría con todos sus consejos, palabras de aliento, regañadas y felicitaciones en cada momento bueno, malo y difícil que pasamos durante este proceso de implementación y que gracias a él y a todo el equipo que conformamos, logramos que todo esto sea posible.

Capítulo 1

Introducción

Las telecomunicaciones han experimentado una evolución considerable desde sus primeros pasos a mediados del siglo XX, hasta la actualidad. Desde la aparición de los primeros teléfonos móviles, que eran grandes y pesados, hasta los dispositivos finos y ligeros que se utilizan en la actualidad. A lo largo de este proceso, se han introducido nuevas tecnologías, como las redes 3G, 4G y ahora 5G, que han mejorado la velocidad y la capacidad de conexión. También se ha buscado incrementar la capacidad de transmisión de información implementando algoritmos de inteligencia artificial, lo que ha transformado por completo la forma en que nos comunicamos e interactuamos con el mundo, [Wang et al. \[2020\]](#).

Las telecomunicaciones han sido marcadas por el desarrollo de diferentes generaciones de tecnologías inalámbricas que han experimentado una evolución significativa a lo largo de las últimas décadas. La primera generación (1G), se desarrolló a finales de los años 70 y principios de los 80, se basó en sistemas analógicos que permitían la transmisión de voz a través de señales de radio de baja frecuencia, la calidad de la señal era baja y la cobertura limitada [Kumar et al. \[2015\]](#). La segunda generación (2G), se desarrolló en los años 90 e introdujo la tecnología digital, permitiendo una mayor capacidad de transmisión, una mejor calidad de voz, mensajes de texto y funciones como el roaming [Kumar et al. \[2015\]](#). La tercera generación (3G), fue desarrollada en la década de los 2000, y tuvo la novedad de brindar acceso a internet móvil, el envío de mensajes multimedia y la posibilidad de realizar videollamadas [Berezdivin et al. \[2002\]](#). La cuarta generación (4G), que fue presentada en la década de 2010 mejoró aún más la velocidad de conexión, permitiendo la transmisión de datos en alta definición, la navegación web rápida y la descarga de aplicaciones [Kumar et al. \[2015\]](#). Actualmente, se

está trabajando en la quinta generación (5G), que se espera que proporcione una velocidad de conexión mucho mayor que la tecnología 4G y permita la conexión de dispositivos en tiempo real a través de la tecnología de internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés *Internet Of Things*) y la inteligencia artificial, [Gowda et al. \[2021\]](#), [Alencar and da Rocha Jr. \[2022\]](#), [Kumar et al. \[2015\]](#). Finalmente, la sexta generación (6G), todavía se encuentra en fase de investigación y se espera que se implemente en el año 2030, esta generación se proyecta a incrementar la velocidad de conexión en comparación con la 5G, una latencia extremadamente baja y una capacidad de transmisión aún mayor. Además, se espera que la tecnología 6G permita nuevas aplicaciones, como la realidad aumentada y la holografía en tiempo real.

Toda esta evolución se consiguió gracias a varios estudios y pruebas para mejorar los protocolos de comunicación inalámbrica existente, entre estos estudios estuvieron nuevas tecnologías de modulación y codificación para mejorar la eficiencia espectral, [Krishnamurthi and Goyal \[2018\]](#), [Jaradat et al. \[2019\]](#). Es fundamental destacar que dentro de los estudios orientados a mejorar las comunicaciones, se encuentra el campo de la estimación del canal. Este concepto se refiere a un canal de comunicación inalámbrica, en el cual, la respuesta varía en función de la frecuencia de la señal transmitida. Esto puede ser causado por la presencia de objetos en el camino de la señal, tales como edificios, árboles, o incluso cambios en la topografía del terreno. Cuando esto ocurre, las diferentes frecuencias de la señal pueden ser atenuadas o amplificadas de manera diferente, lo que puede resultar en distorsión o desvanecimiento de la señal, [Nagaraj \[2009\]](#).

Para mejorar las comunicaciones inalámbricas en canales selectivos, se utilizan técnicas como el ecualizador adaptativo, que ajusta automáticamente la respuesta del canal para compensar los efectos del desvanecimiento selectivo. Además, se pueden utilizar técnicas de diversidad de antena, que implican el uso de múltiples antenas para reducir la interferencia y mejorar la calidad de la señal. A estas técnicas se las complementa con el uso de múltiples antenas para aumentar la capacidad de la red y reducir la interferencia. También es importante considerar el uso de técnicas de codificación y modulación avanzadas, para mejorar la eficiencia espectral y la calidad de la señal; técnicas de cancelación de interferencia, para reducir el efecto de otras señales en el mismo rango de frecuencia; técnicas de programación de red y de enrutamiento, para mejorar la eficiencia de la red y reducir el tiempo de latencia; y, finalmente, las técnicas de encriptación, para garantizar la privacidad, integración y confidencialidad [Mohammed \[2021\]](#).

Adicionalmente, los avances tecnológicos desarrollados permitieron la

implementación de la modulación en el Espacio de Tiempo-Frecuencia Ortogonal (OTFS, por sus siglas en inglés *Orthogonal Time Frequency Space*). Esta es una técnica de modulación que se utiliza en comunicaciones inalámbricas para mejorar la eficiencia y la calidad de la transmisión de datos. A diferencia de las técnicas de modulación convencionales, que se basan en la modulación de amplitud, frecuencia o fase de una señal portadora, la modulación OTFS se basa en la modulación conjunta en el dominio tiempo-frecuencia [Thaj and Viterbo \[2019\]](#). En lugar de transmitir datos en un solo canal de frecuencia, la señal se distribuye en múltiples canales de frecuencia y tiempo. En base a estas características, se implementó un modelo de modulación OTFS sobre un Software Defined Radio (SDR) dentro del laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana. Para la realización de este proyecto de titulación se empleó un Universal Software Radio Peripheral (USRP) de la empresa National Instruments con el objetivo de desarrollar una herramienta de experimentación en esta novedosa técnica de modulación.

Para empezar, se realizó una revisión profunda de la bibliografía para conocer el estado del arte de la implementación de OTFS en SDR. Si bien existen algunos investigadores que comparten experiencias previas, es notorio que la línea de investigación requiere mayores aportes. Posteriormente, empleando la herramienta NI LabVIEW NXG 3.1., se programó un sistema de transmisión y otro de recepción, utilizando la modulación PSK y enfocados en evaluar la Tasa de Error de Bit (BER, por sus siglas en inglés *Bit Error Rate*) [Kollengode Ramachandran and Chockalingam \[2018\]](#). El algoritmo desarrollado para la comunicación tiene como objetivo crear una modulación conjunta en el dominio tiempo-frecuencia generando tramas que posteriormente son transmitidas a través del USRP 2920. En esta experimentación no se estableció una sincronización de fase ni la inserción de códigos cíclicos, evaluando únicamente la eficiencia en función de la modulación. El planteamiento de nuevas propuestas de experimentación modificando el tipo de modulación, inserción de algoritmos de corrección y evaluación basada en parámetros adicionales, se aborda como parte de los trabajos futuros a partir de los resultados actuales.

Capítulo 2

Estado del arte

La modulación OTFS, es una modulación que presenta una señal resistente a los cambios de retardo Doppler en el canal inalámbrico [Hadani et al. \[2017a\]](#), [Monk et al. \[2016\]](#). La idea es transformar el canal multipath variable en el tiempo en un canal bidimensional en el dominio de retardo Doppler y realizar modulaciones y demodulaciones en este dominio. Por el principio de incertidumbre de Heisenberg [Hadani et al. \[2017b\]](#), la señal no puede localizarse en tiempo y frecuencia simultáneamente. Pero la forma de onda de OTFS está localizada en el dominio de retardo Doppler, y TDMA y OFDM se convierten en casos limitantes en comparación con OTFS cuando se ven en este dominio. Los símbolos de información se asignan a estas funciones bidimensionales que abarcan el ancho de banda y la duración del tiempo de la trama de transmisión. La técnica de modulación conocida como OTFS, diseñada en el dominio del retardo Doppler, hace uso de la diversidad total en el tiempo y la frecuencia para convertir un canal inalámbrico variable en el tiempo en un canal independiente del tiempo. A diferencia de las señales moduladas como OFDM, OTFS utiliza ecualización para combatir el desvanecimiento experimentado por el canal inalámbrico. Además, OTFS no requiere adaptación del transmisor debido a que su ganancia de canal compleja es aproximadamente constante para todos los símbolos. La extracción de la diversidad de canales completa mediante OTFS simplifica significativamente la operación del sistema y mejora el rendimiento, especialmente en sistemas con Doppler alto, paquetes cortos y grandes conjuntos de antenas [Hadani et al. \[2017b\]](#).

2.1. Fundamentos teóricos

Para entender la modulación OTFS es importante considerar un sistema de comunicaciones con un ancho de banda $B = A\Delta f$ completamente disponible y una latencia $Tf = BT$. Los parámetros del sistema que se eligieron son A, B y T (donde, $\Delta f = \frac{1}{T}f$) sobre un canal variante en el tiempo caracterizado por una dispersión máxima de retardo multitrayecto T_{mp} y una dispersión Doppler máxima s_{max} entre todos los trayectos de propagación de canal. Está claro que T y Δf determinan el máximo Doppler ($\frac{1}{T}$) y el retardo ($\frac{1}{\Delta f}$). Por lo tanto, se requiere que $s_{max} < 1/T$ y $\Delta f < \frac{1}{T_{mp}}$ para que se determinen A y B , este análisis matemático que se describe en la siguiente sección, se basó en las referencias: Mohammed [2021], Thaj and Viterbo [2019], Bhat and Chockalingam [2021] y Bhat et al. [2021]. Además, es importante considerar el diagrama 2.1 que representa la modulación y demodulación OTFS, con el objetivo de una mejor comprensión del sistema.

