

Crerios y métodos de reducción del ruido de fase en osciladores de microondas con MESFET.

I. Corbella, L.M. Carrasco
G.A.M.R. Dept. Teoria Senyal i Comunicacions
E.T.S.E. Telecomunicació de Barcelona

Abstract. This paper gives several building criteria for the design of microwave oscillators with MESFET (MESFET-MWO) in order to achieve low phase noise.

From device low frequency noise model and identification of phase noise mechanisms generation and sources in MESFET-MWO, a novel expression of *1 Hz single side noise power to carrier power relation* or $\mathcal{L}(f)$ function is obtained.

A low cost X band oscillator with high efficiency and medium power is built to prove the methods of phase noise reduction derived of that expression.

The phase noise measured of the built oscillator allows us to doubt of the device noise model used.

1. Modelo de Ruido. Base Teórica. El modelo circuital de ruido simplificado de un MESFET es el expuesto en la figura 1 (recuadro de línea punteada). El ruido presente es modelado en forma de un generador equivalente de ruido $e_g(t)$ cuya densidad espectral de potencia sigue una característica inversamente proporcional a la frecuencia (ruido *Flicker* o $1/f$) [1], [6] con lo que la potencia de ruido se concentra en la banda de frecuencias más bajas (BF).

La aparición de este ruido de baja frecuencia (BF) en las inmediaciones de la frecuencia de oscilación f_0 (en forma de bandas colaterales de ruido AM y FM) es consecuencia de la intermodulación entre f_0 y dicho ruido BF dado el carácter inherentemente no lineal de un oscilador. Este fenómeno es denominado habitualmente en la literatura como *Upconversion* [2].

A partir de la adecuada manipulación de la expresión clásica de la relación *Potencia de ruido en una banda de 1 Hz a f Hz de la frecuencia de oscilación a Potencia de frecuencia de oscilación* (expresión comúnmente notada como $\mathcal{L}(f)$) obtenida por Kurokawa en [3], junto con las aportaciones de Debney&Joshi [4] y Graffeuil *et al.* [5] se obtiene la expresión para $\mathcal{L}(f)$, siguiente [6] :

$$\mathcal{L}(f) = K_1 \frac{(S_g(f_0 - f) + S_g(f_0 + f))}{Q_L^2} \left(\frac{f_0}{f} \right)^2 \left(1 + \frac{(s \cdot u + r \cdot t)^2}{(r \cdot u - s \cdot t)^2} \right) \quad \text{con} \quad S_g = \frac{K_2}{f} \left(\frac{V_p}{L \cdot Z} \right) \quad (\text{Ec. 1}).$$

Donde :

- f_0 es la frecuencia de oscilación.
- f es la frecuencia *offset* a la que se mide el ruido.
- K_1 y K_2 son constantes de proporcionalidad independientes de la frecuencia.
- Q_L es el factor de calidad cargado del oscilador.
- s , r , t , u son parámetros dependientes de las impedancias de dispositivo y carga.

$$s = \frac{A_0}{R_L} \frac{\partial R_D}{\partial A} \quad r = \frac{A_0}{R_L} \frac{\partial X_D}{\partial A} \quad u = \frac{f_0}{R_L} \frac{\partial R_L}{\partial f} \quad t = \frac{f_0}{R_L} \frac{\partial X_L}{\partial f}$$

Con:

- A_0 la amplitud de oscilación.
- R_D y R_L resistencia de dispositivo y carga respectivamente.
- X_D y X_L reactancia de dispositivo y carga respectivamente.

- V_p tensión de *Pinch-off*.
- L y Z la longitud y anchura del canal bajo la puerta respectivamente;
- $L \cdot Z$ es pues el área del canal bajo la puerta.
- $S_g(f)$ la densidad espectral de potencia del generador equivalente de ruido $e_g(t)$.

La minimización de esta expresión reducirá el ruido de fase del oscilador.

Métodos de reducción del ruido de fase y aplicación a un diseño. Para comprobar la validez del modelo y de los métodos de reducción de ruido de fase que se van a proponer, se implementó un oscilador con MESFET en banda X, montando el transistor en línea *microstrip* y realimentándolo en configuración serie (fig.2a). El proceso de diseño implicaba la modelización circuital de un resonador dieléctrico en reflexión, la obtención de los parámetros de *Scattering* del transistor con un analizador de redes (HP8510B) y la optimización del diseño con *software* de simulación de circuitos de microondas (HP-MDS), se describe en la referencia [6]. El esquema del circuito puede verse en la figura 2b.

De la observación de la ecuación 1 se pueden establecer los siguientes criterios para minimizar el ruido de fase:

2.1 Elevado factor de calidad cargado. Este criterio, ampliamente utilizado en todo tipo de osciladores, se aplicó en este diseño usando como estructura resonante del oscilador, un resonador dieléctrico acoplado a la línea *microstrip* conectada a la puerta del MESFET (fig. 2b).

