EVALUACIÓN AMBIENTAL DE TERMINALES DE USUARIO MULTIANTENA EN REDES LTE-A

José Javier Martínez Vázquez [(1)], Eduardo Martínez de Rioja y del Nido[(2)] y José Daniel Martínez de Rioja y del Nido[(2)]
[(1)]Coordinador del Grupo de Trabajo, [(2)]Dpto. de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones (UPM)

Resumen. Este trabajo tiene como objetivos el análisis medioambiental de los terminales de usuario (***UE***) en redes ***LTE-A*** que incorporen estructuras ***MIMO*** y su posible influencia sobre el abonado. Inicialmente se describen los principios de funcionamiento así como las características y ventajas de los sistemas ***MIMO***. A continuación se estudian los escenarios más probables para la explotación comercial de estos equipos, entre las que cabe destacar el control y la gestión de cultivos en invernaderos, y se analizan desde un punto de vista ambiental. Por último, se obtienen conclusiones sobre su posible repercusión en la salud del usuario.

1. INTRODUCCIÓN.

La tecnología ***MIMO*** permite establecer entre dos sistemas de comunicaciones, uno con M_t antenas transmisoras y otro con M_r antenas receptoras, r canales de transmisión incorrelados, siendo r :

$$r \leq L = \min (M_t , M_r)$$

Para las estructuras con una sola antena en emisión y una sola en transmisión ***(SISO)***, se tiene:

$$y(t) = h_{i,j}(\tau,t) * s(t)$$

Nótese como la respuesta impulsional: $h_{i,j}(\tau,t)$, es la de un sistema lineal variante en el tiempo, y dada la naturaleza indeterminada y variable del escenario móvil, la respuesta impulsional es también una señal aleatoria. Con lo que puede expresarse la ecuación del sistema ***MIMO*** como:

$$y(t) = H(\tau,t) * s(t)$$

Donde $H(\tau,t)$ es la matriz de propagación o de respuesta del canal, de dimensiones M_t x M_r :

$$H(\tau,t) = \begin{vmatrix} h_{1,1}(\tau,t) & h_{1,2}(\tau,t) & \ldots\ldots h_{1,Mt}(\tau,t) \\ h_{2,1}(\tau,t) & h_{2,2}(\tau,t) & \ldots\ldots h_{2,Mt}(\tau,t) \\ \vdots & & \\ h_{Mr,1}(\tau,t) & h_{Mr,2}(\tau,t) & \ldots\ldots h_{Mr,Mt}(\tau,t) \end{vmatrix}$$

Siendo $s(t) = [s_1(t), s_2(t),\ldots, s_{Mt}(t)]^T$ un vector de dimensión M_t **x1** que contiene las señales de entrada $S_j(t)$ $(j=1, 2, .., M_t)$ a cada una de las M_t antenas transmisoras.

Al igual que $y(t) = [y_1(t), y_2(t),\ldots, y_{Mr}(t)]^T$ es un vector de dimensión M_r **x 1** conteniendo las M_r salidas de las M_r antenas receptoras.

La matriz $H(\tau,t)$ representa todas las posibles relaciones entre una antena ***i*** en transmisión y todas las antenas en recepción desde la **1** hasta la M_r**,** dicho de otro modo, corresponde a un sistema con diversidad tanto en transmisión como en recepción, tal y como se describe en la figura siguiente:

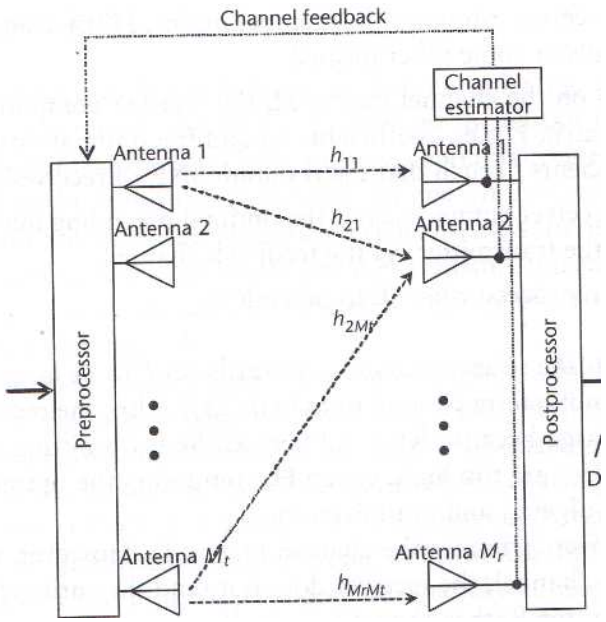


Fig. 1. Canal resultante de un sistema con diversidad en transmisión y en recepción.

Sin embargo, lo que se pretende en un sistema ***MIMO*** es relacionar cada señal de salida de la antena transmisora ***i*** con la señal de entrada de la antena receptora ***i***,

estableciendo ***r*** canales independientes. La respuesta podría aproximarse por la de un canal lineal e invariante en el tiempo representado por una matriz:

$$h(\tau) = \begin{vmatrix} h_{1,1}(\tau) & 0 & 0 & 0 \ldots\ldots & 0 \\ 0 & h_{2,2}(\tau) & \ldots\ldots 0 & 0 & 0 & 0 \\ . & & & & & \\ . & & & & & \\ . & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \ldots\ldots h_{rr}(\tau) & & \end{vmatrix}$$

De esta forma, tendríamos un sistema de multiplexado espacial denominado ***MIMO***, tal y como se muestra en la figura:

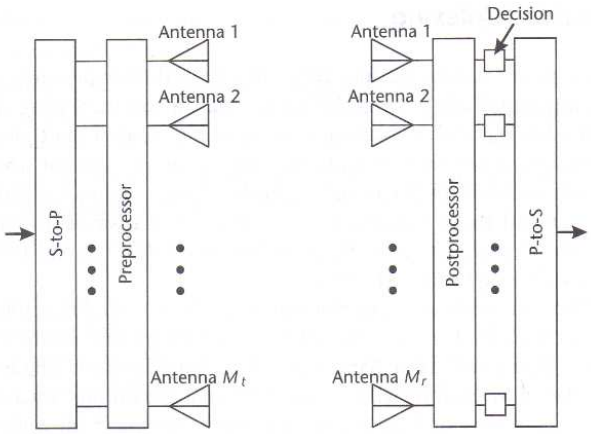


Fig. 2. Canal resultante de un sistema con multiplexado espacial.

