

Medidas MIMO de canal dual para WiMAX™ Wave 2

Benjamin Zarlingo, Agilent Technologies Inc., Everett, Washington

Ben Zarlingo es licenciado en ingeniería eléctrica (BSEE) por la Universidad Estatal de Colorado y trabaja para HP/Agilent desde hace 28 años. En los doce últimos años ha centrado su actividad principalmente en tecnologías de comunicaciones emergentes y medidas que utilizan analizadores vectoriales de señales y de espectros.



La especificación WiMAX™¹ Wave 2 permite actualmente el uso de múltiples antenas para obtener un mayor rendimiento del sistema en transmisiones de enlace descendente (DL) y ascendente (UL). Por ejemplo, los sistemas que utilizan configuraciones de múltiples entradas y salidas (MIMO) pueden proporcionar velocidades de transmisión de datos más altas y mayor eficiencia espectral que las aplicaciones tradicionales de entradas y salidas sencillas (SISO). La caracterización y resolución de problemas de estos sistemas WiMAX avanzados requieren a menudo un analizador de señales de canal dual con función de estimación de canales, un "descodificador de matriz" y un demodulador OFDM.

Configuraciones de Matriz A y Matriz B

El uso de múltiples antenas en una transmisión DL en un sistema WiMAX Wave 2 puede incluir codificación espaciotemporal (STC), definida como Matriz A, o MIMO, definida como Matriz B. En la Figura 1 se muestran las configuraciones típicas de enlace descendente para 2x1 STC y 2x2 MIMO.

En la operación de Matriz A (STC) el canal se puede modelar en forma

de dos trayectos que conectan las dos antenas transmisoras de la estación base (BS) a una única antena receptora en la estación móvil (MS). Cada trayecto de señal se puede representar mediante un único coeficiente del canal o "h_x". Cada coeficiente representa una combinación (que se supone lineal) de todos los trayectos entre el correspondiente par de antenas de transmisión a recepción y puede incluir la diafonía de canal a canal que se genera en el transmisor, junto con numerosas señales multitrayecto presentes en el canal inalámbrico. Una técnica para mejorar la recepción de la señal consiste en transmitir versiones de la misma señal codificadas de distinta forma desde cada antena en momentos diferentes con la misma frecuencia. Esta técnica de diversidad espacial se aplica en configuraciones de Matriz A.

Una alternativa para que los sistemas de Matriz B (MIMO) consigan velocidades de transmisión de datos más altas y mejoras en la eficiencia espectral es transmitir simultáneamente flujos de datos diferentes desde cada antena a través del mismo canal de frecuencia. Para la configuración de Matriz B que se muestra en la Figura 1, las señales recibidas medidas en un sistema sin ruido son:

$$R_{x0} = h_{00}T_{x0} + h_{10}T_{x1} \quad (1)$$

$$R_{x1} = h_{01}T_{x0} + h_{11}T_{x1} \quad (2)$$

El receptor de Matriz B, al detectar los cuatro coeficientes del canal, puede diferenciar y recuperar las formas de onda transmitidas utilizando la siguiente técnica simplificada.

$$T_{x0} = B(h_{11}R_{x0} - h_{10}R_{x1}) \quad (3)$$

$$T_{x1} = B(-h_{01}R_{x0} + h_{00}R_{x1}) \quad (4)$$

$$\text{En la que } B = \frac{1}{h_{00}h_{11} - h_{10}h_{01}} \quad (5)$$

Estas ecuaciones también pueden representarse en forma de matriz como:

