

**MEDIDA DE LA ESTABILIDAD DE FASE
DEL RECEPTOR DE 22 GHz
EN EL RADIOTELESCOPIO DE 40 m**

R. García García, J.A. López Pérez,
I. Malo Gómez, J.A. López Fernández.

INFORME TÉCNICO IT-OAN 2008-15



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. EL RECEPTOR DE 22 GHz DEL CAY	3
2. MEDIDA DE LA ESTABILIDAD DE FASE	5
2.1. PROCEDIMIENTO DE MEDIDA	5
2.2. GENERACIÓN DE REFERENCIAS DE FRECUENCIA	7
2.2. RESULTADOS	8
3. CONCLUSIONES	10
4. REFERENCIAS	11
ANEXO 1: PÉRDIDA DE COHERENCIA.....	12

1. INTRODUCCIÓN

En este informe se presentan los resultados de las medidas de estabilidad de fase del receptor de 22 GHz realizadas en mayo de 2008, con el receptor instalado en su localización definitiva en el radiotelescopio de 40 metros. Estas medidas se realizaron en modo de observación VLBI y los valores obtenidos se utilizaron en la primera observación de VLBI (dentro de la red europea EVN) llevada a cabo con el radiotelescopio de 40 metros [1]. La observación tuvo lugar durante los días 30 y 31 de mayo de ese mismo año.

1.1. EL RECEPTOR DE 22 GHz DEL CAY

El receptor de 22 GHz del CAY es un receptor de doble polarización circular (RCP y LCP), que permite realizar dos tipos de observación, VLBI y Single Dish (SD). Es un receptor superheterodino con doble conversión de frecuencia y ancho de banda a la salida de la frecuencia intermedia (FI) de 500 MHz, en el caso de observaciones de VLBI, y de triple conversión de frecuencia y ancho de banda de 100 MHz, para observaciones de SD [2].

En ambos modos de observación el receptor permite seleccionar entre dos bandas de frecuencia de observación, que denominaremos Upper Band (UB) y Lower Band (LB), y cuyos valores se muestran en las siguientes tablas. Estas bandas se seleccionan eligiendo entre dos valores de frecuencia de operación del primer oscilador local (OL): 14.4 GHz (UB) y 12.8 GHz (LB).

VLBI (FI: 500-1000MHz)	UB	LB	
2ºOL = 8.45GHz	23.35 – 23.85 GHz	21.75 – 22.25 GHz	
2ºOL = 9.05GHz	23.95 – 24.45 GHz	22.35 – 22.85 GHz	
Total:	23.35 – 24.45 GHz	21.75 – 22.85 GHz	BW = 1.1 GHz BW _{FI} = 500 MHz

Tabla 1: Características del receptor de 22 GHz en modo VLBI.

SD (FI: 170-270 MHz)	UB	LB	
2ºOL = 8.45GHz	23.57 – 23.67 GHz	21.97 – 22.07 GHz	
2ºOL = 9.05GHz	24.17 – 24.27 GHz	22.57 – 22.67 GHz	
Total:	23.57 – 24.27 GHz	21.97 – 22.67 GHz	BW = 700 MHz BW _{FI} = 100 MHz

Tabla 2: Características del receptor de 22 GHz en modo SD.

Variando la frecuencia de operación del 2º OL, el receptor permite seleccionar el ancho de banda a observar dentro de una banda más amplia. En VLBI, es posible seleccionar los 500 MHz de banda simultánea en una banda de 1.1 GHz. En SD, es posible seleccionar los 100 MHz de banda simultánea en una banda de 700 MHz. La frecuencia de operación del 2º OL varía entre 8.45 y 9.05 GHz.

El receptor de 22 GHz está compuesto por el criostato y varios módulos independientes interrelacionados: el módulo de RF, el módulo de FI, el módulo de Osciladores y el módulo de Alimentación y Control.

