

Pregled postojećih DPD modela sa ograničenom širinom propusnog opsega

Tamara Muškatirović-Zekić, *Elektrotehnički fakultet Beograd, Regulatorna agencija za elektronske komunikacije i poštanske usluge*, Milan Čabarkapa, *Elektrotehnički fakultet Beograd*, Nataša Nešković, *Elektrotehnički fakultet Beograd*, Đurađ Budimir, *University of Westminster, London*

Apstrakt—Novi zahtevi za sve bržim i pouzdanijim servisima i uslugama putem mobilnih mreža dovode do potrebe za razvijanjem sofisticiranijih tehnika digitalne predistorzije (DPD) pojačavača (*power amplifier* - PA). Stoga je u ovom radu dat pregled postojećih DPD modela sa ograničenom širinom propusnog opsega (*band-limited* DPD). Ukratko su opisana predložena rešenja za *band-limited* DPD i data je njihova komparativna analiza. Takođe je izvedena i analiza kompleksnosti predloženih modela.

Ključne reči— *band-limited* DPD, PA, LDMOS Doherty PA, LTE, PAPR, MIMO, mMIMO.

I. UVOD

SVE je veći broj pametnih uređaja koji se putem mobilnih mreža nove generacije (4G i 5G) povezuju na Internet, pružajući korisnicima nove servise i istovremeno povećavajući potrebu za prenosom velike količine podataka, velikim brzinama. Očekuje se da će 5G pristupne mreže zahtevati signale širokog propusnog opsega, reda stotinak MHz, pa sve do nekoliko GHz [1]. Usled porasta propusnog opsega (*bandwidth*), povećavaju se i zahtevi koji se stavljaju pred pojačavač (PA), koji predstavlja najveći potrošač u predajniku, i DPD (*Digital PreDistortion*) sistem koji se koristi u cilju održavanja linearnosti i poboljšanja efikasnosti rada PA.

Kod konvencionalnih DPD sistema, potrebna širina propusnog opsega je minimum 5 puta veća od širine signala, kako bi se kompenzovala nelinearna distorzija usled širenja spektra. Razlog je taj što većina *predistorted* signala obuhvata pored osnovne komponente i intermodulacione proizvode trećeg i petog reda [2]. Tako se za signal širine 500 MHz dobija zahtevana širina propusnog opsega od 2500 MHz, odnosno brzina odabiranja DAC i ADC od 3200 Msps, za vrednost roll-of faktora od 0.28 [3]. Konvertori sa ovako velikim brzinama odabiranja su izuzetno skupo i energetski neisplativo rešenje. Cilj je realizovati širokopojasni DPD sa

Tamara Muškatirović-Zekić – Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija; Regulatorna agencija za elektronske komunikacije i poštanske usluge, Palmotićeva 2, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: tamara.muskatirovic@ratel.rs)

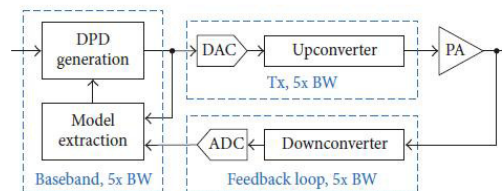
Milan Čabarkapa – Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: milan.cabarkapa@gmail.com)

Nataša Nešković – Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: natasha@etf.rs)

Đurađ Budimir – Wireless Communications Research Group, University of Westminster, London W1W 6UW, U.K. (e-mail: d.budimir@wmin.ac.uk).

A/D konvertorom male brzine (*low-speed* ADC).

Na slici 1 je prikazana blok šema konvencionalnog DPD sistema.



Sl. 1. Konvencionalni DPD sistem [3].

II. DPD SISTEMI SA OGRANIČENOM ŠIRINOM PROPUSNOG OPSEGA

Većina istraživača se fokusirala na smanjenje širine propusnog opsega u povratnoj grani.

