



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:

EVALUACIÓN EN LABORATORIO DE UN
SISTEMA DE TRANSMISIÓN INALÁMBRICA
BASADO EN LA MODULACIÓN ORTHOGONAL
TIME FREQUENCY SPACE (OTFS),
IMPLEMENTADO EN SOFTWARE DEFINED
RADIO (SDR).

AUTORA:

MERCEDES KATHERINE CEVALLOS GONZÁLEZ

DIRECTOR:

PAÚL ANDRÉS CHASI PESANTEZ

CUENCA – ECUADOR
2025

Autora:



Mercedes Katherine Cevallos González

Ingeniera Electrónica.

Candidata a Magíster en Telemática por la Universidad Politécnica Salesiana - Sede Cuenca.

mcevallosg1@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Paúl Andrés Chasi Pesantez

Ingeniero Electrónico.

Máster en Ingeniería en Telecomunicaciones.

Doctor en Ingeniería de Sistemas Electrónicos.

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

2025© Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

MERCEDES KATHERINE CEVALLOS GONZÁLEZ.

Evaluación en laboratorio de un sistema de transmisión inalámbrica basado en la modulación Orthogonal Time Frequency Space (otfs), implementado en software Defined Radio (sdr).

Dedicatoria

A Dios, por darme la fuerza, inteligencia y la paciencia para seguir adelante en este camino.

A mi esposo, por ser mi apoyo incondicional, por animarme siempre y estar a mi lado en cada momento.

A mis padres, por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo y por impulsarme a alcanzar mis metas.

Este logro no es solo mio, es también de ustedes, porque sin su amor y apoyo, nada de esto habría sido posible. ¡Los amo muchísimo!

Agradecimientos

Quiero agradecer, en primer lugar, a Dios, por darme la fuerza y sabiduría para llegar hasta aquí. A mi esposo Jordy, el amor de mi vida, por su apoyo incondicional y por ser siempre mi motivación para seguir adelante. A mis padres, María Esther y Samuel, por impulsarme a crecer y nunca dejar de aprender.

También quiero expresar mi gratitud al Dr. Pául Chasi, por su paciencia y guía durante todo el proceso de esta tesis. Al Dr. Germán Arévalo, por sus enseñanzas y su apoyo para culminar este proyecto. Y al Dr. Fernando Guerrero, por su ayuda y por alentarme en el desarrollo de mi investigación.

A todos ustedes, gracias de corazón.

Índice General

Dedicatoria	III
Agradecimientos	IV
Índice General	v
Índice de Figuras	vii
Índice de Tablas	viii
Resumen	ix
Abstract	x
1. Introducción	1
1.1. Justificación	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
2. Marco Teórico	5
2.1. Comunicación Inalámbrica	5
2.2. Modulación en Comunicaciones Inalámbricas	6
2.3. Modulación OTFS (Orthogonal Time Frequency Space)	6
2.3.1. Ventajas de OTFS	7
2.3.2. Desafíos en la Implementación de OTFS	7
2.3.3. Aplicaciones y Avances Recientes en la Evaluación de OTFS	7
2.3.4. Criterios y Pruebas para la Evaluación de OTFS según el Estado del Arte	8

2.4. Evaluación Experimental de OTFS	8
3. Implementación y Evaluación Experimental	10
3.1. Configuración Experimental.....	10
3.1.1. Equipos Utilizados	10
3.1.2. Implementación del Sistema OTFS.....	11
3.1.3. Transmisión.....	12
3.1.4. Recepción.....	12
3.2. Parámetros de Configuración	12
3.3. Metodología de Pruebas para Evaluar el Desempeño de OTFS	13
3.3.1. Procedimiento de Medición	15
4. Análisis de Resultados	17
4.1. Condiciones del entorno de pruebas	17
4.2. Evaluación del BER en función de la ganancia de transmisión	18
4.2.1. Análisis de la ganancia del transmisor de 1 a 15 dB.....	18
4.2.2. Análisis de la ganancia del transmisor de 16 a 30 dB .	19
4.3. Evaluación del desfase en función de la ganancia de transmisión	21
4.3.1. Análisis del desfase en función de la ganancia en Tx de 1 a 15 dB	22
4.3.2. Análisis del desfase en función de la ganancia en Tx de 15 a 30dB.....	23
4.4. Calidad de constelación.....	24
4.5. Limitaciones de la Evaluación Experimental.....	28
4.6. Trabajos Futuros.....	29
5. Conclusiones y Recomendaciones	31

Índice de Figuras

3.1. Montaje experimental del sistema OTFS en laboratorio. Fuente: Elaboración propia.	11
3.2. Diagrama de bloques del sistema OTFS implementado Fuente: Jaramillo Pizarro [2023]	13
3.3. Conexión y sincronización de los dispositivos mediante el CDA-2990. Fuente: Elaboración propia.....	14
3.4. Configuración del transmisor en LabVIEW. Fuente: Elaboración propia.	15
4.1. BER vs Ganancia de transmisión de 1 a 15dB, Fuente: Elaboración propia.....	20
4.2. BER vs Ganancia de transmisión de 16 a 30dB, Fuente: Elaboración propia.....	21
4.3. Mapa de calor del desfase estimado en función de la ganancia de transmisión y distancia.....	25
4.4. Constelación con BER = 0.....	25
4.5. Desfase en un solo cuadrante, con BER = 0.....	26
4.6. Constelación con BER = 0.126754.....	26
4.7. Desfase ligeramente desplazado, con BER = 0.126754.....	27
4.8. Constelación con BER = 0.48016.....	27
4.9. Desfase disperso, con BER = 0.48016	28

Índice de Tablas

3.1. Valores base del sistema.....	13
4.1. Valores obtenidos de BER de distancia (1m a 5m) vs. ganancia en Tx (1 a 15).....	19
4.2. Valores obtenidos de BER de distancia (1m a 5m) vs. ganancia en Tx (16 a 30).....	21
4.3. Valor de Desfase en Distancia vs. Ganancia en Tx de 1 a 15dB	22
4.4. Desfase en Distancia vs. Ganancia en Tx de 15 a 30dB.....	24

Resumen

La evaluación en laboratorio de un sistema de transmisión inalámbrica basado en la modulación Orthogonal Time Frequency Space (OTFS), implementada mediante Software Defined Radio (SDR), es fundamental para analizar su desempeño y capacidades. OTFS se presenta como una técnica innovadora capaz de enfrentar los desafíos de las comunicaciones inalámbricas en escenarios de alta movilidad y variabilidad temporal, como en aplicaciones móviles y vehiculares. Al operar en el dominio tiempo-frecuencia, esta modulación mejora la eficiencia espectral y la resistencia a desvanecimientos.

La implementación en SDR proporciona una plataforma flexible que permite ajustes dinámicos en los parámetros de transmisión y recepción. Esto facilita la experimentación en entornos controlados, donde se pueden evaluar métricas clave como la tasa de error de bits (BER), la eficiencia espectral y la robustez del sistema ante condiciones adversas, como variaciones en el canal, interferencias y diferentes configuraciones de antena.

Además, el estudio aborda aspectos críticos como la complejidad computacional y los requisitos de procesamiento en tiempo real, proporcionando información valiosa para optimizar el diseño e implementación de sistemas OTFS. Los resultados obtenidos permiten comparar esta técnica con otras modulaciones utilizadas en comunicaciones inalámbricas actuales.

La evaluación experimental de OTFS implementada en SDR es esencial para validar su desempeño, viabilidad y potencial adopción en aplicaciones prácticas. Este trabajo contribuye al desarrollo de tecnologías inalámbricas avanzadas, impulsando la innovación en entornos de alta movilidad y condiciones desafiantes.

Palabras clave: Telecomunicaciones, Comunicación Inalámbrica, Modulación Orthogonal Time Frequency Space (OTFS), Radio Definido por Software (SDR), BER, desfase, calidad de constelación, evaluación experimental.

Abstract

The laboratory evaluation of a wireless transmission system based on Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) modulation, implemented by Software Defined Radio (SDR), is essential to analyze its performance and capabilities. OTFS is presented as an innovative technique capable of addressing the challenges of wireless communications in high mobility and time variability scenarios, such as mobile and vehicle applications. Operating in the time-frequency domain, this modulation improves spectral efficiency and fade resistance.

The SDR implementation provides a flexible platform that allows for dynamic adjustments in transmit and receive parameters. This facilitates experimentation in controlled environments, where key metrics such as bit error rate (BER), spectral efficiency and system robustness under adverse conditions such as channel variations can be evaluated, interference and different antenna configurations.

In addition, the study addresses critical aspects such as computational complexity and real-time processing requirements, providing valuable information to optimize OTFS design and implementation. The results obtained make it possible to compare this technique with other modulations used in current wireless communications.

The experimental evaluation of OTFS implemented in SDR is essential to validate its performance, feasibility and potential adoption in practical applications. This work contributes to the development of advanced wireless technologies, driving innovation in high mobility environments and challenging conditions.

Keywords: Telecommunications, Wireless Communication, Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) Modulation, Software Defined Radio (SDR), BER, phase offset, constellation quality, experimental evaluation.

Capítulo 1

Introducción

El crecimiento acelerado de las comunicaciones inalámbricas en los últimos años ha generado una demanda constante por soluciones más eficientes, confiables y adaptables a condiciones de canal cada vez más dinámicas [Hui et al. \[2023\]](#). Aplicaciones como la conectividad móvil de alta velocidad, las redes vehiculares y los sistemas de sensores distribuidos requieren tecnologías que puedan mantener un rendimiento robusto en entornos con alta movilidad y dispersión multipath.

