

Hacia la próxima generación de sistemas de Radio sobre Fibra de banda ancha: retos tecnológicos en la banda de las ondas milimétricas

Toward Next Generation Broadband Radio-over-Fiber Systems: Technological Challenges in the Millimeters-Wave Band

Jhon James Granada Torres*
Universidad Nacional de Colombia

Claudia Milena Serpa Imbett**
Instituto Tecnológico Metropolitano (Colombia)

Gloria Margarita Varón Durán***
Universidad Nacional de Colombia

Neil Guerrero González****
Universidad de Antioquia (Colombia)

* Auxiliar docente del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Colombia - sede Bogotá. Ingeniero Electrónico, Universidad Nacional de Colombia - sede Manizales. jjgranadato@unal.edu.co.

Correspondencia: Carrera 45 n° 26 - 85 - Edificio Uriel Gutiérrez. Tel. 3008266407.

**Académica investigadora, Centro de Investigación Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM). Magister en Ciencias Físicas, Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín. claudiaserpa@itm.edu.co

*** Profesora asistente del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia. Doctora en "Optoélectronique et hyperfréquence" de l'Université de Toulouse. gmvarond@unal.edu.co

****Profesor Universidad de Antioquia. Doctor en Fotónica de la Universidad Tecnológica de Dinamarca. neguego@gmail.com

Resumen

En este artículo se presenta una revisión de los trabajos científicos más relevantes de la tecnología de radio sobre fibra. Se exponen los aspectos más importantes en la evolución del estado del arte de esta tecnología, basado en la descripción de sus principales dispositivos y las pruebas experimentales más recientes que sugieren la integración entre las redes inalámbricas y cableadas, además de la convergencia de servicios en redes heterogéneas. En esta revisión se identificó una tendencia hacia el incremento en la frecuencia de la portadora de radiofrecuencia en la banda de las ondas milimétricas (75 - 100 GHz), que indican que la próxima generación de sistemas de radio sobre fibra operará en esta banda de gran capacidad disponible. El gran reto consiste en lograr transmisiones inalámbricas en estos sistemas a velocidades multiGbps en un futuro cercano.

Palabras clave: Banda W, estaciones base (BS), oficina central (CO), onda milimétrica (MMW), radio sobre fibra (RoF).

Abstract

In this paper, we present a review based in the most relevant scientific works of radio-over-fiber technology. The most important issues of the state-of-the-art evolution are exposed. We show a description of the main devices and the most recent experimental tests that suggest the integration between wired and wireless networks, and the convergence in heterogeneous networks. In this review, we identify a trend toward the increase of the radiofrequency-carrier in the millimeter-wave bands (75-100 GHz) which show that the next generation of radio-over-fiber system will operate in this band of large capacity available. The challenge consisting of reaching multi-Gbps wireless transmissions in these systems very soon.

Keywords: Base station (BS), central office (CO), millimeter-wave (MMW), radio-over-fiber (RoF), W band.

Fecha de recepción: 22 de julio de 2011
Fecha de aceptación: 13 de septiembre de 2011

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los usuarios finales demandan una conexión inalámbrica permanente desde sus dispositivos móviles a una alta velocidad de transmisión de datos, sin necesidad de dirigirse a puntos de acceso cableados. Sin embargo, los servicios inalámbricos no poseen suficiente ancho de banda para proveer altas capacidad de transmisión. Actualmente, las redes Ethernet (GbE) suministran hasta 1 Gb para sistemas inalámbricos, y se espera muy pronto la implementación de 10 GbE [1]. Para las transmisiones a velocidades de multiGbps, se estudian los posibles escenarios de implementación de sistemas inalámbricos operando a frecuencias portadoras extremadamente altas (EHF, *extremely high frequency*), cuyo rango oscila entre 30 y 300 GHz. Este rango de frecuencias es conocido como la banda de ondas milimétricas (MMW, *millimeter wave*), que dispone de más ancho de banda en el rango de los GHz. En Norteamérica y Corea del Sur la frecuencia de los 60 GHz posee un ancho de banda de 7 GHz, en un rango de 57-64 GHz, y en Japón, el rango es de 59-66 GHz; además, la Unión Europea está aún en proceso de una ubicación similar en su ancho de banda y rango de operación [2]. Consecuentemente, el ancho de banda de los sistemas inalámbricos que operan alrededor de los 60 GHz están siendo estudiados; por ejemplo, en el grupo IEEE 802.15.3c. se enfocan en distancias de transmisión de rango corto de hasta 10 m y se proponen sistemas inalámbricos internos en el rango de las MMW para la provisión de velocidades mayores que 1 Gbps [3].

Para el desarrollo de sistemas que trabajen en bandas de MMW se presentan problemas, como por ejemplo, el costo de los equipos electrónicos utilizados y el aumento de las estaciones base (BS, *base station*) que deberían implementarse. Además, la transmisión de señales de MMW necesita mayor potencia, debido a las altas pérdidas en el medio inalámbrico, lo cual genera inconvenientes en la implementación. Algunos de estos inconvenientes son solucionados con la tecnología de radio sobre fibra (RoF, *Radio-over-Fiber*), la cual es una de las soluciones más prometedoras para las redes de acceso. Las ventajas de usar la fibra óptica como medio para transmitir señales de MMW consiste en su inmunidad a las interferencias electromagnéticas, la gran capacidad de transmisión, pérdidas en la propagación entre los 0,2-0,5 dB/km, dependiendo del tipo de fibra utilizada, y la longitud de onda de operación, siendo estos valores muy

bajos con respecto al cobre y el aire [4]. Por otra parte, los sistemas RoF que operan en la banda MMW requieren de células pequeñas debido a la corta distancia de propagación [5]; de hecho, los enlaces de radio de MMW están siendo considerados para la implementación de sistemas micro o pico celulares de banda ancha, redes de acceso y redes inalámbricas internas. La convergencia de las comunicaciones inalámbricas y los sistemas de fibra óptica se han convertido en una técnica prometedora para proveer servicios de acceso inalámbrico de banda ancha, en un rango de aplicaciones que incluyen soluciones en redes de acceso, en extensión de la cobertura y de la capacidad en las redes de radio. En este sentido, los sistemas RoF proporcionan la sinergia adecuada entre la óptica y la radio, lo cual permite la fusión de estas tecnologías, que han sido fundamentales en el avance de las telecomunicaciones, en las que las redes de acceso inalámbrico y de fibra están requiriendo de actualizaciones, con el fin de responder al aumento exponencial de la demanda de ancho de banda de las sociedades modernas de la información. Se espera que la próxima generación de redes de acceso garantice la disposición de servicios de banda ancha, y aplicaciones multimedia a los usuarios finales en cualquier momento y lugar.