U [4] i [5] je predložen *band-limited* DPD model koji rešava problem širine propusnog opsega u Tx i povratnoj grani. Kod ovog modela je *band-limiting* funkcija ubačena u Volterra operator u DPD modelu, kako bi se kontrolisala širina propusnog opsega izlaznog signala. *Band-limited* Volterra operator p -tog reda se može predstaviti sa:

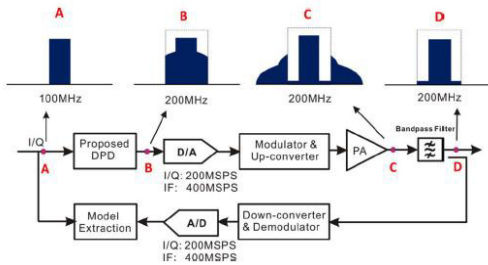
$$T_p(x(n)) = D_p(x(n)) \otimes f(n) \quad (1)$$

gde je: D_p - Volterra operator p -tog reda, f - *band-limiting*

funkcija, a \otimes predstavlja operaciju konvolucije. Za *band-limiting* funkciju je korišćen 40 MHz *low-pass complex equiripple* FIR filter. Predložen DPD model je eksperimentalno verifikovan u više testova na *high-power* LDMOS Doherty PA na 2.14 GHz. Izvršeno je poređenje konvencionalnog DPD modela sa potrebnom širinom propusnog opsega, konvencionalnog DPD modela sa ograničenom širinom propusnog opsega i predloženog DPD modela. Korišćen je WCDMA signal širine 20 MHz sa 4 nosioca i PAPR=6.5 dB. Zatim je izvršena eksperimentalna provera uticaja promene propusnog opsega sistema na performanse linearizacije, pri čemu je korišćen UMTS signal širine 60 MHz sa 12 nosioca i PAPR=6.5 dB. I na kraju je eksperimentalno proveren predložen DPD model kod sistema sa signalima šireg propusnog opsega i sa različitim konfiguracijama signala. Teorijska analiza i eksperimentalni rezultati u [5] su pokazali da ova tehnika značajno poboljšava performanse sistema i smanjuje troškove implementacije

DPD, i što je još važnije, eliminiše ograničenja u pogledu propusnog opsega sistema koja postoje kod konvencionalnih DPD tehnika.

Na slici 2 je prikazana blok šema *band-limited* DPD sistema.



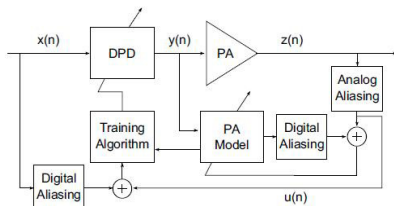
Sl. 2. *Band-limited* DPD sistem [5].

U [6] je predložen LS (*least squares*) model za procenu parametara DPD modela sa ograničenom širinom propusnog opsega, kako bi se poboljšale performanse *band-limited* DPD. Prilagođenje je izvršeno postavljanjem frekvencijskog ograničenja na širinu propusnog opsega konvencionalnog LS modela ekstrakcije. Predloženi model je eksperimentalno verifikovan na širokopojasnom *Doherty* PA izlazne snage 37 dBm, koji je dizajniran za 3G/4G sisteme. Korišćen je pojednostavljen *DDR (Dynamic Deviation Reduction)* *Volterra* model drugog reda i UMTS signal širine 40 MHz sa 8 nosioca i PAPR=6.5 dB. Primenom predloženog modela postignut je ACLR (*Adjacent Channel Leakage Ratio*) ispod -55 dBc.

Određivanje koeficijenata *band-limited* DPD modela u [7] je formulisano kao uopšten LS (GLS - *Generalized Least Squares*) problem posmatrano u frekvencijskom domenu. Ovom metodom je operacija konvolucije u vremenskom domenu zamenjena efikasnom operacijom FFT, čime je značajno smanjena računaska kompleksnost. Eksperimentalni rezultati, sa WCDMA signalom širine 20 MHz i LTE signalom širine 40 MHz sa 2 nosioca, su pokazali da su performanse sa FDD-BL-DPD (*Frequency Domain Data Based Band-Limited DPD*) podjednako dobre kao sa TDD-BL-DPD (*Time Domain Data Based Band-Limited DPD*).

U [8] je predložen metod određivanja DPD parametara metodom direktnog učenja (*Direct Learning Algorithm - DLA*) sa ograničenom širinom propusnog opsega u povratnoj grani. Eksperimentalna merenja su pokazala da se predloženim algoritmom mogu postići slične performanse kao kod konvencionalnih DPD sistema, uz značajno smanjenje širine propusnog opsega u povratnoj grani.

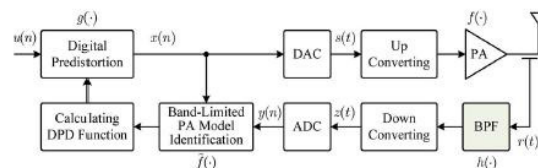
Na slici 3 je prikazana blok šema DLA DPD sistema sa ograničenom širinom propusnog opsega u povratnoj grani.



