

PLL's DE MICROONDAS CON EL VCO SINCRONIZADO POR INYECCION: APLICACIONES

Agustín López Riera, Jordi Berenguer Sau* ,
Adolfo Comerón Tejero y Eduardo Artal Latorre.

Grupo Antenas-Microondas-Radar. Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones.
E.T.S. de Ingenieros de Telecomunicación de Barcelona.
Universidad Politécnica de Cataluña.

* MIER COMUNICACIONES, S.A.

ABSTRACT

A system which combines the properties of the PLL systems and the injection locking ones is described. Its theoretical behaviour is analysed and some practical applications are discussed. Its performance in these applications has been verified at the laboratory and some results are given.

INTRODUCCION

A frecuencias de microondas, las aplicaciones en las que mayoritariamente se utilizan sistemas PLL (Phase Locked Loops) o sistemas de sincronización por inyección (Injection Locking) suelen ser las de síntesis de frecuencias, o también aquellas en las que se requiere la obtención de osciladores con elevada potencia de salida. No obstante recientemente han aparecido artículos en revistas especializadas en los que se utilizaba la sincronización por inyección en el diseño de combinadores de potencia y en phased-array's con elementos activos en emisión. Sin embargo, la utilización de las técnicas de sincronización por inyección dentro de un lazo PLL han sido poco estudiadas, contemplándose en la mayoría de los casos únicamente como sistema de ayuda a la adquisición, de gran utilidad a frecuencias de microondas, pero obviándose algunos de sus aspectos más interesantes que dan origen a diversos aspectos de otra índole.

En esta comunicación se presentan algunas de estas aplicaciones verificadas experimentalmente en el laboratorio, basadas todas ellas en la utilización de un bucle PLL en el cual se sincroniza mediante inyección el VCO con la señal de referencia (Figura 1) PLLI (Phase Locked Loop Injected), con lo que se dispone entonces de un oscilador de frecuencia fija y fase controlable por tensión; el mecanismo de inyección asume la tarea de mantener el sincronismo de frecuencia mientras que el sistema PLL se encarga de garantizar una relación estable de fases entre las señales del VCO y la referencia.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

En la figura 1 aparece el esquema de bloques de un sistema PLL con el VCO sincronizado por inyección con la señal de referencia, lo cual se realiza mediante un circulador. Una vez obtenido el sincronismo de frecuencia, se puede aplicar el modelo lineal de la figura 2. La función de transferencia $M(s)$ corresponde a la del sistema de sincronización por inyección, filtrando paso bajo la fase de la señal de referencia, mientras que la función paso alto $[1-M(s)]$ añade el ruido de fase propio del VCO, estando el ancho de banda de la función determinado por la relación entre las potencias de inyección y de salida del VCO, así como por el Q externo de este último.

$$M(s) = \frac{1}{1 + s/w_L} \quad ; \quad 1-M(s) = \frac{s/w_L}{1 + s/w_L} \quad ; \quad w_L = \frac{w_o}{Q} \sqrt{\frac{P_i}{P_o}}$$

Por lo que respecta al lazo PLL, este aparece caracterizado en su forma habitual, siendo K_d la constante del detector de fase (V/rad), $F(s)$ la función de transferencia del filtro de lazo y K_p (rad/V) la constante de proporcionalidad del oscilador controlado, que como vemos ahora ha perdido su carácter de integrador. Esto es debido a que el mecanismo de sincronización por inyección mantiene constante la frecuencia del VCO, de forma que la actuación sobre su tensión de control provoca un desplazamiento del ángulo que forma la línea del dispositivo del elemento activo del oscilador, con la línea de carga, lo que repercute en un cambio de $\pm 90^\circ$ entre la fase del VCO y la de la señal de inyección; en consecuencia, ahora el oscilador controlado pasa a comportarse como un oscilador de frecuencia fija y fase controlable por tensión en un margen de $\pm 90^\circ$. La adición de un término de fase de $\pi/2$ rad. a la salida del detector de fase es motivada por el hecho de que el mecanismo de sincronización por inyección produce un enganche de las señales en fase mientras que el sistema PLL produce una sincronización entre las dos señales en cuadratura de fases. Este término puede ser introducido como una tensión de offset dentro del filtro de lazo del PLL.

