

Análisis del desempeño de la OTFS para mejorar la flexibilidad de la arquitectura para la 6G

Jorge Luis Blanco Orta, María del Carmen Guerra Martínez, Francisco Reinerio Marante Rizo

RESUMEN / ABSTRACT

En el presente artículo se hace un estudio sobre la modulación en el espacio de tiempo-frecuencia ortogonal (OTFS) y su influencia en el desarrollo de las redes inalámbricas, para lograr una mayor transmisión de datos, flexibilidad y confiabilidad para el despliegue de la sexta generación (6G), por los beneficios que puede brindar esta modulación para entornos con dispersión de alta frecuencia. Ofreciendo la posibilidad de abarcar retrasos localizados y degradaciones Doppler, convirtiendo los canales selectivos de tiempo-frecuencia (TF), en un canal invariante en el dominio de retardo-Doppler (DD). Esto será posible gracias a que es un nuevo esquema de modulación bidimensional (2D), donde los símbolos de información se multiplexan en el dominio DD en lugar del dominio de TF, en relación a las técnicas de modulación tradicionales. Definiendo los desafíos de seguridad y privacidad que pueden surgir para la nueva arquitectura de red, aplicaciones y tecnologías habilitadoras, ante lo nuevos requisitos que se establecerán para la 6G. El estudio se realiza con el propósito de mejorar la transmisión de datos, por ser esta una tecnología clave para abordar problemas similares en futuros sistemas masivos de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), por la capacidad que brinda esta modulación 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.

Palabras claves: OTFS, 6G, TF, retardo-Doppler, MIMO.

This article makes a study on the modulation in the orthogonal time-frequency space (OTFS) and its influence on the development of wireless networks, to achieve greater data transmission, flexibility, and reliability for the deployment of the sixth generation (6G), due to the benefits that this modulation can provide for environments with high-frequency dispersion. Offering the possibility of covering localized delays and Doppler degradations, converting the selective time-frequency (TF) channels into an invariant channel in the delay-Doppler domain (DD). This will be possible thanks to the fact that it is a new two-dimensional (2D) modulation scheme, where the information symbols are multiplexed in the DD domain instead of the TF domain, about traditional modulation techniques. Defining the security and privacy challenges that may arise for the new network architecture, applications, and enabling technologies, given the new requirements that will be established for 6G. The study is carried out to improve data transmission, as this is a key technology to address similar problems in future massive multiple-input and multiple-output (MIMO) systems, due to the ability provided by this modulation to transform a channel that randomly fades within the frequency-time slot on a non-random, non-fading stationary channel between the transmitter and receiver.

Keywords: OTFS, 6G, delay-Doppler, TF, MIMO.

OTFS performance analysis to improve architecture flexibility for 6G.

Recibido: 28/8/2021

Aceptado: 4/12/2021

1.- INTRODUCCIÓN

Ante la existente tendencia mundial, por parte de los usuarios por obtener mejores servicios multimedia, con una mejor calidad, en sus dispositivos móviles en el menor tiempo posible, el sector de las comunicaciones, se encuentra en una constante evolución de la telefonía móvil, razón por lo cual se ha estado buscando en todo momento nuevas formas y estructuras para poder darle solución a las nuevas demandas, lo cual permitirá cambiar por completo el panorama y la industria de los servicios en la nube, como los del entretenimiento y la comunicación. Pero cada nuevo proyecto desarrollado con el objetivo de obtener mejoras en la capacidad del canal de transmisión, traen consigo nuevos desafíos y retos, lo que ha provocado un tránsito sustancioso desde la primera generación (1G) hasta la quinta generación (5G) de los sistemas de comunicaciones móviles.

Para llevar a cabo el desafío que representa el desarrollo de la 5G se plantearon nuevos escenarios para el uso de tecnologías móviles, mediante las comunicaciones inalámbricas, para poder manejar una gran cantidad de dispositivos y tecnologías emergentes, ya que no solo conectará los teléfonos móviles sino también sensores inalámbricos colocados en ropa, casas, automóviles, etc. Permitiendo para entonces que existan millones de éstos, conectados a la red 5G, transformando la forma de percibir y relacionarse con el mundo que lo rodea, cambiando la realidad actual en una “realidad conectada”, en la que todos los objetos y las personas están conectados entre sí formando un todo único [1]. Pero esto no se ha podido concretar del todo en la realidad, ya que se han encontrado algunas limitaciones en algunas áreas, como es el caso de algunas aplicaciones, como la comunicación masiva de todo tipo de máquinas (mMTC, por las siglas del término en inglés, *massive Machine Type Communications*), la comunicación ultra confiable de baja latencia (uRLLC, por las siglas del término en inglés, *ultra-Reliable Low-Latency Communications*) y la banda ancha móvil extrema (eMBB, por las siglas del término en inglés, *enhanced Mobile Broadband*) [2]. Las cuales necesitan ser transmitidas en la banda de ondas milimétricas, siendo esto uno de sus mayores problemas, ya que estas bandas tienen muy corto alcance, convirtiéndose esto en uno de sus mayores desafíos a tener en cuenta, al no poder alcanzar zonas con geografía irregular, como es el caso de autopistas o algunos pueblos distantes; motivo por el cual ya se están haciendo estudios para desarrollar la 6G como la próxima generación de la telefonía móvil.

Aunque la 6G se encuentra en proceso de análisis, ya se está pensando en que sea la sucesora de la tecnología 5G y se espera que la supere en todos los aspectos, con una mayor transmisión de datos y una latencia establecida para los 10 ns, lo que garantizará un mejor control de las redes, permitiendo una mayor velocidad de transmisión de datos, alcanzando el rango de los Tbps, la cual será necesaria para algunas aplicaciones como es el caso de los videos tridimensional (3D) de alta calidad, realidad virtual (VR) y una combinación de realidad virtual y realidad aumentada (AR), donde Terahercios (THz) y las bandas de frecuencia óptica pueden ser las bandas candidatas, frente a los grandes conjuntos de datos generados mediante el uso de redes extremadamente heterogéneas [3,4]. Pero para poder lograr dar este nuevo paso en las comunicaciones inalámbricas, hay que tener en cuenta una forma de onda que permita una mayor flexibilidad en la capa física, para que las aplicaciones puedan lograr alcanzar un alto nivel de disponibilidad del servicio en cualquier momento y lugar, mediante la Internet de las Cosas (IoT, por las siglas del término en inglés, *Internet of Things*). Siendo la modulación OTFS la más apropiada para lograr esta flexibilidad, permitiendo alojar una mayor cantidad de dispositivos, compartiendo de manera más eficiente el ancho de banda disponible [5].