Sl. 3. DLA sa ograničenom širinom propusnog opsega u povratnoj grani [8].

U [9] je predstavljen DPD model sa ograničenom širinom propusnog opsega u povratnoj grani, kod koga se za određivanje parametara PA koristi *memory polynomial* (MP) model. Dobijeni parametri PA su zatim korišćeni u algoritmu direktnog učenja (DLA) kako bi se dobila DPD funkcija koja se zatim koristi za linearizaciju PA. Model je eksperimentalno potvrđen na LTE-A signalu širine 100 MHz sa 5 nosioca. Eksperimentalni rezultati su potvrdili poboljšanje ACLR od 22 dB, čak i kada se opseg u povratnoj grani ograniči na 100 MHz, a brzina odabiranja ADC značajno smanji na 368.64 Msps, čime se značajno smanjuju teškoće u projektovanju sistema kao i troškovi implementacije.

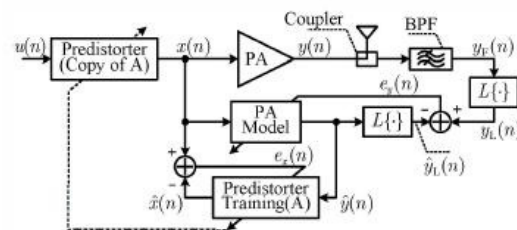
Na slici 4 je prikazana blok šema MP DLA DPD sistema sa ograničenom širinom propusnog opsega u povratnoj grani.



Sl. 4. MP DLA DPD sa ograničenom širinom propusnog opsega u povratnoj grani [9].

Kod DPD modela sa ograničenom širinom propusnog opsega u povratnoj grani u [10] je za određivanje parametara PA korišćen PTNTB (*Parallel Twin Nonlinear Two-Box*) model i algoritam indirektnog učenja (ILA). Eksperimentalni rezultati, na LTE-A signalu širine 100 MHz sa 5 nosioca, pokazali su da predložen model poboljšava ACLR performanse za 23 dB, čak i kada se širina propusnog opsega u povratnoj grani smanji sa 500 MHz na 140 MHz.

Na slici 5 je prikazana blok šema PTNTB ILA DPD sistema sa ograničenom širinom propusnog opsega u povratnoj grani.



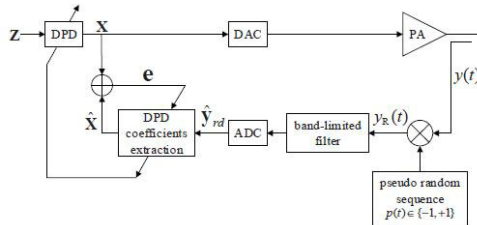
Sl. 5. PTNTB ILA DPD sa ograničenom širinom propusnog opsega u povratnoj grani [10].

Kako bi omogućili korišćenje sporih (*low-speed*) ADC konvertora, autori u [11] su predložili korišćenje spektralne ekstrapolacije signala sa ograničenom širinom propusnog opsega u povratnoj grani. Za optimalno određivanje DPD parametara korišćenog MP modela predložen je *damped Gauss Newton* algoritam. Eksperimentalno je pokazano da širina propusnog opsega u povratnoj grani može da bude i manja od širine signala, a da se i dalje dobiju dobre performanse.

RDRS (*random demodulation based reduced sampling rate*) metod za modelovanje i linearizaciju PA, predložen u [12], značajno redukuje brzinu odabiranja u odnosu na metod

spektralne ekstrapolacije, pri čemu i dalje zadržava dobre performanse. Ovaj metod koristi tehniku slučajne demodulacije u povratnoj grani sa ograničenom širinom propusnog opsega. Značajna karakteristika ove metode je ta što množenje signala pseudoslučajnom sekvencom u vremenskom domenu, širi signal preko celog spektra, pa svaka tačka na frekvencijskoj osi sadrži sve informacije o signalu. Ovo implicira da je za vraćanje signala dovoljno koristiti veoma mali deo spektra.

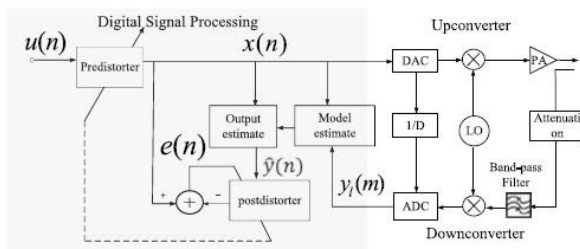
Na slici 6 je prikazana blok šema DPD sistema zasnovanog na slučajnoj demodulaciji (RDRS).