En este contexto, la modulación Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) ha emergido como una técnica de transmisión avanzada diseñada específicamente para operar sobre canales de propagación variables. Su principal fortaleza radica en representar la información en el dominio de retardo-Doppler, permitiendo explotar de forma eficiente la diversidad del canal, incluso en presencia de efectos severos como el desvanecimiento rápido y las variaciones temporales [Murali and Chockalingam \[2018\]](#), [Jaradat et al. \[2019\]](#), [Zhang et al. \[2019\]](#). Estas características convierten a OTFS en una opción prometedora para escenarios inalámbricos exigentes, donde las técnicas convencionales muestran limitaciones de desempeño.

La implementación de OTFS sobre plataformas Software Defined Radio (SDR) representa una vía práctica para validar su rendimiento en condiciones reales. Estas plataformas ofrecen flexibilidad para ajustar parámetros del sistema, replicar distintos entornos de propagación y realizar pruebas controladas con precisión y reproducibilidad. En lugar de limitarse a simulaciones, el uso de SDR permite llevar a cabo una evaluación experimental directa, esencial para entender el comportamiento real del sistema [Das and Prasad \[2021\]](#).

El presente trabajo tiene como finalidad evaluar en laboratorio el

desempeño de un sistema de transmisión inalámbrica basado en modulación OTFS, implementado sobre SDR. La investigación se desarrolla en el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, como parte del proyecto de titulación “Desarrollo de un algoritmo de Modulación en Espacio, Tiempo y Frecuencia Ortogonal (OTFS) en un Software Defined Radio (SDR)” [Jaramillo Pizarro \[2023\]](#). A través de la definición de pruebas experimentales sustentadas en el estado del arte, se diseña un entorno de evaluación controlado que permite analizar parámetros clave como la tasa de error de bits (BER), la ganancia de transmisión y la distancia de propagación, manteniendo constante la ganancia de recepción.

Adicionalmente, se valida la estabilidad del sistema mediante análisis estadístico con múltiples repeticiones, identificando errores en la comunicación y determinando patrones de desempeño en distintas configuraciones experimentales. Este enfoque permite obtener información precisa sobre la robustez y eficiencia de OTFS en condiciones reales, aportando así conocimiento clave para su potencial aplicación en redes inalámbricas de nueva generación.

En suma, esta investigación constituye un aporte técnico relevante al estudio experimental de OTFS, ofreciendo resultados concretos sobre su comportamiento en laboratorio y sentando las bases para su evaluación futura en aplicaciones prácticas que demandan alta resiliencia, eficiencia espectral y adaptabilidad [Nauman et al. \[2023\]](#), [Wei et al. \[2023\]](#).

1.1. Justificación

evaluación práctica sigue siendo un área en desarrollo, especialmente en contextos controlados que permitan medir con precisión su rendimiento.

La caracterización de OTFS a través de métricas como la Tasa de Error de Bits (BER), considerando variaciones en la distancia de transmisión y la ganancia de salida, permite establecer su comportamiento frente a condiciones cambiantes del entorno. Esta aproximación experimental es esencial para identificar su robustez, detectar posibles limitaciones operativas y aportar datos concretos que complementen los estudios existentes en el estado del arte.

La implementación del sistema en una plataforma de Software Defined Radio (SDR) proporciona un entorno de pruebas versátil, donde es posible ajustar parámetros en tiempo real y replicar escenarios específicos de manera controlada. A través de esta infraestructura, se diseña un banco de pruebas

reproducibile y ajustable, que permite evaluar la respuesta del sistema OTFS bajo distintas configuraciones experimentales, más allá de lo que permiten las simulaciones tradicionales.

Este trabajo se desarrolla en el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, como parte del proyecto de titulación “Desarrollo de un algoritmo de Modulación en Espacio, Tiempo y Frecuencia Ortogonal (OTFS) en un Software Defined Radio (SDR)” [Jaramillo Pizarro \[2023\]](#). Mientras dicho proyecto se enfoca en la construcción del sistema y el diseño algorítmico, la presente investigación se orienta a su evaluación cuantitativa, centrada en la recopilación de datos reales y el análisis estadístico de sus resultados.

La validación experimental del sistema, basada en múltiples repeticiones y un análisis riguroso de los datos obtenidos, permite generar evidencia objetiva sobre la viabilidad de OTFS como tecnología para futuras redes inalámbricas. Ámbitos como las comunicaciones vehiculares, los entornos urbanos densos o las redes distribuidas de sensores pueden beneficiarse de la resiliencia y eficiencia de esta modulación bajo condiciones adversas [Thaj and Viterbo \[2019\]](#), [Zieliński et al. \[2024\]](#).

En este sentido, el presente estudio no solo busca comprobar el desempeño técnico de OTFS en SDR, sino también establecer un marco metodológico reproducible que sirva como referencia para futuras investigaciones en esta línea. Al aportar datos empíricos, se fortalece el conocimiento sobre esta técnica emergente y se sientan las bases para su aplicación en sistemas de comunicación que demandan mayor adaptabilidad y confiabilidad.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar en laboratorio el sistema de transmisión inalámbrica basado en la modulación Orthogonal Time Frequency Space (OTFS), implementado en Software Defined Radio (SDR).

1.2.2. Objetivos Específicos

- Definir con base en el estado del arte las pruebas necesarias para la evaluación de la modulación Orthogonal Time Frequency Space (OTFS).
- Diseñar un entorno de prueba en el laboratorio de telecomunicaciones

de la Universidad Politécnica Salesiana para la modulación OTFS, controlando los parámetros posibles, procurando precisión, control y reproducibilidad.

- Validar los resultados mediante un análisis estadístico, realizando múltiples repeticiones del experimento en laboratorio, identificando valores de error en la comunicación.

Este documento se encuentra organizado en cinco capítulos, distribuidos de la siguiente manera:

- En el **Capítulo 2** se realiza una revisión del estado del arte en comunicaciones inalámbricas, abordando los fundamentos de la modulación OTFS y su implementación sobre plataformas de radio definida por software (SDR).
- El **Capítulo 3** presenta el diseño experimental del sistema implementado, describiendo la arquitectura general, los parámetros técnicos empleados y el entorno de pruebas utilizado para la captura de datos.
- En el **Capítulo 4** se exponen los resultados obtenidos durante las pruebas experimentales realizadas en el laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana. Se analiza el comportamiento del sistema en función de métricas como la tasa de error de bit (BER) y el desfase estimado, considerando distintas configuraciones de distancia y ganancia de transmisión.
- Finalmente, el **Capítulo 5** presenta las principales conclusiones del estudio, así como recomendaciones técnicas para trabajos futuros que busquen optimizar o extender la implementación de sistemas OTFS sobre SDR.

Capítulo 2

Marco Teórico

Este capítulo presenta los fundamentos teóricos necesarios para comprender la implementación y evaluación experimental de un sistema inalámbrico basado en la modulación OTFS. Se abordan inicialmente los principios de la comunicación inalámbrica y los desafíos característicos de este tipo de sistemas. Luego, se analiza en detalle el esquema de modulación OTFS, sus ventajas operativas en entornos dinámicos y sus principales retos técnicos. Finalmente, se examina su aplicabilidad sobre plataformas de Software Defined Radio (SDR), así como los criterios experimentales que permiten su evaluación rigurosa en laboratorio, conforme al estado del arte.

2.1. Comunicación Inalámbrica

Las comunicaciones inalámbricas permiten la transmisión de información sin la necesidad de cables físicos, mediante el uso de ondas electromagnéticas [Zhou et al. \[2003\]](#). Estas tecnologías son fundamentales en sectores clave como telecomunicaciones, transporte, industria, salud y ciudades inteligentes.

Sin embargo, presentan desafíos técnicos que comprometen la calidad del enlace y la confiabilidad de la transmisión. Entre los problemas más relevantes, según [Meng and Lee \[2010\]](#), se destacan:

Interferencia electromagnética: La coexistencia de múltiples dispositivos en el espectro radioeléctrico genera interferencias que degradan la calidad de la señal y reducen el rendimiento del sistema.

Desvanecimiento y propagación: Fenómenos como la reflexión, la refracción y la difracción causan fluctuaciones en la intensidad de la señal,

provocando pérdidas significativas, especialmente en entornos urbanos o de alta movilidad.

Capacidad espectral limitada: El crecimiento acelerado de servicios inalámbricos y la disponibilidad finita del espectro exigen técnicas de gestión más eficientes, como el acceso dinámico al espectro y la radio cognitiva.

La evolución hacia tecnologías como 5G, 6G, el Internet de las Cosas (IoT) o las redes vehiculares ha impulsado el desarrollo de nuevos esquemas de modulación más robustos y eficientes. En este contexto, la modulación Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) surge como una opción prometedora al mejorar la confiabilidad en entornos móviles, mitigar los efectos del canal dispersivo y maximizar la eficiencia espectral [Karpovich et al. \[2023\]](#).

2.2. Modulación en Comunicaciones Inalámbricas

La modulación es el proceso mediante el cual se adapta una señal de información a una portadora para su transmisión eficiente a través del canal inalámbrico [Basar et al. \[2017\]](#). En entornos estáticos, técnicas convencionales ofrecen resultados aceptables; sin embargo, su desempeño disminuye drásticamente ante la presencia de movilidad, dispersión Doppler o canales con multitrayectoria.

La modulación OTFS se ha propuesto como una alternativa prometedora frente a estos desafíos, gracias a su operación en el dominio retardo-Doppler, que permite representar con mayor fidelidad la naturaleza dinámica del canal inalámbrico [Mi et al. \[2016\]](#), [Karpovich and Zielinski \[2023\]](#).

