

# Kompenzacija nelinearne distorzije kod *hybrid beamforming MIMO* predajnika

Tamara Muškatirović-Zekić, Milan Čabarkapa, Nataša Nešković, Đurađ Budimir  
School of Electrical Engineering, University of Belgrade  
Belgrade, Serbia  
[muskatirovic@gmail.com](mailto:muskatirovic@gmail.com), [milan.cabarkapa@gmail.com](mailto:milan.cabarkapa@gmail.com),  
[natasha@etf.rs](mailto:natasha@etf.rs), [d.budimir@etf.rs](mailto:d.budimir@etf.rs)

Tamara Muškatirović-Zekić  
Regulatory Agency for Electronic Communications and  
Postal Services  
Belgrade, Serbia  
[tamara.muskatirovic@ratel.rs](mailto:tamara.muskatirovic@ratel.rs)

Djuradj Budimir

Wireless Communications Research Group, University of Westminster  
London, U.K.  
[d.budimir@westminster.ac.uk](mailto:d.budimir@westminster.ac.uk),

**Sažetak**— Kompenzacija nelinearne distorzije kod *hybrid beamforming MIMO* predajnika predstavlja otvoreno i izazovno polje istraživanja. U ovom radu prezentovana je metoda kompenzacije nelinearne distorzije kod *hybrid beamforming MIMO* predajnika zasnovana na polinomima. Metoda je verifikovana kroz sveobuhvatne Matlab simulacije. Dobijeni rezultati su prikazani u grafičkoj i numeričkoj formi korišćenjem metrika u vremenskom i frekvencijskom domenu.

**Ključne riječi**- *hybrid beamforming (HBF); massive MIMO; DPD; PA; memory polynomial*.

## I. UVOD

MIMO (*multiple-input multiple-output*) predajnici predstavljaju jedno od najrasprostranjenijih rešenja za povećanje propusnog opsega i spektralne efikasnosti u mobilnim sistemima nove generacije. Zbog kompleksnosti hardvera i velike potrošnje energije, primena konvencionalnog digitalnog *beamforming*-a kod mMIMO (*massive MIMO*) predajnika je nepraktična. Stoga je u literaturi predložena tehnika hibridnog *beamforming*-a za mMIMO sisteme, kod koje je *beamforming* podeljen na analogni i digitalni *beamforming* [1]-[2]. Analogni *beamforming* se vrši u RF domenu, a digitalni *beamforming* u osnovnom opsegu. Primenom hibridnog *beamforming*-a smanjuje se broj faznih pomerača (*phase shifter*), RF lanaca i ostalih skupih komponenti, poput mešača (*mixer*) i ADC/DAC konvertora, smanjujući na taj način potrošnju snage i kompleksnost hardvera.

Kako se od predajnika mobilnih sistema nove generacije očekuje da rade sa što manjim snagama i da energetski budu što efikasniji, potrebno je posebnu pažnju obratiti na energetsku efikasnost samih pojačavača (PA) u mMIMO

predajniku. Stoga se koriste veoma nelinearni pojačavači koji rade u oblasti blizu zasićenja i koje je potrebno što efikasnije linearizovati. U cilju održavanja linearnosti i poboljšanja efikasnosti rada pojačavača koriste se različiti DPD (*Digital PreDistortion*) sistemi.