Sl. 6. RDRS DPD model [12].

DPD tehnika sa ultra malom brzinom odabiranja je predložena u [13], i sastoji se iz dva koraka. U prvom koraku se pomoću *high-rate* ulaznog signala i *low-rate* izlaznog signala iz *low-speed ADC* u povratnoj grani određuju koeficijenti modela. U drugom koraku se dobijeni model koristi za procenu *high-rate* izlaznog signala PA. Zatim se na osnovu *high-rate* ulaznog signala i procenjenog *high-rate* izlaznog signala određuju koeficijenti inverznog modela, koji se koristi za kompenzaciju nelinearnosti PA. Ovom tehnikom su značajno smanjeni zahtevi za brzinom ADC u povratnoj grani. Eksperimentalni rezultati na LTE signalu širine 40 MHz su pokazali da se predloženom tehnikom može postići smanjenje brzine ADC konvertora do čak 2.5 Msps, uz postizanje skoro iste linearizacije kao kod prethodno predloženih *band-limited* DPD tehnika, čime su značajno smanjeni zahtevi za širinom propusnog opsega u povratnoj grani.

Na slici 7 je prikazana blok šema DPD sistema sa malom brzinom odabiranja.

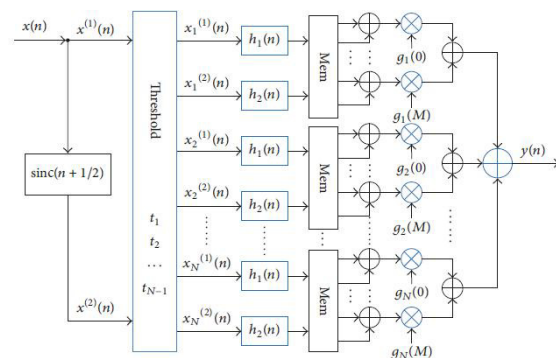


Sl. 7. DPD sistem sa malom brzinom odabiranja [13].

U cilju daljeg poboljšanja linearizacije PA za *mmWave* frekvencijski opseg, koji se nameće kao jedan od kandidata za 5G mobilne sisteme, autori u [3] su predložili DPD tehniku sa smanjenim zahtevima za širinom propusnog opsega za Tx, povratnu granu, ali i za osnovni opseg (Tx/FB/BB). Predloženi DPD model koristi skup linearnih "piecewise" segmenata za

opis nelinearnih karakteristika PA, zamenjujući operatore višeg reda sa nekoliko operatera nižeg reda. Na taj način se smanjuje zahtev za širinom propusnog opsega u osnovnom opsegu i omogućava se primena modela kod budućih ultra širokopojasnih sistema. Tehnika je eksperimentalno potvrđena na *mmWave* PA na 41 GHz (*in-housed designed mmWave PA module*). Testovi su vršeni sa LTE signalom širine 80 MHz sa 4 nosioca i PAPR=7.5 dB, i sa LTE signalom širine 320 MHz sa 4 nosioca i PAPR=7.5 dB.

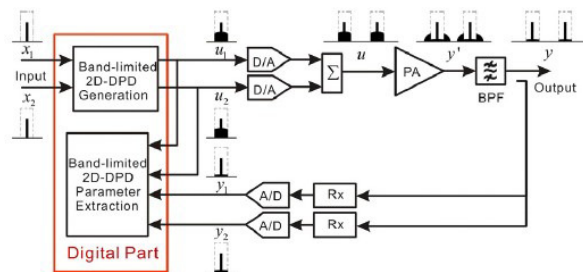
Na slici 8 je prikazana blok šema DPD sistema za ultra-širokopojasne *mmWave* PA.



Sl. 8. DPD sistem za ultra-širokopojasne *mmWave* PA [3].

