

Reutilización Fraccional de Frecuencia con Sectorización sobre Redes Celulares

José C. Marín-Barranquero, Gerardo Gómez, Francisco J. Martín-Vega

{jcmb, ggomez, fjmvega}@ic.uma.es

Dpto. Ingeniería de Comunicaciones. E.T.S. Ingeniería de Telecomunicación
Universidad Málaga, Campus de Teatinos, 29071 Málaga.

Abstract- In this paper, we investigate the downlink of homogeneous LTE cellular networks with Fractional Frequency Reuse (FFR) and sectorized antennas where non-ideal radiation patterns have been considered. Three frequency allocation schemes are proposed: i) static; ii) dynamic and iii) proportional, that differ in complexity and performance. Such schemes are compared in terms of aggregate (per cell) capacity and fairness for the case of 3 and 6 sectors. Results reveal that proportional allocation achieves a good balance between aggregate capacity and fairness, while dynamic allocation achieves the highest capacity with a small fairness. Finally, it is observed that 6-sectors configuration leads to a higher capacity and fairness.

I. INTRODUCCIÓN

La interferencia inter-celda es el principal factor limitante en los sistemas de comunicaciones móviles, el cual se hace patente especialmente en los despliegues actuales con una gran cantidad de estaciones base. Con el fin de minimizar dicha interferencia, han ido apareciendo diversas técnicas como la sectorización o la reutilización fraccional de frecuencias (FFR, *Fractional Frequency Reuse*).

Por un lado, la sectorización en redes celulares [1-2] se ha venido utilizando ampliamente desde las redes 2G para reducir la interferencia inter-celda, principalmente para los usuarios ubicados en el borde de las celdas. Para ello, la estación base utiliza haces de transmisión con un diagrama de radiación direccional, y en el que el ángulo de inclinación de las antenas juega un papel clave para delimitar el máximo alcance del diagrama de radiación.

Por otra parte, la técnica FFR [3-4] se emplea para reducir la interferencia inter-celda, compensando parcialmente la diferencia en capacidad que existe entre los usuarios de borde y centro de celda. Esto se consigue asignando distintas sub-bandas de frecuencia a los usuarios en función de su relación señal a ruido más interferente (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*) recibida. Hasta el momento, las técnicas descritas anteriormente han sido ampliamente investigadas de manera aislada [1-3].

Recientemente, en [4] se analiza el uso de ambas técnicas (FFR y sectorización) conjuntamente, aunque se emplea una única alternativa de reparto de sub-bandas de frecuencia. En este artículo se realiza un análisis comparativo del uso de las técnicas de sectorización y FFR conjuntamente, utilizando tres algoritmos diferentes que definen la porción de ancho de banda asignada a las distintas sub-bandas de frecuencia. El objetivo es encontrar el valor óptimo de un umbral de SINR que determine las distintas regiones de la celda, con el fin de maximizar la capacidad del sistema y/o grado de imparcialidad entre usuarios en cuanto a capacidad.

El resto de este artículo está organizado como se detalla a continuación. En la sección II se describe el modelo del sistema, así como los distintos algoritmos que se han implementado. La sección III muestra los resultados que se han obtenido mediante simulación. Por último, las conclusiones se detallan en la sección IV.

II. MODELO DE SISTEMA

Se ha considerado un modelo de sistema homogéneo formado por un *grid* hexagonal, donde λ_{BS} representa la densidad de estaciones base (BS, *Base Stations*) por m^2 y N_u el número de usuarios por BS. Dichos usuarios se distribuyen de forma uniforme dentro de cada celda.

A. Diagrama de radiación y potencia recibida por usuario

El número de sectores por estación base se representa con el símbolo n_{sect} , estando este artículo centrado en el análisis para $n_{sect} = 3$ y 6. La forma de modelar estos sectores se hace mediante los diagramas de radiación propuestos en [5]. A continuación, se definen las expresiones para la ganancia (en decibelios) del diagrama de radiación horizontal

$$G_h^{dB}(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, FBR \right] + G_m, \quad (1)$$

y diagrama de radiación vertical

$$G_v^{dB}(\phi) = -\min \left[12 \left(\frac{\phi - \phi_{tilt}}{\phi_{3dB}} \right)^2, SLL \right], \quad (2)$$

donde θ y ϕ son las coordenadas esféricas de azimut y colatitud, respectivamente; θ_{3dB} y ϕ_{3dB} denotan el ancho de haz a potencia mitad (HPBW, *Half Power Beam-Width*) del diagrama de radiación horizontal y vertical, respectivamente; ϕ_{tilt} es el ángulo de inclinación eléctrico; FBR (*Front-to-Back Ratio*) es la relación lóbulo principal a lóbulo posterior; SLL (*SideLobe Level*) es el nivel del lóbulo lateral; por último, G_m representa la máxima ganancia de la antena. A dicho parámetro se le suele asignar un valor de 14 dBi [6] para antenas tri-sectoriales y 17 dBi para antenas de 6 sectores.