En este artículo se exponen los tópicos más importantes en la evolución del estado del arte y desarrollo de la tecnología RoF, basada en la revisión bibliográfica de los trabajos científicos más recientes y relevantes en este tema. Se realizó una sistematización de los resultados más destacados reportados en los artículos científicos relacionados con la transmisión RoF en la banda MMW, con el fin de exponer las características de la arquitectura de estos sistemas, y los avances y singularidades en el diseño de los esquemas de modulación y detección. Basados en esta sistematización se identificaron los aspectos más importantes que perfilan la tendencia de los sistemas RoF-MMW, además de los retos tecnológicos que deben ser enfrentados en el diseño de dispositivos y receptores digitales. Finalmente, se hace una descripción de las características más significativas de las transmisiones RoF en la banda MMW, sus principales limitantes, y la importancia en el diseño de sistemas de corto alcance de gran ancho de banda. Nuestros hallazgos muestran la importancia de adelantar investigaciones en sistemas que puedan soportar la convergencia de servicios entre la red de acceso cableada y la inalámbrica, además de contribuir al desarrollo de sistemas capaces de distribuir diferentes servicios simultáneamente usan-

do la misma infraestructura. De esta manera, la tendencia muestra que el objetivo es alcanzar conexiones inalámbricas a las velocidades de transmisión de conexiones fijas de hasta 10 Gbps. Retos que se encaran con el desarrollo de sistemas RoF operando en la región de las MMW, de mayor ancho de banda. Sin embargo, aún es necesario el desarrollo de nuevos dispositivos que operen en este rango de frecuencias, además de mejorar y desarrollar las técnicas de modulación existentes, y perfeccionar los nuevos receptores digitales coherentes basados en procesamiento digital de señales (DSP, *Digital Signal Processing*). Entre otros aspectos, es de gran relevancia la compensación de dispersión en la fibra usando técnicas ópticas o basadas en DSP, debido a que este fenómeno de la fibra es el gran limitante para transmisiones en la banda W (75 a 110 GHz), en la cual se prevé operarán los sistemas RoF futuros para el soporte de las redes de acceso de próxima generación de banda ancha.

2. ARQUITECTURA DE SISTEMAS RoF

Sistemas RoF que operan en la banda de las MMW

Los sistemas de RoF transmiten señales de radio a través de la fibra óptica directamente hasta la BS. Cuando existen varias BS, un dispositivo pasivo, conocido como divisor (*splitter*) [6], divide la señal a las BS, como se observa en la figura 1:

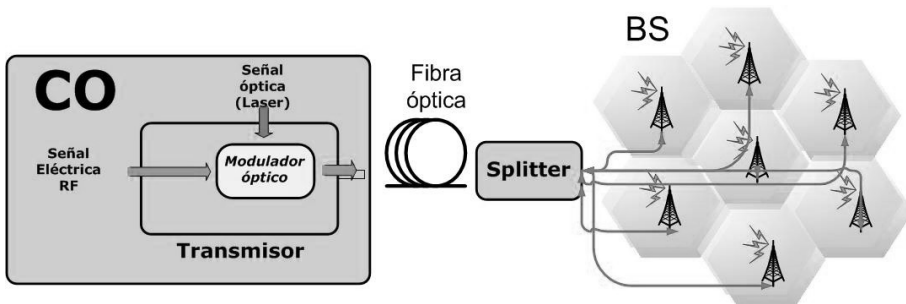


Figura 1. Sistema de radio sobre fibra

Una de las ventajas más importantes de la tecnología RoF es la habilidad de concentrar lo más costoso del equipo de alta frecuencia en un lugar central u oficina central (CO, *Central Office*), lo cual permite la instalación del equipo restante en un lugar distante, debido a su sencillez, bajo peso,

tamaño reducido y bajo consumo de potencia [6]. Entre otras ventajas adicionales se destaca el gran ancho de banda que proporciona la fibra en el transporte de señales de radiofrecuencia (RF). También el aumento de la flexibilidad operacional y el potencial para reutilizar o compartir entre una cantidad determinada de usuarios los servicios implementados [7]. Con los sistemas de RoF, las BSs solo son utilizadas para realizar la conversión opto-eléctrica, por lo que su configuración es más simple e independiente del protocolo y del formato de modulación [8]. Hoy en día, la implementación y uso de servicios basados en IP se está llevando a cabo con conexiones de forma más inalámbrica, donde los usuarios finales por medio de sus teléfonos inteligentes acceden a internet y usan algún tipo de servicio [2]. En la figura 2 se muestra una red heterogénea de banda ancha de próxima generación para diversos servicios.

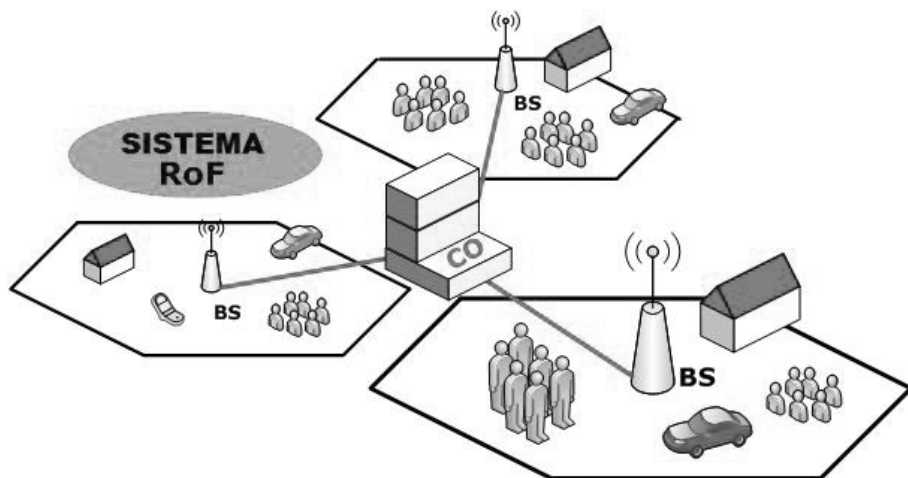


Figura 2. Redes de acceso heterogéneas de banda ancha de próxima generación [9]

Para tener uniformidad en la cobertura, los sistemas inalámbricos se configuran en un sistema de antenas distribuidas (DAS, *Distributed antennas system*). Su implementación es un método común para extender la cobertura inalámbrica desde múltiples BS para múltiples ubicaciones [10]. Los sistemas RoF están diseñados para desempeñar funciones de sistemas de radio, además de funciones de transporte y movilidad. Todas estas funciones incluyen modulación de datos, procesamiento de la señal y conversión de frecuencia.

Modulación y detección de señales en sistemas RoF

La modulación en los sistemas RoF se genera a partir de una modulación eléctrica y una óptica. Primero, se tiene la señal eléctrica modulada en formatos de amplitud, fase o frecuencia como en un sistema eléctrico convencional. La señal eléctrica generada debe tener las especificaciones requeridas por las aplicaciones inalámbricas, como GSM, UMTS, WLAN, WiMAX, entre otras (véase la tabla 1).

Tabla 1
Estándares inalámbricos

Estándares inalámbricos	Velocidad de transmisión	Frecuencia (Portadora)	Alcance
ZigBee	< 250 kbps	915 MHz, 2.4 GHz	Corto
WiBree	< 1 Mbps	2.4GHz	Corto
Bluetooth	< 1 Mbps	2.4GHz	Corto
Wireless USB	< 480 Mbps	3.1 GHz - 10.6 GHz	Corto
802.11b	< 11 Mbps	2.4GHz	Medio
802.11a/g	54 Mbps	2.4 GHz / 5 Ghz	Medio
802.11n	< 300 Mbps	2.4 GHz / 5 Ghz	Medio
GSM	9.6 kbps	900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz	Largo
GPRS 2.5G	171.2 kbps	900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz	Largo
EDGE 2.75G	473.6 kbps	900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz	Largo
UMTS (3G)	2 Mbps	1.8GHz a 2.2GHz	Largo
HSDPA 3.5G	14 Mbps	1900 MHz, 2100 MHz	Largo
HSPA+	42 Mbps	1700 MHz, 2100 MHz	Largo
WRAN	18 Mbps	54 Mhz - 862 MHz	Largo
WiMAX	75 Mbps	2.3 GHz, 2.5 GHz, 3.5 GHz y 5GHz	Largo
NBWA	80 Mbps	< 3.5 GHz	Largo
LTE 4G	< 144 Mbps	1900 Mhz - 3600 MHz	Largo
LTE advanced	< 1 Gbps	1900 Mhz - 3600 MHz	Largo
WiGig	7 Gbps	2.4 GHz, 5 GHz y 60 GHz	Corto
Wireless HD	25 Gbps	60 GHz	Corto