Osnovni princip DPD sistema je da za svaki pojačavač postoji poseban DPD blok kojim se smanjuje nelinearna distorzija koju on unosi. Kod mMIMO predajnika je to neizvodljivo, pa je u literaturi posebna pažnja posvećena optimizaciji i pojednostavljenju digitalne predistorzije signala. U [3] je dat pregled postojećih rešenja za digitalnu predistorziju *hybrid beamforming MIMO* predajnika sa delimično povezanom HBF (*hybrid beamforming*) arhitekturom. Razmatrani DPD modeli zasnovani su na povratnim informacijama direktno sa kraja predaje. Dekorelacioni DPD model koristi kombinovani signal izlaza pojedinačnih PA u sprezi sa pravilom učenja zasnovanim na dekokorelaciji. CL (*closed-loop*) DPD predstavlja rešenje za hibridni MIMO sistem sa više korisnika (*Multiuser Hybrid MIMO*) u kom se koristi jedan DPD blok po prenosnom RF lancu ili podnizu. BO-DPD (*Beam-Oriented DPD*) model linearizuje signal glavnog snopa, a ne svakog PA pojedinačno, pri čemu se za dobijanje povratnog signala koriste izlazi svih PA. PSBO-DPD (*Power Scalable Beam-Oriented DPD*) modeluje i linearizuje signal glavnog snopa datog podniza koristeći povratnu informaciju sa samo jednog PA. Kako potpuno povezana HBF arhitektura omogućava veću spektralnu efikasnost u odnosu na delimično povezanu HBF arhitekturu, autori u [4] predložili su model za linearizaciju potpuno povezanog HBF mMIMO predajnika. Predložen model se sastoji od više DPD blokova zasnovanih na MP (*Memory Polynomial*) modelu, po jedan u svakom od  $P$  RF lanaca predajnika.

U ovom radu razmatran je MP DPD model za potpuno povezanu HBF arhitekturu zasnovan na povratnim informacijama direktno sa kraja predaje, pri čemu je korišćen jedan DPD blok za linearizaciju svih pojačavača u predajniku. S obzirom da se koristi samo jedan DPD blok za linearizaciju, ovakva konfiguracija predstavlja manje kompleksno rešenje u odnosu na rešenja predložena u postojećoj literaturi.

Opis predloženog DPD modela dat je u poglavlju II, rezultati simulacija izloženi su u poglavlju III, dok je u poglavlju IV dat zaključak.

## II. DPD MODEL ZA HBF MIMO PREDAJNIK

### A. Arhitektura HBF predajnika

Kod HBF predajnika  $N_S$  nizova podataka se u digitalnom prekoderu konvertuje u ulazne signale za  $P$  RF lanaca, koji se zatim u analognom prekoderu konvertuju u signale koji se šalju na  $N_T$  antenskih elemenata. U zavisnosti od načina implementacije hibridnog *beamforming*-a u RF domenu, razlikuju se dva tipa arhitekture HBF MIMO predajnika: a) potpuno povezana i b) delimično povezana arhitektura. Na sl. 1 prikazana su ova dva osnovna tipa arhitekture HBF predajnika.

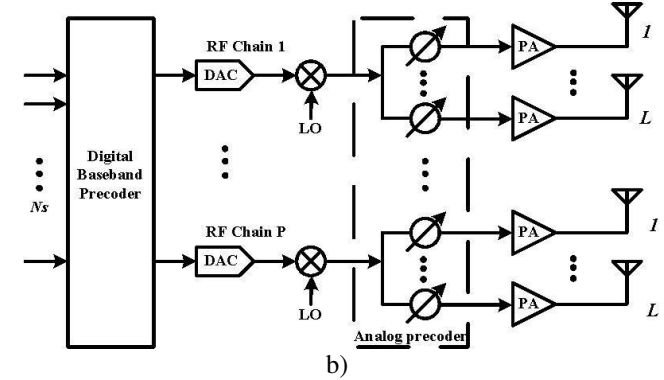
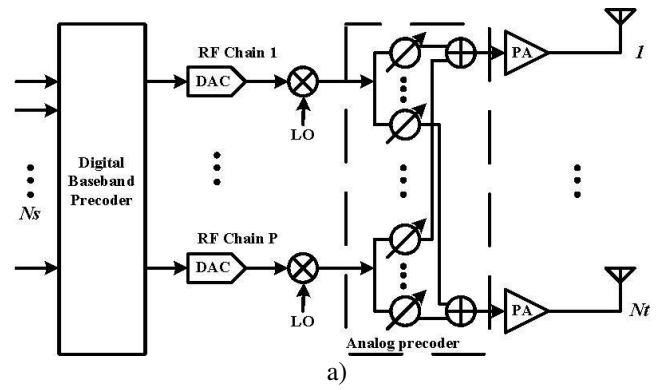
Kod potpuno povezane HBF arhitekture, svaka antena je povezana na svaki od  $P$  RF lanaca, dok je, kod delimično povezane HBF arhitekture, na jedan RF lanac povezan skup od  $L$  antena. Prednost potpuno povezane arhitekture je što omogućava veću spektralnu efikasnost u odnosu na delimično povezanu arhitekturu HBF predajnika.