La modulación OTFS en estos últimos tiempos se ha tenido muy en cuenta por su capacidad de transformar un canal que se desvanece aleatoriamente dentro del espacio TF en un canal estacionario, no aleatorio y sin desvanecimiento, entre el transmisor y el receptor, ya que ha demostrado que es más robusto frente al cambio Doppler inducido por el canal en comparación a sistemas de múltiples portadoras. Esto se debe a que esta modulación, 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) en dos dimensiones (2D), que convierten la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia [4-6]. Al ser una extensión 2D de la modulación OFDM (4G) y de la antigua modulación de Código de División de Acceso Múltiple (CDMA) (3G), es considerada un sistema OFDM evolucionado que utiliza pre-procesamiento y post-procesamiento. Lo que la convierte en una forma de onda candidata muy prometedora para la 6G, por su capacidad para lograr la transmisión de datos entre los dispositivos con una alta movilidad, ya que transforma de manera eficaz el dominio TF variable en el tiempo del canal, en un canal 2D invariante en el tiempo efectivo en el dominio DD, que exhibe una propiedad escasa y estable. Además, OTFS explota directamente el desvanecimiento por trayectos múltiples y fluctuaciones del canal a través de la multiplexación en el dominio DD, que es inherentemente adecuado para abordar la dinámica de canales variantes en el tiempo, en comparación con la técnica OFDM convencional [7,8].

Con la propuesta de solución mediante la utilización de la modulación OTFS, se puede lograr una mayor flexibilidad en la estructura para la 6G, dándole solución a muchos de los problemas que se puede presentar en el despliegue de esta nueva generación de la telefonía móvil, para poder alcanzar los niveles deseados, logrando mejorar la calidad y alcance de la señal, dentro de un entorno con una alta movilidad.

2.- METODOLOGÍA

La investigación que se propone en este artículo es un análisis que recoge los conceptos, evolución y despliegue de la modulación OTFS, donde se estableció el siguiente orden de etapas: parámetros de la investigación, conceptos básicos, desempeño e implementación, donde cada una de las mismas comprende varias fases, como se resume en la Fig. 1. Mediante este procedimiento se representa la principal contribución de este artículo, con el objetivo de desarrollar una investigación y posible desarrollo de esta modulación, por sus numerosos beneficios, que se relacionan con los desafíos que los sistemas con tecnología 6G pueden encontrar en su despliegue. Se tuvo en cuenta la literatura más actualizada, así como algunas de las revistas más reconocidas en el medio, como es el caso de (SciELO y la IEEE), permitiendo de esta manera lograr un mayor nivel de profundidad dentro de cada etapa de construcción del artículo.



Figura 1
Procedimiento para el desarrollo de la investigación.

A continuación, se explican cada una de las etapas del procedimiento que se propone para el análisis de la modulación OTFS para mejorar la flexibilidad de la arquitectura para la 6G.

3.- ETAPA I: PARÁMETROS DE LA INVESTIGACIÓN

Esta primera etapa de la investigación se dividió en dos fases: análisis del proyecto y análisis de aspectos técnicos. En la primera fase, se determina el objetivo por el cual se propuso este estudio, donde se tuvieron en cuenta las principales problemáticas referente a las limitantes existentes para enfrentar los nuevos escenarios para la 6G, determinando las necesidades y posibles soluciones. En la segunda fase, se establecen las diferentes técnicas establecidas para mejorar el desempeño de la arquitectura, al enfrentarse a un futuro proyecto para la arquitectura de la 6G, donde se debe tener en cuenta, la movilidad, latencia, distribución geográfica y ancho de banda necesario, para poder determinar la tecnología más idónea para el diseño de la telefonía móvil.

La 5G, ya ha superado a la 4G en gran medida y ya están siendo desplegadas en todo el mundo. Esto ha permitido una mayor compatibilidad con dispositivos móviles con eMBB, logrando velocidades máximas de datos de hasta 10 Gbps. Además, la uRLLC minimiza los retrasos de hasta 1 ms, mientras que la comunicación mMTC admite más de 100 dispositivos por unidad de área en comparación con la 4G. Pero, aunque esto se podría tomar en cuenta para decir que la 5G es una tecnología que podría solucionar muchos de los problemas existentes en la infraestructura de las comunicaciones inalámbricas en la actualidad, esto no ha podido concretarse en la práctica debido a que la gestión de datos en la 5G es más complicada que las anteriores redes inalámbricas, ya que los dispositivos conectados son más diversos y por ende se genera un mayor volumen de tráfico de datos [2,3]; conectando potencialmente miles de millones de usuarios, lo que provocaría una limitación para la infraestructura de una forma crítica, para una elevada cantidad de aplicaciones (IoT, nube RAN, negocios, servicios, teléfonos inteligentes), lo que generaría un aumento de las amenazas a la seguridad en la red. Los datos de usuario serán cada vez más sensibles, como es el caso de la identidad o la ubicación, que son procesadas y transmitidas en la red, logrando un aumento en la cantidad de filtraciones de la privacidad de los usuarios, así como otras limitaciones que la 5G ha presentado ante corto alcance de la señal para algunas zonas, por encontrarse ante uno de los desafíos más complejos de solucionar, que es poder transmitir en las bandas milimétricas (mmWave). El principal problema es que estas bandas se encuentran en su corto alcance,

ya que son aquellas que corresponden a las longitudes de ondas en el rango de 1 a 10 mm y las frecuencias de 30 a 300 GHz y por tanto existe la necesidad de usar los sistemas MIMO masivos para ofrecer mayor capacidad y por tanto mayores velocidades de datos, por estas razones se está discutiendo las bases para desarrollar la 6G [9].

La 6G en comparación con la 5G, se espera que tenga una mayor velocidad de transmisión de datos que su antecesora, que se ha establecido a unos 20 Gbps como máximo, mientras que para las redes 6G se prevé que debe llegar a una velocidad de transmisión de datos de entre 1 a 10 Tbps, con una latencia de entre 10 a 100 μ s, con una movilidad de 1000 Km/h, y con una densidad de 10^7 /km² y un tráfico de área de 1 Gbps/m², mediante la utilización de las bandas de frecuencia óptica, con una eficiencia espectral que puede aumentar de 5 a 10 veces, mientras que la eficiencia energética de la red debe aumentar en más de 100 veces en comparación con la 5G para compensar el aumento en la velocidad de transmisión de datos [10]. Aunque la 5G se centra mayormente en escenarios como eMBB, mMTC y uRLLC, la 6G también tendrá además de estos escenarios de aplicaciones mejoradas, tres escenarios más a tener en cuenta como es el caso de la banda ultra ancha móvil ubicuo (uMUB, por las siglas del término en inglés, *ubiquitous Mobile Ultra-Broadband*), la ultra alta velocidad con comunicaciones de baja latencia (uHSLC, por las siglas del término en inglés, *ultra-High-Speed with Low-Latency Communications*) y datos ultra altos de densidad (uHDD, por las siglas del término en inglés, *ultra-High Data Density*) respectivamente [11]. Con la 6G se espera dar nuevos pasos hacia la expansión de IoT hacia internet de todo (IoE, por las siglas del término en inglés, *Internet of Everything*), donde la cantidad de dispositivos IoT está aumentando y se espera que crezca hasta 24 billones para el 2030 debido el crecimiento de aplicaciones como la internet industrial de las cosas (IIoT, por las siglas del término en inglés, *Industrial Internet of Things*), mediante la IoE se ampliará el alcance de IoT para formar un mundo hiperconectado que conecte a las personas, permitiendo agilizar los procesos de las empresas e industrias. Donde la IoE se conectará a muchos ecosistemas que involucran sensores heterogéneos, equipos de usuario, servicios y aplicaciones [12].

