

Tecnología de modulación en el espacio de tiempo- frecuencia ortogonal

Orthogonal time frequency space modulation technology

Rodrigo Castillo-Rodríguez¹

Fecha de recepción: 11 de noviembre de 2019

Fecha de aprobación: 18 de marzo de 2020

Castillo-Rodríguez, R. Tecnología de modulación en el espacio de tiempo-frecuencia ortogonal. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-1. Enero-Marzo 2021. Pág 16-24.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.4818>

¹ Escuela de Física y Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rodrigo.castillorodriguez@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-0866-7435>



Palabras clave

Modulación; OTFS; ondas milimétricas; efecto Doppler.

Resumen

La presente investigación bibliográfica recopila los conceptos básicos de la tecnología de modulación en el Espacio de Tiempo-Frecuencia Ortogonal (OTFS), que será utilizada para la comunicación móvil de quinta generación (5G), la cual presenta ventajas inherentes frente a la modulación de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM) utilizada en la comunicación móvil de cuarta generación (4G). Entre ellas podemos destacar su capacidad de transformar un canal que se desvanece aleatoriamente dentro del espacio de tiempo-frecuencia en un canal estacionario, no aleatorio y sin desvanecimiento, entre el transmisor y el receptor. Además, el hecho de que la modulación OTFS opere en dominios en los que el canal puede caracterizarse en una forma muy compacta tiene implicaciones significativas para la solución de los cuellos de botella de estimación de canales, que afectan los sistemas actuales de antenas múltiples, y puede ser una tecnología clave para abordar problemas similares en futuros sistemas masivos de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). Finalmente, el beneficio clave de la modulación OTFS es su capacidad para operar fácilmente en canales Doppler extremos; esto no solo es útil en las comunicaciones de alta movilidad, sino que también puede ser una tecnología que habilite los sistemas en la banda de frecuencia de onda milimétrica significativamente, para su operatividad en condiciones donde los efectos Doppler se amplifican.

Keywords

Modulation; OTFS; mmWave; Doppler Effect.

Abstract

This bibliography research gathers together the basics of the Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) modulation technology, that will be used in the fifth generation (5G) mobile communications; it has inherent advantages in the face of the Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) modulation technique, used in the fourth generation mobile communication (4G). One of these profits is its skill to transform a channel that randomly fades within the time-frequency space into a stationary, deterministic and non-fading channel between the transmitter and the receiver. In addition, there is the fact that OTFS modulation operates in a domain in which the channel can be characterized in a very compact way; this has significant implications for tackling the channel estimation bottlenecks that affect current multi-antenna systems and can be an implementing key technology for addressing similar problems in future massive MIMO systems. Finally, the main benefit of OTFS modulation is its ability to easily operate in extreme Doppler channels; this is not only useful in high mobility communications, but can also be an enabling technology for mmWave systems, where Doppler effects will be significantly amplified.

Introducción

Actualmente la cantidad de servicios multimedia y dispositivos móviles de alta calidad está aumentando; de ello se deriva la importancia de la transmisión de datos a alta velocidad y de la capacidad del canal de transmisión, por lo que existen varios escenarios para la operación del entorno móvil de alta velocidad [1].

Entre estos escenarios podemos destacar la comunicación móvil 4G, que hace uso de la modulación de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM, por sus siglas en inglés). En el marco convencional de un solo portador, la tecnología 4G requiere de un ecualizador de alta complejidad para superar el efecto de la interferencia entre símbolos (ISI, por sus siglas en inglés), lo que demanda un largo tiempo de procesamiento, que hace difícil lograr una comunicación de alta velocidad, por lo que para superar este inconveniente, se ha propuesto la utilización de la modulación OFDM con múltiples señales portadoras para transmitir símbolos de datos. Usando esta técnica, la modulación OFDM cambia el canal selectivo de frecuencia al canal de desvanecimiento plano y usa el prefijo cíclico (CP, por sus siglas en inglés) para superar el ISI [1].