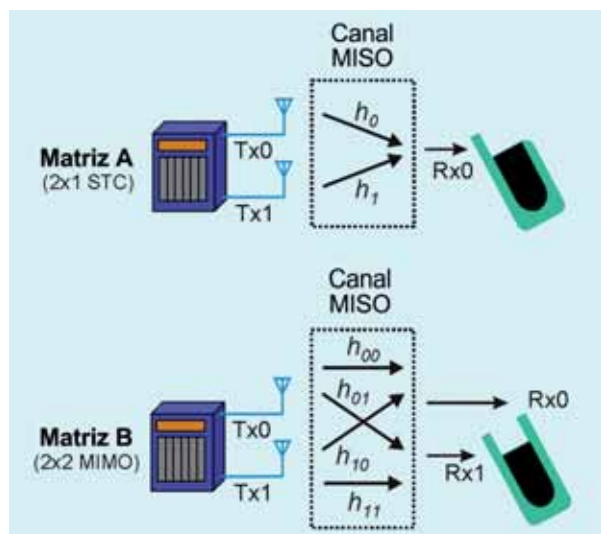
$$[T_x] = [H]^{-1}[R_x] \quad (6)$$

La función de un descodificador de matriz es realizar la inversión de matriz del canal [H] y las operaciones matemáticas asociadas para recuperar los flujos de datos originales transmitidos y pasar esta información al demodulador. Es importante señalar que la operación de descodificación de matriz se realiza aparte y antes que la operación de demodulación.

Un receptor WiMAX práctico puede utilizar técnicas MMSE o descomposición Eigen [1] para la recuperación de datos cuando hay correlación entre los coeficientes del canal. Como se ha señalado, la recuperación de datos requiere conocer los coeficientes del canal, y sus complejos valores los mide el receptor o el analizador de señales de canal dual utilizando la estructura piloto exclusiva que contiene la forma de onda WiMAX OFDM [2]. Cabe señalar que la descodificación precisa de matriz depende en parte de la independencia de los coeficientes del canal, lo que se ve afectado por la cantidad de ruido del canal. Los coeficientes correlacionados del canal y/o el ruido reducen el rendimiento del sistema, ya que la matriz del canal "se condiciona erróneamente" y resulta difícil de invertir con precisión.

En el enlace ascendente puede aplicarse MIMO con transmisiones simultáneas coordinadas de dos MS (terminales portátiles) distintos que operen en el mismo canal de frecuencia. Esta técnica, denominada multiplexión espacial en colaboración del enlace ascendente (UL-CSM), emplea dos o más antenas receptoras en la BS y una única antena en cada MS para operación 2x2 MIMO [2]. En esta configuración hay que tener en cuenta que la operación MIMO sólo se realiza en el canal ascendente. DL-MIMO requiere dos antenas y canales receptores para cada MS.

Figura 1. Aplicaciones de Matriz A (STC) y Matriz B (MIMO) para WiMAX Wave 2



Estimación de canales, descodificación de matriz y demodulación

El análisis de señales y la resolución de problemas de las formas de onda de Matriz A y Matriz B pueden realizarse con una o varias entradas de analizadores vectoriales de señales (VSA). Puede realizarse una serie de medidas básicas, como diafonía de canal a canal y temporización en el transmisor STC o MIMO, utilizando un analizador de entrada única conectado directamente a la salida seleccionada del transmisor. [3] Este sistema de entrada única resulta útil cuando las señales de transmisión están bien aisladas (como ocurre con la conexión directa descrita anteriormente) y no necesitan un descodificador de matriz para la demodulación de la forma de onda. Algunos procedimientos de prueba, como las pruebas de cumplimiento de especificaciones de radio (RCT) definidas en el perfil WiMAX Wave 2, establecen la medida monocal de la calidad de señal del transmisor en presencia de diafonía potencial y cuando no se utiliza el descodificador de matriz. Por desgracia, este tipo de medidas básicas ofrece escasa información sobre el origen de muchos errores de la señal durante la optimización y la resolución de problemas de sistemas. En estos casos, para detectar la contribución de distintas fuentes de error, se requieren a menudo comparaciones de medida con y sin descodificador de matriz. En los sistemas de Matriz A puede utilizarse un VSA monocal para realizar comprobaciones con y sin descodificador. En los sistemas de Matriz B y UL-CSM suele ser necesario un VSA de canal dual para analizar totalmente estas formas de onda cada vez más complejas.