Ante las limitaciones presentadas por las redes 5G para las comunicaciones terrestres y al no poder lograr prestar múltiples servicios con una alta calidad en cualquier momento y lugar, especialmente para regiones apartadas, es por ello que la 6G es la nueva generación más prometedora a tener en cuenta para darle solución a estos desafíos, ya que permitirá desarrollar una arquitectura de red que integrará redes de comunicación submarinas para soportar actividades del mar y en aguas profundas logrando una conectividad mundial; donde se podrá poner al alcance diversas aplicaciones, especialmente en regiones más apartadas, como se muestran en la Fig. 2.

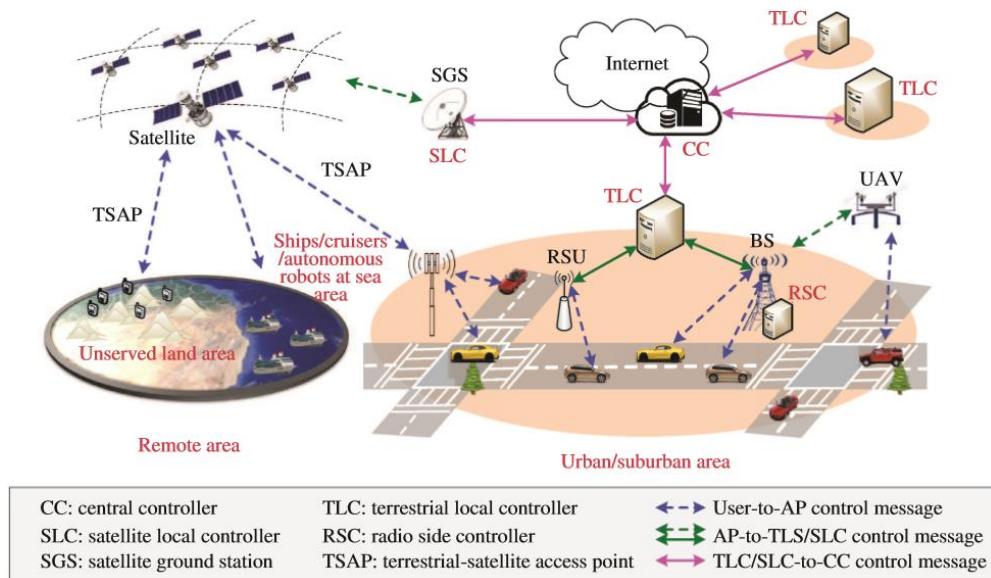


Figura 2

Arquitectura de control de la red integrada espacio-aire-tierra-mar [1].

Se necesitará para mantener la información precisa en la red, los controladores definidos en la red por un software (SDN, por las siglas del término en inglés, *Software Defined Network*), permitiendo la centralización de las decisiones a tener en cuenta para la operabilidad de la red y los servicios. Tal información incluye datos estadísticos y actualizaciones periódicas de acuerdo a la movilidad del usuario, así como la distribución temporal y espacial del servicio, donde se exigirá un extremado índice de calidad del servicio (QoS, por las siglas del término en inglés, *Quality of Service*), para mantener el control de la red mediante una arquitectura versátil y flexible.

3.1.- ETAPA II: CONCEPTOS BÁSICOS

Teniendo en cuenta el análisis realizado en la primera etapa, donde se aborda el tema de la evolución y desarrollo de las diferentes tecnologías existentes en la telefonía móvil, en el que se estableció una comparación entre ellas para poder determinar los problemas existentes por cada estructura; definiendo de esta forma las principales aspiraciones de las industrias de las comunicaciones. Por eso para poder desarrollar esta segunda etapa, se dividió en dos fases: análisis de condiciones y evaluación del sistema de modulación, se desarrolló un estudio profundo de los conceptos relacionados con la concepción de la modulación OTFS, así como su desempeño y desarrollo. La modulación OTFS presenta ventajas inherentes frente a los desafíos que puede presentar la 6G, para poder mejorar la arquitectura de la red. Puede ser una tecnología clave para abordar problemas similares en futuros sistemas MIMO masivos, por su capacidad para operar fácilmente en canales Doppler extremos; siendo esto muy útil en las comunicaciones con alta movilidad, gracias a su operatividad en condiciones donde los efectos Doppler se amplifican.

El nuevo modelo de modulación OTFS opera en el sistema de coordenadas de DD 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 DD que refleja la geometría del canal inalámbrico, que cambia mucho más lentamente que los cambios de fase experimentados en el espacio de TF, que varía rápidamente [13]. 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.

Una de las características fundamentales de la modulación OTFS es que opera en el dominio de DD (esencialmente el dual 2D de Fourier del espacio de TF), convirtiendo efectivamente el canal de desvanecimiento variante en el tiempo, que experimenta la modulación OFDM, en un canal sin desvanecimiento e independiente del tiempo [14,15]. Esto se logra por medio del acoplamiento entre la señal de entrada y el canal, en el espacio TF, como se muestra en la Fig. 3.

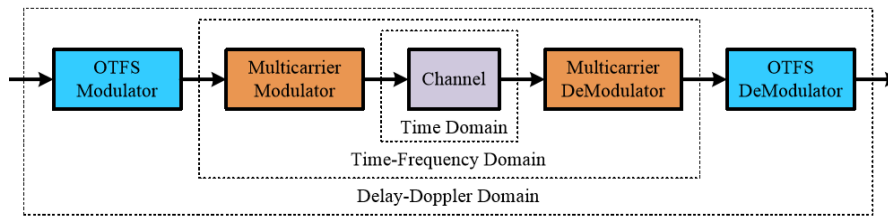


Figura 3

El concepto de modulación y demodulación OTFS [14].

Rápidamente se emplea un modulador multiportadora, como OFDM, para transformar las señales moduladas OTFS del dominio TF al dominio del tiempo, para la transmisión a través de canales inalámbricos. En el lado del receptor, se encuentra un demodulador multiportadora y el demodulador OTFS que transforma las señales recibidas en el dominio DD y luego recupera los símbolos de datos transmitidos.

El modelo de sistema establecido en la modulación OTFS, se puede describir según su concepto básico, de forma matemática mediante la formulación OTFS convencional, como se puede apreciar en [16]. Donde establece que en un plano de la señal de TF discreto consta de ejes de tiempo y frecuencia con su respectivo intervalo de muestreo de T (segundos) y $\Delta f = 1 / T$ (Hz), es decir:

$$\Lambda = \{(nT, m\Delta f), n = 0, \dots, N - 1; m = 0, \dots, M - 1\}, N \in \mathbb{Z}, M \in \mathbb{Z} \quad (1)$$

Señales colocadas en cuadrículas de TF denotadas por $X[n, m]$, $n = 0, \dots, N - 1; m = 0, \dots, M - 1$ se transmiten sobre una trama OTFS con una duración de tiempo $T_f = NT$ y ocupa un ancho de banda $B = M\Delta f$.