Si analizamos cual va a ser la fase de la señal de salida, encontraremos que se cumple:

$$\varphi_o(s) = \varphi_i(s) [M(s)[1-H(s)]+H(s)] + \varphi_{VCO}(s)[1-M(s)][1-H(s)]$$

siendo $H(s)$ la nueva función de transferencia del PLL, dada por la ecuación:

$$H(s) = \frac{K_d K_p F(s)}{1 + K_d K_p F(s)}$$

por lo que el comportamiento global del sistema mantiene su característica de filtrado paso bajo de la señal de entrada, pero con frecuencia de corte superior por el efecto de la sincronización por inyección, manteniéndose el filtrado paso alto del ruido de fase propio del VCO.

CONTROL ELECTRONICO DE FASE

Aunque el sistema anterior puede interpretarse como un sistema de ayuda a la adquisición, a su vez puede utilizarse como modulador de fase o desfasador electrónico. Para ello basta con añadir una tensión $V_m(t)$ a la salida del detector de fase, tal y como se muestra en la figura 3, obteniendo para la fase de salida :

$$\varphi_o(s) = \varphi_i(s) [M(s)[1-H(s)]+H(s)] + \varphi_{VCO}(s)[1-M(s)][1-H(s)] + V_m(t) \frac{H(s)}{K_d}$$

de lo que se deduce que el sistema va a ser capaz de seguir cualquier modulación de fase cuyo espectro esté contenido en el ancho de banda de $H(s)$, con la limitación de una desviación máxima permitida de fase de $\pm 90^\circ$ impuesta por la condición de estabilidad de la sincronización por inyección. Por consiguiente hemos obtenido un sistema capaz de sintetizar una señal de una determinada frecuencia con las características de pureza espectral impuestas por la señal de referencia para su utilización como modulador de fase y/o desfasador electrónico en un margen de $\pm 90^\circ$.

A continuación veremos algunas de las aplicaciones que permite este sistema. Nótese su capacidad para seguir todas las variaciones de frecuencia de la señal de referencia, incluso en el caso de que ésta estuviese modulada en frecuencia, puesto que la sincronización por inyección se encarga de mantener

DESFASADOR ELECTRONICO

Siguiendo el esquema de la Figura 3 se realizó el montaje de la Figura 4 para caracterizar la respuesta fase/tensión de control del sistema PLLI operando a 9.9 GHz, en el que se utilizaba como VCO un oscilador con MESFET de AsGa y diodo varactor, y como detector de fase un anillo híbrido de 90° con diodos Schottky apareados. La relación entre potencias de inyección y de salida fue $P_i/P_o = -10$ dB a fin de minimizar el rizado en la potencia de salida del VCO, de +10.2 dBm. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5. La principal ventaja de este sistema frente al desfasador convencional, es la posibilidad de operar directamente sobre señales de gran potencia y en forma continua.

PHASED-ARRAY'S

Una aplicación directa de este sistema se sitúa dentro de un sistema phased array con elementos activos en emisión. Mediante el esquema de la Figura 6 es posible obtener una antena con barrido electrónico de haz. Este sistema se comprobó en el laboratorio utilizando dos osciladores del tipo anterior y conectando sus salidas a dos bocinas situadas en el interior de una cámara anecóica, distanciadas 1.8λ . En el otro extremo de la cámara se situó una bocina receptora para medir su diagrama de radiación. En la Figura 7 se muestra el diagrama de radiación obtenido para tres valores distintos de la tensión de control, validando esta aplicación.

Es posible eliminar la limitación de $\pm 90^\circ$ de variación de fase que presenta este sistema si se recurre a la utilización del montaje de la Figura 8 donde ahora se realizan dos detecciones de fase entre cada oscilador y la señal de referencia; la tensión de control se aplica de modo diferencial a ambos osciladores, consiguiéndose por tanto extender el margen de variación de fase a $\pm 180^\circ$, lo cual se midió utilizando un analizador de redes donde como señal de referencia se utilizaba la de un VCO y como señal de test la del otro. El resultado obtenido se muestra en la figura 9.

COMBINACION DE POTENCIA/MODULACION DE AMPLITUD

Otra de las aplicaciones que sugiere el sistema es la de combinación de potencia de osciladores. Se trata de sumar en fase las señales de dos osciladores de características similares, sincronizados por inyección a la misma señal de referencia, efectuándose entre ambos una detección de fase, lo que posibilita el ajuste de sus fases relativas. Este sistema también es válido para modular en amplitud la señal combinada, puesto que si hacemos variable la señal de control, ello repercute en una suma de señales con una diferencia de fases variable, generando por tanto una modulación de amplitud. Esta aplicación ya había sido objeto de una anterior comunicación [3].

SISTEMA COMPACTO DE MODULACION AM/PM/FM

Las anteriores aplicaciones pueden integrarse en un sistema compacto, aglutinando simultáneamente las propiedades de modulación de fase, amplitud y frecuencia, utilizando el esquema de la Figura 10.

