

Impacto de las características de la red eléctrica en canales MIMO PLC domésticos

Julio A. Corchado López⁽¹⁾, José A. Cortés Arrabal⁽¹⁾, Francisco J. Cañete Corripio⁽¹⁾, Luis Díez del Río⁽¹⁾
julioalc, jaca, francis, diez@ic.uma.es

⁽¹⁾Dpto. de ingeniería de comunicaciones. Universidad de Málaga.

Resumen—The recent release of indoor Power Line Communications (PLC) specifications with Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) capabilities has significantly increased the bit rates achieved in these channels. However, the performance reached by the use of these methods may differ from one location to another due to the heterogeneous nature of the domestic power grid. In this work, a closer look at the relation between channel performance and the power grid cabling is taken. To that end, some channel features like attenuation, spatial correlation and capacity are analyzed by means of a set of 50 simulated channel topologies in the frequency band from 1 to 80 MHz.

I. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, las tecnologías basadas en PLC se han afianzado como una solución competitiva a la hora de prestar diversos servicios, como la transmisión de contenido multimedia o la conexión de equipos de manera local, de manera eficaz y rentable ya que utiliza como medio de propagación la red eléctrica ya desplegada.

A comienzos del siglo XXI, organizaciones como la HomePlug Power Alliance (HPA) y la International Telecommunication Union (ITU) lanzaron sus primeras especificaciones para sistemas de comunicaciones PLC. Con el fin de satisfacer la demanda de velocidades de transmisión más elevadas, una segunda generación de tecnologías PLC, las cuales utilizan una porción mayor del espectro (hasta 100 MHz en lugar de los 30 MHz que se venían utilizando de manera convencional), fue lanzada al mercado. No obstante, muchos de los servicios más demandados actualmente, tales como la transmisión de vídeo en alta definición u otros relacionados con *cloud computing*, requieren mayores tasas binarias, enlaces más fiables y una cobertura mejorada de la red. Para satisfacer esta demanda, una tercera generación de sistemas PLC fue desarrollada. Algunas de las especificaciones más recientes, como HomePlug AV2 [1] y G.hn [2], utilizan a su favor la naturaleza MIMO del canal PLC. Es preciso señalar que el empleo de técnicas MIMO en entornos cableados es posible debido a la presencia de un tercer conductor, en este caso la tierra (E), que junto con el conductor de fase (P) y el neutro (N), disponibles en prácticamente la totalidad de edificios, posibilitan el uso de técnicas MIMO sobre el canal resultante.

De manera paralela al desarrollo de especificaciones para PLC, el modelado de canales PLC también dio el salto a las comunicaciones MIMO. Estos continuaron la tendencia seguida en el modelado de canales SISO, en el que pueden encontrarse dos estrategias de simulación claramente diferenciadas: la estrategia *top-down*, basada en parámetros estadísticos de los canales [3]; y la estrategia *bottom-up*, que utiliza la información de la topología de la red para tratar de replicar la respuesta del canal [4].

La extensión MIMO de los modelos *top-down* suele ser obtenida mediante la inclusión de un término que determina el nivel de correlación entre los distintos enlaces SISO que forman el canal. Esta correlación puede verse afectada por diversos factores, como el tipo de cableado empleado o el modo de realizar las tomas de tierra, por lo que este término de correlación debe elegirse conforme a las características de la red que se pretenda modelar [5]. No obstante, los modelos *top-down* presentan ciertas ventajas sobre los *bottom-up*, como un coste computacional mucho menor.

En cuanto a los modelos *bottom-up* (categoría en la que se encuentra el modelo que se va a utilizar en este trabajo), existe una gran cantidad de ejemplos de este tipo en la literatura, tanto para canales SISO [4] como para canales MIMO [6]. Este tipo de modelos no necesita la inclusión de términos extra para reflejar la correlación en los canales MIMO, ya que esta información es proporcionada de manera implícita mediante la descripción física de la red. Los modelos *bottom-up* son especialmente útiles para el estudio de técnicas de transmisión *multihop-multicast*, ya que los canales obtenidos reflejan de forma natural la correlación que existe entre los enlaces que comparten al menos uno de los extremos [7], y para realizar predicciones sobre las prestaciones de un servicio PLC a partir de la descripción de la estructura de la red. No obstante, la mayoría de los generadores presentados hasta la fecha no reflejan de manera adecuada la relación que existe entre los enlaces que forman el canal [8]; a este concepto de correlación entre enlaces que forman un canal MIMO se lo conoce como correlación espacial. Con objeto de incluir en las simulaciones una característica tan importante de los canales PLC como es la correlación espacial, se va a utilizar el simulador presentado en [9]; cuya contribución más notable es la correcta caracterización de dicha correlación espacial.

