



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

PhD Thesis

ADAPTIVE PRE-DISTORTION
FOR NONLINEAR HIGH POWER AMPLIFIERS
IN OFDM SYSTEMS

Author : Hugo Durney Wasaff

Advisor : Dr. Josep Sala Alvarez



**Signal Processing
& Communications**

Signal Processing and Communications Group
Department of Signal Theory and Communications
Universitat Politècnica de Catalunya

Barcelona, February 2004

Abstract

The rapid growth of wired and wireless broad-band communications and the pervasive use of spectrally efficient non-constant amplitude modulations, adopted in the framework of several standardized transmission formats, motivates and supports our present research in the field of non-linear distortion in communication systems.

The compensation of nonlinearities has received a lot of attention in past and recent years, presenting direct implications on industrial development of last generation communication technologies. New digital transmission systems, particularly those based on Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), feature high spectral efficiency as they exploit multilevel linear modulations to transmit at high information rates in combination with a dense allocation of a large number of (ideally) orthogonal sub-carriers in a relatively reduced bandwidth. As a result, problems such as adjacent channel interference and non-linear distortion become critical for system performance and, therefore, must be reduced to a minimum. Moreover, numerous applications of such transmission schemes are already operative in the field of satellite and mobile communications, where power efficiency is of primary concern due to, among other reasons, operation autonomy of the equipment and effective transmitted power.

In this context, the non-linear behaviour of high power amplifiers (HPAs) constitutes a major impairment for OFDM-based digital communications systems. The compensation of these harmful effects can be achieved using a variety of techniques that have been proposed and widely dealt with in the literature. Among these techniques, digital pre-distortion, which can be carried out at a very low cost over the discrete base-band information, provides optimal features for the efficient implementation of adaptive linearization. Thence, in order to provide good conditions for the reliable use of high spectral efficiency modulations while taking the maximum advantage from the transmitting power budget, it is necessary to incorporate a suitable linearization technique.

In the present work, we begin by reviewing in chapter 1 some background on linearization techniques. This leads us to continue analyzing, in chapter 2, two relevant theoretical models typically used in characterizing memory and memoryless nonlinear HPAs. In addition to this, throughout chapters 3 and 4, a generic OFDM system and signal structure is described in detail by including the non-linear effect in the analytical model of the transmission chain. This is done in order to formalize an exact discrete OFDM model that could help us in achieving a deeper understanding of the phenomenon under consideration. Then, in chapter 5, some useful statistical properties and parameters associated to the nonlinear distortion are examined as well as the application of a CDF-based estimation of nonlinearities which is proposed as a new pre-distortion strategy. Finally, in chapters 6 and 7, a new discrete adaptive pre-distortion scheme is formulated and then tested via simulation. The analysis and design of the main algorithm therein proposed, considers the

adaptive identification of the inverse complex gain characteristic of a nonlinear HPA. For this purpose, an iterative 2-D optimization of a reduced number of interpolation functions is formulated under a special two-fold criterion which accounts for the particular morphology of the HPA's nonlinear gain characteristic, as well as the probability distribution of the input base-band information.

Resumen

El acelerado crecimiento de las comunicaciones a través de plataformas de transmisión en banda ancha por vía alámbrica e inalámbrica, sumado al uso cada vez más extenso de modulaciones de amplitud no constante que, debido a su alta eficiencia espectral y bajo coste de implementación, han sido adoptadas en el marco de desarrollo de diversos estándares de transmisión, son aspectos que han servido de soporte y motivación fundamental para el presente trabajo de investigación en el campo de la compensación de distorsiones no lineales en sistemas de comunicación.

El estudio de los efectos de la distorsión no lineal y su compensación ha sido desde hace ya muchos años objeto de atención para investigadores de diversas áreas. Hoy, en particular, este estudio sigue siendo fundamental ya que se encuentra directamente implicado en el desarrollo de tecnologías de última generación en el área de las comunicaciones. Los nuevos sistemas de transmisión digital, en especial aquellos basados en OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), son capaces de ofrecer altos niveles de eficiencia espectral utilizando modulaciones lineales multinivel sobre un numeroso conjunto de subportadoras que, al ser (idealmente) ortogonales en frecuencia, pueden ser ubicadas en un ancho de banda muy reducido permitiendo así transmitir elevadas tasas de información por segundo y por ancho de banda. Sin embargo, y a consecuencia de esto, problemas como las interferencias por canal adyacente o la presencia de una distorsión no lineal en la cadena de transmisión afectan de manera crítica las prestaciones de estos sistemas imponiendo severos límites a su viabilidad. De hecho, en el campo de las comunicaciones móviles y satelitales, existen actualmente diversas aplicaciones donde estos esquemas de modulación y multicanalización están ya operativos. En estos casos, la eficiencia de potencia en transmisión resulta primordial para, entre otras razones, lograr una máxima autonomía del equipamiento.

