

Avances

Centro de Información y Gestión Tecnológica

La Interfaz Radio en la Quinta Generación-5G de Telefonía Móvil

The Radio Interface in the Fifth Generation-5G of mobile telephony

Maher Dawod-Alhammadi¹, Alexey García Padilla², José Manuel Díaz Hernández³

¹Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica. Investigador de la Universidad de Pinar del Río «Hermanos Saíz Montes de Oca», Departamento de Telecomunicaciones, Teléf.: +53 48 779362, Calle Martí Final No. 270, Pinar del Río, Cuba, alhammadimaher7@gmail.com; ID: <https://orcid.org/0000-0001-6895-3308>

²Máster en Telecomunicaciones y Telemática, profesor Asistente de la Universidad de Pinar del Río «Hermanos Saíz Montes de Oca», Departamento de Telecomunicaciones, Teléf.: +53 48 779362, Calle Martí Final No. 270, Pinar del Río, Cuba, alexey@upr.edu.cu; ID: <https://orcid.org/0000-0001-9573-3984>

³Máster en Telecomunicaciones y Telemática, profesor Auxiliar de la Universidad de Pinar del Río «Hermanos Saíz Montes de Oca», Departamento de Telecomunicaciones, Teléf.: +53 48 779362, Calle Martí Final No. 270, Pinar del Río, Cuba, jman@upr.edu.cu; ID: <https://orcid.org/0000-0001-6662-2054>

Para citar este artículo / to reference this article / para citar este artigo

Dawod- Alhammadi, M., García, A. & Díaz, J.M. (2018). La Interfaz Radio en la Quinta Generación-5G de Telefonía Móvil. *Avances*, 20(4), 497-510.

Recuperado de <http://www.ciget.pinar.cu/ojs/index.php/publicaciones/article/view/400/1389>

Recibido: marzo 2018

RESUMEN

En la actualidad existe una alta demanda para la implementación del nuevo estándar de telefonía móvil 5G, estandarización y realización de pruebas tecnológicas. 5G va a contar con un avance revolucionario en términos de velocidades de datos, latencia, conectividad masiva, confiabilidad de la red y eficiencia energética. Estas capacidades están dirigidas a lograr una conectividad de alta velocidad, virtualización realidad aumentada, Internet, etc. La interfaz radio 5G empleará portadoras en la banda milimétrica (mm) con mayores anchos de banda, empleando sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), densificación de red y nuevas formas de onda que proporcionan escalabilidad y flexibilidad para cumplir con las diversas demandas de los servicios 5G. En esta investigación, se desarrolló un estudio sobre las potencialidades del nuevo estándar móvil, así como los nuevos desafíos tecnológicos que supone la implementación de un sistema de última generación. El enfoque se centra principalmente en el usuario y se identifican las principales tecnologías, evaluando sus fortalezas

y debilidades, y esbozando los principales desafíos futuros.

Palabras clave: 5G, MIMO, banda mm, formas de onda.

ABSTRACT

At present, there is a high demand for the implementation of the new 5G mobile telephony standard, standardization and performance of technological tests. 5G is going to count on a revolutionary advance in terms of data speeds, latency, massive connectivity, network reliability and energy efficiency. These capabilities are aimed at achieving high-speed connectivity, virtualized virtual reality, internet, etc. The 5G radio interface will use carriers in the millimetric band (mm) with higher bandwidths, using multiple input and multiple output (MIMO) systems, network densification and new waveforms that provide scalability and flexibility to meet the diverse demands of 5G services. In this research, a study was developed on the potentialities of the new mobile standard is developed, as well as the new technological challenges involved in the implementation. The focus is mainly on the user and the main

technologies are identified, assessing their strengths and weaknesses, and outlining the main future challenges.

Keywords: 5G, MIMO, mm band, waveforms.

INTRODUCCIÓN

La tecnología de acceso móvil está pasando en estos momentos por un cambio revolucionario, cada generación de tecnología móvil ha proporcionado importantes mejoras de rendimiento. Estos cambios rápidos son la respuesta a las demandas de capacidad y el resultado del crecimiento masivo de datos en los últimos diez años, debido principalmente a la demanda de video de alta calidad. La capacidad de resolución de video está aumentando y se necesitarán dispositivos compatibles con video 4K (Müller *et al.*, 2013). La demanda de contenido multimedia continuará creciendo a tasas extremas, superando las previsiones.

