

# ANÁLISIS NO LINEAL DE UN SINTETIZADOR BASADO EN UN DETECTOR SPD

S. Ver Hoeye, S. Sancho, A. Suárez

Departamento de Comunicaciones  
Universidad de Cantabria  
[VHSamuel@excite.com](mailto:VHSamuel@excite.com)

## ABSTRACT

A microwave synthesizer operating at 6.52 GHz and based on a sampling-phase detector (SPD) has been designed and simulated. The employment of nonlinear-analysis tools has enabled an in-depth study of the system dynamics. Hold-in and lock-in bands are determined in a direct and accurate way through the use of the Poincaré-map technique.

## 1. INTRODUCCIÓN

Se ha diseñado un sintetizador de microondas a 6.52 GHz, para operar en un convertor inferior de un sistema de comunicaciones por satélite. Debido a las especificaciones estrictas para el ruido de fase, se ha utilizado un divisor de bajo orden en el lazo enganchado en fase (PLL). Eso requiere una referencia de alta frecuencia, que se ha obtenido utilizando un *sample-phase-detector* (SPD) [1]. El uso de un filtro apropiado permite seleccionar el armónico deseado  $K_L \omega_x$  y eliminar los componentes armónicos espurios. La elección de un ancho de bando muy estrecho para el filtro, aunque positivo para el comportamiento al ruido de fase, lleva una fuerte reducción de las bandas de enganche en fase. Por ello, generalmente, se necesita un circuito de adquisición. Se ha realizado un análisis no lineal en profundidad del PLL basado en el SPD. Eso nos ha permitido tener una mejor comprensión de la dinámica compleja del sistema y la determinación de las bandas de *lock-in* y *hold-in* alrededor del componente armónico deseado de la frecuencia del cristal. Estas bandas son intrínsecas al sistema fase enganchado y su conocimiento nos permite obtener estimaciones útiles para la sensibilidad necesario del VCO y para la amplitud de la señal de control. Como en [2], el análisis no lineal esta basado en el uso de modelos realistas para los elementos del lazo. Aquí, se ha aplicado, por la primera vez, la técnica de la mapa de Poincaré, para la determinación de los anchos de bandas de enganche en fase de manera precisa y directa.

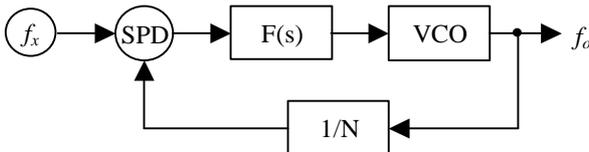


Figura 1. Sintetizador de microondas basado en un SPD.

## 2. ANÁLISIS NO LINEAL DEL SINTETIZADOR DE MICROONDAS

Se ha modelado el VCO con una característica realista, incluyendo efectos de saturación, que como en [2], han sido modelados con una tangente hiperbólica. El mezclador ha sido simulado como un multiplicador de señales. Para el filtro se han considerado los elementos reales.

### 2.1. Análisis del Estado-Estacionario.

La ecuación no lineal determinando la frecuencia de salida del VCO es [2]:

$$\dot{f}_o = \omega_o + M_1 \operatorname{tgh} [M_2 u_2(t)] \quad (1)$$

con  $u_2(t)$  la señal de salida del filtro lazo y  $M_1$  y  $M_2$ , dos constantes de ajuste. El resultado de (1) ha sido representado en Fig. 2, para un diseño inicial del filtro. Se ha considerado un valor inicial de la frecuencia libre  $\omega_o$  del VCO, cerca de un componente armónico  $K_L = 162$ . Como se puede observar, el sistema engancha en fase a  $K_L = 163$ . Eso es debido al *duty cycle* (cerca de  $1/2$ ) del pulso de salida del SPD, que da lugar a líneas espectrales con valor teórico cero para múltiplos pares de  $f_x$ .

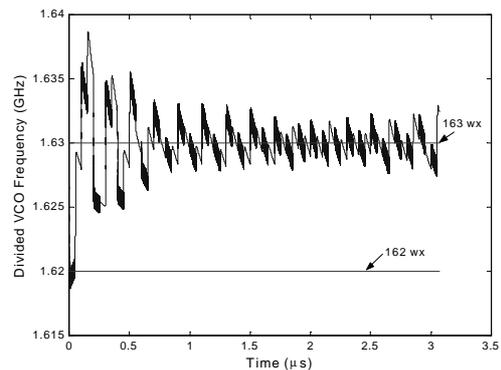


Figura 2. Phase-locking del sintetizador SPD al componente armónico  $K_L = 163$ . La frecuencia libre del VCO esta cerca de  $\omega_o = 162 \omega_x$ .