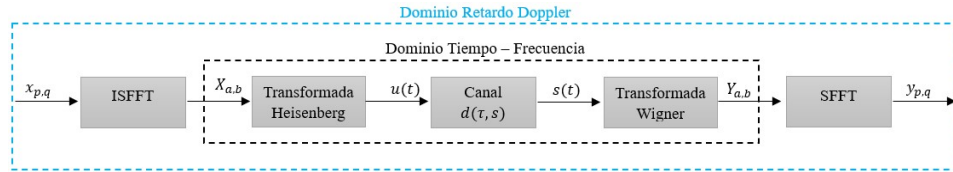


Figura 2.1: Diagrama de modulación y demodulación OTFS.

2.1.1. Modulación OTFS

Se considera un conjunto de $A \times B$ símbolos de información $x_{p,q}$, $p = 0, \dots, A - 1$, $q = 0, \dots, B - 1$, tomados desde un alfabeto predefinido. Los símbolos son organizados sobre un arreglo con retardo Doppler Γ . La modulación OTFS primero mapea los símbolos de información $x_{p,q}$ en el dominio del retardo Doppler para muestras $X_{a,b}$ en el dominio de tiempo-frecuencia usando la Transformada Inversa Simpléctica Rápida de Fourier (ISFFT, por sus siglas en inglés *Inverse Symplectic Finite Fourier Transform*) como se presenta a continuación:

$$X_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{AB}} \sum_{q=0}^{B-1} \sum_{p=0}^{A-1} x_{p,q} e^{j2\pi \left(\frac{bq}{B} - \frac{ap}{A} \right)}, \quad b = 0, \dots, B - 1, \quad a = 0, \dots, A - 1 \quad (2.1)$$

Entonces la transformada de Heisenberg es aplicada a $X_{a,b}$ para crear una señal en el dominio del tiempo $v(t)$ usando un transmisor de pulso $p_{tx}(t)$

como

$$v(t) = \sum_{b=0}^{B-1} \sum_{a=0}^{A-1} X_{a,b} p_{tx}(t - bT) e^{j2\pi a \Delta f (t - bT)} \quad (2.2)$$

2.1.2. Recepción de señal y canal variante en el tiempo

La señal $v(t)$ es transmitida sobre un canal variable en el tiempo con una respuesta de impulso de banda base compleja $p(\tau, t)$

$$p(\tau, t) = \sum_{l=0}^{N_l-1} p_l(t) \delta(t - \tau_l(t)) \quad (2.3)$$

N_l : Número de caminos de propagación.

$p_l(t)$ y $\tau_p(t)$: son las ganancias del trayecto del canal y los retrasos del trayecto en función del tiempo.

La representación del canal del retardo Doppler $d(\tau, s)$ es la transformada de Fourier a lo largo de la variable de tiempo de la respuesta de impulso del canal variable en el tiempo, o

$$d(\tau, s) = \mathfrak{F}_t[p(\tau, t)] = \int p(\tau, t) e^{-j2\pi st} dt \quad (2.4)$$

$$p(\tau, t) = \mathfrak{F}_t^{-1}[d(\tau, s)] = \int d(\tau, s) e^{j2\pi st} ds \quad (2.5)$$

La señal $v(t)$ es transmitida sobre el canal $d(\tau, s)$ que caracteriza la respuesta del canal a un impulso con retardo τ y Doppler s , y la señal recibida $r(t)$ viene dada por

$$r(t) = \int h(\tau, t) v(t - \tau) d\tau + n(t) = \int_s \int_\tau d(\tau, s) e^{j2\pi s(t - \tau)} s(t - \tau) d\tau ds \quad (2.6)$$

Donde $n(t)$ es el ruido Gaussiano aditivo con densidad de potencia espectral σ^2 .

2.1.3. Demodulación OTFS

La estadística para la detección de símbolos se obtiene filtrando la señal recibida $r(t)$ con el pulso recibido $p_{rx}(t)$. La función resultante se conoce como la función de ambigüedad cruzada $C_{p_{rx}, r}(f, t)$

$$Y(f, t) = C_{p_{rx}, r}(f, t) = \int r(\gamma) p_{rx}^*(\gamma - t) e^{-j2\pi f(\gamma - t)} d\gamma \quad (2.7)$$

La salida del matched filter es obtenida por un muestreo de $Y(f, t)$, así:

$$Y_{a,b} = Y(f, t) |_{f=a\Delta f, t=nT}, \quad a = 0, \dots, A-1 \quad b = 0, \dots, B-1. \quad (2.8)$$

El proceso matemático realizado en 2.7 y 2.8 son conocidas como la transformada de Wigner. La relación entre la entrada y salida de las muestras en tiempo-frecuencia es expresado como se observa a continuación

$$Y_{a,b} = P_{a,b} X_{a,b} + Z_{a,b} \quad (2.9)$$

$P_{a,b}$ incluye los efectos combinados del pulso transmitido, el canal y los pulsos recibidos

$$P_{a,b} = \int_s \int_\tau d(\tau, s) e^{-j2\pi(s+a\Delta f)\tau} e^{j2\pi snT} d\tau ds, \quad (2.10)$$

y si la respuesta del canal responde en el dominio del retardo Doppler siguiendo el modelo $d(\tau, s) = \sum_l p_l \delta(\tau - \tau_l) \delta(s - s_l)$, se llega a la siguiente ecuación:

$$P_{a,b} = \sum_{l=0}^{N_l-1} p_l e^{-j2\pi s_l \tau_l} e^{-j2\pi a \Delta f \tau_l} e^{j2\pi b T s_l} \quad (2.11)$$

La SFFT es aplicada sobre las muestras $Y_{a,b}$ para obtener los símbolos $y_{p,q}$ en el dominio del retardo Doppler como se observa a continuación:

$$y_{p,q} = \frac{1}{\sqrt{AB}} \sum_{b=0}^{B-1} \sum_{a=0}^{A-1} Y_{a,b} e^{-j2\pi \left(\frac{bq}{B} - \frac{ap}{A} \right)} \quad (2.12)$$

2.1.4. Señal de pulsos OTFS

Las señales de pulsos $d_{tx}(t)$ y $d_{rx}(t)$ son ideales si cumple la propiedad de bi-ortogonalidad

$$\int e^{-j2\pi a \Delta f (t-bT)} d_{rx}^*(t-bT) d_{tx}(t) dt = \delta_a \delta_b. \quad (2.13)$$

2.2. Trabajos relacionados

Con la modulación OTFS, se ha logrado desarrollar varios estudios e investigaciones que tienen como objetivo demostrar su potencial. Entre uno de los estudios realizados está el análisis de rendimiento de la modulación OTFS en redes vehiculares.

Para este estudio se considera un sistema de modulación OTFS tipo SISO de una red vehicular, en donde se cuenta con un nodo principal equipado con una antena para transmitir mensajes a los equipos de vehículos de destino a través de un canal multitrayecto, también se considera un vehículo espía que intenta usar canales de intervención telefónica. Para el caso de la comunicación con el vehículo destino se realiza el enlace por medio de un canal con desvanecimiento de Rayleigh y en el caso del vehículo espía, se utiliza un canal de desvanecimiento de Nakagami. El estudio llega a la conclusión, de que la capacidad de confidencialidad de la modulación OTFS evaluada sobre los canales con desvanecimiento Nakagami y Rayleigh son más seguros que otros sistemas [Ashok Raj and Ananthi \[2021\]](#).

También se ha realizado estudios en los que se desea analizar rendimientos de sistemas IoT vehiculares basados en nuevos radios con modulación OTFS, en estos estudios se ha propuesto sistemas menos complejos sin verificación de paridad, es decir, se elimina la complejidad computacional de la decodificación con revisión de paridad de baja densidad (LDPC, por sus siglas en inglés, *Low-Density Parity-Check*), logrando obtener una relación señal a ruido SNR de 6 dB, esto significa que estos sistemas se pueden utilizar para mejorar la calidad de servicio de las aplicaciones vehiculares con IoT, [Reddy et al. \[2021\]](#).

Otro caso de estudio de la modulación OTFS es su implementación en un sistema de radar, que en comparación con los sistemas convencionales, el sistema implementado con OTFS promete ser más novedoso y eficiente para la estimación de la distancia y la velocidad del objetivo. En la implementación de este radar, es importante considerar que la propagación de la señal transmitida, requiere menos prefijos cíclicos, lo que conlleva a una duración menos de transmisión en comparación con la modulación OFDM (por sus siglas en inglés, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), [Correas-Serrano et al. \[2022\]](#), logrando que el radar tenga un mayor alcance y una tasa de seguimiento o detección de objetivos más rápida, y como punto final a destacar, con OTFS el radar permanece libre de interferencias entre portadoras, permitiendo así una mayor estimación de frecuencia Doppler, [Raviteja et al. \[2019\]](#).

Capítulo 3

Diseño e Implementación de la Modulación OTFS en SDR

Un Radio Definido por Software (SDR, por sus siglas en inglés *Software Defined Radio*), es un sistema de comunicaciones, donde la frecuencia de portadora, ancho de banda de la señal, modulación y acceso a la red, están definidos por un software. Para el desarrollo de la tesis, se diseñó e implementó en un SDR usando hardware y software de National Instruments específicamente el software LabVIEW NXG 3.1 y el hardware NI USRP 2920.

Para diseñar el algoritmo es importante entender la matemática que conlleva la modulación OTFS y el funcionamiento de un sistema de comunicaciones inalámbricas, por lo tanto, se toma como referencia el siguiente diagrama de bloques presentado en la Figura 3.1.