El tráfico móvil anual se espera que aumente a 291.8 exabytes para 2019 (Rappaport *et al.*, 2015). Sin embargo, los patrones de uso de 5G de los estándares internacionales de Telecomunicaciones Móviles (IMT 2020) no solo se limitan a la banda ancha móvil. De hecho, IMT 2020 está previsto para apoyar una diversa variedad de escenarios que están

especificados en tres amplias categorías:

Banda ancha móvil mejorada (eMBB): ampliación del ancho de banda, con un mejor rendimiento por usuario. Este escenario incluye una gran variedad de casos, incluido un área de amplia cobertura y puntos de acceso.

Comunicaciones ultra confiables y de baja latencia (URLLC): existen requisitos estrictos de confiabilidad, latencia y disponibilidad. Algunos ejemplos son Internet táctil, sistemas de transporte inteligentes, comunicaciones vehículo-a-todo (V2X), seguridad en el transporte, control remoto de cirugía médica, redes inteligentes, protección pública y asistencia en desastres, control inalámbrico de fabricación industrial, etc. (Simsek, *et al.*, 2016)

Comunicaciones masivas tipo máquina (mMTC): existe una amplia red de aplicaciones para las cuales los patrones de tráfico no están completamente caracterizados. Sin embargo, se sabe que la

implementación de mMTC podría consistir en un número muy grande de dispositivos con un relativamente bajo (o relativamente alto) volumen de datos no sensibles al retraso. Se requieren dispositivos de bajo costo y una muy larga vida útil de la batería.

Requisitos de 5G

Los requisitos mínimos de rendimiento técnico para 5G fueron aprobados recientemente en la Unión Internacional de Telecomunicación (ITU). Existe parámetros clave para la caracterización de esta generación (ITU-R, 2017).

Regulación del espectro

Es probable que se introduzca 5G en múltiples bandas de frecuencia. Las bandas existentes inferiores a 6 GHz (denominadas bandas de microondas) tienen ancho de bandas limitados y actualmente son muy utilizadas. Para cumplir con la demanda decrecimiento, en la Conferencia Mundial de Radiocomunicación (WRC-15) se aprobó una serie de bandas de frecuencia candidatas en el rango de las bandas mm de (24 - 100 GHz). Específicamente, se aprobaron las siguientes bandas: (24,25 - 27,5; 31.8 - 43.5; 45.5 50.2; 50,4 - 52,6; 66 -76; 81 - 86: en GHz). Estas bandas proporcionan una cantidad considerable de nuevo ancho de banda. Una lista final de las bandas

será aprobada por (WRC-19). Además de las anteriores bandas con licencia, el espectro en las bandas sin licencia (60 GHz) se puede utilizar. Esto podría incluir: frecuencias más bajas para área de amplia cobertura, enlaces de onda mm de alta velocidad para comunicaciones en área local y personal, y enlaces interiores de corto alcance en la gama de espectro de las bandas de onda mm sin licencia (Hansen, 2011). El nuevo espectro, especialmente en las bandas de onda mm, puede ser administrado a través de un mecanismo de acceso con licencia, como es el caso, o a través de nuevos enfoques que se consideran (IEEE JSAC, 2016).

Existen servicios de satélites y servicios fijos en ondas de bandas milimétricas que necesitan coexistir con servicios futuros (acceso móvil, Fronthaul y Backhaul). Se implementarán nuevos mecanismos de acceso al medio de radio, como conformación de haces (en inglés beamforming) y coordinación. Estos se basan en conformación de haces (analógico, digital e híbrido), coordinación (intercambio de información) y la extensión del espectro compartido, parcial o completo (Shokri-Ghadikolaei *et al.*, 2016 & IEEE Communications, 2016).

Las arquitecturas de formación de haces que realizan el procesamiento de señales analógicas y digitales

necesitan tener algunos de sus parámetros alineados con el entorno y el sistema. Por ejemplo, los números de cadenas de RF, el número de flujos que se transportarán y los números de clústeres en el entorno están todos interconectados.

