

Análisis del impacto de los efectos del canal en el rendimiento de los sistemas MIMO

Por Wilkie Yu de Agilent Technologies



www.agilent.com

Acerca del autor: Wilkie Yu empezó a trabajar en Agilent Technologies en el año 2000 y ha ocupado varios cargos en el campo del marketing como ingeniero de desarrollo de ventas para Asia y gerente de desarrollo de mercados de China. Actualmente es responsable del uso de la plataforma PXB de Agilent. El Sr. Wilkie es licenciado en Ingeniería Técnica y Ciencias de la Computación por la Universidad de Berkeley en California.

Las tecnologías de múltiples entradas y salidas (MIMO) han cumplido lo prometido: velocidades de transmisión de datos más elevadas con mayor eficiencia espectral. Al ser utilizados en entornos multitrayecto, los sistemas inalámbricos comerciales aprovechan ampliamente las características multitrayecto de los sistemas de antenas MIMO. Gracias a la consistente mejora potencial del rendimiento del sistema inalámbrico que ofrecen las entradas y salidas múltiples, muchas comisiones de normas en materia de comunicación inalámbrica acaban de adoptarlas o están considerando la posibilidad de usarlas.

A pesar de lo atractivo que puede resultar, el sistema de entradas y salidas múltiples es muy complejo y presenta desafíos de prueba y medida únicos cuando se implementa en un sistema inalámbrico. Uno de estos desafíos se centra en el canal inalámbrico y en los efectos de la correlación en los canales, como la pérdida de trayecto y el desvanecimiento multitrayecto. En los sistemas de comunicación inalámbricos, el canal inalámbrico constituye el factor clave para determinar el rendimiento del sistema. El objetivo es garantizar que el canal inalámbrico sea lo bastante diferente para cada canal, ya que esta diferencia es lo que permite soportar varios flujos en el mismo espacio tiempo-frecuencia. Por consiguiente, es fundamental entender bien los efectos de la correlación en los canales para optimizar el rendimiento de los sistemas MIMO, lo cual requiere un medio para probar con precisión los componentes MIMO (p. ej., los receptores) y los sistemas en condiciones y en canales reales. Desgraciadamente, realizar dichas pruebas directamente en un entorno inalámbrico "real" no es ni eficaz ni práctico por dos factores, como la sensibilidad del canal y los requisitos de movilidad.

Actualmente existen equipos especializados preparados para afrontar este desafiante entorno de pruebas que ofrecen a los ingenieros de I+D la mejor solución para conocer a fondo y tratar los distintos efectos del canal que puedan presentarse.

Principios básicos de funcionamiento

Para entender mejor el desafío que suponen los efectos de la correlación en los canales, primero es necesario examinar cómo funcionan los sistemas MIMO y por qué. En los sistemas de comunicación inalámbricos, los sistemas multiantena como MIMO aprovechan las características espaciales del canal inalámbrico obtenido colocando varias antenas separadas en un entorno de dispersión multitrayecto denso. El sistema MIMO utiliza varios transceptores tanto en transmisión como en recepción para crear varios trayectos independientes para las señales que se pueden recuperar dentro del receptor.

En terminología MIMO, la "Entrada" y la "Salida" son referenciadas al canal inalámbrico que existe entre las antenas. Se obtienen ganancias de rendimiento cuando varios trans-

misores mandan su señal al canal inalámbrico al mismo tiempo y, posteriormente, combinaciones de estas señales salen simultáneamente del canal inalámbrico hacia los distintos receptores.

En la Figura 1 se ilustran varias configuraciones básicas para conectar los transmisores y los receptores en un sistema inalámbrico. Comprenden entradas y salidas sencillas (SISO), entrada sencilla y salidas múltiples (SIMO), entradas múltiples y salida sencilla (MISO), y múltiples entradas y salidas (MIMO). En la figura, cada flecha de color representa trayectos de señal múltiples entre dos antenas (incluido el trayecto de contacto visual directo entre antenas (LOS), si lo hay) y las numerosas señales multitrayecto originadas por la reflexión, dispersión y difracción del entorno circundante. En la configuración MIMO 2x2, cada antena transmisora tiene dos canales de transmisión separados y cada antena receptora tiene dos canales receptores combinados. Se pueden realizar también muchas otras configuraciones MIMO que usan combinaciones de pares de antenas múltiples, como la configuración 3x3 o 4x4. Un sistema MIMO se puede configurar incluso con un número desigual de antenas en transmisión y en recepción.