2.3. Modulación OTFS (Orthogonal Time Frequency Space)

OTFS es una técnica de modulación diseñada para maximizar la eficiencia y confiabilidad en entornos de alta movilidad. A diferencia de esquemas tradicionales que operan en el dominio tiempo-frecuencia, OTFS transforma la información al dominio retardo-Doppler, modelando el canal en función de dos parámetros físicos: el retardo de propagación y el desplazamiento Doppler [Xiao et al. \[2022\]](#), [Makino \[1979\]](#).

Esta representación proporciona una visión más estable del canal, facilitando una detección más robusta de los símbolos y mejorando el rendimiento bajo condiciones severas de propagación.

2.3. MODULACIÓN OTFS (ORTHOGONAL TIME FREQUENCY SPACE)7

2.3.1. Ventajas de OTFS

Según diversos estudios recientes [Karpovich et al. \[2023\]](#), [Das and Prasad \[2021\]](#), OTFS presenta ventajas técnicas significativas:

- **Mayor resistencia al desvanecimiento:** Aprovecha la diversidad del canal en el dominio retardo-Doppler, lo que reduce la sensibilidad al fading selectivo.
- **Mejor desempeño en escenarios de alta movilidad:** Su estructura mantiene la coherencia del canal, incluso en aplicaciones vehiculares o ferroviarias.
- **Alta eficiencia espectral:** Minimiza la interferencia intersimbólica, mejorando la utilización del ancho de banda disponible.
- **Compatibilidad con MIMO:** Se integra eficientemente con esquemas de múltiples antenas, aumentando la capacidad del sistema.

2.3.2. Desafíos en la Implementación de OTFS

Pese a sus beneficios, la implementación de OTFS presenta limitaciones técnicas relevantes, como lo menciona [Xiao et al. \[2022\]](#), [Das and Prasad \[2021\]](#):

Alta complejidad computacional: La transformación y procesamiento en el dominio retardo-Doppler requieren algoritmos sofisticados y una mayor capacidad de cómputo.

Falta de estandarización: Aún no ha sido adoptada en los principales estándares de telecomunicaciones, lo que limita su implementación a nivel comercial.

Costos de implementación: La evaluación experimental en plataformas SDR implica el uso de hardware especializado y herramientas de desarrollo avanzadas.

2.3.3. Aplicaciones y Avances Recientes en la Evaluación de OTFS

La modulación OTFS ha despertado interés en aplicaciones que requieren alta confiabilidad bajo condiciones de movilidad, como redes vehiculares, trenes de alta velocidad y sistemas industriales basados en IoT [R T \[2023\]](#). Su capacidad para mantener la estabilidad del enlace la posiciona como una opción viable para las futuras generaciones de redes inalámbricas.

Las evaluaciones experimentales se han llevado a cabo mediante plataformas SDR, como las USRP, en combinación con entornos de desarrollo como MATLAB. Estos ensayos permiten comparar su rendimiento con esquemas tradicionales como OFDM, destacando mejoras significativas en la tasa de error de bits (BER), eficiencia espectral y resistencia a la movilidad [Zieliński et al. \[2024\]](#).

2.3.4. Criterios y Pruebas para la Evaluación de OTFS según el Estado del Arte

Para evaluar experimentalmente el desempeño de la modulación OTFS, es fundamental definir criterios de prueba alineados con el estado del arte. La literatura especializada describe diversas metodologías orientadas a comparar su rendimiento con técnicas tradicionales y analizar su comportamiento en entornos adversos.

2.4. Evaluación Experimental de OTFS

La modulación OTFS ha sido objeto de múltiples investigaciones experimentales, especialmente en aplicaciones vehiculares, ferroviarias y sistemas industriales IoT, donde se requiere estabilidad del enlace bajo condiciones dinámicas [R T \[2023\]](#).

Estas evaluaciones se realizan frecuentemente mediante plataformas Software Defined Radio (SDR), como las USRP, en conjunto con entornos de simulación como MATLAB. Este enfoque permite contrastar el desempeño de OTFS frente a esquemas tradicionales bajo condiciones equivalentes [Zieliński et al. \[2024\]](#).

Métricas de Evaluación

Con base en el estado del arte, se emplean las siguientes métricas para evaluar el rendimiento de sistemas OTFS:

- **Tasa de error de bit (BER):** Refleja la calidad de la transmisión. Se mide en función de la relación señal a ruido (SNR), la distancia de transmisión y la ganancia de los radios [Karpovich et al. \[2023\]](#).
- **Relación señal a ruido (SNR):** Indicador clave del desempeño del enlace, especialmente en entornos de prueba controlados [Das and Prasad \[2021\]](#).

- **Dispersión en retardo y Doppler:** Evalúa el comportamiento del sistema frente a movilidad y multitrayectoria [Mi et al. \[2016\]](#).
- **Estimación de desfase:** Mide la coherencia de fase del canal, relevante para la correcta demodulación de los símbolos [Karpovich and Zielinski \[2023\]](#).

Condiciones Experimentales Típicas

Las investigaciones recientes han establecido escenarios de prueba que incluyen, como lo señala [Zieliński et al. \[2024\]](#):

- **Canales simulados y físicos:** Combinación de simulaciones controladas y transmisiones reales con SDR.
- **Entornos con movilidad:** Se incluyen escenarios dinámicos con movimiento relativo entre transmisor y receptor o simulación de efecto Doppler.
- **Condiciones con multitrayectoria:** Evaluación en ambientes NLOS (Non-Line-of-Sight) para analizar la tolerancia al desvanecimiento severo.

Diseño experimental sugerido

De acuerdo con las mejores prácticas observadas en la literatura, una evaluación rigurosa en laboratorio debe incluir:

1. **Medición de BER en función de la ganancia de transmisión y distancia**, con ganancia de recepción fija, para caracterizar la atenuación del canal.
2. **Estimación del desfase promedio**, como métrica complementaria para evaluar la coherencia temporal del sistema.
3. **Comparativa con OFDM**, bajo condiciones idénticas, para demostrar cuantitativamente las mejoras de OTFS.
4. **Implementación sobre SDR**, que permita replicabilidad, control de parámetros y emulación de escenarios reales.

Estos elementos conforman un marco riguroso, sistemático y replicable para evaluar experimentalmente la modulación OTFS, cumpliendo con las mejores prácticas establecidas en la literatura científica reciente.

Capítulo 3

Implementación y Evaluación Experimental

La implementación de sistemas de comunicación inalámbrica avanzados requiere no solo el dominio de las técnicas de modulación, sino también la capacidad de diseñar entornos de prueba controlados que permitan evaluar con precisión su comportamiento en condiciones realistas. Este capítulo presenta el diseño e implementación de un entorno experimental para la evaluación de la modulación Orthogonal Time Frequency Space (OTFS), orientado a garantizar precisión, control y reproducibilidad en el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana.

3.1. Configuración Experimental

La configuración experimental fue desarrollada para simular condiciones reales de transmisión inalámbrica dentro de un entorno controlado, asegurando sincronización, estabilidad temporal y fidelidad en la generación y recepción de señales OTFS. La Figura 3.1 muestra el montaje del entorno de pruebas empleado.

3.1.1. Equipos Utilizados

Los equipos fueron seleccionados por su compatibilidad con tecnologías SDR y su capacidad para operar en tiempo real con baja latencia. A continuación se describen los principales componentes utilizados:

- **USRP NI-2029:** Radios definidos por software empleados como transmisor (TX) y receptor (RX), que permiten generar y capturar



Figura 3.1: Montaje experimental del sistema OTFS en laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

señales de radiofrecuencia de forma flexible.

- **Antenas de banda estrecha:** Caracterizadas a 1.2 GHz, optimizadas para minimizar pérdidas y maximizar la relación señal/ruido.
- **Computadoras de procesamiento:** Dos computadoras independientes (TX y RX), con procesadores Intel Core i5 o superiores y 8 GB de RAM, para garantizar procesamiento en tiempo real.
- **CDA-2990 (Clock Distribution Accessory):** Módulo que distribuye una referencia de reloj común, asegurando sincronización temporal entre los USRP.
- **Cables coaxiales y Ethernet:** Utilizados para interconectar los equipos, asegurando integridad de señal y baja latencia.
- **Software LabVIEW 3.1:** Plataforma utilizada para implementar la modulación OTFS, controlar las pruebas y visualizar los resultados.

3.1.2. Implementación del Sistema OTFS

La arquitectura funcional del sistema se basa en una cadena de procesamiento que convierte datos digitales en señales de RF y viceversa, siguiendo la estructura propuesta por Jaramillo Pizarro [2023]. La Figura 3.2 presenta el diagrama general del sistema implementado.

3.1.3. Transmisión

1. **Generación de datos:** Se genera una secuencia binaria representativa del mensaje de prueba.
2. **Modulación PSK:** Conversión de bits a símbolos complejos.
3. **Inserción de pilotos:** Inclusión de símbolos de referencia para facilitar la ecualización.
4. **Transformaciones OTFS:**
 - ISFFT: Mapeo al dominio retardo-Doppler.
 - Transformada de Heisenberg: Conversión al dominio tiempo-frecuencia.
5. **Adición de prefijo cíclico (CP) y preámbulo:** Se agrega un código Barker de 31 bits para sincronización.

3.1.4. Recepción

1. **Sincronización:** Detección de tramas mediante correlación con el preámbulo.
2. **Transformada de Wigner:** Conversión al dominio retardo-Doppler.
3. **SFFT:** Recuperación de los símbolos modulados.
4. **Demodulación y decodificación:** Extracción de los bits originales.