Para simplificar la nomenclatura, definimos:

$$y(t) = y,\ H(\tau,t)=H,\ s(t) = s$$

En tal caso resulta:

$$y = H * s$$

Con una potencia de señal de salida en cada antena transmisora de P/M_t , se tiene:

$$y = \sqrt{P/M_t}\quad H * s$$

Donde ***H*** es una matriz cuyas entradas son $h_{k,l}$.

Con el objeto de visualizar cómo una estructura ***MIMO*** puede proporcionar $r \leq L$= **min** (M_t, M_r) caminos paralelos de propagación y el correspondiente multiplexado espacial, que es la esencia de las estructuras ***MIMO***, hacemos uso de la descomposición en valores singulares ***SVD*** (Singular Value Decomposition) de la matriz de propagación ***H***, de modo que:

$$H = U \sum V^H$$

El superíndice ***H*** indica en la matriz correspondiente que es transpuesta y conjugada. Las matrices resultantes ***U*** y ***V*** son matrices de dimensiones ($M_r \times r$) y ($M_t \times r$) respectivamente y satisfacen:

$$U^H U = V^H V = I_r$$

Donde ***Ir*** es la matriz identidad de dimensión ($r \times r$), $\sum$ es una matriz diagonal que presenta los valores $\{\sigma_1, \sigma_2, \ldots, \sigma_r\}$ en la diagonal principal y cero en el resto de las posiciones, lo que denotaremos como:

$$\sum = diagonal\ \{\sigma_1, \sigma_2, \ldots, \sigma_r\} = diagonal\ \{\sqrt{\lambda_1}, \sqrt{\lambda_2}, \ldots, \sqrt{\lambda_r}\}$$

Siendo σ_i **(i= 1,..., r)** los valores singulares de la matriz **H**.

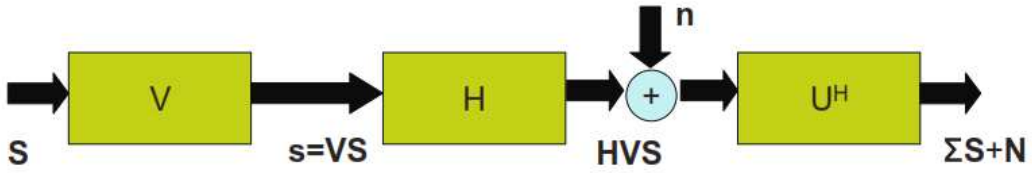


Fig. 3. Descomposición SVD

El rango de la matriz ***H*** (definido como el número de ecuaciones linealmente independientes en el sistema de ecuaciones) nos establece el número de caminos paralelos de propagación que se pueden utilizar, cumpliéndose siempre que $r \leq L$

= **min** (M_t, M_r). Al valor de ***r*** también se le conoce como ganancia de multiplexado. Con objeto de ver la aplicabilidad de la descomposición ***SVD***, introducimos un vector de entradas de señal de usuario:

$$S = (S_1, S_2, \ldots, S_r)^T$$

De dimensión ***r x 1*** que aplicamos a la matriz ***V*** mediante la operación ***VS***, que se denomina precodificación, tal como se esquematiza en la figura 3. A la salida del precodificador aparece el vector:

$$s = VS = (s_1, s_2, \ldots, s_{Mt})^T$$

De dimensión M_t ***x 1***, cuyos M_t valores constituyen las entradas a las M_t antenas transmisoras. De modo similar en recepción, y a resultas de la matriz de propagación ***H***, las M_r señales recibidas en las correspondientes M_r antenas receptoras coinciden con las componentes del vector ***HVS*** de dimensión ***Mr x 1***. Finalmente, tal y como se esquematiza en la figura 3, aplicando este vector de salida a un decodificador caracterizado por U^H resulta la ecuación:

$$Y = \sqrt{P/M_t} \quad (U^H H V) S + U^H n$$

Sustituyendo ***H*** por su descomposición ***SVD***, $H = U \sum V^H$, resulta:

$$Y = \sqrt{P/M_t} \quad (U^H U \sum V^H V) S + U^H n = \sqrt{P/M_t} \quad \sum S + N$$

Donde $N = U^H n$ es un vector columna de ***r*** filas correspondiente al ruido resultante e ***Y*** es el vector de salida. Es decir, a la salida de la operación de descodificación que determina el operador U^H, tenemos ***r*** canales paralelos desacoplados:

$$Y_i = \sqrt{P/M_t} \quad \sigma_i S_i + N_i \quad (i = 1, 2, \ldots, r)$$

Tal y como se representa en la figura 4, que ilustra cómo a todos los efectos podemos imaginar que el esquema ***MIMO*** ha transportado las r señales a transmitir desde el extremo emisor al extremo receptor a través de r canales en paralelo desacoplados de ganancia $\sigma_1, \sigma_2, \ldots, \sigma_r$ respectivamente.