El criostato [3] alberga la bocina y una lente hiperbólico-plana, el polarizador, el acoplador direccional y los dos amplificadores de bajo ruido (LNA), manteniéndolos a una temperatura de 12 K. La salida del LNA (uno por polarización) se conecta al módulo de RF mediante un cable coaxial semirrígido de bajas pérdidas y la polarización de los LNA junto con otras tensiones de alimentación y control están conectadas al módulo de alimentación y control.

El módulo de RF [4] realiza la primera conversión de frecuencia, un filtrado en 1ª FI de 1.1 GHz de ancho de banda, y la segunda conversión de frecuencia, con una ganancia de conversión de 32 dB y frecuencia intermedia de 0 a 1.6 GHz.

El módulo de FI [2] se encarga de filtrar la 2ª conversión, entre 500 MHz y 1 GHz. En modo VLBI, ésta será la banda de salida de FI, con una ganancia de 17 dB. En modo SD, además del filtrado y amplificación, se realiza un posterior filtrado entre 720 y 820 MHz y una tercera conversión con la frecuencia del 3º OL = 550 MHz. Por tanto, en modo SD, el módulo de FI presenta una ganancia de 30.5 dB y una banda de salida de FI de 170-270 MHz. En ambos modos de operación la ganancia del módulo de FI puede disminuirse entre 0 y 40 dB en pasos de 1 dB mediante un atenuador manual variable situado a la entrada de dicho módulo.



Figura 1: Receptor de 22 GHz dispuesto en su posición definitiva en la rama de baja frecuencia de la sala de receptores del radiotelescopio de 40 metros.

2. MEDIDA DE LA ESTABILIDAD DE FASE

Una modulación de fase/frecuencia en los osciladores locales del receptor produce una modulación análoga en la frecuencia intermedia, dando lugar a una pérdida de coherencia entre las señales de dos estaciones de VLBI al realizar su correlación. Por ello, las medidas de estabilidad de fase son muy importantes para receptores de VLBI, como el citado receptor a 22 GHz.

A lo largo de la segunda semana de mayo de 2008, se realizaron una serie de medidas para determinar las fluctuaciones de fase del sistema completo de observación VLBI a 22 GHz. Este sistema de observación comprende el receptor a 22 GHz (criostato + módulo de FI), el terminal VLBA que funciona como backend y los diferentes módulos por los que se distribuye la referencia de frecuencia que procede del máser de hidrógeno.

2.1. PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

El procedimiento consistió en medir las fluctuaciones de fase de ambas polarizaciones tomando las salidas de dos BBCs (uno por cada polarización) y midiendo el desfase de dichas salidas con respecto a la señal de 5 MHz proveniente del máser de hidrógeno. El desfase rms proporciona una medida del ruido de fase que introduce el sistema de recepción desde la bocina hasta el backend.

El factor de coherencia se relaciona con el desfase rms $\Delta\phi$ en radianes mediante la siguiente expresión [5]:

$$C_F = \left| J_0(\Delta\phi \cdot \sqrt{2}) \right| \quad (1)$$

Siendo J_0 la función de Bessel de primera especie y orden 0. En el anexo 1 se justifica la elección de esta expresión en lugar de otras disponibles en la bibliografía especializada.

La pérdida de coherencia en tanto por ciento sería:

$$L_C(\%) = (1 - C_F) \times 100 \quad (2)$$

Las figuras 2 y 3 muestran el banco de medidas utilizado. Se inyecta una señal sinusoidal de 21.160 GHz a la entrada de phasecal / diodo de ruido del criostato utilizando el generador de señales Agilent E8257D (250 kHz - 67 GHz). De esta forma, en cada una de las dos salidas del módulo de FI se obtiene una señal sinusoidal de 750 MHz, que se lleva hasta la sala de backends.