3.2. Parámetros de Configuración

Los parámetros fueron seleccionados buscando un equilibrio entre eficiencia espectral, complejidad computacional y robustez frente a condiciones adversas. Estos valores fueron definidos siguiendo las recomendaciones de la titulación [Jaramillo Pizarro \[2023\]](#) para entornos controlados de laboratorio, como se detalla en la tabla 3.1.

3.3. METODOLOGÍA DE PRUEBAS PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DE OTFS13

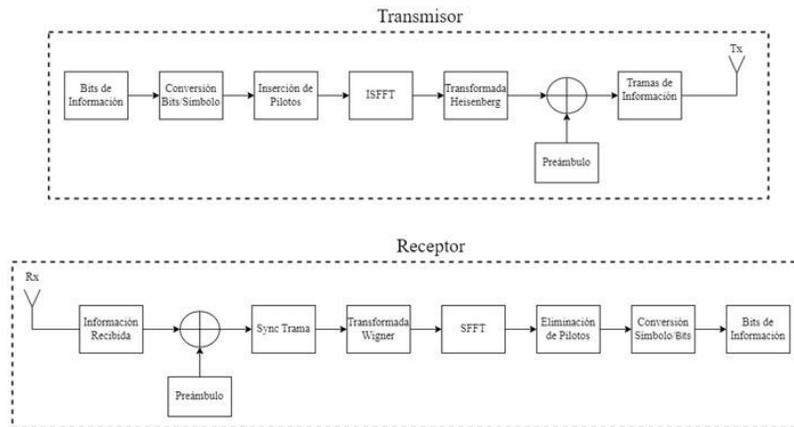


Figura 3.2: Diagrama de bloques del sistema OTFS implementado Fuente: Jaramillo Pizarro [2023]

Tabla 3.1: Valores base del sistema

Parámetro	Valor	Unidad
Ancho de banda	100	kHz
Frecuencia de muestreo	800	kHz
Número de portadoras	1024	–
Bloques de información	32	–
Número de pilotos	64	–
Muestras por portadora	8	–
Tiempo de guardia	0.001	ms

La frecuencia central de 1.2GHz fue seleccionada por su compatibilidad con las antenas empleadas y su buena propagación en entornos interiores. El ancho de banda de 100kHz permite una resolución Doppler adecuada, mientras que el sobremuestreo mejora la fidelidad del sistema. La conexión y sincronización entre dispositivos se muestra en la Figura 3.3.

3.3. Metodología de Pruebas para Evaluar el Desempeño de OTFS

Se diseñaron y ejecutaron pruebas para evaluar el rendimiento del sistema bajo diferentes condiciones de canal, considerando las siguientes métricas:

3.3. METODOLOGÍA DE PRUEBAS PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DE OTFS14

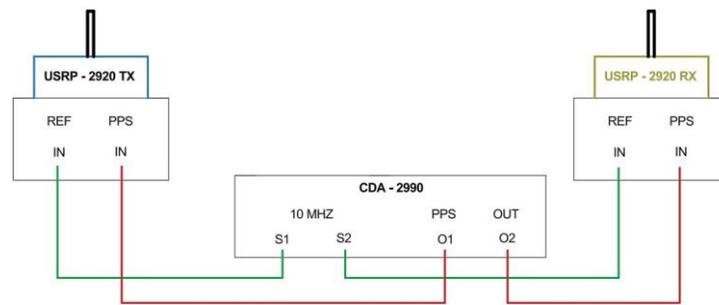


Figura 3.3: Conexión y sincronización de los dispositivos mediante el CDA-2990. Fuente: Elaboración propia.

- **Análisis de Constelación:** Evaluación visual de la dispersión de los símbolos modulados para inferir el impacto del canal sobre la señal.
- **Cálculo de la Tasa de Error de Bits (BER):** Medición de la proporción de bits erróneos en función de la SNR, la distancia y la ganancia de transmisión.
- **Evaluación de la Relación Señal-Ruido (SNR):** Determinación de la calidad de la señal a distintas potencias de transmisión para analizar la robustez del sistema.
- **Análisis de Eficiencia Espectral:** Cálculo de los bits transmitidos por Hz (bps/Hz) como métrica de eficiencia comparativa frente a otros esquemas de modulación.
- **Pruebas bajo Efecto Doppler:** Simulación de velocidades relativas entre TX y RX para observar el comportamiento de la BER ante dispersión Doppler.
- **Robustez ante Interferencia:** Introducción de ruido aditivo blanco para evaluar la capacidad del sistema frente a canales degradados.

Estas pruebas proporcionan una caracterización integral del sistema OTFS en condiciones controladas de laboratorio, estableciendo una base sólida para evaluar su viabilidad en aplicaciones emergentes como redes 5G/6G, sistemas vehiculares e IoT en movimiento.

3.3. METODOLOGÍA DE PRUEBAS PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DE OTFS15

3.3.1. Procedimiento de Medición

El procedimiento experimental consistió en la transmisión de datos bajo distintas condiciones de ganancia, distancia y presencia de ruido, como se ilustra en la Figura 3.4. Se buscó evaluar el desempeño en términos de BER, SNR y estabilidad de la constelación.

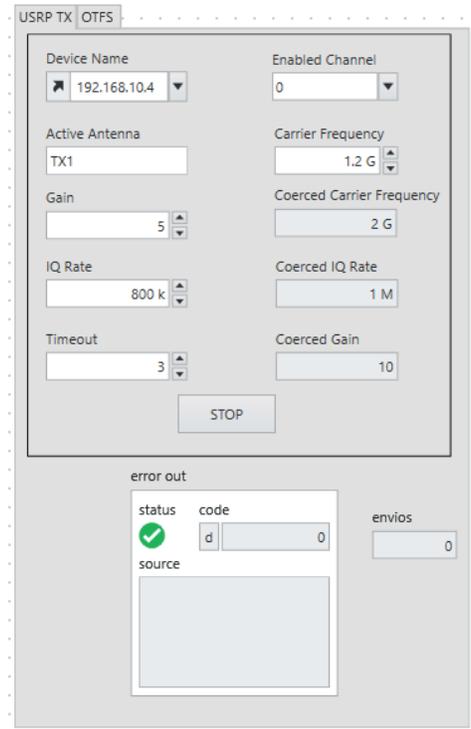


Figura 3.4: Configuración del transmisor en LabVIEW. Fuente: Elaboración propia.

Se fijó una ganancia de transmisión de 30 dB para garantizar recepción adecuada sin saturación. El tiempo de espera fue de 3 s, adecuado a la capacidad del equipo receptor. Se definió un tiempo de guardia de 0.001 ms para mitigar trayectorias multitrayecto.

Transmisión de datos: Se empleó el discurso “Mi credo” de Albert Einstein, convertido a código ASCII y luego a una secuencia binaria de 80,984 bits, segmentada en tramas OTFS. Se insertó un símbolo piloto cada 15 símbolos útiles para facilitar la equalización.

Recepción de datos: La señal fue procesada mediante el siguiente

3.3. METODOLOGÍA DE PRUEBAS PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DE OTFS16

procedimiento:

1. Sincronización de tramas mediante correlación con el preámbulo (código Barker de 31 bits).
2. Eliminación de símbolos piloto y extracción de datos útiles.
3. Demodulación PSK y decodificación de la secuencia binaria original.

Capítulo 4

Análisis de Resultados

Este capítulo presenta los resultados obtenidos durante la evaluación experimental de un sistema de transmisión inalámbrica basado en la modulación Orthogonal Time Frequency Space (OTFS), implementado mediante Software Defined Radio (SDR). Esta etapa tuvo como objetivo validar el comportamiento del sistema en condiciones reales de laboratorio, a través de un análisis estadístico con múltiples repeticiones por configuración, procurando identificar el impacto de los parámetros de transmisión sobre el desempeño del sistema. En particular, se analizó la tasa de error de bit (BER) y el desfase estimado en la recepción, variando dos parámetros clave: la ganancia del transmisor (Tx) y la distancia entre los equipos. La ganancia de recepción se mantuvo fija en 15 dB, siguiendo lo estipulado en la documentación técnica de los dispositivos USRP empleados.

4.1. Condiciones del entorno de pruebas

Las pruebas se desarrollaron en el Laboratorio de Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca. El entorno presentaba condiciones típicas de propagación en interiores, con presencia de obstáculos, superficies reflectantes y fuentes potenciales de interferencia electromagnética. Se diseñó un entorno controlado, en el que se mantuvo constante la configuración de modulación, codificación y sincronización, modificando únicamente la ganancia de transmisión y la distancia entre los equipos, en un rango de 1 a 30 dB (Tx) y de 1 a 5 metros (distancia), respectivamente. Para cada combinación de parámetros, se realizaron múltiples mediciones con el fin de obtener promedios representativos y detectar la presencia de valores atípicos.

4.2. Evaluación del BER en función de la ganancia de transmisión

El análisis de la tasa de error de bit (BER) se presenta a continuación en función de la ganancia del transmisor, para cada distancia fija entre 1 y 5 metros. Se incluyen tanto las observaciones cualitativas como los patrones detectados a partir de los datos reales.

