

TÉCNICAS EMERGENTES DE MEJORA DEL COMPROMISO EFICIENCIA-LINEALIDAD EN TRANSMISORES DE RADIOFRECUENCIA

José A. García⁽¹⁾, Jesús de Mingo⁽²⁾, Gabriel Montoro⁽³⁾, Lorena Cabria⁽¹⁾, Reinel Marante⁽¹⁾, Paloma García⁽²⁾, César Sánchez⁽²⁾, Eduard Bertran⁽³⁾, Pere Lluís Gilabert⁽³⁾

joseangel.garcia@unican.es, mingo@unizar.es, montoro@tsc.upc.edu, lorena.cabria@unican.es,
reinel.marante@unican.es, paloma@unizar.es, cesarsp@unizar.es, bertran@tsc.upc.edu, plgilabert@tsc.upc.edu

⁽¹⁾ Dpto. Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Cantabria, Plaza de la Ciencia, Avda. Los Castros s/n, 39005 Santander.

⁽²⁾ Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A). Dpto. de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones, Universidad de Zaragoza. C/ María de Luna 1, 50018 Zaragoza.

⁽³⁾ Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cataluña, Avda. Canal Olímpic 15, 08860, Castelldefels, Barcelona.

Abstract- In this paper, an overview of emerging techniques for overcoming the current limit in the solution to the linearity versus efficiency trade-off in wireless transmitters is presented. Starting with the combination of digital predistortion and impedance synthesis techniques for dealing with wideband communication formats in I/Q transmitters, the attractive capability of envelope tracking for improving average efficiency in those architectures with available technology is highlighted. Finally, and due to the intrinsic limitations of the Cartesian transmitter, the polar concept is considered. Its nonidealities are put under analysis, as they may restrict current introduction of this promising architecture.

The solutions under consideration are due to the joint work from the groups of Univ. Cantabria, Univ. Zaragoza and Univ. Polit. Cataluña (UPC) under a Coordinated Project from the Spanish National Plan.

I. INTRODUCCIÓN

El propósito de este artículo es mostrar el trabajo que los grupos de investigación de la Universidad de Cantabria, la Universidad de Zaragoza y Universidad Politécnica de Cataluña están realizando en conjunto con el fin de contribuir a la mejora de la eficiencia energética y la linealidad de los transmisores de radiofrecuencia. Dichos esfuerzos se integran dentro del Proyecto TEC2008-06684-C03 del Plan Nacional de I+D+i, y el presente artículo de revisión permite ofrecer una visión general del tema en la actualidad, destacar su importancia, y ofrecer una perspectiva de las líneas de trabajo a acometer por los grupos implicados.

II. COMPROMISO LINEALIDAD VS. EFICIENCIA

El gran esfuerzo de investigación y desarrollo realizado en los últimos años en el ámbito de las comunicaciones móviles y las tecnologías inalámbricas, ha propiciado el desarrollo de tecnologías tan diversas como UMTS, IEEE 802.11x, IEEE 802.16x, Bluetooth, redes móviles ad-hoc o redes de sensores

sin hilos y la definición del nuevo concepto de “servicios y redes de cuarta generación” (4G).

Uno de los condicionantes más importantes es maximizar la autonomía de los terminales de usuario y reducir los gastos relacionados al elevado consumo de potencia de las estaciones base, mediante la incorporación de técnicas que permitan optimizar su eficiencia energética. Hay que tener en cuenta que tales servicios requieren modulaciones multinivel o multiportadora de alta eficiencia espectral y elevado PAPR (*Peak to Average Power Ratio*), cuyas máscaras espectrales imponen restricciones muy importantes en linealidad, tanto para garantizar la correcta recuperación del mensaje como para evitar el desbordamiento espectral sobre canales o servicios vecinos.

III. TÉCNICAS DE PREDISTORSIÓN Y SÍNTESIS DE IMPEDANCIA

Es precisamente en este escenario que surge el interés de investigar en soluciones que permitan trabajar con amplificadores eficientes en potencia mediante la incorporación de técnicas de linealización y de mecanismos de adaptación automática de la impedancia de entrada a la antena con el objetivo de proporcionar en todo momento la máxima potencia radiada con el mínimo consumo energético y la mínima interferencia en canal adyacente.