La Figura 2 muestra el flujo de medida a través de un VSA de canal dual típico con función de medida WiMAX MIMO, como el analizador de la Serie 89600 de Agilent con la opción B7Y. En las configuraciones de Matriz B, el análisis de señales MIMO se inicia calculando los coeficientes complejos del canal a través de medidas realizadas en un gran número de subportadoras piloto conocidas que se reciben de dos señales de entrada, indicadas como Rx0 y Rx1 en la figura. Estos cuatro coeficientes del canal, mostrados como función de frecuencia de subportadora, pueden resultar muy útiles como herramienta de análisis a la hora de optimizar y solucionar problemas de sistemas MIMO. Los coeficientes del canal calculados sirven fundamentalmente al descodificador de matriz para recuperar los dos flujos de datos independientes de la señal 2x2 MIMO. El descodificador de matriz está diseñado para invertir los efectos del canal y no realiza demodulación de datos. Como se muestra en la figura, los flujos de datos de Matriz B recuperados se envían al demodulador OFDM para el posterior análisis de la señal.

Como se ha señalado anteriormente, cuando se usa una co-

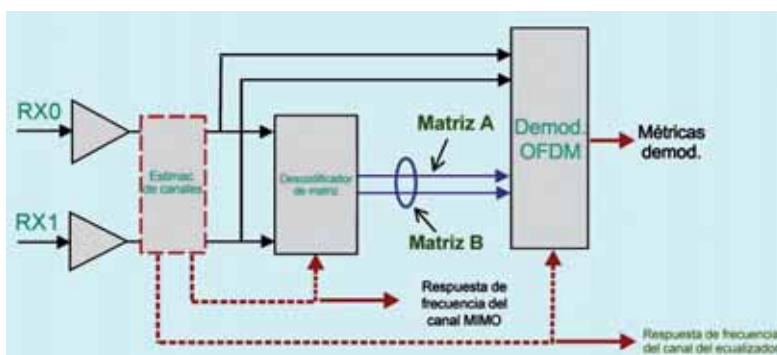
nexión directa con los puertos del transmisor, quizá no sea necesario un descodificador de matriz para demodulación básica. La Figura 2 también muestra dos trayectos de medidas que evitan el descodificador de matriz. En esta configuración se estiman las características del canal empleando la información del preámbulo, los pilotos y/o las subportadoras de datos asociadas. Estas respuestas del canal pueden contener diafonía del transmisor y del canal y son distintas de los coeficientes del canal MIMO que se obtienen de los pilotos MIMO incorporados. Estas respuestas del canal se utilizan para ecualizar (aplanar la respuesta de frecuencia) las formas de onda como parte del proceso de demodulación y pueden resultar muy útiles a la hora de solucionar problemas con las formas de onda WiMAX. Sin embargo, estas dos respuestas medidas del canal no contienen suficiente información del canal para realizar la operación del descodificador de matriz.

El análisis de señal de la Matriz A sigue el mismo trayecto de señal a través del VSA que la configuración de la Matriz B, pero sólo requiere un analizador monocal. La Tabla 1 muestra una breve lista de configuraciones de medida típicas cuando

¹ (“WiMAX”, “Fixed WiMAX”, “Mobile WiMAX”, “WiMAX Forum”, el logotipo de WiMAX Forum, “WiMAX Forum Certified” y el logotipo de WiMAX Forum Certified son marcas comerciales del WiMAX Forum. Todas las demás marcas comerciales son propiedad de sus respectivos propietarios.)

