

Tecnología MIMO

Introducción

En los últimos años los fabricantes de sistemas inalámbricos han lanzado numerosas soluciones de radioenlaces punto-punto y punto-multipunto con tecnología MIMO, lo que permite doblar la capacidad de un enlace empleando el mismo ancho de banda que un sistema convencional (SISO). Estos sistemas se basan fundamentalmente en el uso de antenas con dos polarizaciones cruzadas.

Sin embargo, al analizar más en detalle esas soluciones, muchas preguntas surgen, como por ejemplo: ¿por qué se basan en el uso de polarizaciones cruzadas cuando otros sistemas MIMO como los empleados en telefonía móvil no lo hacen? ¿En qué se diferencia entonces MIMO de las técnicas de polarización cruzada empleadas en los radioenlaces tradicionales? ¿Qué ventajas reales aporta MIMO? ¿Afecta en algo el uso de bandas no licenciadas? ¿Por qué se limitan a MIMO 2x2 y no es posible implementar soluciones MIMO 3x3 ó 4x4?

Este documento da respuesta a esas y otras preguntas explicando aspectos fundamentales sobre la tecnología MIMO y su aplicabilidad a radioenlaces en bandas no licenciadas, aclarando mitos y desmintiendo conceptos erróneos usados frecuentemente a nivel de marketing. Del mismo modo, este documento presenta la tecnología MIMO implementada en los equipos de Albentia Systems, que ha sido específicamente diseñada para radioenlaces punto-punto y punto-multipunto en bandas no licenciadas, en configuraciones 2x2 y 4x4.

¿Qué es MIMO?

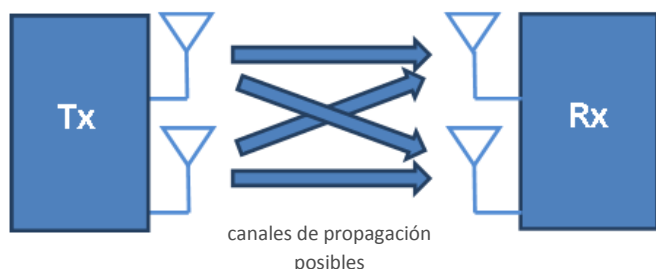
MIMO es un mecanismo que incrementa la eficiencia espectral de un sistema de transmisión inalámbrica por medio de la utilización del dominio espacial, aprovechando fenómenos físicos como la propagación multitrayecto para incrementar la velocidad de transmisión o reducir la tasa de error. Dado que MIMO se basa en el dominio espacial, requiere el uso de múltiples antenas en el transmisor y en el receptor.

Conviene aclarar una serie de puntos indicados en la definición anterior:

- 1) MIMO se basa en la utilización del dominio espacial, creando “canales espaciales” diferenciados entre el transmisor y el receptor. Para ello es necesario emplear múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor. Estas antenas deben estar separadas por una distancia mínima que permita la creación de estos canales espaciales diferenciados.
- 2) MIMO se puede emplear para dos usos: Incrementar la velocidad de transmisión para una misma tasa de error y SNR (Matrix B), o reducir la tasa de error manteniendo la velocidad de transmisión y la SNR constantes (Matrix A).
- 3) MIMO se basa en el uso de canales espaciales que operan en la misma frecuencia, polarización y tiempo. Esos canales espaciales pueden crearse en condiciones de propagación con fuerte multitrayecto, por lo que MIMO es una tecnología destinada a sistemas de transmisión sin línea de vista (NLOS). Como se analizará posteriormente, no es posible la creación de canales espaciales separados en condiciones LOS.

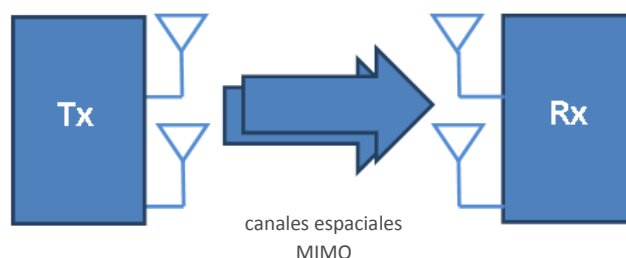
¿Cómo funciona MIMO?

El siguiente esquema resume una configuración MIMO 2x2:



Tanto el transmisor como el receptor cuentan con dos antenas. Tal y como muestran las flechas, la señal transmitida por una antena es recibida por las dos antenas receptoras, por lo que la señal recibida en una determinada antena receptora es una combinación lineal de las señales transmitidas por cada antena transmisora. Las cuatro antenas operan en la misma frecuencia y polarización.