El plano de DD correspondiente consiste en las cuadrículas portadoras de mensajes.

$$\Gamma = \left\{ \left(\frac{k}{NT}, \frac{l}{M\Delta f} \right), k = 0, \dots, N - 1; l = 0, \dots, M - 1 \right\} \quad (2)$$

Donde $1 / M\Delta f$ y $1 / NT$ representan los pasos de cuantificación del retardo y la frecuencia Doppler, respectivamente. Las opciones para T y Δf están determinadas por las características del canal, es decir, T no es menor que la máxima dispersión del retardo, y Δf no es menor que el mayor desplazamiento Doppler. En la banda base, se puede seleccionar transmitir y recibir pulsos $g_{tx}(t)$ y $g_{rx}(t)$, respectivamente. Dejar $A_{g_{rx}, g_{tx}}(t, f)$ denota la función de ambigüedad cruzada entre $g_{tx}(t)$ y $g_{rx}(t)$, es decir:

$$A_{g_{rx}, g_{tx}}(t, f) \stackrel{\Delta}{=} \int g_{rx}^*(t' - t) g_{tx}(t') e^{-2\pi f(t' - t)} dt' \quad (3)$$

Para eliminar completamente la interferencia de símbolos cruzados en el receptor, $g_{tx}(t)$ y $g_{rx}(t)$ se debe satisfacer la siguiente condición bi-ortogonal, o sea.

$$A_{g_{rx}, g_{tx}}(t, f) \Big|_{t=nT, f=m\Delta f} = \int e^{-j2\pi m\Delta f(t-nT)} g_{rx}^*(t-nT) g_{tx}(t) dt = \delta[m] \delta[n] \quad (4)$$

Por lo tanto, para el diseño de receptores OTFS de una forma práctica se deben abordar algunas consideraciones. Tal es el caso de los pulsos rectangulares no ideales prácticos que se utilizan en OTFS para transmisiones, que se debe derivar la relación señal de entrada-salida OTFS en el dominio de DD.

3.2.- ETAPA III: DESEMPEÑO

Para esta etapa, se consideraron dos fases: evolución del sistema y selección de tecnologías de interconexión, para describir bien en detalle las condiciones que llevaron a cabo la selección de este tipo de tecnología, por ser la más indicada para la 6G, teniendo en cuenta la primera y segunda etapa de la investigación.

La modulación OTFS comienza con una cascada de un par de transformaciones 2D en el transmisor. Los primeros mapeos del modulador con los símbolos de información $x[k, l]$ en el dominio de DD a $X[n, m]$ en TF en el plano mediante el uso de la Transformada Finita Simpléctica Inversa de Fourier (ISFFT, por las siglas del término en inglés, *Inverse Symplectic Finite Fourier Transform*). Donde se considera a NM como símbolos de datos $\{x[k, l], k=0, \dots, N-1; l=0, \dots, M-1\}$ de la modulación alfabética donde $A = \{a_1, a_2, \dots, a_Q\}$, (por ejemplo, símbolos QAM), que se colocan en el plano Γ de DD, como se aprecia en [16,17]. Mediante el uso de la ISFFT, los símbolos NM se convierten del TF en el plano Λ :

$$X[n, m] = \frac{1}{\sqrt{NM}} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} x[k, l] e^{j2\pi \left(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M} \right)}, n=0, \dots, N-1; m=0, \dots, M-1 \quad (5)$$

Para las señales de TF la $X[n, m]$ se transforman en una señal en el dominio del tiempo $s(t)$ a través de la Transformada de Heisenberg utilizando pulso de transmisión $g_{tx}(t)$:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} X[n, m] g_{tx}(t - nT) e^{j2\pi \left(m - \frac{M-1}{2} \right) \Delta f (t - nT)} \quad (6)$$

Se establece un prefijo cíclico (CP, por las siglas del término en inglés, *Cyclic Prefix*) de longitud al menos igual a la máxima dispersión de retardo del canal de banda base. Después que se inserta el CP en $s(t)$ para abordar la interferencia entre tramas, la señal en el dominio del tiempo pasa a través del filtro de transmisión antes de ingresar al canal (banda base) con respuesta de impulso de banda base:

$$h(t, pT_s) = \sum_{i=1}^L h_i e^{j2\pi v_i (t - pT_s)} P_{re}(pT_s - \tau_i), p=0, \dots, P-1, \quad (7)$$

Donde L es el número de trayectos múltiples y $T_s = 1 / M\Delta f$ es el intervalo de muestreo espaciado de símbolos (SSS, por las siglas del término en inglés, *Symbol Spaced Sampling*); h_i , τ_i y v_i representan la ganancia, el retardo y el desplazamiento Doppler asociados con la i -th, respectivamente.

En el receptor, la señal recibida ingresa a un filtro de recepción definido por el usuario antes de la eliminación del CP. La señal recibida $r(t)$ viene dada por:

$$r(t) = \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{i=1}^L h_i e^{j2\pi v_i (t - pT_s)} P_{re}(pT_s - \tau_i) s(t - pT_s) + N(t) \quad (8)$$

Donde el ruido filtrado se inserta como se muestra en la ecuación (9). Se debe tener en cuenta que $P_{rrc}(\mu)$ suele ser una raíz levantada-coseno (RRC, por las siglas del término en inglés, *Root Raised-Cosine*) filtro de recepción de atenuación y $n(t)$ representa el ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN) en el receptor.

$$N(t) = \int_{\mu} n(t + \mu) P_{rrc}(\mu) d\mu \quad (9)$$

La señal resultante en el dominio del tiempo $r(t)$ se transforma de nuevo en el dominio de la frecuencia del tiempo a través de la Transformada de Wigner (es decir, la inversa de la Transformada de Heisenberg). La transformada de Wigner calcula la función de ambigüedad cruzada $A_{g_{rx}, r}(t, f)$ dada por:

$$Y(t, f) = A_{g_{rx}, r}(t, f) \stackrel{\Delta}{=} \int g_{rx}^*(t' - t) r(t') e^{-j2\pi f(t' - t)} dt' \quad (10)$$

La salida de señal recibida de banda base al SSS se obtiene muestreando $Y(t, f)$ como:

$$Y[n, m] = Y(t, f) \Big|_{t=nT, f=\left(m-\frac{M-1}{2}\right)\Delta f}, n = 0, \dots, N-1; m = 0, \dots, M-1 \quad (11)$$

Finalmente, la Transformada Simpléctica Finita de Fourier (SFFT, por las siglas del término en inglés, *Symplectic Finite Fourier Transform*) recupera el dominio de DD símbolo de datos, como se muestra en la siguiente ecuación, que se describe en [18]:

$$y[k, l] = \frac{1}{\sqrt{NM}} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} Y[n, m] e^{-j2\pi \left(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M} \right)}, k = 0, \dots, N-1; l = 0, \dots, M-1 \quad (12)$$

Estas operaciones proporcionan la base del modelo OTFS con enfoque SSS en un caso general. Ellos son muy útiles para estudiar más a fondo el sistema OTFS cuando se emplean los pulsos específicos. En la evolución de sistema se encuentra el diagrama en bloque de banda base del sistema OTFS que se muestra en la Fig. 4.