El diagrama de radiación en 3D [5] se expresa en función de $G_h^{dB}(\theta)$ y $G_v^{dB}(\phi)$ como:

$$G(\phi, \theta) = G_E - \min \left(- \left(G_h^{dB}(\theta) + G_v^{dB}(\phi) \right), FPB \right), \quad (3)$$

donde G_E representa la máxima ganancia de la antena en su dirección principal, típicamente con un valor de 8 dBi [5].

En cuanto a las pérdidas por propagación, se ha asumido el modelo del 3GPP [7] en entorno urbano, el cual se caracteriza por

$$G_{PL_{i,k}}(dB) = 40(1 - 4 \cdot 10^{-3} h_{BS_k}) \cdot \log_{10}(R_{i,k}), \quad (4)$$

$$-18 \cdot \log_{10}(h_{BS_k}) + 21 \cdot \log_{10}(f) + 80$$

donde h_{BS} define la altura de la estación base en metros y f la frecuencia de portadora en MHz.

B. FFR con sectorización

Se considera que el ancho de banda disponible (BW, Bandwidth), se reparte entre distintas sub-bandas. El número de sub-bandas, M , es igual al número de sectores más la banda central, es decir, $M = n_{sect} + 1$, donde se asume que todas las BSs usan el mismo ancho de banda. Todos los sectores planifican a los usuarios en dos subbandas: 1) subbanda central, que es común a todos los sectores de todas las BSs; 2) subbanda de borde, que es distinta para cada sector de la misma BS. Por otro lado, los usuarios se clasifican en usuarios de borde y centro, según si su SINR recibida es menor o mayor que un umbral de SINR, γ_{th} . Dicha SINR se calcula considerando al usuario como de centro.

C. Algoritmos de planificación de frecuencias

A continuación, se proponen tres algoritmos distintos de asignar BW a cada subbanda:

a) Asignación estática: considera que el BW disponible se reparte a partes iguales entre todas las sub-bandas. El BW de la sub-banda j -ésima, se obtiene como sigue

$$BW_j^{est} = \frac{BW}{M}. \quad (5)$$

b) Asignación dinámica: reparte el BW entre aquellas sub-bandas que tienen usuarios activos, de modo que el BW de la sub-banda j -ésima es:

$$BW_j^{din} = \frac{\mathbf{1}(N_j > 0) BW}{\sum_{k=1}^M \mathbf{1}(N_k > 0)} \quad (6)$$

donde $\mathbf{1}(\mathcal{A})$ es la función indicadora, que es 1 si la condición \mathcal{A} es cierta y 0 en caso contrario. El denominador de la función (5) da el número de sectores activos.

c) Asignación proporcional: inspirados por [4], en este trabajo se propone el siguiente mecanismo de asignación de frecuencias imparcial, que asigna una porción de BW similar a cada usuario con independencia de si el usuario es de centro o de borde. Una vez los usuarios han sido clasificados en función de su SINR, se calcula el número de usuarios de centro, N_c . Con este valor se calcula el parámetro α , que determina la asignación de BW a las distintas sub-bandas como $\alpha = N_c / N_u$, siendo N_u el número total de usuarios de la celda. Así, se determina el BW por sub-banda como:

$$BW_j^\alpha = \begin{cases} \alpha \cdot BW, & \text{si } j = 1 \\ \frac{(1 - \alpha) \cdot BW}{n_{sect}} & \text{si } j > 1 \end{cases}, \quad (7)$$

donde $j = 1$ es la sub-banda de centro y el resto son las sub-bandas de borde de los distintos sectores.

