

# DESARROLLO DE OSCILADORES DE ZAFIRO DE BANDA C DE ULTRA BAJA RUIDO DE FASE

Nicolás Shtin y José Mauricio López Romero  
División de Tiempo y Frecuencia, CENAM  
Km. 4.5 Carr. A Los Cues, El Marques, CP 76246, Querétaro, México  
Tel: (442) 2110500 (ext. 3216), correo electrónico: nick\_shtin@hotmail.com

**Resumen:** En el presente trabajo se reporta el diseño, caracterización y análisis del ruido de osciladores de microondas de muy bajo ruido de fase basados en resonadores de cristal de zafiro. El desarrollo de dichos osciladores es realizado en el CENAM con el objetivo de contar con generadores de microondas de muy alta estabilidad de frecuencia a corto plazo para ser utilizados como osciladores locales en patrones primarios de frecuencia y en algunos otros proyectos como el patrón de tensión eléctrica basado en el efecto de Josephson, en el patrón de frecuencia de banda óptica (peine de frecuencias) y para la realización de mediciones del "jitter" en los sistemas de telecomunicaciones. Para lograr este objetivo se han diseñado, construido y caracterizado osciladores de zafiro para la frecuencia de 4.6 GHz basados en la técnica de estabilización combinada de frecuencia.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los osciladores de microondas son uno de los elementos claves para la realización experimental de la unidad de tiempo del Sistema Internacional de Unidades (SI). La unidad de tiempo se realiza radiando microondas con la frecuencia de 9.192 GHz a los átomos de Cesio-133 con el objetivo de inducir la transición hiperfina del estado base. Para mantener la incertidumbre en la realización de la unidad de tiempo del SI suficientemente baja se requiere que la señal de microondas sea de la mayor pureza espectral. Sintetizadores de frecuencia en base de osciladores de cuarzo son típicamente utilizados para la generación de dicha señal de microondas. Sin embargo, los osciladores más estables se construyen en base de resonadores dieléctricos de monocristales de zafiro, los cuales poseen un factor de calidad extremadamente alto y que permiten disminuir el ruido de fase e inestabilidad de frecuencia de corto plazo hasta niveles muy bajos.

Cabe mencionar que los osciladores de microondas con el ruido más bajo se construyen utilizando la técnica de estabilización de frecuencia combinada [1, 2]. Esta técnica implica que el mismo resonador de zafiro se usa simultáneamente como un circuito resonante que determina la frecuencia de oscilación del lazo principal de oscilador y como un elemento dispersivo de discriminador de frecuencia (DF) el cual junto con alguna electrónica adicional forma un sistema de estabilización de frecuencia adicional.

El CENAM ha introducido una técnica novedosa que permite desarrollo de osciladores de zafiro con

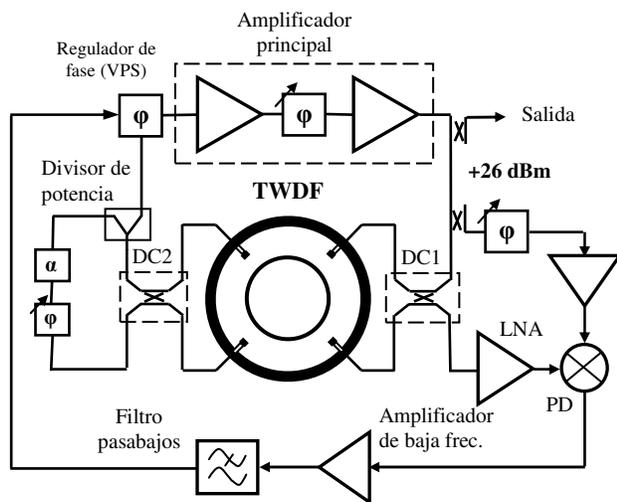
características metroológicas que compiten muy bien con los diseños típicos de los osciladores de este tipo pero que tienen la ventaja de ser compactos, de bajo consumo de energía, que operan a temperatura ambiental, además de ser económicos en su fabricación y de mantenimiento prácticamente nulo.