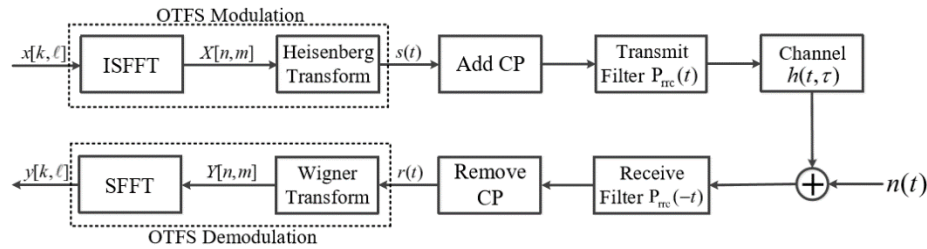


Figura 4

Diagrama de bloques del transmisor OTFS (arriba) y el receptor (abajo) [16].

Para una mejor eficiencia espectral, se consideró el uso de impulsos rectangulares insertando, con solo un CP para todo el marco OTFS. Con este fin, de baja complejidad de los receptores diseñados en [15,18] se pueden eliminar eficazmente la auto-interferencia y mejorar el rendimiento del receptor. Por eso se investigan algoritmos de receptor más efectivos para la modulación OTFS basados en pulsos rectangulares con un solo CP para toda la trama OTFS como se describe en [15,19]. Se observó que los diseños de receptores existentes que no utilizan completamente la información espectral, donde se aplicaron restricciones al SSS para el procesamiento de señales de banda base, son receptores más eficientes donde se asume el canal de TF como $H(t; f)$ y el DD para $h(\tau, \nu)$.

En el que se establece como $\Delta f = 1/T$, para los canales $h(\tau, \nu)$ que se corresponde con la ecuación (13) y asumiendo las ecuaciones en (14), como aparece en la Fig. 6.

$$h(\tau, \nu) = \sum_{i=1}^P h_i \delta(\tau - \tau_i) \delta(\nu - \nu_i) \quad (13)$$

$$\tau_i = l_{\tau_i} \left(\frac{1}{M\Delta f} \right) \quad y \quad \nu_i = k_{\nu_i} \left(\frac{1}{NT} \right) \quad (14)$$

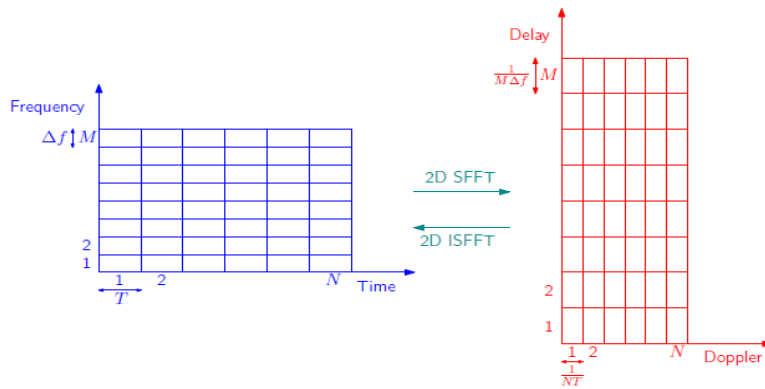


Figura 6

Las rejillas de tiempo-frecuencia y retardo-Doppler [16].

Por otro lado, al invocar la bidimensionalidad (2D) mediante la SFFT, la OTFS modula los símbolos de información en el dominio DD, donde los parámetros del canal son relativamente estables en comparación con los del dominio TF. Más importante aún, se puede demostrar que modulando la información símbolos en el dominio DD en lugar del dominio TF, cada símbolo experimenta principalmente las fluctuaciones completas del canal TF sobre una trama OTFS, por eso la modulación OTFS ofrece la potencialidad de desarrollar la diversidad de canales completa, logrando un mejor rendimiento de error en comparación con la modulación OFDM convencional en un entorno de alta movilidad [20]. Es por eso que los esquemas de modulación OTFS-MIMO, les permiten transmitir el flujo de datos de cada antena sin degradación del rendimiento de la comunicación, logrando ofrecer una alta eficiencia espectral y energética de un sistema MIMO, mediante la robustez de la modulación OTFS en canales de desvanecimiento de alta dispersión Doppler [21]. Lo cual hace muy atractiva la implementación de este binomio en los futuros sistemas inalámbricos, como se puede apreciar en la Fig. 7.

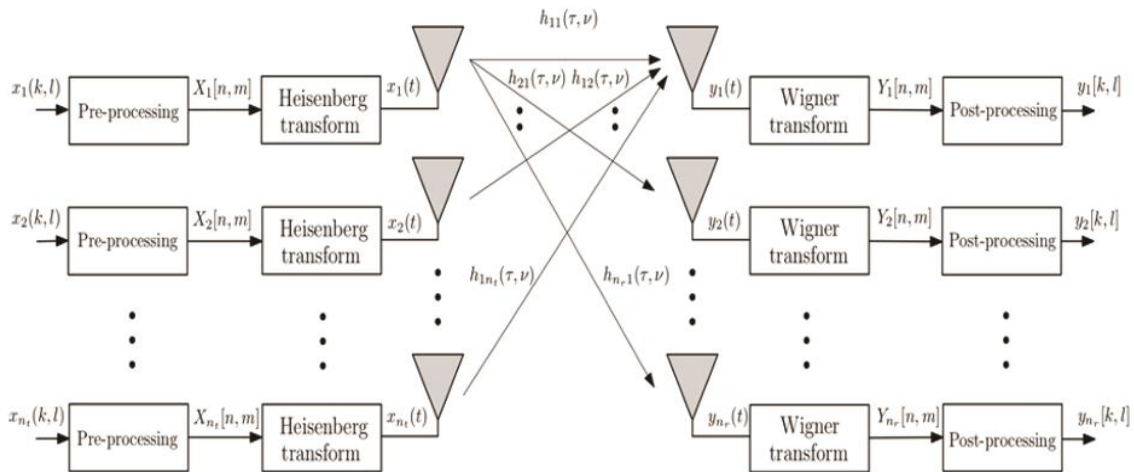


Figura 7

Diagrama de bloques del sistema de comunicación por modulación OTFS para sistemas MIMO [20].

4.- ETAPA IV: IMPLEMENTACIÓN

Esta constituye la última etapa del procedimiento y se encuentra dividida en dos fases: despliegue y prueba. En la primera fase, esta destinadas a comprobar la futura estructura que se espera montar en tiempo real, donde se incluirá la inteligencia artificial (AI, por las siglas del término en inglés, *Artificial Intelligence*) y el aprendizaje de máquinas (ML, por las siglas del término en inglés, *Machine Learning*) para el despliegue de la 6G, como se muestra en la Fig. 8. Se espera que las redes de comunicación 6G puedan lograr desarrollar mejores esquemas de codificación, que permitan la optimización de la uRLLC, centralizando los problemas a nivel de red. Sin embargo, mejorar estas tecnologías para cumplir con los requisitos que se esperan para la 6G requiere más trabajo de investigación. Ya que la fusión de la tecnología inalámbrica, junto con plataformas de nube / borde / niebla que proporcionan instalaciones de procesamiento y almacenamiento de datos que son esenciales para

empoderar las futuras redes de comunicación 6G. Además, el desarrollo de métricas como la calidad de la experiencia física (QoPE, por las siglas del término en inglés, *Quality of the Physical Experience*), que es capaz de combinar QoS, calidad de la experiencia (QoE, por las siglas del término en inglés, *Quality of Experience*) y humanas percepciones, debido a los recientes desarrollos en máquinas, será un servicio clave ante los nuevos desafíos que surgirán para esta nueva generación [2,22]. Las diferentes generaciones previas de la red, se han convertido cada vez más complejas en muchos aspectos, ya que la red se ha expandido en ambas dimensiones tanto por la parte horizontal como por la vertical. Estas razones han motivado el uso de softwares inteligentes y autónomos para solucionar problemas diversos del diseño, para las transmisiones inalámbricas mediante el interfaz, asignando recursos para la red.