D. Principales métricas

La SINR del usuario i se puede expresar como

$$\gamma_i = \frac{P_{rx_i}}{\sum_{k=1}^{N_{BS}-1} P_{rx_k} + \sigma^2}, \quad (8)$$

donde σ^2 es la potencia de ruido aditivo blanco Gaussiano (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*); N_{BS} representa el número de estaciones base del sistema; P_{rx_i} representa la potencia recibida por el usuario i , que puede computarse como

$$P_{rx_i} = \max\{G_{PL_i} \cdot G_s \cdot P_{tx}\}, \quad (9)$$

donde G_{PL_i} representa las pérdidas de propagación respecto a la estación base objetivo para el usuario i ; G_s representa la ganancia de antena para $s \in [1, n_{sect}]$, y P_{tx} denota la potencia transmitida por la estación base servidora por recurso (RE, *Resource Element*). La potencia recibida por cada usuario se calcula para cada sector de la estación base y posteriormente se calcula el máximo para determinar de qué sector se recibe con mayor potencia y así poder hacer la asociación al sector correspondiente.

Por otro lado, se define la potencia de los interferentes a un determinado usuario objetivo como

$$P_{rx_k} = G_{PL_{i,k}} \cdot G_{s,i} \cdot P_{tx}, \quad (10)$$

donde la posición de cada usuario i a cada estación base k se tiene en cuenta al calcular tanto las pérdidas de propagación $G_{PL_{i,k}}$ como la ganancia de antena de la sub-banda interferente $G_{s,i}$. Se ha considerado el efecto de las pérdidas por multicamino, modelándolas mediante una distribución tipo Rayleigh. Los interferentes serán todos aquellos sectores de cada celda que transmitan en la misma sub-banda de la que esté recibiendo el usuario objetivo.

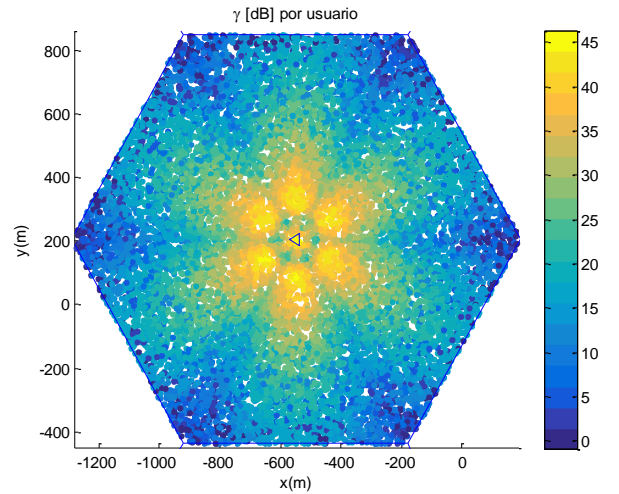


Fig. 1. SINR por usuario con 6 sectores

La Fig. 1 representa la SINR (γ (8)), expresada en dB, de los usuarios ubicados en la celda objetivo para una densidad de 10000 usuarios/celda. Los niveles de γ son altos para una red convencional con macro-celdas (caso omnidireccional) ya que se suele trabajar con valores en el rango $\gamma \in [-5, 40]$ dB. En este caso, al emplear sectorización y FFR conjuntamente, el número de interferentes en el sistema se está viendo reducido notablemente, aumentando así el valor de SINR.

La capacidad total por BS se escribe como:

$$C_T^k = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} C_{U,i,j}^k, \quad (11)$$

siendo $C_{U,i,j}^k$ la capacidad del usuario i -ésimo asociado al sector j -ésimo, que se representa como

$$C_{U,i,j}^k = \frac{BW_j^k}{N_j} \log_2(1 + \gamma_{i,j}), \quad (12)$$

donde $\gamma_{i,j}$ es la SINR del usuario i asociado al sector j y $k=\{est,din,\alpha\}$ identifica a los distintos esquemas estudiados.

Por último, para evaluar el grado de imparcialidad entre los usuarios, se ha definido el *fairness* inverso, \mathcal{F}^{-1} , como

$$\mathcal{F}^{-1} = \max_{\substack{i \in \{1, N_j\} \\ j \in \{1, M\}}} (C_{U,i,j}^k) - \min_{\substack{i \in \{1, N_j\} \\ j \in \{1, M\}}} (C_{U,i,j}^k), \quad (13)$$

El *fairness* definido según (13) representa la diferencia entre la capacidad del mejor y del peor usuario de una BS. Mientras mayor sea esta métrica, más injusto es el sistema.

III. RESULTADOS NUMÉRICOS

Los parámetros más relevantes para la obtención de los resultados se resumen en la Tabla I.