La propuesta de una mejora conjunta desde el punto de vista de la optimización en el compromiso entre linealidad y eficiencia en los sistemas de transmisión asociados a los sistemas de comunicaciones inalámbricos de banda ancha está adquiriendo una gran importancia. La aplicación de nuevos métodos de entrenamiento de los sistemas de predistorsión basados en señales de calibración específicas que mejoren los tiempos de convergencia de los mismos, donde, en los modelos de predistorsión se tengan en cuenta los efectos de memoria (Series de Volterra Truncadas o similares), imprescindibles cuando los anchos de banda de las

señales a transmitir son elevados cobran especial relevancia [1]. Unir al sistema anterior un sistema de adaptación de impedancia de antena que permita, en todo momento, presentar a la etapa de potencia la impedancia o carga (“Load Pull”) óptima desde el punto de vista de eficiencia y linealidad [2] permitiría buscará optimizar potencia emitida en canal útil a la vez que minimizar la potencia emitida en el canal adyacente. Esta propuesta permite presentar una coexistencia entre lo que se daría en llamar una técnica de linealización a nivel de dispositivo, por lo que a la presentación de la impedancia óptima de carga a la etapa de potencia se refiere, y una técnica de linealización a nivel de sistema, empleando técnicas de predistorsión utilizando modelos con memoria, necesarios para sistemas de banda ancha como queda reflejado en el propuesta de la Fig. 1.

El control de los efectos causados por la respuesta no lineal de los amplificadores de potencia en sistemas de comunicaciones móviles, donde el aumento de la eficiencia energética cobra gran interés, ha sido objeto de estudio durante años por parte de muchos grupos de investigación, en lo relativo a conseguir como objetivo satisfacer los fuertes requisitos que aparecen en nuevos estándares relacionados con minimización de interferencias en canales adyacentes junto a la utilización de modulaciones complejas conviniendo con una elevada eficiencia en el uso de la potencia. El control del comportamiento no lineal ha pasado por dos vertientes, el control a nivel de dispositivo, donde se conjugan los efectos de carga presentados a entrada (“Source-Pull”) y salida (“Load-Pull”) del transistor o los relativos al punto de polarización (“sweet-spot”) del dispositivo con el objeto de minimizar los efectos de no linealidades, y una segunda vertiente asociada a las técnicas de linealización a nivel de sistema, de entre las técnicas a nivel de sistema más ampliamente conocidas tenemos:

Lazos de Realimentación (realimentaciones cartesianas y polar). Estas técnicas han demostrado buenas prestaciones para señales de banda estrecha. Presenta limitaciones por su estabilidad condicionada reflejada en los límites relativos al producto ganancia en lazo abierto, retardo de lazo y ancho de banda. Dentro de las técnicas de realimentación, podemos incluir las de linealización mediante predistorsión por realimentación [3], esta técnica consiste en realizar una previa predistorsión de la señal en banda base de tipo antagónico a la que introducirá posteriormente el amplificador, la realimentación garantiza una continua actualización del predistorsionador que permite seguir las derivas que puede sufrir el amplificador de potencia. **Linealización “feedforward”**, donde la filosofía de funcionamiento reside en conseguir la compensación, o en la medida de lo posible cancelación, de la distorsión realizando una adición externa al amplificador principal de las componentes de IMD generadas por el propio amplificador a linealizar, el problema de ajuste entre la amplitud y fase de los lazos que componen esta técnica puede ser corregido utilizando técnicas de procesamiento de señal. Otra técnica de linealización ampliamente estudiada corresponde al **transmisor LINC**, la base de esta técnica se centra en la representación de cualquier señal paso banda, modulada en amplitud y fase, mediante un paso previo a un nuevo plano de modulación en el que se usan dos señales moduladas únicamente en fase, y en consecuencia de envolvente constante. Sus principales limitaciones están relacionadas con la

sensibilidad del diseño a los desbalances entre las dos ramas que componen el transmisor LINC, [4]. Por último técnicas basadas en eliminación y restauración de la envolvente, **EER**, basadas en la eliminación de la modulación de la envolvente a la señal de entrada para reconfigurarla a partir de un tratamiento en la alimentación de la etapa de potencia.