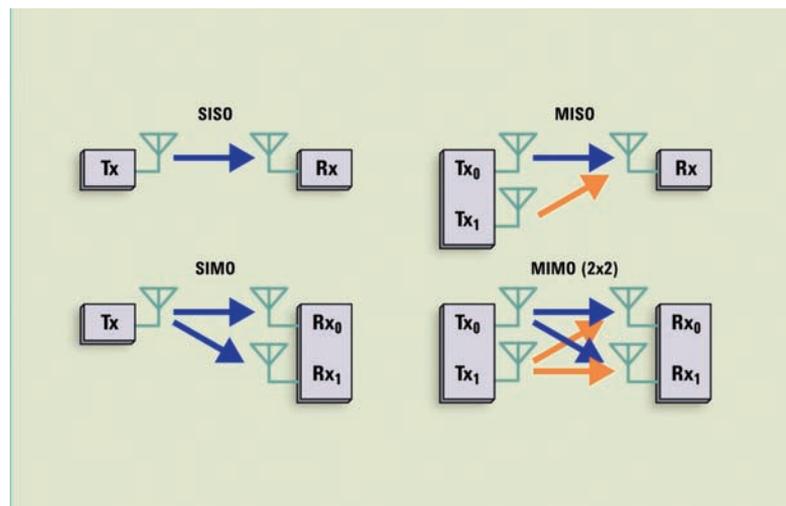


Figura 1. Las flechas de color de este esquema representan las configuraciones de los canales en sistemas SISO, SIMO, MISO y MIMO (2x2).

Usos de los sistemas MIMO

Los sistemas MIMO se pueden implementar para evitar el desvanecimiento de las señales o bien para mejorar la capacidad. Por lo general, existen tres categorías de técnicas de antenas múltiples, que comprenden la diversidad espacial, la multiplexión espacial y el modelado de canales.

- Diversidad espacial
- Multiplexión espacial
- Modelado de canales

Diversidad espacial

Técnica ideada para mejorar la eficiencia de la potencia minimizando las retransmisiones. Se basa en métodos como la diversidad de retardo, la codificación espaciotemporal de bloque (STBC) y la codificación espaciotemporal Trellis (STTC).

En un canal inalámbrico, la potencia de la señal fluctúa rápidamente en el tiempo y en la distancia debido a la diversidad del entorno multitrayecto. Cuando la potencia de la señal desciende considerablemente en el receptor, se dice que el canal sufre desvanecimiento multitrayecto. A menudo, la diversidad se utiliza en canales inalámbricos para evitar este efecto de desvanecimiento. La diversidad de antena evita el desvanecimiento combinando copias de señales procedentes de dos o más canales desvanecidos independientemente. Por ejemplo, en un sistema SIMO, la diversidad de la antena receptora mejorará el rendimiento del sistema cuando el receptor combine correctamente las señales procedentes de distintas antenas, de manera que la señal resultante sufra una variación de amplitud reducida si se compara con la amplitud de la señal de cualquier otra antena. La diversidad se caracteriza por el número de canales de desvanecimiento independientes, conocido también como orden de diversidad, y es igual al número de antenas receptoras de un sistema de configuración SIMO. Es importante observar que, si los canales de desvanecimiento no son independientes, la diversidad de antena puede no mejorar el rendimiento del sistema.

