

TECNOLOGÍA MIMO

En los últimos años los fabricantes de sistemas inalámbricos han lanzado numerosas soluciones de radioenlaces punto-punto y punto-multipunto con tecnología MIMO, prometiendo 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 ortogonales.

Sin embargo, al analizar más en detalle esas soluciones, surgen muchas preguntas, como por ejemplo: ¿por qué se basan en el uso de polarizaciones ortogonales cuando otros sistemas MIMO, como los empleados en telefonía móvil, no lo hacen? ¿En qué se diferencia entonces MIMO de las técnicas de polarización ortogonal empleadas en los radioenlaces tradicionales? ¿Qué ventajas reales aporta MIMO? ¿Afecta en algo el uso de bandas no licenciadas? ¿Qué es la filosofía MIMO frecuencial de Albentia Systems?

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 frecuencial implementada en los equipos de Albentia Systems, que ha sido específicamente diseñada para radioenlaces punto-punto y punto-multipunto en bandas no licenciadas.

¿Qué es MIMO?

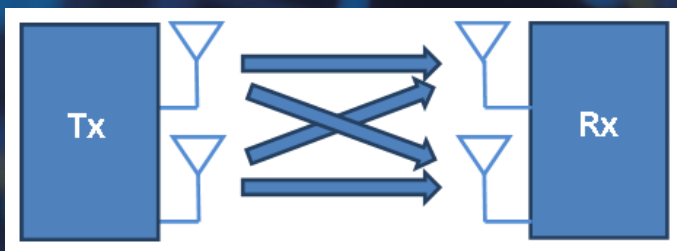
MIMO es un mecanismo que incrementa la eficiencia espectral de un sistema de transmisión inalámbrica por medio de la utilización del dominio espacial, aprovechando fenómenos físicos como la propagación multitrayecto para incrementar la velocidad de transmisión o reducir la tasa de error. Dado que MIMO 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:

- 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.
- 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).
- 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). No es posible la creación de canales espaciales separados en condiciones LOS, a menos que se juegue con antenas de doble polarización, dando lugar a un MIMO degradado, como veremos más adelante.

¿Cómo funciona MIMO?

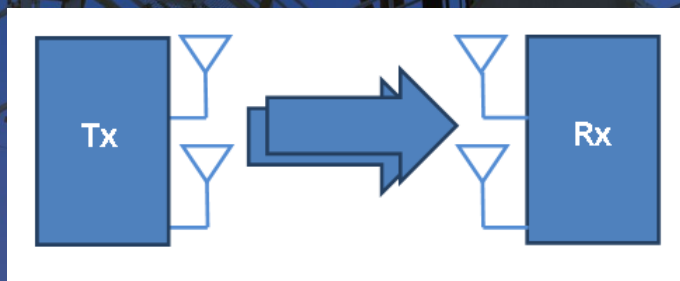
El siguiente esquema resume una configuración MIMO 2x2:



Canales de propagación posibles

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.



Canales espaciales MIMO

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

MIMO crea dos canales espaciales que pueden emplearse para dos fines:

- **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. Este uso de MIMO se suele conocer como “Matrix A”.
- **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 redunda 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”.



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. 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.

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, 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.

¿Por qué Albentia Systems apuesta por la diversidad frecuencial en lugar de angular? Ventajas:

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, en Albentia Systems optamos 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 en la tecnología aerDOCSIS frente a diversidad angular para “ayudar” a MIMO, creándole los canales independientes son fundamentalmente tres:

- **Permite configuraciones 2x2, 3x3 y 4x4.** Al contrario que en el caso de diversidad por polarización, en el que solo 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.

- **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.
- **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 Albentia Systems no emplea chipsets WiFi (802.11n) debido a su insuficiente resistencia al multitrayecto, Albentia Systems ha optado por la mejor solución MIMO para radioenlaces punto-punto y punto-multipunto LOS en bandas no licenciadas: el MIMO frecuencial que incorporan los equipos aerDOCSIS.

¿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 se deben a que un equipo interferente en fase de transmisión se encuentra ubicado cerca del equipo interferido, que se encuentra en fase de recepción. 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.

Los equipos que implementan MIMO angular (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 (es prácticamente el mismo) 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 (son muy diferentes entre ellas). 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 en sus equipos aerDOCSIS.



Conclusiones

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. Albentia Systems opta por la terminología “MIMO polarizado (WiFi)” o “MIMO frecuencial (aerDOCSIS, la mejor opción)” para diferenciarlo del “MIMO real” aplicable únicamente en escenarios NLOS (en el router indoor de casa del cliente).
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. Albentia Systems opta en cambio por MIMO frecuencial para sus equipos aerDOCSIS PTP y PtMP 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.