TIPO	Medida en	Descodificador de matriz	Demod. OFDM	Respuesta frec. canal del ecualizador	Respuesta frec. canal MIMO
A (STC)	Tx0 o Tx1	OFF	Diafonía incluida	h0*	h0 y h1
A (STC)	Tx0 o Tx1	ON	Diafonía eliminada	h0 o h1	h0 y h1
A (STC)	Rx	ON	Flujo Matriz A precodificada	h0 o h1	h0 y h1
B (MIMO)	Tx0 y Tx1	OFF	Diafonía incluida	h00 o h11*	h00, h01, h10 y h11
B (MIMO)	Tx0 y Tx1 o Rx0 y Rx1	ON	Flujos Matriz B	h00, h01, h10 o h11	h00, h01, h10 y h11

Tabla 1. Configuraciones de medida del VSA y resultados para las formas de onda WiMAX de Matriz A y Matriz B



se comprueban las formas de onda de Matriz A y Matriz B utilizando una solución de entrada única y dual como el VSA de la Serie 89600 de Agilent. La tabla muestra los efectos del descodificador de matriz en los resultados de demodulación OFDM. La tabla también muestra los coeficientes del canal mostrados al seleccionar las funciones de ecualizador y respuesta de frecuencia del canal MIMO en el VSA.

Figura 2. Flujo y métricas de la señal en un analizador de señales vectoriales para un sistema MIMO en el VSA.