La tecnología MIMO logra mediante métodos matemáticos crear dos “canales espaciales” diferenciados, de modo que entre el transmisor y el receptor se crean dos canales independientes que operan en la misma frecuencia y al mismo tiempo por los que transmitir información. La transmisión físicamente se realiza a través de los cuatro canales de propagación mostrados en la figura anterior, pero matemáticamente es como si existieran dos canales independientes entre el transmisor y el receptor. Podríamos hablar por tanto de canales matemáticos, o canales virtuales, en contraste con los cuatro canales físicos que realmente existen entre el transmisor y el receptor.



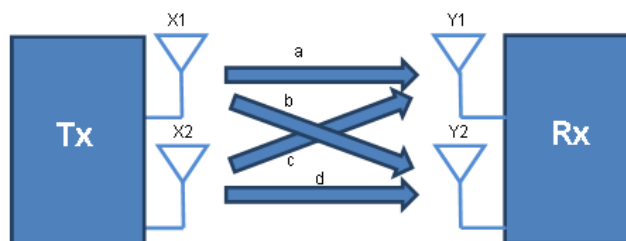
¿Cómo logra MIMO crear esos dos canales espaciales separados si ambos operan en la misma frecuencia, polarización y tiempo?

No queda más remedio que abordar esta pregunta con ayuda de las matemáticas. No obstante, el lector que no quiera entrar en el análisis deberá aceptar el principal condicionante para que MIMO funcione, y que anticipamos a continuación: “Para que MIMO pueda crear los canales espaciales diferenciados, los canales físicos de propagación deben ser muy distintos”. La afirmación anterior tiene enormes implicaciones en cómo se implementa MIMO en radioenlaces punto-punto y punto-multipunto.

Comenzamos el análisis para comprender ese importante condicionante. Podemos basarnos en un ejemplo sencillo basado en el modelo anterior 2x2.

Como se ha indicado, la señal recibida en la antena receptora es una combinación lineal de las señales transmitidas por las antenas transmisoras. Para poder separar esas señales si el canal de propagación que conecta las antenas es conocido (en el caso anterior hay cuatro canales de propagación posibles), basta con resolver un sistema de ecuaciones de dos incógnitas.

Para conocer el canal de propagación basta con enviar señales conocidas por una antena y luego por la otra, de modo que el receptor conocerá cada canal de propagación.



En la figura anterior, cada antena transmisora envía un símbolo diferente, X1 por una antena y X2 por otra antena. La señal de las antenas viaja por los canales de propagación posibles (a, b, c y d), y el receptor recibe las señales Y1 y Y2 en sus antenas. Por ejemplo, Y1 es la suma del símbolo X1 viajando por el canal “a”, más X2 viajando por el canal “c”.

El sistema de ecuaciones por tanto es:

$$Y1 = a \cdot X1 + c \cdot X2$$

$$Y2 = b \cdot X1 + d \cdot X2$$

Como los coeficientes del canal de propagación a, b, c y d son conocidos, el receptor puede recuperar X1 y X2 en base a las señales recibidas Y1 e Y2 con simplemente resolver el anterior sistema de ecuaciones.

Sin embargo, basta repasar la teoría básica de ecuaciones lineales para recordar que no todo sistema de ecuaciones tiene solución. El sistema puede ser indeterminado, con infinitas soluciones posibles. Para que un sistema lineal de dos ecuaciones con dos incógnitas tenga solución, es imprescindible que las ecuaciones sean linealmente independientes, o que la matriz de canales de propagación tenga determinante no nulo.

Del mismo modo, para que MIMO pueda separar los dos canales espaciales es imprescindible que la matriz de canales de propagación tenga determinante no nulo, o empleando otra terminología, que los canales de propagación entre las diferentes antenas sean incorrelados. Es decir, que en el ejemplo anterior, los canales de propagación entre la antena transmisora 1 y las antenas receptoras 1 y 2 (a y b), sean bien diferentes que los canales de propagación entre la antena transmisora 2 y las antenas receptoras 1 y 2 (c y d).

Una vez se cumple este condicionante de incorrelación de los canales de propagación, es fácil separar los canales espaciales, creando dos canales diferentes que operarán en la misma frecuencia, tiempo y polarización, siendo el receptor capaz de diferenciar las señales enviadas por cada canal espacial.

¿Para qué se emplea MIMO? ¿Qué es Matrix A y Matrix B?