Za linearizaciju širokopojasnih RF PA u *concurrent dual-band* predajnicima u [14], predložen je BL 2-D (*band-limited two-dimensional*) DPD. Model je eksperimentalno potvrđen na *high-power* LDMOS Doherty PA na 2.14 GHz, sa izlaznom snagom od 37 dBm. *Dual-band* signal je generisan korišćenjem LTE signala širine 20 MHz i WCDMA signala širine 20 MHz sa 4 nosioca. Zbog ograničenja testnog modela, frekvencijski razmak je postavljen na 80 MHz. Maksimalna širina svakog opsega u povratnoj grani je postavljena na 80 MHz. Eksperimentalni rezultati pokazuju da predložen metod predstavlja moguće rešenje za efikasno smanjenje zahteva za širinom propusnog opsega za širokopojasne *concurrent dual-band* predajnike.

Blok šema predloženog modela prikazana je na slici 9.

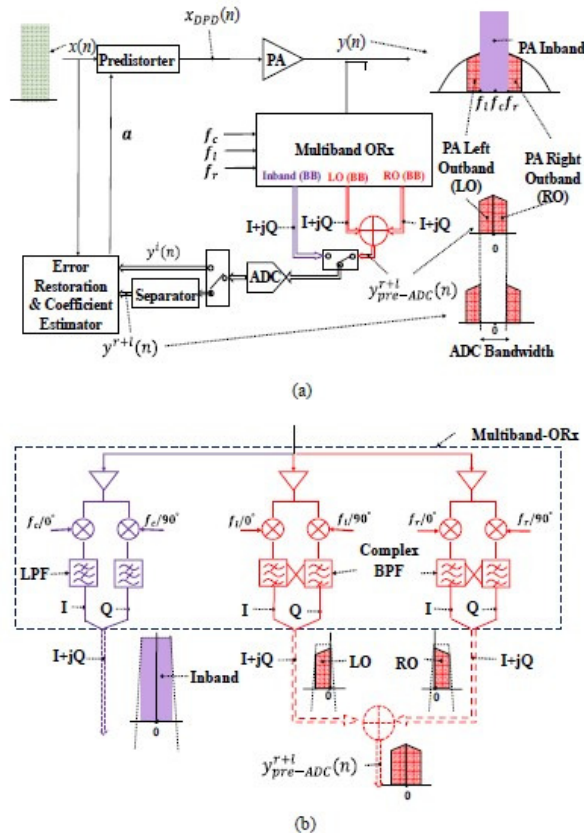


Sl. 9. *Band-limited* 2-D DPD sistem [14].

Kod klasičnog BL DPD modela, odbacivanjem signala van opsega PA dolazi do gubitka značajne količine informacija o nelinearnosti PA. Stoga su autori u [15] predložili BL DPD model sa *Band-switching* arhitekturom u povratnoj grani i ažuriranom procedurom linearizacije širokopojasnog 5G *mmWave* PA. U predloženom modelu se uzima u obzir i

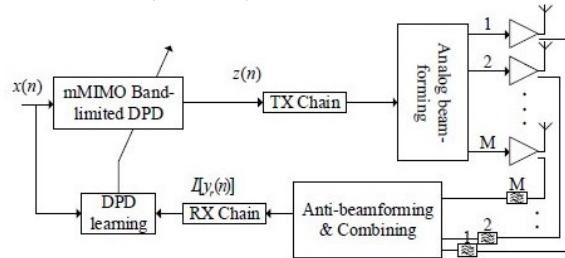
signal van opsega PA, korišćenjem *band-switching* arhitekture prikazane na slici 10, uz zadržavanje širine propusnog opsega ADC, kako bi se izbeglo povećanje troškova i potrošnje energije. Uveden je mehanizam za prebacivanje kojim se izdvaja ili signal unutar opsega PA ili signal van opsega PA, na osnovu unapred utvrđenog redosleda kroz odgovarajući filter. Za izdvajanje signala unutar opsega PA se koristi LPF (*low-pass filter*), dok se za izdvajanje signala van opsega PA koristi složeni BPF (*band-pass filter*), nakon što se izvrši frekvencijsko pomeranje odgovarajućim lokalnim oscilatorima. Tokom izdvajanja signala van opsega PA, levi i desni PA opsezi se frekvencijski pomeraju tako da se postavljaju jedan pored drugog kao što je prikazano na slici 10 (a) i (b) i kombinuju. Širina dobijenog signala je jednaka širini PA, čime se zadržava ista širina propusnog opsega ADC kao i u klasičnom BL DPD. Zatim se vrši analiza izdvojenih signala kako bi se ažurirali DPD koeficijenti. U prvih nekoliko iteracija, modelovanje DPD se vrši samo pomoću informacija unutar opsega PA. U narednim iteracijama, naizmenično se biraju signali unutar i van opsega PA, i zatim se vrši obrada u bloku *Error Restoration & Coefficient Estimator block*. Eksperimentalno je potvrđeno da se pomoću predloženog modela postiže ACLR od -43.6/-42 dBc i EVM<3% za *Watt-class PA* sa 256QAM modulisanim OFDM signalom širine 800 MHz u opsegu 26 GHz, pri čemu je mehanizam prebacivanja implementiran u MATLAB-u.

