

Resumen

El estándar de quinta generación (5G) es la clave potencial para satisfacer el aumento exponencial en la demanda de nuevas aplicaciones, servicios y usuarios. La tecnología 5G ofrecerá una latencia extremadamente baja de 1 ms, una velocidad máxima de datos de 10 Gbit/s, una alta densidad de conexión de hasta 10^6 dispositivos/km² y permitirá una alta movilidad de los dispositivos de hasta 500 km/h. En esta Tesis se proponen varias soluciones basadas en tecnologías habilitadoras para el despliegue de redes 5G. La arquitectura de la red de acceso de radio en la nube (*cloud-radio access network*, C-RAN) se emplea junto con las técnicas de Fotónica de Microondas como una solución prometedora para generar y transmitir señales de ondas milimétricas (*millimeter wave*, mmW) en la próxima generación de comunicaciones móviles. La tecnología radio sobre fibra (*radio over fiber*, RoF) ha demostrado ser una buena opción para enfrentarse al desafío de la distribución inalámbrica mmW debido a la gran distancia de transmisión, el gran ancho de banda y la inmunidad a las interferencias electromagnéticas, entre algunas de las principales ventajas. Además, esta tecnología se puede ampliar con comunicaciones ópticas de espacio libre (*free-space optics*, FSO) en sistemas de radio sobre FSO (*radio over FSO*, RoFSO) en las redes inalámbricas.

En esta Tesis, las señales mmW se generan fotónicamente mediante modulación externa de doble banda lateral con supresión de portadora (*carrier suppression-double sideband*, CS-DSB) y se distribuyen a través de enlaces fronthaul híbridos RoF/FSO. Se han generado experimentalmente señales de hasta 90 GHz de frecuencia, con niveles de ruido de fase por debajo de -87 dBc/Hz. Además, la generación múltiple de señales permite la distribución reconfigurable en canales multiplexados por división de longitud de onda (*wavelength-division multiplexed*, WDM) desde una oficina central hasta las estaciones base, y se ha evaluado el impacto de las turbulencias producidas en los canales FSO sobre las señales mmW generadas fotónicamente en términos de fluctuaciones de potencia y ruido de fase de la señal.

Se propone la técnica de modulación directa de un láser (*directly modulated laser*, DML) como solución principal para la transmisión de datos a través de enlaces ópticos híbridos que emplean un esquema de multiplicación de frecuencias ópticas, es decir, CS-DSB, para la generación de señales de mmW. En concreto, se evalúan teórica y experimentalmente los esquemas de generación fotónica local y remoto de señales mmW y se comparan para su implementación práctica en la red frontal de la C-RAN. La configuración remota conduce a una mayor potencia eléctrica de salida que la configuración de generación local en la banda de mmW, de forma específica, 15 dB más en enlaces de fibra de 25 km debido al efecto combinado del *chirp* y la dispersión de la fibra. Además, se estudia experimentalmente el impacto de la distorsión armónica y de la intermodulación en la transmisión de datos, cuyos resultados muestran que las señales de banda ancha con distorsión dentro de la banda y las señales multibanda con distorsión fuera de banda son ejemplos de señales que deben transmitirse a través del esquema de generación local en lugar de la generación remota. Igualmente, con el fin de obtener la capacidad que ofrece el DML en términos de ancho de banda, también se presenta una evaluación teórica y experimental del efecto de la dispersión de la fibra y el *chirp* sobre diferentes anchos de banda de señales de M-modulación de amplitud en cuadratura (*quadrature amplitude modulation*, QAM). Tanto los resultados experimentales como los de simulación muestran que los anchos de banda más grandes de señal conducen a penalizaciones de potencia óptica más altas debido al efecto combinado de ambos.

No obstante, la Tesis también incluye otro enfoque para la transmisión de datos basado en el uso de otro modulador externo. En este caso, la demostración experimental de la generación de señales ópticas empleando CS-DSB y la transmisión de señales a través de fibra híbrida y red frontal FSO se completa con un enlace de antena que permite transmitir señales 5G 64/256-QAM con un ancho de banda de 200 MHz. La investigación realizada con los sistemas CS-DSB y DSB también permiten compararlos y los resultados demuestran que

el esquema CS-DSB es robusto frente al desvanecimiento inducido por la dispersión cromática para frecuencias de hasta 40 GHz y una longitud de fibra monomodo de 30 km, mientras que el formato DSB parece más apropiado para la transmisión a través de un enlace radio entre antenas. Además, se ha realizado una evaluación experimental impacto las turbulencias producidas en los canales FSO sobre las señales mmW generadas fotónicamente con diferentes distribuciones térmicas y se ha cuantificado la degradación de la señal de datos de acuerdo con las condiciones de la turbulencia.

Como demostradores finales, esta Tesis incluye un sistema de transmisión full-dúplex que emplea señales 5G en enlace descendente (*downlink*, DL) a 39 GHz y en enlace ascendente (*uplink*, UL) a 37 GHz sobre enlaces híbridos con una tasa de bits máxima de 1 Gbit/s para un solo usuario y 3 Gbit/s para tres usuarios en DL, y 2,4 Gbit/s para un usuario en UL, respectivamente; y la transmisión de señales OFDM LTE de 60 GHz (DL) y 25 GHz (UL) sobre una infraestructura heterogénea de frontal óptico que consiste en fibra óptica de 10 km, un canal FSO de 100 m y un enlace de radio inalámbrico de 2 m.