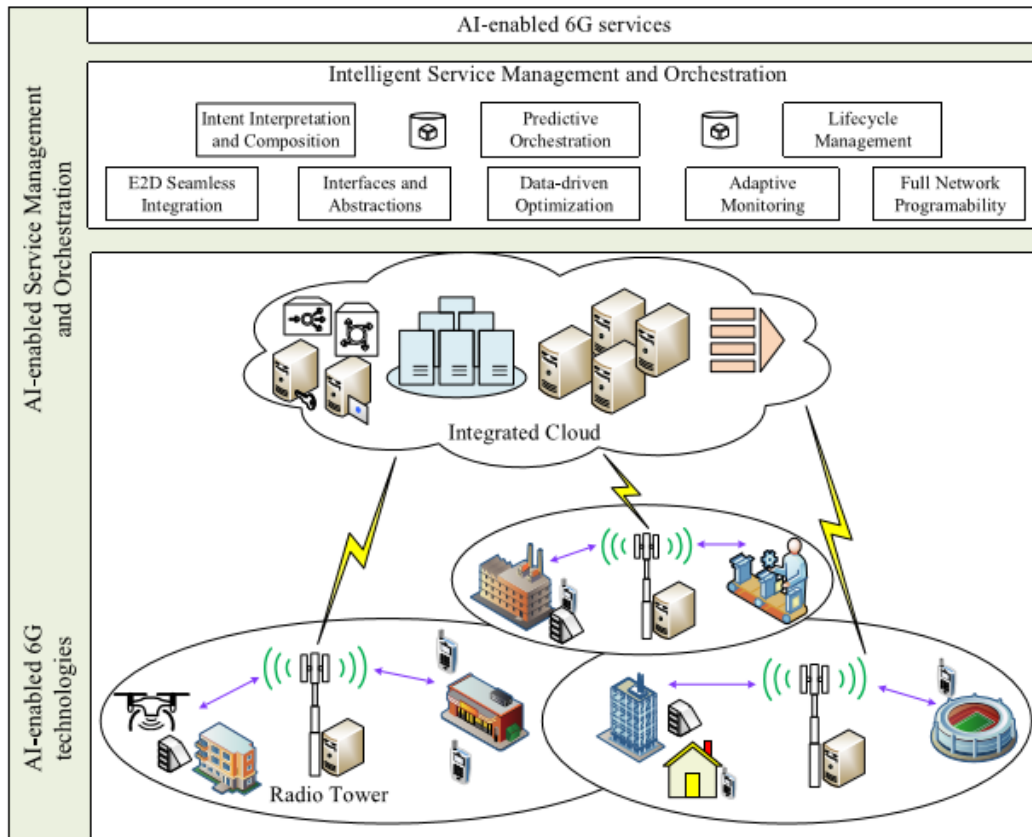


Figura 8

Estructura dinámica y óptima colocación de micro-servicios virtuales para funciones habilitadas por AI/ML en tiempo real en la era de la 6G [2].

Por eso la modulación OTFS es la más adecuada para lograr ese futuro despliegue de la 6G, ya que ha demostrado ser aplicable a muchos sistemas de comunicación. Como para la OFDM en [23] se investigó el canal disperso estructurado en 3D de MIMO-OTFS y propuso un método de estimación de canal. En [24,25], se muestra que OTFS podría alcanzar de manera eficiente la tasa de información completa de la modulación y logrando un rendimiento óptimo de la estimación con el radar. Además, la modulación OTFS difunde la onda base sobre todo el espacio de TF 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 limitado del canal o nula en el transmisor. Una de las características fundamentales de la modulación OTFS es que permite convertir eficientemente el canal de desvanecimiento variante en el tiempo, que experimenta la modulación OFDM, en un canal sin desvanecimiento e independiente del tiempo, ya que opera en el dominio DD [9,24]. 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 las siglas del término en inglés, *Cooperative Multipoint*) 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, permitiendo la utilización de accesos múltiples no ortogonales (NOMA, por las siglas del término en inglés, *Non-Orthogonal Multiple Access*) [26,27].

Las técnicas de acceso múltiple definen cómo se comparten los recursos de ancho de banda entre los usuarios móviles y se han reconocido como la clave para la migración de redes celulares. En las generaciones pasadas de redes móviles, se ha utilizado el acceso múltiple ortogonal (OMA, por las siglas del término en inglés, *Orthogonal Multiple Access*), donde los anchos de banda ortogonal de los bloques de recursos se generan en los dominios de tiempo, frecuencia o código (intervalos de tiempo, subportadoras y códigos de extensión) y luego asignados a los usuarios de manera ortogonal, es decir, un bloque de recursos es ocupado únicamente por un único usuario [28]. El éxito de OMA en las redes móviles de la última generación se debe principalmente a que se puede implementar de forma de baja complejidad, aunque se conoce desde el trabajo de múltiples canales de acceso, que indica que la eficiencia del espectro de OMA es sub-óptima. La NOMA es un cambio de paradigma para el diseño de múltiples técnicas de acceso. La idea clave de NOMA es fomentar el uso compartido del espectro entre los usuarios móviles, donde la ganancia de eficiencia espectral superior de NOMA sobre OMA se obtiene utilizando de manera oportunista las condiciones del canal dinámico de los usuarios o los requisitos heterogéneos de QoS [29]. Se atiende a varios usuarios con diferentes condiciones de canal al mismo tiempo, frecuencia y código de extensión. Como tal, NOMA evita situaciones espectralmente ineficientes cuando los bloques de ancho de banda están ocupados únicamente por usuarios cuyas condiciones del canal son malas. NOMA logra introducir los multi-usuarios, utilizando técnicas de detección para garantizar que la interferencia de accesos múltiples, ocasionada en el espectro se suprime eficazmente con una complejidad computacional razonable.