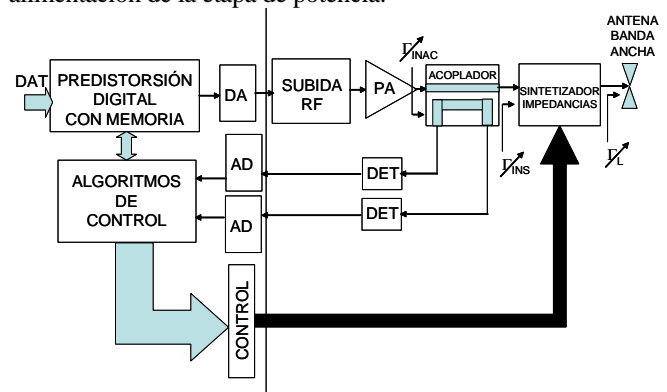


Fig. 1. Propuesta de optimización conjunta de técnicas de predistorsión digital y síntesis de impedancia

IV. TÉCNICAS DE SEGUIMIENTO DE LA ENVOLVENTE MEDIANTE POLARIZACIÓN VARIABLE

A. Polarización variable de transistores de radiofrecuencia

Todo parece indicar que en el futuro las técnicas de polarización variable de amplificadores para seguimiento de envolvente tendrán una gran importancia, especialmente la de modulación de la tensión de drenador, dado el elevado grado de eficiencia energética que es posible alcanzar con tales amplificadores. Es por ello que en la actualidad varios grupos de investigación de todo el mundo están trabajando en solventar los diversos problemas inherentes a la implementación de estas técnicas. Las mejoras de eficiencia que se logran con la polarización variable (sea de puerta o de drenador) por seguimiento de la envolvente son inferiores a las conseguidas mediante estructuras del tipo ‘transmisores polares’, pero actualmente su implementación presenta menos dificultades tecnológicas. Las técnicas de seguimiento de envolvente se basan en variar la tensión de puerta o la tensión de drenador del transistor del amplificador de potencia (generalmente del tipo LDMOS o GaAs) de modo que esta polarización variable se ajuste a lo requerido, es decir, al nivel de señal a amplificar. O sea, la polarización se ajusta según el valor la envolvente de la señal que se quiere amplificar y no toma un valor fijo y constante como es el caso de un amplificador clase-A. Algunas referencias interesantes donde encontrar valores experimentales de las mejoras de rendimiento energético obtenidas con estas técnicas son [5],[6].

Las envolventes correspondientes a muchas de las modulaciones digitales actuales, del tipo OFDM, suelen tener un elevado PAPR, esto es, hay una gran diferencia entre los valores de pico y el valor promedio de la señal. Por ejemplo, en el caso de modulaciones OFDM multiportadora la función de distribución de probabilidad acaba tendiendo a una señal de estadística gaussiana. Este elevado PAPR implica que sólo en ciertos instantes la señal alcanzará los extremos de funcionamiento marcados por la polarización del transistor

de potencia. Por tanto, se puede decir que durante gran parte de su funcionamiento el margen dinámico del amplificador está desaprovechado y podría ser inferior si la polarización también lo fuera, sin que esto implicara ningún recorte de los picos de la señal que se está amplificando.

Una solución para reducir el PAPR de las señales son las técnicas de *clipping*, que pretenden recortar/reducir el pico de tales señales para que se aproxime más al valor promedio y que de este modo no se desaproveche tanto el margen dinámico del amplificador. Y lo hacen cuidando de no deteriorar en exceso la linealidad de la señal. Otras soluciones son las basadas en amplificadores de polarización variable, cuyo esquema genérico puede verse en la Fig. 2. y que se comentarán a continuación.