Ya en la sala de backends, las señales de FI se inyectan en los puertos de entrada A y B del terminal VLBA (en la observación se utilizaron los puertos A y C). Al sintonizar los BBCs ("Base Band Converters") a 745 MHz se tienen unas señales sinusoidales de 5 MHz en sus salidas. Estas salidas pueden chequearse a través de las salidas de monitorización (USB, en este caso) de los BBCs, que son las señales que se comparan con la señal de 5 MHz del máser.

Por tanto, al osciloscopio digital LeCroy WavePro 960 se llevan la señal de 5 MHz del máser (puerto 1), la salida del BBC número 1 (al puerto 2) y la del BBC número 2 (al puerto 3).

Pese a que en los resultados se refieren a los BBCs 1 y 2, se comprobaron el resto de conversores del terminal VLBA.

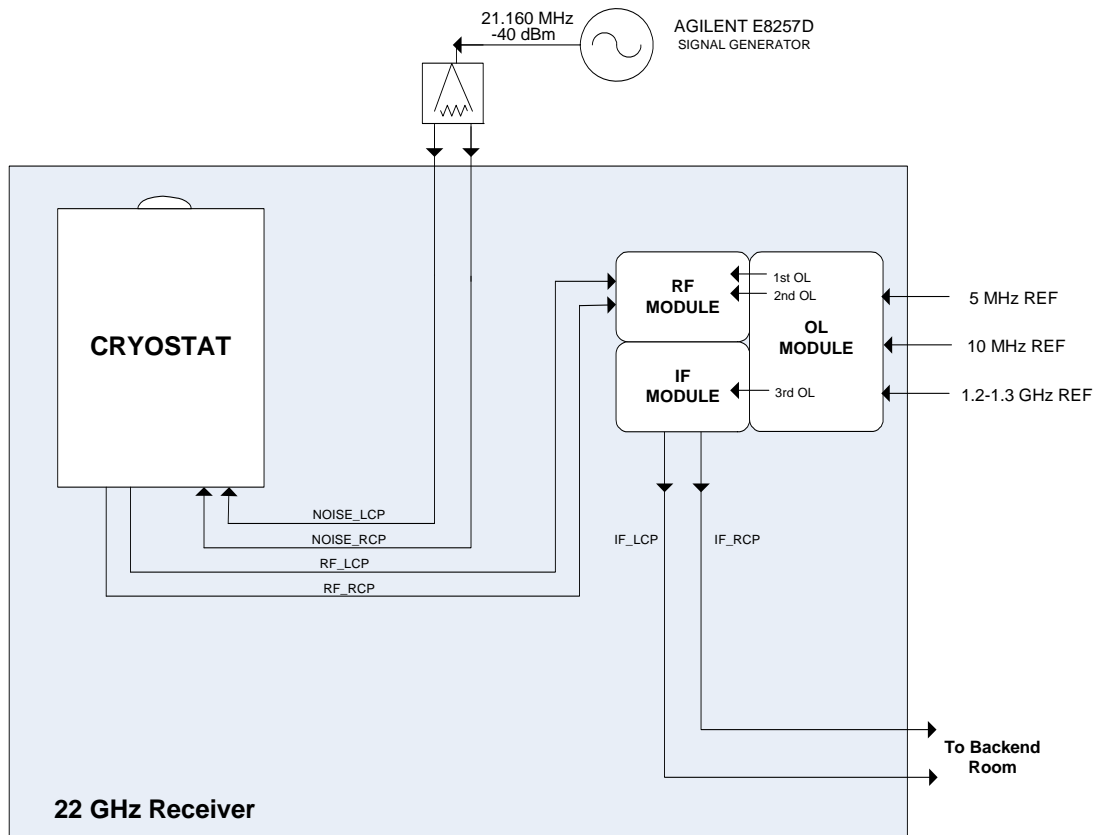


Figura 2: Conexiones en el receptor de 22 GHz (sala de receptores).