Como hemos visto, mediante mecanismos matemáticos MIMO es capaz de crear canales espaciales diferenciados que operan en la misma frecuencia, polarización y tiempo.

En el ejemplo anterior, los dos canales espaciales creados pueden emplearse para dos fines.

- a) Para reducir la tasa de error. Los canales espaciales pueden emplearse para redundar la información, como si fuese transmitida por ambos canales simultáneamente. Si uno de los canales presenta alguna pérdida, probablemente el otro logre transmitir la señal. Es un método similar al concepto de “dos orejas oyen mejor que una”. Este uso de MIMO se suele conocer como “Matrix A”.
- b) Para incrementar la velocidad de transmisión. Los dos canales pueden emplearse para transmitir información diferente por cada uno de ellos, por lo que se duplica la velocidad de transmisión. En este caso no se redundante la transmisión, por lo que la tasa de error no mejora como en el caso anterior, pero se incrementa notablemente la velocidad de transmisión. Esta configuración se conoce como “Matrix B”.

Como curiosidad, el origen de la terminología “Matrix A” y “Matrix B” tiene que ver con la matriz de símbolos que alimentan a cada antena. En el caso A, la matriz es la descrita en el algoritmo de Alamouti que reduce la tasa de error por diversidad espacial, mientras que en el caso B, cada antena se alimenta con símbolos diferentes para duplicar la velocidad de transmisión.

Lo importante es que las configuraciones MIMO Matrix A están orientadas a mejorar la recepción de la señal en unas condiciones determinadas, y no a incrementar la velocidad de transmisión. Al contrario, Matrix B incrementa la velocidad de transmisión en esas mismas condiciones sin mejorar la tasa de error.

MIMO en condiciones LOS y NLOS

La principal diferencia entre canales con línea de vista (LOS) y sin línea de vista (NLOS) es la existencia de un rayo directo que domina sobre los reflejados. Dejando al margen los detalles matemáticos, podemos resumir diciendo que en LOS la comunicación se realiza a través de un rayo directo dominante, con poco multitrayecto, y en NLOS la comunicación se logra únicamente mediante multitrayecto rebotando la señal de un lugar a otro hasta llegar del transmisor al receptor.

Como ya se ha indicado, para poder emplear MIMO es imprescindible que los canales sean fuertemente diferentes, ya que si no es imposible resolver el sistema de ecuaciones. Sin embargo, esto no ocurre en condiciones LOS, ya que los diferentes canales de propagación entre las antenas transmisoras y receptoras son prácticamente idénticos, pues se basan en un rayo directo.

En el caso NLOS, en el que los canales de propagación se caracterizan por fuerte multitrayecto (no hay rayo directo),

los canales de propagación son claramente diferentes, pues el multitrayecto será muy distinto entre las diferentes antenas ya que los caminos físicos recorridos y los rebotes de la señal no serán los mismos.

Por lo tanto llegamos a una importantísima conclusión: MIMO sólo es posible en propagación NLOS. Es matemáticamente imposible emplear MIMO en propagación LOS debido a la fuerte correlación de los canales de propagación.

Si MIMO no es posible en condiciones LOS, ¿qué mecanismo emplean los radioenlaces MIMO?

Como en un escenario LOS es matemáticamente imposible crear canales espaciales diferenciados que operen en la misma frecuencia, polarización y tiempo, no queda otro remedio que crear físicamente esos canales diferenciados, ya sea mediante frecuencias diferentes, polarizaciones diferentes o tiempos diferentes. Es decir, ya no hablamos de canales virtuales creados mediante métodos matemáticos, sino de canales físicos reales diferenciados.

Ya no hablamos por tanto de incrementar la eficiencia espectral más allá del límite de Shannon para sistemas convencionales, sino de mantener la eficiencia espectral convencional en dos, tres o cuatro canales físicamente (y no matemáticamente) diferenciados, ya sea empleando diferente espectro (diversidad en frecuencia), polarización (diversidad angular), tiempo (diversidad temporal), o una combinación de las anteriores. Pero ya no es posible la diversidad espacial.

El método más comúnmente empleado es el de la diversidad angular, por el que los canales físicos operan en la misma frecuencia y tiempo, pero empleando polarizaciones ortogonales. Se entiende así que los conceptos de diversidad angular y multiplexación en polarización son equivalentes. Más adelante en este documento explicaremos por qué esta tendencia y sus ventajas e inconvenientes.