En esta arquitectura de RoF, la portadora óptica es modulada por una señal de radio con una portadora de radiofrecuencia (RF), luego transmitida por un enlace de fibra óptica entre una CO y un conjunto de BSs

(véase las figuras 1 y 2). El proceso de conversión eléctrico-óptica se hace por medio de la modulación del láser, la señal eléctrica permite que el láser module su intensidad óptica de forma "On - Off", y comúnmente se usa un fotodetector en el receptor, donde la señal es convertida del dominio óptico al dominio eléctrico antes de ser amplificada y radiada por una antena. Estos sistemas se conocen como IM/DD (Modulación de intensidad/ Detección directa). Los sistemas IM/DD son los más simples y los más implementados, pero para frecuencias mayores que los 10 GHz, modular el láser directamente trae problemas, debido a que el ancho de banda de este dispositivo es limitado. Por tal razón, para frecuencias mayores que los 10 GHz, los sistemas IM/DD usan modulación externa [11]. En este tipo de modulación son ampliamente usados el modulador Mach Zender (MZM) y el modulador de electro-absorción (EAM). En la figura 3 se presenta una arquitectura común de un sistema RoF.

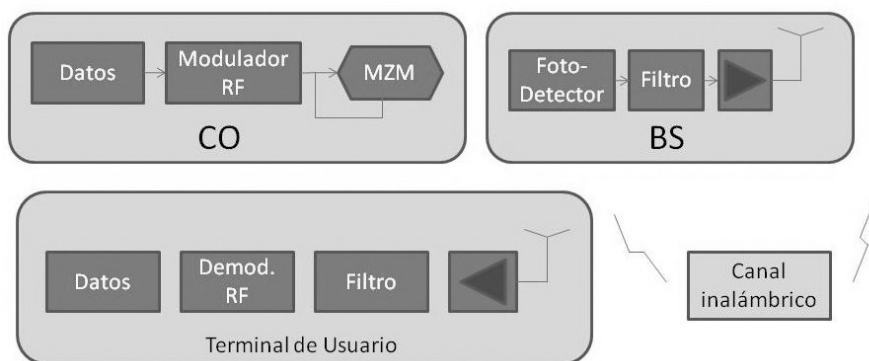


Figura 3. Arquitectura de un sistema RoF [12]

Otro método utilizado para la transmisión y transporte de señales RF por la fibra es la generación óptica remota de forma heterodina. Es un método en el cual más de una señal óptica es generada por la fuente de luz; una de las cuales es modulada por la señal que conlleva la información, luego son mezcladas o heterodinadas por un fotodetector o por un mezclador externo para formar la señal RF de salida [11]. La generación óptica heterodina tiene como ventaja la generación de señales de alta frecuencia y es solo limitada por el ancho de banda del fotodetector. La generación heterodina soporta una detección de más alta potencia (mayor ganancia del enlace) y mayor relación portadora a ruido (CNR, *carrier-to-noise ration*) [13], ya que

bajo ciertas condiciones las potencias ópticas de los dos campos ópticos interfieren, lo cual contribuye al aumento de la potencia de la señal óptica generada.

De otra parte, los enlaces RoF que modulan la fase (PM, *phase modulated*) de la señal óptica presentan ventajas con respecto a los sistemas IM/DD, además de permitir la implementación de unas BSs más simples [14]. Sin embargo, los enlaces RoF-PM requieren un receptor óptico coherente combinados con módulos de DSP para la detección y la demodulación de señales lineales. La detección coherente en sistemas ópticos ha sido demostrada para realizar la demodulación de señales lineales de MMW, codificada sobre la fase de una portadora óptica [9]. La principales ventajas ofrecida por los sistemas RoF-PM con detección coherente sobre los sistemas RoF IM/DD son: 1) mayor rango dinámico de estímulo libre (SFDR, *larger spur-free dynamic range*), 2) transmisión óptica de datos con mayor eficiencia espectral en formatos avanzados de modulación, 3) mayor ancho de banda y selectividad del canal y 4) menores requerimientos en la potencia de la señal de transmisión. Los receptores coherentes basados en DSP reconstruyen la señal microondas transmitida a partir de la fase óptica de la portadora, para luego realizar la demodulación. En la figura 4 se muestra un esquema de un receptor digital coherente para sistemas RoF-PM.

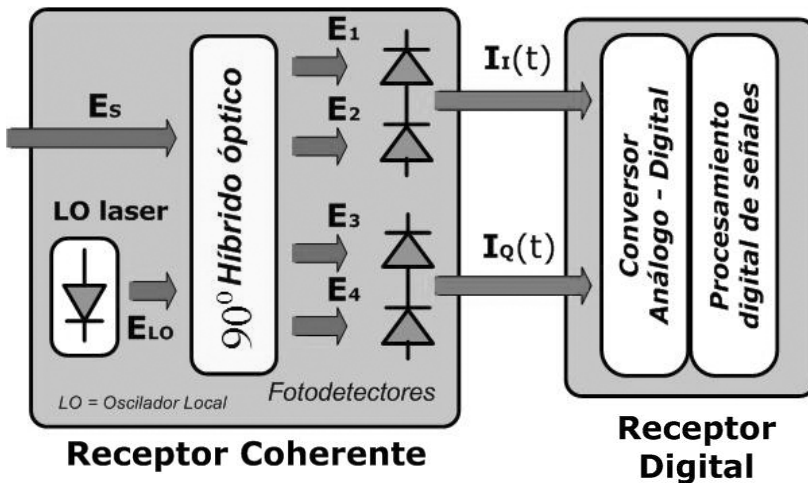


Figura 4. Receptor digital coherente para sistemas RoF-PM

Las principales ventajas de los receptores digitales coherentes comparado con los receptores tradicionales son: 1) costo efectivo y de tamaño reducido, 2) compensación adaptiva de las imperfecciones del canal en el dominio electrónico usando técnicas de procesamiento de señales, 3) versatilidad en el diseño y robustez en la operación, lo cual permite diferentes formatos usando el mismo *hardware* en el receptor [9].

3. EVOLUCIÓN Y TENDENCIA DE LA TECNOLOGÍA ROF

Los usuarios finales de las redes inalámbricas y cableadas están demandando grandes volúmenes de información a elevadas velocidades. En este escenario, los sistemas basados en RoF y de fibra hasta el hogar (FTTH, *Fiber to the Home*) son los candidatos más prometedores para dar soporte a estos requerimientos de las redes de acceso [15]. Las redes de acceso de próxima generación progresan hacia la convergencia de servicios cableados e inalámbricos, con el objetivo de ofrecer eficientemente servicios de gran ancho de banda a bajo costo. Los sistemas RoF lideran el progreso de las redes de acceso mediante los avances significativos en aspectos como: el incremento en la capacidad de transmisión y el ancho de banda, así como la disminución de los costos de las redes fijas y móviles [16]. En esta red de configuración híbrida hay un punto clave en el éxito de su operación que consiste en la generación y la transmisión de señales a alta velocidad en modo cableado o inalámbrico de manera simple y confiable.