La diversidad en transmisión es aplicable a los canales MISO y se ha convertido en un área activa de in-

vestigación. Si los canales desde cada antena transmisora hasta la antena receptora tienen características de desvanecimiento distintas, entonces el orden de diversidad es igual al número de antenas transmisoras. Si la transmisora no dispone de un conocimiento previo de las características del canal, se requiere un diseño adecuado de la señal transmitida para alcanzar la ganancia de diversidad en la receptora. Una famosa técnica de diversidad en transmisión que ha acaparado la atención recientemente es la codificación espaciotemporal (STC). Esta técnica envía los mismos datos de usuario a las dos antenas de transmisión, pero en instantes diferentes para mejorar la probabilidad de recuperación de los datos deseados. En efecto, codifica los datos tanto en el espacio como en el tiempo.

La diversidad en los canales MIMO es una combinación de la diversidad en transmisión y en recepción descritas anteriormente. Por tanto, el orden de diversidad es igual al producto del número de antenas transmisoras y receptoras si el canal entre cada par de antenas de transmisión-recepción se desvanece independientemente.

Multiplexión espacial

Esta técnica utiliza la multiplexión espacial, definida como MIMO, en la que se transmiten varios flujos de datos a la vez a través de distintas antenas para aumentar la velocidad de transmisión de datos efectiva. La multiplexión espacial puede aumentar la velocidad de transmisión aunque use el mismo

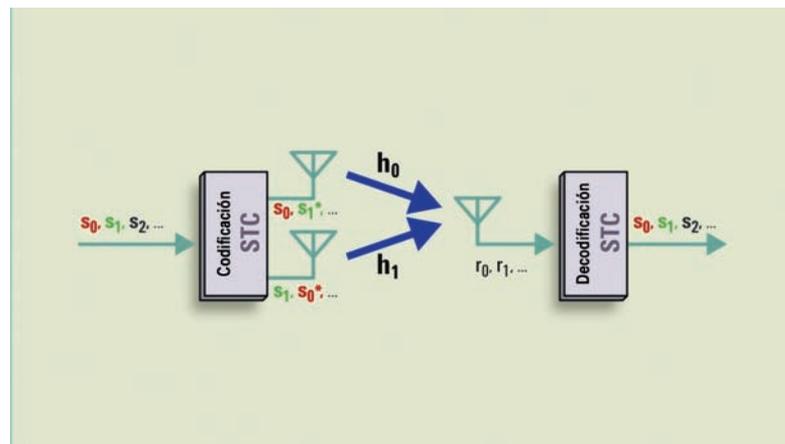


Figura 2. Diagrama simplificado de bloques de codificación espaciotemporal Alamouti, donde h_0 y h_1 representan los coeficientes de los canales, s_0, s_1, \dots representan símbolos de la secuencia y $()^*$ representa una operación transpuesta conjugada. En este sistema, se transmiten dos símbolos distintos a la vez desde las dos antenas durante cualquier periodo de símbolo.

En la Figura 2 se muestra un diagrama de bloques simplificado que utiliza la codificación espaciotemporal Alamouti. En este sistema se transmiten a la vez dos símbolos diferentes desde las dos antenas durante cualquier periodo de símbolo.

Obsérvese que la técnica de diversidad de codificación espaciotemporal (STC) no mejora la velocidad de transmisión de datos del sistema, pero sí la calidad de la señal. La secuencia mostrada en la Figura 2 se codifica en espacio y en tiempo (codificación espaciotemporal). La codificación también se puede realizar en los dominios del espacio y la frecuencia. En este caso, en lugar de transmitir dos periodos de símbolo consecutivos desde dos antenas distintas, se pueden usar dos portadoras de frecuencia (codificación espaciofrecuencia).

ancho de banda y la misma potencia que un sistema SISO convencional. El aumento de capacidad teórico está relacionado directamente con el número de pares de antenas transmisoras-receptoras integradas en el sistema MIMO. En configuraciones en las que el número de antenas de transmisión y de recepción no son iguales, la mejora de la capacidad es proporcional al número menor, M o N .