Considerando las numerosas investigaciones en curso sobre el escenario 5G y las comunicaciones móviles de esta tecnología, podemos destacar las referentes a la modulación en el Espacio de Tiempo-Frecuencia Ortogonal (OTFS, por sus siglas en inglés) [1-10]. La modulación OTFS puede compensar el retraso y el efecto de propagación Doppler de alta velocidad mediante el uso de las Transformadas Inversa-Discreta / Discreta de Fourier (IDFT / DFT, por sus siglas en inglés, respectivamente) en dos dimensiones (2D), que convierten la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

La modulación OFDM convencional puede superar efectivamente el efecto ISI mediante el uso del CP. Sin embargo, el sistema requiere un algoritmo de compensación de efecto Doppler de alta complejidad para compensar la señal recibida adicionalmente, o el uso de una modulación de Multiplexación por División de Frecuencia (FDM, por sus siglas en inglés) con una División de Frecuencia en el CP (FD-CP, por sus siglas en inglés), lo que representa una nueva técnica de compensación de los efectos ocasionados por dispersión en los canales Doppler para su operatividad, misma que es denominada como FDM-FD-CP [11].

Especialmente, la comunicación móvil 5G debe ser compatible con los dispositivos móviles en entornos de alta velocidad donde existen retrasos por efecto Doppler, por esta razón el algoritmo de compensación debe tener un efecto Doppler más fuerte que logre contrarrestar este fenómeno, el cual resulta esencial para la eficacia del proceso de comunicación.

La modulación OTFS al ser una extensión 2D de la modulación OFDM (4G) y de la antigua modulación de Código de División de Acceso Múltiple (CDMA, por sus siglas en inglés) (3G), es considerada un sistema OFDM evolucionado que utiliza preprocesamiento y postprocesamiento.

La figura 1 muestra el diagrama de bloques del sistema de comunicación con modulaciones OFDM y OTFS de un solo portador, en donde se pueden observar todos los procesos antes descritos.

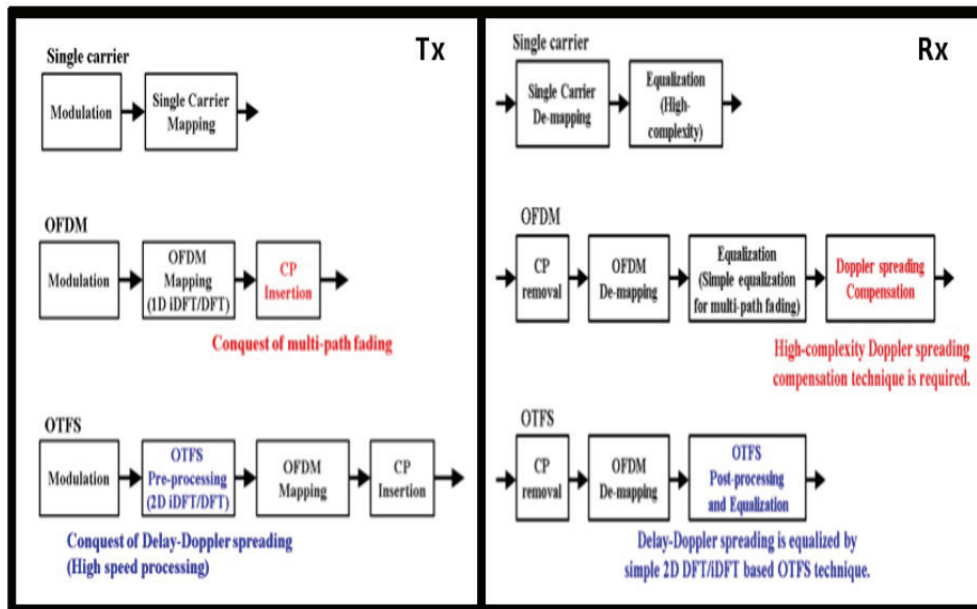


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de comunicación con modulaciones OFDM y OTFS de un solo portador. Adaptado de [1].

Por todo lo mencionado anteriormente, este trabajo se centra en los conceptos básicos de la tecnología de modulación OTFS, que según las investigaciones recientes [1-10], es la que mejor responde a las nuevas necesidades de aumento en la velocidad y la capacidad de los canales de transmisión; además de que compensa de forma simple los retrasos Doppler en entornos de alta movilidad [1].