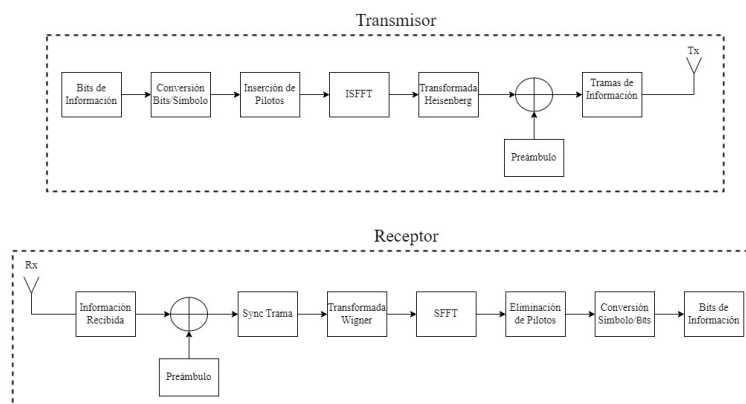


Figura 3.1: Diagrama de bloques del sistema

3.1. Trama de bits en Tx

La parte inicial del programa tiene como objetivo crear una trama o un vector de bits desde un texto cualquiera. En el transmisor la conversión de texto a bits se realizó mediante una estructura *Case* en la cual, al tener el valor de *False*, captura todo el texto y lo convierte en un *Byte Array*. En cada posición de esta matriz se encuentran los bits que representan cada uno de los caracteres del texto ingresado, el siguiente proceso que se realiza es, tomar esta información que se encuentra en la matriz y cambiarla a un vector, es por eso que la información de la matriz ingresa a un *bucle for* que inicia desde la posición $[0, 0]$ hasta el tamaño completo de la matriz $M \times N$. El proceso mencionado se utiliza para cambiar a la matriz de bits a un solo vector con la información de los caracteres ingresados.

Cuando la estructura *Case* toma el valor de *True*, toma el texto ingresado en binario y realiza un proceso similar al caso anterior con la diferencia de que la información ingresada al ser bits los transforma de texto a una matriz y luego se los coloca en un vector, para enviar ese vector o trama al proceso de modulación. Esto se puede observar en la Figura 3.2.

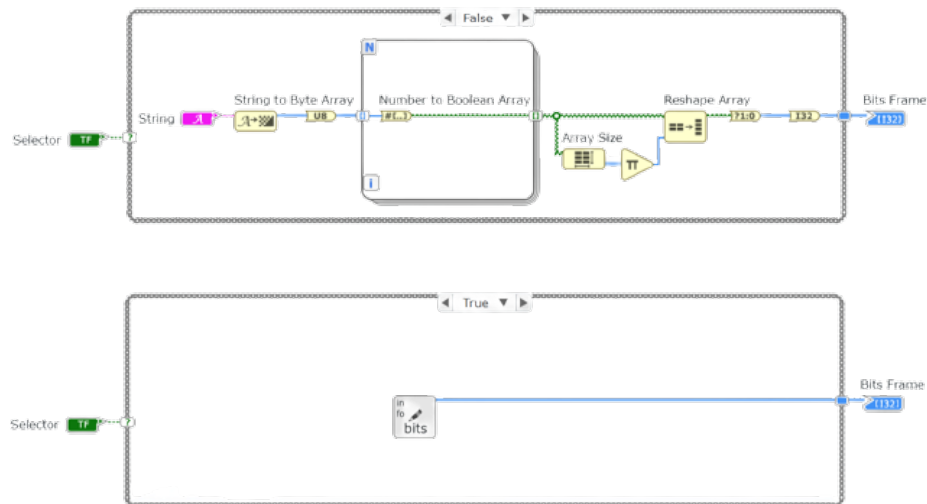


Figura 3.2: Fuente de información a ser transmitida (conversión de texto a bits).

3.2. Modulación PSK

El siguiente paso de este programa consiste en realizar una modulación al vector de bits que se obtuvo en el transmisor y una demodulación del vector de símbolos que se obtiene en el receptor. El objetivo es convertir en símbolos la información que ingresa en el sistema, mismo que fue detallado anteriormente.

Para este caso se utilizó una técnica de modulación digital en la que se emplea la fase de la señal portadora para transmitir información digital, en ese punto, se modifica su fase de acuerdo a los datos que se desean transmitir, esta modulación se la conoce como modulación PSK (Por sus siglas en inglés *Phase Shift Keying*), Figura 3.3, y tiene como ventaja una mejor eficiencia en el ancho de banda y es robusta frente a ciertos tipos de interferencias en comparación con los que utilizan amplitud y frecuencia [Noori and Ardakani \[2011\]](#).

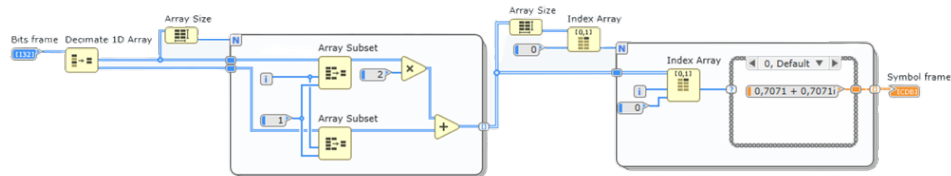


Figura 3.3: Modulación PSK (conversión de bits a símbolo).

3.3. Inserción de pilotos

En el transmisor luego de tener la información convertida en símbolos mediante la modulación PSK explicada anteriormente, se procedió con un paso fundamental para las comunicaciones inalámbricas, la inserción de símbolos pilotos.

Los símbolos pilotos son señales definidas en las que se conoce el valor y la ubicación dentro de la trama de información, además se transmiten periódicamente durante la comunicación para brindar una referencia constante. Su función es brindar al receptor una ayuda para estimar el valor del canal, y así lograr una correcta decodificación de los símbolos de los datos transmitidos.

Dentro del programa implementado se insertan 64 pilotos a lo largo de toda la trama de información. Para obtener la posición de cada piloto se realiza un cálculo en base al número de portadoras K y la cantidad de pilotos L que se van a insertar, por ejemplo:

Si tenemos un número de portadoras $K = 1024$ y el número de pilotos $L = 64$, quiere decir que, la posición de cada piloto se obtiene dividiendo $K/L = 1024/64 = 16$, Este valor indica que después de cada 15 símbolos se insertará en la posición número 16 un símbolo con valor de $0,707 + 0,707i$. A continuación, en la Figura 3.4, se presenta el algoritmo que se implementó para la inserción de símbolos.

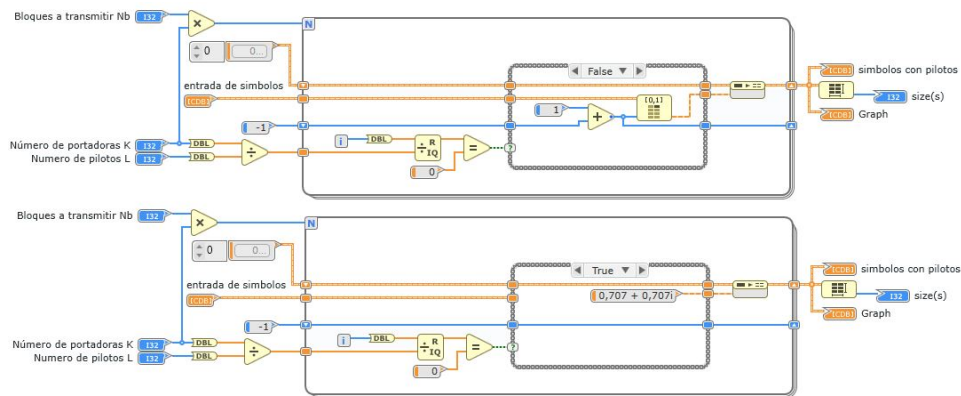


Figura 3.4: Inserción de símbolos pilotos.

3.4. Modulación OTFS

3.4.1. Transformada Inversa Simpléctica Rápida de Fourier

Para la implementación de la modulación OTFS en el transmisor, es necesario realizar varios procesos y cálculos matemáticos con la matriz de símbolos que se tiene hasta este punto. En base a la matemática analizada en el capítulo anterior, se debe implementar la transformada inversa simpléctica rápida de Fourier (ISFFT) para codificar la señal de entrada. esta transformada se realiza mediante la transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés *Fast Fourier Transform*) y por la Transformada rápida de Fourier inversa (IFFT, por sus siglas en inglés *Inverse Fast Fourier Transform*).

3.4. MODULACIÓN OTFS

Primero, se realiza una transformada rápida de Fourier a todas las columnas de la matriz de símbolos, para esto, los valores de la matriz se ingresan a un *bucle For* que inicia desde 0 hasta el número total de *columnas* de la matriz indicada. Luego, a todos los valores de las columnas se realizan la FFT y se construye una nueva matriz con estos nuevos valores, como se observa en la Figura 3.5.

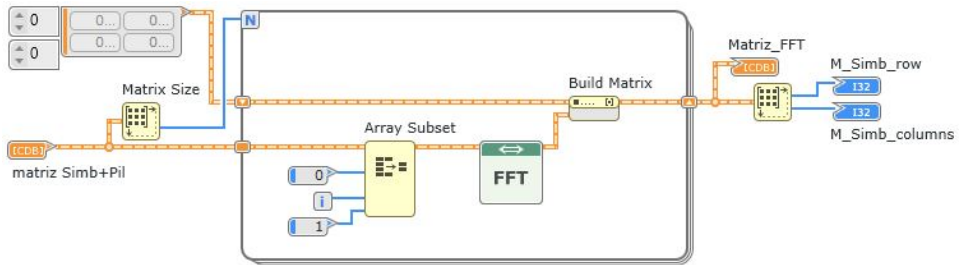


Figura 3.5: FFT aplicada a las columnas de la matriz de símbolos.

Segundo, se realiza una transformada rápida de Fourier inversa a cada una de las filas de la matriz obtenida luego de la FFT. Cada valor de la matriz se ingresan a un *bucle For* que inicia desde 0 hasta el número total de *filas*. Luego, a todos los valores de las filas se realizan la IFFT y se construye una nueva matriz con estos valores obtenidos. En la siguiente Figura 3.6 se puede observar la implementación de la IFFT a las filas de la matriz que se obtuvo luego de la FFT.