El artículo se organiza como sigue. La sección II describe someramente el modelo de generador utilizado. En la sección III se ilustra mediante simulaciones la disparidad de prestaciones entre canales con diferente cableado. Por último, en la sección IV se recogen las conclusiones extraídas de este trabajo.

II. GENERADOR DE CANAL BASADO EN MTL

En esta sección se presenta un resumen del modelo en el que está basado el generador de canales utilizado para obtener las simulaciones que aparecen en el apartado III. El modelo correspondiente al generador empleado, cuya descripción detallada puede encontrarse en [9], es de tipo *bottom-up* y está basado en la teoría de líneas de transmisión multifilares (del inglés *Multiconductor Transmission Line theory* - MTL). La descripción del modelo está dividida en tres apartados

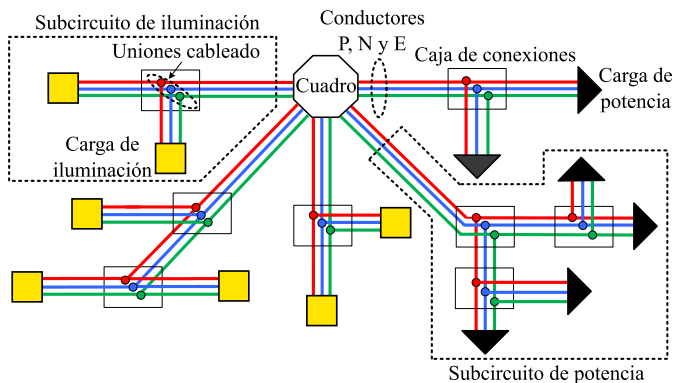


Fig. 1. Estructura arborescente característica de la red eléctrica doméstica. Habitualmente encontramos 5 subcircuitos que parten del panel principal: 3 circuitos de baja potencia, en el que figuran las derivaciones causadas por interruptores y terminaciones para iluminación y otros dispositivos (representados con cuadrados amarillos); 2 circuitos de distribución de alta potencia, terminados con impedancias pertenecientes a dispositivos de alto consumo (marcados con triángulos negros).

claramente diferenciados que abarcan diferentes aspectos del canal PLC como son la estructura, el cableado y las cargas conectadas a la red.

El objetivo de la presente sección es el de facilitar al lector la comprensión de las diferencias entre los distintos escenarios simulados.

A. Estructura de la red

La red eléctrica doméstica, entendida como la parte de la red de distribución de energía eléctrica comprendida entre el cuadro de distribución y las terminaciones de red (enchufes), presenta una estructura de tipo arborescente muy ramificada y está dividida en una serie de subcircuitos, tal y como se indica en la Figura 1. Estos subcircuitos están clasificados en dos categorías según la potencia que deben ser capaces de suministrar: circuitos de baja potencia (de iluminación, baño, propósito general) y de alta potencia (con una función más específica: cocina, calentadores de agua, calefacción, etc.). Debido al carácter especializado de los circuitos de mayor potencia, estos presentarán una ramificación menor (tienen un número menos de terminaciones) por lo que las pérdidas por desadaptación entre elementos conectados en un mismo subcircuito de potencia serán bajas. No obstante, los accesos de PLC suelen encontrarse conectados a los subcircuitos de propósito general (baja potencia), de forma que el efecto de las pérdidas por desadaptación resultarán normalmente más determinantes que el de las pérdidas por conducción.

En este trabajo se van a simular canales PLC de viviendas pequeñas, por lo que el número de circuitos eléctricos presentes en cada escenario será cinco (en casas grandes u oficinas el número de circuitos eléctricos puede ser mayor, incluso en algunos casos puede que existan varios cuadros de distribución que sean controlados por un cuadro general). El número de terminaciones de los canales generados se encuentra alrededor de veinte, mientras que la longitud media del enlace entre transmisor y receptor es aproximadamente de 30 metros; valores que se encuentran dentro de lo esperado en el tipo de vivienda elegido.