Desarrollo

La modulación OTFS se utiliza principalmente en las comunicaciones inalámbricas para optimizar su uso. Estas comunicaciones inalámbricas no utilizan un medio físico como el cable o hilos conductores para enviar o recibir información, más bien utilizan la modulación de ondas electromagnéticas en el espacio para lograr la transmisión. Las comunicaciones inalámbricas, como la mayor parte de las tecnologías, han evolucionado a lo largo de los años y han pasado por diferentes etapas (1G - 4G) hasta llegar al paradigma de la tecnología 5G, como se muestra en la figura 2.

Un componente indispensable de los sistemas 5G son las bandas de frecuencia de onda milimétrica, ya que ofrecen un ancho de banda mucho mayor que las bandas celulares clásicas. Sin embargo, un desafío importante es su comportamiento en canales que favorecen una alta dispersión de la onda electromagnética, dado que el ruido de fase y la sensibilidad al movimiento (retardo Doppler) aumentan con la frecuencia de la onda portadora de la información [4], por lo que es decisivo encontrar métodos de modulación cuyo rendimiento no se degrade significativamente en esas circunstancias.

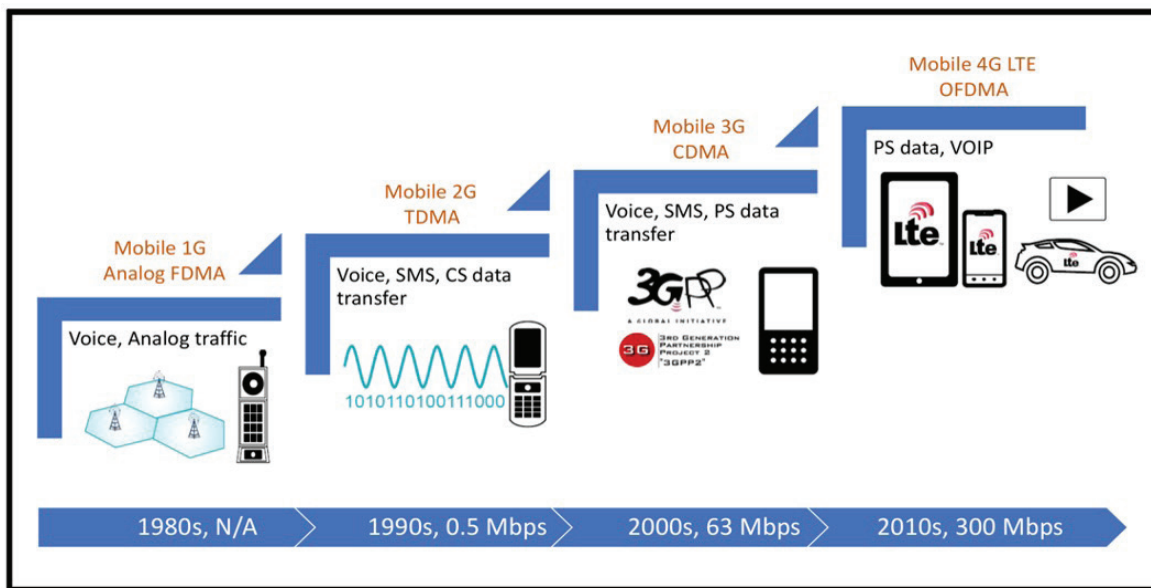


Figura 2. Diagrama esquemático de la evolución de las tecnologías de comunicación inalámbricas. Tomado de [12].

El nuevo modelo de modulación OTFS opera en el sistema de coordenadas de retardo Doppler utilizando un conjunto de funciones básicas ortogonales a los cambios de tiempo y frecuencia. Tanto los datos como las señales de referencia o las portadoras son transportados en este sistema de coordenadas. El dominio de retardo Doppler refleja la geometría del canal inalámbrico, que cambia mucho más lentamente que los cambios de fase experimentados en el espacio de tiempo-frecuencia, que varía rápidamente. Los símbolos OTFS experimentan la diversidad completa del canal a lo largo del tiempo y la frecuencia, intercambiando latencia por rendimiento, en escenarios de alta dispersión Doppler [5].

Además, la modulación OTFS difunde la onda base sobre todo el espacio de tiempo-frecuencia en contraste con la modulación OFDM, donde la onda base se encuentra altamente localizada; por consecuencia la modulación OTFS funciona bien particularmente en situaciones con alta dispersión Doppler e información del estado del canal limitada o nula en el transmisor [4].