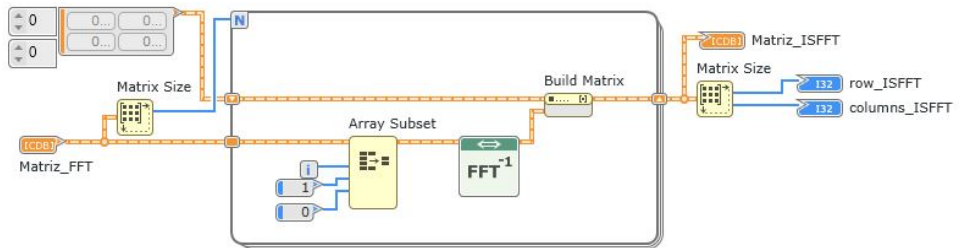


Figura 3.6: IFFT aplicada a las filas de la matriz de símbolos.

Es importante mencionar que luego de la IFFT es necesario realizar una inserción de *ceros* a la matriz resultante de la ISFFT. Para la inserción de

ceros se debe tener definido la cantidad de muestras que se tomará por cada portadora y ese valor se lo multiplica por el número total de portadoras. Estos valores calculados, se utilizan para construir una nueva matriz que contiene los valores de la matriz ISFFT y los *ceros* que serán insertados, este proceso se lo puede observar en la Figura 3.7

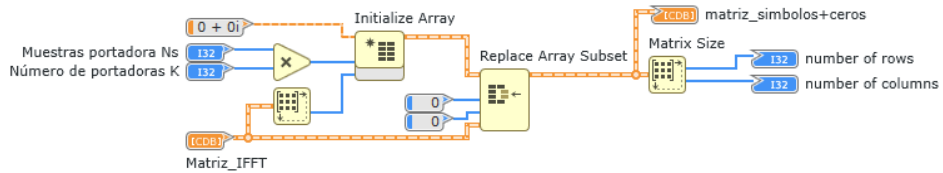


Figura 3.7: Ceros añadidos a la Matriz ISFFT.

3.4.2. Transformada de Heisenberg

La transformada de Heisenberg es otra parte fundamental de la modulación OTFS. Esta transformada se la realizó a todas las columnas de la matriz que se obtuvo luego de la ISFFT, el objetivo de esta transformada es convertir la señal que se encuentra en el espacio de tiempo-frecuencia al dominio del tiempo para que posteriormente pueda ser acoplada en el canal. En la Figura 3.8, se puede observar que la matriz de símbolos más los ceros incluidos ingresan en un *bucle For* que inicia desde *ceros* hasta el número de columnas, a cada una de estas columnas se realiza una FFT y luego se construye una matriz con estos valores, finalizando así la modulación OTFS.

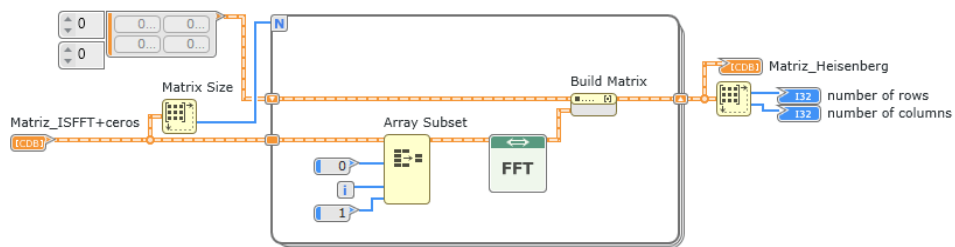


Figura 3.8: Transformada de Heisenberg.

3.5. Prefijo Cíclico

El prefijo cíclico se lo añade luego de la modulación OTFS, su función es evitar la interferencia entre símbolos ocasionado por el efecto de dispersión. Generalmente se presenta cuando la señal se propaga por un canal inalámbrico y durante ese proceso se puede producir reflexiones, difracciones y otros eventos que ocasionan que la señal llegue al receptor en diferentes momentos, esto también es conocido como dispersión multipath. Es importante mencionar que el prefijo cíclico se escoge en base a las características del canal, como la frecuencia de muestreo y el retardo máximo esperado, pero se debe tener cuidado de que no sea muy largo debido a que esto puede ocasionar problemas de sobrecarga por los datos redundantes. En conclusión, el prefijo cíclico, es un tiempo adicional que se añade al inicio o final de los símbolos con el objetivo de eliminar la interferencia intersimbólica cuando la señal llega al receptor.

La programación del prefijo cíclico se inició calculando el tamaño, esto se logra multiplicando la frecuencia de muestreo por el tiempo de guardia, con este valor y las dimensiones de la matriz obtenida con la modulación OTFS, se crea una nueva matriz y el prefijo cíclico se añade desde la posición $[0, 0]$ hasta el valor obtenido de la longitud del prefijo cíclico. Por ejemplo si el prefijo cíclico tiene una longitud de 2000, la matriz OTFS se ubicaría en la posición 2001. esto se puede observar en la Figura 3.9.

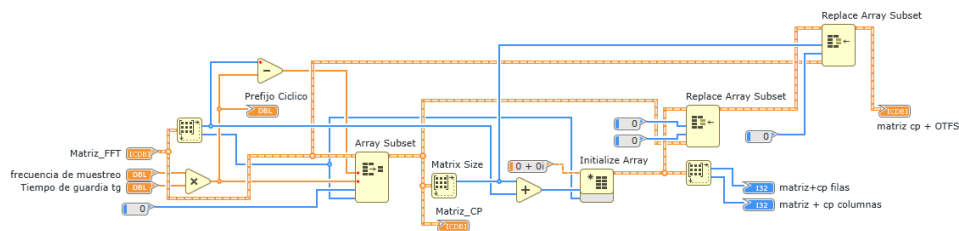


Figura 3.9: Inserción de prefijo cíclico.

3.6. Preámbulo Transmisor - Receptor

Es importante entender que es una secuencia de bits transmitida antes de los datos útiles, desempeña un papel crítico en la sincronización y recuperación de la información en el receptor. Al llegar al receptor, estos bits de preámbulo se convolucionan con la señal original, permitiendo una

3.6. PREÁMBULO TRANSMISOR - RECEPTOR

correcta alineación y sincronización de las tramas de datos enviadas, como se presenta en la Figura 3.10. En el proceso de diseño del programa, se definen códigos específicos para el preámbulo, los cuales se utilizan para asegurar la detección y corrección de errores. Asimismo, se realiza un sobremuestreo de la señal recibida para aumentar la precisión de la recuperación de los datos.

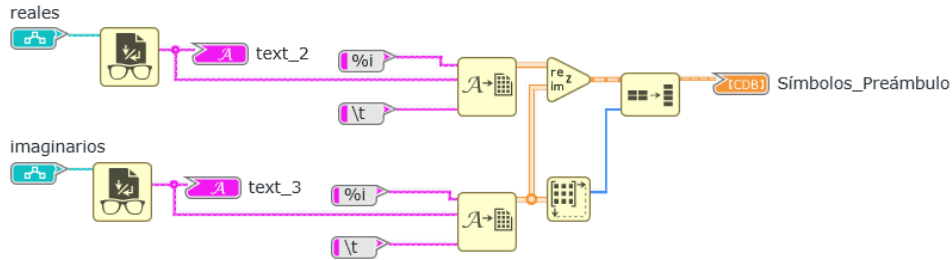


Figura 3.10: Preámbulo transmisor y receptor.

Una vez completado el sobremuestreo, la señal es sometida al filtro *Pulse Shaping*, que tiene la función de darle forma a la señal, reduciendo su ancho de banda y mejorando su eficiencia espectral. De esta manera, se logra optimizar el rendimiento y la calidad de la transmisión inalámbrica en el sistema, como se puede observar en la Figura 3.11.

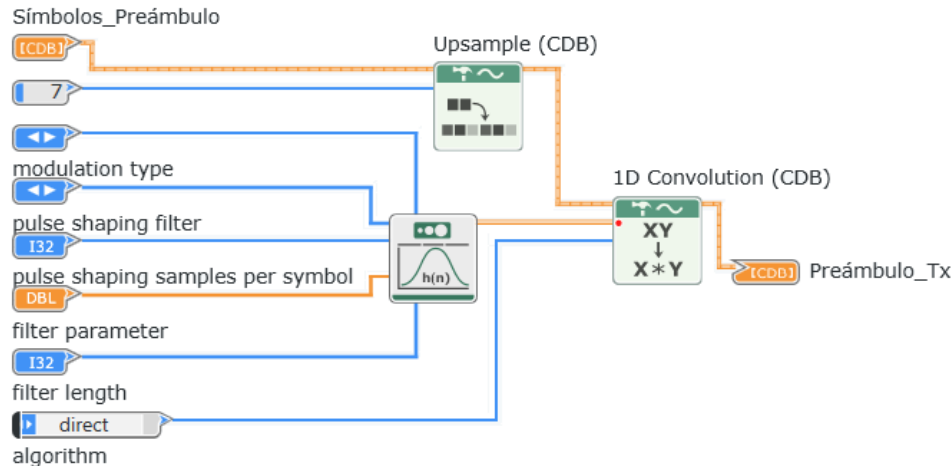


Figura 3.11: Filtro Pulse Shaping.

3.7. SINCRONIZACIÓN DE TRAMA

Este vector se une con los símbolos obtenidos de la modulación OTFS y se envían mediante varias tramas hacia el receptor. Es importante mencionar que la trama de información es enviada 3 veces con el objetivo de no perder información y tener más posibilidades de reconstruir la señal en el receptor, este proceso se realiza en la Figura 3.12.

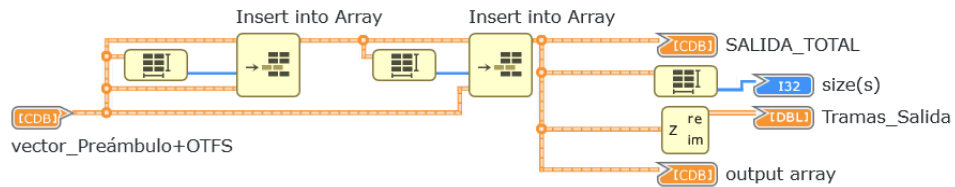


Figura 3.12: Tramas enviadas desde el transmisor.