TABLA I Parámetros de simulación

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
N_{BS}	130	N_u	20
λ_{BS}	9e-8 BSs/m ²	BW	10 MHz
f_c	2.1 GHz	n_{sect}	{3, 6}
G_m	{14, 17} dBi	<i>Tilt</i>	{12.4, 8.3}°
Vert. <i>HPBW</i>	{12.8, 8.2}°	Hor. <i>HPBW</i>	{65, 33}°
<i>FBR</i>	{20, 23} dB	<i>SLL</i>	{20, 23} dB
P_{tx}	15.2dBm/RE	Realizaciones	200
TN	-174dBm/Hz	NF	10 dBs

La Fig. 2 muestra el número de usuarios asignados al centro y borde de celda objetivo en función del umbral de FFR, γ_{th} . Se puede ver cómo para un umbral $\gamma_{th} = -15$ dB todos los usuarios son de centro; para el caso de C_T^{din} y C_T^α , estaríamos en la situación de un factor de reuso unidad. A medida que se va aumentando este umbral empieza a crecer el número de usuarios de borde. Se aprecia que en torno a los 5 dBs tenemos los mismos usuarios en centro y borde de celda; a partir de 45 dBs casi todos los usuarios son de borde de celda, desapareciendo así la banda central para los algoritmos C_T^{din} y C_T^α , quedando únicamente la sectorización.

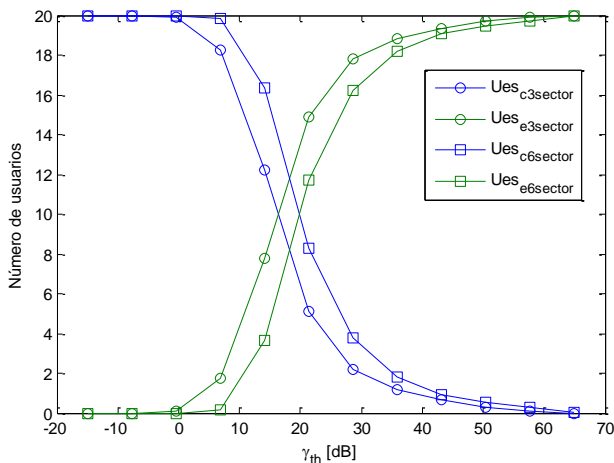


Fig. 2. Usuarios en borde y centro de celda para cada umbral.

La Fig. 3 representa la capacidad total del sistema en función de γ_{th} para cada uno de los algoritmos descritos en el apartado II, usando 3 y 6 sectores por BS. Se han promediado 200 escenarios, lanzando aleatoriamente los usuarios en el plano. De esta forma se obtienen valores de capacidad media agregada por sub-banda para cada uno de los umbrales. Para la interpretación de estos resultados hay que tener presente los de la Fig. 2.

Hay que tener en cuenta que en -15 dBs únicamente existen usuarios de centro de celda, y por tanto, sólo existe una sub-banda para los algoritmos C_T^{din} y C_T^α . Por este motivo, estos algoritmos proporcionan la misma capacidad para -15 dBs. Para este valor del umbral, se puede ver cómo la técnica que proporciona una menor capacidad es C_T^{est} , ya que no tiene en cuenta si existen sub-bandas vacías.

Se observa cómo, a medida que se incrementa el valor del umbral γ_{th} , el sistema mejora su capacidad hasta alcanzar un máximo, momento en el que empieza a decaer el número de usuarios en la sub-banda central y pasan a ser todos de borde. Es decir, se deja de emplear la técnica FFR. Se observa que alrededor de los 40 dB se maximiza la capacidad, pero a costa de empeorar el *fairness*, como se verá más adelante.

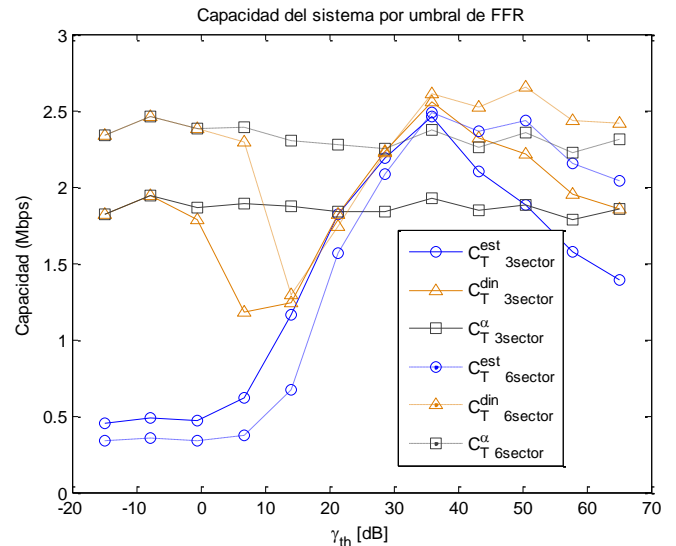


Fig. 3. Capacidad total por BS en función del umbral.