B. Seguimiento de envolvente mediante polarización variable de puerta

En este caso la tensión de puerta se ajusta según el valor de la envolvente de la señal. Esto puede provocar fuertes variaciones de la ganancia. La implementación más lógica es hacerla mediante dispositivos procesadores que además de encargarse del cálculo de la tensión de puerta variable deseada también compensen los efectos no lineales mediante predistorsión digital [7]. La fuente de alimentación que se esté usando para la tensión de drenador no se ve afectada ni modificada para nada y puede seguir siendo la misma que se emplearía caso de tratarse de un amplificador convencional.

C. Seguimiento de envolvente mediante polarización variable de drenador

Se alcanzan niveles de eficiencia superiores al caso de la polarización variable de puerta. El inconveniente está en que tecnológicamente se requiere de fuentes de alimentación de salida variable eficientes (lo cual se consigue usando fuentes conmutadas) y que sean capaces de variar a alta velocidad ya que han de ser capaces de seguir el ancho de banda de la envolvente [5]. Este ancho de banda requerido puede llegar a ser de decenas de MHz.

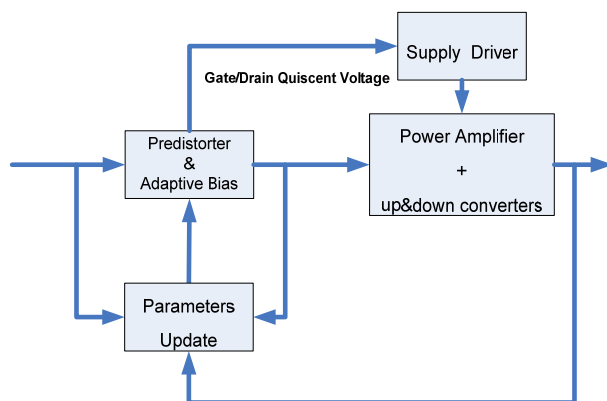


Fig. 2. Esquema de los subsistemas que conforman un amplificador con predistorsión digital y polarización variable (de puerta o drenador).

D. Necesidad del empleo de predistorsionadores en las técnicas de polarización variable

Tal como se ha comentado, la modificación de los puntos de trabajos de los transistores provoca efectos indeseados, siendo el más destacable la modificación de la ganancia del amplificador. Es decir, que para diferentes valores de la envolvente vamos a tener diferentes ganancias. Esto se puede solventar mediante un predistorsionador digital. Además, en amplificadores de señales con gran ancho de banda la posible presencia de no linealidades dinámicas (lo que se denomina como *nonlinear memory effects*, es decir efectos de memoria no lineales) hace que igualmente sea requerido el empleo de predistorsionadores más complejos [8]. En la práctica el procesador más adecuado para este tipo de implementaciones será un dispositivo FPGA, que deberá: 1) implementar el predistorsionador que ha de compensar las no linealidades propias del amplificador, 2) calcular la señal de polarización variable a partir de la información de la envolvente de la señal 3) compensar los efectos (p.e. ganancia variable) que la modificación de la polarización de los transistores pueda provocar.

V. TRANSMISORES POLARES

Los problemas actuales para la consecución de valores elevados de eficiencia en la transmisión de formatos de modulación multinivel o multiportadora, tratados en detalle en las secciones anteriores, vienen asociados al principio de funcionamiento que rige la propia arquitectura vigente: el transmisor Cartesiano o transmisor I/Q. Dado que la señal paso-banda a transmitir se conforma en bajo nivel, los amplificadores de potencia se ven forzados a manipular una señal con variaciones significativas de la envolvente, siendo evidentemente necesario ajustar su capacidad de potencia a los valores picos de la misma, y por lo tanto sobredimensionarles con respecto al nivel de potencia media que se desea radiar. En la medida en que la relación potencia pico – potencia promedio sea mayor, y menos probable la aparición de dichos máximos, menos será entonces la eficiencia promedio del amplificador, y con ella la de todo el transmisor.