Desde la perspectiva técnica, NOMA debería conservar el rendimiento superior prometido por diferentes formas 5G-NOMA, ya que logrará un soporte de conectividad masiva, obteniendo una mejor equidad del usuario y logrando un equilibrio entre la energía y la eficiencia espectral. Vale la pena señalar que la mayoría de los formularios 5G-NOMA existentes se han desarrollado para propósitos particulares. Tal es el caso de acceso múltiple de código disperso (SCMA, por las siglas del término en inglés, *Sparse Code Multiple Access*) que fue desarrollado principalmente para admitir la conectividad masiva para mMTC, mientras que el dominio de potencia NOMA es bien conocido por su capacidad para aumentar el rendimiento del sistema para eMBB [30]. Por lo tanto, un marco general es crucial para el despliegue de NOMA en sistemas 6G, donde las herramientas sofisticadas, como la optimización multi-objetivo y el aprendizaje multitarea, serán útiles para establecer dicho marco.

Con la modulación OFDM, la comunicación y el rendimiento se puede evaluar en el plano de TF con recursos del bloque (ORB, por las siglas del término en inglés, *Block Resource*). Sin embargo, la comunicación establece la calidad de los usuarios en los dispositivos móviles que se decide principalmente por el retardo y los efectos Doppler. Vale la pena señalar que las subportadoras OFDM tradicionales en el plano de DD no son ortogonales, lo que introduce grandes interferencias entre símbolos e interferencia entre portadoras para los dispositivos móviles. Para resolver este problema, se propuso un nuevo esquema de modulación, denominado OTFS, para proporcionar canales casi sin desvanecimiento para estos canales con doble dispersión [31].

Dado que el estado del canal para los usuarios de dispositivos móviles rápidos suele ser peor que el de los usuarios de dispositivos móviles lentos, NOMA puede ser una técnica eficaz aprovechando esta disparidad de canales. En los sistemas OTFS-NOMA, un móvil lento el usuario y un usuario móvil rápido se pueden agrupar en un clúster NOMA [32]. Como lo ha hecho el usuario de móvil lento un canal fuerte, el proceso cancelación sucesiva de interferencias (SIC por las siglas del término en inglés, *Successive Interference Cancellation*) lo lleva a cabo este usuario. A diferencia de los sistemas NOMA convencionales, el SIC en el usuario de móvil lento tiene dos etapas únicas [33]:

- El usuario de móvil lento primero decodifica el usuario de móvil rápido. La señal del usuario en el plano de DD.
- Después de cancelar la señal decodificada en la primera etapa a partir de la señal recibida, el usuario de móvil lento decodifica su señal en el plano TF. El usuario móvil rápido, decodifica su propia señal directamente en el plano de DD. Si se adiciona ORB, el esquema OTFS-NOMA proporciona beneficios tanto al usuario del móvil rápido como lento en términos de latencia y eficiencia espectral.

Por lo tanto, NOMA en 6G debe considerar las diferentes QoS de los usuarios de IoT, que incluyen no solo las velocidades de datos sino también la latencia y confiabilidad. Para satisfacer estas métricas de rendimiento, garantizando una conectividad masiva, el diseño del enlace descendente NOMA se vuelve orientado a QoS, y son preferibles las transmisiones semi-libres de concesión para el enlace ascendente NOMA.

Se debe tener en cuenta que varias iteraciones de SIC introducen largos tiempos de espera y altas probabilidades de interrupciones. Para NOMA de enlace descendente en 6G, el principal desafío es superar la alta latencia y la baja confiabilidad debido a SIC, especialmente para el escenario de usuarios masivos. Además, aplicar el SIC híbrido para mejorar la eficiencia espectral, permitiéndoles transmitir el flujo de datos de cada antena sin degradación del rendimiento de la comunicación, inclusive en los entornos de alta dispersión Doppler.

5.- CONCLUSIONES

La contribución principal de este artículo es el estudio de las características de la modulación OTFS sobre trayectos múltiples del canal de desvanecimiento rápido. Se podría decir que el mayor beneficio es su capacidad, logrando un mejor rendimiento al compartir los recursos de ancho de banda entre los usuarios; garantizando una conectividad masiva, al transformar un canal que se desvanece aleatoriamente dentro del espacio de TF en un canal estacionario. Refleja el gran impacto que puede significar la utilización de este tipo de modulación, combinada con otras tecnologías con un nuevo protocolo de transmisión como es el caso de OTFS-NOMA, siendo esta una tecnología clave para abordar problemas que se puedan presentar en la estructura de la 6G; facilitando el salto de las comunicaciones inalámbricas hacia nuevas tecnologías y así poder satisfacer la creciente demanda de los usuarios. Resulta interesante por los resultados que refleja la modelación OTFS por su flexibilidad, siendo un esquema de comunicación confiable para los canales multitrayecto. Otro beneficio es su capacidad para manejar fácilmente canales Doppler extremos, siendo esto no solo útil para las comunicaciones de alta movilidad de vehículo a vehículo, desde el tren de alta velocidad u otras aplicaciones 6G 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; permitiendo ajustar distintos anchos de banda para distintas aplicaciones y dividir la banda disponible en un número de usuarios que se adapte al escenario. Con esta configuración se puede cubrir una mayor área que con la modulación OFDM y así lograr un mejor aprovechamiento del limitado espectro radioeléctrico.

REFERENCIAS

1. You X H, Wang C-X, Huang J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts. *Sci China Inf Sci.* 2021; 64(1): 110301–110374.
2. Alwis C D, Kalla A, Pham Q V, et al. Survey on 6G Frontiers: Trends, Applications, Requirements, Technologies and Future Research. *IEEE Open Journal of the Communications Society.* 2021 abril 7; 2: 836- 886.
3. Porambage P, Gür G, Moya D P, Liyanage M, Ylianttila M. 6G Security Challenges and Potential Solutions. 2021 Joint European Conference on Networks and Communications (EuCNC) & 6G Summit. Porto; Portugal; junio 2021.p. 1-6.
4. Inomata M, et al. Terahertz Propagation Characteristics for 6G Mobile Communication Systems. 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Dusseldorf; Alemania; marzo 2021.p. 1-5.
5. Tang X, et al. Computing power network: The architecture of convergence of computing and networking towards 6G requirement. *China Communications.* 2021 Feb; 18(2): 175-185.
6. Pérez L A, Calderón A C, Fernández D T. Procedimiento para la implementación de la computación en la niebla en ciudades inteligentes, *Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, RIELAC.* 2021 enero-abril; 42(1): 45-57.
7. Khan M S, Kim Y J, Sultan Q, Joung J, Cho Y S. Downlink Synchronization for OTFS-Based Cellular Systems in High Doppler Environments. *IEEE Access.* 2021; 9: 73575-73589, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3079429.
8. Liu C, Liu S, Mao Z, Huang Y, Wang H. Low-Complexity Parameter Learning for OTFS Modulation Based Automotive Radar. *ICASSP 2021 - 2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP).* Toronto; Canadá; junio 2021.p. 8208-8212.
9. Shahjalal M, Ahmed M F, Alam M, M. Rahman H, Jang Y M. Fuzzy C-Means Clustering-Based mMIMO-NOMA Downlink Communication for 6G Ultra-Massive Interconnectivity. 2021 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC). Isla de Jeju; Corea del Sur; abril 2021.p. 421-424.
10. Lee Y L, Qin D, Wang L C, Sim G H. 6G Massive Radio Access Networks: Key Applications, Requirements and Challenges. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology.* 2021; 2: 54-66, doi: 10.1109/OJVT.2020.3044569.
11. Nawaz S J, Sharma S K, Mansoor B, Patwary M N, Khan N M. Non-Coherent and Backscatter Communications: Enabling Ultra-Massive Connectivity in 6G Wireless Networks. *IEEE Access.* 2021; 9: 38144-38186, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3061499.
12. Zhang X, Zhu Q, Poor H V. Age-of-Information for mURLLC Over 6G Multimedia Wireless Networks. 2021 55th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS). Baltimore; USA; marzo 2021.p. 1-6.
13. Mohammed S K. Time-Domain to Delay-Doppler Domain Conversion of OTFS Signals in Very High Mobility Scenarios. *IEEE Transactions on Vehicular Technology.* 2021 junio; 70(6): 6178-6183
14. Wei Z, Yuan W, Li S, Yuan J, Kwan Ng D W. Transmitter and Receiver Windows Designs for Orthogonal Time-Frequency Space Modulation. *IEEE Transactions on Communications.* 2021 April; 69(4): 2207-2223.
15. Castillo-Rodríguez R. Tecnología de modulación en el espacio de tiempo-frecuencia ortogonal. *Tecnología en Marcha.* 2021 enero-marzo; 34(1): 16-24.

