

REZUMATUL
tezei de doctorat
**Metode de reducere a PAPR în sistemele de
comunicații bazate pe OFDM**
autor: ing. Eugen Victor Cuteanu

mai 2014

Tehnologiile tot mai performante, concepute în ultima perioadă, au permis o expansiune continuă a comunicațiilor electronice, prin intermediul canalelor radio terestre și celor prin satelit, dar și o creștere permanentă a vitezelor de transmitere a semnalelor în format digital. Una din soluțiile adoptate în dezvoltarea sistemelor de comunicații este multiplexarea ortogonală cu divizare în frecvență (OFDM). Acestea presupun utilizarea mai multor subpurtoare, a căror frecvențe sunt astfel alese încât interferența dintre acestea să fie minimă, oferind posibilitatea transmiterii în paralel a mai multor informații cu o eficiență spectrală foarte mare.

Multitudinea de subpurtoare din componența simbolului OFDM face ca reprezentarea în domeniul timp a acestuia să aibă aspectul unui semnal de zgomot, a cărui amplitudine are densitatea de probabilitate de tip Rayleigh. Din acest motiv, semnalul OFDM prezintă vârfuri sporadice, de amplitudine mult mai mare față de nivelul mediu al acestuia.

Pentru a asigura legături radio pe distanțe mari, transmițătorul trebuie să efectueze o amplificare în putere a semnalului modulat. În mod evident, această operație necesită utilizarea unor dispozitive amplificatoare cu un grad mare de liniaritate, ce admit o gamă largă de valori atât pentru intrare cât și pentru ieșire. Dificultatea realizării unor asemenea circuite amplificatoare, dar și costul ridicat al acestora, reprezintă o constrângere foarte importantă în proiectarea transmițătoarelor. Astfel, caracterul parțial neliniar al funcției de transfer și domeniul de valori finit admis pentru amplitudinea semnalului, conduc la apariția distorsiunilor neliniare. Una din soluțiile pentru contracararea acestor probleme este de a reduce a raportului dintre valoarea maximă și valoarea medie a puterii (PAPR), utilizând diferite tehnici de prelucrare numerică a semnalului. Funcție de modul de prelucrare a semnalului, tehnicile de reducere a PAPR se caracterizează prin diferite aspecte precum: neliniaritatea transformării aplicate simbolurilor OFDM, numărul de operații necesare la transmițător sau receptor, tipul și cantitatea de informație auxiliară transmisă la receptor, distorsiuni.

Principalele tehnici cu prelucrare de tip liniar sunt: 'Selective Mapping' (SLM), 'Partial Transmit Sequence' (PTS), 'Tone Reservation' (TR), 'Tone Injection' (TI) și 'Active Constellation Extension' (ACE). Acestea efectuează modificări ale amplitudinii sau fazei vectorilor modulatori ai subpurtoarelor de date sau a celor rezervate, pentru a obține reprezentări diferite ale aceluiași simbol OFDM. Dat fiind caracterul aleatoriu al modificărilor de fază efectuate de primele două tehnici enumerate, receptorul este nevoit să utilizeze un algoritm de căutare care să identifice secvența de fază utilizată de către receptor. Din acest motiv, în unele cazuri, se recurge la transmiterea unor informații auxiliare, în baza cărora receptorul poate să refacă semnalul inițial cu un număr mai mic de iterații. Un inconvenient al acestor tehnici, este faptul că eficiența de reducere a PAPR este în mod direct dependentă de numărul de reprezentări alternative ale semnalului util, considerate de către algoritmul utilizat. Mai mult, aceste soluții prezintă și un fenomen de saturare, în sensul că de la un anumit număr, orice creștere suplimentară a numărului de reprezentări alternative ale semnalului original, nu mai aduce nici un câștig în ceea ce privește estomparea vârfurilor de semnal.

Cealaltă categorie, a tehnicilor cu prelucrare de tip neliniar, reținează diminuarea PAPR fie prin limitarea propriu-zisă a amplitudinii vârfurilor de semnal (clipping), fie prin aplicarea unei transformări neliniare, care să conducă la modificarea raportului dintre amplitudinea maximă și nivelul mediu al semnalului (compresie). Este evident faptul că aceste soluții permit reducerea PAPR oricât de mult, însă doar cu prețul unor degradări semnificative ale performanțelor BER.