En este contexto, el comportamiento no lineal de los amplificadores de alta potencia utilizados en transmisión de RF, constituye el principal obstáculo (desde el punto de vista de la distorsión no lineal) para el buen funcionamiento de los sistemas de comunicación digital basados en OFDM. Afortunadamente, este nocivo efecto puede ser compensado mediante diversas técnicas clásicas de linealización cuyas variantes ‘ad-hoc’ han sido propuestas y ampliamente investigadas, existiendo al día de hoy una nutrida literatura parte de la cual referimos a lo largo de este trabajo. Entre dichas técnicas, la *pre-distorsión digital* ofrece óptimas condiciones para el diseño de linealizadores adaptativos ya que puede ser implementada a muy bajo coste sobre la información discreta de las señales de banda base. El objetivo que se persigue, en general, es el de proveer las condiciones de linealidad necesarias para explotar las capacidades propias de las modulaciones de alta eficiencia espectral, y al mismo tiempo alcanzar un máximo aprovechamiento de la potencia disponible.

En el presente trabajo, efectuamos inicialmente una revisión sintetizada de algunas importantes técnicas de linealización para luego dar paso a una revisión más detallada de dos modelos relevantes utilizados para caracterizar el comportamiento no lineal de los amplificadores de alta potencia (modelo de Series de Volterra y modelo de Saleh para amplificadores no lineales sin memoria). Junto con ello se examinan algunas interesantes propiedades estadísticas asociadas al fenómeno de la distorsión no lineal que han dado pie a considerar durante la investigación posibles nuevas aplicaciones en estrategias de pre-distorsión. Se ha querido también incluir la descripción, a nivel de sistema y modelo de señal, de un esquema de transmisión OFDM genérico incluyendo caracterizaciones analíticas detalladas del efecto no lineal a objeto de formalizar en propiedad un modelo discreto exacto que otorgue una visión más profunda para la comprensión del fenómeno. Finalmente se presenta el diseño y evaluación de un esquema de pre-distorsión basado en un algoritmo iterativo que considera, como principal aporte, la optimización bidimensional de un reducido número de coeficientes de interpolación que identifican de manera adaptativa la característica inversa de ganancia compleja de un amplificador, tanto en función de la particular morfología no lineal de dicha curva, como también de la distribución de probabilidad de la señal muestreada.

Acknowledgements

Certainly, a single page is not enough to thank all the good friends I have made during these years in Barcelona, both inside as well as outside of UPC. However, considering how eagerly some of them have been waiting for the completion of this thesis, I have committed myself to brevity in writing this page and hope that I can find other ways of letting everyone know how grateful I am for their friendship and support. Now, in order to avoid being too formal, in these acknowledgements I will use Spanish, as it is the language in which I first learned to say thanks.

Quiero expresar, en primer lugar, mi sincero reconocimiento a Josep Sala Alvarez, a quien he tenido la suerte de tener como tutor y director de tesis durante todos estos años. Su apoyo ha sido permanente y fundamental, destacando no solo por contar con su admirable solidez académica, sino también por haber demostrado una voluntad pedagógica siempre amable y dispuesta a compartir conocimientos y atender mis dudas cada vez que ha sido necesario.

Por otra parte, la redacción de esta tesis en inglés ha resultado ser un reto muy enriquecedor para el cual he contado con la inestimable y paciente ayuda de Camilo Chang Dorea quien, durante larguísimas jornadas a cambio de un imperdonable café instantáneo, ha actuado como mi editor-in-chief revisando detalladamente cada texto. Só posso dizer muito obrigado meu amigo.