16. Ge Y, Deng Q, Ching P C, Ding Z. Receiver Design for OTFS with a Fractionally Spaced Sampling Approach. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2021 julio; 20(7): 4072-4086.
17. Li S, Yuan J, Yuan W, Wei Z, Bai B, et al. Performance Analysis of Coded OTFS Systems over High-Mobility Channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2021 Septiembre; 20(9): 6033-6048.
18. Li S, Yuan W, Wei Z, Yuan J. Cross Domain Iterative Detection for Orthogonal Time Frequency Space Modulation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. septiembre 2021: 1-30, doi: 10.1109/TWC.2021.3110125.
19. Bhat V S, Dayanand S G, Chockalingam A. Performance Analysis of OTFS Modulation with Receive Antenna Selection. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021 Abril; 70(4): 3382-3395.
20. Wei Z, Yuan W, Li S, Yuan J, Kwan D W. Performance Analysis and Window Design for Channel Estimation of OTFS Modulation. *ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications*. Montreal; Canadá; junio 2021.p. 1-7.
21. Pandey B C, Mohammed S K, Raviteja P, Hong Y, Viterbo E. Low Complexity Precoding and Detection in Multi-User Massive MIMO OTFS Downlink. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021 mayo; 70(5): 4389-4405.
22. Alvarez Y, Leguizamón-Páez M A, Londoño T J. Risks and security solutions existing in the Internet of things (IoT) in relation to Big Data. 2020 septiembre 4; 23(1):1-13.
23. Khan M S, Kim Y J, Sultan Q, Joung J, Cho Y S. Downlink Synchronization for OTFS-Based Cellular Systems in High Doppler Environments. *IEEE Access*. 2021 mayo 24; 9: 73575-73589.
24. Bhat V S, Chockalingam A. Performance Analysis of OTFS Modulation with Transmit Antenna Selection. 2021 *IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring)*. Helsinki; Finland; abril 2021.p. 1-6.
25. Naikoti A, Chockalingam A. Low-complexity Delay-Doppler Symbol DNN for OTFS Signal Detection. 2021 *IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring)*. Helsinki; Finland; abril 2021.p. 1-6.
26. Shi D. et al. Deterministic Pilot Design and Channel Estimation for Downlink Massive MIMO-OTFS Systems in Presence of the Fractional Doppler. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2021:1-14, doi: 10.1109/TWC.2021.3081164.
27. Wei Z, Yuan W, Li S, et al. Orthogonal Time-Frequency Space Modulation: A Promising Next-Generation Waveform. *IEEE Wireless Communications*. 2021 Agosto; 28(4): 136-144.
28. Shahjalal M, Ahmed M F, Alam M, Rahman M H, Jang Y M. Fuzzy C-Means Clustering-Based mMIMO-NOMA Downlink Communication for 6G Ultra-Massive Interconnectivity. 2021 *International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIC)*. Isla de Jeju; Corea del Sur; abril 2021.p. 421-424.
29. Lee H, Jung I, Heo J, Hong D. Exploiting Intentional Time-Domain Offset in Downlink Multicarrier NOMA Systems. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2021 julio; 10(7): 1577-1580.
30. Zhang Z, Zhang C, Jiang C, Jia F, Ge J, Gong F. Improving Physical Layer Security for Reconfigurable Intelligent Surface Aided NOMA 6G Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021 mayo; 70(5): 4451-4463.
31. Ge Y, Deng Q, Ching P C, Ding Z. OTFS Signaling for Uplink NOMA of Heterogeneous Mobility Users. *IEEE Transactions on Communications*. 2021 mayo; 69(5): 3147-3161.
32. Chatterjee A, Rangamgari V, Tiwari S, Das S. Nonorthogonal Multiple Access with Orthogonal Time-Frequency Space Signal Transmission. *IEEE Systems Journal*. 2021 marzo; 15(1): 383-394.
33. Bariah L, Muhaidat S, Sofotasios P C, Bouanani F E, et al. Large Intelligent Surface-Assisted Nonorthogonal Multiple Access for 6G Networks: Performance Analysis. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021 April; 8(7): 5129-5140.

CONFLICTO DE INTERESES

No existe conflicto de intereses entre los autores, ni con ninguna institución a la que cada uno está afiliado, ni con ninguna otra institución.

Las opiniones expresadas aquí son únicamente responsabilidad de los autores y no representan la posición de la institución o las instituciones a las que están afiliados.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Los tres autores participaron en la conceptualización de la investigación, el diseño de metodología y la validación de los resultados.

1. **Jorge Luis Blanco Orta:** Conceptualización, Curación de Datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Validación-Verificación, Visualización, Administración de proyecto, Redacción-borrador original, Redacción-revisión y edición.

2. **María del Carmen Guerra Martínez:** Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Validación-Verificación.
3. **Francisco Reinerio Marante Rizo:** Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Supervisión, Validación-Verificación.

AUTORES

Jorge Luis Blanco Orta, Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Emisora Municipal de Radio Mariel, Artemisa, Cuba, E-mail: jorgeluisbo@nauta.cu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9592-7818>. Sus intereses de investigación incluyen: identificación de sistemas de comunicación inalámbricas, estudio de las limitaciones para la infraestructura para la 6G, análisis de los retrasos localizados y degradaciones Doppler.

María del Carmen Guerra Martínez, Ingeniero en Telecomunicaciones, Master en Ciencia, Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”, Habana, Cuba, E-mail: mariagm@tele.cujae.edu.cu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1989-4414>. Intereses de investigación: identificación de sistemas de comunicación inalámbrica y estudio de las limitaciones para la infraestructura para la 6G, modelación de sistemas físicos MIMO.

Francisco Reinerio Marante Rizo, Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”, Habana, Cuba, E-mail: marante@tele.cujae.edu.cu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3277-1371>. Intereses de investigación: identificación robusta de sistemas dinámicos con grandes incertidumbres, control de procesos y análisis de uso de redes heterogéneas.



Esta revista se publica bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Sin Derivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)