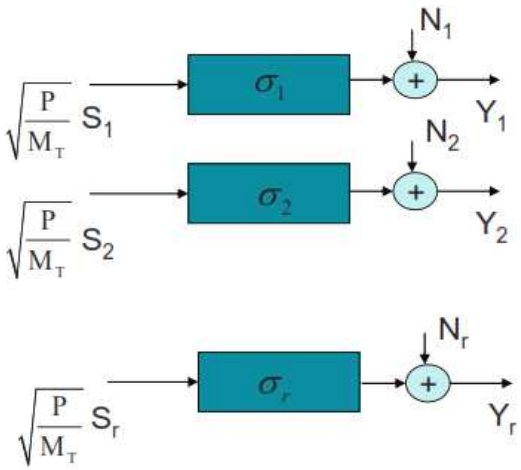


Fig. 4. Esquema de una estructura MIMO

Cada columna de $V^H V = I_r$, introduce un significado geométrico que permite una interpretación intuitiva del problema. En efecto, se puede considerar que las columnas de la matriz ***V*** son como los ***r*** vectores unitarios de dimensión:

$$M_t\ (e_1, e_2, \ldots, e_r)$$

Que definen una base en un sub-espacio ***r***-dimensional. La señal transmitida ***VS*** se puede representar a partir de la base de este espacio vectorial según:

$$VS = S_1 e_1 + S_2 e_2 + \ldots + S_r e_r$$

Los ***r*** vectores e_i ***(i=1, 2,..., r)*** definen los ***r*** canales de transmisión ortogonales ($e_i \cdot e_j = \delta_{i,j}$) y por lo tanto desacoplados en los que cada emisor transporta las ***r*** señales de usuario recibidas, dando de esta forma sentido amplio al concepto de multiplexado espacial en contraposición al multiplexado temporal o en frecuencia convencional usado en caso de tener canales ortogonales en el tiempo (***TDM***) o en la frecuencia (***FDM***), respectivamente.

Como se ha comentado, se cumple que $r \leq L = \min(M_t, M_r)$, de modo que ***L*** constituye el máximo número de caminos en paralelo que se pueden extraer del canal móvil. Valores más pequeños que ***L*** son factibles, e incluso valores degradados de ***r=1*** que indican que la estructura dispersiva de los canales móviles correspondientes no permite ninguna paralelización. Por otra parte, el vector **S** debe ser tal que el valor medio de $S^H S$ es $E[S^H S] = M_t$, si se pretende mantener que la potencia total transmitida es ***P***.

1.1. ALGUNAS PROPIEDADES DE LOS SISTEMAS MIMO.

Tanto con la diversidad espacial en recepción, como con la diversidad espacial en transmisión, se puede aumentar la capacidad del canal resultante con el número de antenas ***M***, al mejorar la relación señal ruido a la entrada del receptor SNR= γ.

$$C = B \log_2 (1 + \gamma) \text{ bits / s}$$

La relación de energía de bit a densidad espectral de potencia de ruido E_b/N_0 puede hacerse muy elevada para valores de la velocidad de transmisión superiores al ancho de banda de funcionamiento ***B***, como es el caso de los sistemas que requieren una alta eficiencia espectral (medida como ***R/B*** b/s/Hz, donde ***R*** es la tasa de transmisión) como ***LTE***. En tales sistemas, utilizar diversidad espacial en recepción podría resultar insuficiente, aún contando con esquemas de transmisión avanzados que introduzcan codificación de canal y modulaciones adaptativas con distintos niveles, tal como ***QAM***.

Con la aparición del concepto ***MIMO*** (Multiple Input Multiple Output), se presenta una nueva estrategia derivada de aprovechar la presencia de M_t antenas en transmisión y M_r antenas en recepción. La diferencia, relevante en relación a la diversidad ***SIMO*** y ***MISO***, es que la estrategia ***MIMO*** pretende explotar la variación espacial del canal móvil creando de hecho ***L*** caminos de transmisión paralelos desacoplados entre el emisor y el receptor. La capacidad del canal en estas condiciones puede llegar a valer:

$$C = L\, B \log_2 (1 + \gamma) \text{ bits / s}$$

La capacidad de un sistema ***MIMO*** sin información del canal en el transmisor se comporta como la capacidad de ***r*** canales en paralelo cada uno con una ganancia de canal λ_i y potencia transmitida igual a la potencia total dividida por ***M***.

$$C = B \sum_{i=1}^{r} \log_2 (1 + \gamma\, \lambda_i / M)$$

Observemos que en tales circunstancias, la capacidad del canal aumenta linealmente con el número de antenas, o lo que es equivalente la relación de energía de bit a densidad espectral de potencia de ruido E_b/N_0 necesaria para conseguir una velocidad de transmisión $R = C$ es:

$$E_b/N_0 \geq \frac{2^{(R/BL)} - 1}{R/B}$$

A diferencia de los sistemas basados sólo en diversidad, la E_b/N_0 recibida necesaria para conseguir sistemas de alta eficiencia espectral, tales como los previstos en ***LTE***, queda sustancialmente reducida al usar multiplexado espacial.

En conclusión, las estructuras de antenas ***MIMO*** representan un salto cualitativo respecto a los sistemas en diversidad ***SIMO*** y ***MISO***, y abren la puerta a conseguir sistemas de velocidad de transmisión elevada, pero con potencia recibidas y por tanto coberturas y distancias entre emplazamientos abordables.

$$E_b/N_0 \geq \frac{1}{M} \frac{2^{(R/B)} - 1}{R/B}$$

La naturaleza exponencial de la expresión anterior nos indica que la relación E_b/N_0 puede hacerse muy elevada para valores de la velocidad de transmisión superiores a ***B***, como es el caso de los sistemas que requieren una alta eficiencia espectral (medida como ***R/B*** b/s/Hz) como ***LTE***. En tales sistemas, utilizar diversidad espacial en recepción podría resultar insuficiente, aún contando con esquemas de transmisión avanzados que introduzcan codificación de canal y modulaciones adaptativas con distintos niveles, tal como ***QAM***.