### B. DPD model

Matematički gledano, osnovni princip hibridnog *beamforming*-a je podela koeficijenata za prekodiranje signala na: koeficijente u osnovnom opsegu ( $F_{BB}$ ) i koeficijente u RF domenu ( $F_{RF}$ ). Problem određivanja koeficijenata je veoma kompleksna tema i u literaturi postoji veliki broj različitih algoritama. U radu je korišćen *Spatially Sparse Precoding* algoritam koji vrši potragu za ortogonalnim podudaranjem (*orthogonal matching pursuit algorithm*) [5], i analizirana je mogućnost primene jednog DPD bloka za linearizaciju potpuno povezane HBF arhitekture. Blok šema modela prikazana je na sl. 2.

Izlazi svakog pojedinačnog PA se vode u modul za *anti-beamforming* i kombinovanje. Uloga ovog modula je da se poništi efekat koeficijenata *beamforming*-a u analognom *beamforming* modulu tako da posmatrani signal u povratnoj RX grani odgovara signalu koji korisnik treba da primi. Dobijeni signal se zatim vodi na modul za određivanje koeficijenata DPD modela. Korišćen je MP DPD model, čija je upotreba rasprostranjena za modelovanje ponašanja i digitalnu predistoriju pojačavača koji pokazuju memorijske efekte. Izlaz MP DPD modela računa se po sledećoj formuli [6]:

$$x_{out}(n) = \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^K a_{mk} \cdot x_{in}(n-m) \cdot |x_{in}(n-m)|^{k-1} \quad (1)$$



Slika 1. Arhitektura HBF predajnika: a) potpuno povezana; b) delimično povezana.

gde su:  $a_{mk}$  – koeficijenti modela,  $M$  – dubina memorije,  $K$  – red nelinearnosti,  $x_{in}$  i  $x_{out}$  – ulazni i izlazni signal, respektivno.

Predloženi MP DPD model testiran je kroz simulacije u programskom paketu Matlab.

Za procenu performansi predloženog DPD modela korišćene su sledeće metrike u vremenskom domenu: normalizovana srednja kvadratna greška NMSE (*Normalized Mean-Squared Error*) i EVM (*Error Vector Magnitude*) [7].

NMSE se računa po formuli:

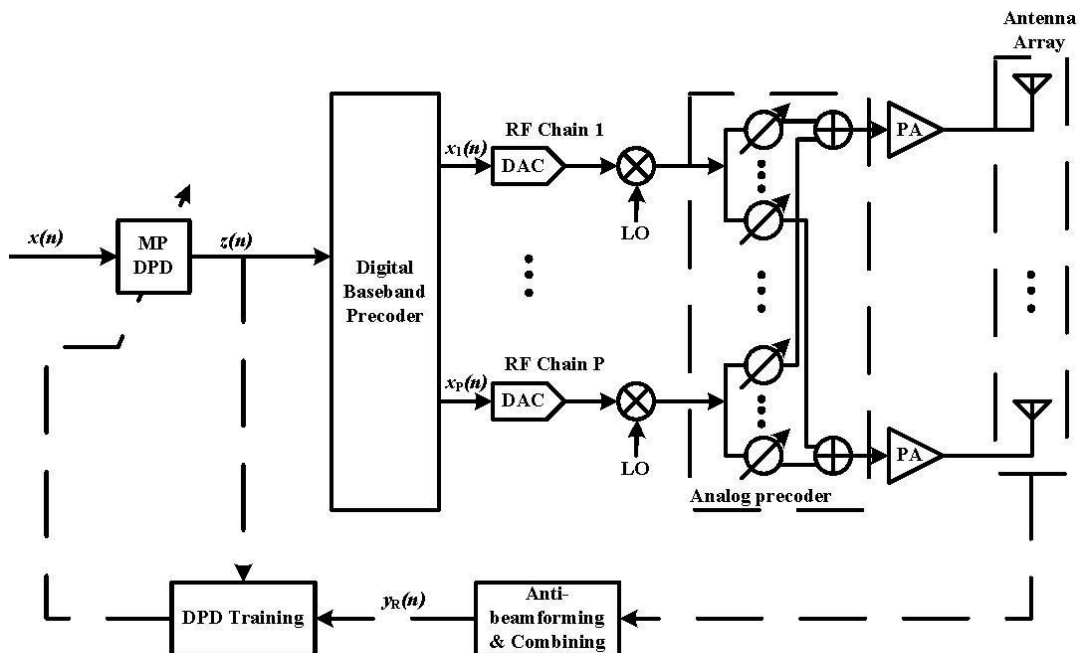
$$NMSE = 10 \log_{10} \left( \frac{\sum_{n=1}^K |y_{meas}(n) - y_{est}(n)|^2}{\sum_{n=1}^K |y_{meas}(n)|^2} \right) \quad (2)$$