En el 2016, Beltran, Ray y Gutiérrez, realizaron la propuesta de la coexistencia y cooperación entre el sistema celular y WiFi sistemas en las bandas sin licencia de 2,4 GHz y 5 GHz (donde hasta 500 MHz está disponible).

Estandarización para 5G

Las normas para 5G serán aprobadas por el comité de investigación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT-R. (WP), que está preparando los criterios de la evaluación (ITU-R, 2016), a los que seguirán las presentaciones de propuestas y evaluación de las tecnologías candidatas. Este proceso se completará a finales de 2019, lo que lleva a la primera certificación de estándares 5G. Recientemente la UIT-T ha completado un estudio sobre innovaciones de red requeridas para apoyar el desarrollo de los sistemas 5G a través de un Grupo Temático sobre IMT-2020 como parte de la Comisión de estudio 13. Este estudio toma una visión de todo el sistema de arquitecturas 5G y también incluye prueba de conceptos. 3GPP está

siguiendo un proceso de estandarización (Gozalvez, 2015), que se desarrolla con la línea de tiempo del UIT-R (Marcus, 2015).

La estandarización de la tecnología 5G se divide en dos fases El objetivo de este enfoque de estandarización gradual es para completar las especificaciones iniciales para permitir implementaciones en el 2020. La fase 1 se completará en septiembre 2018 en la Versión 15. La Fase 2 incorporará más funciones para extender las capacidades de 5G para soportar progresivamente más servicios, escenarios y bandas de frecuencias mucho más altas (por encima de 40 GHz). La Fase 2 se completará alrededor del final de 2019 en la Versión 16.

Esta investigación proporciona un debate y un resumen de los problemas clave de 5G en un momento en que la carrera hacia el despliegue de 5G se está acelerando y se están realizando muchas pruebas precomerciales en todo el mundo. La introducción establece los objetivos 5G, regulación del espectro y progreso de estandarización. El capítulo 1 describe las tecnologías clave que están siendo ampliamente aceptadas hacia el incremento del rendimiento de 5G. Los nuevos desarrollos en modelos de canales con un enfoque 5G se discuten en el capítulo 2. La atención se centra tanto

en los modelos como en las mediciones que intentan capturar algunos de los aspectos cada vez más importantes de los canales 5G, como los arreglos distribuidos masivos, la propagación de onda mm y las celdas pequeñas.

1. Tecnologías Clave para la interface Radio Frecuenciade 5G

Hay diversos requisitos de capacidad y calidad de servicio a lograr en el nuevo estándar, los cuales se ilustran en la *tabla*.

DESARROLLO

Tabla. Requisitos mínimos de rendimiento técnico de IMT 2020.

Indicador clave de rendimiento(Kpi)	Valores
Descarga máxima de velocidad de datos	Descarga:20 Gbps, Carga: 10 Gbps
Eficiencia espectral máxima	Descarga:30 bps/Hz, Carga: 15 bps/Hz
Tasa de datos experimentada por el usuario	Descarga:100 Mbps, Carga: 50 Mbps (urbano denso)
Capacidad de área de tráfico	Descarga:10 Mbps/m ² (punto de acceso interior)
Latencia del plano de usuario	4 ms for eMBB and URLLC
Densidad de conexión	1,000,000 dispositivos/Km ²
Eficiencia energética	Capacidad de soportar alto / bajo consumo de energía cuando se realiza transferencia de datos del usuario, también la capacidad de soportar el período de tiempo continuo sin transmisión (para red y dispositivo) y recepción (para el dispositivo).
Movilidad	Hasta 500 Km/h
Ancho de banda	de al menos 100 MHz; hasta 1 GHz para el funcionamiento en bandas de frecuencias más altas (p. ej., por encima de 6 GHz)

Fuente: Unión Internacional de Telecomunicación, 2016.

Otros requisitos establecidos son:

- *Mayor ancho de banda:* los sistemas móviles de hoy son ampliamente desplegados en lasbandas de microondas (menos de 6 GHz), y la mayor parte de las implementaciones usan frecuencias por debajo de 3 GHz. Este espectro está muy congestionado. Por el contrario, hay muchos espectros disponibles en las bandas cm y mm (28-300 GHz) y son posibles anchos de

banda de portadora amplios del orden de 1 GHz.