Blok šema predloženog DPD modela sa *Band-switching* arhitekturom prikazana je na slici 10.



Sl. 10. BL DPD model sa *Band-switching* arhitekturom [15].

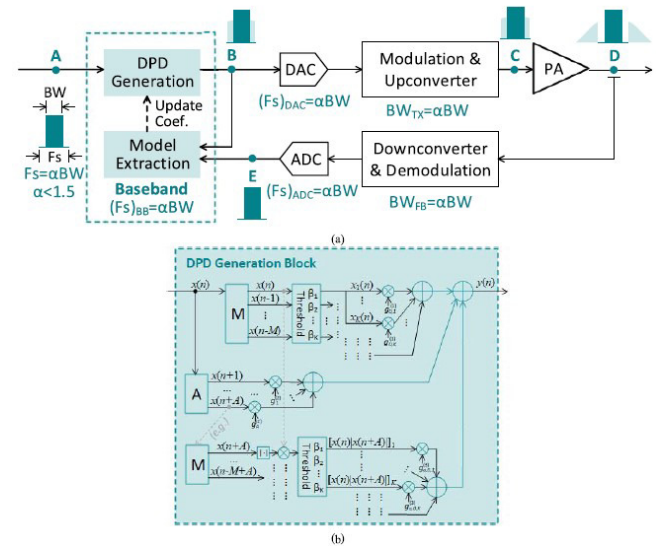
Primena BL DPD modela za hibridne MIMO predajnike analizirana je u [16]. Blok šema predloženog modela dobijena je uvođenjem *band-limiting* funkcije i predstavljena je na slici 11. Model je testiran na *parallel-Wiener PA* modelu, sa ulaznim LTE signalom širine 50 MHz i PAPR=7.6dB. Korišćen je MP DPD model čiji je red nelinearnosti 7, a dubina memorije 3. Za *band-limiting* funkciju je uzet kompleksni BPF propusnog opsega od 60 MHz. Pokazano je da predloženi model postiže performanse uporedive sa postojećim DPD metodama za hibridne MIMO predajnike, ali sa nižim brzinama ADC, čime se može značajno smanjiti cena hardvera uz zadržavanje dobrih performansi pri primeni kod *massive MIMO* (mMIMO).



Sl. 11. mMIMO *band-limited* DPD model [16].

BL DPD model predložen u [17] vrši smanjenje propusnog opsega u osnovnom opsegu primenom lineare dekompozicije. Za razliku od modela predloženog u [13] gde se za interpolaciju koristi *sinc* funkcija koja uključuje dosta množenja, u LD (*Linear-Decomposition*) BL DPD modelu je znatno smanjena računarska kompleksnost uz zadržavanje male brzine odabiranja. Predložen model je eksperimentalno verifikovan na 5G NR test signalu u dva opsega, *sub-6-GHz* (64 QAM signal širine 100 MHz i PAPR=9.1 dB) i *mmWave* (64 QAM signal u 28 GHz, širine 400 MHz i 800 MHz i PAPR= 9dB).

Blok šema predloženog modela data je na slici 12.



Sl. 12. LD BL DPD model [17].

III. POREĐENJE DPD MODELA SA OGRANIČENOM ŠIRINOM PROPUSNOG OPSEGA

Kompleksnost rada pri kojoj izloženi modeli dostižu izložene performanse se dosta razlikuje od modela do modela. Procena računarske kompleksnosti može se izvršiti na osnovu broja FLOP-ova (*floating point operations*). U tabeli 1 je prikazan potreban broj FLOP-ova za određene računarske operacije [18].