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

Dok se EVM računa po formuli:

$$EVM_{\%} = \sqrt{P_{error}/P_{ideal}} * 100\% \quad (3)$$

gde su:  $P_{error}$  i  $P_{ideal}$  – snaga signala greške i referentna snaga idealne konstalacije signala, respektivno.



Slika 2. Blok šema MP DPD sistema za HBF MIMO predajnik.

Kompleksnost modela određena je brojem koeficijenata  $N_{coef}$  i brojem FLOP-ova (*floating point operations*), i računa se prema sledećim formulama [8]:

$$N_{coef} = (M + 1)K \quad (4)$$

$$FLOPs = (10 + 2(K - 1)) + (8K(M + 1) - 2) \quad (5)$$

gde je:  $M$  – dubina memorije,  $K$  – red nelinearnosti.

### III. REZULTATI

Za potrebe simulacija generisan je OFDM signal širine 20 MHz, pri čemu je razmak podnosioca (*subcarrier*) 15kHz, a broj korišćenih podnosica je 1200. Korišćen je model realnog dvostepenog pojačavača - CFH 2162-P3 PA, pojačanja 14 dB i  $P_{1dB}=37$  dBm. Razmatran je HBF MIMO predajnik sa jednim ulazom i jednim izlazom, tzv. *single user* slučaj, i generisan je MP digitalni prekoder za ceo HBF MIMO predajnik (sl. 2). Izvršena je simulacija za 64x64 MIMO HBF sistem sa 2 RF grane na predajnoj strani i 2 RF grane na prijemnoj strani. Korišćen je *Saleh-Valenzuela* model kanala, sa parametrima  $N_{cl}=6$  (broj klastera) i  $N_{ray}=5$  (broj rasipača u svakom klasteru). Ovako izabrani parametri modeluju kanal u skladu sa 3GPP specifikacijom [9].

Simulacije su izvršene za različite parametre MP modela, tj. za različite vrednosti dubine memorije  $M$  i reda nelinearnosti  $K$ . Uzimajući u obzir modele analizirane u literaturi [3]-[4], za parametre modela izloženog u ovom radu izabrane su sledeće vrednosti: 1)  $M=2$ ,  $K=5$ ; 2)  $M=3$ ,  $K=7$ ; i 3)  $M=3$ ,  $K=11$ .

Na sl. 3-6 prikazana je spektralna gustina snage PSD (*Power Spectrum Density*) bez DPD i sa primenom

predloženog MP DPD modela, za različite vrednosti dubine memorije i reda nelinearnosti, dok su u tabeli 1 date dobijene vrednosti za EVM, NMSE, kao i vrednosti broja koeficijenata i FLOP-ova.

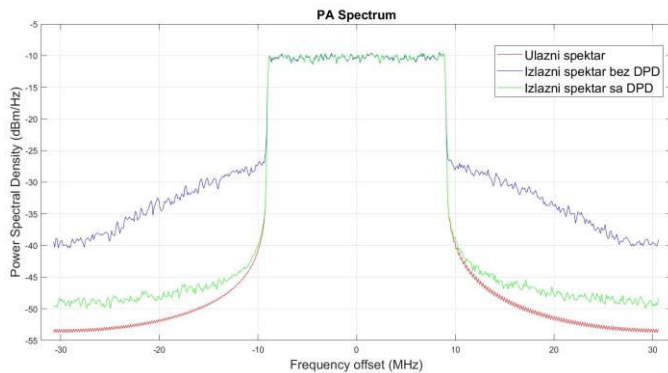
Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da predloženi MP DPD model veoma dobro kompenzuje nelinearnu distorziju kod HBF MIMO predajnika. Sa povećanjem dubine memorije  $M$  i reda nelinearnosti  $K$  postiže se bolja kompenzacija nelinearne distorzije, ali se, istovremeno, povećava i računarska kompleksnost modela.

