

ALGORITMI ZA REKONSTRUKCIJU SLIKE NA OSNOVU BAJEROVOG MOZAIKA**ALGORITHMS FOR IMAGE RECONSTRUCTION BASED ON BAYER MOSAIC**Tamara Tešanović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U radu je razmatran proces generisanja slike u boji korišćenjem matrice senzora slike sa Bajerovim mozaikom. Proces obrade slike započinje sa merenjem količine svetlosti u crvenom, zelenom i plavom delu spektra. Umesto razdelnika snopa svetlosti kojim bi se slika projektovala na tri različita fotoosetljiva elementa, u slučaju Bajerovog mozaika koristi se niz kolor filtera sa specifičnim prostornim rasporedom na matricnom senzoru. Način interpolacije nedostajućih spektralnih merenja (uklanjanja mozaika) i redosled operacija kao što su uklanjanje šuma i povećanje prostorne rezolucije nisu proizvoljni i u značajnoj meri utiču na kvalitet rekonstruisane slike. U radu su analizirane tehnike interpolacije zasnovane na Hamiltonovim interpolacionim formulama i vođenom filtriranju slike korišćenjem interpolacije reziduala. Eksperimentalnim poređenjem rezultata rekonstrukcije sa tehnikama koje koriste konvolucione neuronske mreže (CNN) identifikovani su najefikasniji pristupi za poboljšanje kvaliteta slike i uklanjanje mozaika.

Gljučne reči: *Bajerov mozaik, vođeno filtriranje slike, interpolacija reziduala, CNN, uklanjanje mozaika*

Abstract – The paper discusses the process of color image generation using matrix image sensors with Bayer mosaic. The image processing begins with measuring the amount of light in the red, green and blue part of the spectrum. Instead of a light beam splitter that would project the image onto three different photosensitive elements, in the case of Bayer mosaic, a series of color filters with a specific spatial arrangement on the matrix sensor is used. The method of interpolation of missing spectral measurements (demosaicking) and the sequence of operations such as denoising and spatial resolution enhancement are not arbitrary and significantly affect the quality of the reconstructed image. Interpolation techniques based on Hamilton's interpolation formulas and guided image filtering using residual interpolation are analyzed in the paper. Experimental comparison of reconstruction results with techniques based on convolutional neural networks (CNN) identified the most effective approaches image quality improvement and demosaicking.

Keywords: *Bayer mosaic, guided image filtering, residual interpolation, CNNs, demosaicking*

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Branko Brkljač, vanr. prof.

1. UVOD

Digitalna fotografija je neizostavan deo savremenog života zahvaljujući digitalnim kamerama i pametnim telefonima. Senzori registruju svetlost i pretvaraju je u električne signale, koji se zatim obrađuju u digitalnom formatu. Navedeni proces uključuje uklanjanje šuma, poboljšanje rezolucije, korekciju osvetljenja i kontrasta, oštine slike, ali pre svega rekonstrukciju trokanalne slike u boji na osnovu originalnih jednokanalnih merenja, tzv. demozaik (engl. demosacking).

U radu su posmatrane dve osnovne grupe metoda za rekonstrukciju slike zasnovane na složenim postupcima interpolacije signala. Prva grupa algoritama koristi napredne tehnike filtriranja slike, dok se druga grupa oslanja na posebno dizajnirane modele dubokih neuronskih mreža kojima se problem interpolacije nedostajućih merenja rešava naučenim preslikavanjem, tj. u jednom koraku, prolazu kroz mrežu (engl. end to end), polazeći od izmerene jednokanalne matrice, mozaika. Analizirano je kako navedeni postupci rekonstrukcije slike utiču na kvalitet i izgled generisanih digitalnih fotografija.

Opisani su odgovarajući postupci i kroz prikazane eksperimentalne rezultate ponuđen odgovor na pitanje koje su najbolje strategije za dobijanje slike u boji na osnovu originalnih jednokanalnih merenja sa prostornim rasporedom u obliku Bajerovog mozaika. Pored rekonstrukcije slike, razmatrano je i kako redosled pratećih operacija predobrade prilikom akvizicije slike, kao što su uklanjanje šuma i povećanje prostorne rezolucije signala, može da utiče na krajnji kvalitet rezultata.