- *Conjuntos de antenas masivas MIMO en la estación base:* el uso de frecuencias más altas hace posible desplegar arreglos de antenas de gran escala en la estación base, que se utilizan para proporcionar una mayor ganancia por multiplexación espacial para contrarrestar las pérdidas de propagación. El número de antenas considerados para la estación base varían de 256 a

1024 para las bandas de onda mm (Larsson *et al.*, 2014, Rusek *et al.*, 2013).

- *Avances en MIMO*: el uso de arreglos 2D y la pre-codificación multiusuario permite la transmisión simultánea a múltiples usuarios distribuidos tanto en acimut como en elevación. El número de usuarios simultáneos están limitados por el máximo número de flujos espaciales, y el entorno de propagación. Esto a su vez depende de las ubicaciones del usuario y métodos de procesamiento de señal desplegados.
- *Densificación de red*: esto dará como resultado el enrutamiento del tráfico a células pequeñas (con cobertura en decenas de metros) especialmente para los puntos de accesos interiores y densos micro células urbanas. Los despliegues de alta densidad de celdas pequeñas descarga el tráfico del plano de usuario, pero aún necesitará cobertura a través de la implementación de macrocélulas (en las bandas de microondas) para llevar el plan de control tráfico. Aumento de la densidad celular también puede resultar en una mayor interferencia de otras células que a su vez afectará cualquier aumento de capacidad. Sin embargo, técnicas de mitigación de interferencia tales

como la programación cooperativa (COMP), contribuye a mejorar eficiencias de espectro. Además, los arreglos de antena 5G tienen un ancho de haz mucho más estrecho que el sector sectorial existente de las antenas y los niveles de interferencia pueden reducirse.

- *Nuevas formas de onda*: 5G requiere de una nueva interfaz de radio. El uso del acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales (OFDMA) en la evolución a largo plazo (LTE) es adecuado para la transmisión de datos a alta velocidad. Sin embargo, para mMTC, el paquete es generalmente bastante pequeño. El tiempo de alineación de la señalización es muy grande cuando hay un gran número de dispositivos conectados. Además, el esquema de transmisión de datos generalmente tiene una gran latencia debido al mecanismo de solicitud y concesión. Un nuevo esquema de acceso múltiple es necesario para resolver los problemas anteriores.

2. Caracterización del Canal

El rendimiento de los sistemas 5G está limitado por el canal de

propagación por radio. Por lo tanto, es vital investigar las características del canal que son relevantes para los sistemas 5G, en particular aquellos que aún no se han explorado para los sistemas de generaciones anteriores. En esta sección se proporciona una breve reseña de los canales para MIMO masivo, sistemas distribuidos y sistemas de ondas mm (Rusek, *et al.*, 2013).

2.1 Canales MIMO masivos

En principio, un modelo de canal doble-direccional describe el canal de propagación para cualquier arreglo, ya sea el sistema MIMO es masivo o no (Steinbauer, Molisch, & Bonek, 2001). Sin embargo, existen varias importantes excepciones:

1) *Espaciales no estacionarias*: cuando los arreglos MIMO se vuelven muy grandes, es posible que la intensidad (no solo la fase) de los componentes multitrayecto (MPCs) varían sobre el arreglo. Cuando esto ocurre, la posible ganancia por diversidad, se reduce en comparación con los valores que se esperarían en un escenario ideal. Además, cuando el arreglo se vuelve muy grande, la curvatura del frente de onda (y dependiendo en el ancho de banda del sistema, incluso el tiempo de ejecución en el arreglo) puede ser relevante y debe ser incorporado en el modelo (estos últimos efectos se

pueden manejar mediante una aproximación a través de un modelo geométrico).

2) *Características de elevación*: debido a las limitaciones en el factor de forma, sistemas MIMO casi seguro serán 3D (arreglos planas o cilíndricas) y usuarios separados en ambos dominios de acimut y elevación. Por lo tanto, los modelos de canales que proporciona las características de elevación son importantes para 5G. El canal 3GPP ha sido generalizado para incluir la elevación de MPCs en la estación base (BS) (Kalliola *et al.*, 2002).