Predlogom DPD sistema za potpuno povezanu arhitekturu HBF MIMO predajnika koja uključuje DPD blok u svakom RF lancu predajnika, autori u [4] postigli su nešto bolje rezultate po pitanju linearizacije HBF predajnika ( $M=2$ ,  $K=5$ ,  $N_{coef}=112$ ,  $NMSE=-37$ dB). Naravno, treba imati u vidu i činjenicu da je DPD model predložen u ovom radu, koji, uz znatno jednostavniju realizaciju, veoma dobro kompenzuje nelinearnost HBF MIMO predajnika.

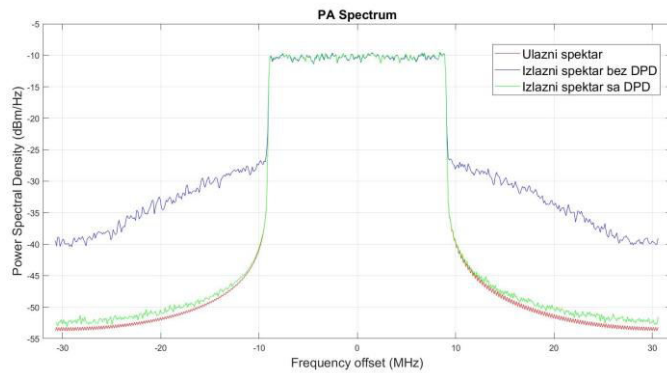
Ispitivanje uticaja dubine memorije i reda nelinearnosti na kompleksnost modela i efikasnost kompenzacije nelinearne distorzije kod *hybrid beamforming* MIMO predajnika, kao i pronalaženje optimalnih vrednosti istih, predstavlja novi izazov i stvara mogućnost za dalji istraživački rad na ovom polju.

### IV. ZAKLJUČAK

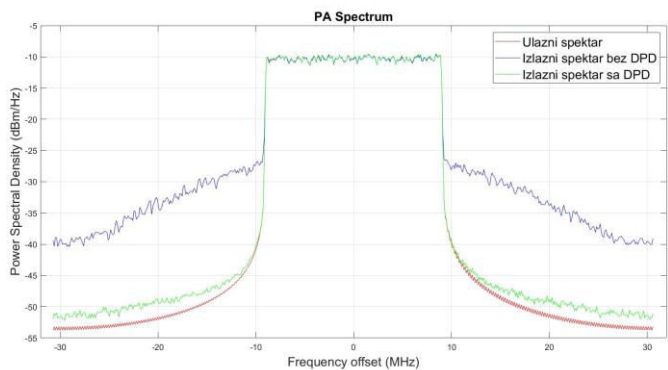
Na osnovu izloženog može se zaključiti da se korišćenjem MP DPD modela može veoma dobro kompenzovati nelinearna distorzija kod *hybrid beamforming* MIMO predajnika. Na osnovu dobijenih rezultata, ovaj rad predstavlja dobru polaznu tačku za dalje razvijanje efikasnijih i manje složenih modela digitalne predistorzije za predajnike budućih širokopojasnih



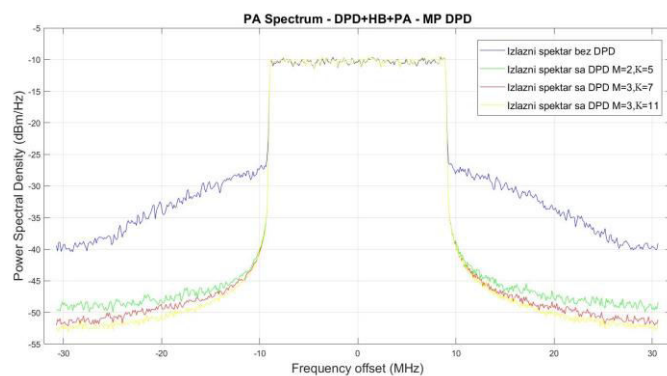
Slika 4. Spektralna gustina snage sa i bez DPD; M=2, K=5.