4.2.1. Análisis de la ganancia del transmisor de 1 a 15 dB

La Tabla 4.1 presenta los mejores valores de BER registrados para diferentes distancias (1 m a 5 m) y niveles de ganancia en el transmisor (1 a 15 dB). A partir de los datos recopilados, se destacan los siguientes aspectos:

- A distancias menores (1m y 2m), el sistema muestra un rendimiento óptimo a distancias más cortas, con valores de BER cercanos a 0.001. Esto indica que el sistema mantiene una calidad de señal muy alta en rangos cercanos al transmisor, lo que puede explicarse por la menor atenuación de la señal y la mayor relación señal-ruido (SNR) en estos casos.
- A medida que la distancia aumenta (3m a 5m), se observa una mayor variabilidad en los valores de BER. Esto puede deberse a la pérdida de señal por propagación, así como a los efectos de interferencias y reflexiones dentro del entorno de prueba. En particular, a distancias de 5m, se alcanzan valores más altos de BER, lo que sugiere que la señal experimenta una mayor atenuación, afectando negativamente la calidad de la comunicación.
- Con una ganancia de 13 dB, el sistema mantiene un rendimiento eficiente, con BER consistentemente bajos, lo que sugiere que esta ganancia ofrece un equilibrio adecuado entre la mejora de la señal y la capacidad de mantener una transmisión robusta. Sin embargo, a distancias mayores, incluso con una ganancia de 13 dB, la calidad de la señal comienza a disminuir, especialmente en el caso de la distancia de 5 metros.
- Se observa la presencia de algunos valores atípicos, como se ve en algunas entradas de la tabla. Estos pueden estar relacionados con

4.2. EVALUACIÓN DEL BER EN FUNCIÓN DE LA GANANCIA DE TRANSMISIÓN¹⁹

fenómenos de interferencia en el entorno del laboratorio, tales como el rebote de señales o la interferencia de otros dispositivos.

El análisis sugiere que, a distancias más cortas, el sistema presenta un rendimiento mucho mejor, y que la ganancia de transmisión tiene un papel importante en la optimización de la calidad de la señal, aunque su impacto se ve limitado por los efectos de propagación a distancias más largas.

Tabla 4.1: Valores obtenidos de BER de distancia (1m a 5m) vs. ganancia en Tx (1 a 15)

		Ganancia Tx														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Distancia	1m	0,0298	0,4650	0,0000	0,0116	0,0037	0,4648	0,0233	0,0000	0,4633	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	2m	0,4647	0,0000	0,0000	0,0000	0,0044	0,1731	0,0000	0,0000	0,1714	0,0036	0,0000	0,0000	0,0007	0,4627	0,1933
	3m	0,4637	0,4641	0,0135	0,4635	0,4640	0,0001	0,4571	0,0147	0,0902	0,1106	0,2809	0,0000	0,0000	0,0000	0,0012
	4m	0,1115	0,0000	0,4654	0,4640	0,0000	0,1041	0,0022	0,0000	0,4519	0,0000	0,0036	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001
	5m	0,0102	0,0000	0,0003	0,4519	0,0563	0,0343	0,4519	0,0007	0,0012	0,4656	0,0136	0,4519	0,0001	0,0000	0,0000

Como se observa en la figura 4.1 se evidencian diferencias claras entre las curvas de BER correspondientes a cada distancia, lo que indica una fuerte dependencia del desempeño respecto a la separación entre transmisor y receptor en esta franja de ganancia. Este comportamiento también sugiere que el sistema no logra compensar eficazmente los efectos del canal en condiciones de bajo nivel de señal, lo cual es consistente con lo esperado para un entorno con dispersión significativa y SNR reducido. Se confirma que el sistema OTFS, en este caso particular, opera en una zona no lineal y poco eficiente del canal, donde pequeñas variaciones en potencia o distancia pueden generar impactos significativos en el rendimiento. Esto refuerza la necesidad de establecer una potencia mínima de transmisión que garantice robustez frente a las variaciones del canal y permita aprovechar las ventajas de la modulación OTFS en escenarios reales.

4.2.2. Análisis de la ganancia del transmisor de 16 a 30 dB

En la Tabla 4.2 se presentan los valores de BER a mayores niveles de ganancia de transmisión, con Tx ajustada de 16 dB a 30 dB. Los siguientes puntos son relevantes:

- En general, a medida que se aumenta la ganancia de transmisión, se observa una mejora el BER a distancias más largas. Esto es especialmente evidente a distancias de 5 metros, donde la señal experimenta una atenuación considerable debido a la propagación.

4.2. EVALUACIÓN DEL BER EN FUNCIÓN DE LA GANANCIA DE TRANSMISIÓN²⁰

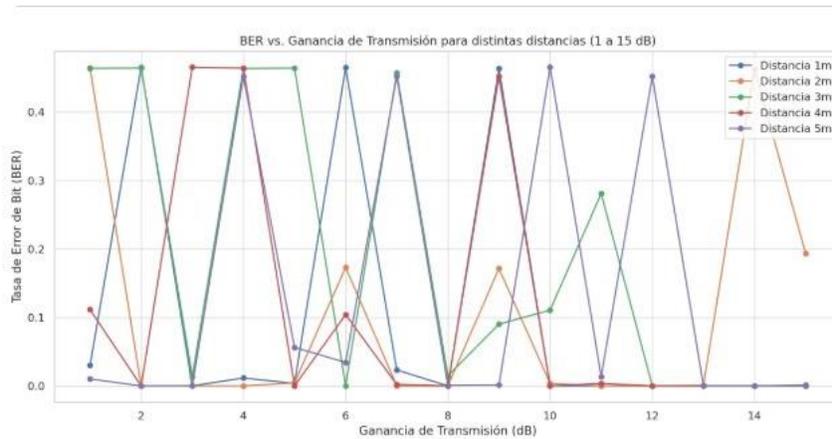


Figura 4.1: BER vs Ganancia de transmisión de 1 a 15dB, Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, incluso a estas distancias, el aumento en la ganancia de transmisión permite mantener el BER en niveles aceptables, evidenciando la importancia de ajustar adecuadamente este parámetro.

- A distancias intermedias (como 3m y 4m), el aumento en la ganancia de transmisión también mejora el rendimiento, pero la variabilidad del BER sigue siendo significativa, especialmente en configuraciones de Tx bajas. Los valores de BER más estables se logran con una ganancia de 25 dB a 30 dB, lo que resalta la capacidad de esta configuración para contrarrestar las pérdidas por propagación y mantener una señal confiable.
- Aunque el aumento de la ganancia de transmisión mejora el rendimiento, los efectos de la interferencia y las pérdidas de propagación continúan afectando el sistema, como se evidencia en algunos de los valores más altos de BER incluso con altas ganancias. Esto subraya la complejidad del entorno radioeléctrico y la necesidad de considerar múltiples factores, más allá de la ganancia de transmisión, para optimizar el rendimiento del sistema.

4.3. EVALUACIÓN DEL DESFASE EN FUNCIÓN DE LA GANANCIA DE TRANSMISIÓN²¹

Tabla 4.2: Valores obtenidos de BER de distancia (1m a 5m) vs. ganancia en Tx (16 a 30)

		Ganancia Tx														
		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Distancia	1m	0,0194	0,0000	0,0000	0,0006	0,4570	0,1268	0,0000	0,4754	0,4754	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0017	0,4643
	2m	0,0000	0,0000	0,4647	0,4633	0,0000	0,2117	0,4545	0,1204	0,0038	0,4519	0,0000	0,0000	0,0000	0,4638	0,0000
	3m	0,0830	0,1980	0,0000	0,2938	0,0344	0,2110	0,0000	0,0004	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,4519	0,0112	0,4639
	4m	0,0000	0,0000	0,4672	0,0000	0,0001	0,1045	0,0013	0,0002	0,4607	0,0000	0,4519	0,0631	0,4648	0,4611	0,1914
	5m	0,4639	0,4679	0,0575	0,0012	0,2196	0,0011	0,1951	0,0000	0,0019	0,0000	0,0000	0,0000	0,1453	0,0000	0,0000

En la figura 4.2 se evidencia que el sistema OTFS muestra una transición clara hacia un régimen de operación más estable y eficiente, caracterizado por una disminución significativa en la tasa de error de bit (BER) a medida que aumenta la potencia de transmisión. Este comportamiento es coherente con el incremento progresivo de la relación señal a ruido (SNR), que permite una detección más precisa de los símbolos y una mejor estimación del canal.

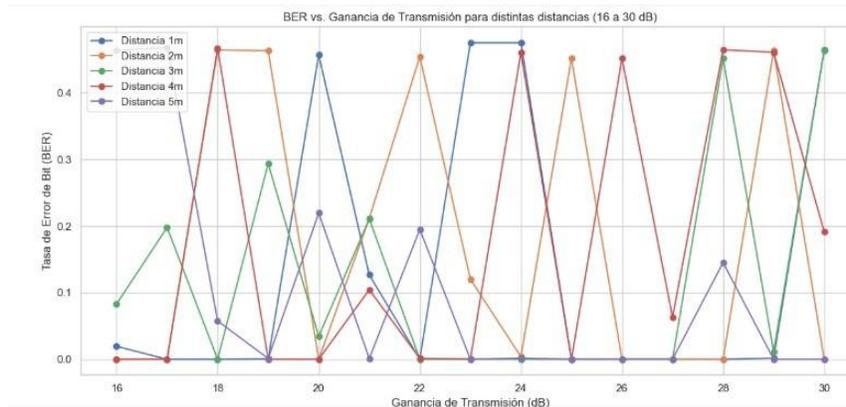


Figura 4.2: BER vs Ganancia de transmisión de 16 a 30dB, Fuente: Elaboración propia

4.3. Evaluación del desfase en función de la ganancia de transmisión

En esta sección se presentan los valores de desfase estimado obtenidos experimentalmente, organizados según las combinaciones de distancia (de 1 a 5 metros) y ganancia de transmisión (Tx) desde 1 hasta 30 dB. Aunque el desfase no representa directamente el índice de errores de bit (BER), sus variaciones permiten inferir posibles inestabilidades en la estimación del

4.3. EVALUACIÓN DEL DESFASE EN FUNCIÓN DE LA GANANCIA DE TRANSMISIÓN 22

canal, lo cual puede incidir directamente en errores de decodificación y, por ende, en un BER más elevado.