Una de las características fundamentales de la modulación OTFS es que opera en el dominio de retardo Doppler (esencialmente el dual 2D de Fourier del espacio de tiempo-frecuencia), convirtiendo efectivamente el canal de desvanecimiento variante en el tiempo, que experimenta la modulación OFDM, en un canal sin desvanecimiento e independiente del tiempo [4]. Esto se logra por medio del acoplamiento entre la señal de entrada y el canal, en el espacio tiempo-frecuencia, con la aplicación de una integral doble que relaciona la señal recibida $r(t)$ y la señal de transmisión $s(t)$, como lo expresa la ecuación 1,

$$r(t) = \int \int h(\tau, \nu) e^{j2\pi\nu(t-\tau)} s(t-\tau) d\nu d\tau \quad (\text{ecuación 1})$$

donde $h(\tau, \nu)$ es la función de expansión del canal, es decir, la transformada de Fourier (con respecto a t) de la respuesta al impulso variante en el tiempo $h(\tau, t)$. Además τ y ν son el retraso y el desplazamiento Doppler, respectivamente [4].

En la figura 3 se puede observar el diagrama de bloques del sistema de comunicación por modulación OTFS, donde se utilizan las transformadas simplécticas rápidas de Fourier para codificar (Transformada Inversa Simpléctica Rápida de Fourier, ISFFT por sus siglas en inglés) y decodificar (Transformada Simpléctica Rápida de Fourier, SFFT por sus siglas en inglés) las señales de entrada y salida, respectivamente. Una vez que la señal de entrada es codificada por la ISFFT, pasa por un modulador en que se utiliza una transformación de Heisenberg (ecuación 2), que convierte la señal del espacio de tiempo-frecuencia al dominio del tiempo, para ser acoplada en el canal según la ecuación 1 [2],

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} X[n, m] g_{tx}(t - nT) e^{j2\pi m \Delta \nu (t - nT)} \quad (\text{ecuación 2})$$

donde $g_{tx}(t)$ denota el pulso transmitido.

Luego en el receptor esta señal en el dominio del tiempo es devuelta al espacio de tiempo-frecuencia a través de un demodulador en que se utiliza una transformación de Wigner (ecuación 3),

$$\begin{cases} Y(t, \nu) = A_{g_{rx}, r}(t, \nu) = \int g_{rx}^*(t - \tau) r(t) e^{-j2\pi \nu (t - \tau)} dt \\ Y[n, m] = Y(t, \nu) \Big|_{t=nT, \nu=m \Delta \nu} \end{cases} \quad (\text{ecuación 3})$$

donde $g_{rx}(t)$ es el pulso recibido. Cabe destacar que $g_{tx}(t)$ y $g_{rx}(t)$ son ortogonales con respecto a traslaciones en tiempo y frecuencia [2].

Finalmente esta onda demodulada es decodificada por la SFFT (ver figura 3).