Por otro lado, aunque C_T^{din} y C_T^α obtienen la misma capacidad para umbrales muy bajos, el caso dinámico (C_T^{din}) decae inicialmente (alrededor de 5dB) debido a que se asigna mucho BW a usuario(s) de borde con muy mala SINR, empeorando así la capacidad del sistema. Sin embargo, el algoritmo proporcional le asigna un BW proporcional, de manera que la capacidad total no se ve tan degradada y continúa asignando recursos a dichos usuarios de borde con objeto de mantener el grado de imparcialidad razonable.

A partir de 5 dBs la capacidad del sistema empieza a aumentar tanto para C_T^{din} como para C_T^{est} ; en este punto, el grado de imparcialidad es máximo entre los usuarios de borde y centro de celda. Sin embargo, a partir de aquí, el BW asignado a cada sub-banda deja de ser equitativo para C_T^{din} y C_T^{est} , que ven cómo aumenta la capacidad del sistema conforme el umbral es mayor, a cambio de empeorar el grado de imparcialidad (ver Fig. 4). Sin embargo, el algoritmo C_T^α consigue una capacidad más estable, independientemente del número de usuarios que tengamos en cada subbanda.

Nótese que en torno a los 20 dB, C_T^α y C_T^{est} poseen el mismo valor. Esto es debido a que C_T^{est} es un caso particular de C_T^α con $\alpha = 0.25$ (en el caso de 3 sectores) y $\alpha = 0.17$ (en el caso de 6 sectores); es decir, en estos puntos se está repartiendo el mismo BW a cada sub-banda.

Para comprobar si se maximiza la capacidad de forma equitativa entre todos los usuarios, se ha obtenido una gráfica para el grado de imparcialidad *max-min*, definida como la diferencia entre las capacidades máxima y mínima de la celda. La Fig. 4 muestra el *fairness* inverso \mathcal{F}^{-1} , definido en (13), de manera que, cuanto mayor sea el valor de esta métrica, peor será la situación del usuario más alejado del centro de celda con respecto al más cercano. Se observa que la relación entre el usuario que posee mayor capacidad (muy próximo a la estación base) y el de menor capacidad (usuario de borde) es más o menos constante para el caso de C_T^α .

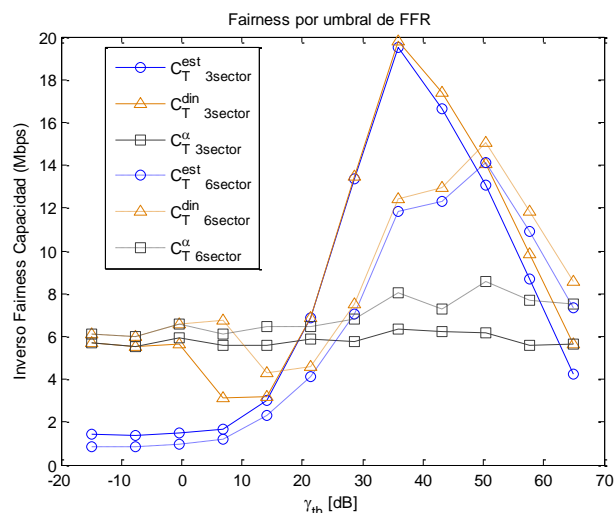


Fig. 4. Fairness inverso del sistema en función del umbral

El punto en el que se maximiza el grado de imparcialidad es en torno a los 15 dB de umbral. Los algoritmos que se comportan mejor son el estático y el dinámico, que consiguen un mejor grado de imparcialidad a cambio de una menor capacidad. Por último, cuando aumentamos el número de sectores, la capacidad que obtenemos es mayor que en el caso de emplear una sectorización menor. Esto es debido a que en el caso de 6 sectores se mejora el grado de imparcialidad y la SINR del sistema con respecto al caso de 3 sectores.