3) *Simplificaciones del modelo*: hay varias simplificaciones hechas para el estándar MIMO que conducen a errores inaceptables en sistemas masivos MIMO; un caso muy importante es el número y distribución de amplitud de los MPCs. Con arreglos que pueden formar haces que son significativamente más estrechos que un clúster, el modelo correcto de los parámetros dentro del clúster se convierte en cuestión importante. En el proyecto de la UE MAMMOET, un proyecto del modelo de canal MIMO basado en el enfoque COST 2100 fue desarrollado dando los primeros pasos en esta dirección (Gao *et al.*, 2015).

2.2 Canales de onda milimétrica

Los canales de onda milimétrica experimentan diferentes efectos de propagación, tales como absorción atmosférica para enlaces más largos, reflexión en superficies con una rugosidad comparable a la longitud de onda, y mala difracción. Se pueden anticipar que la atenuación y características de dispersión, que determinan el rendimiento del sistema, serán significativamente diferentes. Se puede citar algunos ejemplos representativos.

Fenómenos básicos de propagación:

- a) Pérdida de espacio libre.
- b) Atenuación atmosférica.
- c) Atenuación por vegetación.
- d) Penetración de exterior a interior.
- e) Sombreado por objetos.
- f) Escasa densidad del canal.

2.3 Métodos de Modelación

La modelación se puede llevar a cabo a través de tres vías: (i) modelos de canales espaciales tipo 3GPP(ii) modelos de canal estocástico basado en geometría (GSCM) como en COST 259/273/2100 (Molisch et al., 2006), (Liu *et al.*, 2012). (iii) modelos cuasideterministas. Los principales problemas que tales modelos apuntan a resolver son: (i) la incorporación de

sombreado por humanos y objetos, incluido el efecto de no estacionalidad inducida por ellos. (ii) consistencia espacial tanto con respecto a múltiples usuarios y BS distribuidas.

i) 3GPP-SCM: 3GPP, el cuerpo de estandarización para sistemas celulares 5G, se está estableciendo un modelo de canal que se utilizará para todo el rango de frecuencia entre 1 y 100 GHz. Actualmente hay un debate en curso sobre si el modelo debe exhibir discontinuidades a 6 GHz, casi todos los parámetros deben tener una dependencia de frecuencia suave (en muchos casos, los parámetros serían en realidad de frecuencia independiente). En cualquier caso, la estructura fundamental de modelo no cambiaría en comparación con el modelo existente utilizado para la estandarización LTE. Esto implica que, por ejemplo, los PSM en cada clúster tienen la misma amplitud. Se están haciendo intentos para introducir la consistencia espacial de los ángulos de llegada o salida, definiendo la tasa de cambio de estos ángulos como una función del movimiento del usuario (esto es similar a la fijación de la ubicación del primer o último dispersor que ve un MPC, compare el «clúster gemelo» modelo de COST 273) (3GPP, 2017). La atenuación por parte de los humanos u objetos es descrita por un modelo de difracción de doble filo (Jacob *et al.*, 2013).

Independientemente de los resultados finales, se debe enfatizar que el modelo 3GPP está destinado a comparar diferentes sistemas en condiciones de canales reproducibles.

ii) Modelos de canales estocásticos basados en geometría (GSCM): en un GSCM, la posición geométrica de los difusores está determinada por una función de densidad de probabilidad, y la respuesta de impulso bidireccional real se determina a partir del trazado simplificado de rayos. Este principio se ha utilizado (al menos para las propiedades entre clústeres) en el marco del modelado COST (COST 259, COST 273, COST 2100) durante los últimos 15 años, y es capaz de proporcionar inherentemente consistencia espacial. La aparición / desaparición de clúster a medida que el UE se mueve a través de la celda está gobernada por regiones de visibilidad (un clúster está «activo» si el usuario está en la región de visibilidad del clúster asociado). Las direcciones de los MPCs se derivan de la ubicación del «primer» y «último» clúster de dispersores que un MPC ve en su camino desde el transmisor (TX) al receptor (RX) (Molisch *et al.*, 2006). Los GSCM no necesitan ninguna modificación significativa para describir los sistemas 5G, la consistencia espacial y los efectos esféricos de frente de onda son provistos intrínsecamente, y el

ocultamiento por humanos u objetos también puede proporcionarse fácilmente mediante la introducción de formas geométricas de los objetos sombreados (similar al doble modelo de difracción de borde de cuchillo en 3GPP).