2. SISTEMAS MIMO PRÁCTICOS PARA EL ANÁLISIS.

Los sistemas de multiplexado espacial, están actualmente orientados a un funcionamiento en interiores en lugar de hacerlo en celdas de tipo metropolitano, urbano o rural. En estos últimos casos, las potencias utilizadas por las estaciones base son relativamente altas, pudiendo alcanzar niveles del orden de los 50 vatios, con áreas de cobertura también muy extensas. La implantación de capas físicas de multiplexado espacial para poner en servicio ***MIMO*** en el enlace descendente, disminuiría notablemente las áreas de cobertura y limitaría el número de abonados. Por otra parte, dado que el número de usuarios en celdas ***LTE*** es muy elevado, unos 100 aproximadamente, parece poco práctico hacer una instalación para dar servicio ***MIMO*** a una pequeña parte de aquellos, ya sea ***MIMO*** multiusuario o ***MIMO*** con usuario único.

Tampoco sería muy habitual que un abonado de telefonía móvil detuviera su vehículo en la carretera o aparcara en plena calle para solicitar de su operador un servicio de datos asociado con tasas de transmisión elevadas.

Lo más lógico es imaginar un escenario de interiores, donde el abonado puede disponer de manera práctica y eficaz de las ventajas de varias capas físicas de ***MIMO***. Esta situación presenta un corto recorrido entre estación base (***e Nodo B***) y terminal de abonado (***UE***), lo que implica la necesidad de bajos niveles de potencia, tanto en transmisión como en recepción, es decir en el enlace

ascendente y en el descendente. El conocimiento del canal también constituye otra ventaja, no sólo por las bajas pérdidas de propagación sino también por la facilidad para el conocimiento de la matriz de precodificación, ahorrando almacenamiento de datos a ambos lados de la interfaz aire. Por otra parte, sería la situación idónea para establecer una red de datos en una nave de tipo invernadero, con la ventaja añadida de que el propio operador de telefonía móvil podría implantar el sistema a petición del usuario.

De hecho, la normativa ***3GPP*** actual contempla sólo la instalación de equipos ***MIMO*** en las estaciones base denominadas "***HOME***", sin precisar ningún dato en el resto de ***eNb*** incluidas en la citada normativa: macro, micro y área local.

En este escenario, las antenas de la estación base o ***eNB*** y las de los terminales de usuario deberán tener ganancias bajas y próximas a los cero dBi, para evitar dependencia de la orientación del terminal de usuario (***UE***) en el funcionamiento del sistema.

Un hecho de interés a reseñar, es que la potencia máxima de una estación base doméstica (***HOME eNB***) es menor que la potencia máxima de un terminal de abonado (***UE***). La explicación consistiría en que un terminal de usuario debe funcionar con cualquier tipo de cobertura, ya sea de interiores o de exteriores. De esta forma se asegura su funcionamiento para el caso más desfavorable, el límite del área de cobertura de una macrocelda. A pesar de ello, los terminales de usuario ***LTE*** funcionan con potencias mucho más bajas que los de sus predecesores ***GSM***, ***UMTS*** y ***HSPA***.

Dentro de este mismo punto, conviene constatar también que la potencia máxima de un terminal de abonado está definida en la normativa ***3GPP*** para un mismo ancho de banda de transmisión. Dicho de otro modo, la potencia máxima total de un terminal ***UE*** es independiente del número de capas, lo que redunda en un escenario ***MIMO*** de interiores, ya que al aumentar el número de capas la potencia por capa va disminuyendo y por tanto también se reduce el alcance del terminal.

Por último, señalar que este estudio está enfocado al posible impacto ambiental de los equipos de radio al margen de otras consideraciones sobre coeficientes de correlación espacial, aislamiento entre señales, etc.

2.1. FRECUENCIAS DE FUNCIONAMIENTO.

A nivel experimental, las pruebas realizadas hasta la fecha utilizan las bandas de frecuencias de 750 MHz y de 2700 MHz.

La banda de frecuencias más baja, 700/800 MHz, presenta unas pérdidas de propagación menores por lo que es la más apropiada a efectos de despliegue de red. Sin embargo, en términos de longitud de onda, representa un terminal más

pequeño y unos mayores niveles de interferencia entre las señales de las diferentes antenas.

Por el contrario, la banda de frecuencias más alta, 2.700 MHz, tiene unas pérdidas de propagación mayores pero al disminuir la longitud de onda, la interferencia entre las señales de las diferentes antenas es menor, ya que las dimensiones de los terminales en términos eléctricos son mayores.

Desde el punto de vista ambiental, los niveles de referencia de las señales de mayor frecuencia son más elevados, por lo que las señales en la banda más alta alcanzan el nivel inocuo más cerca del sistema radiante que las señales de frecuencia más baja. Así pues el análisis en el caso peor correspondería a la banda de los 750 MHz.

3. NIVELES DE REFERENCIA Y DENSIDAD DE POTENCIA RADIADA.

La Recomendación del Consejo de Europa 1999/519/CE, de 12 de julio de 1999, y el Real Decreto Legislativo 1066/2001, de 28 de septiembre, establecen las restricciones básicas como las restricciones de la exposición a los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos de tiempo variable, basadas en los efectos conocidos sobre la salud y en consideraciones biológicas. Además, señalan que el cumplimiento del nivel de referencia garantizará el respeto de la restricción básica pertinente.

El Decreto 148/200, de 29 de mayo, de la Generalitat de Catalunya, define los niveles de referencia como los niveles eficaces máximos de exposición a los campos electromagnéticos permitidos para las personas (público en general) en las zonas de uso continuado.

Por lo tanto, se van a tener en cuenta la regulación europea, la española y un ejemplo de regulación autonómica. Se incluye la reglamentación catalana en este estudio dado que es la más restrictiva del conjunto de las Comunidades Autónomas. Los niveles de referencia para la densidad de potencia radiada establecidos por la legislación que se acaba de mencionar son:

BANDA DE FRECUENCIAS	RECOMENDACIÓN 1999/519/CE Y RD 1066/2001	DECRETO 148/2001
700 - 800 MHz	**f /200 (3,5 – 4 vatios/m2)**	**f /450 (1,55 – 1,77 vatios/m2)**
2.600 - 2.700 MHz	**10 vatios/m2**	**4,5 vatios/m2**

Las distancias respecto de los sistemas radiantes a las que se alcanza el nivel de referencia se calculan de acuerdo a la expresión:

$$4\,\pi\, r^{2}\, W = \sum_{i=1}^{n} P_i\, G_i\,, \quad i = 2, 4, 8$$

En donde ***W*** es el nivel de referencia de la densidad de potencia radiada, ***n*** es el número de capas ***MIMO*** instaladas, P_i es la potencia máxima radiada por la antena ***i***, y G_i es la ganancia asociada a la misma antena. Finalmente, ***r*** es la distancia de la antena a la que se cumple el nivel de referencia.