Los osciladores de zafiro desarrollados serán utilizados inicialmente en la realización experimental del CENAM de la unidad de tiempo del SI por medio de los relojes atómicos de bombeo óptico y de fuente atómica. Así mismo se planea su uso en los experimentos del efecto Josephson programable para el patrón nacional de tensión eléctrica. Finalmente, los osciladores de zafiro se utilizarán para estabilizar el peine de frecuencias que actualmente está en desarrollo. Así mismo los osciladores de zafiro del CENAM también pueden encontrar aplicación en diversos sistemas de telecomunicaciones y los radares.

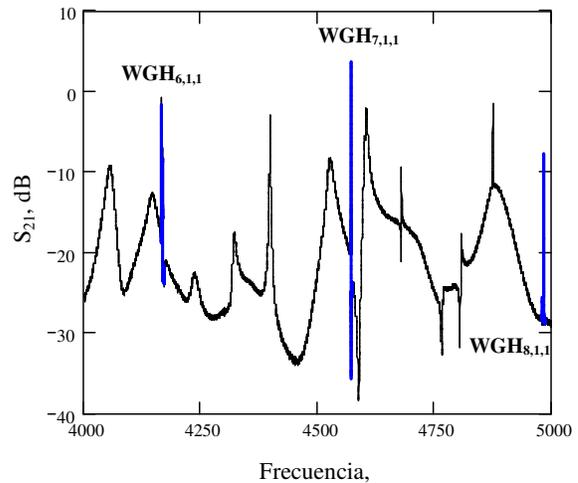
## 2. DISEÑO DE OSCILADORES

Los osciladores reportados en este trabajo fueron implementados en base de filtros direccionales de onda viajera (TWDF – Travelling Wave Directional Filter) [3]. El uso de dichos dispositivos nos ha permitido realizar un discriminador de fase de alta eficiencia sin utilizar circuladores de microondas, los cuales son normalmente requeridos en este tipo de osciladores para la extracción de la señal de onda reflejada del resonador de zafiro. De esta manera hemos logrado eliminar una de las fuentes del ruido





**Fig. 5** Esquema del oscilador de zafiro con estabilización de frecuencia combinada.

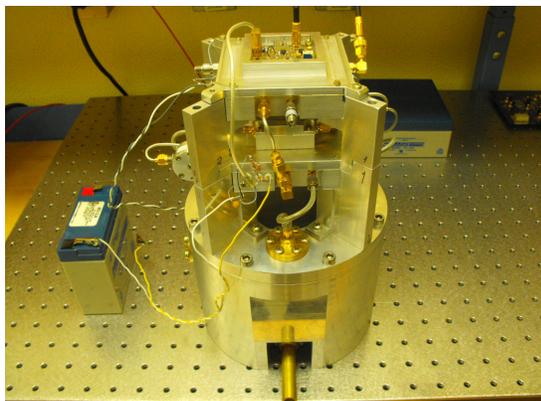


**Fig. 7** Respuesta en frecuencia del lazo abierto del oscilador de zafiro.

se muestran en la Fig. 4.

El segundo oscilador de zafiro fue construido según el esquema presentado en la Fig. 5. En dicho oscilador se implementó un interferómetro novedoso realizado en base del TWDF con un arreglo adicional que permite mejorar el cociente de supresión de la portadora. Otra de las mejoras realizadas en el segundo oscilador es el aumento de la potencia de señal entregada al resonador de zafiro para lo cual se agregó un amplificador de potencia de bajo ruido fase con la potencia de salida de 400 mW [5]. De esta manera el arreglo experimental del segundo oscilador que incluye las mejoras mencionadas se muestra en la Fig. 6.