CONCLUSIONES

Se ha presentado el principio de funcionamiento de un sistema PLL de microondas con el VCO sincronizado por inyección, destacando, al margen de su utilización como sistema de ayuda a la adquisición, su capacidad para permitir el control electrónico de la fase del oscilador sincronizado con la referencia en un margen de $\pm 90^\circ$.

Asimismo se han presentado un conjunto de aplicaciones basadas todas ellas

satisfactoria sistemas de modulación de amplitud y fase, así como controles automáticos de nivel, para su utilización dentro de sistemas phased array con elementos activos en emisión.

Estas aplicaciones aunque verificadas en el laboratorio en banda X, encuentran su mayor utilidad en bandas de milimétricas, siendo fácilmente transferibles.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Lopez : "Control electrónico de fase de osciladores de banda X utilizando sistemas PLL y sincronización por inyección". PFC, 1988.
- [2] J. Berenguer : "Síntesis de frecuencias en microondas mediante sistemas PLL. Aplicación a la recepción coherente de señales emitidas por satélite hasta 30 GHz.". Tesis Doctoral, 1988.
- [3] J. Berenguer y J. Bará : "Combinación de potencia de dos osciladores mediante sincronización por inyección y lazo PLL". Actas de la VI Reunión Anual de la Comisión B del Comité Español de la URSI, Valencia 1987, pp. 273-278 .
- [4] K. D. Stephan : "Inter-Injection-Locked Oscillators for Power Combining and Phased Arrays". IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol MTT 34, n° 10, October 1986, pp. 1017-1025.