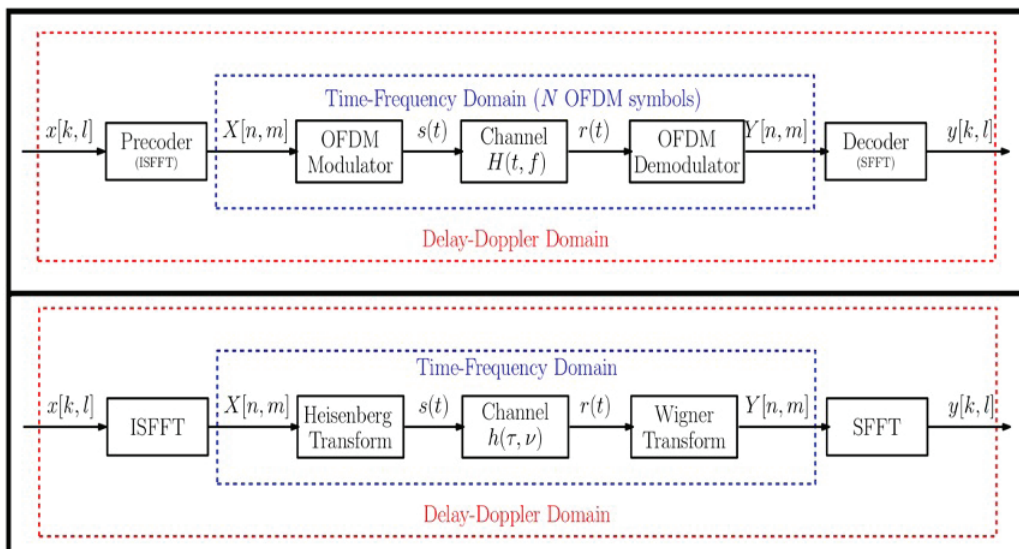


Figura 3. Diagrama de bloques del sistema de comunicación por modulación OTFS. Adaptado de [2].

Por otra parte, la modulación OTFS, al compensar de manera concisa el efecto de retardo Doppler, permite transmitir datos a alta velocidad [1, 2]. Esto crea una gran ventaja para los sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO, por sus siglas en inglés), especialmente para los esquemas de modulación OTFS-MIMO, permitiéndoles transmitir el flujo de datos de cada antena sin degradación del rendimiento de la comunicación, inclusive en los entornos de alta dispersión Doppler [1], gracias a que este esquema (OTFS-MIMO) ofrece los beneficios de alta eficiencia espectral y energética de un sistema MIMO y la robustez de la modulación OTFS en canales de desvanecimiento de alta dispersión Doppler [2]. Esto hace muy atractiva la implementación de este binomio en los futuros sistemas inalámbricos, incluidos los sistemas 5G, donde deben operar en las condiciones de un canal dinámico, tomando en cuenta escenarios de alta movilidad y bandas de frecuencia de onda milimétrica [2]. Un diagrama esquemático de bloques del sistema de comunicación por modulación OTFS para sistemas MIMO se muestra en la figura 4.

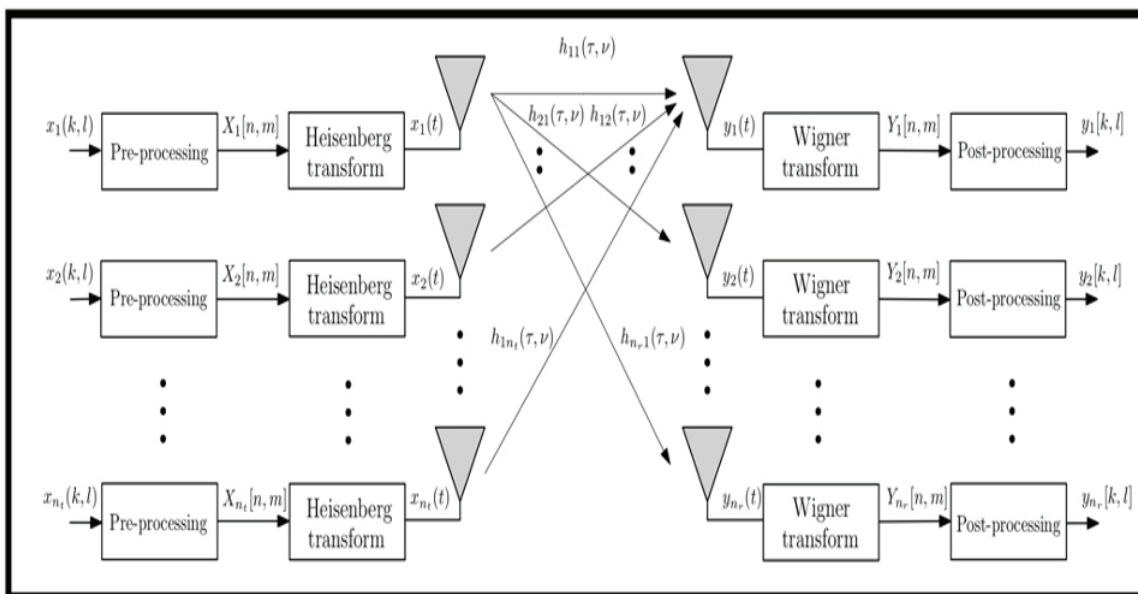


Figura 4. Diagrama de bloques del sistema de comunicación por modulación OTFS para sistemas MIMO. Tomado de [2].