Para una mejor visualización, los datos se agrupan en dos tablas: la primera corresponde a ganancias de transmisión entre 1 y 15 dB, y la segunda abarca el rango de 16 a 30 dB. En ambos casos, se mantiene constante la ganancia de recepción en 15 dB.

4.3.1. Análisis del desfase en función de la ganancia en Tx de 1 a 15 dB

El análisis de los valores de desfase en función de la ganancia de transmisión muestra una notable variabilidad con respecto a las distancias evaluadas (de 1 a 5 metros). En general, se observa que los valores de desfase no siguen una tendencia completamente lineal, sino que presentan fluctuaciones significativas a medida que varía la ganancia de transmisión (de 1 a 15 dB), incluso cuando la ganancia de recepción se mantiene constante en 15 dB.

A lo largo de todas las distancias, se identifican tanto valores negativos como positivos de desfase, lo que indica la presencia de efectos de interferencia, propagación compleja y posibles distorsiones en el sistema de comunicación. La distribución de estos valores es impredecible en ciertas gamas de ganancia de transmisión, sugiriendo que factores como la distorsión no lineal y las características del entorno influyen considerablemente en el desfase observado.

En general, el comportamiento del desfase en función de la ganancia de transmisión y la distancia sugiere que la relación entre estos dos factores es compleja y no está completamente determinada por la distancia o la ganancia de transmisión de manera independiente. La presencia de valores tanto negativos como positivos en diferentes puntos de medición, junto con las variaciones observadas, apunta a la existencia de fenómenos que no pueden explicarse únicamente con un modelo simple, y es necesario considerar factores adicionales en la interpretación de estos resultados.

Tabla 4.3: Valor de Desfase en Distancia vs. Ganancia en Tx de 1 a 15dB

		Ganancia Tx														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Distancia	1m	-15,297	-39,193	89,731	-74,704	-75,032	87,335	-76,438	-82,301	-42,819	-60,959	-85,689	-82,072	87,928	87,651	-83,415
	2m	-37,908	-38,448	-33,139	-40,290	-27,607	-67,185	-49,649	40,886	65,969	57,425	45,013	40,842	55,990	56,949	64,266
	3m	-42,225	-37,182	-26,216	-31,022	-33,027	-61,293	-77,334	-64,297	-72,938	-21,392	-66,829	-35,192	-55,599	-41,208	-80,239
	4m	20,233	-1,473	-1,908	-2,797	-85,323	-64,372	-37,281	-50,788	-50,092	-55,761	-61,140	-51,077	-38,710	-47,943	-53,393
	5m	-48,179	-88,105	-75,879	-64,833	-74,010	-73,649	-56,190	-74,824	-72,849	-45,168	-39,695	65,814	-52,194	-35,628	-49,322

4.3.2. Análisis del desfase en función de la ganancia en Tx de 15 a 30dB

La tabla 4.4 se muestra la estimación de desfase obtenida en un sistema de transmisión OTFS evaluado experimentalmente, considerando variaciones de distancia entre transmisor y receptor (de 1 a 5 metros) y niveles de ganancia en transmisión (Tx) desde 16 dB hasta 30 dB. Todos los datos se obtuvieron manteniendo constante la ganancia de recepción (Rx) en 15 dB.

En general, se observa una alta variabilidad en los valores de desfase estimado, lo cual refleja la sensibilidad del sistema OTFS a las condiciones del canal radioeléctrico y al nivel de potencia de transmisión. Esta variabilidad no sigue una progresión estrictamente lineal ni con la ganancia ni con la distancia, lo que sugiere la influencia de efectos complejos como la dispersión en tiempo y frecuencia, interferencias multi-trayectoria y fluctuaciones en la sincronización.

Para distancias cortas, los valores de desfase tienden a ser más controlados y, en algunos casos, se aproximan a valores cercanos a cero. Sin embargo, incluso en condiciones cercanas, se aprecian picos y caídas abruptas del desfase, especialmente a bajas ganancias de transmisión, lo cual podría deberse a una sincronización deficiente en presencia de señales de baja relación señal-ruido (SNR).

A medida que se incrementa la distancia, la dispersión de los valores de desfase se amplifica considerablemente, evidenciando una menor estabilidad del canal. En este contexto, la ganancia de transmisión no siempre compensa completamente el efecto del alejamiento físico, ya que se presentan tanto valores extremos positivos como negativos del desfase, en algunos casos superando los ± 80 unidades. Estas variaciones pueden estar asociadas a cambios bruscos en la fase de la señal recibida, atribuibles a trayectorias reflejadas o interferencias destructivas propias de entornos con múltiples rebotes o condiciones no ideales de laboratorio.

Se identifican asimismo algunos valores atípicos, tanto positivos como negativos, que podrían ser indicativos de eventos de pérdida de sincronización momentánea o de errores en la estimación de canal, especialmente cuando las combinaciones de distancia y ganancia alcanzan niveles donde la SNR cae por debajo del umbral operativo del sistema.

En resumen, la tabla evidencia una fuerte dependencia del desfase estimado respecto de los parámetros de distancia y ganancia de transmisión. Las oscilaciones y signos opuestos del desfase en combinaciones adyacentes de parámetros reflejan la complejidad del entorno radioeléctrico y resaltan la necesidad de mecanismos robustos de estimación y compensación de

desfase en sistemas OTFS, particularmente bajo condiciones dinámicas o no controladas.

Tabla 4.4: Desfase en Distancia vs. Ganancia en Tx de 15 a 30dB

		Ganancia Tx														
		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Distancia	1m	-77,244	55,738	-46,111	30,214	18,184	19,490	3,722	5,185	18,577	6,847	-0,477	5,975	-5,990	18,422	8,500
	2m	-49,392	-57,378	-44,034	-46,153	-37,126	-23,874	-28,639	-24,505	-27,135	-27,073	-41,228	-43,237	-35,564	-40,412	-41,576
	3m	-64,375	-70,910	82,306	-68,531	30,230	67,864	76,811	-74,101	-82,842	77,765	-82,061	-86,419	73,206	67,773	-85,755
	4m	59,297	88,112	78,296	-87,129	74,407	65,341	56,619	61,636	67,775	-87,496	73,376	65,368	-86,564	-76,173	71,230
	5m	-67,595	-68,420	-72,116	-71,807	-66,539	-76,400	-72,244	-54,385	-32,162	-36,072	-37,029	-51,226	-53,464	81,332	79,699

Para complementar la interpretación de los valores de desfase estimado obtenidos experimentalmente, se ha generado un mapa de calor, como se observa en la figura 4.3 que permite visualizar de forma intuitiva la evolución del desfase en función de dos variables clave: la ganancia de transmisión (Tx) y la distancia de separación entre los nodos transmisor y receptor. Esta representación facilita la identificación de patrones de comportamiento, zonas críticas y posibles anomalías.

En el gráfico, los valores de desfase se codifican cromáticamente, de manera que las zonas con desfases más altos se representan con colores cálidos (rojos y anaranjados), mientras que los desfases más bajos aparecen en tonos fríos (azules y verdes). Esta distribución visual revela, por ejemplo, que a distancias cortas y con bajas ganancias de transmisión el desfase tiende a mantenerse bajo, mientras que a medida que aumenta la distancia, incluso con incrementos en la potencia de Tx, el desfase presenta mayores fluctuaciones.

El mapa también permite detectar posibles irregularidades o valores atípicos, como los observados en ciertos puntos aislados de ganancia alta y distancia media, donde se presentan variaciones abruptas que podrían estar asociadas a condiciones de canal no controladas, reflexiones o interferencias. Este tipo de representación resulta útil no solo para el análisis puntual de los datos, sino también como herramienta de diagnóstico para optimizar la configuración del sistema OTFS en condiciones reales.

4.4. Calidad de constelación

El análisis de la calidad de la constelación y el desfase es crucial para comprender el desempeño del sistema bajo distintas condiciones. A continuación, se presentan tres escenarios representativos que describen la relación entre la constelación, el desfase y la potencia.