Astfel, fiecare dintre aceste tehnici de reducere a PAPR prezintă unele constrângeri sau limitări, ce au un impact diferit asupra performanțelor întregului sistem de comunicații. Din acest motiv, în dezvoltarea sistemelor de comunicații, în unele cazuri, funcție de puterea de

procesare sau caracteristicile canalului de comunicații, algoritmi de reducere a PAPR trebuie configurați să lucreze la parametri suboptimali, pentru a nu afecta performanțele globale ale transmisiei.

În cadrul acestei teze, au fost propuse și studiate câteva soluții alternative, care fie să îmbunătățească eficiența de reducere a PAPR, fie să diminueze degradarea performanțelor BER datorate prelucrării neliniare, acolo unde este cazul. În acest sens, au fost dezvoltate următoarele tehnici derivate: compresie utilizând noi funcții neliniare, compresie adaptivă funcție de caracteristicile semnalului, ACE cu modificarea punctelor din constelație prin compresie graduală și TR cu gruparea subpurtătoarelor auxiliare. De asemenea, pentru îmbunătățirea eficienței de reducere a PAPR au fost propuse câteva tehnici hibride, obținute prin combinarea a două dintre tehnicile standard menționate anterior. Nu în ultimul rând, pentru a pune în evidență importanța temei, am efectuat o analiză a diferitelor tipuri de amplificatoare, arătând legătura dintre pragul de limitare și caracteristicile semnalului de intrare.

Lucrarea de doctorat este structurată pe șase capitole după cum urmează:

În primul capitol se prezintă câteva informații preliminare precum și motivația de la care s-a pornit cercetarea în acest domeniu. Apoi se prezintă pe scurt conținutul următoarelor capitole, precum și lista lucrărilor în baza cărora s-a scris lucrarea.

În al doilea capitol se oferă câteva informații și noțiuni de bază referitoare la sistemele de comunicații de tip OFDM. Se prezintă structura și principalele relații matematice ce caracterizează sistemele de comunicații ce utilizează acest tip de modulație multiportătoare. De asemenea, se prezintă modul în care sunt contracarate unele dintre problemele datorate distorsiunilor și interferențelor din canalele prin care aceste echipamente trebuie să comunice.

La începutul celui de-al treilea capitol, sunt prezentate cele mai uzuale clase de amplificatoare și principalele tehnici electronice de compensare a neliniarităților funcției de intrare-iesire, ce caracterizează aceste dispozitive. Apoi, sunt prezentate câteva dintre modelele matematice utilizate pentru a descrie funcția de transfer a amplificatoarelor cu și fără atenuare după punctul de saturație, ce nu prezintă efect de memorie. Pentru cazul în care efectul de memorie poate fi neglijat, s-a elaborat o analiză detaliată a legăturii dintre proprietățile semnalului și câteva dintre caracteristicile tipice amplificatorului. Astfel, ținând cont de factorul de amplificare liniară, s-a evaluat puterea semnalului de ieșire în absența limitării, precum și puterea semnalului de eroare. Cu ajutorul raportului dintre aceste mărimi s-a arătat cum crește eroarea introdusă de către dispozitivul de amplificare funcție de nivelul semnalului de intrare. Pentru a pune în evidență importanța evitării efectului de atenuare după punctul de saturație ale amplificatoarelor de tip Saleh, s-a evaluat raportul dintre puterea semnalului de la ieșirea acestui dispozitiv și puterea semnalului de ieșire, corespunzătoare modelului liniar-limitator luat ca referință. Acest aspect a fost analizat și din perspectiva raportului dintre semnalul diferență și semnalul de la ieșirea aceluiași model de amplificator liniar cu limitare. Un caz aparte este cel al amplificatoarelor de tip Rapp, a căror funcție de transfer în amplitudine se apropie cel mai mult de modelul liniar-limitator. Evaluând rapoartele menționate funcție de parametrul variabil al modelului Rapp, am putut arăta că în unele situații ponderea blocului de predistorsionare descrește, caz în care reducerea PAPR rămâne principala soluție în diminuarea efectelor neliniare. O atenție deosebită a fost acordată și evaluării raportului semnal-zgomot, în prezența distorsiunilor neliniare, funcție de mărimile introduse. Generalizând modelul de calcul propus de Ochiai, am putut arăta dependența dintre raportul semnal-zgomot cu distorsiuni (SNDR) și raportul semnal-zgomot (SNR) caracteristic canalului Gaussian, funcție de factorul de amplificare liniară. Cu ajutorul mărimii SNDR generalizate am arătat cum se modifică rata erorii de bit și capacitatea canalului funcție de nivelul semnalului și factorul de amplificare liniară. La final, sunt prezentate succint și câteva dintre modelele matematice, utilizate pentru descrierea funcției de transfer a amplificatoarelor ce prezintă efect de memorie.