Slika 6. Spektralna gustina snage sa i bez DPD; M=3, K=11.



Slika 3. Spektralna gustina snage sa i bez DPD; M=3, K=7.



Slika 5. Upporedni prikaz spektralnih gustina snage sa i bez DPD za različite vrednosti M i K.

mobilnih sistema. Potrebno je istaći da je u ovom radu razmatran DPD model zasnovan na povratnim informacijama direktno sa kraja predaje (*direct transmit-end*). Znatna ušteda u pogledu hardverskih resursa može se postići korišćenjem OTA (*over-the-air*) DPD modela, koji ne zahteva povratne informacije sa svih pojačavača. Sa druge strane, OTA DPD tehnika zahteva postavljanje dodatne antene u dalekom polju (*far field*) za prikupljanje i analizu signala. Budući rad ide u pravcu ispitivanja digitalne predistorzije kod OTA DPD modela i pronalazjenja optimalnog DPD modela kojim će se što efikasnije smanjiti uticaj nelinearne distorzije u HBF mMIMO sistemima.

#### LITERATURA

- [1] A. F. Molisch et al., "Hybrid Beamforming for Massive MIMO: A Survey," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 134-141, September 2017.
- [2] A. Singh, and S. Joshi, "A Survey on Hybrid Beamforming in MmWave Massive MIMO System," in *Journal of Scientific Research*, vol. 65, no. 1, pp. 201-213, January 2021.
- [3] Tamara Muškatirović-Zekić, Milan Čabarkapa, Nataša Nešković i Đurađ Budimir, "Pregled rešenja digitalne predistorzije za *hybrid beamforming MIMO* predajnike " 29. Telecommunication Forum (TELFOR) 2021, November 2021.
- [4] X. Liu, W. Chen, J. Chu, F. M. Ghannouchi and Z. Feng, "Multi-Stream Spatial Digital Predistortion for Fully-Connected Hybrid Beamforming Massive MIMO Transmitters," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 68, no. 7, pp. 2998-3011, July 2021.
- [5] O. E. Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi and R. W. Heath, "Spatially Sparse Precoding in Millimeter Wave MIMO Systems," in

TABELA I. POREĐENJE MP DPD MODELA ZA HBF MIMO

Parametri	EVM [%]	NMSE [dB]	$N_{coef}$	FLOPs
M=2, K=5	2.4179	-32.3312	15	136
M=3, K=7	1.9600	-34.1551	28	244
M=3, K=11	1.7111	-35.3345	44	380

*IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 3, pp. 1499-1513, March 2014.

- [6] F. M. Ghannouchi, and O. Hammi, „Behavioral modeling and predistortion”, *IEEE Microwave Magazine*, vol.10, no.7, pp.52-64, Dec. 2009.
- [7] O. Hammi, M. Younes, and F. M. Ghannouchi, “Metrics and Methods for Benchmarking of RF Transmitter Behavioral Models With Application to the Development of a Hybrid Memory Polynomial Model,” *IEEE Trans. Broad.*, vol. 56, no. 3, Sept. 2010.
- [8] Pooria Varahram, John Dooley, Keith Finnerty, and Ronan Farrell, “ A low complexity pre-distortion scheme for power amplifier linearization in wideband applications“, *International Journal of Communication Systems*, August 2016.
- [9] 3GPP Technical Report 38.901, “Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz,” v16.1.0 (Release 16), December 2019.

#### ABSTRACT

Compensation of nonlinear distortion in hybrid beamforming MIMO transmitters is an open and challenging field of research. In this paper, the polynomial-based compensation method of nonlinear distortion in hybrid

beamforming MIMO transmitters is presented. The method is verified through comprehensive Matlab simulations. The obtained results are presented in graphical and numerical form, using metrics in time and frequency domain.

**COMPENSATION OF NONLINEAR DISTORTION IN  
HYBRID BEAMFORMING MIMO TRANSMITTERS**

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