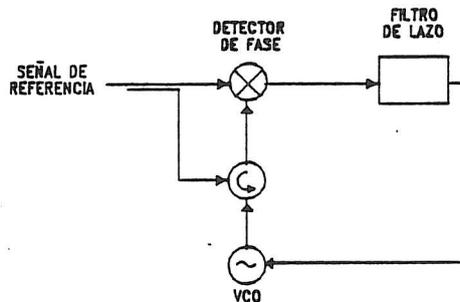


FIG 1 ESQUEMA DE BLOQUES DE UN PLLI

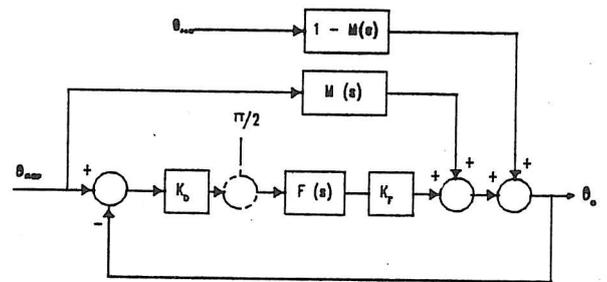


FIG 2 MODELO LINEAL DE UN PLLI

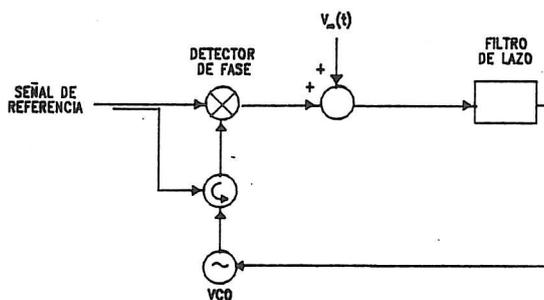


FIG 3 ESQUEMA DE BLOQUES DE UN PLLI MODULADOR DE PM

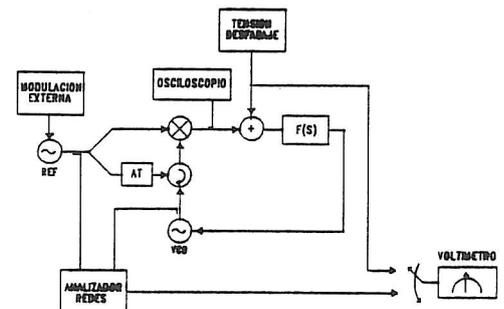


FIG 4 CIRCUITO DE MEDIDA DEL DESFASADOR PLLI

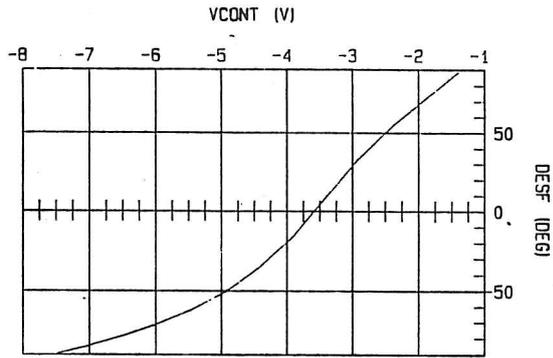


FIG 5 CURVA DE DESFASE DEL DESFASADOR PLLI

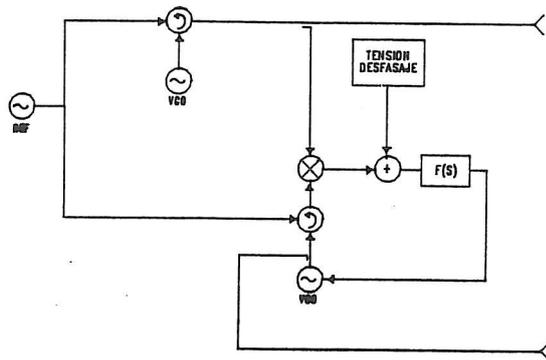


FIG 6 PHASED ARRAY DE MARGEN DE VARIACION DE 180 GRADOS

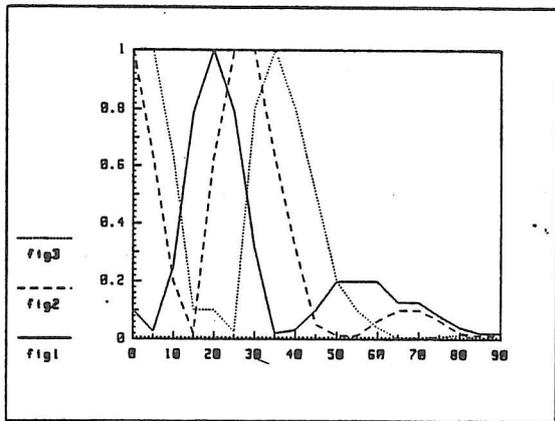


FIG 7 DIAGRAMAS DE RADIACION MEDIDOS EN LA CAMARA ANECOICA

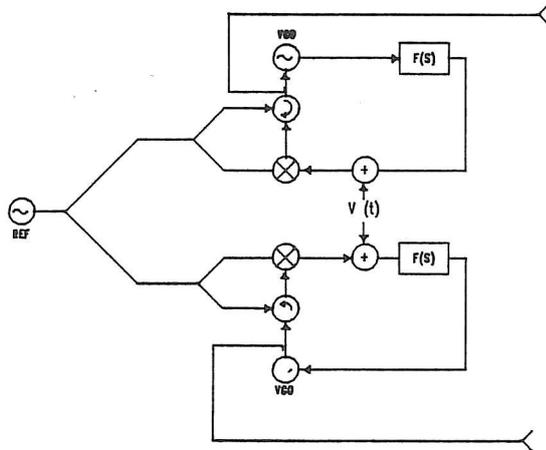


FIG 8 PHASED ARRAY DE MARGEN DE VARIACION DE 360 GRADOS

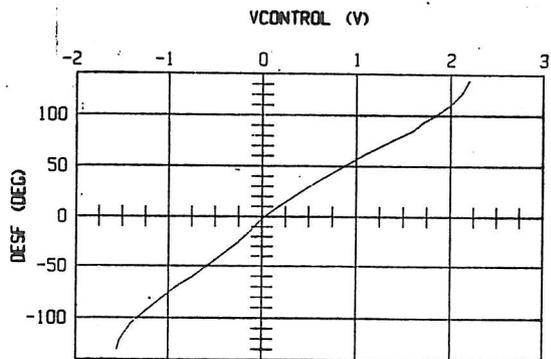


FIG 9 CURVA DE DESFASE ENTRE LOS DOS ELEMENTOS DEL PHASED ARRAY

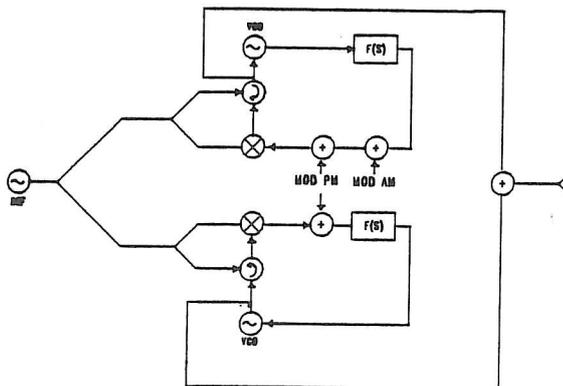


FIG 10 ESQUEMA DE BLOQUES DE UN MODULADOR AM, PH, FM