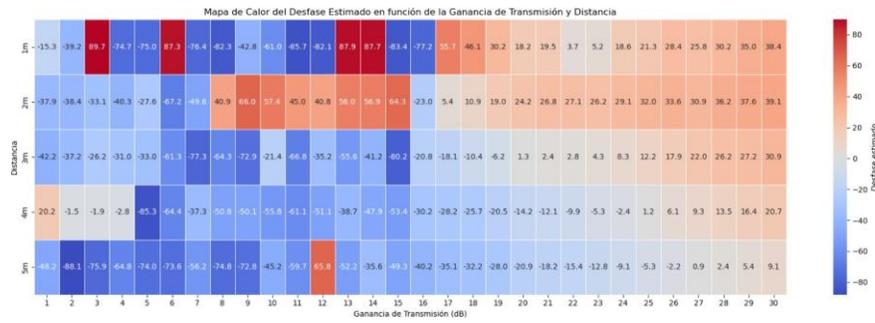


Figura 4.3: Mapa de calor del desfase estimado en función de la ganancia de transmisión y distancia

Constelación y desfase correctos

En el primer escenario, tanto la constelación como la gráfica del desfase muestran una sincronización perfecta, con puntos claramente definidos dentro de los cuadrantes. Este caso refleja una correcta modulación y sincronización, lo cual da como resultado una BER (Bit Error Rate) prácticamente nula:

$$BER \leq 0,001$$

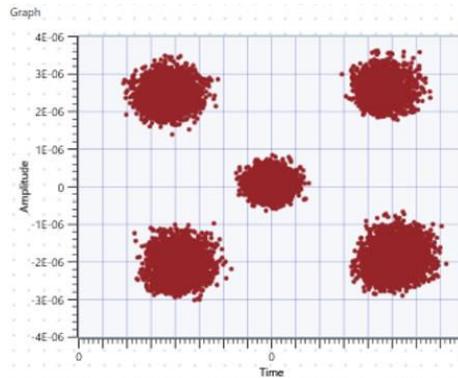


Figura 4.4: Constelación con BER = 0

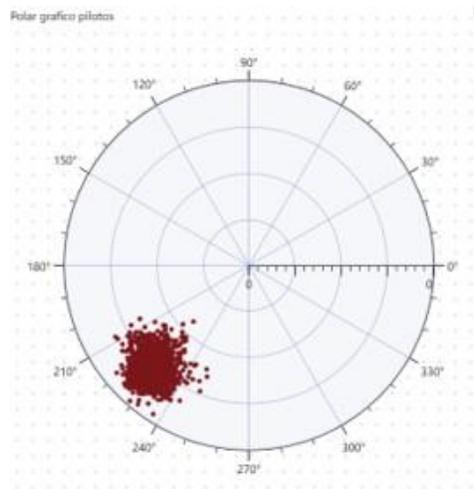


Figura 4.5: Desfase en un solo cuadrante, con $BER = 0$

Constelación correcta y desfase incorrecto

En este escenario, la constelación mantiene su estructura dentro de los cuadrantes, lo cual indica una modulación estable. No obstante, el desfase muestra una ligera desalineación, reflejando errores de sincronización que incrementan la BER, aunque no de forma crítica:

$$0,001 < BER \leq 0,13$$

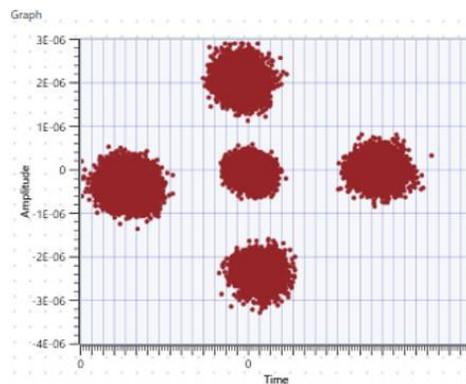


Figura 4.6: Constelación con $BER = 0.126754$

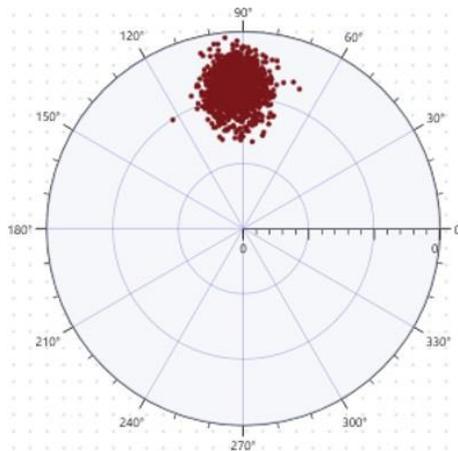


Figura 4.7: Desfase ligeramente desplazado, con BER = 0.126754

Constelación y desfase incorrectos

Aquí se observa una constelación desordenada y una gráfica de desfase completamente dispersa, evidenciando un escenario degradado con pérdida significativa de información. La BER supera el umbral de tolerancia:

$$BER \geq 0,2$$

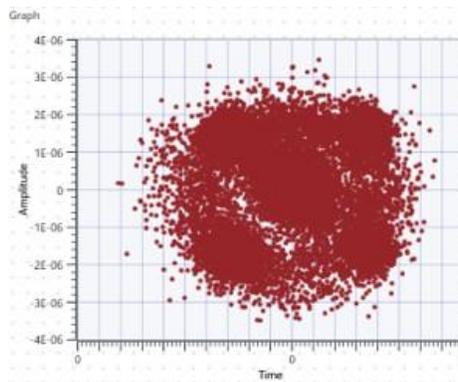


Figura 4.8: Constelación con BER = 0.48016

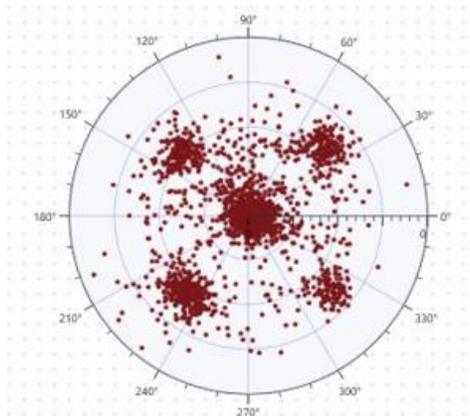


Figura 4.9: Desfase disperso, con BER = 0.48016

4.5. Limitaciones de la Evaluación Experimental

Durante el desarrollo del entorno de pruebas y la ejecución de los ensayos experimentales, surgieron ciertas limitaciones que impidieron la implementación de algunas pruebas propuestas en el marco teórico. Aunque el diseño experimental se estructuró con base en un enfoque integral, que incluía aspectos como movilidad, entornos NLOS, evaluación de SNR y comparaciones con esquemas de modulación convencionales, no fue posible llevar a cabo todas estas pruebas debido a factores logísticos, técnicos y de infraestructura del laboratorio.

En primer lugar, las pruebas relacionadas con movilidad —orientadas a observar el desempeño del sistema OTFS en presencia de desplazamiento físico del transmisor o receptor— no se ejecutaron por falta de espacio físico suficiente y de elementos móviles adecuados dentro del laboratorio. Además, el entorno presentó niveles significativos de interferencia electromagnética provenientes de otros equipos en operación, lo que limitó aún más la posibilidad de obtener mediciones representativas y controladas bajo condiciones de movilidad.

Por otro lado, la comparación con técnicas convencionales como QPSK o OFDM bajo condiciones de canal equivalentes fue descartada en esta etapa, principalmente porque el presente trabajo se centró exclusivamente en la implementación y evaluación de OTFS. Dado que no se desarrolló ni incluyó en el sistema un esquema alternativo de modulación para referencia, dicha comparación habría carecido de la base técnica necesaria para ser justa y

significativa.

Asimismo, la evaluación del desempeño en entornos NLOS (Non Line of Sight) no se realizó debido a las limitaciones estructurales del laboratorio. A pesar de que la propagación multipath es un fenómeno crítico para el análisis de sistemas OTFS, replicar un entorno NLOS de manera controlada requiere acondicionamiento físico del espacio y materiales de bloqueo que no se encontraban disponibles.

Finalmente, la medición de la relación señal a ruido (SNR), indicador clave en la caracterización de canales de comunicación, no pudo incorporarse al análisis debido a una limitación técnica del entorno de desarrollo en LabVIEW. El bloque funcional que permite la estimación automática de SNR no estaba disponible en la versión instalada, y su implementación manual requería una reconfiguración extensa del flujo de procesamiento, que excedía el alcance y tiempo disponible para el presente trabajo.

A pesar de estas limitaciones, los resultados obtenidos permiten validar el desempeño del sistema OTFS bajo condiciones de canal realistas, evaluando aspectos fundamentales como la tasa de error de bit (BER) y la estimación de desfase en condiciones line-of-sight (LOS) y con parámetros controlados. Las pruebas no ejecutadas se consideran parte de futuras líneas de trabajo, que permitirán expandir el análisis hacia un entorno de evaluación más amplio y representativo.

4.6. Trabajos Futuros

Los resultados presentados en este capítulo proporcionan una base sólida para futuras investigaciones en sistemas OTFS implementados sobre plataformas SDR. No obstante, se identifican diversas oportunidades de mejora y extensión del entorno experimental, las cuales permitirán un análisis más completo y cercano a escenarios reales de comunicación inalámbrica. A continuación, se describen las principales líneas de trabajo propuestas:

- **Eliminación del componente CDA:** Evaluar el sistema sin el uso del Clock Distribution Accessory (CDA) permitiría analizar escenarios más realistas, donde los dispositivos operan con sus propios relojes internos, introduciendo asincronías temporales propias de entornos reales de comunicación.
- **Evaluación bajo movilidad:** Incorporar movimiento entre los nodos para estudiar el impacto del efecto Doppler en la sincronización y el BER.