3.7. Sincronización de trama

El proceso de sincronización se lleva a cabo siguiendo los siguientes pasos. En primer lugar, se realiza una correlación entre la señal de entrada y el resultado de la convolución del preámbulo con la señal recibida. A partir de los valores obtenidos en la correlación, se determina la posición del valor más alto, el cual corresponde a la sincronización óptima. Una vez identificada esta posición, se procede a eliminar los símbolos del preámbulo de la señal, generando así una nueva matriz libre de los símbolos del preámbulo.

En la Figura 3.13, se observa los bloques de programación del proceso de sincronización de tramas.

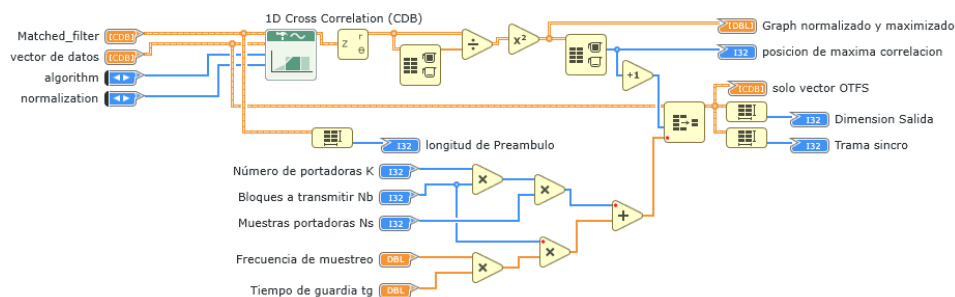


Figura 3.13: Proceso para la sincronización de Tramas.

3.8. Demodulación OTFS

3.8.1. Transformada de Wigner

Luego de realizar la sincronización de las tramas de información, estas tramas son colocadas dentro de una matriz con el objetivo de poder demodular la información. Al tener la matriz con toda la información se procede a realizar la transformada de Wigner. Consiste en realizar la transformada rápida de Fourier inversa de cada una de las columnas y generar una nueva matriz, para lograr esto, cada columna ingresa en un *bucle For* para recorrer todas las posiciones de la matriz y aplicar la IFFT a toda la columna para finalmente construir la nueva matriz con símbolos que se encuentran en dominio del tiempo-frecuencia. En la Figura 3.14, se puede apreciar lo mencionado.

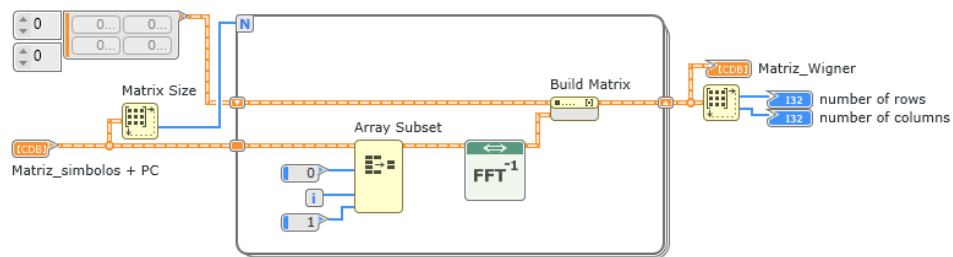


Figura 3.14: Transformada de Wigner.

Se debe recordar que luego de la transformada de Wigner se tiene la matriz en dominio del tiempo-frecuencia, por lo tanto es necesario eliminar los *ceros* que se encuentran al final de los símbolos de información.

Para identificar estos ceros se utiliza una función dentro de *LabVIEW NXG* conocida como *Get SubMatriz*, aquí se ingresa el *número de portadoras* -1 para posicionarse en la ubicación de las filas de la matriz de símbolos más *ceros*, y para determinar la posición de las columnas se ingresa el valor de los *bloques transmitidos* -1 . De esta forma se excluye todos los elementos *ceros* de la matriz. En la Figura 3.15, se puede apreciar el proceso de eliminación de *ceros*.

3.8. DEMODULACIÓN OTFS

19

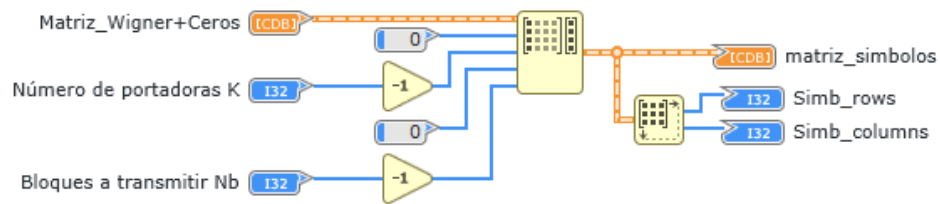


Figura 3.15: Eliminación de ceros.

3.8.2. Transformada Simpléctica Rápida de Fourier

El proceso para obtener la SFFT de la matriz obtenida luego de la transformada de Wigner, consiste en realizar la FFT a todas las filas de la matriz en mención, esto se logra ingresando los datos de cada fila en un *bucle For* para tomar cada valor de las filas de la matriz y aplicar la FFT, luego reconstruir la matriz para enviarla al siguiente proceso que sirve de complemento para la decodificación de la señal. En la Figura 3.16, se puede observar el proceso detallado anteriormente.

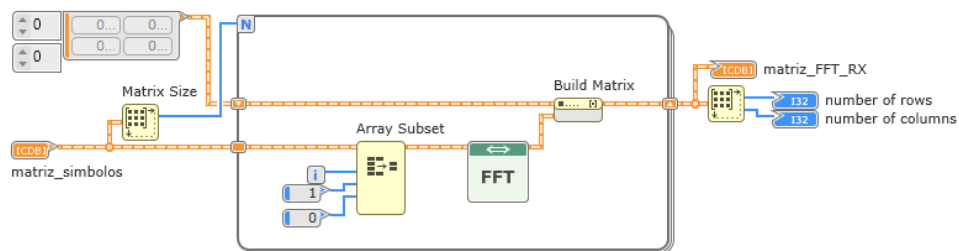


Figura 3.16: FFT aplicada a las filas de la matriz de símbolos.

El siguiente paso es ejecutar una IFFT a todas las columnas de la matriz obtenida en el paso anterior, de igual forma, cada valor de las columnas ingresa en un *bucle For* para ser aplicado la IFFT y volver a construir una matriz de datos decodificados, obteniendo valores en donde se encuentran los símbolos y los pilotos agregados por el transmisor. En la Figura 3.17, se encuentra el proceso mencionado.

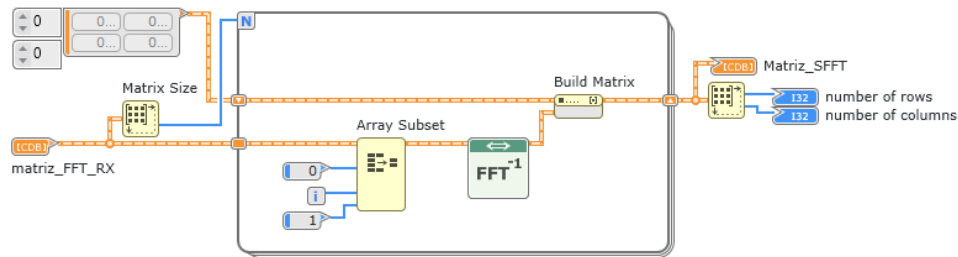


Figura 3.17: IFFT aplicada a las columnas de la matriz de símbolos.

3.9. Eliminación de Pilotos

En el receptor, para la eliminación de pilotos se usa la función *Delete from Array*. La matriz de valores obtenidos luego de la SFFT fueron transformados a un vector con el objetivo de poder eliminar los símbolos pilotos, esto se logra ingresando los valores del vector dentro de un *bucle For* que tiene que recorrer desde la posición *cero (0)* hasta el valor resultante del producto entre el número de pilotos y número de bloques transmitidos. Al tener esta información, dentro del bucle se identifica la posición del símbolo piloto y por medio de la función mencionada anteriormente se elimina el valor de la posición identificada. Finalmente, se obtiene un vector de símbolos libres de procesamiento adicional, esto se puede observar en la Figura 3.18.

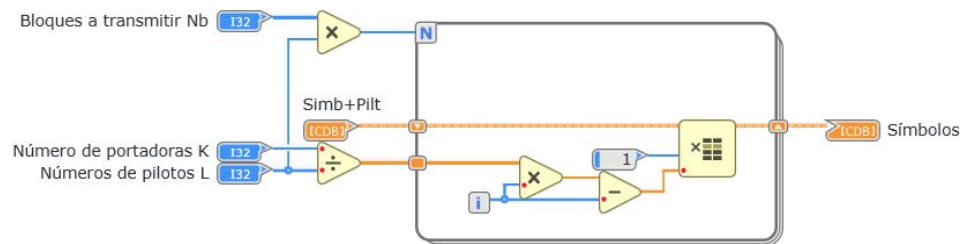


Figura 3.18: Eliminación de símbolos pilotos.

3.10. Demodulación PSK

Para la demodulación que se implementa en el receptor se realiza un proceso similar. Con el array de símbolos obtenidos se procede a ejecutar

una comparación de fase, es decir, se divide la parte real de la parte imaginaria de cada uno de los símbolos recibidos y estos ingresan a una estructura condicional *Case* que se encargan de asignar el número binario correspondiente, los posibles valores que se pueden asignar son 00, 01, 10 y 11 que corresponde a las diferentes fases utilizadas en la modulación PSK. En conclusión, se recupera la información transmitida usando cambios de fase discretos en una señal junto con una determinación de valores binarios. Este proceso mencionado se puede observar en la Figura 3.19.

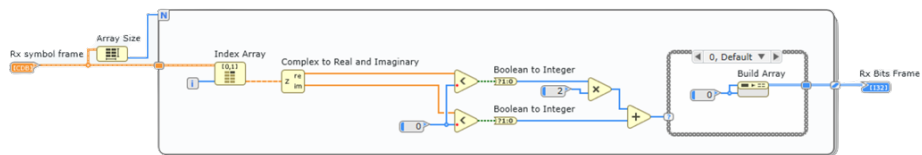


Figura 3.19: Demodulación PSK (conversión de símbolos a bits).