Y, aunque restringiéndome a lo meramente teórico no puedo expresar mi amistad, quisiera destacar la asistencia recibida en diversos temas de procesado de señales de Carles Fernandez Prades y Maribel Madueño Ruiz (moltes gràcies a tots dos companys) y además agradecer el camino académico y desafíos compartidos con mi colega Fernando Ulloa Vasquez. Llegado este punto, honestamente, el temor a omitir siquiera un solo nombre de aquella gran lista de amig@s, compañer@s y personas que, de alguna u otra manera, no solamente me han apoyado en este proceso sino que han hecho de ésta una época indudablemente feliz, me obliga a recurrir a la incómoda metáfora del agradecimiento implícito. Sin embargo, más allá de estas líneas, estoy seguro de que, a través del tiempo sabré encontrar las palabras para cada uno de ellos, sin excepción ni excusas.

Quisiera, finalmente, agradecer a la Universidad Tecnológica Metropolitana de Chile, por la oportunidad y confianza otorgadas a través de la beca de perfeccionamiento que, por sobre todo, me ha dado la satisfacción de creer en la vida académica como una alternativa de permanente evolución, desde la cual es posible aportar a objetivos definitivamente más humanos.

H.D.W.

Contents

1	Introduction	1
1.1	Overview of Linearization Techniques	4
1.1.1	Cartesian Loop Feedback (CLFB).	4
1.1.2	Feedforward (FF).	5
1.1.3	Envelope Elimination and Restoration	6
1.1.4	LINC and CALLUM.	7
1.1.5	Pre-Distortion.	8
2	Non-linear models for High Power Amplifiers	13
2.1	Volterra Series Model for Memoryless Non-linearities	14
2.2	High Level HPA Model for Simulations	20
2.2.1	The Memoryless Saleh Model for TWT HPAs	21
2.2.2	Comments on Invertibility	27
3	Signal Model and System Definitions	31
3.1	General System Description	31
3.1.1	OFDM Signal Generation	32
3.1.2	Guard Time and Cyclic Extension	35
3.1.3	Oversampling	38
3.2	Analysis of the Frequency Domain Representation of the Signal	41
3.2.1	Analog Spectral Representation	41
3.2.2	Spectral Modeling of the Non-Linear Transference	43
3.3	Schemes for Discrete Domain Representation	50

3.3.1	Preliminary discussion	51
3.3.2	Time–Frequency definitions and discrete signal structure.	53
3.3.3	D/A Conversion	58
3.4	Exact Equivalent Discrete Model for Transmission	64
3.A	Appendix:Discrete-analog windowing representation.	76
3.B	Appendix: DFT Properties and Fractional shift Synthesis	78
3.C	Appendix: Diagonality of S	81
4	Signal and System Model with Non-Linear Distortion	85
4.1	Equivalent Framing Structures for Reception	85
4.2	Signal Model for the Non-linear Processing Chain	87
4.2.1	Non Linear System Structure and Definitions	87
4.2.2	Spectral Modeling for the Non-linear Transference (discrete equivalent)	89
4.2.3	Signal model from the HPA output up to DFT demodulator	91
4.A	Appendix: General Properties for Periodically Extended Sequences	97
5	Statistics of the Nonlinear Distortion	99
5.1	Simplified model including time delay	99
5.2	Statistics of distortion and clipping effect	101
5.2.1	Clipping characterization	103
5.3	CDF based Pre-distortion	109
5.3.1	Identification of AM/AM Pre-Distortion	109
5.3.2	Identification of AM/PM Pre-Distortion	110
5.3.3	CDF Estimation using Order Statistics	110
5.3.4	CDF based digital pre-distortion	114
5.A	Appendix: Clipping error bound	117
6	Pre/Post-Distortion Algorithms	119
6.1	Adaptive scheme for PD, basic definitions	119
6.1.1	Basic schemes for PD estimation: Pre-distortion vs. Post-distortion	120

6.1.2	Pre/post distortion block definition	122
6.1.3	Definition of activation functions	123
6.1.4	PD gain based on linear interpolation	129
6.1.5	Optimum PD set calculation	131
6.2	Advanced adaptive strategies for PD	135
6.2.1	Optimization of centroid distribution	139
6.2.2	ELASTIC centroid allocation algorithm	143
6.A	Appendix: Gradient for centroid allocation	146
6.B	Appendix: PDF-based centroid allocation	149
6.C	Appendix: ELASTIC, preliminary test	151
6.D	Appendix:Equivalent error signals for PD estimation	158
7	Simulations and Commented Results	161
7.1	Simulation schemes	161
7.2	Simulation Results	168
8	Conclusions and Future Work	191