În al patrulea capitol, după o scurtă clasificare a tehnicilor existente, se introduc mărimile statistice ce permit evaluarea eficienței de reducere a PAPR. Apoi pentru fiecare dintre tehnicile standard de reducere a PAPR, se prezintă structura algoritmului de prelucrare a semnalului, și câteva rezultate numerice. Astfel, pentru fiecare dintre aceste tehnici s-a evaluat distribuția cumulativă complementară a amplitudinii eșantioanelor de semnal funcție de PAPR, rata erorii de bit, funcție de raportul semnal-zgomot, atât pentru canalul Gaussian cât și pentru un caz particular de canal cu interferențe, pentru diferite valori ale parametrilor specifici algoritmilor utilizați. De asemenea s-au reprezentat variațiile spectrului de semnal introduse de unii dintre aceste algoritmi, acolo unde era cazul. Tot în cadrul acestui capitol, sunt prezentate și tehnicile derivate, ce au fost dezvoltate în cadrul cercetării. Una dintre

acestea, este o tehnică TR cu grupare de subpurtătoare, ce presupune o creștere parțială a spațiului de căutare, dat de combinația dintre subpurtătoarele adiționale și valorile admise pentru acestea. O altă tehnică derivată propusă, este ACE cu deplasarea graduală a punctelor marginale ale constelației, utilizând compresia semnalului. Această soluție presupune înlocuirea utilizării ponderii controlate a semnalului diferența de limitare din cadrul algoritmului 'Smart Gradient Projection' (SGP), cu o compresie progresivă a semnalului. Prin simulări, se arată ca în cazul unei limitări superioare a domeniului extins de valori corespunzător punctelor marginale ale constelației, noul algoritm ACE are o performanță mai bună. Contribuții importante au fost aduse în domeniul compresiei semnalului în domeniul timp. În cadrul secțiunii dedicate acestei tehnici de reducere a PAPR, sunt prezentate câteva funcții neliniare noi, ca alternativă la cele considerate anterior. Dintre acestea, o funcție de compresie importantă este raportul de polinoame de ordinul întâi, care prezintă avantajul simplității computaționale și a unor performanțe similare cu legea- μ sau funcția exponențială. Celelalte funcții propuse, precum inversul sinusului hiperbolic generalizat, funcția logistică generalizată, sau funcția de tip logaritm-în-logaritm, prezintă îmbunătățiri din punctul de vedere al eficienței de reducere a PAPR sau al performanțelor BER. Pornind de la premisa că nu toate simbolurile OFDM au același PAPR, au fost elaborate și propuse două tehnici adaptive de compresie, ce presupun utilizarea unui set de funcții neliniare, ce a fost obținut prin modificarea valorii unor parametri suplimentari, a formei generalizate a funcțiilor propuse. Simulările au arătat că aceste tehnici de compresie adaptivă prezintă o îmbunătățire a eficienței de reducere a PAPR sau a ratei erorii de bit. Dat fiind faptul că în urma aplicării acestei tehnici, densitatea de probabilitate a modului eșantioanelor de semnal se modifica foarte mult, am efectuat și o analiză statistică teoretică a semnalului OFDM compandat. Astfel, în cadrul unei secțiuni dedicate, am calculat dependența diferitelor mărimi statistice ale semnalului funcție de parametrii de control pentru două dintre funcțiile de compresie propuse. O primă parte este dedicată analizei statistice de ordinul întâi, unde este arătată dependența amplitudinii medii, a puterii medii și a varianței semnalului util, funcție de parametrul de control al funcțiilor de compresie, raport de polinoame de ordinul întâi, respectiv inversul sinusului hiperbolic generalizat. Tot în cadrul acestei subsecțiuni, am arătat cum depinde eficiența de reducere a PAPR funcție de parametrul funcției de compresie. Următoarea subsecțiune este dedicată analizei statistice de ordinul doi, unde am evaluat mărimile 'rata de trecere peste un prag dat', respectiv 'durata medie a unui impuls de semnal', funcție de aceeași parametrii de control a funcției de compresie. În urma acestei evaluări, s-a putut arăta că durata și densitatea impulsurilor se modifică funcție de gradul de compresie, fapt ce poate influența regimul de funcționare al amplificatorului de putere.

