

Efikasna hardverska implementacija dvodimenzionalne inverzne DWT korišćenjem 5/3 filtara

Goran Savić, Milan Prokin, *Member, IEEE*, Vladimir Rajović i Dragana Prokin, *Member, IEEE*

Apstrakt—U ovom radu je opisana efikasna hardverska implementacija dvodimenzionalne inverzne diskretne *wavelet* transformacije (DWT) koja upotrebljava inverzne 5/3 filtre kao osnovne gradivne elemente. Prezentovana implementacija ima manji utrošak logičkih resursa u poređenju sa ostalim implementacijama opisanim u literaturi. Predložena implementacija koristi i memoriju manjeg kapaciteta od bilo koje druge do sada objavljene implementacije. Prezentovana implementacija ima manju potrošnju u poređenju sa drugim implementacijama iz literature, dok je njena maksimalna radna frekvencija uporediva sa maksimalnim radnim frekvencijama drugih implementacija. Predložena hardverska implementacija se može iskoristiti u sistemima za dekompresiju digitalne slike koji koriste inverzne 5/3 filtre, kao što je npr. JPEG 2000.

Ključne reči—Dvodimenzionalna inverzna DWT; inverzni 5/3 filtri; efikasna hardverska implementacija.

I. UVOD

Diskretna *wavelet* transformacija (DWT) se danas primenjuje u mnogim oblastima. Ona je postala standardna tehnika u procesiranju signala, kodovanju digitalnih slika i video kompresiji. Neka od značajnijih istraživanja o *wavelet* transformaciji su objavljena u [1,2]. Dvodimenzionalna (2-D) DWT je postala deo standarda za kompresiju mirne slike JPEG 2000 [3], prema kom se digitalna slika ili njeni delovi dekomponuju u nekoliko nivoa dekompozicije pomoću 2-D DWT. Svaki od nivoa se sastoji od četiri podopsega koji sadrže odbirke signala koji predstavljaju horizontalne i vertikalne karakteristike prostorne frekvencije digitalne slike ili njenih delova. Osnovna reverzibilna transformacija koja se koristi prema JPEG 2000 standardu, realizuje se pomoću Le Galovih 5/3 filtara [4], koji omogućavaju savršenu rekonstrukciju signala, imaju dobre performanse za kompresiju svih tipova slika, kao i nisku računsku složenost [5].

Do sada je razvijen i u literaturi opisan veći broj različitih hardverskih implementacija 2-D inverzne DWT sa 5/3

filtrima. Generalizovana i programabilna implementacija sa četiri procesora, koja podržava filtriranje pomoću većeg broja različitih filtara je opisana u [6]. Hardverska implementacija paralelne 2-D DWT, zasnovane na dizanju (*lifting*), koja procesira veći broj nivoa dekompozicije/kompozicije korišćenjem jednog procesora koji računa i predikcione korake i korake za ažuriranje unutar osnovnog 5/3 filtra, prezentovana je u [7]. U radu [8] je predstavljena protočna hardverska implementacija 2-D DWT sa više nivoa dekompozicije/kompozicije (tzv. *pipelined multilevel architecture* - PMA) koja upotrebljava metod skeniranja piksela u parovima i koja ima veoma visoku maksimalnu radnu frekvenciju. U istom radu je opisana i hardverski efikasna rekurzivna implementacija 2-D DWT sa više nivoa dekompozicije/kompozicije (tzv. *recursive multilevel architecture* - RMA). Hardverska implementacija 2-D DWT, zasnovana na linijskom filtriranju po dve linije istovremeno, predložena je u [9]. Optimizacijom računskih operacija i protočnom arhitekturom kod ove implementacije je obezbeđena velika brzina procesiranja. Hardverska implementacija 2-D inverzne DWT zasnovane na dizanju i filtriranju liniju po liniju predstavljena je u [10]. Ova implementacija sadrži jedan procesor vrsta i jedan procesor kolona, koji rade paralelno, pri čemu se svaki od procesora sastoji od po četiri filtra. Umesto operacija množenja implementirane su kombinacije operacija bitskih pomeranja i sabiranja u cilju postizanja što veće optimizacije dizajna, dok je povećana maksimalna radna frekvencija ostvarena protočnošću dizajna. U radu [11] je opisana hardverska implementacija 2-D DWT sa prostornim kombinatornim algoritmom koji je zasnovan na dizanju sa redukovanom složenošću računskih operacija.

II. PREDLOŽENA HARDVERSKA IMPLEMENTACIJA 2-D INVERZNE DWT SA 5/3 FILTRIMA

Struktura hardverske implementacije 2-D inverzne DWT sa 5/3 filtrima i sa $J = 5$ nivoa kompozicije, koja je opisana u ovom radu, prikazana je na Sl. 1. Ova struktura se može na jednostavan način modifikovati sa ciljem da podrži i bilo koji drugi broj nivoa kompozicije.

Ulazni podaci za predstavljenu implementaciju 2-D inverzne DWT sa 5/3 filtrima su komponente dekomponovanog signala $z_{HH}^{(j)}[m,n]$, $z_{HL}^{(j)}[m,n]$ i $z_{LH}^{(j)}[m,n]$ iz nivoa j ($j=1,2,\dots,5$) kompozicije, kao i komponente

Goran Savić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: savic@el.etf.rs).