Nótese que el estado de enganche en fase no esta representado por un valor  $\phi = \phi_o$  constante. Los componentes armónicos de la señal pulsada todavía están presentes en la solución, dando lugar a un comportamiento oscilatoria alrededor

la frecuencia  $f_L = 163 f_x$ . En condiciones de enganche en fase, la frecuencia de salida del VCO se puede describir por:

$$\hat{f}_o = U_o + M_1 \sum_k R_k e^{jk\omega_x t} = w_o + M_1 R_o + M_2 \sum_{k \neq 0} R_k e^{jk\omega_x t} \quad (2)$$

con  $R_k$  los componentes armónicos de la función tangente hiperbólica, aplicado a la salida del filtro. Nótese que:

$$K_L w_x = w_o + M_1 R_o \quad (3)$$

## 2.2. Bandas de Enganche en Fase. La escalera del Diablo.

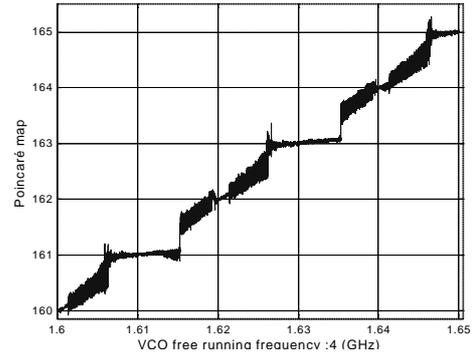
La aplicación del mapa de Poincaré para valores sucesivos de  $\omega_o$  (parámetro del análisis) establece el diagrama de bifurcaciones. Para obtener el mapa de Poincaré el estado estacionario esta muestreado con el paso  $T_s = 1/f_x$ . Se ha representado la relación  $\hat{f}_o / w_x$  en Fig. 3a. Obsérvese que la línea recta de frecuencia constante representa el ancho de banda de enganche en fase alrededor cada componente armónico. No es una línea perfecta, debido al término de oscilación en (3). Los intervalos en que no hay enganche en fase, es la solución caótica. Las bandas de enganche encerradas entre los intervalos de comportamiento caótico toman la forma de una escalera, llamada *la escalera del diablo* [3]. El diagrama ha sido trazado empezando de  $\omega_o/\omega_x = 160$  y moviéndose hacia la derecha. Observación de cada una de las bandas de sincronización muestra un comportamiento casi continuo al límite izquierda y un comportamiento discontinuo al límite derecho. El comportamiento casi continuo indica un fenómeno de captura, mientras que el comportamiento discontinuo indica el final del rango de *hold-in* [2]. La ocurrencia de los dos fenómenos distintos da lugar a histéresis. Trazando el parámetro  $\omega_o$  en el sentido contrario, e.d., disminuyendo  $\omega_o/\omega_x$ , se puede determinar el rango del histéresis a los dos límites, Fig. 3b.

## 2.3. Análisis paramétrico frente el ancho de banda del filtro.

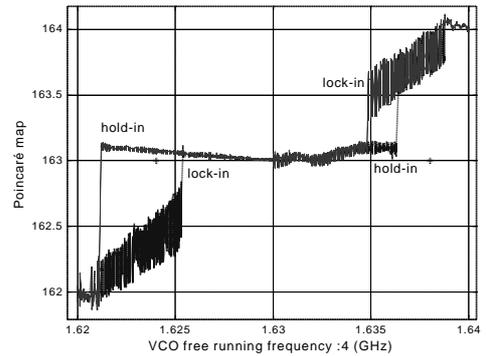
Se espera que el sintetizador opere en la banda de enganche que corresponde con  $K_L = 163$ . Para determinar como varia ese intervalo con el ancho de banda del filtro lazo, se ha realizado un segundo análisis no lineal. El diagrama resultante es la *lengua de Arnold* [3], correspondiendo con el número de rotación  $r = 1/163$ . El efecto de saturación se origina por la influencia de los componentes armónicos cercanos  $K_L = 162$  y  $K_L = 164$ .

## 3. CONCLUSIONES

Se ha analizado un sintetizador de microondas, basado en un SPD, con métodos no lineales permitiendo un mejor comprensión de la dinámica compleja del sistema. El uso de la técnica del mapa de Poincaré ha hecho posible el determinar de las bandas de *lock-in* y *hold-in* alrededor un componente armónico deseado del oscilador de referencia. Un análisis paramétrico de estas bandas, frente la frecuencia de corte del filtro de lazo, ha permitido un diseño optimo para cumplir las especificaciones del ruido de fase.



a)



b)

Figura 3. Mapa de Poincaré. a) Escalera del diablo. b) Ampliación alrededor el armónico  $K_L = 163$ , con medidas superpuestas: +

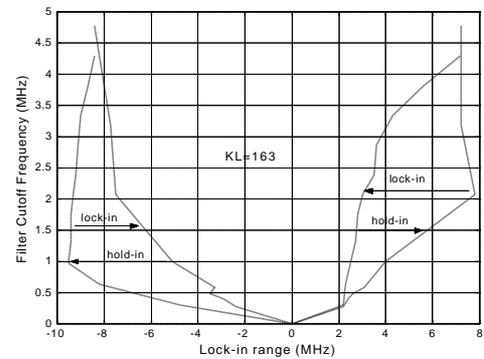


Figura 4. Lengua de Arnold para  $K_L = 163$ .

## 4. REFERENCIAS

- [1] J. Gismero, J. Grajal, "9 GHz phase locked oscillator using a sampling phase detector. Application to VSAT local oscillators (18-27 GHz)," *23th European Microwave Conference, Madrid*, pp. 784-786, October 1993.
- [2] S. Sancho, A. Suárez, T. Fernandez, "Nonlinear analysis of microwave frequency synthesizers: stability and incidental FM," *2000 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 1, pp. 497-500, June 2000.
- [3] T. Matsumoto, "Chaos in Electronic Circuits," *1987 IEEE Special Issue on Chaotic Systems*, vol. 75, no. 8, pp. 1033-1057, August 1987.