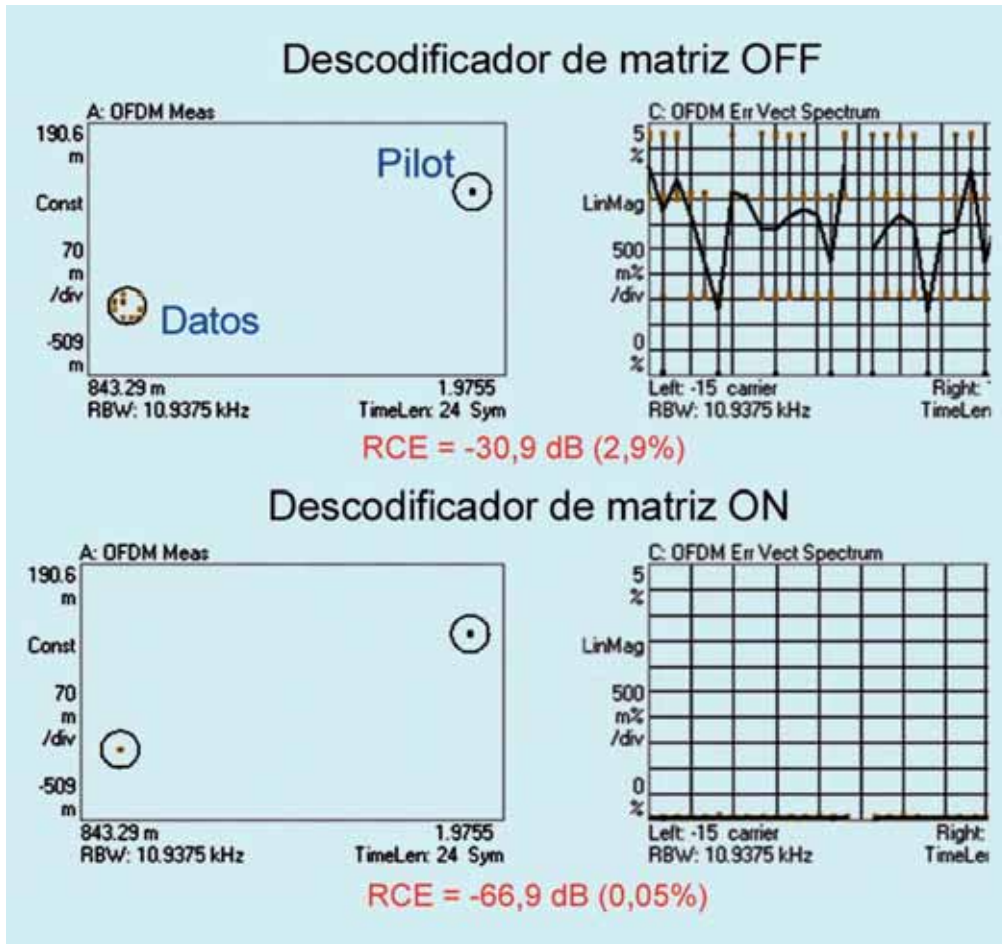


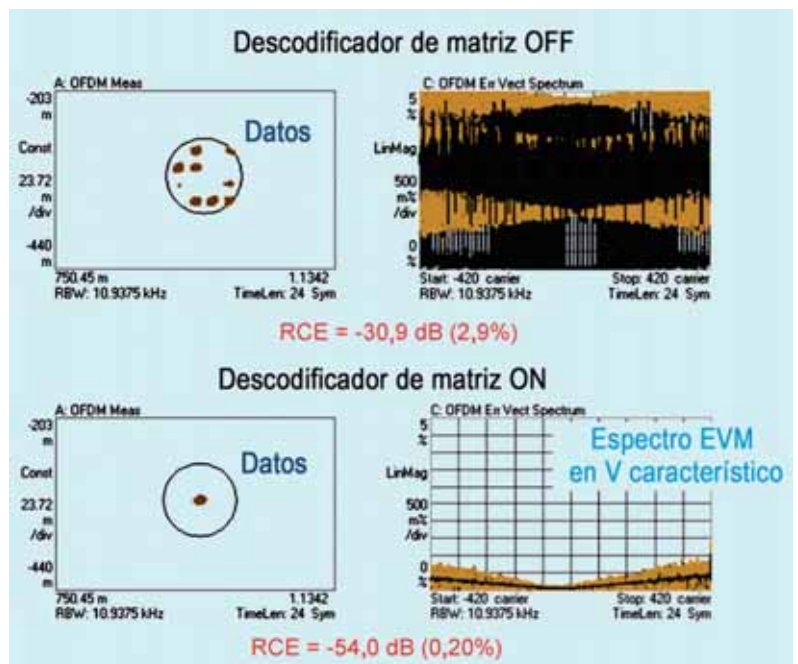
Figura 3. Constelación demodulada (ampliada) y espectro del vector de error para una señal de Matriz B WiMAX con diafonía de 29 dB. La señal simulada tiene un error prácticamente de cero, salvo para la diafonía.

Detección de perturbaciones de la señal

En la Figura 3 se muestra un ejemplo de resultados de medida para un par simulado de formas de onda de Matriz B utilizando un VSA de canal dual. En el ejemplo se muestra la influencia de diafonía significativa entre los canales del transmisor con y sin descodificador de matriz. Los gráficos de la izquierda muestran una parte de la constelación IQ demodulada con un piloto y un punto de símbolo de datos ampliados para mostrar los detalles. Con el descodificador de matriz desactivado (gráfico superior izquierdo) se produce propagación en la constelación de datos a medida que el otro canal de transmisión se acopla a esta medida en un nivel relativo de -29 dB. El alto nivel de diafonía produce una medida de error de constelación relativo (RCE) del 2,9%. El error de esta diafonía por sí solo sería suficiente para que no se cumpliera el requisito de RCT para una forma de onda WiMAX

Figura 4. Constelación demodulada y espectro del vector de error para una señal de Matriz B WiMAX que contiene diafonía y errores de temporización de símbolos. El descodificador de matriz elimina la diafonía para mostrar el error de temporización.

Wave 2. En la parte superior derecha de esta figura también se muestra el espectro del vector de error asociado: el error de OFDM marcado frente a la frecuencia de subportadora. Esta pantalla de medida es una herramienta



ta excelente para solucionar problemas de errores de temporización en el sistema, como se mostrará en el ejemplo siguiente.