2.2 Impedancia de carga RF adecuada. Propuesto inicialmente por Kurokawa [3] consiste en que la línea de dispositivo y la de carga sean perpendiculares en el plano complejo. Es fácil demostrar [6] que esta condición es equivalente a que el término $su + rt$ de la ecuación 1 se anule.

2.3 Elección adecuada del dispositivo. Entre varios transistores MESFET, se elegirá aquel que presente menor valor de la expresión:

$$\frac{V_p}{L \cdot Z}$$

para así, de acuerdo con la ecuación 1, utilizar el dispositivo con un valor de densidad espectral de ruido de menor valor. Este criterio, no obstante, tiene las siguientes limitaciones : [5]

Un valor demasiado elevado de L disminuirá la frecuencia máxima de operación del dispositivo.

Un valor excesivo de Z disminuirá el valor de la transconductancia g_m del dispositivo y por tanto su ganancia unilateral, con lo que será difícil hacerlo oscilar.

2.4 Cargas de baja frecuencia adecuadas en puerta y drenador. Este es el sistema, *a priori*, más innovador de los expuestos. La influencia que el generador equivalente de ruido $e_g(t)$ tiene sobre la pureza espectral de la señal de oscilación puede reducirse, en principio, cargando la puerta del MESFET con una alta impedancia en baja frecuencia [7] ya que la tensión, hipotética, de ruido V_G (fig.1) resulta ser :

$$V_G = \frac{Z_T}{Z_T + Z_{BF}} \quad \text{Ec.2}$$

Esa alta impedancia en baja frecuencia en la puerta puede conseguirse intercalando una resistencia de elevado valor (cientos de Kohms) entre la fuente de alimentación que polariza la puerta del transistor y dicha puerta (fig.1). Esta resistencia no afecta apreciablemente a la corriente de polarización de puerta debido a la pequeña magnitud de dicha corriente. Un problema que se puede presentar es la oscilación en media-baja frecuencia (de KHz a algunos MHz) que esa resistencia puede provocar dada la alta ganancia que presentan los MESFETS a esas frecuencias.

2.5 Utilización de dobladores. La función $\mathcal{L}(f)$ es proporcional al cuadrado de la frecuencia de oscilación, f_0 , como puede verse en la ecuación 1, lo que sugiere que una manera de reducir el ruido de fase en 6 dB teóricos, sería diseñar el oscilador a frecuencia mitad y utilizar como frecuencia de salida el segundo armónico. El inconveniente de este sistema es que la potencia de un segundo armónico es sensiblemente inferior a la de un primer armónico aunque puede maximizarse, en el caso de un MESFET, polarizando éste con una tensión de puerta próxima a la de *Pinch-off* ya que la alinealidad del dispositivo es máxima para dicha polarización.

En la referencia [7] se propone un diseño en esta línea de actuación.

3. Resultados. El circuito oscilador finalmente construido presenta las características resumidas en la tabla siguiente y en la figura 3 (espectro del oscilador).

Frecuencia de oscilación (1 ^{er} armónico)	8.571 GHz
Potencia primer armónico	11 dBm
Potencia segundo armónico	-9 dBm
Polarización	$I_{DS} = 30 \text{ mA}$ $V_{DS} = 2 \text{ V}$ $V_{GS} = -0.8 \text{ V}$
Eficiencia	22 %

TABLA I

El ruido de fase ha sido medido por el método de detección de fase [6], [8] con

el sistema de medida HP3048A [8]. Los resultados se muestran en las gráficas 4a y 4b.

La figura 4a muestra el ruido de fase obtenido ($\mathcal{L}(f)$) con una frecuencia *offset* entre 10 Hz y 40 MHz y como puede verse, la función sigue una característica inversamente proporcional al cubo de la frecuencia *offset* ($1/f^3$) tal como predecía la ecuación 1.

La figura 4b muestra esa misma función en un margen más estrecho (10 Hz a 10 KHz) para poder apreciar con más detalle el margen de frecuencias donde el método de reducción de ruido de fase expuesto en el punto 2.4 debe ser efectivo.

El ruido de fase con alta y baja impedancia de BF en puerta es prácticamente idéntico en ambos casos lo que cuestiona la validez del modelo de ruido utilizado y pone en duda los resultados de Graffeuil *et al* que en [7] proponían un método de reducción del ruido de fase similar al de este trabajo. Dallas y Evererd en [9] explican los aparentemente buenos resultados de [7] por la eliminación de ruido AM convertido en ruido de fase que se producía en el experimento de [7].

Conclusiones. Se ha implementado un circuito oscilador siguiendo unos criterios deducidos de una expresión original de la función $\mathcal{L}(f)$ y del modelo de ruido del transistor MESFET.

Algunos de esos criterios son utilizables en cualquier tipo de oscilador (2.1, 2.2 y 2.5) y otros son exclusivos de osciladores con MESFET (2.3 y 2.4).

El circuito oscilador implementado es compacto, de bajo coste y fácil realización. La eficiencia que se obtiene es alta con una potencia de señal media y el ruido de fase resultante se puede considerar bueno en comparación con circuitos similares presentados en la literatura.

Referencias.