- **Entornos sin interferencia:** Realizar pruebas en cámaras anecoicas o ambientes electromagnéticamente aislados para eliminar fuentes de ruido externas y mejorar la precisión de las mediciones.
- **Ampliación de parámetros:** Incluir más repeticiones y combinaciones de parámetros (distancia, ganancia, frecuencia), lo cual permitirá análisis estadísticos más robustos.
- **Comparación con otras modulaciones:** Ampliar el estudio a esquemas como OFDM, GFDM o FBMC para contrastar el desempeño frente a OTFS bajo iguales condiciones.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

La implementación y evaluación experimental de un sistema de transmisión inalámbrica basado en la modulación Orthogonal Time Frequency Space (OTFS), utilizando plataformas de *Software Defined Radio* (SDR), ha permitido obtener resultados relevantes sobre su desempeño en un entorno controlado de laboratorio. A partir del análisis detallado de las pruebas realizadas, se presentan las siguientes conclusiones:

- Se evidenció que la tasa de error de bit (BER) disminuye significativamente a medida que se incrementa la ganancia de transmisión (T_x). En distancias cercanas (1 y 2 metros), el BER fue mínimo incluso para valores bajos de ganancia ($T_x = 10$ dB), mientras que a 5 metros se requirieron niveles superiores a 25 dB para lograr una transmisión confiable. Esto confirma la relación directa entre la potencia de la señal transmitida y la integridad de los datos recibidos, especialmente en entornos con pérdidas de trayectoria y dispersión temporal.
- La distancia de transmisión tuvo un impacto notable sobre la calidad de la señal. Se observó un incremento sostenido del BER conforme la separación entre los nodos aumentaba de 1 a 5 metros. Este efecto es atribuible a la atenuación de la señal y al mayor grado de distorsión introducida por el canal, lo que reafirma la necesidad de ajustar

dinámicamente los parámetros del sistema OTFS en función de la distancia y las condiciones del entorno.

- El análisis del desfase entre la señal transmitida y la recibida reveló rotaciones de fase importantes, particularmente a mayores distancias y bajos niveles de ganancia. Estas rotaciones, que alcanzaron valores medios superiores a 80° en condiciones desfavorables, afectan la correcta demodulación de los símbolos, y son indicativas de la sensibilidad del sistema a efectos de retardo y variaciones Doppler. Su compensación precisa es fundamental para mantener una baja BER.
- Se detectó que los errores de transmisión tienden a concentrarse en símbolos que se ubican en cuadrantes opuestos de la constelación. Este patrón sugiere la existencia de desplazamientos significativos en la fase, provocando decisiones erróneas del demodulador y afectando especialmente aquellos puntos cercanos a los ejes de transición entre cuadrantes.
- La arquitectura OTFS demostró ser efectiva para canalizar información en entornos dispersivos, aprovechando su estructura en el dominio retardo-Doppler. Esta propiedad le permite preservar la forma de los símbolos incluso en presencia de efectos dinámicos del canal, como la selectividad en frecuencia y el retardo multipath.
- A pesar de su potencial, la implementación experimental evidenció la necesidad de fortalecer el procesamiento digital en el receptor. Las etapas de estimación de canal y corrección de fase resultaron ser determinantes para el rendimiento global del sistema, siendo responsables directas de las diferencias observadas en el BER a iguales condiciones de transmisión.
- Finalmente, la validación experimental confirmó la viabilidad de un sistema OTFS sobre SDR, tanto desde el punto de vista funcional como de desempeño. Sin embargo, también quedaron en evidencia limitaciones técnicas relacionadas con la robustez del procesamiento en condiciones reales, lo cual abre oportunidades de mejora mediante algoritmos más sofisticados de sincronización, compensación Doppler y equalización en tiempo-frecuencia.

Recomendaciones

A partir de los resultados experimentales y del análisis detallado del desempeño del sistema OTFS sobre SDR, se proponen las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones y mejoras en la implementación:

- **Optimizar la corrección de fase:** Reemplazar el método actual basado en CDA por algoritmos avanzados de estimación y corrección de fase, como técnicas de seguimiento de portadora o filtros de Kalman, que permitan mitigar eficazmente las rotaciones de fase identificadas en condiciones de canal dispersivo.
- **Mejorar la estimación de canal:** Implementar esquemas de estimación más robustos, como pilotos en el dominio retardo-Doppler o aprendizaje automático para entornos altamente dispersivos. Una mejor caracterización del canal puede reducir el BER en escenarios de alta movilidad o gran distancia.
- **Estabilizar el sistema antes de extender pruebas:** Validar completamente el comportamiento del sistema en condiciones estáticas y controladas antes de pasar a escenarios móviles. Esto garantizará una referencia sólida para medir el impacto real del entorno en pruebas más complejas.
- **Minimizar interferencias externas:** Realizar ensayos en entornos electromagnéticamente controlados y con uso exclusivo del canal de prueba, con el fin de asegurar que los resultados reflejen únicamente el comportamiento del sistema OTFS y no influencias ajenas.
- **Verificación rigurosa del hardware:** Asegurar el correcto estado de los módulos USRP, cables RF, conectores y sincronización entre dispositivos antes de cada sesión de pruebas. Se detectaron comportamientos anómalos asociados a errores físicos o a pérdidas por conexión deficiente.
- **Ampliar el estudio a canales dinámicos:** Una vez superadas las limitaciones observadas en entornos estáticos, se recomienda realizar pruebas en movimiento (por ejemplo, con desplazamiento físico del nodo receptor), para evaluar la resiliencia de OTFS frente a variaciones rápidas de canal, como desvanecimiento y Doppler severo.

- **Explorar constelaciones y codificación:** Ampliar el estudio experimental utilizando modulaciones más densas (por ejemplo, 16-QAM) y esquemas de codificación canal (LDPC, Turbo Codes), con el fin de evaluar la tasa efectiva de transmisión y la robustez ante errores en condiciones adversas.

Bibliografía

- E. Basar, M. Wen, R. Mesleh, M. Di Renzo, Y. Xiao, and H. Haas. Index modulation techniques for next-generation wireless networks. *IEEE Access*, 5:16693–16746, 2017. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2737528.
- S. S. Das and R. Prasad. *OTFS: Orthogonal Time Frequency Space Modulation A Waveform for 6G*, pages i–xxvi. 2021.
- S.-Y. R. Hui, Y. Yang, and C. Zhang. Wireless power transfer: A paradigm shift for the next generation. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 11(3):2412–2427, 2023. doi: 10.1109/JESTPE.2023.3237792.
- 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.
- G. G. Jaramillo Pizarro. Desarrollo de un algoritmo de modulación en espacio, tiempo y frecuencia ortogonal (otfs) en un software definido por radio (sdr)., 2023. URL <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26444>.
- P. Karpovich and T. P. Zielinski. Vehicle Detection in 6G Systems with OTFS Modulation. *arXiv (Cornell University)*, 1 2023. doi: 10.48550/arxiv.2307.04391. URL <https://arxiv.org/abs/2307.04391>.
- P. Karpovich, T. Zielinski, R. Maksymiuk, K. Abratkiewicz, P. Tomikowski, and P. Samczyński. Experimental testing of an otfs-modulated waveform in a joint radar-comm system. In *2023 IEEE Radar Conference (RadarConf23)*, pages 1–6, 2023. doi: 10.1109/RadarConf2351548.2023.10149464.
- T. Makino. Effects of the operational modes on the temperature dependence of the Gunn diode admittance. *Solid-State Electronics*, 22(9):761–769,

1979. ISSN 0038-1101. doi: [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(79\)90123-0](https://doi.org/10.1016/0038-1101(79)90123-0). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038110179901230>.
- Y. S. Meng and Y. H. Lee. INVESTIGATIONS OF FOLIAGE EFFECT ON MODERN WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS: A REVIEW. *Electromagnetic waves*, 105:313–332, 1 2010. doi: 10.2528/pier10042605. URL <https://doi.org/10.2528/pier10042605>.
- C. C. Mi, G. Buja, S. Y. Choi, and C. T. Rim. Modern advances in wireless power transfer systems for roadway powered electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(10):6533–6545, 2016. doi: 10.1109/TIE.2016.2574993.
- K. R. Murali and A. Chockalingam. On ofds modulation for high-doppler fading channels. In *2018 Information Theory and Applications Workshop (ITA)*, pages 1–10, 2018. doi: 10.1109/ITA.2018.8503182.
- M. Nauman, L. Lopacinski, N. Maletic, M. Scheide, M. Krstic, and E. Grass. 6g and beyond: Hardware-in-the-loop experiments with ofds modulation using sdr. In *2023 Workshop on Microwave Theory and Technology in Wireless Communications (MTTW)*, pages 72–77, 2023. doi: 10.1109/MTTW59774.2023.10320001.
- R. R T. Precoded ofds for vehicular iots based on quantized csi at transmitter. In *2023 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, pages 639–643, 2023. doi: 10.1109/ANTS59832.2023.10469351.
- T. Thaj and E. Viterbo. Ofds 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.
- X. Wei, L. Zhang, W. Yuan, F. Liu, S. Li, and Z. Wei. Sdr system design and implementation on delay-doppler communications and sensing. In *2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–6, 2023. doi: 10.1109/WCNC55385.2023.10118889.
- L. Xiao, S. Li, Y. Qian, D. Chen, and T. Jiang. An overview of ofds for internet of things: Concepts, benefits, and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(10):7596–7618, 2022. doi: 10.1109/JIOT.2021.3132606.

- H. Zhang, X. Huang, and J. A. Zhang. Comparison of ofds diversity performance over slow and fast fading channels. In *2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, pages 828–833, 2019. doi: 10.1109/ICCCChina.2019.8855898.
- S. Zhou, M. Zhao, X. Xu, J. Wang, and Y. Yao. Distributed wireless communication system: a new architecture for future public wireless access. *IEEE Communications Magazine*, 41(3):108–113, 2003. doi: 10.1109/MCOM.2003.1186553.
- T. P. Zieliński, P. Karpovich, K. Abratkiewicz, R. Maksymiuk, P. Samczyński, K. Duda, and M. Wypich. Wireless ofds-based integrated sensing and communication for moving vehicle detection. *IEEE Sensors Journal*, 24(5):6573–6583, 2024. doi: 10.1109/JSEN.2024.3350238.