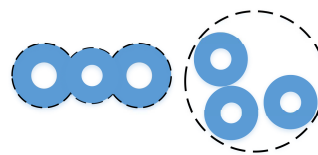


Fig. 2. Sección transversal de un cable multipolar plano (izquierda) y un cable monopolar (derecha) de tres conductores. Nótese que en el caso del cable monopolar, la distancia entre los conductores varía a lo largo de la línea ya que estos van sueltos dentro de una estructura rígida, típicamente un tubo de plástico corrugado

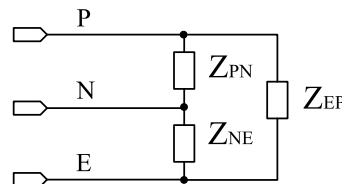


Fig. 3. Modelo de elementos concentrados para elementos conectados a la red eléctrica doméstica. Cada uno de los bloques de impedancia (Z_{PN} , Z_{NE} y Z_{EP}) está formado por la conexión en serie de circuitos RLC-paralelo.

B. Simulación del cableado

La instalación eléctrica de la mayor parte de las viviendas actuales está compuesta por tres conductores: el conductor de fase (P), neutro (N) y tierra (E). Estos tres cables suelen encontrarse dispuestos de manera paralela durante todo el trayecto desde el cuadro de distribución hasta prácticamente las terminaciones de red. En España, el cableado se suele instalar utilizando cableado de tipo monopolar (los tres conductores van en cables individuales que discurren por una misma guía, generalmente un tubo de plástico corrugado). Esta práctica, bastante extendida en otras partes de Europa, difiere de la empleada en otras regiones como el Reino Unido donde predomina el uso del cable plano; en el que los tres conductores van fijos en una estructura rígida (ver Figura 2).

El problema que surge a la hora de simular canales PLC de viviendas en las que el cableado empleado es monopolar (como las españolas) mediante el uso de la teoría MTL, es que al usar MTL para simular líneas de transmisión se supone que los conductores van perfectamente paralelos entre sí durante toda la longitud de línea. Esto se adecua bien al caso del cableado utilizado en el Reino Unido y no al caso español, en el que los cables están sueltos dentro de sus guías. Para tratar de mitigar este problema, el simulador divide las líneas de transmisión que simulan cada tramo de línea en 5 segmentos más pequeños de la misma longitud y asigna a cada uno de estos segmentos distancias aleatorias entre los conductores. De esta forma se pretende reflejar el efecto de la distancia variable entre conductores, causado por el empleo de cableado monopolar, sin renunciar al uso de la teoría MTL.

C. Generador de cargas conectadas a la red

En [4], [10] se muestra que una gran cantidad de aparatos domésticos presentan una impedancia de entrada con un comportamiento resonante en frecuencia, es decir, están compuestas por algunas bandas estrechas de alta impedancia que se encuentran rodeadas por zonas de menor impedancia.

Con objeto de reflejar este comportamiento, se utilizan una serie de circuitos RLC-paralelo (los cuales tienen una

característica resonante en frecuencia) para formar cada uno de los elementos (Z_{PN} , Z_{NE} y Z_{EP}) que componen la estructura con la que se pretende modelar las impedancias de los dispositivos conectados a la red eléctrica, la cual se muestra en la Figura 3.

III. CARACTERÍSTICAS DEL CANAL MIMO PLC EN FUNCIÓN DEL CABLEADO

En esta sección se ilustran mediante gráficas las diferencias que existen entre canales MIMO PLC formados por cableado monopolar y por cableado plano en cuanto a ciertas características de los mismos como son la atenuación, la correlación espacial y la capacidad. Para obtener las curvas que componen este apartado, se ha utilizado el simulador indicado en la sección II para generar 50 topologías de canal MIMO PLC, cada una de ellas con las dos configuraciones de cableado bajo análisis: plana y monopolar.