TABELA I
POTREBAN BROJ FLOP-OVA ZA RAČUNARSKE OPERACIJE

Operacija	Broj FLOP-ova
Konjugovanje	0
Kašnjenje	0
Sabiranje realnih brojeva	1
Množenje realnih brojeva	1
Sabiranje kompleksnih brojeva	2
Množenje kompleksnog i realnog broja	2
$ x ^2$	3
Množenje kompleksnih brojeva	6
Kvadratno korenovanje	7

Procena performansi DPD modela se može izvršiti na osnovu normalizovane srednje kvadratne greške NMSE (*Normalized Mean-Squared Error*), koja se računa po formuli:

$$NMSE = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{n=1}^K |y_{meas}(n) - y_{est}(n)|^2}{\sum_{n=1}^K |y_{meas}(n)|^2} \right) \quad (2)$$

gde su: y_{meas} i y_{est} - izmereni i procenjeni talasni oblici izlaznog signala, respektivno.

U tabeli 2 je dat uporedni prikaz eksperimentalno izmerenih performansi izloženih modela, kao i izračunata kompleksnost modela, pri čemu je P - red nelinearnosti, M - dubina memorije, K - dužina *band-limiting* funkcije modela, K_a i K_b - red nelinearnosti statičkog nelinearnog modela i MP modela, N - broj "piecewise" segmenata, N_s - broj odbiraka u svakoj sekvenci, A - dužina glavnih odbiraka.

IV. ZAKLJUČAK

Na osnovu izloženog, može se zaključiti da iako je sam koncept DPD prilično jednostavan, razvijanje jeftinog i efikasnog DPD modela za potrebe budućih širokopojasnih mobilnih sistema predstavlja veoma izazovan zadatak. Značaj ovog rada je u kompaktnom prikazu i analizi postojećih *band-limited* DPD tehnika. Budući rad ide u pravcu ispitivanja mogućnosti optimizacije i razvijanja efikasnijeg *band-limited* DPD modela.

TABELA II
POREĐENJE PARAMETARA BAND-LIMITED DPD MODELA

Referenca	Signal	Širina signala [MHz]	PAPR [dB]	Širina propusnog opsega sistema [MHz]	ACPR [dBc]	NMSE [dB]	Kompleksnost modela
[3]	LTE sa 4 nosioca CA LTE sa 4 nosioca	80 320	7.5 7.5	144 576	-47.64/-47.47 -42.92/-45.04	-34.63 -30.13	$2 \cdot (4 \cdot N \cdot M + 10 \cdot N + 1)$
[5]	WCDMA sa 4 nosioca LTE-A sa 5 nosioca LTE-A sa 3 nosioca LTE-A + UMTS	20 100 60 100	6.5 7.8 7.7 9.2	40 140 140 140	-60.44/-60.40 -51.02/-52.22 -52.57/-53.44 -56.14/-57.04	-45.83 -41.66 -41.94 -43.53	$K \cdot \left((M+1) \cdot \frac{P+1}{2} - 1 \right) + 3 \cdot K \cdot \left(M \cdot \frac{P-1}{2} - 1 \right) + 3$
[8]	WCDMA sa 2 razmaknuta nosioca	40	-	81.92	-59.60/-57.73	-	-
[9]	LTE-A sa 5 nosioca	100	-	100	-48	-	$2M \cdot (13P - 7)$
[10]	LTE-A sa 5 nosioca	100	-	140	-48	-	$4 \cdot (3K_a + 4M(K_b - 1) - 3)$
[12]	LTE	20	-	20	-52.61/-52.39	-45.77	-
[13]	LTE	40	7.0	20	-46.35/-45.59	-	-
[14]	Dual-band LTE i WCDMA sa 4 nosioca	20	-	40	-52.13/-51.54 - (lower) 51.15/-50.53 (upper)	-44.46 (lower) -43.36 (upper)	-
[15]	256 QAM OFDM	800	7.6	800	-43.6/-42	-	-
[16]	LTE	50	7.6	60	-65.16/-64.82	-52.85	-
[17]	5G NR sub-6GHz 5G NR mmWave 28GHz	100 400 800	9.1 9 9	150 600 1200	- - -	-35.26 -32.35 -29.52	$2 \cdot (4 \cdot N \cdot M + 10 \cdot N + 1)$