4. ENLACE DESCENDENTE. DL-MIMO DOMÉSTICO.

Se describen a continuación los sistemas radiantes más usuales en este tipo de instalaciones, así como las distancias a los mismos para asegurar el nivel de referencia. El estudio considera, para los cálculos de la distancia, no sólo la potencia total de la estación base sino que también se analiza la potencia por capa para obtener la distancia a cada antena que debe guardar el usuario.

4.1. SISTEMAS RADIANTES.

Ya se ha indicado que las antenas de la estación base deberán tener ganancias bajas y próximas a los cero dBi, para evitar una excesiva dependencia de la orientación del terminal de usuario (***UE***) en el funcionamiento del sistema.

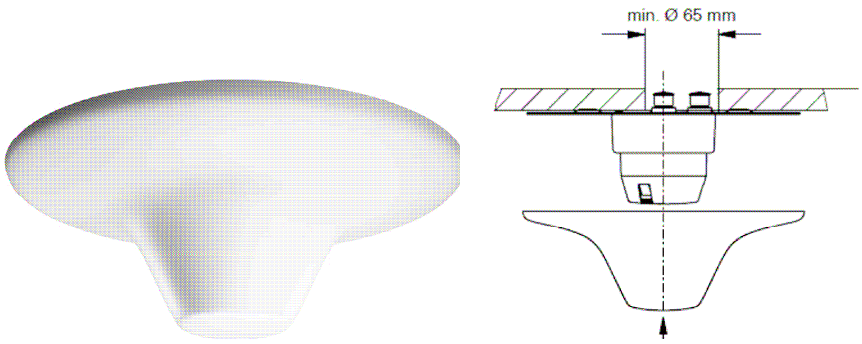


Fig. 5. Antena de fijación al techo para estaciones base domésticas

Algunos estudios, de ***MIMO 8x8*** utilizan en los ***e-Nodo B*** domésticos, 8 antenas tipo Kathrein 80010709, con ganancias próximas a 2 dBi, trabajando a 2.700 MHz, como la mostrada en la Figura 5.

En principio, estos elementos radiantes suelen ir fijados al techo del local donde se realizan las pruebas de campo, de forma que la potencia total se radiaría dentro del mencionado local.

4.2. DISTANCIAS DE SEGURIDAD.

De acuerdo con las normas establecidas por el 3GPP, las potencias de emisión de una instalación de este tipo son las que figuran en la tabla siguiente:

Potencia máxima de salida	20 dBm
Con 2 capas MIMO	17 dBm por capa
Con 4 capas MIMO	14 dBm por capa
Con 8 capas MIMO	11 dBm por capa

Podrán diferenciarse, por un lado el nivel de referencia respecto al total de los elementos radiantes y por otro, el nivel de referencia respecto a una sola antena.

Independientemente del número de capas ***MIMO***, el caso más desfavorable sería aquél que contemplara la potencia máxima y la ganancia máxima:

$$4 \pi r^2 W = P_{max} G_{max}$$

La potencia máxima para un e-Nodo B reseñada en la normativa es de 100 mW, si se considera una ganancia máxima de 3 dBi, se obtienen las siguientes distancias de seguridad:

BANDA DE FRECUENCIAS	RECOMENDACIÓN 1999/519/CE Y RD 1066/2001	DECRETO 148/2001
700 - 800 MHz	**6.5 cm**	**10 cm**
2.600 - 2.700 MHz	**4 cm**	**6 cm**

Por antena o por capa física, en el caso de potencias máximas de emisión, se tienen las siguientes distancias de seguridad:

MIMO 2 X 2.

P_i = 50 mW, G_i = 3dBi

BANDA DE FRECUENCIAS	RECOMENDACIÓN 1999/519/CE Y RD 1066/2001	DECRETO 148/2001
700 - 800 MHz	4.5 cm	7 cm
2.600 - 2.700 MHz	3 cm	4 cm

MIMO 4 X 4.

P_i = 25 mW, G_i = 3dBi

BANDA DE FRECUENCIAS	RECOMENDACIÓN 1999/519/CE Y RD 1066/2001	DECRETO 148/2001
700 - 800 MHz	3.5 cm	5 cm
2.600 - 2.700 MHz	2 cm	3 cm

MIMO 8 X 8.

P_i = 12.5 mW, G_i = 3dBi

BANDA DE FRECUENCIAS	RECOMENDACIÓN 1999/519/CE Y RD 1066/2001	DECRETO 148/2001
700 - 800 MHz	2.5 cm	3.5 cm
2.600 - 2.700 MHz	1.5 cm	2 cm

Por lo tanto, los niveles de referencia para el caso de estaciones base o eNB doméstico, se alcanzan a 10 centímetros de las antenas. Esta distancia aseguraría el cumplimiento del nivel de referencia para todas las regulaciones consideradas, ya que se corresponde al cálculo en el caso más restrictivo, la legislación catalana. Considerando el caso de una sola antena, para ***MIMO*** de dos capas, las distancias de seguridad para guardar el nivel de referencia son de 7 centímetros.

5. ENLACE ASCENDENTE. UL-MIMO DOMÉSTICO.

Este apartado está dedicado a la disposición de las antenas dentro de los diferentes tipos de terminales de usuario existentes en las redes LTE-A. También, se calcula la distancia del terminal a la que se tiene un nivel de señal igual al nivel de referencia.