En los últimos años se ha observado el gran avance de las aplicaciones multimedia como la televisión de alta definición (HDTV, *high definition television*) y video 3D, las cuales exigen un gran ancho de banda, no suministrado totalmente por las actuales interfaces, para el acceso inalámbrico de estos servicios [17]. Este hecho ha estimulado el desarrollo de sistemas de comunicación inalámbrica a altas velocidades, para la provisión de servicios con la misma capacidad de transmisión de las redes cableadas. Por esta razón, se empezó a estudiar nuevas regiones del espectro, debido a que la alta demanda en la tasa de transmisión produjo una congestión en las bandas actuales: GSM, W-CDMA, Wi-MAX, entre otras [18]. Este suceso resultó en un gran interés de la comunidad científica por investigar en los temas referentes a la generación y transmisión de señales microondas y de onda milimétrica. Aunque los sistemas convencionales de redes WLAN (IEEE802.11a, b y g) ofrecen teóricamente tasas de transmisión de

54 Mbps, las alternativas más modernas, como *ultrawideband* (UWB) [19] y sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), son capaz de extender la velocidad de transmisión inalámbrica a varios cientos de Mbps, teniendo como objetivo alcanzar hasta 1 Gbps en un futuro cercano [3]; sin embargo, esta velocidad no es suficiente para transmitir señales de televisión HDTV en vivo, dado que solo un stream de HDTV (1080i) sin comprimir requiere una tasa de transmisión de alrededor de 1,5 Gbps [3].

Hace casi dos décadas se empezaron a estudiar los sistemas de RoF con MMW, pero estos no modulaban la señal de MMW dentro de la portadora óptica en la fibra, por lo que se necesitaba una BS compleja para la conversión [20]. El uso de señales de radio sobre fibra en sistemas de antenas distribuida (F - DAS) desplaza el procesamiento electrónico de la antena a un punto central (CO), abriendo nuevas oportunidades en la creación de redes híbridas, las cuales aún no han sido plenamente explotadas. Cambiar la ubicación de los equipos significa que la capacidad ahora se puede reasignar a cualquier punto de la red, en lugar de ser fijada por el equipo que se instala en una BS particular.

Otro de los grandes retos que se tienen en el área de la RoF es poder tener unidades de antenas remotas (RAU, *remote antenna units*) que puedan cubrir múltiples bandas facilitando su distribución. En este escenario se podrían implementar esquemas de asignación dinámica de ancho de banda, con el fin de proporcionar eficientemente el ancho de banda a los usuarios finales, los cuales cambian dinámicamente su demanda de acuerdo con los servicios requeridos en diferentes instantes y lugares. De esta manera, este tipo de redes ofrece una ventaja adicional basada en la posibilidad de cambio de capacidad asignada, la cual puede variar en la red de acuerdo con las densidades de tráfico y las demandas de los usuarios [5].

El enorme ancho de banda ofrecido por la fibra tienen otros beneficios aparte de la alta capacidad para transmitir señales microondas. El gran ancho de banda óptico permite el procesamiento de señales a alta velocidad que podría ser más difícil de hacer en sistemas electrónicos; por ejemplo, el filtrado de señales de MMW se puede lograr convirtiendo la señal eléctrica a óptica y realizar el filtrado usando componente ópticos basados en redes de Bragg en fibra óptica (FBG, *Fiber Bragg Grating*) o el interferómetro Mach Zender (MZI, *Mach Zender Interferometer*). No

obstante, el gran problema al transmitir señales de MMW sobre fibra óptica es la degradación de la señal debido a la dispersión de la fibra. Una de ellas, la dispersión cromática, es el fenómeno más relevante que afecta estos sistemas, ya que causa la interferencia intersímbolo (ISI, *intersymbol interference*), debido al ensanchamiento temporal de los pulsos en el receptor [21]. Este fenómeno depende de las componentes espectrales de la fuente de luz, de la frecuencia de la portadora y la longitud de la fibra. Los sistemas inalámbricos de MMW con canales de ancho de banda por encima de los 10 GHz podrían fácilmente proveer capacidades multi-Gbps, incluso con formatos de modulación simples como ASK o QPSK. Estos sistemas son sugeridos como una posible alternativa no solo para el acceso óptico sino también para futuras redes de retorno (*backhauling*) móviles, debido a que evitarían el cuello de botella que presentarían las futuras redes LTE (*Long term evolution*), que llegarían a velocidades de 1 Gbps [2]. La banda ubicada en el rango de los 75 y 110 GHz, denominada banda W, es de interés particular, debido a que presenta una ventana de transmisión más amplia, con pérdidas mínimas de propagación, y sería más adecuada para aplicaciones multiGbps en exteriores en un futuro cercano [22]. Se espera la introducción del estándar Ethernet inalámbrico de 10 Gbps, que soporte la convergencia de sistemas cableados e inalámbricos en el acceso, y así permita garantizar una adecuada función de *backhauling* en una red de telefonía móvil en un futuro próximo [3].

Los principales retos de los sistemas fotónicos basados en MMW son: mejorar el desempeño de los dispositivos que los integran, adaptar estos sistemas a la región espectral de operación, aumentar la eficiencia de conversión de los dispositivos opto-electrónicos e incrementar su rango dinámico, compensar las dispersiones de la fibra, y a su vez, reducir los costos de estos avances tecnológicos [23], [24]. Se espera que la tecnología RoF pueda proveer una arquitectura que soporte múltiples servicios y estándares de radio, que sea flexible y confiable, con BS cada vez más simplificadas.

4. DISPOSITIVOS Y PRUEBAS EXPERIMENTALES RECIENTES: RETOS TECNOLÓGICOS

Dispositivos en sistemas RoF

Los elementos fundamentales en un sistema RoF son dispositivos que permiten la modulación de las señales, o el control, o la detección a frecuencias

muy altas. Desde la invención del primer semiconductor láser se ha progresado en el diseño de láseres que admiten modulaciones directas con anchos de banda microondas e inclusive en el rango MMW. Actualmente, en varias aplicaciones de sistemas RoF se utilizan láseres de diodo con realimentación distribuida (DFB, *Distributed Feedback Laser*), debido a su ancho de línea estrecho, su bajo ruido y alta linealidad. Investigadores de la Universidad de California demostraron una frecuencia de resonancia de 72 GHz en un láser DFB [25] y a 50 GHz para un láser de cavidad vertical llamado VCSEL (*Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser*) [26]. El uso de los láseres VCSEL, para modulación directa en sistemas RoF, se ha incrementado debido a factores como su bajo coste y a su capacidad de transmitir a velocidades multiGbps en enlaces de fibras multimodo, en la primera ventana a 850 nm y la segunda ventana de transmisión a 1300 nm [27].

Para sistemas con modulación externa usando el MZM, se han alcanzado transmisiones hasta de 14 Gbps con portadoras de 60 GHz en rango corto [28] y con modulaciones de desplazamiento en fase binaria (BPSK, *Binary phase shift keying*) y en amplitud (m-ASK, *amplitude shift keying*) con portadoras hasta 40 GHz [29]. En estos sistemas se tiene como limitación las no linealidades del MZM [30].