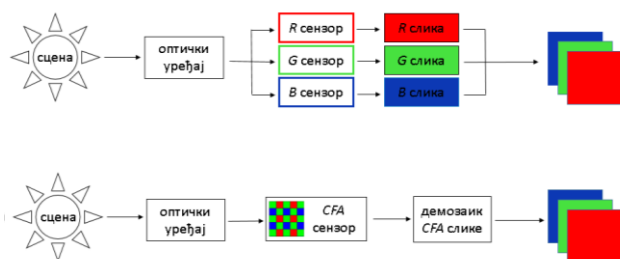
2. PROBLEM REKONSTRUKCIJE SLIKE

Demozaik je ključni proces u obradi digitalnih fotografija koji se koristi za prevođenje nepotpunih uzoraka boja sa matricnog senzora u kompletne trokanalne slike. Naime, prilikom akvizicije slike u boji potrebno je imati najmanje tri uzorka primarnih boja svetlosti na poziciji svakog prostornog elementa slike, tj. piksela.

Međutim, umesto tri odvojena senzora, fotoosetljiva elementa po pikselu, većina kamera koristi samo jedan matricni senzor slike sa optičkim filterima za crvenu, zelenu i plavu svetlost postavljenim ispred fotoosetljivog elementa. Vrsta optičkog filtra postavljenog ispred piksela zavisi od pozicije piksela, odnosno svaki od piksela beleži samo po jednu od primarnih boja svetlosti. U zavisnosti od usvojenog prostornog rasporeda optičkih filtera moguće su različite konstrukcije kolor senzora. Tako se prilikom akvizicije slike dobijaju različite vrste mozaičnih merenja (mozaika ili jednokanalnih matrica), koje sadrže izmerene vrednosti intenziteta crvene, zelene i plave svetlosti, ali na različitim pozicijama.

Raspored merenja (boja) karakterističan je za određenu vrstu mozaika i zavisi od proizvođača kamere. Kako bi se od takvog mozaika generisala konačna trokanalna slika u boji, sa odvojenim merenjima za crvenu, zelenu i plavu svetlost na poziciji svakog piksela, potrebna je odgovarajuća interpolacija nedostajućih merenja, odnosno rekonstrukcija slike koju nazivamo demozaik. Način rešavanja opisanog zadatka u slučaju prostornog rasporeda optičkih filtera koji je u literaturi poznat kao Bajеров mozaik [1] osnovni je predmet ovog rada.

Kada se projektuju algoritmi za rekonstrukciju, važno je izbegavati uvođenje artefakata u vidu lažnih boja i očuvati što veću rezoluciju slike, što može biti izazovno. Upotreba CFA (engl. color filter array) филтара poput Bajерове rešetke (mozaika) predstavlja optimalan balans između prostorne rezolucije, brzine snimanja, troškova i složenosti proizvodnje i obrade slika, u poređenju sa konstrukcijama kamera koje bi koristile prizmu ili razdelnik ulaznog snopa svetlosti kako bi se razdvojile putanje svetlosti različitih talasnih dužina. Razlika u procesu akvizicije slike u boji između opisanih konstrukcija kamera prikazana je na Slici 1.



Slika 1. Proces akvizicije slike prema tipu kamere

Prvo je prikazan proces akvizicije kada se koriste tri nezavisna optička toka, a zatim i proces akvizicije kada se koristi samo jedan CFA filter, poput Bajеровог mozaika, nakon čega sledi proces koji nazivamo demozaik, kojim se rekonstruiše slika.

Iako digitalna fotografija predstavlja inženjersku praksu već više od nekoliko decenija, istraživači su tek nedavno doveli u pitanje redosled operacija prilikom procesa rekonstrukcije i predobrade digitalne slike u boji. Prema [2], tradicionalni redosled operacija $DM \rightarrow DN \rightarrow SR$, često stvara artefakte poput lažnog predstavljanja ili tzv. *moiré* efekta, gde DM označava rekonstrukciju slike na osnovu Bajеровог mozaika ili nekog drugog CFA filtra (engl. demosaicking), DN označava operaciju uklanjanja šuma (engl. denoising), a SR operaciju poboljšanja originalne prostorne rezolucije signala (engl. super-resolution).

Tako je u studiji [2] predložen novi redosled operacija: $DN \rightarrow SR \rightarrow DM$, koji značajno poboljšava kvalitet slike jer uklanjanje šuma pre rekonstrukcije eliminiše artefakte. U istom radu takođe su razmatrane i mogućnosti za objedinjeno ili istovremeno rešavanje sva tri pomenuta zadatka, odnosno korišćenje dubokih neuronskih mreža kao načina za generisanje konačnog rezultata koji odgovara opisanoj sekvenci operacija $DN \rightarrow SR \rightarrow DM$.