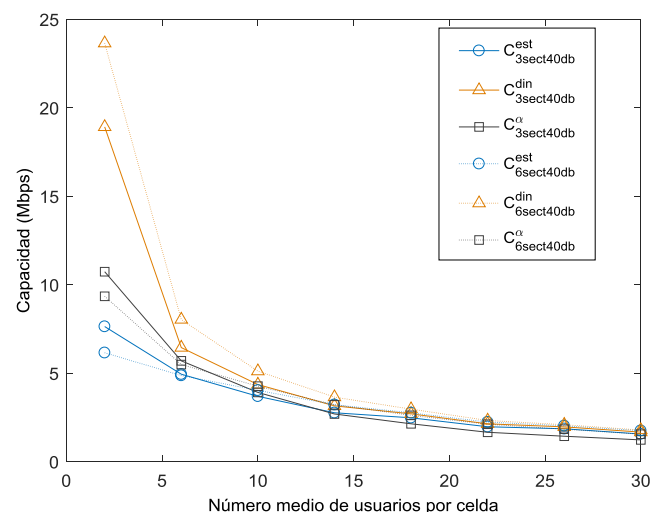


Fig. 5. Capacidad para 3 y 6 sectores en función del número medio de usuarios por celda

En la Fig. 5 se muestra la capacidad total agregada por celda en función del número medio de usuarios acampados en la celda para un umbral de 40 dB. El objetivo es evaluar a partir de cuántos usuarios es conveniente emplear sectorización con 3 o 6 sectores.

De acuerdo a los resultados, se ha obtenido que el algoritmo dinámico maximiza la capacidad del sistema con 6 sectores, independientemente del número de usuarios en la celda. Por otro lado, se obtiene que el algoritmo estático obtiene una mayor capacidad con 3 sectores cuando hay menos de 7 usuarios simultáneamente; por último, para el algoritmo proporcional, es conveniente emplear 3 sectores por debajo de 10 usuarios por celda.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una comparativa del rendimiento de diferentes esquemas de planificación celulares para LTE, considerando la técnica FFR y sectorización de manera conjunta.

Los resultados del trabajo han mostrado que, de manera general, el uso de sectorización mejora las prestaciones de capacidad. Además, si se aplica FFR junto con sectorización se maximiza la capacidad del sistema para un umbral de 40 dB, aunque a costa de degradar a los usuarios del borde de la celda. Para maximizar el grado de imparcialidad entre usuarios de borde y centro de celda, es necesario emplear un umbral en torno a 15 dBs. Podemos observar que el algoritmo de asignación proporcional es el que consigue un mayor grado de imparcialidad en el sistema independientemente del número de usuarios de borde y centro. Por último, se ha comprobado que la sectorización con 3 sectores obtiene mayor capacidad que con 6 sectores únicamente para un número reducido de usuarios en la celda y para dos de los algoritmos analizados. Para carga alta, siempre es más favorable utilizar 6 sectores.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, bajo los proyectos TEC2013-44442-P y TEC2016-80090-C2-1-R, así como la Universidad de Málaga.

REFERENCIAS

- [1] R. Joyce, D. Morris, S. Brown, D. Vyas and L. Zhang, "Higher Order Horizontal Sectorization Gains for 6, 9, 12 and 15 Sectored Cell Sites in a 3GPP/HSPA+ Network," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 5, pp. 3440-3449, May 2016.
- [2] C. S. Lee, M. C. Lee, C. J. Huang and T. S. Lee, "Sectorization with beam pattern design using 3D beamforming techniques," *2013 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference*, Kaohsiung, 2013, pp. 1-5.
- [3] S. H. Ali and V. C. M. Leung, "Dynamic frequency allocation in fractional frequency reused OFDMA networks," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 8, pp. 4286-4295, Aug. 2009.
- [4] Jianhua He, Wenqing Cheng, Zuoyin Tang, David López-Pérez, and Holger Claussen, "Analytical Evaluation of Higher Order Sectorization Frequency Reuse, and User Classification Methods in OFDMA networks", in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, No. 12, September 2016, pp. 8209-8222.
- [5] 3GPP TR 36.873 V12.2.0 Study on 3D channel model for LTE. Jun 2015.
- [6] 3GPP TR 25.814 V7.1.0, "Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA)". Oct 2006.
- [7] 3GPP TR 36.942; "Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios". March 2017