5.1. DISPOSICIÓN Y TIPO DE SISTEMAS RADIANTES.

Como ya se ha indicado, la directividad de los elementos radiantes integrados en el UE debe ser baja, para evitar dependencia de la orientación del terminal en la conexión entre el terminal móvil y la estación base. Así pues se utilizan antenas tipo dipolo elemental ya sea eléctrico o magnético y antenas impresas tipo PIFA, de endidura, etc. En general, se trata de elementos con ganancias entre 0 y 3 dBi´s.

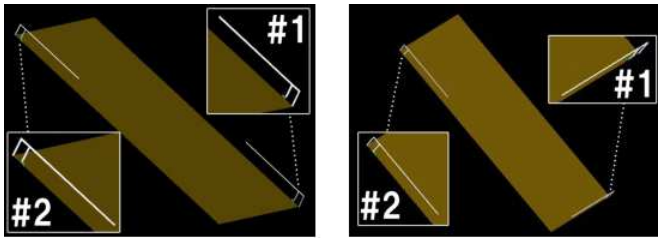


Fig. 6. Posible ubicación de antenas PIFA en un equipo de abonado

La figura 6 representa de forma esquemática la posible disposición de dos antenas impresas tipo F invertida sobre una placa de circuito impreso a ubicar dentro del terminal de abonado.

Fig. 7. Antenas PIFA en un dispositivo comercial.

En la Figura 7 puede verse un montaje práctico de antenas impresas sobre un terminal de mano de abonado. El uso de antenas impresas, facilita el montaje y reduce el coste de los sistemas radiantes. La figura 8 muestra dos terminales de de mano de abonado con un tamaño medio, con los que se llevaron a cabo pruebas de campo a 750/800 MHz. Como antena principal se utilizó una de tipo monopolo situada en la parte inferior de cada uno de los dispositivos A y B.

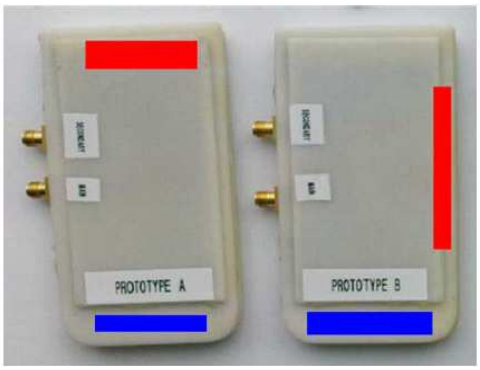


Fig. 8. Terminales de tamaño medio para pruebas de campo.

La segunda antena es también un monopolo para el terminal A y una de tipo endidura en el prototipo B. Para el equipo de abonado A, la polarización es la misma en las dos antenas y el caso del prototipo B las antenas tienen polarización ortogonal. Se intenta analizar la influencia en la correlación espacial de las señales de dos antenas separadas con la misma polarización y dos antenas próximas con polarización ortogonal.

La figura 9 muestra dos terminales de mano de abonado con un tamaño mayor que el del caso anterior, con los que se realizaron igualmente pruebas de campo a 750/800 MHz. Los terminales van equipados con una antena principal de tipo monopolo, señalada como azul en la figura, y otra antena PIFA señalada como roja en los terminales.

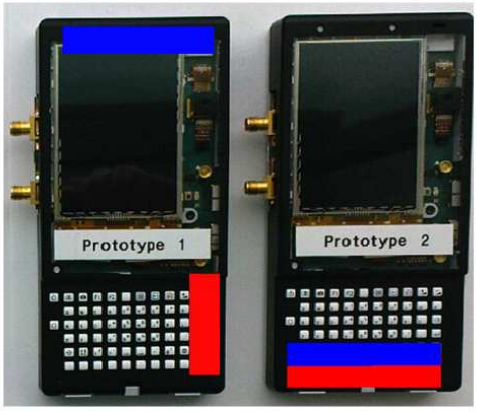


Fig. 9. Terminales de tamaño grande para pruebas de campo.

El prototipo 1 presenta polarizaciones ortogonales y máxima separación entre las antenas, mientras que en el prototipo 2 se han montado las dos antenas muy

próximas y con la misma polarización con el objeto de estudiar un caso con baja correlación espacial y otro con una correlación espacial elevada.

Con carácter general, la disposición hasta cuatro capas físicas, puede describirse de acuerdo con la Figura 10. Sobre un terminal de usuario, ya sea tipo tablet o tipo smart phone, las antenas pueden disponerse como un array lineal, figura 10a, o como un array plano, figura 10b. El array lineal tiene sus antenas ubicadas sobre un lado del dispositivo mientras que en el array plano están situadas en los vértices del terminal. Las dimensiones aproximadas de los equipos de usuario son: 1 x 0.5 longitudes de onda para el smart phone y 2 x 1.6 longitudes de onda para el tablet, para frecuencias de trabajo de 2.700 MHz.