Pri tome je takođe razmatrano da li redosled izdvajanja obeležja, odnosno tok obrade informacija unutar neuronske mreže, koji je uslovljen arhitekturom odgovarajućeg modela, utiče na kvalitet rekonstrukcije.

Međutim, za razliku od sekvencijalnih operacija u kojima se uticaj redosleda operacija predobrade na kvalitet slike

ispostavio kao značajan, u slučaju objedinjenog rešenja tok obrade informacija unutar mreže nije imao toliki uticaj.

3. ANALIZIRANI ALGORITMI

Razmatranje dve različite grupe metoda za rekonstrukciju slike pokazuje složenost i raznovrsnost postupaka interpolacije koji se koriste za postizanje kvalitetnih rezultata. Prva grupa metoda za demozaik merenja obuhvata tradicionalne tehnike, poput interpolacije reziduala [3, 4, 5], koje koriste interpolaciju razlika između posmatranih (izmerenih) i privremeno procenjenih vrednosti piksela kako bi se postigla precizna rekonstrukcija boja.

Nasuprot tome, pristupi [6] koji koriste duboko učenje, poput neuronskih mreža, automatski uče složene karakteristike rekonstruisane slike iz velikog broja primera u skupu za obuku. Primeri predstavljaju parove slika koji se sastoje od jednokanalnih matrica koje predstavljaju mozaična merenja, ulaz mreže, i trokanalnih slika koje odgovaraju rekonstruisanoj slici u boji. Kako bi se obezbedio adekvatan skup parova za nadgledanu obuku mreže, parovi slika se generišu poduzorkovanjem trokanalnih slika u boji na način koji imitira izgled korišćenog mozaika CFA filtera na matricnom senzoru.

Na taj način je moguće kreirati skupove podataka sa referentnim signalom slike u boji, čime se omogućava i kvantitativno poređenje rezultata, pored uobičajenih vizuelnih procena kvaliteta. Po pitanju uspešnosti rekonstrukcije, duboko učenje omogućava nelinearno modelovanje suptilnih relacija između izmerenih vrednosti u mozaiku koje su nedostupne tradicionalnim metodama, stvarajući mogućnosti za dodatna poboljšanja. Navedena dva pristupa i konkretni algoritmi koji su razmatrani u nastavku, pokazuju principe na kojima se baziraju savremene metode rekonstrukcije i koje su prednosti i ograničenja njihove primene.

3.1. Algoritmi na bazi interpolacije reziduala

Većina algoritama za rekonstrukciju na osnovu Bajеровог mozaika prvo interpolira vrednosti zelenih piksela, jer zeleni pikseli imaju dvostruko češće uzorkovanje u mozaiku u odnosu na crvene i plave piksele. Time se generišu tri odvojena kanala ili matrice, od kojih crvenom i plavom kanalu nedostaju merenja na mestima na kojima su se u polaznom Bajеровом mozaiku nalazili zeleni pikseli. Nakon toga, razlike u vrednostima između crvenog i zelenog, odnosno plavog i zelenog kanala se izračunavaju za svaki piksel za koji u crvenom i plavom kanalu postoje merenja (oduzimanjem odgovarajućih jednokanalnih matrica sa zelenim kanalom duž pozicija na kojima postoje merenja). U pretposlednjem koraku, na osnovu izračunatih razlika (reziduala) interpoliraju se vrednosti razlika i na onim pozicijama na kojima u originalnom kanalu (crvenom ili plavom) nisu postojala merenja (za one pozicije ili piksele na kojima je u Bajеровом mozaiku bio postavljen zeleni filter).