Las técnicas de linealización intentan mejorar el compromiso eficiencia espectral - eficiencia de potencia, buscando lograr en general niveles de distorsión típicos de régimen pequeña señal cerca del punto de compresión de 1 dB. Sin embargo, esos "oasis" de linealidad, ya sean logrados mediante topologías de cancelación (realimentación, feedforward, predistorsión, etc.) o por un óptimo aprovechamiento de las particularidades de funcionamiento de los dispositivos (sweet-spots), sólo pueden conseguirse lejos de las condiciones en que el amplificador ofrece su máxima eficiencia. Las técnicas de adaptación de la polarización o la carga, tipo envelope tracking o Doherty, intentan sin embargo ajustar la capacidad de manejo de potencia del transistor al valor instantáneo de la envolvente, evitando la degradación brutal de la eficiencia que se produce cuando dichas condiciones se mantienen fijas, razón por la cual vienen recabando cada vez mayor atención en los mundos académico e industrial.

El transmisor polar, derivado de las técnicas de modulación por placa usadas en los principios de la radio, o del transmisor tipo Kahn (EER) [9], intenta sin embargo aprovechar las condiciones de operación en máxima eficiencia de los amplificadores (en este particular más o menos en la línea del LINC). En vez de trabajar con las componentes $i(t)$ y $q(t)$ de la envolvente, utiliza las componentes $A(t)$ y $\phi(t)$, lo que da lugar a su nombre. Tal y como se muestra en su esquema (ver Fig. 3), la portadora es modulada sólo con la componente de fase. Al tener una amplitud constante, dicha señal se puede amplificar con etapas de RF altamente eficientes operadas en modo conmutado (clases D^{-1} , E/E^{-1} ó F/F^{-1}). La componente de amplitud es amplificada a través de una rama independiente, donde usualmente se usa modulación PWM ó Σ - Δ , y reinsertada en la etapa final a través de la tensión en drenador o la impedancia de carga. Idealmente, este esquema podría asegurar la linealidad deseada con un 100% de eficiencia, pero como en cualquier solución de ingeniería, existen una serie de no idealidades que limitan su funcionamiento y por lo tanto su introducción [10].

A nivel de sistema es importante controlar la diferencia en demora entre las ramas AM y PM, así como garantizar un ancho de banda adecuado en ambas. Desde el punto de vista circuital, es imprescindible comprender las causas que dan origen a las no linealidades en la característica de modulación de amplitud (Vdd-AM) así como a una modulación parásita de fase (Vdd-PM). Los elementos más críticos en el diseño son el amplificador de RF conmutado así como el amplificador de envolvente, de los cuales depende la eficiencia global del transmisor. Atendiendo a las no idealidades del transmisor, y teniendo en cuenta que el ancho de banda de las componentes $A(t)$ y $\phi(t)$ sería en principio infinito, el transmisor polar suele implementarse a través de algún tipo de técnica híbrida EER/ET, donde se permiten ciertas variaciones de amplitud por la vía PM (usualmente asociadas a las transiciones por cero de la envolvente compleja). Por otro lado, se requiere acudir a técnicas de predistorsión digital, donde los efectos de memoria pueden ser significativos, para corregir las no linealidades de tipo residual [11].

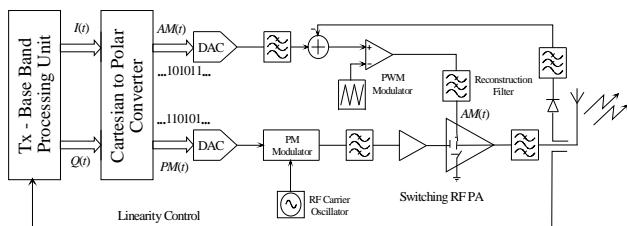


Fig. 3. Esquema simplificado de un Tx polar.

Las líneas de actuación en el diseño de amplificadores de RF conmutados de banda y sobre las nuevas tecnologías GaN HEMT, en el diseño de convertidores DC/DC de alta eficiencia y ancho de banda (combinando apropiadamente amplificación lineal y conmutada), así como las propias técnicas de predistorsión de las componentes de amplitud y fase centran la atención de las investigaciones actuales en relación a esta arquitectura emergente. Usando soluciones como las comentadas, parece posible obtener un 50% de

eficiencia en transmisores para estaciones bases [12] (prácticamente un orden de magnitud superior a las soluciones existentes).