3.11. Trama de bits en Rx

Cuando la información que se entrega al receptor, después de un proceso de sincronización de tramas, demodulación y otros procesos adicionales, que se describirán más adelante, es necesario convertir el vector de bits recibidos a texto.

Los bits recibidos se capturan en tramos de 8 bits para transformarlos en un número entero por medio del cálculo de bit a número entero, esta transformación entrega valores entre 0 a 255. Finalmente, con el número calculado se obtiene el valor ASCII correspondiente a cada uno de ellos, obteniendo así, el texto transmitido. El proceso descrito anteriormente se lo puede observar en la Figura 3.20.

3.11. TRAMA DE BITS EN RX

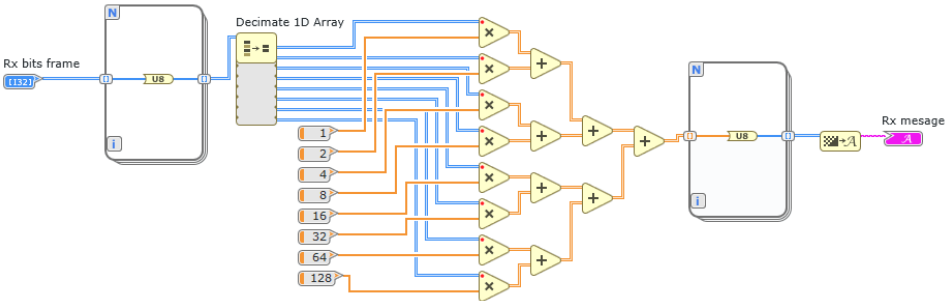


Figura 3.20: Mensaje recibido (conversión de bits a texto).

Capítulo 4

Análisis de resultados

En este capítulo se describen los parámetros de configuración empleados para la comunicación en el USRP (Universal Software Radio Peripheral). Junto con esto, también se realiza un análisis de los resultados para comprobar el funcionamiento adecuado del sistema de comunicación con modulación OTFS.

Para comenzar, el ancho de banda propuesto para el sistema de comunicaciones inalámbricas es de 100 KHz , el cual se encuentra dentro de los parámetros de trabajo del USRP. Esta medida nos permitirá establecer el ancho de banda de cada portadora y determinar la frecuencia de I/Q rate que se utilizará en el USRP. El sobremuestreo propuesto es de 8 muestras por portadora, esto se debe a que la transformada de Fourier trabaja con valores de 2^n bits. Además, la frecuencia de sobremuestreo calculada es de 8 veces el ancho de banda, lo que resulta en un valor de 800 Ksamples/seg . Este proceso se puede observar en las Figuras 4.1 y 4.2.

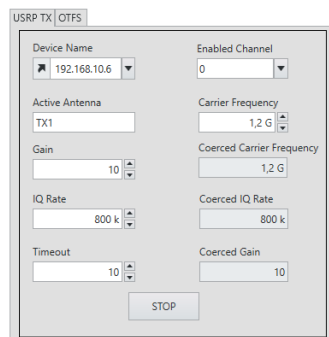


Figura 4.1: Parámetros de Configuración del USRP para el transmisor.

USRP_RX OTFS_RX	
Device Name	Enabled Channel
192.168.10.6	0
Active Antenna	Carrier Frequency
RX2	1,2 G
Gain	Coerced Carrier Frequency
15	1,2 G
IQ Rate [S/sec]	Coerced IQ Rate [S/sec]
800 k	800 k
Timeout	Coerced Gain
5	15
STOP	Number of Samples
	800000

Figura 4.2: Parámetros de Configuración del USRP para el receptor.

En función del ancho de banda propuesto se estableció un tiempo de guardia de $0,001\text{ ms}$. Este tiempo representa el intervalo en el que un paquete tarda en llegar desde el transmisor al receptor, considerando tanto la ruta directa como las posibles reflexiones. El propósito del tiempo de guardia es evitar el solapamiento de información entre el paquete recibido directamente y el reflejado. Basándonos en el tiempo de guardia, se calcula el tamaño del prefijo cíclico que se incluirá en las tramas enviadas por el transmisor.

Por otro lado, se ha determinado un total de 32 bloques de información cada uno de estos con 1024 portadoras. Esta cantidad de bloques nos proporciona un total de 32,768 bits de información transmitida, incluyendo los símbolos pilotos. Además, se ha establecido la cantidad de símbolos pilotos que se utilizarán dentro de cada trama de información colocando un piloto por cada 15 símbolos de información. Estos símbolos pilotos se utilizan para estimar y ecualizar el canal al llegar al receptor, facilitando la correcta decodificación de la información transmitida. Sin embargo, para este proyecto no se considero la estimación del canal pero se implementó para continuar con futuras investigaciones. En la Tabla 4.1, se puede observar los valores mencionados anteriormente.

Dentro del análisis se debe considerar las configuraciones específicas del USRP para el transmisor y receptor, se utilizo la banda de frecuencia del sistema de $1,2\text{ GHz}$ debido a las características de la antenas utilizadas y rango de trabajo del equipo, además se utilizo una ganancia de 10 dB en el transmisor y de 15 dB en el receptor. Un parámetro importante es el timeout ya que este varia en función de las capacidades de memoria RAM del computador, el que fue establecido para este proyecto es de 10 segundos para el transmisor y de 5 segundos para el receptor.

En el proceso de pruebas de comunicación en el sistema, se hace uso de un

Descripción	Valor	Unidad
Ancho de banda (BW)	100	KHz
Freq. Muestreo	800	KHz
Nro. Portadoras (K)	1024	U
Bloques a transmitir (N_b)	32	U
Nro. Pilotos	64	U
Muestras por Portadora N_s	8	U
Tiempo de Guardia (T_g)	0.001	ms

Tabla 4.1: Valores base del sistema.

texto predefinido para validar el correcto funcionamiento de la transmisión y recepción de datos. Este texto se encuentra establecido en el transmisor y se envía a través del canal de comunicación para ser recibido en el receptor. La información recibida es luego comparada con el texto original para verificar la integridad y exactitud de la transmisión, el texto utilizado fue tomado del discurso "Mi credo" pronunciado por Albert Einstein en la Liga Alemana de Derechos Humanos, Berlín, en otoño de 1932. es el que se muestra en la Figura 4.3, y fue seleccionado por adecuarse al sistema planteado. Para este caso se envió el texto tres veces llegando a un total de 10123 caracteres en código ASCII que son convertidos en bits para construir la trama de información, con un total de 80984 bits.

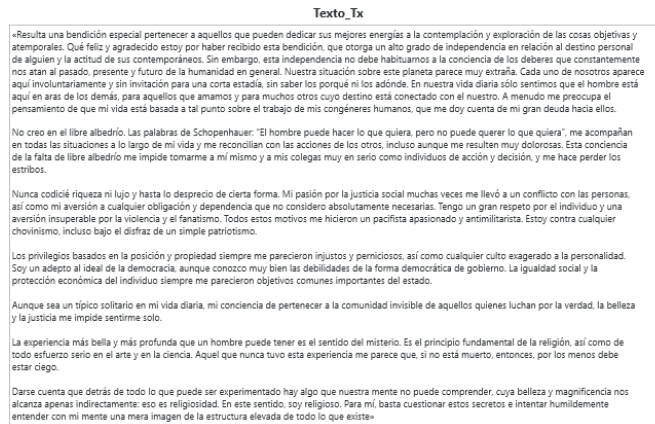


Figura 4.3: Texto base para procesar y transmitir.

En la Figura 4.4, se pueden observar los bits que fueron transmitidos y recibidos luego de aplicar el proceso de demodulación. Este proceso consiste

en utilizar la distancia euclidiana en el mapeo de la constelación en el plano complejo, se puede observar una alta similitud entre ambas señales. Sin embargo, en el receptor se obtuvo una cantidad de bits inferior a la cantidad original, en específico se obtuvieron 61440 bits. Esta reducción en la cantidad de bits se debió al tiempo de espera establecido en el receptor y a la capacidad de procesamiento del computador utilizado en el proyecto.

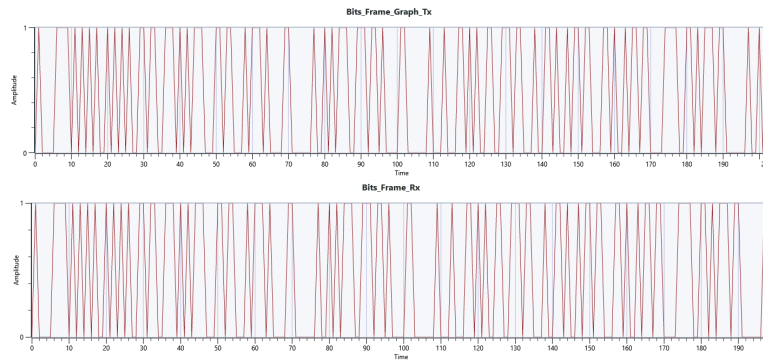


Figura 4.4: Comparación de bits entre Transmisor vs Receptor.

Una de las formas de validar los resultados obtenidos, es transformar los bits recibidos en texto, aquí se obtuvo el siguiente resultado que se presenta en la Figura 4.5.

Texto_Rx

«Resulta una bendición especial pertenecer a aquellos que pueden dedicar sus mejores energías a la contemplación y exploración de las cosas objetivas y atemporales. Qué feliz y agradecido estoy por haber recibido esta bendición, que otorga un alto grado de independencia en relación al destino personal de alguien y la actitud de sus contemporáneos. Sin embargo, esta independencia no debe habituarnos a la conciencia de los deberes que constantemente nos atan al pasado, presente y futuro de la humanidad en general. Nuestra situación sobre este planeta parece muy extraña. Cada uno de nosotros aparece aquí involuntariamente y sin invitación para una corta estadía, sin saber los porqué ni los adónde. En nuestra vida diaria sólo sentimos que el hombre está aquí en aras de los demás, para aquellos que amamos y para muchos otros cuyo destino está conectado con el nuestro. A menudo me preocupa el pensamiento de que mi vida está basada a tal punto sobre el trabajo de mis congéneres humanos, que me doy cuenta de mi gran deuda hacia ellos.