Na kraju, sabiranjem matrica reziduala sa zelenim kanalom rekonstruišu se vrednosti crvenog i plavog kanala na mestima na kojima nisu postojale. Ovo je osnovni postupak interpolacije reziduala koji se u literaturi naziva i interpolacija razlika boja [3]. Pretpostavka je da različiti kanali sadrže slične informacije, čime se problem interpolacije razlika pojednostavljuje u odnosu na rekonstruk-

ciju originalnih vrednosti, ako se kao osnova koriste interpolirane vrednosti zelenog kanala za koje se zbog većeg broja uzoraka očekuje da će biti kvalitetnije interpolirane. Na sličnom principu zasnovana su i kasnija unapređenja, predložena u literaturi [3, 4, 5], ali sa osnovnom razlikom da se umesto interpoliranih vrednosti zelenog kanala kao osnova za izračunavanje reziduala koriste drugačije vrednosti. Tako je u [3] predloženo da se interpolirane vrednosti zelenog kanala koriste samo kao vodič (smernice) za upravljanje procesom dodatne interpolacije tzv. privremenih procena nedostajućih vrednosti crvenog, odnosno plavog kanala, nakon čega se odgovarajući reziduali izračunavaju kao razlike između originalnih merenja crvenog i zelenog kanala i privremenih procena dobijenih na osnovu zelenog kanala.

Ključan korak u generisanju privremenih procena crvenog i plavog kanala jeste primena koncepta vođenog filtriranja slike (engl. guided image filtering) [7]. U pitanju je postupak sličan bilateralnom filtru za nelinearno ublažavanje slike, koji u standardnoj varijanti kao dodatnu informaciju za adaptaciju procesa ublažavanja slike koristi informacije o ivicama, čime se kroz rešavanje odgovarajućeg optimizacionog problema adaptivno podešavaju parametri linearnog filtra kako bi se postiglo ublažavanje uz očuvanje oštine detalja. Međutim, isti princip navođenja procesa filtriranja može da se koristi i u slučaju interpolacije kao linearnog filtriranja, gde se kao vodič za uspešnu rekonstrukciju nedostajućih crvenih, odnosno plavih piksela (ranije pomenutih privremenih procena) mogu koristiti interpolirane vrednosti zelenog kanala.

Time se dobija algoritam sa adaptivnim procesom interpolacije (engl. guided upsampling), koji prilikom procene crvenih i plavih piksela uzima u obzir vrednosti u zelenom kanalu. Ostatak rekonstrukcije je sličan kao kod ranije opisane interpolacije razlika boja, samo se interpolirane vrednosti reziduala u poslednjem koraku sabiraju sa privremenim procenama generisanim pomoću vođenog filtra. Što se tiče interpoliranih vrednosti zelenog kanala, one se najčešće generišu postupkom opisanim u [8], koji se zasniva na standardnim Hamiltonovim i Adamsovim interpolacionim formulama [9]. Na primer, formula za horizontalnu interpolaciju crvenih piksela je:

$$\hat{R}_{i,j}^H = \frac{R_{i,j-1} + R_{i,j+1}}{2} + \frac{2 * G_{i,j} + G_{i,j-2} + G_{i,j+2}}{4} \quad (1)$$

što se može zapisati i kao:

$$\hat{R}_{i,j}^H = \frac{R_{i,j-1} - \tilde{G}_{i,j-1}^H}{2} + \frac{R_{i,j+1} - \tilde{G}_{i,j+1}^H}{2} + G_{i,j} \quad (2)$$

gde je: $\tilde{G}_{i,j-1}^H = (G_{i,j} + G_{i,j-2})/2$, i na sličan način: $\tilde{G}_{i,j+1}^H = (G_{i,j} + G_{i,j+2})/2$. Ovakvom formulacijom dobija se izraz u kome figuriše razlika između originalnih crvenih i interpoliranih zelenih piksela, što odgovara osnovnom postupku interpolacije razlika boja.

Međutim, ako se procene $\tilde{G}_{i,j}^H$ zamene sa privremenim procenama crvenog kanala, $\check{R}_{i,j}^H$, kao u [3, 4], dobija se rekonstrukcija:

$$\hat{R}_{i,j}^H = \frac{R_{i,j-1} - \check{R}_{i,j-1}^H}{2} + \frac{R_{i,j+1} - \check{R}_{i,j+1}^H}{2} + \check{R}_{i,j}^H \quad (3)$$

Pored standardne interpolacije reziduala, RI metod predložen u [3], u eksperimentima su analizirani i algoritmi interpolacije reziduala kod kojih su uvedena dodatna

poboljšanja. Tako se u MLRI metodu [4] koeficijenti adaptivnog filtra određuju rešavanjem optimizacionog problema koji minimizuje razlike kvadrata laplasijana R i laplasijana privremene procene \check{R} , dok su u ARI metodu [5] kombinuju RI i MLRI procene.