¿Por qué la mayor parte de los sistemas MIMO destinados a aplicaciones LOS usan diversidad por polarización y no frecuencial?

Dado que en condiciones LOS la tecnología MIMO no puede crear canales espaciales diferenciados, no queda otro remedio que crear esos canales diferenciados físicamente, por métodos como el uso de doble polarización, o diferentes frecuencias. ¿Por qué se emplea generalmente diversidad angular o de polarización en lugar de diversidad de frecuencia?

Hay varios motivos para ello. Pero el motivo fundamental es que la tecnología empleada en la mayor parte de los radioenlaces en bandas no licenciadas está basada en el estándar WiFi 802.11n.

WiFi se orienta a sistemas inalámbricos punto-multipunto que permiten interconectar diferentes dispositivos en una vivienda u oficina, empleando generalmente para ello espectro no licenciado en la banda de 2.4GHz.

El escenario típico de propagación es claramente NLOS, pues rara vez existe línea de vista perfecta sin obstáculos entre la antena del Access Point y el ordenador o teléfono que se conecta a dicho AP. Por lo tanto, es posible emplear tecnología MIMO, y efectivamente 802.11n hace gran uso de la tecnología MIMO para incrementar la velocidad de transmisión.

Por otra parte, el espectro disponible en la banda de 2.4GHz es muy limitado, permitiéndose únicamente dos o tres canales WiFi.

Esto incrementa el interés en MIMO como mecanismo para incrementar la capacidad del sistema sin requerir para ello usar más espectro radioeléctrico.

Los chipsets empleados en dispositivos WiFi implementan dos, tres o cuatro cadenas transmisoras y receptoras que operan simultáneamente en la misma frecuencia y polarización (antenas omnidireccionales), en configuraciones MIMO 2x2, 3x3 o incluso 4x4, según el número de antenas.

Dado el bajo coste de estos chipsets, la mayoría de fabricantes de radioenlaces punto-punto o punto-multipunto de acceso (larga distancia) basan la capa física de sus sistemas en dichos chipsets 802.11n. Esto conlleva serios problemas dado que la modulación OFDM de dicho estándar nunca fue concebida para soportar el multitrayecto típico de la propagación a larga distancia, pero eso no es objeto de este documento.

Como en aplicaciones LOS no es posible implementar MIMO, dichos fabricantes emplean chipsets WiFi 2x2 y “ayudan” al sistema MIMO creando los canales separados que MIMO no es capaz de crear debido a la correlación de los canales de propagación. Pero el sistema mantiene la esencia del chipset 802.11, por lo que los canales trabajan en la misma frecuencia, obligando a recurrir a polarizaciones ortogonales como única vía de separación de dos canales que operan en la misma frecuencia.

¿Por qué en radioenlaces generalmente se emplea MIMO 2x2 y no MIMO 3x3 ó 4x4?

Tal y como se ha indicado anteriormente, la mayor parte de los radioenlaces emplean tecnología 802.11n, que sí fue diseñada para implementar MIMO, pero que al trasladarse a aplicaciones LOS obliga a trabajar en polarizaciones ortogonales.

Desafortunadamente no hay más de dos polarizaciones ortogonales: vertical y horizontal. Por eso sólo es posible implementar MIMO 2x2 basándose en polarizaciones ortogonales.

Sin embargo hay en el mercado chipsets 802.11n MIMO 3x3, y se ha llegado a ver empresas que implementan estos sistemas en radioenlaces LOS empleando polarización vertical, horizontal y diagonal, pensando que así lograrán triplicar el throughput. Esto obviamente es matemáticamente imposible, ya que la tercera polarización es una combinación lineal de las otras dos.

Por lo tanto, en sistemas LOS que emplean polarizaciones ortogonales no es posible implementar más que MIMO 2x2.

¿Y por qué no emplear diversidad frecuencial?

Efectivamente, dado que en condiciones LOS no es posible crear canales espaciales, no queda otro remedio que forzar canales diferenciados en polarización o frecuencia. Los sistemas basados en 802.11n se basan en diversidad angular dado que el chipset fue diseñado para una aplicación "MIMO real" que trabajaba en una misma frecuencia. Pero ¿por qué no crear esos canales diferenciados mediante diversidad en frecuencia? En ese caso hablaríamos de "MIMO frecuencial" en lugar de "MIMO polarizado".

En las bandas no licenciadas de 5GHz hay una gran cantidad de espectro disponible, por lo que es viable emplear canales en diferentes frecuencias en lugar de emplear una misma frecuencia en doble polarización.