No creo en el libre albedrío. Las palabras de Schopenhauer: "El hombre puede hacer lo que quiera, pero no puede querer lo que quiera", me acompañan en todas las situaciones: a lo largo de mi vida y me reconcilian con las acciones de los otros, incluso aunque me resulten muy dolorosas. Esta conciencia de la falta de libre albedrío me impide tomarme a mí mismo y a mis colegas muy en serio como individuos de acción y decisión, y me hace perder los estribos.

Nunca codicié riqueza ni lujo y hasta lo desprecio de cierta forma. Mi pasión por la justicia social muchas veces me llevó a un conflicto con las personas, así como mi aversión a cualquier obligación y dependencia que no considero absolutamente necesarias. Tengo un gran respeto por el individuo y una aversión insuperable por la violencia y el fanatismo. Todos estos motivos me hicieron un pacifista apasionado y antimilitarista. Estoy contra cualquier chovinismo, incluso bajo el disfraz de un simple patriotismo.

Los privilegios basados en la posición y propiedad siempre me parecieron injustos y perversos, así como cualquier culto exagerado a la personalidad. Soy un adepto al ideal de la democracia, aunque conozco muy bien las debilidades de la forma democrática de gobierno. La igualdad social y la protección económica del individuo siempre me parecieron objetivos comunes importantes del estado.

Aunque sea un típico solitario en mi vida diaria, mi conciencia de pertenecer a la comunidad invisible de aquellos quienes luchan por la verdad, la belleza y la justicia me impide sentirme solo.

La experiencia más bella y más profunda que un hombre puede tener es el sentido del misterio. Es el principio fundamental de la religión, así como de todo esfuerzo serio en el arte y en la ciencia. Aquel que nunca tuvo esta experiencia me parece que, si no está muerto, entonces, por los menos debe estar ciego.

Darse cuenta que detrás de todo lo que puede ser experimentado hay algo que nuestra mente no puede comprender, cuya belleza y magnificencia nos alcanza apenas indirectamente: eso es religiosidad. En este sentido, soy religioso. Para mí, basta cuestionar estos secretos e intentar humildemente entender con mi mente una mera imagen de la estructura elevada de todo lo que existe»

Figura 4.5: Texto obtenido en el receptor.

Otro punto muy importante dentro en el desarrollo de la modulación OTFS son los diagramas de constelaciones generadas en el transmisor y

receptor. En la Figura 4.6 se muestra el diagrama de constelación de los símbolos generados en el transmisor, estos símbolos están en valores normalizados, mapeados con código gray y se encuentran bien definidos dentro del plano complejo. Este será el punto de partida para un posterior análisis del diagrama de constelación en el receptor.

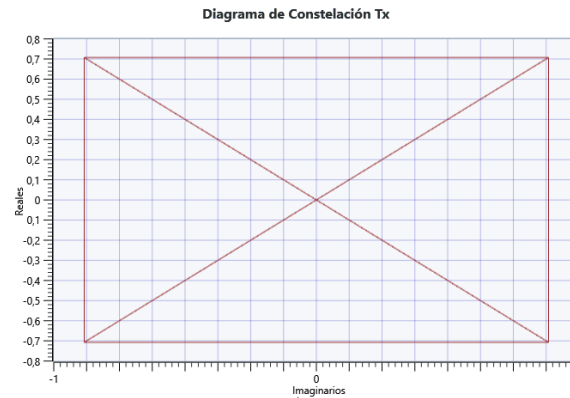


Figura 4.6: Diagrama de constelación de símbolos en el transmisor.

Observando el diagrama de constelación del receptor, se obtuvo los siguientes resultados: en el eje de fase valor máximo $3,747\mu V$ y mínimo $-3,902\mu V$ y ejes de cuadratura valor máximo $3,560\mu V$ y mínimo $-4,119\mu V$. Esto se puede apreciar en la Figura 4.7.

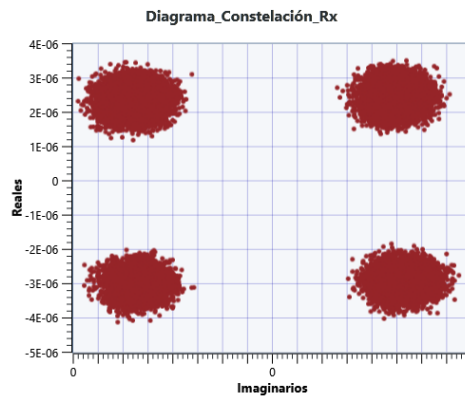


Figura 4.7: Diagrama de constelación de símbolos en el receptor.

En el diagrama de constelación del receptor, se puede apreciar que la constelación formada por los símbolos recibidos, se encuentran muy

bien definida dentro del plano de fase y cuadratura, a tal punto que se puede diferenciar los cuadrantes en los que se encuentran concentrados los símbolos, esto es un indicador muy importante dentro de las comunicaciones inalámbricas, debido a que se puede observar que existe ruido gaussiano pero sin afectar a la probabilidad de detección del símbolo. Con este diagrama de constelación se puede apreciar la calidad de la modulación realizada. Por otro lado, el error de símbolo en el sistema implementado es prácticamente 0, debido a que se pudo recuperar toda la información que se presentó en la Figura 4.5. Al analizar el diagrama presentado, se puede concluir que no se han identificado problemas de degradación ni de calidad de la señal, superando incluso la interferencia intersimbólica. La evaluación se basa en el diagrama de constelación generado en el receptor y en el texto obtenido tras la demodulación PSK.

Para lograr la sincronización de la trama, se empleó el código Barker de 31 bits. Mediante este código, se generó un preámbulo que se añadió al inicio de la trama en la modulación OTFS, esta señal preámbulo se presenta en la Figura 4.8. El objetivo de este preámbulo es facilitar la recuperación de la trama en el receptor a través de la correlación entre el preámbulo recibido y el preámbulo transmitido, los resultados obtenidos en el receptor se puede apreciar en las Figuras 4.9, 4.10 y 4.11. Este proceso de correlación nos proporciona el índice del valor donde comienza la trama de información recibida. La utilización del código Barker como preámbulo asegura una sincronización precisa y confiable, lo cual es fundamental en las comunicaciones inalámbricas.

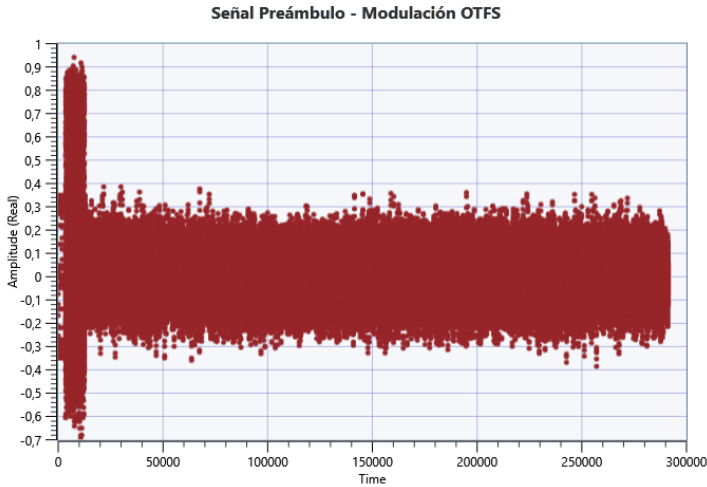


Figura 4.8: Trama enviada desde el transmisor (Parte real) con el Preámbulo (Código Barker).

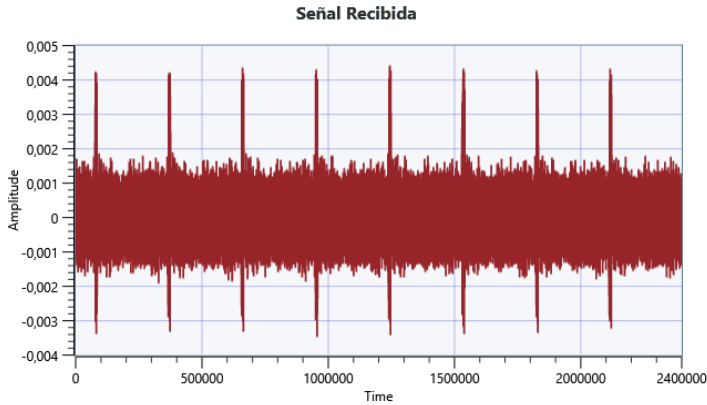


Figura 4.9: Trama recibida por el USRP(Parte real).

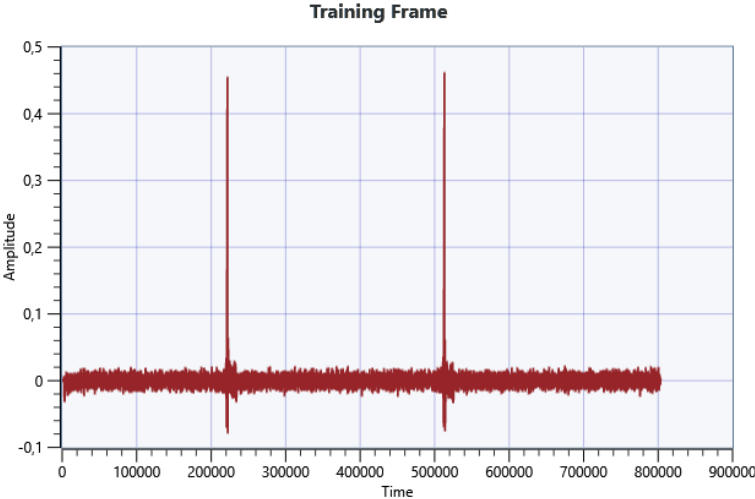


Figura 4.10: Detección del índice entre la correlación del preámbulo y la trama recibida.