iii) Modelos cuasideterministas: los modelos casi deterministas eligen una geometría determinista, de la cual derivan los «principales MPC» a través de un simple trazado de rayos o guía de ondas (ya sea restringido a reflexiones individuales, o incorporando reflexiones múltiples). Cada uno de estos MPCs principales está asociado con un grupo de MPC cuyas direcciones y retrasos se extienden alrededor del MPC principal. Además, pueden existir MPCs más pequeños que tengan distribuciones completamente estocásticas. Al igual que los GSCM, estos modelos proporcionan consistencia espacial inherente (Weiler *et al.*, 2016).

CONCLUSIONES

Esta investigación ha proporcionado un debate para el despliegue comercial de 5G e identifica muchos de los desafíos técnicos correspondientes. Las líneas de tiempo son extremadamente desafiantes y el despliegue es una especie de carrera contra el tiempo, con muchas actividades sucediendo en paralelo, la estandarización en sus

primeras etapas. El espectro no se identifica formalmente, pero se supone que parte de él estará en bandas de onda mm. Hay muchos ensayos, pero estos son esencialmente solo para eMBB, e incluso estos son muy limitados; casi todos son de células individuales y no hay resultados con otras interferencias celulares y cómo mitigar su impacto. Incluso en el caso de células únicas, hay pocos datos para mostrar el rendimiento descarga y se pueden lograr tasas máximas de 20 Gbps / 10 Gbps en carga / descarga.

Existen una gran variedad de puntos de vista sobre formas de onda y técnicas de acceso múltiple para 5G. Algunas de los criterios relacionadas con la implementación de 5G son:

Existe una creencia generalizada de que las bandas de onda mm proporcionarán grandes anchos de banda, pero ¿se tratará de un ancho de banda contiguo o de la agregación de portadoras de componentes de menor ancho de banda? Dado que la SNR disminuye cuando se incrementa el ancho de banda, varios 100 MHz parecen ser un tamaño práctico.

La densificación de la red también es una parte clave de las técnicas necesarias para cumplir con la capacidad 5G, pero ¿existen límites fundamentales para la densificación

establecida por la interferencia intercelda? ¿Estos límites serán menos restrictivos cuando se utilicen arreglos de antenas con anchos de haz estrechos?

5G utilizará arreglos de antenas activas, pero cuántas antenas y cómo organizarlas son cuestiones clave que requieren mayor estudio. La disposición de las antenas en una matriz bidimensional y las dimensiones verticales / horizontales dependerá de los ángulos que se extienden en acimut y elevación. No puede haber una única respuesta óptima para cada entorno.

Tener un buen modelo de canal es fundamental para cualquier estudio de la capa física. Los datos en los modelos de canales, especialmente para las bandas de onda mm, son muy limitados. Se necesitan más mediciones sobre los valores de los parámetros tanto a gran escala como a pequeña escala para estos canales. La tecnología móvil actual usa Antenas FPlanar Invertidas (PIFA), pero ¿este también será el caso para la onda mm? Por último, la interacción con 4G existente, la flexibilidad del sistema en una amplia gama de bandas y aplicaciones se identifican como requisitos importantes, lo cual constituyen los pilares de investigación en la actualidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3GPP. (2017). Study on channel model for frequency spectrum above 6 GHz. *Technical Report, 38.900*. version 14.2.0. Recuperado de https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138900/14.02.00_60/tr_138900v140200p.pdf
- Beltran, F., Ray, S.K., & Gutierrez, J. (2016). Understanding the current operation and future roles of wireless networks: Co-existence, competition and co-operation in the unlicensed spectrum bands. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(11), 2829-2837. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7582403/>
- Gao, X., Flordelis, J., Dahman, G., Tufvesson, F., & Edfors, O. (2015). Massive MIMO channel modeling - extension of the COST 2100 model. in *Joint NEWCOM/COST Workshop on Wireless Communications (JNCW)*, Barcelona, Spain. Recuperado de [http://portal.research.lu.se/portal/en/publications/massive-mimo-channel-modeling-extension-of-the-cost-2100-model\(13b69bfa-775b-4a48-81c3-83647fd1eca6\).html](http://portal.research.lu.se/portal/en/publications/massive-mimo-channel-modeling-extension-of-the-cost-2100-model(13b69bfa-775b-4a48-81c3-83647fd1eca6).html)
- Gozalvez, J. (2015). Tentative 3GPP timeline for 5G mobile radio. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 10(3), 1218. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7225225/>
- Hansen, C.J. (2011). WiGiG: Multi-gigabit wireless communications in the 60 GHz band. *IEEE Wireless Communications*, 18(6), 67. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6108325/>
- Tsiftsis, T., Guoru Ding, Yulong Zou, Karagiannidis, G., Zhu Han & Hanzo, L. (2016). IEEE JSAC Special Issue on Spectrum Sharing and Aggregation for Future Wireless Networks, Part I. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(10), 2533-2536. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7589167/>
- ITU-R. (2017). Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s). *Technical Report M. [IMT-2020.TECH PERF REQ]*. 11p. Recuperado de <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2410-2017>
- Müller, K., Schwarz, H., Marpe, D., Bartnik, C., Bosse, S., Brust, H., Hinz, T., Lakshman, H., Merkle, P., Rhee, F.H., Tech, G., Winken, M. & Wiegand, T.