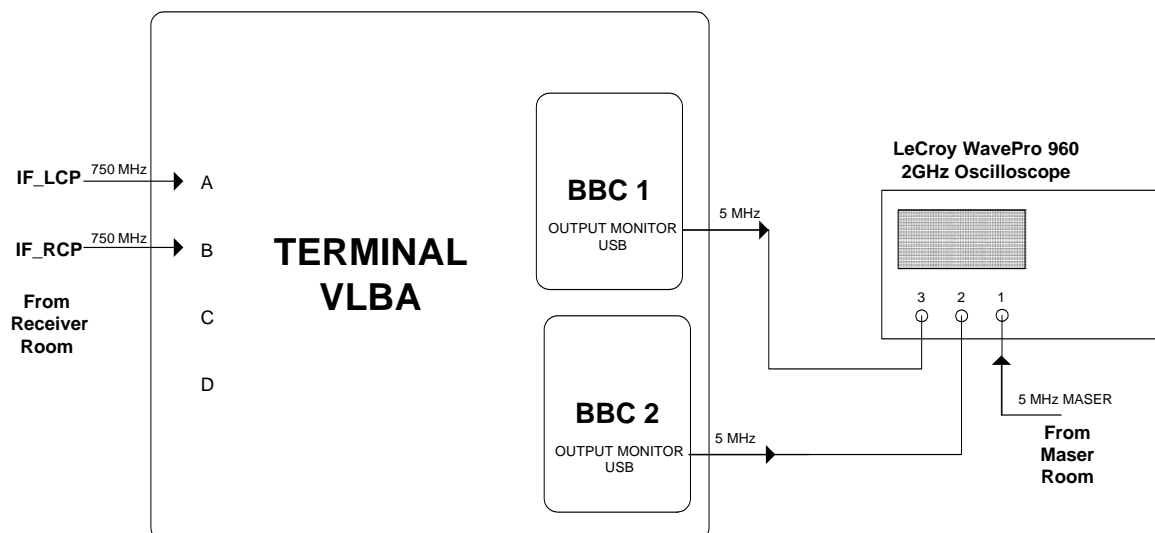


Figura 3: Medida de la estabilidad de fase comparando las salidas de dos BBCs con la señal de 5 MHz del máser (sala de backends).

2.2. GENERACIÓN DE REFERENCIAS DE FRECUENCIA

La Figura 4 muestra el esquema de generación de referencias para el receptor de 22 GHz. Para observaciones VLBI, el módulo de osciladores del 22 GHz requiere dos referencias de frecuencia: una fija de 10 MHz y otra variable entre 1.2 y 1.3 GHz que permite la sintonización del receptor. Para asegurar un ruido de fase lo más pequeño posible, ambas referencias tienen como origen una señal de 5 MHz generada por el máser de hidrógeno KVARZCH1-75. Esa señal se envía desde el máser hacia la sala de backends utilizando un cable coaxial RG-58.

En la sala de backends, la señal de 5 MHz del máser pasa por el amplificador de distribución Quartzlock Model A5, que ajusta su nivel de potencia, y por el amplificador de distribución HP5087A donde se genera una señal de 10 MHz (además de otras de 1, 5 y 10 MHz). Ambas referencias llegan a la cabina de receptores a través de cables coaxiales LMR240, de bajas pérdidas y buena estabilidad térmica y de fase.

Ya en la sala de receptores, la referencia variable de 1.2-1.3 GHz se genera mediante el sintetizador Racal Dana 3101 enganchado a la señal de 5 MHz proveniente del Quartzlock. Como referencia de 10 MHz, iba a utilizarse directamente la señal de 10 MHz de salida del Quartzlock; sin embargo, en las primeras medidas con el osciloscopio LeCroy se observaron unas desviaciones de fase del orden de 100° rms lo que suponía una pérdida de coherencia del 99.95% inadmisibles para una observación VLBI.