În capitolul cinci se pun în evidență diferențele limitări ale fiecăreia dintre tehnicile standard considerate. În funcție de aceste limitări, sunt indicate criteriile în baza cărora se pot alcătui tehnici hibride, care să conducă la o îmbunătățire a eficienței de reducere a PAPR. Apoi, sunt propuse mai multe tehnici compuse, care sunt grupate pe trei categorii, funcție de tipul de prelucrare a semnalului implicat. Pentru fiecare dintre acestea, se prezintă curbele ce indică eficiența de reducere a PAPR pentru diferite valori ale parametrilor caracteristici. De asemenea, se evaluează performanțele BER atât pentru canalul cu zgomot alb Gaussian (AWGN), cât și pentru un model de canal cu interferențe, aceste curbe având o deosebită importanță în evaluarea distorsiunilor introduse de către algoritmi, ce conțin și blocuri cu prelucrare neliniară. Pentru tehnicile care implică modificarea formatului simbolului OFDM, se prezintă și densitatea spectrală de putere, pentru a putea aprecia extinderea lățimii de bandă a semnalului. Dat fiind faptul că tehnicile neliniare modifica semnalul în domeniul timp, am utilizat metode de calcul numeric pentru aprecierea densității de probabilitate a amplitudinii semnalului prelucrat. Cu ajutorul acestor diagrame, s-a putut arăta modificările aduse de tehnica de reducere a PAPR asupra vârfurilor de semnal, sau asupra nivelului mediu al acestuia. Nu în ultimul rând, pentru fiecare dintre aceste tehnici hibride se evaluează complexitatea computațională, pentru un caz particular de procesor de semnal. Această mărime are un rol important în alegerea parametrilor algoritmilor considerați, în special în cazurile când aceștia efectuează o prelucrare liniară de tip iterativ, ce implică calculul transformatei Fourier.

În ultimul capitol, este prezentat un rezumat succint al rezultatelor obținute și sunt subliniate contribuțiile personale din cadrul acestei teze. La final, sunt trecute în revistă posibile direcții pentru o viitoare cercetare a subiectului tratat în cadrul acestei teze.

În urma elaborării acestei teze, principalele contribuții aduse în domeniul reducere PAPR a semnalelor OFDM sunt:

- ▶ În capitolul 3, s-au evaluat diferite mărimi specifice semnalului OFDM funcție de pragul de limitare al amplificatorului și factorul de amplificare liniară al acestuia. Dintre acestea, cele mai importante mărimi sunt: semnal-zgomot de limitare, puterea de eroare în raport cu puterea semnalului de la ieșire, raportul semnal-zgomot-cu-distorsiuni, obținut prin generalizarea modelului propus de Ochiai.
- ▶ În capitolul 4, s-au propus câteva tehnici derivate de reducere a PAPR, precum și soluții alternative pentru transmiterea informației auxiliare.
 - În secțiunea 4.4 se propune utilizarea variației de fază pentru a încorpora informația auxiliară în subpurtătoarele de date, pentru cazul în care tehnica SLM se aplică unui semnal modulat conform constelației de puncte de tipul M-QAM.
 - În secțiunea 4.7 este propusă o tehnică TR derivată, ce permite o îmbunătățire a eficienței de reducere a PAPR prin extinderea spațiului de căutare.
 - În secțiunea 4.8 se prezintă eficiența de reducere a PAPR când tehnica de tip JT utilizează un nou tip de constelație extinsă.
 - Pentru îmbunătățirea eficienței de reducere a PAPR, în secțiunea 4.9 este sugerată utilizarea transformatei Hadamard cu ordonare generică, conform principiului de întrețesere a eșantioanelor.
 - În baza simulărilor de tip Monte Carlo, în secțiunea 4.10 se arată că eficiența de reducere a PAPR a tehnicii clipping poate fi îmbunătățită, dacă eșantioanele de la ieșirea filtrului de semnal sunt rePLICATE la intrare.
 - Pentru tehnica de compresie a semnalului, în secțiunea 4.11 s-a propus utilizarea unor funcții neliniare noi. Rezultatele numerice obținute în urma simulărilor arată avantajele utilizării acestor funcții.
 - Totodată, în secțiunea 4.11.1 sunt propuse tehnici de compresie adaptivă ce permit o îmbunătățire suplimentară a eficienței de reducere a PAPR sau a performanțelor BER.
 - Secțiunea 4.11.2 este dedicată analizei statistice de ordinul întâi și doi a semnalului comprimat. Utilizând calculul analitic și numeric, se arată cum se modifică diferitele mărimi statistice funcție de variația unor parametrii caracteristici, incluși în expresiile algebrice ale funcțiilor neliniare propuse.
 - Secțiunea 4.12 este dedicată diferitelor tehnici de tip ACE și a diferitelor modalități de control a domeniului de valori extins admis, pentru punctele marginale din constelația de puncte. După prezentarea variantelor clasice reprezentate de algoritmii POCS și SGP, se prezintă o soluție alternativă (CGP) care realizează proiecția punctelor marginale înspre exteriorul constelației, funcție de rezultatul obținut în urma compresiei de semnal. Cu ajutorul simulărilor, se arată că în condițiile în care domeniul de valori extins corespunzător punctelor marginale are o limită superioară, noul algoritm propus, prezintă o degradare mai mică a performanțelor BER în comparație cu algoritmii SGP.
- ▶ În capitolul 5 sunt propuse câteva tehnici hibride, ce sunt împărțite pe trei grupe, funcție de tipul de prelucrare de semnal corespunzător: exclusiv liniar, mixt, respectiv doar neliniar.
 - Astfel, secțiunea 5.2 este dedicată tehnicilor compuse, care implică atât metode liniare cât și metode neliniare de prelucrare a semnalelor.
 - Cu ajutorul diagramelor CCDF obținute în urma simulărilor, este pusă în evidență îmbunătățirea eficienței de reducere a PAPR corespunzătoare acestor soluții alternative.
 - De asemenea, avantajele acestor tehnici combinate sunt puse în evidență și prin intermediul diagramelor BER(SNR) pentru canalul AWGN cât și pentru un model de canal cu interferențe.
 - Pentru fiecare dintre aceste soluții, s-a evaluat și complexitatea computațională, pentru a pune în evidență încărcarea de procesor de semnal, ce poate fi evitată, dacă se optează pentru utilizarea soluțiilor hibride.
 - Totodată, în secțiunea 5.2.2 este propusă o nouă modalitate de a transmite informația adițională necesară tehnicii PTS, folosind

- grupe de subpurtătoare adiționale, astfel modulate încât să nu altereze procesul de reducere a PAPR.
- În secțiunea 5.3 sunt prezentate rezultatele numerice corespunzătoare tehnicilor cu prelucrare exclusiv liniară.
 - Cu ajutorul curbelor CCDF din secțiunea 5.3.1 se arată că eficiența de reducere a PAPR poate fi îmbunătățită, în condițiile în care doar una dintre tehnicile componenete, SLM sau TR, realizează un număr considerabil de iterații.
 - În secțiunea 5.3.2 este propusă tehnica hibridă de tip ACE-TR, în vederea îmbunătățirii eficienței de reducere a PAPR, evitând totodată o creștere exagerată a numărului de operații.
 - În secțiunea 5.4 se studiază tehnica compusă de tipul clipping-compresie.
 - Se arată dependența curbelor CCDF(PAPR) și BER(SNR) funcție de variația pragului de limitare și a unor parametrii specifici legilor de compresie considerate.
 - Avantajul utilizării funcției neliniare de tipul raport de polinoame de gradul întâi, este evidențiat și din perspectiva complexității computaționale.