Cabe destacar que al abordar de manera adecuada los efectos destructivos de la alta dispersión Doppler en las comunicaciones inalámbricas, la tecnología de modulación OTFS tiene un alto potencial de aplicación en otras áreas [7]. Una de ellas es en los sistemas de radar donde se ha demostrado que los algoritmos basados en la modulación OTFS presentan ventajas sobre los algoritmos de radar basados en la modulación OFDM, los cuales proporcionan beneficios adicionales para mejorar las capacidades del radar. Esto se debe a que la modulación OTFS requiere menos CP, por lo tanto, el tiempo de duración de la transmisión es más corto que en la modulación OFDM, lo que proporciona al radar mayor alcance y una velocidad de seguimiento de objetivos más rápida. Además, a diferencia de la modulación OFDM, OTFS está libre de interferencias entre operadores, lo que proporciona una estimación de frecuencia Doppler mayor [7]. La figura 5 muestra el diagrama de bloques de la arquitectura de un sistema de radar basado en la modulación OTFS.

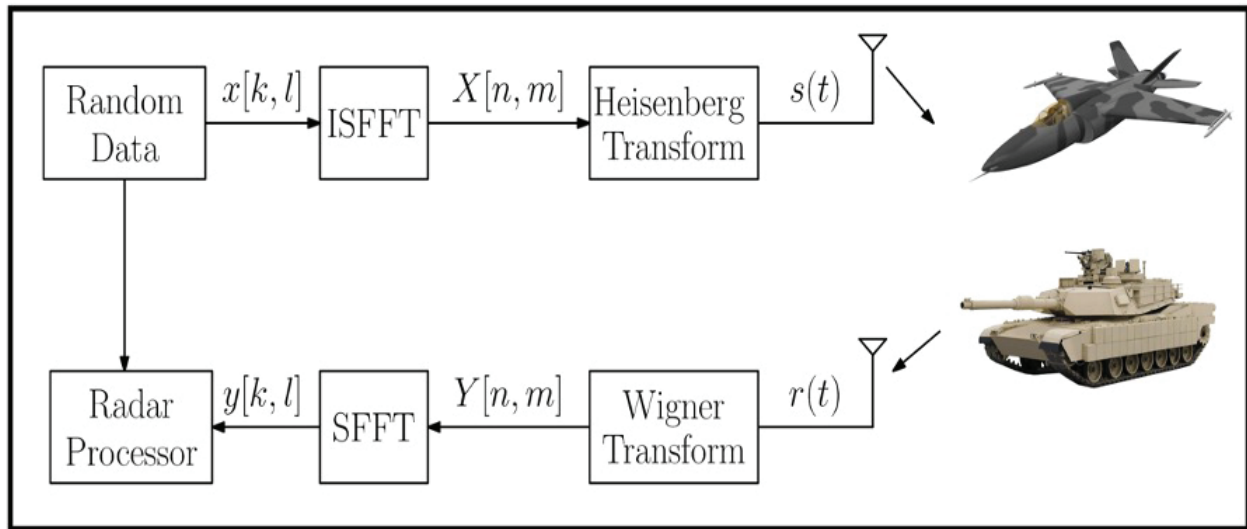


Figura 5. Diagrama de bloques de la arquitectura de un sistema de radar basado en la modulación OTFS. Tomado de [7].

Conclusiones

La modulación OTFS tiene numerosos beneficios que se relacionan con los desafíos que los sistemas con tecnología 5G están tratando de superar. Podría decirse que el mayor beneficio y la razón principal para estudiar esta modulación es su capacidad de transformar un canal que se desvanece aleatoriamente dentro del espacio de tiempo-frecuencia en un canal estacionario, no aleatorio y sin desvanecimiento entre el transmisor y el receptor, por medio de una mejor utilización de los desvanecimientos y las fluctuaciones de potencia en la señal recibida, para maximizar la capacidad [5].

El hecho de que la modulación OTFS opere en un dominio en el que el canal puede caracterizarse en una forma muy compacta tiene implicaciones significativas para resolver los cuellos de botella de estimación de canales que afectan los sistemas actuales de antenas múltiples, y puede ser una tecnología clave para abordar problemas similares en futuros sistemas MIMO masivos [5]. De hecho, ya se ha propuesto un nuevo protocolo de transmisión de Acceso Múltiple No Ortogonal para incorporarlo en la modulación OTFS, denominado OTFS-NOMA por sus siglas en inglés [13].