Tras una serie de medidas se detectó que este elevado ruido de fase provenía de la rama del módulo de OL cuya referencia es la señal de 10 MHz. Esa rama contiene un oscilador de 1.6 GHz enganchado a la señal de 10 MHz, cuyo espectro (medido con el analizador escalar HP8565) se caracterizaba con alto nivel de armónicos a 50 Hz y múltiplos enteros de éste; en concreto -40 dBc @ 100 Hz. Esto implica que la componente principal de las fluctuaciones de fase tiene como origen una modulación de la red eléctrica. Esta modulación no es visible a frecuencias del orden de MHz pero sí se observa al multiplicar las referencias a frecuencias más elevadas del orden de GHz (como se realiza en el módulo de OL).

Dicha modulación de fase se puede minimizar si la referencia se filtra utilizando un oscilador con bucle de enganche de fase (PLL) caracterizado por un ancho de banda pequeño (menor que 50 Hz). El oscilador de 1.6 GHz instalado en el módulo de OL del receptor de 22 GHz no realiza un buen filtrado al tratarse de un sintetizador y por tanto no caracterizarse por un bucle de ancho de banda pequeño.

Como solución provisional, al no disponer de osciladores alternativos, se optó por utilizar el generador de señal Rohde & Schwarz SMR 40 enganchado a la referencia externa de 10 MHz proveniente del Quartzlock, y tomando la salida de referencia situada en su parte trasera para ser inyectada en la entrada correspondiente del módulo de OL. Curiosamente este generador de señal que se caracteriza por una referencia interna de discretas prestaciones en ruido de fase, dispone de un circuito de limpieza de referencia externa de bajo ancho de banda, que permite obtener un ruido de fase adecuado para observaciones interferométricas, como se certifica en el apartado siguiente.

Esta solución, lógicamente debe ser provisional y se están buscando alternativas más económicas para resolver el problema y disponer de un esquema definitivo de generación de referencias (ver apartado 3).

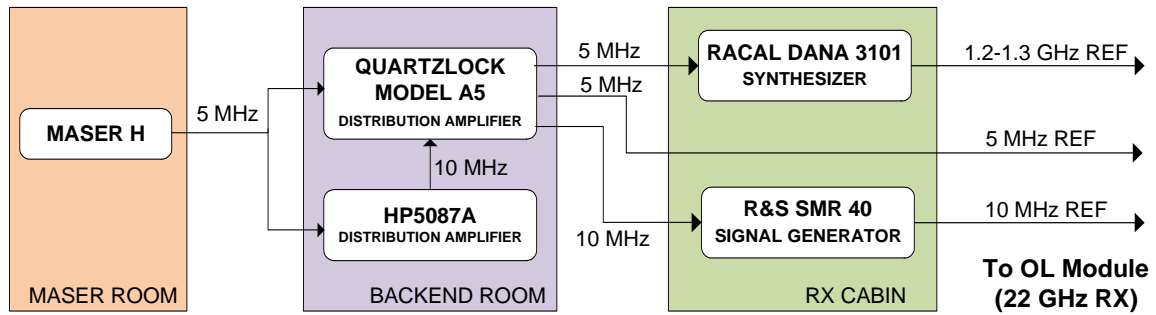


Figura 4: Generación de referencias para el módulo OL del receptor de 22 GHz

2.2. RESULTADOS

La Figura 5 muestra los resultados de las medidas realizadas con el osciloscopio digital LeCroy. En la captura de pantalla, se representa en la primera traza (amarilla) la señal del máser y en la segunda (rosa) y tercera (azul) las salidas de los BBCs 1 y 2 respectivamente.