En [31] demuestran experimentalmente un “transceiver” fotónico, basado en modulación de fase de una fuente óptica de gran ancho espectral para el transporte de señales RoF sobre 20 km de SMF. En [32] proponen y demuestran un esquema de un convertidor óptico para la conversión de datos de 1 Gbps en banda base (BB, *baseband*) a MMW de 40 GHz. Este desarrollo muestra el cumplimiento de uno de los retos para sistemas RoF, pues estos convertidores son de bajo costo y además poseen un tamaño compacto, lo que los hace ideales para aplicaciones altamente integradas. Para sistemas de corto alcance se reporta en [1] la creación de un transmisor RoF sin amplificación RF, con el que se demostró una transmisión a 12,5 Gbps sobre distancias inalámbricas de hasta 3,1 m con una sensibilidad en el receptor de aproximadamente -45,4 dBm. Para enlaces de acceso de rango medio se usó un amplificador eléctrico en el transmisor RoF para este caso, en una transmisión a 7,5 Gbps se demostró en exteriores con línea de vista, una distancia máxima alcanzada de 36 m.

Tradicionalmente, los dispositivos electrónicos de MMW se fabrican con tres y hasta cinco componentes, entre los que se destacan el GaAs e InP [20], sin embargo, estas tecnologías son muy costosas y menos disponibles que la conocida CMOS [33]. Con esta tecnología se creó un amplificador de bajo ruido que opera en la banda de los 60 GHz [34]. En [20] muestran una comparación del rendimiento de los amplificadores de bajo ruido CMOS, donde el rango de ganancia está entre 15 y 22.4 dB, y del ruido, entre 4,4 y 6,1 dB.

Transmisiones alcanzadas en RoF

En la banda W [35], donde se prevén las redes de próxima generación, son relevantes las dispersiones de la fibra, por lo tanto, métodos como la multiplexación de subportadoras (SCM, *subcarrier multiplexing*) ya presentan inconvenientes en esta banda de transmisión. En [8] nombran algunos métodos utilizados para la generación de señales de MMW para enlaces de subida y de bajada sin que la señal sufra un desvanecimiento considerable; además proponen un sistema de acceso RoF a 60 GHz que alcanza una transmisión de 1 Gbps por medio de una técnica heterodina en el dominio óptico.

Para sistemas con frecuencias más bajas se ha podido compensar los efectos de la dispersión cromática. Por ejemplo, en [36] se expone una red WiMax que alcanza distancias hasta de 410 km en fibras monomodo gracias a la unión de fibras compensadoras de dispersión elaboradas a partir de FBGs. En frecuencias WiMax de 3,5 GHz solo alcanzaban distancias de 180 km. En [37] exponen un sistema WiMax similar pero que usa OFDM, que logra distancias de 792 km a 120 Mbps. Con otros sistemas que OFDM se han logrado transmisiones a 16 Gbps sobre 20 km de fibra y 6 m de distancia inalámbrica usando portadora de 24 GHz [38].

La distancia de transmisión a frecuencias de MMW se ve muy limitada por el desvanecimiento de la potencia; este desvanecimiento es debido a la atenuación propia de la fibra y a la dispersión cromática del enlace [15]. En [5] estudian el impacto de la dispersión cromática para el transporte de señales RF a 64 GHz y velocidades de 2,5 Gbps, en el cual exponen las limitaciones en las distancias de transmisión para modulación de portadora suprimida (OCS, *optical carrier suppression*) y de banda lateral

única con portadora (OSSB+C, *Optical single sideband with carrier*). Este trabajo reporta experimentos en los que se alcanzan distancias de 34 y 95 km, respectivamente, sin degradación de la señal por la dispersión cromática.

Resultados experimentales en [39] muestran un sistema RoF a 60 GHz con formatos de modulación QPSK y ASK (véase la figura 5) que tolera la dispersión cromática debido a la inherente modulación de banda lateral única (BLU) producida por la inyección de bloqueo del láser VCSEL. A diferencia de la modulación estándar, la BLU elimina la banda que transmite la portadora y la banda redundante que contiene la información, optimizando la modulación gracias a que evita el gasto innecesario de energía, permitiendo el alcance de distancias de transmisión de 20 km a 2 Gbps. En este caso, la dispersión de la fibra y la distorsión inducida por el modulador óptico deben ser tenidas en cuenta para los diseños de este tipo de redes.

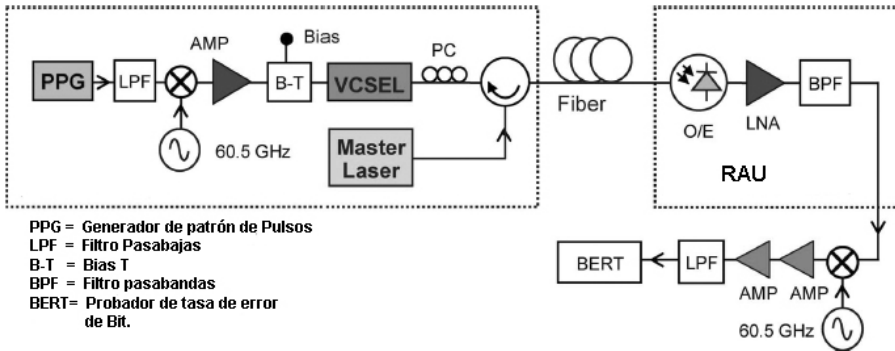


Figura 5. Sistema RoF experimental, con modulación directa del VCSEL a multiGbps a 60 GHz [30]

En [35] construyen un sistema RoF que usa una portadora de MMW de doble banda lateral con portadora única (DSB-SC, *double side band - suppressed carrier*) con modulación de amplitud (OOK, *on-off keying*) para transmisiones internas, que alcanza un BER de 10^{-9} a 3,1 m.

En [40] analizan el rendimiento de una transmisión en la banda de los 60 GHz a 4 Gbps y muestran que es posible compensar los efectos de la dispersión cromática de la fibra en estos sistemas usando un método sen-

cillo de ecualización como el de prealimentación (*feed-forward*); además demuestran el uso de un sistema RoF para generar señales a 60 GHz moduladas en QPSK a 7 Gbps.

Un algoritmo implementado recientemente en los receptores basados en DSP es el de *k-means*, el cual es un método novedoso descrito en [9]. El algoritmo de “k-means” es menos complejo que algoritmos como el de Viterbi, que requiere mayor información estadística. “K-means” permite la recuperación de la portadora en cualquier formato de modulación, además estima el desplazamiento de fase del sistema. Este algoritmo ofrece ventajas adicionales con respecto a la adición de módulos digitales en paralelo sin requerimiento de más potencia, lo que permite potencializar las funciones realizadas. En [41] registran una transmisión experimental a 40 GHz y 4 Gbps para enlaces RoF-PM con detección coherente basado en DSP, y en [14] reportan una transmisión a 12.5 Gbps para un sistema de tres canales multiplexados por división de longitud de onda (WDM, *wavelength division multiplexing*) en un enlace RoF codetección coherente, para una frecuencia de portadora de 6 GHz, lo cual logra una distancia de 78.8 km.

La modulación de múltiples subportadoras (MSM, *multiple subcarrier modulation*) es una técnica de modulación también usada en sistemas RoF, que permite flexibilidad, multiplexación por división de frecuencia asíncrona acoplada con transmisión multicanal en el caso de redes WLAN, mientras se mantiene la simplicidad de la detección directa. Los sistemas MSMIM/DD son atractivos, ya que el uso de varias subportadoras de banda angosta promete minimizar la ISI sobre canales multitrayecto, aunque tienen como principal inconveniente la pobre eficiencia en su potencia óptica promedio. Esta técnica se ha implementado para transmisiones a 100 Mbps [42].