En primer lugar, se procede a evaluar la atenuación promedio de los enlaces individuales que forman el canal MIMO. En la Figura 4 se muestra la atenuación promedio por frecuencias de dichos canales canales simulados.

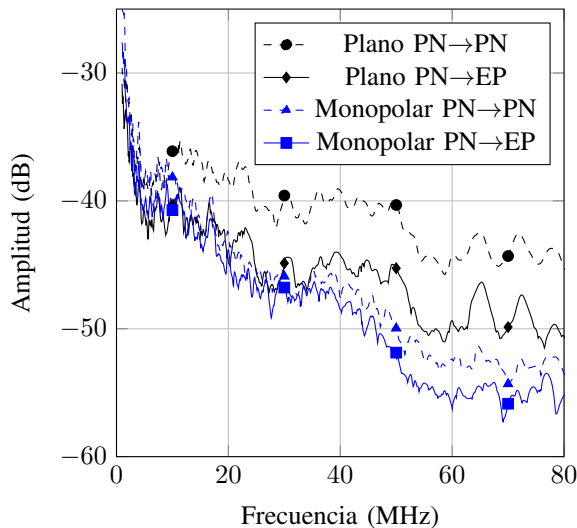


Fig. 4. Atenuación promedio de los enlaces SISO de 50 canales MIMO obtenidos mediante el simulador propuesto con dos configuraciones de cableado diferentes: plana y monopolar.

En la Figura 4, se puede apreciar que los canales directos, los que utilizan el mismo puerto en transmisión que en recepción (PN \rightarrow PN), que utilizan cableado plano atenúan aproximadamente unos 5 dB menos que los canales formados por cable de tipo monopolar, aumentando dicha diferencia hasta los 8-9 dB en las zonas más altas de la banda bajo estudio (< 80 MHz). En cuanto a la atenuación en los canales acoplados, los que utilizan distintos puertos en transmisión y en recepción (PN \rightarrow EP), apenas hay diferencias por debajo de los 30 MHz, aumentando esta diferencia hasta los 5 dB en la zona de frecuencias altas.

Para evaluar el comportamiento MIMO de los canales, el parámetro que se va a analizar es la correlación espacial, el cual se suele cuantificar en el caso MIMO 2x2 mediante el número de condición de la matriz del canal [11]:

$$\kappa = 20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right) \text{ (dB)}, \quad (1)$$

donde σ_i representa el valor singular i -ésimo de la matriz de canal \mathbf{H} . Sin que esto suponga ninguna pérdida de generalidad, se asume que el primer valor singular es siempre mayor o igual que el segundo valor, por lo que $0 \leq \kappa < \infty$. Altos valores de κ indican que uno de los dos caminos independientes obtenidos tras la diagonalización del canal está muy atenuado con respecto al otro. Por el contrario, si $\kappa \rightarrow 0$, se obtienen canales desacoplados que sufren una atenuación semejante, con lo que generalmente se pueden alcanzar mayores velocidades de transmisión que en el caso anterior. Nótese que la velocidad obtenible en los canales MIMO no sólo depende de la relación entre la atenuación de los caminos desacoplados tras diagonalizar el canal, sino también de otros factores como el ruido o la atenuación en términos absolutos de cada uno de estos caminos. No obstante, el uso de técnicas MIMO (como precodificación) proporciona mayores mejoras en escenarios en los que estos caminos presentan valores de atenuación semejantes, $\kappa \rightarrow 0$.

En la Figura 5 se muestra la función de distribución acumulada (CDF) del parámetro κ obtenido de las 50 topologías simuladas con ambas configuraciones de cableado.

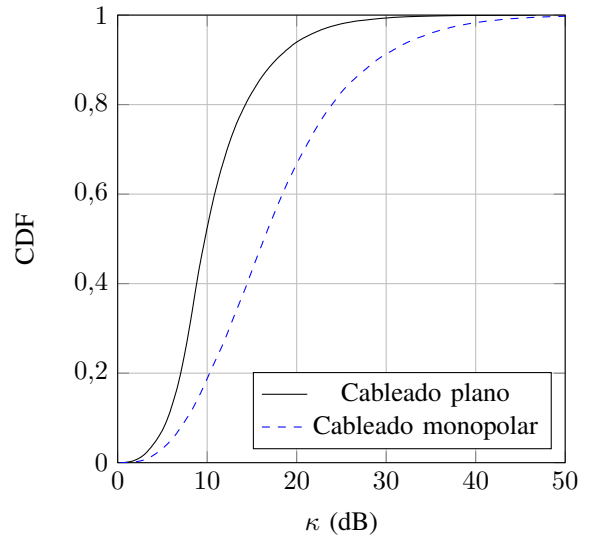


Fig. 5. CDF del número de condición de la matriz de 50 canales MIMO 2x2 simulados utilizando distintos tipos de cableado: plano y monopolar. Puertos de transmisión/recepción: PN y EP.