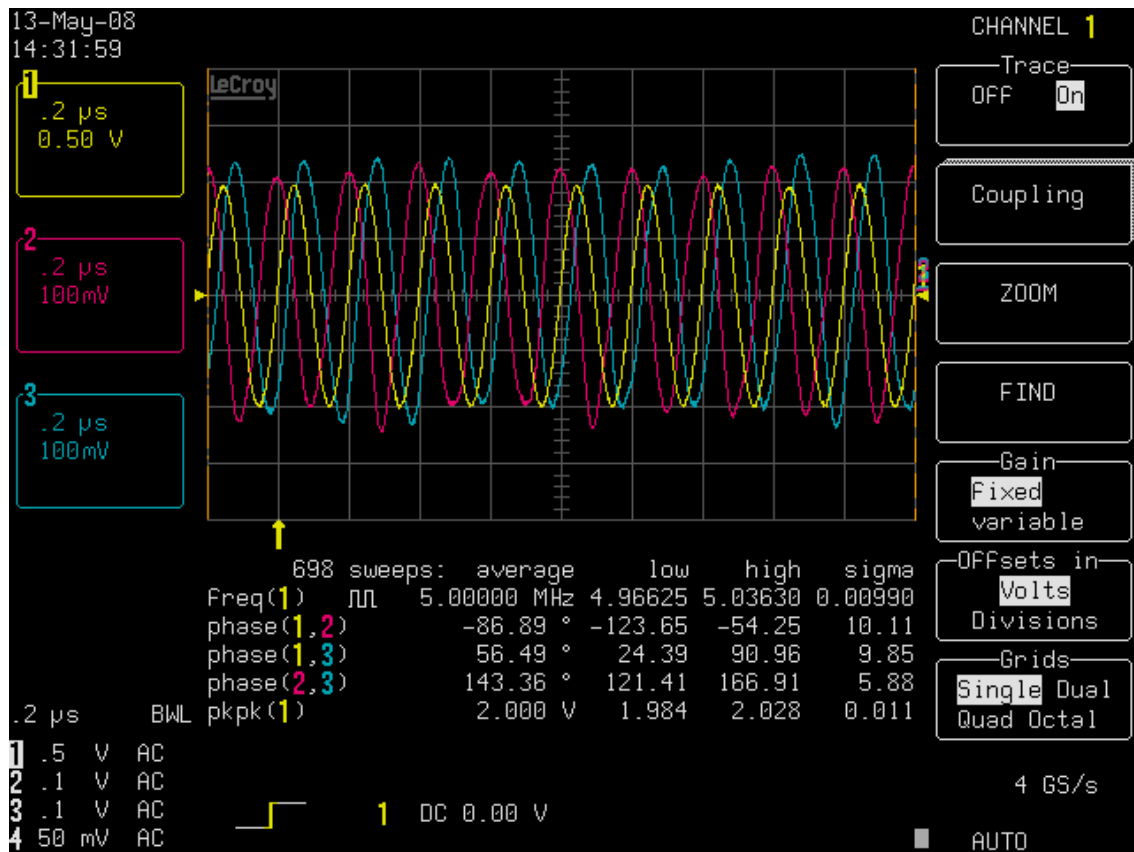


Figura 5: Medida de estabilidad de fase con el osciloscopio digital LeCroy WavePro 960.

El osciloscopio mide periódicamente la diferencia de fases entre cada par de señales y calcula el valor cuadrático medio de las fluctuaciones con respecto al número de barridos realizado. De la figura se leen los siguientes desfases RMS:

- $\Delta\phi$ (máser-BBC1) = 10.11° rms
- $\Delta\phi$ (máser-BBC2) = 9.85° rms
- $\Delta\phi$ (BBC1-BBC2) = 5.88° rms



Por tanto, se tiene un error de fase en ambas polarizaciones (ambos BBCs) de aproximadamente 10° rms. Utilizando la ecuación 1, se tiene un factor de coherencia de:

$$C_F = 0.9848, \quad (3)$$

Lo que implica una pérdida de coherencia de $L_C = 1.51\%$, que es adecuada para realizar observaciones VLBI de calidad.