Emplear diversidad frecuencial es tan falso MIMO como emplear diversidad angular. Es otra forma de crear dos canales donde MIMO no es capaz de crearlos, pero empleando dos frecuencias diferentes en vez de dos polarizaciones diferentes.

Esta es la apuesta MIMO de Alpentia Systems. Los radioenlaces MIMO para aplicaciones LOS en banda no licenciada de Alpentia Systems emplean diversidad en frecuencia.

¿Por qué Alpentia Systems apuesta por la diversidad frecuencial en lugar de angular? ¿Qué ventajas aporta?

A la hora de decidir qué tipo de MIMO implementar en radioenlaces punto-punto y punto-multipunto LOS para las bandas no licenciadas de 5 GHz, los ingenieros de Alpentia Systems optaron por diversidad frecuencial en lugar de diversidad angular. Esta decisión se basa fundamentalmente en dos características de las bandas no licenciadas de 5GHz, que son la existencia de un gran número de canales disponibles (prácticamente 1 GHz de espectro), y la presencia de interferencias al ser un espectro de uso compartido.

Las ventajas de emplear diversidad en frecuencia frente a diversidad angular para "ayudar" a MIMO creándole los canales independientes son fundamentalmente tres:

- 1) Permite configuraciones 2x2, 3x3 y 4x4. Al contrario que en el caso de diversidad por polarización, en el que sólo existen dos polarizaciones ortogonales posibles, la diversidad frecuencial permite emplear múltiples canales diferenciados, posibilitando configuraciones 3x3 y 4x4 o superiores, rompiendo el límite de MIMO 2x2 característico de la diversidad angular.

- 2) No requieren antenas de doble polarización. Al emplearse diferentes frecuencias que pueden compartir la misma polarización, es posible crear configuraciones 2x2 ó 4x4 con una única antena transmisora, al combinarse los diferentes canales internamente en el equipo, lo que reduce notablemente el coste de las antenas. No obstante, es posible emplear también diversidad angular y espacial mejorando más aún el rendimiento.
- 3) El comportamiento en entornos interferidos es muy superior al de la diversidad angular. Este punto se explica en la siguiente sección.

Dadas las importantes ventajas mencionadas, y ya que Alpentia Systems no emplea chipsets 802.11n debido a su insuficiente resistencia al multitrayecto, Alpentia Systems ha optado por la mejor solución MIMO para radioenlaces punto-punto y punto-multipunto LOS en bandas no licenciadas: MIMO frecuencial.

¿Por qué la diversidad frecuencial es mejor que la angular en entornos interferidos?

Para responder a esta pregunta primero es necesario comprender la naturaleza de las interferencias que se suelen encontrar en las bandas no licenciadas de 5GHz.

Las interferencias pueden ser de dos tipos:

Interferencias co-canal: Estas son las interferencias más fuertes, ya que otro equipo ocupa el mismo canal de transmisión

- a) **Interferencias en banda (las más comunes):** En este caso nadie más emplea el mismo canal radio, pero la transmisión de un equipo cercano puede saturar el receptor de un equipo que se encuentre en fase de recepción. Estas interferencias existen debido al mecanismo de duplexión TDD (un equipo transmite y recibe en la misma frecuencia, en diferentes intervalos de tiempo) que se emplea en bandas no licenciadas, por el que dos equipos no sincronizados pueden encontrarse en fases de transmisión/recepción diferentes. Es decir, aunque no haya equipos en el mismo canal, se pueden interferir por saturación del receptor.
- b) En ambos casos, especialmente en el segundo, la interferencia se debe a que un equipo interferente en fase de transmisión se encuentra ubicado cerca del equipo interferido, que se encuentra en fase de recepción. Las interferencias se deben fundamentalmente a la cercanía entre equipos. Efectivamente, las interferencias suelen encontrarse en torres de telecomunicación donde hay una alta concentración de equipos instalados que operan en la misma banda, mientras que lejos de esos puntos el espectro suele estar libre de interferencias en su práctica totalidad. La cercanía es una característica fundamental de las interferencias en bandas no licenciadas.

Los equipos que emplean MIMO polarizado emplean una misma frecuencia en polarizaciones ortogonales, lo que lleva a mucha gente a pensar que las interferencias afectarán a una polarización o a otra, pero no a las dos. Sin embargo esto no es así, ya que las interferencias tienen lugar en la zona de radiación en “Campo Cercano”, o zona de Fresnel.