Otro beneficio clave de la modulación OTFS es su capacidad para manejar fácilmente canales Doppler extremos. Esto no solo es útil en las comunicaciones de alta movilidad de vehículo a vehículo, desde el tren de alta velocidad u otras aplicaciones 5G intensivas en Doppler, sino que también puede ser una tecnología que habilite sistemas de banda de frecuencia de onda milimétrica donde los efectos Doppler se amplifican significativamente [5].

Por último, pero no menos importante, el proceso de estimación de un canal compacto que OTFS proporciona puede ser esencial para el despliegue exitoso de tecnologías avanzadas como la Cooperativa Multipunto (Co-MP, por sus siglas en inglés) y la mitigación de la interferencia distribuida o MIMO de red, que requieren una estimación del canal precisa, para grandes cantidades de puertos de antena en cualquier escenario de movilidad [5].

Agradecimientos

El autor agradece al profesor Julio Stradi Granados por haberle motivado a realizar esta investigación bibliográfica en el marco del curso EL-5513 Comunicaciones Eléctricas I, de la carrera de Licenciatura en Ingeniería en Electrónica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Referencias

- [1] C. An & H. G. Ryu, "High throughput mobile communication based on OTFS system with the delay-Doppler compensation". *Wireless Personal Commun.*, 106(2), 473-486, 2019. doi:10.1007/s11277-019-06174-8.
- [2] M. K. Ramachandran & A. Chockalingam, "MIMO-OTFS in high-Doppler fading channels: Signal detection and channel estimation," in *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 206-212. IEEE, doi:10.1109/GLOCOM.2018.8647394.
- [3] R. Hadani & A. Monk, *OTFS: A new generation of modulation addressing the challenges of 5G*, 2018. arXiv preprint arXiv:1802.02623.
- [4] R. Hadani, S. Rakib, A. F. Molisch, C. Ibars, A. Monk, M. Tsatsanis,... & R. Calderbank, "Orthogonal time frequency space (OTFS) modulation for millimeter-wave communications systems," in *2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, pp. 681-683. IEEE, doi:10.1109/MWSYM.2017.8058662.
- [5] A. Monk, R. Hadani, M. Tsatsanis, & S. Rakib, *OTFS-orthogonal time frequency space*, 2016. arXiv preprint arXiv:1608.02993.
- [6] P. Raviteja, E. Viterbo, & Y. Hong, "OTFS performance on static multipath channels," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, 2019. doi:10.1109/LWC.2018.2890643.
- [7] P. Raviteja, K. T. Phan, Y. Hong, & E. Viterbo, *Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) modulation based radar system*, 2019. arXiv preprint arXiv:1901.09300
- [8] P. Raviteja, K. T. Phan, & Y. Hong, "Embedded pilot-aided channel estimation for OTFS in delay-Doppler channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 68(5), 4906-4917, 2019. doi:10.1109/TVT.2019.2906357.
- [9] W. Shen, L. Dai, J. P. An, P. Fan, & R. W. Heath, "Channel estimation for Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) Massive MIMO," *IEEE Trans Signal Inf. Process.*, 2019. doi:10.1109/TSP.2019.2919411.
- [10] F. Wiffen, L. Sayer, M. Z. Bocus, A. Doufexi, & A. Nix, "Comparison of OTFS and OFDM in Ray Launched sub-6 GHz and mmWave Line-of-Sight Mobility Channels," in *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 73-79. IEEE, doi:10.1109/PIMRC.2018.8580850.
- [11] T. Dean, M. Chowdhury, & A. Goldsmith, "A new modulation technique for Doppler compensation in frequency-dispersive channels," in *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1-7. IEEE, doi:10.1109/PIMRC.2017.8292240.
- [12] A. Chockalingam, H. Hong, & E. Viterbo, E., August 27th, 2018, "Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) Modulation" [Tutorial at VTC2018-Fall, Chicago].
- [13] Z. Ding, R. Schober, P. Fan, & H. V. Poor, *OTFS-NOMA: An efficient approach for exploiting heterogenous user mobility profiles*, 2019. arXiv preprint arXiv:1904.02783.