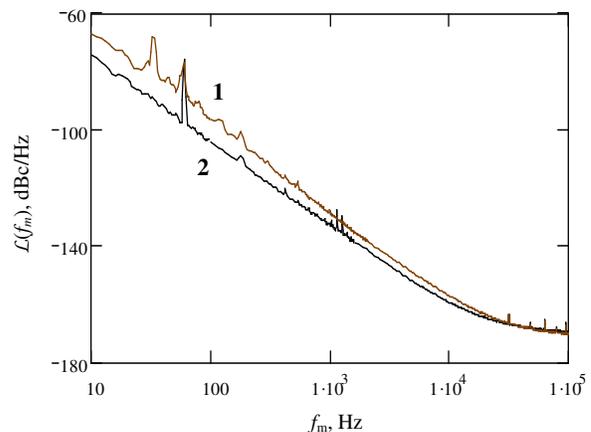
### 3. FUNCIONAMIENTO DE OSCILADORES



**Fig. 6** Realización experimental del oscilador de zafiro mejorado de 400 mW.

### 3.1. Lazo principal

La electrónica de microondas del lazo principal fue diseñada para la frecuencia de operación de 4.57 GHz. En la Fig. 7 se da a conocer la respuesta del lazo abierto en rango de frecuencias de 4 a 5 GHz. Es de notar que dicha respuesta contiene múltiples resonancias que se deben tanto a los modos resonantes del resonador de zafiro como a los de la cavidad. No obstante, las condiciones de oscilación se cumplen únicamente para la resonancia correspondiente al modo de operación WGH<sub>7,1,1</sub>. Es importante mencionar que la electrónica del lazo fue diseñada para operar en un rango amplio de frecuencias, sin embargo, gracias al novedoso esquema de excitación del resonador, la máxima



**Fig. 9** Espectro del ruido de fase del oscilador de 100 mW (curva 1) y del oscilador mejorado de 400 mW (curva 2).

ganancia del lazo se obtiene en la frecuencia del modo operacional.

Las mediciones del ruido de fase de los lazos principales de los osciladores construidos fueron realizadas utilizando los discriminadores de frecuencia según el método presentado en [3]. En la Fig. 8 se muestran los espectros del ruido de fase obtenidos para ambos osciladores operados en régimen de corrimiento libre. Es de notar que el ruido del segundo oscilador fue desminuido hasta -133 dBc/Hz a una frecuencia de corrimiento de 1 kHz lo cual principalmente se debe al aumento del factor de calidad del resonador de zafiro ( $Q_0 \propto 350,000$ ) logrado gracias a las mejoras del sistema de excitación.

### 3.2. Sistema de estabilización de frecuencia

El sistema de estabilización de frecuencia incluye los siguientes bloques: el amplificador de bajo ruido (LNA – Low Noise Amplifier), el detector de fase (PD – Phase Detector), el regulador de fase ajustable y el amplificador auxiliar. El LNA diseñado contiene tres etapas de amplificación con la ganancia de 10-12 dB. Tanto en las primeras dos etapas del LNA como en el amplificador auxiliar se utilizaron los transistores de SiGe NESG2021M05 (CEL), mientras tanto, la ultima etapa del LNA se implementó usando el amplificador integrado de la misma tecnología SiGe del tipo HMC476 de marca Hittite. De esta manera se logró el desarrollo de un amplificador de bajo ruido de fase con una ganancia mayor a 30 dB. Las respuestas en frecuencia del amplificador se muestran en la Fig. 10. El detector de fase fue implementado en base a un circuito

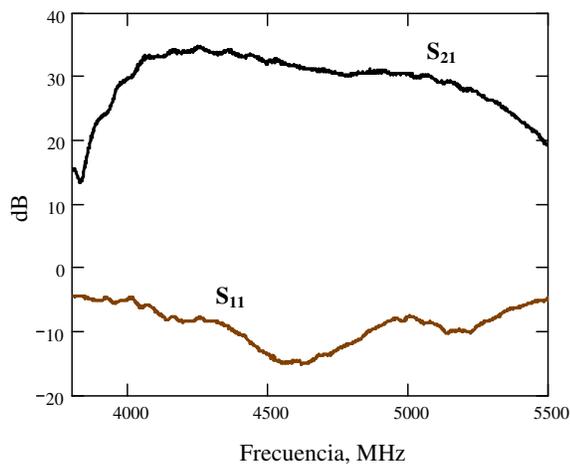


Fig. 10 Respuestas en frecuencia del amplificador de bajo ruido.