La polarización de una antena se define como la polarización de los campos electromagnéticos que la antena produce evaluados en el campo lejano (no en el campo cercano). Este punto es muy importante, ya que dada la distancia típica en la que se encuentran las fuentes de interferencia, éstas se ubican en campo cercano, por lo que la polarización no está bien definida o puede ser totalmente diferente a la de campo lejano. Para hacernos una idea, a 5GHz, el campo lejano para una antena de 50 centímetros comienza a una distancia de unos diez metros. Por lo tanto, las interferencias se encuentran casi siempre en campo cercano, pues todas las antenas que se instalen en una misma torre entrarán prácticamente en la distancia de campo cercano.

Al no estar aún bien definida la polarización de las ondas emitidas por la antena del equipo interferente, la antena del equipo interferido no puede discriminarlas según su polarización, por lo que la interferencia afectará en general a todas las polarizaciones, independientemente de la polarización de la antena del equipo interferente o la del interferido.

La presencia de interferencias en campo cercano presenta por tanto un importante problema para los sistemas MIMO polarizado que se basan únicamente en diversidad de polarización, ya que generalmente la interferencia afecta por igual a ambas polarizaciones. Es decir, el efecto de las interferencias está fuertemente correlado en ambas polarizaciones, lo que reduce enormemente la eficiencia de los sistemas MIMO al degradar ambos canales por igual.

En el caso de diversidad frecuencial este problema no existe, ya que las interferencias en diferentes frecuencias están totalmente incorreladas. Esto permite un rendimiento claramente superior frente a la diversidad por polarización en entornos interferidos, lo que constituye uno de los principales motivos por los que Albentia Systems ha optado por técnicas MIMO frecuencial.

¿Qué tipo de MIMO implementa Alcentia Systems? ¿Matrix A o Matrix B?

Ambos. Esta es otra diferencia importante frente a otros fabricantes. Alcentia Systems ofrece la posibilidad de emplear su MIMO frecuencial para mejorar la tasa de error (Matrix A) o incrementar la velocidad de transmisión (Matrix B). La mayor parte de fabricantes únicamente implementa configuraciones tipo Matrix B, ya que se orientan únicamente a aumentar la velocidad de transmisión, que es uno de los principales diferenciadores comerciales entre productos.

Alcentia Systems ofrece la posibilidad de mejorar la velocidad, o de mejorar la tasa de error. Esto último es especialmente interesante en escenarios móviles o entornos fuertemente interferidos, donde las configuraciones Matrix B de MIMO polarizado presentan un rendimiento muy pobre al tratarse de canales con fuertes pérdidas e interferencias correladas en ambos canales.

Conclusiones

Las principales conclusiones alcanzadas en este documento son:

- 1) **La tecnología MIMO no es matemáticamente viable en escenarios LOS debido a la correlación de los canales de propagación**
- 2) **Las configuraciones Matrix A mejoran la tasa de error, y las Matrix B la velocidad de transmisión**
- 3) **Dado que MIMO no puede crear canales espaciales debido a la correlación de los canales de propagación, en escenarios LOS hay que crear canales físicamente diferenciados, ya sea por diversidad angular o frecuencial**
- 4) **En sistemas LOS, realmente no se implementa MIMO, sino diversidad frecuencial o angular. No es correcto hablar por tanto de MIMO, aunque es una terminología comúnmente aceptada que ha creado gran confusión. Alcentia Systems opta por la terminología “MIMO polarizado” o “MIMO frecuencial” para diferenciarlo del “MIMO real” aplicable únicamente en escenarios NLOS.**
- 5) **La mayor parte de los radioenlaces LOS emplean MIMO polarizado, mediante el uso de polarización cruzada. Esto se debe a que generalmente se basan en chipsets WiFi (algo desaconsejado por el IEEE debido a la incapacidad de su modulación OFDM de soportar el multitrayecto de los enlaces de larga distancia)**
- 6) **La diversidad angular sólo permite configuraciones 2x2, ya que no existen más de dos polarizaciones ortogonales posibles.**
- 7) **La diversidad angular presenta problemas en entornos interferidos ya que dichas interferencias suelen encontrarse en campo cercano, donde las antenas no son capaces de discriminar la polarización, lo que hace que las interferencias afecten a ambas polarizaciones.**
- 8) **Alcentia Systems opta en cambio por MIMO frecuencial para radioenlaces en banda no licenciada, debido a sus claras ventajas: Posibilidad de configuraciones superiores a 2x2, mejor rendimiento en entornos interferidos y posibilidad de emplear una única antena.**