La multiplexión espacial también se puede aplicar en formato multiusuario, conocido como Acceso múltiple por división de espacio (SDMA). Imaginemos dos usuarios móviles que transmiten sus señales a través del mismo canal inalámbrico. Ambas señales llegan a la estación de base equipada con dos antenas, donde se separan mediante multiplexión espacial. El aumento de capacidad es

proporcional al número de antenas de la estación de base o al número de usuarios móviles, el que sea menor. Aunque el usuario no note este aumento de capacidad, el proveedor de servicios sale beneficiado, ya que puede tener más usuarios en el mismo espacio.

Esta técnica se ha definido en la norma WiMAX Wave 2 y se denomina multiplexión espacial en colaboración del enlace ascendente (UL-CSM).

La multiplexión espacial sólo puede aumentar las velocidades de transmisión cuando el entorno inalámbrico dispone de gran variedad de multitrayectos. Dicho entorno ofrece bajas correlaciones entre los canales, haciendo posible la recuperación de datos en el receptor. Cuando los canales están altamente correlacionados, el rendimiento de la multiplexión espacial se reduce rápidamente.

Modelado de canales

Esta técnica aprovecha el conocimiento del canal en transmisión, conocido también como modelado de canales. En una aplicación de modelado de canales tradicional, la misma señal, o símbolo de datos, se transmite simultáneamente desde cada elemento de antena aplicando un peso complejo (magnitud y/o fase) a cada trayecto de señal con el fin de "conducir" la agrupación de antenas para obtener una relación señal-ruido ideal a través del enlace inalámbrico.

En un modelador de canales optimizado para diversidad espacial o para multiplexión espacial, cada elemento de antena transmite simultáneamente una combinación ponderada de dos símbolos de datos.

Para usar esta técnica de modelado de canales es necesario conocer las características del canal en transmisión. Dicha técnica utiliza esta información para construir las matrices de modelado (predistorción) como prefiltros y posfiltros en el transmisor y en el receptor para obtener ganancia de capacidad. En este caso, puede ser necesario medir el canal en el receptor y mandar información de vuelta al transmisor.

Evaluación del desafío

Como el canal inalámbrico desempeña una función esencial en la implementación de los sistemas MIMO, es fundamental analizar a fondo todos los efectos que pueden tener un efecto negativo. La diversidad espacial y la multiplexión espacial pueden mejorar significativamente el rendimiento, pero sólo si la dimensión espacial está configurada correctamente para aprovechar la diversidad del entorno multitrayecto. En el caso de la diversidad espacial, la ganancia de diversidad que se puede obtener usando codificación espacio-temporal depende del orden de diversidad del canal. Los canales entre cada par de antenas de transmisión-recepción deben desvanecerse independientemente para que el orden de diversidad de los canales sea igual al producto del número de antenas de transmisión y recepción. Y, al contrario, si los canales entre los pares de antenas de transmisión-recepción están altamente correlacionados, entonces la ganancia de diversidad obtenible es muy limitada.

Los canales de baja correlación también son necesarios en aplicaciones MIMO de multiplexión espacial. Los distintos flujos de señales espaciales se pueden separar fácilmente sólo en condiciones de canal favorables. Esto requiere a menudo la colocación correcta de las antenas de transmisión y de recepción para ofrecer bajas correlaciones de canal a canal entre los pares de antenas.

Atenuación de los efectos del canal

Aunque las técnicas como la diversidad espacial y la multiplexión espacial representan un camino viable para mejorar el rendimiento frente a los efectos del canal, no resuelven del todo el problema.

Para ello se pueden usar varios métodos. En una configuración MIMO 2x2 típica, por ejemplo, se pueden usar dos emuladores de canales SIMO separados para modelar los cuatros canales distintos que existen entre los pares de antenas de transmisión y recepción. Pero los emuladores de canales SIMO no ofrecen la correcta correlación entre los canales MIMO, una característica importante a la hora de probar el rendimiento de un sistema, ya que los canales reales están correlacionados en mayor o menor grado. El ingeniero podría optar por realizar la prueba directamente en un entorno inalámbrico "real", pero el canal es muy sensible, incontrolable e irreplicable. Este método tampoco es factible en situaciones de prueba que requieran entornos distintos o pruebas de movilidad. Otra opción consiste en utilizar herramientas de software para crear canales MIMO realistas, una solución que requiere tiempo y que no genera resultados en tiempo real, aunque sí ofrece datos indicativos sobre el funcionamiento correcto de las funciones de radio-frecuencia y de banda base.