Tal y como puede apreciarse en la Figura 5, las matrices de canal MIMO correspondientes a canales con cableado plano están mejor condicionadas que las matrices de canales simulados con cableado monopolar. Este hecho, junto con la menor atenuación de los canales con cableado plano (Figura 4), permite en cierto modo anticipar el resultado del análisis de la capacidad de los canales que se muestra a continuación.

Una de las formas más habituales de evaluar las prestaciones de un canal suele ser mediante el cálculo de su capacidad. Si bien es cierto que para obtener la capacidad de un canal se necesita conocer en detalle las características estadísticas del ruido presente en el canal y que sólo existen expresiones cerradas sencillas para ciertas distribuciones, como la gaussiana; puede asumirse que el ruido es AWGN para obtener una cota inferior de las prestaciones del canal mediante el empleo de la conocida expresión para el cálculo de la capacidad de

un conjunto de canales paralelos con *fading* plano, ancho de banda Δf y ruido gaussiano estacionario [12]:

$$R_{SISO} = \sum_{k \in K} \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{P_k |H_k|^2}{N_k} \right), \quad (2)$$

donde N_k , P_k y H_k son la potencia de ruido, la potencia de transmisión y la respuesta en frecuencia en el canal k -ésimo, respectivamente. K indica el conjunto de índices de frecuencia utilizados. En el caso de canal MIMO, esta capacidad se calcula como [12]:

$$R_{MIMO} = \sum_{j=1}^2 \sum_{k \in K} \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{P_k^j \lambda_k^j}{N_k^j} \right), \quad (3)$$

donde N_k^j , P_k^j y λ_k^j son la potencia de ruido, la potencia de transmisión y el autovalor del camino j -ésimo del canal MIMO a la frecuencia k -ésima, respectivamente. Los autovalores λ_k^j se obtienen de la matriz $\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H$, siendo \mathbf{H}_k la matriz de canal MIMO a la frecuencia k -ésima y $(-)^H$ el operador de matriz conjugada traspuesta. Estos autovalores están relacionados con los valores singulares de \mathbf{H} mediante la expresión $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$. Nótese que en la Figura 5 se muestra el cociente entre los valores singulares de \mathbf{H} y no entre los autovalores de $\mathbf{H} \mathbf{H}^H$. Debido a la alta SNR del canal a algunas frecuencias, se ha fijado el número máximo de bits por símbolo a 12 ya que éste es el tamaño máximo de constelación contemplado en algunos estándares. Se van a considerar, para el cálculo de la capacidad, valores de potencia de ruido y de transmisión constantes en toda la banda de operación (1-80 MHz). Mientras que el uso de ruido blanco es un requisito para poder utilizar la expresión (3), la transmisión de potencia uniforme en toda la banda describe una situación en cierta manera irreal ya que en [13] se define una máscara que reduce la potencia transmitida en 30 dB entre 30 y 100 MHz. No obstante, el objetivo de este trabajo no es tanto el de mostrar la capacidad de los canales MIMO PLC con distinto tipo de cableado, sino el de resaltar la diferencia que existe entre ellos; por lo que esta aproximación no colisiona con el propósito principal del documento.

En la Figura 6 se muestra la CDF de la capacidad calculada para cada canal utilizando la expresión (3) con $P_k^j = -25$ dBm/kHz y $N_k^j = -100$ dBm/kHz para todo $k \in K$ y $j \in [1, 2]$. Como se podía anticipar tras conocer las características de atenuación y correlación espacial de los canales, la capacidad de los canales MIMO PLC con cableado plano es mayor que la de los canales con cableado monopolar.