En [43] presentan un sistema RoF *full-duplex* operando en la banda de los 60 GHz, que usa detección directa para aplicaciones de redes gigabit Ethernet, mientras que en [44] plantean un sistema también *full-duplex* de buen desempeño hasta los 25 km de fibra óptica, cuyo enlace ascendente lo modula PSK a 100 Mbps y el enlace descendente lo modula en 16-QAM en la banda de los 6 GHz. La WDM incrementa la capacidad del sistema mediante la inserción simultánea de varias señales de diferente longitud

de onda por la fibra [12]. Este sistema se muestra en la figura 6. Dicho esquema de transmisión mejora la flexibilidad de la red, pero está limitado por las no linealidades de la fibra cuando se eleva la potencia de la luz o se insertan muchos canales sobre la fibra; además del efecto de supresión de portadora y las no linealidades de los amplificadores ópticos [27].

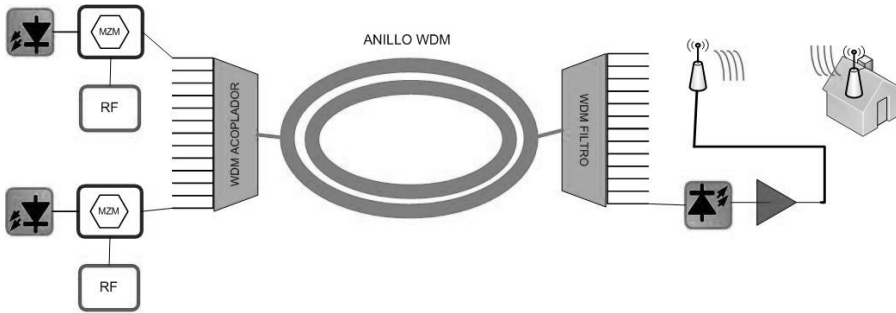


Figura 6. Sistema RoF con transporte óptico WDM

Redes convergentes en sistemas RoF

Las redes de nueva generación (NGN, *Next Generation Network*) son redes que proveen diferentes servicios en una misma plataforma. Técnicamente, significa que la arquitectura de la red permite la transmisión de diferentes señales, con diferentes formatos, además de proveer diferentes servicios simultáneamente. La tecnología RoF apunta a ser una solución para hacer posible la adopción de las NGN [45], [46].

Por ejemplo, en la referencia [15] proponen un esquema de RoF de buen desempeño hasta los 50 km a 20 GHz, para la transmisión de señales RF moduladas en PSK y señales en BB simultáneamente, con tasas de transmisión de 622 Mbps y 2,5 Gbps respectivamente. La configuración mostrada simplifica las BS y reduce los costos del sistema. En [47] demuestran la transmisión simultánea de señales WiMax (2,5 GHz) y GSM (1,95 GHz) en un formato RF digitalizado sobre 20 km a 48 Mbps y 270 Kbps respectivamente.

Desde hace más de diez años se han realizado varias investigaciones prácticas y teóricas de transmisión simultáneas de señales BB multigigabit y señales RF en las que han usado el modulador EAM para la conversión

electro-óptica en la banda de 60GHz [48]. En [48] muestran la primera investigación de una transmisión simultánea RoF y BB con un modulador EAM que alcanza una tasa de error de bit (BER, *Bit error rate*) menor que 10^{-9} . Para las señales en BB se transmitió a 9.95328Gb/s y a 155.52Mb/s en DPSK. En otro experimento lograron un BER de 10^{-9} utilizando una nueva arquitectura para RoF por medio de WDM [49] para una señal en BB de 1.25 Gbps en una transmisión de 23 km; en este caso se generó una señal de MMW de 63 GHz usando el efecto de una portadora óptica suprimida y también enrutamiento de banda lateral; dicho autor expresa que puede ser un buen modelo de WDM-RoF para transmisión simultánea de señales alámbricas e inalámbricas en un futuro cercano.

En sistemas de detección heterodina se han hecho experimentos con señales PSK de 2.5 Gbps y señales inalámbricas ASK, ambas a 15 GHz [50], respecto a lo cual los autores concluyen que se pueden realizar transmisiones usando polarizaciones inalámbricas diversas, asimismo, simplificar ampliamente la estructura de la BS. En la tabla 2 se muestra un resumen de los logros alcanzados en la tecnología RoF en los últimos años.

Tabla 2

Resumen de algunos logros obtenidos en tecnología RoF de 2009 a la fecha

Dispositivos
Generación óptica RF hasta 40 GHz usando MZM en cascada [29]
Transceptor fotónico PM RoF hasta 20 km en SMF [31]
Convertidores ópticos de 1 Gbps en BB a MMW de 40 GHz [32]
Amplificador CMOS de bajo ruido a 60 GHz [34]
Sistemas RoF
RoF a 60 GHz a 1 Gbps usando técnica heterodina óptica [8]
WiMax a 3,5 GHz hasta 410 km con FBG [36]
WiMax con OFDM hasta 792 km a 120 Mbps [37]
RoF a 64 GHz a 2,5 Gbps usando OCS hasta 34 km [5]
RoF a 64 GHz a 2,5 Gbps usando OSSB+C hasta 95 km [5]
RoF laser VCSEL a 60 GHz a 2 Gbps en QPSK y ASK con BLU hasta 20 km [39]
60 GHz a 4 Gbps con ecualización Feed-Forward [40]

60 GHz QPSK a 7 Gbps [40]
RoF PM 40 GHz a 4 Gbps con detección coherente basado en DSP [41]
WDM-RoF 3x12,5 Gbps a 6 GHz hasta 78,8 km [14]
RoF full Duplex a 60 GHz en GbE con DD [44]
RoF a 6 GHz full duplex, 16-QAM a 200Mbps descendente, PSK a 100 Mbps descendente, hasta 25 km de fibra. [44]
Redes Convergentes RoF
WiMax y GSM sobre fibra a 48 Mbps y 270 Kbps, hasta 20 km [47]
Tx. Simultánea de BB a 1,25 Gbps y RF de 63 GHz con WDM [49]
Tx. Simultánea de PSK a 2,5 Gbps y ASK 15 GHz [50]

5. OBSERVACIONES FINALES

En este trabajo se expuso la evolución del estado del arte de la tecnología RoF basado en la descripción de sus principales dispositivos y las pruebas experimentales recientes que sugieren la integración y la convergencia de servicios. Se presentaron los principales retos que se deben enfrentar para el desarrollo de sistemas RoF en la banda MWM, como: simplificación de los equipos electrónicos usados, reducción de costos, compensación de las altas pérdidas de medio inalámbrico, y para el caso de transmisión RoF, la compensación de los fenómenos físicos de la fibra, como la atenuación y la dispersión. Sin embargo, para lograr superar algunos de estos retos aún son necesarios mayores esfuerzos en investigación y desarrollo en esta tecnología. Uno de los tópicos de investigación más destacados consiste en el perfeccionamiento de dispositivos que operen a altas frecuencias para lograr transmisiones a mayores distancias, con poca sensibilidad a las pérdidas de la fibra o al medio inalámbrico. Por esta razón, uno de los campos de investigación de más interés científico en la actualidad se dirige hacia el mejoramiento los receptores digitales coherentes con técnicas basadas en DSP para la compensación de las degradaciones en la transmisión. Idealmente, el desarrollo de estos dispositivos debería ser independiente del formato de modulación, para facilitar la transmisión y recuperación de las múltiples señales en una misma infraestructura; asimismo, para favorecer la convergencia de servicios en las redes RoF que soportan una heterogeneidad de servicios. En la revisión del estado del arte se mostró el éxito experimental de sistemas RoF-WDM, RoF-SCM, RoF-PM con detección coherente basada en DSP, WiMax y GSM sobre fibra

las cuales serán el soporte y desarrollo de las redes de última generación (NGN).