3.2. Duboko učenje za interpolaciju reziduala

Upotreba mašinskog učenja omogućava automatizaciju procesa adaptacije i učenje predikcija direktno iz velikog skupa parova slika za obuku modela. Konvolucione neuronske mreže (CNN) pružaju mogućnost učenja složenih nelinearnih preslikavanja koja se mogu prilagoditi specifičnim zahtevima rekonstrukcije.

Algoritam zasnovan na izdvajanju obeležja iz Bajerovog mozaika korišćenjem CNN predložen je u [6]. Ova neuronska mreža umesto direktnog korišćenja CFA mozaika kao ulaza prvo generiše jednostavne bilinearne interpolacije kanala, a zatim koristi strategiju učenja reziduala za rekonstrukciju slika u boji. Umesto direktnog izlaza u obliku konačne slike u boji, mreža predviđa sliku reziduala, što poboljšava preciznost rekonstrukcije.

Predloženi model takođe usvaja dvostepenu šemu obrade informacija da bi se informacije iz zelenog kanala na što bolji način iskoristile za vođenje rekonstrukcije crvenog i plavog kanala.

4. REZULTATI EKSPERIMENATA

Kako se u ovom radu metode kao što su RI, MLRI i ARI porede sa rešenjem u obliku duboke neuronske mreže na bazi CNN, bila je neophodna adekvatna baza slika. Podaci su korišćeni za generisanje parova referentnih slika i simuliranih Bajerovih mozaika, na kojima su testirani rezultati razmatranih metoda. Takođe, za obuku neuronske mreže bile su neophodne baze slika koje obuhvataju različite vrste scena i uslove osvetljenja. Tokom obuke neuronske mreže korišćena su tri skupa podataka: Kodac, McMaster i WED-CDM, videti [6].

Svaki od navedenih algoritama je testiran na nasumično odabranim slikama iz DIV2K skupa podataka. Ovaj skup podataka sadrži slike visoke rezolucije koje su idealne za evaluaciju algoritama za poboljšanje rekonstrukcije i obradu Bajerovog CFA mozaika. DIV2K karakteriše visoka rezolucija i raznovrsnost scena, pružajući mogućnost detaljne i precizne analize algoritama.

U uporednoj analizi algoritama ključne metrike za ocenu kvaliteta rekonstruisanih slika bile su PSNR (engl. peak signal to noise ratio) i CPSNR (engl. color peak signal to noise ratio). PSNR u [dB] često se koristi za procenu kvaliteta rekonstrukcije u obradi signala. Ova metrika meri odnos između maksimalne moguće snage signala i snage šuma, greške rekonstrukcije procenjene na osnovu srednje kvadratne greške MSE (engl. mean squared error):

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [I(i,j) - K(i,j)]^2 \quad (4)$$

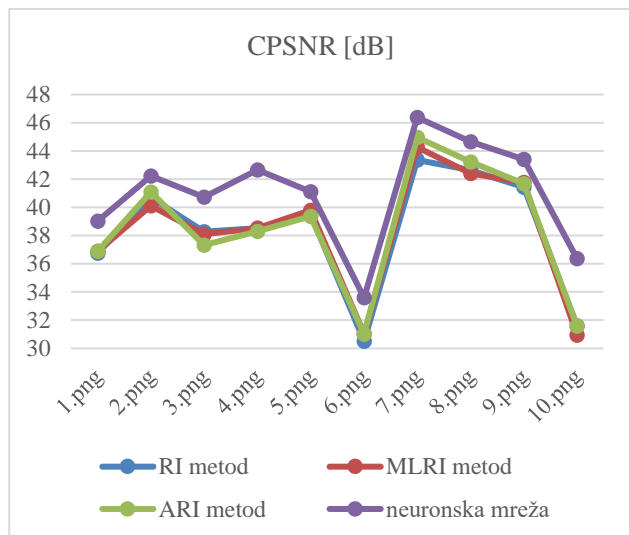
$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{MAX^2}{MSE} \right) \quad (5)$$

CPSNR se koristi kada je potrebno imati jednu konsolidovanu vrednost koja predstavlja ukupan kvalitet rekonstrukcije slike u boji. Ova metrika može da bude prikladnija za procenu ukupnog kvaliteta slike u boji jer uzima u obzir sva tri kanala istovremeno:

$$MSE_{total} = \frac{1}{3MN} \sum_{k=1}^3 \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [I(i,j) - K(i,j)]^2 \quad (6)$$

$$CPSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{MAX^2}{MSE_{total}} \right) \quad (7)$$