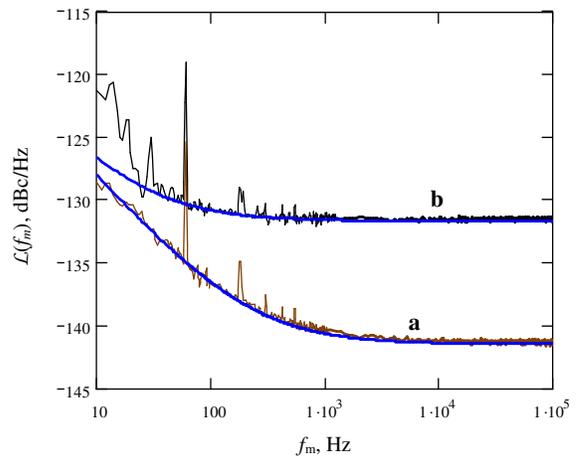


Fig. 11 Espectro del ruido de fase del detector de fase para  $G_{LNA} = 32$  dB (curva a) y para  $G_{LNA} = 42$  dB (curva b).

integrado MA4EX580-1225T de marca MACOM. El espectro del ruido de fase del PD y el LNA se muestra en la Fig. 11. Es de notar que el nivel del ruido  $1/f$  es independiente de la potencia de la señal de entrada. La densidad del dicho ruido puede ser aproximada como  $a_{.1}/f_m$ , donde  $a_{.1} = 1.5 \times 10^{-12}$  ( $\text{rad}^2/\text{Hz}$ ).

### 4. ANÁLISIS DEL RUIDO DE FASE

Para el análisis del ruido de fase del oscilador con estabilización de frecuencia combinada se empleó el esquema que se presenta en la Fig. 12. Como se puede apreciar en dicho esquema se muestran dos fuentes del ruido principales, los cuales son el amplificador del lazo principal y el detector de fase. Según el presente esquema el ruido de frecuencia en la salida del oscilador esta dado por:

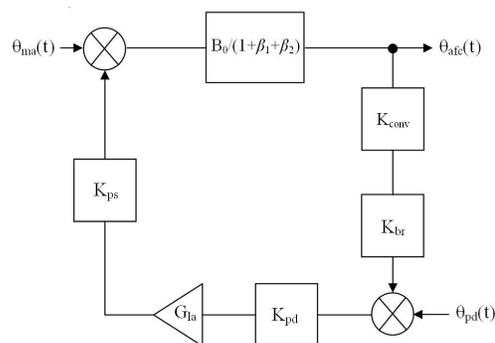


Fig. 12 Esquema equivalente del oscilador empleado para el análisis del ruido de fase.

$$df(t) = (\vartheta_{ma}(t) - \vartheta_{pd}(t)K_{pd}K_{la}K_{vps}) \frac{B_0}{1 + \beta_1 + \beta_2} \times \left[ 1 + K_{br}K_{pd}K_{la}K_{vps} \frac{q_{eff}}{1 + \beta_1 + \beta_2} \right]^{-1} \quad (1)$$

donde  $B_0 = f_0/2Q_0$ ;  $\beta_1$  y  $\beta_2$  son los coeficientes de acoplamiento del resonador;  $K_{pd}$ ,  $K_{la}$ ,  $K_{br}$  y  $K_{vps}$  son respectivamente los coeficientes de transmisión del detector de fase, del amplificador de baja frecuencia, del puente de cancelación de la portadora y del regulador de fase controlado por voltaje; el parámetro  $q_{eff}$  caracteriza el cociente de la conversión FM-PM del resonador y se define como:

$$q_{eff} = \frac{1}{1 - \beta_1 + \beta_2} - \frac{1}{1 + \beta_1 + \beta_2} \quad (2)$$