Para Colombia, la investigación en estos sistemas es relevante debido al gran interés de la articulación de las TICs a las políticas de desarrollo social, que faciliten la interacción entre los ciudadanos. A propósito del “Plan Vive Digital”, lanzado recientemente por el Ministerio de Tecnología de Información y Comunicaciones, que busca la promoción, el acceso, uso y apropiación masiva de las TICs, a través de políticas y programas para el logro de niveles progresivos y sostenibles de desarrollo, en todos los departamentos de Colombia. Esta iniciativa está sostenida en una columna vertebral: “Proyecto Nacional de Fibra Óptica” que consiste en el despliegue de redes de acceso de banda ancha basadas en fibra óptica, en hasta ~700 municipios. Con respecto a este gran proyecto investigaciones y desarrollos relacionados con el tema de este artículo permitiría proponer en un futuro cercano el desarrollo de sistemas inalámbricos de banda ancha integrados al cableado de fibra óptica que será instalado en el territorio nacional, con el fin de optimizar su uso e incrementar el acceso a banda ancha a un mayor número de colombianos. En este contexto, investigaciones en el tema analizado en este artículo acreditan todas las condiciones de impacto social de gran interés para nuestro desarrollo nacional.

REFERENCIAS

- [1] M. Weiß, M. Huchard, A. Stöhr, B. Charbonnier, S. Fedderwitz, and D. Stefan, “60-GHz photonic millimeter-wave link for short- to medium-range Wireless transmission pp to 12.5 Gb/s”, *J. Lightw. Technol.*, vol. 26, n° 15, pp. 2424-2429, Aug. 2008.
- [2] A. Stohr, “10 Gbit/s wireless transmission using millimeter-wave over optical fiber systems”, *Optical Fiber Communication Conf.*, Los Angeles, CA, 2011, pp.1-3, 6-10.
- [3] A. Stöhr et al., “60 GHz radio-over-fiber technologies for broadband wireless services”, *J. Optical Networking*, vol. 8, n° 5, pp. 471-487, May 2009.
- [4] G. Smith, D. Novak, and C. Lim, “A millimeter-wave full-duplex WDM/SCM fiber-radio access network”, *Optical Fiber Communication Conf.*, San José, CA, 1998, pp.18-19, 22-27.
- [5] J. Mitchell, “Radio over fibre networks: Advances and challenges”, *Optical Communication 35th European Conf.*, Vienna, 2009, pp.1-4, 20-24.

- [6] M. Milosavljevic, P. Kourtessis, and A. Gliwan, "Advanced PON topologies with wireless connectivity", *Transparent Optical Networks 11th International Conf.*, São Miguel, 2009, pp.1-4.
- [7] G. E. Campos and G. P. Sabogal, "Software de simulación de diferentes tipos de modulación de señales de radiofrecuencia sobre fibra óptica", *UMbral Científico Redalyc*, n° 9, pp. 76-84, septiembre de 2006.
- [8] T. Taniguchi, N. Sakurai, H. Kimura, and K. Kumozaki, "Technical Trends in Millimeter-wave Band Radio-On-Fiber Access System", *PIERS Proc.*, Beijing, 2009, pp. 24-27.
- [9] N. Guerrero, "Digital Photonic Receivers for Wireless and Wireline Optical Fiber Transmission Links", Ph. D. dissertation, Dept. Fotonik, Denmark Tech. Univ., Copenhagen, 2011.
- [10] M. Fabbri and P. Faccin, "Radio over Fiber Technologies and Systems: New Opportunities", *Transparent Optical Networks 9th International Conf.*, Rome, vol. 3, 2007, pp.230-233.
- [11] V. Vorgelegt, "Radio over Fiber based Network Architecture", Ph.D. dissertation, Dept. Elect., Tech. Berlin Univ., Berlin, 2005.
- [12] E. Dadrasnia and F. Adikan, "DWDM effects of single model optical fiber in radio over fiber system", *Electronic Computer Technol. Int. Conf.*, Kuala Lumpur, 2010, pp. 39-41.
- [13] A. Ng'oma, "Radio-over-fibre Technology for Broadband Wireless Communication Systems". Ph.D. dissertation, Dept. Elect., Tech. Eindhoven Univ., Eindhoven, 2005.
- [14] N. Guerrero, D. Zibar, A. Caballero, and I. Tafur, "Experimental 2.5-Gb/s QPSK WDM Phase-Modulated Radio-Over-Fiber Link With Digital Demodulation by a k-Means Algorithm", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 22, n° 5, pp. 335-337, Feb. 2010.
- [15] Y. Pi, Z. Dong, L. Chen, and J. Yu, "A Radio-over-Fiber System for Simultaneous Generation of Wired and Wireless Services", *Proc. of SPIE*, vol. 7136, pp. 71361K-71361k-9, Nov. 2008.
- [16] C. Lin, J. Chen, P. Peng-Chun, P. Cheng-Feng, P. Wei-Ren, C. Bi-Shiou, and S. Chi, "Hybrid Optical Access Network Integrating Fiber-to-the-Home and Radio-Over-Fiber Systems", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 19, n° 8, pp. 610-612, April 2007.
- [17] R. Avo, P. Laurencio, and M. Medeiros, "Simulation of mm-wave over fiber employing optical single sideband modulation combined with subcarrier multiplexing", *Mediterranean Winter, Marrakesh*, 2008, pp. 1-5, 11-13.
- [18] M. Mohamed, Z. Xiupu, B. Hraimel, and W. Ke, "Efficient Photonic Generation of Millimeter-Waves Using Optical Frequency Multiplication in Radio-over-fiber Systems", *IEEE Microwave Photonics*, 2007, pp.179-182, 3-5 Oct. 2007.

- [19] Y. L. Guennec, A. Pizzinat, S. Meyer, B. Charbonnier, P. Lombard, M. Lourdiane, B. Cabon, C. Algani, A. Billabert, M. Terre, C. Rumelhard, J. L. Polleux, H. Jacquinet, S. Bories, and C. Sillans, "Low-Cost Transparent Radio-Over-Fiber System for In-Building Distribution of UWB Signals", *J. Lightwave Technol.*, vol. 27, n° 14, pp. 2649-2657, July 2009.
- [20] Z. Yong and T. Wong, "Prospects of CMOS technology for millimeter-wave radio-over-fiber applications", *Microwave and Millimeter Wave Technology International Conf.*, Chengdu, pp. 476-479, 8-11 May 2010.
- [21] J. J. Granada, C. E. Zuluaga, N. Guerrero y O. M. Díaz, "Compensación de la dispersión cromática usando ecualización LMS", *XV Symp. Tratamiento de Señales, Imágenes y Visión Artificial*, Bogotá, 2010, pp. 224-229.
- [22] F. M. Kuo et al., "Spectral Power Enhancement in a 100 GHz Photonic Millimeter-Wave Generator Enabled by Spectral Line-by-Line Pulse Shaping", *IEEE J. Photonics*, vol. 2, n° 5, pp. 719-727, Oct. 2010.
- [23] S. Z. Pinter and X. N. Fernando, "Estimation and equalization of fiber-wireless uplink for multiuser CDMA 4G networks", *IEEE Trans. Communications*, vol. 58, n° 6, pp.1803-1813, June 2010.
- [24] J. Campány and D. Novak, "Microwave photonics combines two worlds", *Nature Photonics*, vol. 1, pp. 319-330, June 2007.
- [25] E. K. Lau, S. Hyuk-Kee, and M. C. Wu, "Ultra-high, 72 GHz resonance frequency and 44 GHz bandwidth of injection-locked 1.55- μm DFB lasers", *Optical Fiber Communication National Fiber Optic Engineers Conf.*, Los Angeles, CA, 2006, pp., 5-10.
- [26] L. Chrostowski, X. Zhao, C.J. Chang-Hasnain, R. Shau, M. Ortsiefer, and M. C. Amann, "50-GHz optically injection-locked 1.55- μm VCSELs", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.18, n° 2, pp.367-369, Jan. 2006.
- [27] J. Pérez, "Coexistencia e integración de comunicaciones Inalámbricas en Sistemas de Transmisión Ópticos". Ph.D disertación, Dept. Electr. Universidad Politécnica de Valencia (España), 2009.
- [28] J. Wen-Jr, L. Chun-Ting, A. Ngoma, S. Po-Tsung, J. Chen, M. Sauer, F. Annunziata, and C. Sien, "Simple 14-Gb/s Short-Range Radio-Over-Fiber System Employing a Single-Electrode MZM for 60-GHz Wireless Applications", *J. Lightwave Technol.*, vol. 28, n° 16, pp. 2238 - 2246, Aug. 2010.
- [29] C. Haoshuo and R. Lin, "Schemes of generating M-ASK signals and remote local oscillator at millimeter-wave band in Radio over Fiber system", *Communications and Photonics Conf.*, Shanghai, 2009, pp.1-6.
- [30] H. Yang, J. Zeng, Y. Zheng, H. Jung, B. Huiszoon, J. van Zantvoort, E. Tangdiongga, and A. M. Koonen, "Evaluation of effects of MZM nonlinearity on QAM and OFDM signals in RoF transmitter", *Asia-Pacific Microwave Photonics Conf.*, Gold Coast, 2008, pp. 90-93.