- (2013). 3D High-Efficiency Video Coding for Multi-View Video and Depth Data. *IEEE Transactions on Image Processing*, 22(9), 3366 - 3378. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6519266/>
- Jacob, M., Priebe, S., & Kürner, T. (2013). Fundamental analyses of 60 GHz human blockage. in EuCAP 7th, 11712. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6546228/>
- Kalliolaet, K., Sulonen, K., Laitinen, H., Kivekas, O., Krogerus, J., & Vainikainen, P. (2002). Angular power distribution and mean effective gain of mobile antenna in different propagation environments. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 51(5), 823838. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/1105924/>
- Larsson, E., Edfors, O., Tufvesson, F., & Marzetta, T. (2014). Massive MIMO for next generation wireless systems. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), 33-39. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6736761/>
- Liu, L., Oestges, C., Poutanen, J., Haneda, K., Vainikainen, P., Qutitn, F. Tufvesson, F. & De Doncker, P. (2012). The COST 2100 MIMO channel model. *IEEE Wireless Communications*, 19(6), 9299. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6393523/>
- Marcus, M.J. (2015). 5G and IMT for 2020 and beyond [spectrum policy and regulatory issues]. *IEEE Wireless Communications*, 22(4), 1-3. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7224717/>
- Molischet, A., Asplund, H., Heddergott, R., Steinbauer, M., & Zwick, T. (2006). The COST259 directional channel model Part I: Overview and methodology. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5(12), 34213433. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4027578/>
- Rappaport, T. MacCartney, G., Samimi, M., Shu Sun (2015). Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design. *IEEE Transactions Communication*, 63(9), 30293056. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7109864/?part=1>
- Rusek, F., Persson, D., Lau, B., Larsson, E., Marzetta, T.,

- Edfors, O., & Tufvesson, F. (2013). Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays. *IEEE Signal Processing Magazine*, 30(1), 4060. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6375940/>
- Shokri-Ghadikolaei, H., Boccardi, F., Fischione, C., Fodor, G., & Zorzi, M. (2016). Spectrum sharing in mmWave cellular networks via cell association, coordination, and beamforming. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(11), 2902-2917. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7583670/>
- Simsek, M., Aijaz, A., Dohler, M., Sachs, J. & Fettweis, G. (2016). 5G-enabled tactile internet. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(3), 9299. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7403840/>
- Steinbauer, M., Molisch, A. F., & Bonek, E. (2001). The double-directional radio channel. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 43(4), 5163. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/iel5/74/20580/00951559.pdf>
- Weiler, R., Peter, M., Keusgen, W., Maltsev, A., Karls, I., Pudseyev, A., Boloin, I., Siaud, I. & Ulmer-Moll, A.M. (2016). Quasi-deterministic millimeter-wave channel models in MiWEBA. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2016(84). <https://doi.org/10.1186/s13638-016-0568-6> Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1186/s13638-016-0568-6>