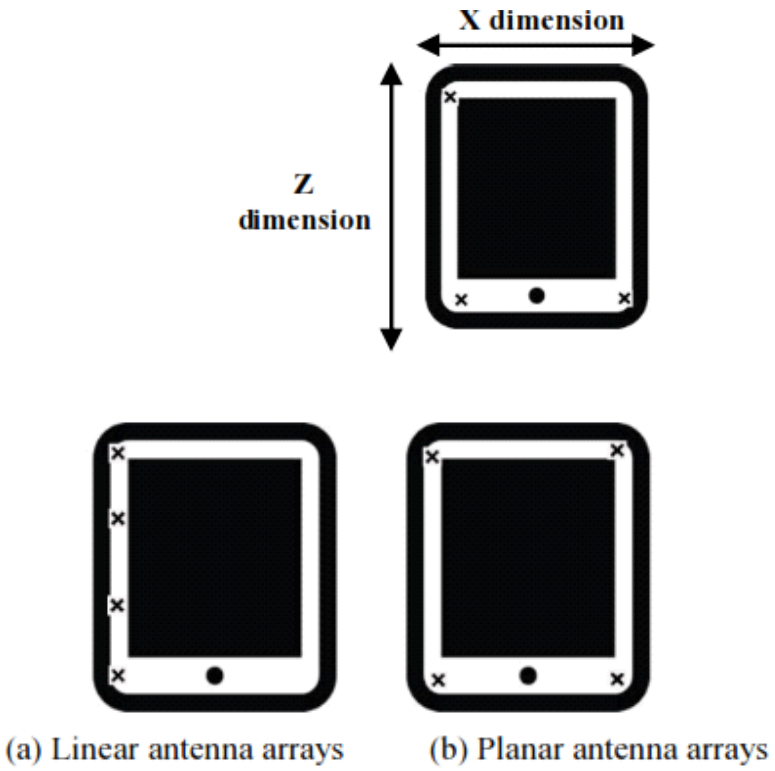


Fig. 10. Disposiciones posibles de antenas para terminales tipo smartphone y tablet

En el caso MIMO 2x2, la instalación de los elementos radiantes puede hacerse bien en el lado corto del equipo de usuario o bien en el lado más largo, como se muestra en la figura 11. Las pruebas realizadas con antenas omnidireccionales, indican que tanto a nivel de correlación, capacidad y sensibilidad a la orientación del aparato, la disposición de las antenas sobre el lado más largo es mejor que la ubicación de las mismas en el lado corto.

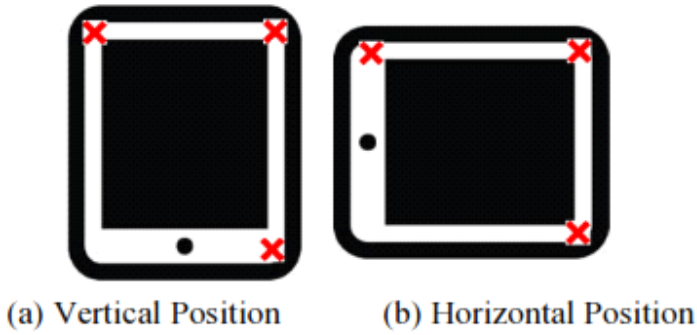


Fig. 11. MIMO de 2 capas físicas sobre terminal tipo tablet

La Figura 11 indica la posible ubicación de las antenas para dos capas físicas de MIMO y un dispositivo tipo tablet.

Para sistemas MIMO de cuatro capas, empleando terminales de tipo smart phone, se observa un mejor comportamiento de la disposición en array plano que del array lineal. En este último caso, existe una gran dependencia de la relación señal ruido en la entrada del terminal. Para coeficientes S/N altos, el funcionamiento es correcto pero para relaciones S/N bajas presenta una capacidad y correlación espacial que son función de la orientación del terminal.

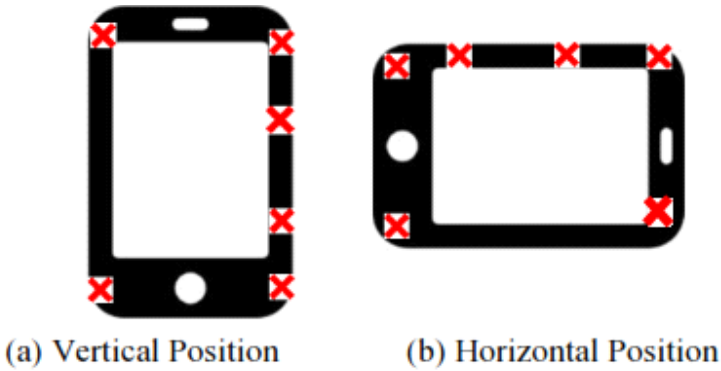
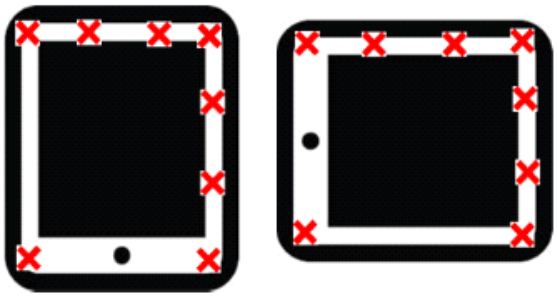


Fig. 12. MIMO de 4 capas físicas en terminales tipo smartphone

La Figura 12 indica la posible ubicación de las antenas para cuatro capas físicas de MIMO y un dispositivo tipo smart phone.

Para terminales de tipo tablet, la situación de las antenas con cuatro capas físicas, presenta otras alternativas. Los arrays lineales pueden instalarse en cualquiera de los laterales, como se indica en la figura 13.



(a) Vertical Position (b) Horizontal Position

Fig. 13. MIMO de 4 capas físicas en terminales tipo tablet

Con array plano, el terminal es independiente de la orientación y no se observa variación de la capacidad o de la correlación espacial entre canales y presentando siempre mejores resultados que el array lineal. Con array lineal, si bien no hay dependencia con el giro del terminal de la capacidad o la correlación, es decir el fabricante puede elegir cualquiera de los lados del terminal para la instalación, quedando la capacidad del sistema en función de la relación señal ruido existente.

También, se han realizado pruebas de un sistema ***MIMO 8X8*** con portadora de 2.700 MHz y un ancho de banda de 20 MHz, alcanzándose una tasa de transmisión en el enlace descendente de 335 Mbps. En la estación base se utilizaron antenas omnidireccionales tipo Kathrein 80010709, conectadas a los ocho puertos del ***eNB***. Las antenas fueron fijadas al techo del local de pruebas dispuestas según un cuadrado, con dos configuraciones. Una configuración tendría los lados del cuadrado de 2,6 longitudes de onda y otra más grande, de 9. La potencia total transmitida fue limitada a 10 mW, que es un valor típico en los sistemas distribuidos de antenas (***DAS***).

Fig. 14. Puebas de campo con terminales tipo tablet de MIMO con 8 capas físicas.