IV. CONCLUSIONES

En este documento se han puesto de manifiesto, mediante el uso de simulaciones, las diferencias existentes entre canales MIMO PLC con cableado monopolar y cableado plano, en aspectos tales como la atenuación y la correlación espacial. Estas diferencias se traducen en mayores prestaciones alcanzadas por los canales con cableado plano con respecto a los canales con cableado monopolar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Marvell Hispania S.A. su colaboración en este trabajo.

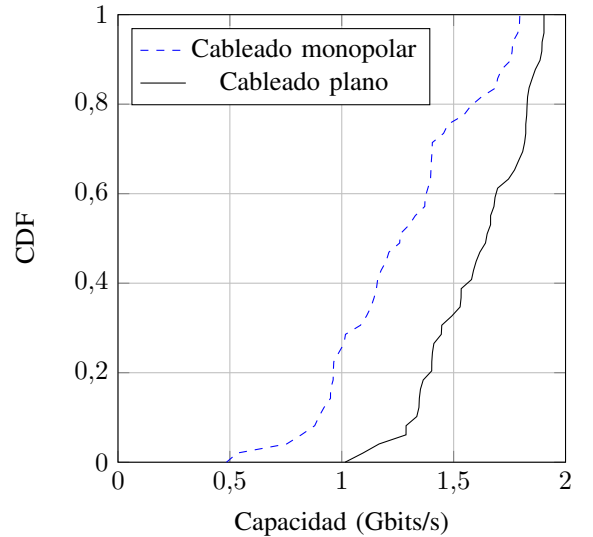


Fig. 6. CDF de la capacidad de cada uno de los 50 canales MIMO 2x2 simulados utilizando distintos tipos de cableado: plano y monopolar. Densidad de potencia de señal transmitida: -25 dBm/kHz. Densidad de potencia de ruido: -100 dBm/kHz. Puertos de transmisión/recepción: PN y EP.

REFERENCIAS

- [1] HomePlug Alliance, "HomePlug AV Specification Version 2.0," HomePlug Alliance, January 2012.
- [2] *Unified high-speed wireline-based home networking transceivers - Multiple input/multiple output specification*, ITU-T Recommendation G.9963, 2011 Std.
- [3] M. Zimmermann and K. Dostert, "A Multipath Model for the Powerline Channel," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 4, pp. 553–559, Apr 2002.
- [4] F. J. Cañete, L. Díez, J. A. Cortés, and J. T. Entrambasaguas, "Broadband Modelling of Indoor Power-Line Channels," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 48, no. 1, pp. 175–183, Feb 2002.
- [5] M. Babic, M. Hagenau, K. Dostert, and J. Bausch, "D4: Theoretical Postulation of PLC Channel Model," Opera, Tech. Rep., 2005.
- [6] F. Versolatto and A. M. Tonello, "An MTL Theory Approach for the Simulation of MIMO Power-Line Communication Channels," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 3, pp. 1710–1717, July 2011.
- [7] P. J. Piñero, J. A. Cortés, J. Malgosa, F. J. Cañete, P. Manzanera, and L. Díez, "Analysis and improvement of multicast communications in HomePlug AV-based in-home networks," *Elsevier Computer Networks*, vol. 62, pp. 89–100, 2014.
- [8] D. Schneider, A. Schwager, W. Baschlin, and P. Pagani, "European MIMO PLC Field Measurements: Channel Analysis," in *IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, March 2012, pp. 304–309.
- [9] J. A. Corchado, J. A. Cortes, F. J. Canete, and L. Díez, "An MTL-based Channel Model for Indoor Broadband MIMO Power Line Communications," *Early Access Articles of the IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2016.
- [10] M. Antoniali and A. M. Tonello, "Measurement and Characterization of Load Impedances in Home Power Line Grids," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, no. 3, pp. 548–556, March 2014.
- [11] L. T. Berger, A. Schwager, P. Pagani, and D. Schneider, *MIMO Power Line Communications: Narrow and Broadband Standards, EMC, and Advanced Processing*. CRC Press, 2014.
- [12] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2005.
- [13] *Unified high-speed wireline-based home networking transceivers - Power spectral density specification*, ITU-T Recommendation G.9964, 2011 Std.