[1] Gupta. *Noise Model in Oscillators employing Submicron FET's*. 41st Annual Frequency Control Symposium. 1987.

[2] Siweris, Schiek. *Analysis of Noise Upconversion in Microwave FET Oscillators*. IEEE Transactions on Microwaves Theory and Techniques. Vol 33 N° 3 marzo 1985.

[3] Kurokawa. *Microwave Solid State Oscillators Circuits*. *Microwaves Devices*. Editorial J.Wiley & sons. 1978.

[4] Debney, Joshei. *A theory of Noise in GaAs FET Microwave Oscillators and its experimental verification*. IEEE Transactions on Electronic Devices. Vol 30 N° 7 julio 1983.

[5] Graffeuil, Tantrarongroj, Sauterau. *Low Frequency Noise Physical Analysis for the Improvement of the spectral purity of GaAs FET Oscillators*. Solid State Electronics. Vol 2 N° 5 mayo 1982.

[6] L.M. Carrasco. *Oscilador de microondas en banda X de bajo ruido de fase*. Proyecto Final de Carrera. E.T.S.E.T.B. U.P.C. Director I.Corbella. 1990.

[7] Mamodaly, Prigent, Obregon. *New Configurations to Reduce Converted FM Noise in FET Oscillators*. 16th European Microwave Conferences. 1986.

[8] HP3048A *A Phase Noise Measurement Operators Training's Course*. Student Guide. Course N° HP3048A + 24A.

[9] Dallas, Everard. *Measurements of the cross correlation between baseband and transposed flicker noise in GaAs MESFET*. IEEE International Microwaves Symposium Digest. Dallas 1990.

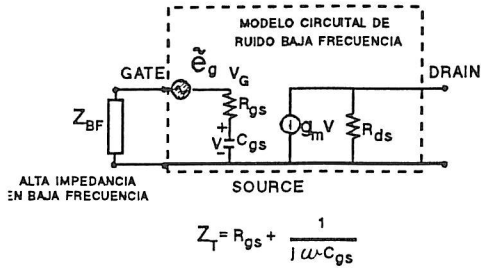


Fig.1 Modelo de ruido de baja frecuencia del MESFET.

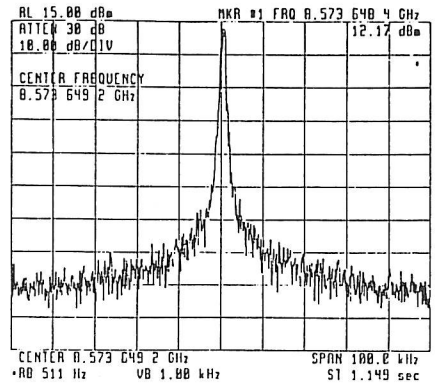


Fig.3 Espectro.

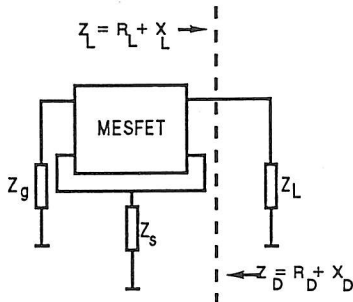


Fig.2a MESFET realimentado serie.

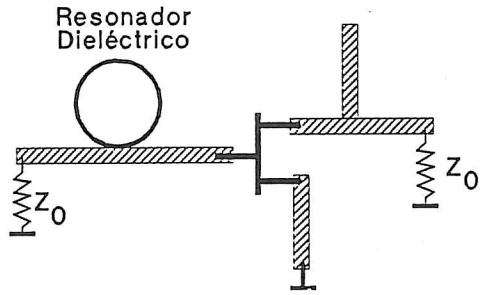


Fig.2b Esquema del Oscilador.

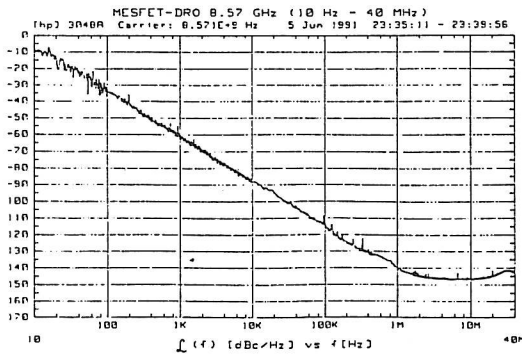


Fig.4a $S(f)$ entre 10 Hz y 40 MHz.

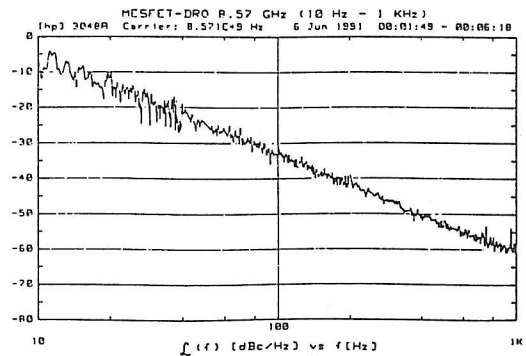


Fig.4b $S(f)$ entre 10 Hz y 1 KHz.