Con el objeto de estudiar el funcionamiento con baja correlación se utilizó un conjunto de dipolos eléctricos y magnéticos, separados 20 centímetros (1,8 longitudes de onda). Un segundo conjunto de antenas fue montado sobre un tablet, empleando antenas impresas de tipo parche y polarización dual. El conjunto

fue instalado como array lineal con una separación de media longitud de onda, unos 5.5 centímetros.

5.2. DISTANCIAS DE SEGURIDAD.

De acuerdo con la normativa ***3GPP***, la potencia de los terminales está limitada a 23 dBm, además la teoría de sistemas ***MIMO*** también señala que la potencia total ha de ser la misma en el caso multiantena que en el caso ***SISO***.

Potencia máxima de salida Con 2 capas MIMO	23 dBm 20 dBm por capa
Con 4 capas MIMO	17 dBm por capa
Con 8 capas MIMO	14 dBm por capa

En consecuencia, la potencia máxima son 200 mW, si se supone una ganancia máxima de 3 dBi y de acuerdo con la expresión:

$$4 \pi r^2 W = P_{max} G_{max}$$

se obtiene:

BANDA DE FRECUENCIAS	RECOMENDACIÓN 1999/519/CE Y RD 1066/2001	DECRETO 148/2001
700 - 800 MHz	**10 cm**	**14 cm**
2.600 - 2.700 MHz	**5,6 cm**	**9 cm**

En conclusión, los niveles de referencia para el caso de equipos de usuario (***UE***) ya sean de tipo tablet o smart phone, se alcanzan a 14 centímetros de los terminales. Al igual que con las estaciones base domésticas, esta distancia aseguraría el cumplimiento del nivel de referencia para todas las regulaciones consideradas, ya que se corresponde con el cálculo en el caso más restrictivo, la legislación catalana.

En este punto, habría que considerar que el equipo de abonado (***UE***) está siendo utilizado como terminal de datos, lo que implica que su manejo se realiza con las manos, por lo que, aunque no se guarde la distancia de seguridad, no se ve afectado ningún órgano vital. Desde que los terminales de bolsillo se utilizan como terminales de datos, el impacto ambiental de estos equipos puede considerarse mucho menor que cuando eran fundamentalmente terminales de voz y su funcionamiento se llevaba a cabo cerca del cerebro del usuario.

6. CONCLUSIONES

Las estructuras de comunicaciones móviles con multiplexado espacial parecen idóneas para un funcionamiento en naves industriales de tipo invernadero, como redes de datos orientadas a la gestión y el control de la producción en los cultivos.

Los sistemas ***MIMO*** en la actualidad estarían restringidos a un tipo de funcionamiento en interiores, que es el que parece más lógico desde un punto de vista práctico y funcional.

La potencia máxima de transmisión de una estación base doméstica (100 mW) es la mitad que la de un terminal de usuario (200 mW). Hay que tener en cuenta que los terminales de abonado deben funcionar en entornos muy diferentes al de una estructura ***MIMO***.

Las potencias máximas de transmisión del terminal de abonado y de la estación base doméstica son independientes del número de capas ***MIMO***.

Las ganancias de las antenas tanto del ***UE*** como del ***e-NB***, han de ser pequeñas, para evitar que el nivel de señal a la entrada del terminal de abonado dependa de la posición del abonado y de la posición del propio terminal.

Los niveles de referencia para el caso de estaciones base o eNB doméstico, se alcanzan a 10 centímetros de las antenas. Esta distancia aseguraría el cumplimiento del nivel de referencia para todas las regulaciones consideradas, ya que se corresponde con el cálculo del caso más restrictivo, la legislación catalana.

Para ***MIMO*** de dos capas, las distancias de seguridad para guardar el nivel de referencia son de 7 centímetros a cada una de las antenas.

Los niveles de referencia para el caso de equipos de usuario (***UE***) ya sean de tipo tablet o smart phone, se alcanzan a 14 centímetros de los terminales. Al igual que con las estaciones base domésticas, esta distancia aseguraría el cumplimiento del nivel de referencia para todas las regulaciones consideradas, ya que se corresponde con el cálculo del caso más restrictivo, la legislación catalana.

Habría que considerar que el equipo de abonado (***UE***) está siendo utilizado como terminal de datos, lo que implica que su manejo se realiza con las manos, por lo que, aunque no se guarde la distancia de seguridad que impone el nivel de referencia, no se ve afectado ningún órgano vital. Desde que los terminales de bolsillo se utilizan como terminales de datos, el impacto ambiental de estos equipos puede considerarse mucho menor que cuando eran fundamentalmente terminales de voz y su funcionamiento se llevaba a cabo muy cerca de la cabeza del usuario.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

[1] 3rd Generation Partnership Project;Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception. Release 14. Junio de 2016.

[2] 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception. Release 13. Marzo de 2016.

[3] LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles. Ramón Agustí Comes y otros. Fundación Vodafone España. 2010.

[4] Exploiting the Elevation Dimension of MIMO System For Boosting Handset Capacity. Almesaeed, Ameen, Doufexi y Nix. Universidad de Bristol. UK. IEEE International Conference on Communications 2015. London (UK).

[5] LTE-Advanced 8X8 MIMO Measurements in an Indoor Scenario. Werner, Asplund, Figueiredo, Jalden, Halvarsson. Eriksson AB. Suecia. ISAP 2012. Nagoya (Japón).

[6] LTE-A Field Measurements: 8X8 MIMO and Carrier Aggregation. Werner, Asplund, Figueiredo, Jalden, Halvarsson. Eriksson AB. Suecia. IEEE Vehicular Technology Conference 2013. Dresden (Alemania).

[7] Radiated Two-Stage Method for LTE MIMO User Equipment Performance Evaluatión. Yu, Qi, Liu, Xu y Fan. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Diciembre de 2014.

[8] OFDMA SYSTEM ANALYSIS AND DESIGN. Samuel c. Yang. Artech House 2010.