3. CONCLUSIONES

- Se ha medido la estabilidad de fase del receptor de 22 GHz ya instalado en su localización definitiva.
- La componente principal de las fluctuaciones de fase proviene de una modulación de red eléctrica que provoca la aparición de armónicos a 50 Hz y múltiplos enteros de esta frecuencia.
- Debido al alto ruido de fase medido en un primer momento, se propuso una solución provisional que consistió en el filtrado de la referencia de 10 MHz a través del circuito de enganche del generador de señales R&S SMR 40. Con esta solución se alcanzó un desfase de 10^0 rms (factor de coherencia del 98.48%).
- Se está estudiando una solución definitiva y más económica que permita alcanzar un ruido de fase similar al disponible actualmente. Se ha propuesto adquirir unos osciladores a cristal con circuito de enganche de fase (PLLs) de la firma Wenzel Associates Inc. Se utilizaría un PLL para filtrar cada una de las referencias. Estos PLLs se caracterizan por un ancho de banda del bucle cercano a 1 Hz, lo suficientemente pequeño para minimizar la modulación de red eléctrica, que como se dijo anteriormente, es el principal origen del ruido de fase observado.

4. REFERENCIAS

- [1] *IT-OAN-2008-11. Primeras observaciones de VLBI con el radiotelescopio de 40 m.*
- [2] *IT-OAN-2006-3. Medida de la FI completa del receptor de 22 GHz. I. Malo, J.A. López Fernández, C. Almendros.*
- [3] *IT-OAN-2005-12. Criostato del receptor de 22 GHz del CAY. I. Malo, J.A. López Fernández, F. Tercero, J.A. Abad, C. Almendros, J. Fernández, J. M. Yagüe.*
- [4] *Medida del módulo de RF del receptor de 22 GHz. F. Tercero, I. Malo, J.A. López Fernández, C. Almendros, J.A: Abad. Informe Interno.*
- [5] *IT-OAN-1999-2. Medidas de la estabilidad de fase del oscilador local a diodo Gunn del receptor banda Q del radiotelescopio de 14 m. J.A. López Fernández, A. Barcia, J. A. Abad, A. Miguel.*
- [6] *Short-term phase stability requirements for interferometer coherence. S. Weinreb. Electronics Division Internal Report No. 233 (National Radio Astronomy Observatory). June, 1983*

ANEXO 1: PÉRDIDA DE COHERENCIA

En el presente informe técnico se ha optado por utilizar para el cálculo de la pérdida de coherencia, una expresión propuesta en el informe técnico IT-OAN-1999-2 [5] sobre medidas de estabilidad de fase en el receptor de banda Q del radiotelescopio de 14 metros:

$$C_F = |J_0(\Delta\phi \cdot \sqrt{2})| \quad (4)$$

En dicho informe se expone en un anexo la demostración matemática correspondiente y se resalta que la fórmula es válida si se asume que las fluctuaciones de fase son producidas por una modulación de la portadora por una señal sinusoidal.

Al igual que en este documento, en el informe IT-OAN-1999-2 se sostuvo que la principal fuente de las variaciones de fase tenía como origen una modulación de red eléctrica. En los espectros medidos se observaron bandas laterales a 50 Hz y a múltiplos enteros de esta frecuencia. En todos los casos, la componente de 100 Hz era sensiblemente mayor que el resto. Por ejemplo, la Figura 6 muestra el espectro de la señal de salida del sintetizador Racal-Dana tomando como referencia la señal de 5 MHz del máser.