La instrumentación especializada que emula canales MIMO realistas representa la mejor solución para afrontar estas desafiantes condiciones de prueba. Un emulador de canales, como el comprobador de receptores

Figura 3. El comprobador de receptores MIMO N5106A de Agilent ofrece hasta 4 generadores de banda base y 8 atenuadores que son útiles para probar y localizar averías en sistemas MIMO de hasta 4x2. El software de creación de señales Signal Studio de Agilent se ejecuta en el instrumento y permite al ingeniero crear señales actualizadas conformes a las normas.



MIMO PXB N5106A, que reproduce condiciones MIMO reales mediante una potente tecnología de procesamiento de señales digitales, permite identificar rápidamente problemas de rendimiento en las primeras fases de diseño, desarrollo y comprobación (véase la Figura 3). El emulador de canales ofrece también la ventaja de que puede generar escenarios de desvanecimiento realistas, incluidas las correlaciones de trayecto y canal, tiene un coste de implementación bajo y ofrece un proceso de calibración más rápido.

En la Figura 4 se muestra un diagrama de configuración simplificado para probar un receptor MIMO 2x2. Aquí, el instrumento de medida se conecta a dos generadores de señales de RF para la conversión ascendente de señales. Los

generadores de banda base internos del instrumento crean formas de onda conformes a las normas, tales como señales WiMAX, LTE y WLAN. Estos generadores de banda base se conectan fácilmente a los atenuadores de canales a través de una interfaz gráfica de usuario basada en software. Cada atenuador se puede configurar por separado con un modelo de atenuación conforme a las normas, como el modelo Pedestrian B especificado por la ITU para redes WiMAX, o con un modelo personalizado usando una serie de condiciones de trayecto y desvanecimiento. Al contrario que en los atenuadores autónomos, la calibración de potencia automática del instrumento evita el aburrido y largo proceso de configuración del sistema necesario para el desvanecimiento.

Conclusión

Para cumplir la promesa de aplicar sistemas MIMO en entornos de comunicación inalámbricos es necesario probar detenidamente los componentes y sistemas MIMO en un entorno real. Un instrumento especializado como el comprobador de receptores MIMO PXB representa para los ingenieros una solución ideal, ya que ofrece un modo rápido, preciso y escalable de reproducir condiciones y canales realistas, además de atenuar señales MIMO en tiempo real. Dichas capacidades no sólo permiten al ingeniero detectar problemas con precisión durante las primeras fases del ciclo de vida útil, sino que también permiten minimizar inexactitudes de diseño, tiempo y costes de configuración de equipos y laboratorios, a la vez que aumentan el rendimiento y la escalabilidad necesarios para satisfacer futuras necesidades de prueba. Por consiguiente, estos equipos de prueba especializados se están convirtiendo rápidamente en una herramienta esencial para cualquier ingeniero de I+D que desarrolle e integre componentes y sistemas MIMO.

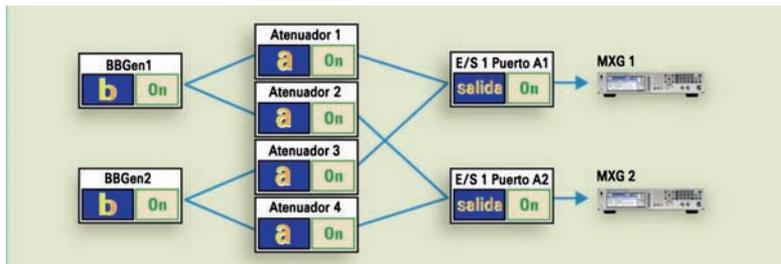


Figura 4. Diagrama de bloques simplificado para probar un receptor MIMO 2x2 usando un comprobador de receptores MIMO PXB N5106A de Agilent.