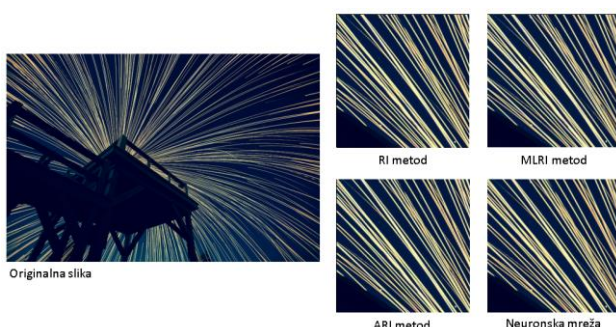
Rezultati eksperimenata na primeru 10 slika iz test skupa grafički su prikazani na Slici 2, dok je vizuelno poređenje rezultata prikazano na Slici 3 i Slici 4.



Slika 2. Poređenje vrednosti CPSNR za analizirane algoritme (RI, MLRI, ARI i CNN)



Slika 3. Rezultati rekonstruisane slike psi u vodi (4.png)



Slika 4. Rezultati rekonstruisane slike vatrometa (10.png)

5. ZAKLJUČAK

U radu su poređene dve reprezentativne grupe algoritama za rekonstrukciju slike na osnovu Bajerovog mozaika. Implementirane su različite metode zasnovane na interpolaciji reziduala i demonstrirane njihove karakteristike na adekvatnom skupu referentnih slika.

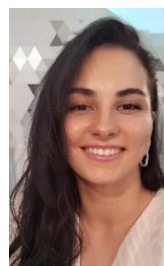
Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da je svako od unapređenja predloženih u literaturi imalo uticaj na kvalitet rekonstrukcije, dok je neuronska mreža demonstrirala najbolje rezultate.

Međutim, treba imati u vidu ograničenja sistema za obradu slike, koji u slučaju rekonstrukcije zahtevaju brzo izvršavanje i malu potrošnju energije, uz što manju cenu hardvera. U tom slučaju, pored ostvarenih rezultata rekonstrukcije, mogućnost implementacije uz navedena ograničenja može da ima značajnu ulogu u izboru odgovarajućeg algoritma. Stoga su postupci interpolacije reziduala na bazi adaptivnog linearnog filtriranja i dalje veoma aktuelni.

6. LITERATURA

- [1] Bayer, B. E. (1976). Color imaging array, *U.S. Patent* 3,971,065, July 20, 1976.
- [2] Qian, G., Wang, Y., Gu, J., Dong, C., Heidrich, W., Ghanem, B., Ren, J. S. (2023). Rethinking learning-based demosaicing, denoising, and super-resolution pipeline. *IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, pp. 1-12
- [3] Kiku, D., Monno, Y., Tanaka, M., Okutomi, M. (2013). Residual interpolation for color image demosaicing. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 22, No. 11, pp. 4270-4280.
- [4] Kiku, D., Monno, Y., Tanaka, M., Okutomi, M. (2014). Minimized-Laplacian residual interpolation for color image demosaicing. *IS&T/SPIE Electronic Imaging (EI), Digital Photography X*, Vol. 9023, pp. 90230L-1-8.
- [5] Monno, Y., Kiku, D., Tanaka, M., Okutomi, M. (2015). Adaptive residual interpolation for color image demosaicing. *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pp. 3861-3865
- [6] Tan, R., Zhang, K., Zuo, W., Zhang, L. (2017). Color image demosaicing via deep residual learning. *IEEE Int. Conf. Multimedia Expo (ICME)*, Vol. 2, No. 4, pp. 1-6.
- [7] He, K., Sun, J., Tang, X. (2013). Guided image filtering. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 35, No. 6, pp. 1397-1409.
- [8] Pekkucuksen, I., Altunbasak, Y. (2010). Gradient based threshold free color filter array interpolation, *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Hong Kong, pp. 1377-1380.
- [9] Hamilton, J.F., Adams J.E. (1997). Adaptive color plan interpolation in single sensor color electronic camera, *U.S. Patent* 5,629,734, 1997.

Kratka biografija:



Tamara Tešanović - rođena je u Novom Sadu 1997. god. Osnovne studije Biomedicinskog inženjerstva na Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu završila je 2021. godine. Master rad iz oblasti Elektrotehnike i računarstva na studijskom programu Biomedicinsko inženjerstvo, na istom fakultetu, uspešno je odbranila 2024.

email: tesanovictamara05@gmail.com