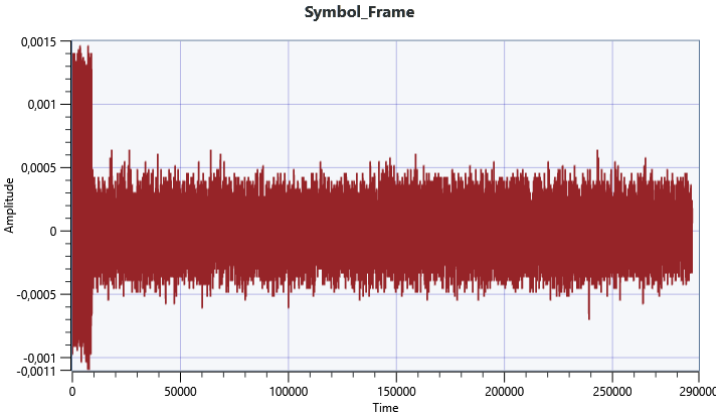


Figura 4.11: Trama de de recepción recuperada (Parte real).

Capítulo 5

Conclusiones

El algoritmo de la modulación OTFS en un SDR, presentó muchas novedades durante todo el proceso. Se obtuvieron resultados muy prometedores que son una puerta para muchos proyectos de desarrollo e investigación a futuro.

- La modulación OTFS representa una tecnología para la transmisión de datos en ambientes de movilidad, tales como vehículos en movimiento y dispositivos portátiles. Esta tecnología se basa en la transformación de la señal de datos a un dominio ortogonal de tiempo y frecuencia, lo que permite que la señal sea inmune a los efectos del desvanecimiento temporal y frecuencial que se presentan en entornos de alta movilidad. Además, la modulación OTFS aprovecha el uso de la técnica de procesamiento en múltiples dimensiones para separar señales en espacios de transmisión, lo que mejora la eficiencia espectral de los sistemas de comunicación inalámbrica.

Aunque la modulación OTFS es una tecnología relativamente nueva, su capacidad para abordar los desafíos de la comunicación en entornos de alta movilidad y complejidad la convierte en una opción interesante para el futuro de las comunicaciones inalámbricas.

- Tras llevar a cabo la implementación de la modulación OTFS en un SDR, se logró validar que, en comparación con otras técnicas de modulación, OTFS exhibe una notable inmunidad frente a los efectos de los desvanecimientos temporales y frecuenciales que se presentan en entornos de alta velocidad. Esto se debe a su capacidad para transformar la señal de datos en el dominio tiempo-frecuencia, lo cual

mejora significativamente la eficiencia espectral de los sistemas de comunicación inalámbrica.

En términos de rendimiento, los resultados demuestran que la modulación OTFS reduce significativamente la interferencia entre los símbolos de información modulados en señales portadoras diferentes. Esto se traduce en una demodulación más precisa en el dominio del retardo Doppler, lo que a su vez permite una mayor robustez en el sistema para la compensación del desplazamiento Doppler inducido por la movilidad en entornos de alta velocidad.

Además, la modulación OTFS es una tecnología relativamente nueva, lo que significa que se están explorando aún más sus posibilidades y limitaciones en diferentes entornos y escenarios de uso. Se están realizando estudios para investigar la capacidad de esta técnica para soportar transmisiones de datos en entornos de múltiples usuarios y múltiples antenas, lo que podría aumentar aún más la eficiencia y el rendimiento de los sistemas de comunicación inalámbrica.

Con su capacidad para reducir la interferencia entre los símbolos de información modulados en señales portadoras diferentes y permitir una demodulación precisa en el dominio del retardo Doppler, la modulación OTFS es una alternativa eficiente y robusta para la transmisión de datos inalámbricos.

- A futuro, es posible proponer nuevos escenarios donde el transmisor y receptor tengan movimiento relativo, para así comprobar la robustez en condiciones que generen un efecto Doppler. Actualmente, se ha visto que la implementación de la modulación resulta bastante robusta en un escenario donde no existe el mencionado movimiento, obteniendo un BER de 0. Sin embargo, el movimiento relativo podría forzar condiciones de fallo que motiven a proponer soluciones innovadoras y aportes importantes en la técnica. Además, se pueden proponer técnicas de modelado de canal con el objetivo de mejorar la eficiencia de la modulación. Se considera la utilización de símbolos piloto añadidos específicamente para la estimación del canal, y es posible proponer la adaptación de algoritmos, como el de mínimos cuadrados, para el modelado del canal.
- Finalmente, la implementación de la modulación OTFS ha generado una notable herramienta para que los docentes, estudiantes e investigadores de la Universidad Politécnica Salesiana, puedan desarrollar nuevos proyectos de investigación. Este puede ser el punto

de partida para probar distintos escenarios que generen resultados útiles para desarrollar nuevos aportes al estado del arte.

Bibliografía

- M. S. Alencar and V. C. da Rocha Jr. *The Fifth Generation of Mobile Communications*, pages 337–358. Springer International Publishing, Cham, 2022. ISBN 978-3-031-12067-1. doi: 10.1007/978-3-031-12067-1_12. URL https://doi.org/10.1007/978-3-031-12067-1_12.
- M. Ashok Raj and G. Ananthi. Performance analysis of ofds modulation in vehicular networks. In *2021 2nd International Conference on Secure Cyber Computing and Communications (ICSCCC)*, pages 198–201, 2021. doi: 10.1109/ICSCCC51823.2021.9478085.
- R. Berezdivin, R. Breinig, and R. Topp. Next-generation wireless communications concepts and technologies. *IEEE Communications Magazine*, 40(3):108–116, 2002. doi: 10.1109/35.989768.
- V. S. Bhat and A. Chockalingam. Performance analysis of ofds modulation with transmit antenna selection. In *2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring)*, pages 1–6, 2021. doi: 10.1109/VTC2021-Spring51267.2021.9448900.
- V. S. Bhat, S. G. Dayanand, and A. Chockalingam. Performance analysis of ofds modulation with receive antenna selection. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(4):3382–3395, 2021. doi: 10.1109/TVT.2021.3063546.
- A. Correas-Serrano, N. Petrov, M. Gonzalez-Huici, and A. Yarovoy. Comparison of radar receivers for ofdm and ofds waveforms. In *2022 19th European Radar Conference (EuRAD)*, pages 1–4, 2022. doi: 10.23919/EuRAD54643.2022.9924824.
- D. Gowda, K. Sudhindra, B. Harshitha, H. Surendra., and K. Madhusudhan. Evolution of mobile communication leading to 5g. In *2021 5th International Conference on Electrical, Electronics, Communication,*

- Computer Technologies and Optimization Techniques (ICEECCOT)*, pages 813–819, 2021. doi: 10.1109/ICEECCOT52851.2021.9708059.
- R. Hadani, S. Rakib, A. F. Molisch, C. Ibars, A. Monk, M. Tsatsanis, J. Delfeld, A. Goldsmith, and R. Calderbank. Orthogonal time frequency space (otfs) modulation for millimeter-wave communications systems. In *2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, pages 681–683, 2017a. doi: 10.1109/MWSYM.2017.8058662.
- R. Hadani, S. Rakib, M. Tsatsanis, A. Monk, A. J. Goldsmith, A. F. Molisch, and R. Calderbank. Orthogonal time frequency space modulation. In *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–6, 2017b. doi: 10.1109/WCNC.2017.7925924.
- A. M. Jaradat, J. M. Hamamreh, and H. Arslan. Modulation options for ofdm-based waveforms: Classification, comparison, and future directions. *IEEE Access*, 7:17263–17278, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2895958.
- M. Kollengode Ramachandran and A. Chockalingam. Mimo-otfs in high-doppler fading channels: Signal detection and channel estimation. In *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 206–212, 2018. doi: 10.1109/GLOCOM.2018.8647394.
- R. Krishnamurthi and M. Goyal. Optimization of capacity allocation problem in 4g lte mobile networks. In *2018 5th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, pages 1–5, 2018. doi: 10.1109/UPCON.2018.8596797.
- S. Kumar, G. Gupta, and K. R. Singh. 5g: Revolution of future communication technology. In *2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT)*, pages 143–147, 2015. doi: 10.1109/ICGCIoT.2015.7380446.
- S. K. Mohammed. Derivation of otfs modulation from first principles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(8):7619–7636, 2021. doi: 10.1109/TVT.2021.3069913.
- A. Monk, R. Hadani, M. Tsatsanis, and S. Rakib. Otfs-orthogonal time frequency space. *arXiv preprint arXiv:1608.02993*, 2016.
- S. Nagaraj. Symbol-level adaptive modulation for coded ofdm on block fading channels. *IEEE Transactions on Communications*, 57(10):2872–2875, 2009. doi: 10.1109/TCOMM.2009.10.070645.

- M. Noori and M. Ardakani. On symbol mapping for binary physical-layer network coding with psk modulation. *IEEE transactions on wireless communications*, 11(1):21–26, 2011.
- P. Raviteja, K. T. Phan, Y. Hong, and E. Viterbo. Orthogonal time frequency space (otfs) modulation based radar system. In *2019 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, pages 1–6, 2019. doi: 10.1109/RADAR.2019.8835764.
- C. S. Reddy, D. Sen, and C. Singhal. Performance analysis of nr based vehicular iot system with otfs modulation. In *2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall)*, pages 1–6, 2021. doi: 10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625242.
- T. Thaj and E. Viterbo. Otfs modem sdr implementation and experimental study of receiver impairment effects. In *2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, pages 1–6, 2019. doi: 10.1109/ICCW.2019.8757167.
- C.-X. Wang, M. D. Renzo, S. Stanczak, S. Wang, and E. G. Larsson. Artificial intelligence enabled wireless networking for 5g and beyond: Recent advances and future challenges. *IEEE Wireless Communications*, 27(1):16–23, 2020. doi: 10.1109/MWC.001.1900292.