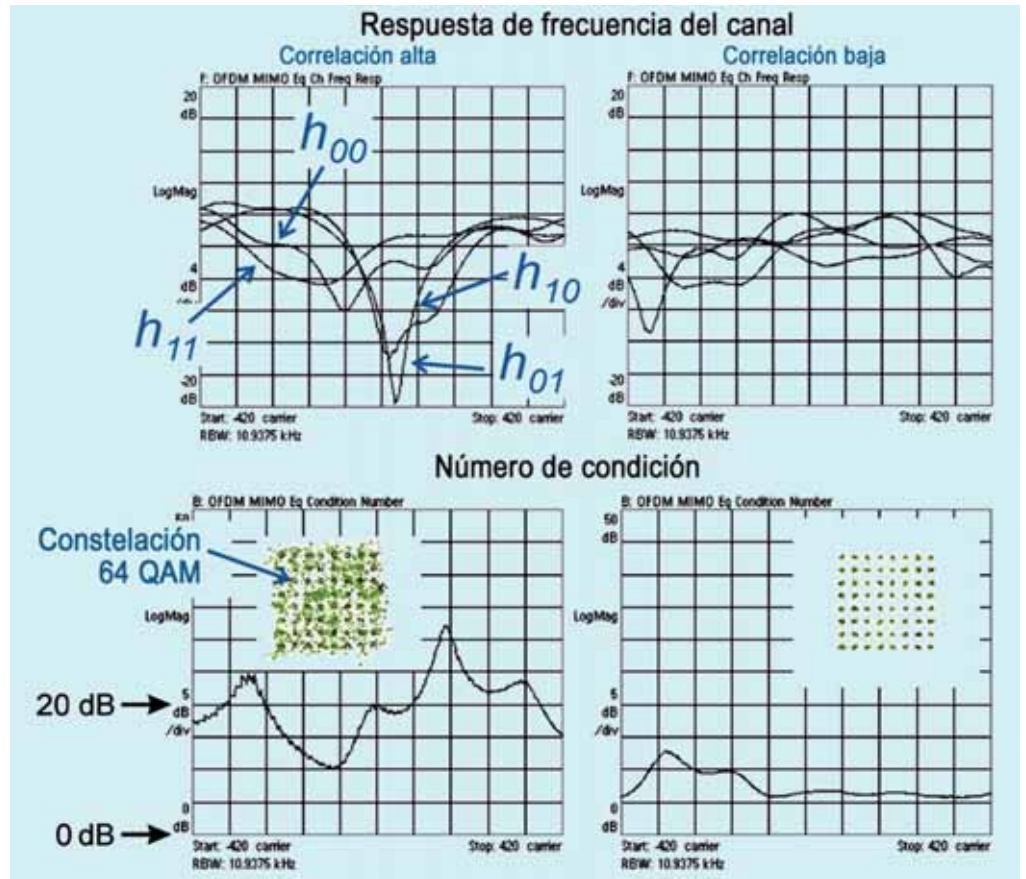
Los gráficos inferiores de la Figura 3 muestran los resultados de medida con el descodificador de matriz activo. El descodificador de matriz elimina los efectos de la diafonía utilizando las cuatro estimaciones del canal (en el caso de 2x2 MIMO). Cuando el descodificador de matriz elimina la diafonía, el RCE mejora por encima del 0,05% y el espectro del vector de error y la constelación de datos reflejan la diferencia. Tenga en cuenta que los puntos de constelación de los pilotos no se ven afectados por la diafonía o el descodificador de matriz. Los pilotos no se superponen en tiempo y frecuencia. De este modo, los puntos de constelación de los pilotos no se propagan y los pilotos pueden servir para medir el nivel de diafonía entre los dos canales de transmisión.

Si bien el descodificador de matriz no se utiliza para pruebas de RCT, constituye una excelente herramienta para resolver errores de medida y para eliminar los efectos de diafonía que podrían oscurecer perturbaciones adicionales de la señal. Por ejemplo, la Figura 4 muestra cómo el descodificador de matriz elimina diafonía para revelar un error de temporización de símbolos presente en el sistema. Como anteriormente, los gráficos superiores muestran la constelación y

el espectro del vector de error de una señal con un nivel de diafonía de 29 dB. Sin el descodificador de matriz, el espectro de error está dominado por la diafonía, lo que dificulta la visualización del error de temporización en la forma de onda. Con el descodificador de matriz activado, la diafonía se elimina de la medida y puede apreciarse fácilmente un error de temporización. En la medida de la parte inferior derecha, el espectro de error muestra ahora el típico patrón en "V" que caracteriza a un error de temporización de símbolos [4].