LITERATURA

- [1] 5GPPP, "5G Vision: The 5G Infrastructure Public Private Partnership - The next generation of communication networks and services", February 2015
- [2] F. M. Ghannouchi and O. Hammi, "Behavioral modeling and predistortion", *IEEE Microwave Magazine*, vol. 10, no. 7, pp. 52–64, December 2009.
- [3] C. Yu, Q. Lu, H. Sun, X. Wu and X.-W. Zhu, "Digital Predistortion of Ultra-Broadband mmWave Power Amplifiers with Limited Tx/Feedback Loop/Baseband Bandwidth", *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, March 2018.
- [4] C. Yu, L. Guan and A. Zhu, "Band-Limited Volterra Series-Based Behavioral Modeling of RF Power Amplifiers", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium, IMS '12*, pp. 1–3, Canada, June 2012.
- [5] C. Yu, L. Guan, E. Zhu and A. Zhu, "Band-Limited Volterra Series-Based Digital Predistortion for Wideband RF Power Amplifiers", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, no. 12, pp. 4198–4208, December 2012.
- [6] L. Guan, C. Yu and A. Zhu, "Bandwidth-constrained Least Squares-based Model Extraction for Band-limited Digital Predistortion of RF Power Amplifiers" Conference Paper, in *Workshop INMMiC*, Dublin, Ireland, September 2012.
- [7] G. Yang, F. Liu, C. Zhao, Z. Wang, L. Li and H. Wang, "Frequency Domain Data Based Model Extraction for Band-Limited Digital Predistortion of Wideband RF Power Amplifiers" *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, pp. 412–420, August 2013.
- [8] L. Ding, F. Mujica and Z. Yang, "Digital Predistortion using Direct Learning with Reduced Bandwidth Feedback," in *Proc. IEEE Int. Microw. Symp.*, pp. 1–3, Jun. 2013.
- [9] Y. Liu, W. Pan, S. Shao and Y. Tang, "A New Digital Predistortion for Wideband Power Amplifiers With Constrained Feedback Bandwidth", *IEEE Microwave And Wireless Components Letters*, vol. 23, no. 12, pp. 683–685, December 2013.
- [10] Y. Liu, W. Pan, S. Shao, and Y. Tang, "A New Digital Predistortion Using Indirect Learning with Constrained Feedback Bandwidth for Wideband Power Amplifiers", *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 1–3, Jun. 2014.
- [11] Y. Ma, Y. Yamao, Y. Akaiwa and K. Ishibashi, "Wideband Digital Predistortion Using Spectral Extrapolation of Band-Limited Feedback Signal" *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 61, no. 7, pp. 2088–2097, 2014.
- [12] W. Tao, H. Wang, C. Zhou, G. Li and F. Liu, "A Random Demodulation Based Reduced Sampling Rate Method for Wideband Digital Predistortion," in *Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference, APMC '15*, China, December 2015.
- [13] Z. Wang, W. Chen, G. Su, F. M. Ghannouchi, Z. Feng and Y. Liu, "Low Feedback Sampling Rate Digital Predistortion for Wideband Wireless Transmitters," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, no. 11, pp. 3528–3539, November 2016.
- [14] C. Yu, Y. Guo, and A. Zhu, "A Band-limited 2-D Digital Predistorter for Concurrent Dual-band RF Transmitters", *IEEE International Wireless Symposium (IWS)*, March 2014.
- [15] S. Deb, M. Tanio, S. Hori, N. Tawa, Y. Wada, and K. Kunihiro, "Band-limited Digital Predistortion with Band-switching Feedback Architecture for 5G mmWave Power Amplifiers", *48th European Microwave Conference (EuMC)*, September 2018.
- [16] W. Qiao, G. Li, Y. Zhang, H. Li, and F. Liu, "A Band-limited Digital Predistortion Method for Hybrid MIMO Transmitters", *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, May 2019.
- [17] C. Yu, Q. Lu, H. Yin, J. Cai, J. Chen, X.-W. Zhu, and W. Hong, "Linear-Decomposition Digital Predistortion of Power Amplifiers for 5G Ultrabroadband Applications", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 68, no. 7, pp. 2833 - 2844, July 2020.
- [18] A.S. Tehrani, C. Haiying, S. Afsardoost, T. Eriksson, M. Isaksson and C. Fager, "A comparative analysis of the complexity/accuracy tradeoff in power amplifier behavioral models," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 58, no. 6, pp. 1510-1520, June 2010.

ABSTRACT

New demands for faster and more reliable applications and services over mobile networks lead to the need of developing more sophisticated digital pre-distortion (DPD) techniques for power amplifiers (PA). Therefore, this paper provides an overview of existing band-limited DPD models. The proposed solutions for band-limited DPD are briefly described and their comparative analysis is given. An analysis of the complexity of the proposed models was also performed.

An overview of existing band-limited DPD models

Tamara Muškatirović-Zekić, Milan Čabarkapa, Nataša Nešković, Đurađ Budimir