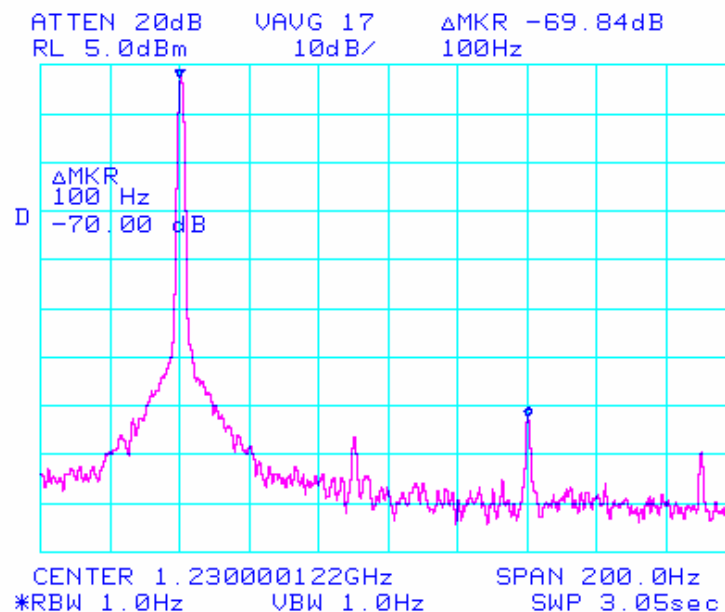


Figura 6: Portadora contaminada con ruido de fase proveniente de una modulación de red eléctrica.

Como alternativa a la ecuación 4, Weinreb del NRAO (National Radio Astronomy Observatory) propuso la siguiente expresión para el cálculo del factor de coherencia: [6]

$$C_F = \exp\left(\frac{-\Delta\phi^2}{2}\right) \quad (5)$$

Siendo $\Delta\phi$ la desviación de fase rms.

Weinreb asume que las fluctuaciones de fase siguen una distribución gaussiana de probabilidades, algo que no se refleja en los espectros medidos en nuestro caso. Por ello, concluimos que la hipótesis de una modulación de fase sinusoidal es más acertada que una variación de fase aleatoria con distribución gaussiana.

En cualquier caso, ambas expresiones proporcionan resultados prácticamente idénticos para desviaciones de fase menores a 40° rms, como se muestra en la Figura 7.

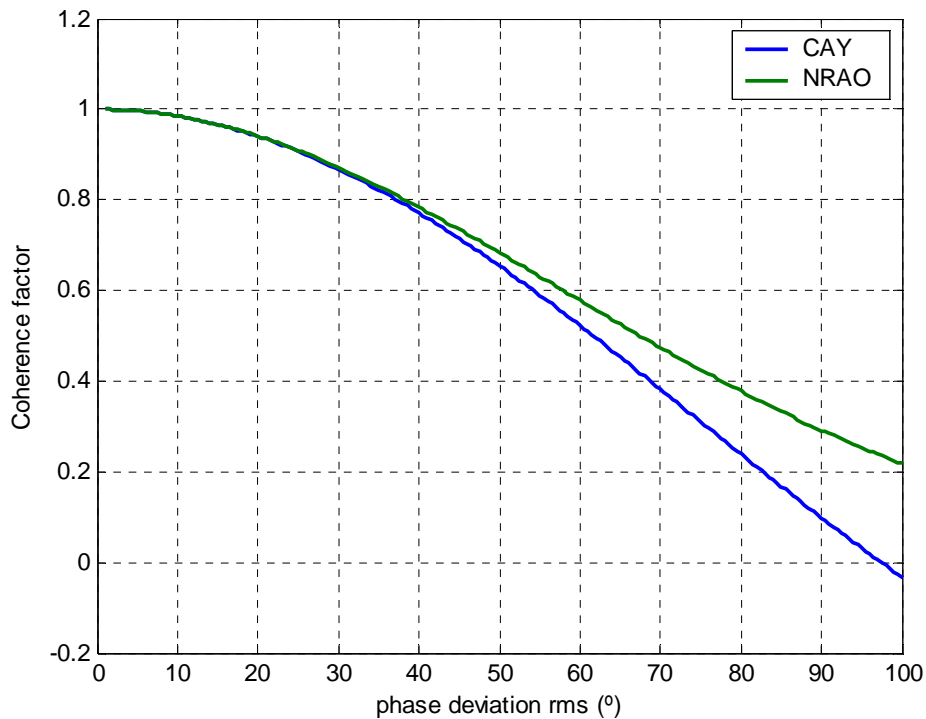


Figura 7: Comparativa de expresiones para el cálculo del factor de coherencia propuestas en informes técnicos del CAY y del NRAO.