- [31] F. Grassi, J. Mora, B. Ortega, and J. Capmany, "Radio over fiber transceiver employing phase modulation of an optical broadband source", *Optics Express*, vol. 18, pp. 21750-21756, Sep. 2010.
- [32] C. Qingjiang, L. Qiang, Z. Ziyang, Q. Min, and S. Yikai, "Micrometer-scale optical up-converter using a resonance-split silicon microring resonator in radio over fiber systems", *Optical Fiber Communication Conf.*, San Diego, CA, 2009, pp.1-3.
- [33] H.S. Kang and W.Y. Choi, "Millimeter-wave optoelectronic mixers based on CMOS-compatible Si photodetectors", *Int. Topical Meeting on Microwave Photonics*, Grenoble, 2006, pp.1-4.
- [34] J.W. Kunze, C. Weyers, P. Mayr, A. Bilgic, and J. Hausner, "60 GHz compact low noise amplifier in 65 nm CMOS", *IEEE Electron. Device Lett.*, vol. 45, n° 20, pp.1035-1036, Sept. 2009.
- [35] M. Lucente, C. Stallo, T. Rossi, S. Mukherjee, E. Cianca, M. Ruggieri, and V. Dainelli, "Analysis and design of a point-to-point radio-link at W band for future satellite telecommunication experiments", *IEEE Aerospace Conf.*, Big Sky, 2011, pp.1-10.
- [36] M. Al-Noor, J. Loo, and R. Comley, "WiMAX 54Mbit/s over radio over fibre using DCF, SMF fibre and FGB for fibre over 410 km", *Wireless Communication Systems 7th International Symp.*, New York, 2010, pp.829-833.
- [37] M. Al-Noor, L. Kok-Keong, and R. Comley, "120 Mbps Mobile WiMAX Scalable OFDMA Signal Transmission over RoF with SMF, DCF and Chirped FBG for Fibre Length of 792 km", *Wireless and Mobile Communications 6th Int. Conf.*, Valencia (España), 2010, pp. 373-377.
- [38] Y. Jianjun, H. Junqiang, Q. Dayou, J. Zhensheng, C. K. Geeg, and W. Ting, "Transmission of microwave-photonics generated 16Gbit/s super broadband OFDM signals in radio-over-fiber system", *Optical Fiber communication/ National Fiber Optic Engineers Conf.*, 2008, San Diego, CA, pp.1-3, 24-28.
- [39] A. Ng'oma, D. Fortusini, D. Parekh, W. Yang, M. Sauer, S. Benjamin, W. Hofmann, M. Amann, and C. Chang-Hasnain, "Performance of a Multi-Gb/s 60 GHz Radio Over Fiber System Employing a Directly Modulated Optically Injection-Locked VCSEL", *J. Lightw. Technol.*, vol. 28, °16, pp. 2436-2444, Aug. 2010.
- [40] A. Ng'oma and M. Sauer, "Radio-over-fiber technologies for high data rate wireless applications", *Sarnoff Symp.*, Princeton, NJ, 2009, pp.1-6.
- [41] A. Caballero, D. Zibar, and I. Tafur Monroy. "Digital Coherent detection of multi-gigabit 40 GHz carrier frequency radio-over-fiber signals using photonic downconversion", *IEEE Electron. Lett.*, vol. 46, n° 1, pp. 57-58, Jan. 2010.
- [42] H. Joshi, R. J. Green, and M. S. Leeson, "Multiple sub-carrier optical wireless systems", *Transparent Optical Networks 10th Anniversary International Conf.*, Athens, 2008, vol. 4, n° 1, pp.184-188, 22-26.

- [43] P. Chul, Y. Yong-Kee, and L. C. Ong, "Full-duplex 60 GHz radio-over-fiber system for gigabit network application", *LEOS Annu. Meeting Conf. Proc.*, Belek-Antalya, 2009, pp. 446-447.
- [44] J. Ho-Chul, K. Hoon, and C. Yun, "Full-Duplex Radio-Over-Fiber System Using Phase-Modulated Downlink and Intensity-Modulated Uplink", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 21, n° 1, pp. 9-11, Jan.1 2009.
- [45] W. Baluja and C. Anías, "Experiences in Planning and Implantation of Security at Next Generation Networks", *IEEE Latin America Trans.*, vol. 8, n° 6, pp. 703-707, Dec. 2010.
- [46] S. K. Mohapatra, "Integrated planning for Next Generation Networks", *IEEE Int. Symp. Integrated Network Management-Workshops*, New York, 2009, pp. 205 - 210.
- [47] P. A. Gamage, A. Nirmalathas, C. Lim, D. Novak, and R. Waterhouse, "Experimental Demonstration of the Transport of Digitized Multiple Wireless Systems Over Fiber", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 21, n° 11, pp. 691-693, June 2009.
- [48] T. Kamisaka, T. Kuri, and K. Kitayama, "Simultaneous modulation and fiber-optic transmission of 10-Gb/s baseband and 60-GHz-band radio signals on a single wavelength", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, n° 10, pp. 2013 - 2017, Oct. 2001.
- [49] W. Yong-Yuk, K. Hyun-Seung, S. Yong-Hwan, and H. Sang-Kook, "Full Colorless WDM-Radio Over Fiber Access Network Supporting Simultaneous Transmission of Millimeter-Wave Band and Baseband Gigabit Signals by Sideband Routing", *J. Lightw. Technol.*, vol. 28, n° 16, pp. 2213-2218, Aug. 2010.
- [50] J. Yin, K. Xu, Y. Li, X. Sun, L. Gui, J. Wu, X. Hong, and J. Lin, "Demonstration of 2.5Gb/s optical PSK signal and the ASK wireless transmission based on heterodyne detection in a radio-over-fiber platform", *Int. Topical Meeting Microwave Photonics*, Valencia (España), 2009, pp. 1-3.