VI. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una revisión de técnicas emergentes para la solución del compromiso linealidad – eficiencia en los transmisores de los sistemas inalámbricos modernos. Se ha puesto en consideración la importancia del tema, y se ha ofrecido una perspectiva de las líneas de investigación actuales, destacando las de los grupos implicados en la colaboración. Se han ofrecido además consideraciones sobre la evolución de dichas arquitecturas en el futuro.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo conjunto ha sido financiado fundamentalmente a través del Proyecto Coordinado TEC2008-06684-C03 (subproyectos 01, 02 y 03) del Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN) y FEDER. Además, el grupo de la U. Cantabria agradece la contribución del MICINN a través del Proyecto Consolider CSD2008-00068, y el grupo de la U. Zaragoza agradece el apoyo del Gobierno de Aragón para el Parque Tecnológico WALQA y al Proyecto Europeo EUWB.

REFERENCIAS

- [1] C. Sánchez, J. de Mingo, P. García, P. L. Carro, A. Valdovinos, "Memory Behavioral Modeling of RF Power Amplifiers", *IEEE Vehicular Technology Conference 2008 Spring. CD Proceedings*, Singapur, Mayo 2008.
- [2] C. Sánchez, J. de Mingo, P. García, P. L. Carro, A. Valdovinos, "Performance Evaluation of an Automatic Impedance Synthesizer based on RF Switches", *2009 IEEE 69th Vehicular Technology Conference: VTC2009-Spring. CD Proceedings*, Barcelona, 29 Abril 2009.
- [3] J. de Mingo, A. Valdovinos, "Performance of a New Digital Base-Band Predistorter Using Calibration Memory", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 50, No: 4, pp 1169- 1176, July 2001.
- [4] P. García, J. de Mingo, A. Valdovinos, A. Ortega, "An Adaptive Digital Method of Imbalances Cancellation in LINC Transmitter", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 54, No. 3 879-888. Mayo 2005.
- [5] J. Staudinger, R. Sherman and T. Quach, "Gate and Drain Power Tracking Methods Enhance Efficiency in Reverse Link CDMA Amplifiers", *Applied Microwave & Wireless*, 2006, Pages 28-38.
- [6] E. Cijvat, K. Tom, M. Faulkner et al. "A GaN HEMT Power Amplifier with Variable Gate Bias for Envelope and Phase Signals", *IEEE Norchip Conference*, 2007.
- [7] T. Fergus. "Improving Amplifier's Efficiency Using a Linearizer in Conjunction with Adaptive Bias Modulation", *RF Design*, October 2005, Pages 40-48.
- [8] P.L. Gilabert, A. Cesari, G. Montoro, E. Bertran et al. "Multi-Lookup Table FPGA Implementation of an Adaptive Digital Predistorter for Linearizing RF Power Amplifiers With Memory Effects", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, Vol. 56, No. 2, February 2008, Pages 372-384.
- [9] L. R. Kahn, "Single-Sideband transmission by envelope elimination and restoration," *Proc. IRE*, vol. 40, no. 7, pp. 803-806, Jul. 1952.
- [10] J. C. Pedro, J. A. García and P. M. Cabral, "Nonlinear Distortion Analysis of Polar Transmitters", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, Vol. 55, No. 12, pp. 2757-2765, Dec. 2007.
- [11] P. M. Cabral, J. C. Pedro, J. A. García and L. Cabria, "A Linearized Polar Transmitter for Wireless Applications", 2008 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Atlanta June 2008, pp. 935-938.
- [12] D. F. Kimball, J. Jeong, et al., "High-Efficiency Envelope-Tracking W-CDMA Base-Station Amplifier Using GaN HFETs," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, Vol. 54, No. 11, pp. 3848-3856, Nov. 2006.