La ecuación (1) puede ser reescrita en términos de las densidades espectrales de forma siguiente:

$$L_{\varphi}^{osc}(f_m) = \left( L_{\varphi}^{loop}(f_m) + L_{\varphi}^{pd}(f_m)K_{pd}^2K_{la}^2K_{vps}^2 \frac{B_0^2}{(1 + \beta_1 + \beta_2)^2} \right) \times \left[ K_{br}K_{pd}K_{la}K_{vps} \frac{q_{eff}}{1 + \beta_1 + \beta_2} \right]^{-2} \quad (3)$$

donde  $L_{\varphi}^{loop}(f_m)$  es la densidad espectral del ruido de fase del lazo principal de oscilador, mientras que  $L_{\varphi}^{pd}(f_m)$  es la densidad espectral del ruido de detector de fase la cual esta dada por:

$$L_{\varphi}^{pd}(f_m) = \frac{kT_k NF}{P_{inc} L_{br} \Gamma_0} + \frac{a_{-1}}{f_m} \quad (4)$$

donde  $k$  es la constante de Boltzmann;  $T_k$  es temperatura en Kelvins;  $P_{inc}$  es la potencia en la entrada del FD;  $NF$  es la figura de ruido del amplificador de bajo ruido incorporado en el DF;  $L_{br}$  es el cociente de supresión de portadora del puente;  $\Gamma_0$  es un parámetro que describe las perdidas de reflexión, el cual viene dado por:

$$\Gamma_0 = \frac{1 - \beta_1 + \beta_2}{1 + \beta_1 + \beta_2} \quad (5)$$

La ecuación (3) puede ser representada de forma siguiente:

$$L_{\varphi}^{osc}(f_m) = L_{\varphi}^{loop}(f_m) \left( K_{br}K_{pd}K_{la}K_{vps} \frac{q_{eff}}{1 + \beta_1 + \beta_2} \right)^{-2} + L_{\varphi}^{pd}(f_m) \frac{B_0^2}{K_{br}^2 q_{eff}^2} \quad (6)$$

Es de notar que el primer término en la ecuación (6) representa el ruido del lazo principal suprimido por el sistema de estabilización de frecuencia. Mientras tanto, el segundo término representa la contribución del ruido de detector de fase, el cual impone un límite al desempeño de oscilador.

Para la estimación del ruido de fase del oscilador de 100 mW podemos asumir los siguientes parámetros:  $P_{inc} = 100$  mW,  $f_0 = 4.57$  GHz,  $Q_0 = 220,000$ ,  $\beta_1 = 1.09$ ,  $\beta_2 = 0.15$ ,  $NF = 1$  dB,  $L_{br} = 30$  dB,  $G_{LNA} = 32$  dB, substituyéndolos en las ecuaciones (4-6) se obtiene la siguiente estimación:  $L_{\varphi}^{OSC}(1 \text{ kHz}) = -165$  dBc/Hz. Para el oscilador mejorado asumiendo  $P_{inc} = 300$  mW,  $f_0 = 4.57$  GHz,  $Q_0 = 350,000$ ,  $\beta_1 = 1.09$ ,  $\beta_2 = 0.15$ ,  $NF = 1$  dB,  $L_{br} = 30$  dB,  $G_{LNA} = 32$  dB se obtiene  $L_{\varphi}^{OSC}(1 \text{ kHz}) = -174$  dBc/Hz.

## REFERENCIAS

- [1] E. N. Ivanov, M. E. Tobar and R. A. Woode, "Advanced Phase Noise Suppression Technique for Next Generation of Ultra Low-Noise Microwave Oscillators", in Proc. 1995 IEEE Int. Freq. Contr. Symp., pp. 314-320.
- [2] E. N. Ivanov, and M. Tobar, Low Phase-Noise Microwave Oscillators with Interferometric Signal Processing, Trans. Microwave Theory and Tech., vol. 54, No. 8, pp. 3284-3294, 2006.
- [3] N. Shtin, J. M. Lopez Romero and E. Prokhorov, Development of ultra low phase noise oscillators at CENAM, in Proc. of the 22nd European Frequency and Time Forum (EFTF 2008), Toulouse, France, April 23-25, 2008.
- [4] N. Shtin, J. M. Lopez Romero and E. Prokhorov, Design and Performance of Ultra Low Phase Noise Reflection Whispering Gallery Resonator Oscillator, Microwave and Opt. Technol. Lett., Vol. 49, No 8, pp. 2026-2030, 2007.
- [5] N. Shtin, and J. M. Lopez Romero, Medium Power C-Band Array Amplifier Featured Ultra Low Residual Phase Noise, Microwave and Opt. Technol. Lett., to be published.