Medidas de respuesta de frecuencia del canal

Las respuestas del equalizador y del canal MIMO constituyen también útiles herramientas de diagnóstico para caracterizar formas de onda de Matriz A y Matriz B. La magnitud y la forma de estas respuestas pueden ayudar a comprender la calidad de las formas de onda recibidas antes de la demodulación. Por ejemplo, es sabido que los sistemas MIMO que operan en entornos multirrayecto ricos experimentarán generalmente bajas correlaciones entre los coeficientes del canal, facilitando la recuperación de datos en el receptor. Cuando los coeficientes están muy correlacionados, el rendimiento del sistema se degrada rápidamente. La Figura 5 muestra la magnitud de los coeficientes del canal medidos para dos canales MIMO diferentes, uno con una correlación relativamente alta (izquierda) y otro con una correlación baja (derecha). Las dos medidas se realizan con el descodificador de matriz activado. En el caso de la correlación alta, los pares de coeficientes tienen una respuesta de frecuencia compleja similar y es previsible que se reduzca el rendimiento del sistema. Como se muestra en el recuadro del gráfico inferior, la constelación 64 QAM medida muestra un elevado grado de distorsión de la señal. En comparación, la medida de la parte superior derecha indica que los coeficientes del canal medido tienen baja correlación. En este caso, los coeficientes tienen respuestas de frecuencia distintas, lo que produce una mejora en la recuperación de datos tal como se muestra en la constelación medida de la parte inferior derecha de la figura.



Número de condición

Otra herramienta útil para la resolución de problemas es el "Número de condición de MIMO", que se calcula a partir de una descomposición eigen de la matriz del canal [H] y tomando una relación del valor singular máximo en cada subportadora. Es una medida del grado de condicionamiento incorrecto de la matriz en el receptor. La relación suele mostrarse en una escala logarítmica y la relación ideal de valores singulares para una matriz correctamente condicionada es 1 o 0 dB. En términos generales, cuando el número de condición de la señal es mayor que su relación señal-ruido, el descodificador de matriz no podrá separar con efectividad las señales y el rendimiento de demodulación será pobre. Esto resulta evidente en la respuesta del número de condición que se muestra en el gráfico inferior izquierdo de la Figura 5. En este caso, el número de condición es similar o mayor que un valor de 20 dB y la constelación demodulada es muy deficiente. En comparación, el gráfico de la derecha muestra un número de condición que suele estar por debajo de 10 dB y el gráfico de constelación asociado mejora considerablemente.

Conclusión

Los sistemas WiMAX Wave 2 que utilizan configuraciones de Matriz A o Matriz B pueden mejorar enormemente el rendimiento del sistema aprovechando las ricas características multirrayecto del entorno inalámbrico. A la hora de diseñar, solucionar problemas y optimizar estos sistemas, hay varias medidas del canal dual que pueden suministrar información esencial sobre su funcionamiento y rendimiento.

Referencias

- [1] WiMAX System Evaluation Methodology, Versión 2.1, 7 de julio de 2008. www.wimaxforum.org
- [2] Agilent, sesión difundida por webcast, "WiMAX Wave 2 Testing - MIMO & STC", enero de 2008, www.techonline.com
- [3] "Matrix A and B re-measured; Single channel measurements for WiMAX™ Wave 2 reduce the need for multi-channel analysis" WiMAX Daily, junio 2008
- [4] Testing and Troubleshooting Digital RF Communications Transmitter Designs, AN de Agilent 1313, número de documento 5968-3578E <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-3578E.pdf>

Figura 5. Respuesta de frecuencia del canal y números de condición para una señal WiMAX de Matriz B transmitida a través de dos canales MIMO separados; uno con alta correlación de canal a canal (izquierda) y otro con bajas correlaciones entre canales (derecha)