Milan Prokin – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: proka@el.etf.rs).

Vladimir Rajović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: rajo@el.etf.rs).

Dragana Prokin – Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, Vojvode Stepe 283, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: dprokin@viser.edu.rs).

dekomponovanog signala $z_{LL}^{(5)}[m,n]$ iz nivoa 5 kompozicije.

Komponente dekomponovanog signala $z_{HH}^{(j)}[m,n]$, $z_{HL}^{(j)}[m,n]$, $z_{LH}^{(j)}[m,n]$ i $z_{LL}^{(j)}[m,n]$ koje pripadaju podopsezima HH, HL, LH i LL, respektivno, nivoa j ($j=2,3,4,5$) kompozicije, prihvataju se u odgovarajuće registre "Ulazni registar nivoa j ", a zatim se propuštaju kroz multiplexer na čijem izlazu se pojavljuju odbirci signala $z_B[m,n]$:

$$z_B[m,n] = \begin{cases} z_{LH}^{(j)}[m,k], & \text{za } m = 2l, n = 2k \\ z_{LL}^{(j)}[m,k], & \text{za } m = 2l, n = 2k + 1 \\ z_{HH}^{(j)}[m,k], & \text{za } m = 2l + 1, n = 2k \\ z_{HL}^{(j)}[m,k], & \text{za } m = 2l + 1, n = 2k + 1 \end{cases} \quad (1)$$

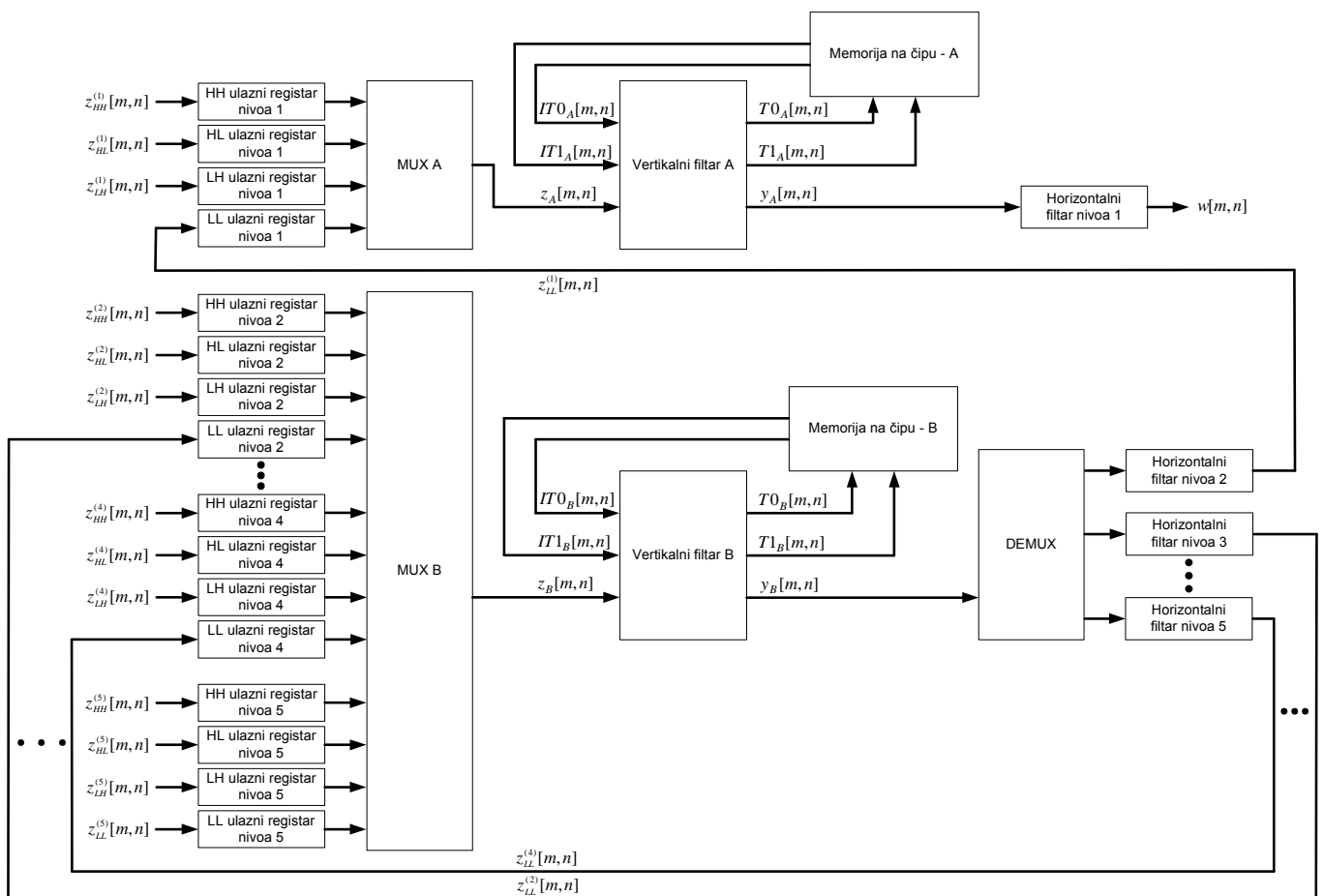
U ovoj notaciji podopseg LL predstavlja rezultat direktnog niskofrekventnog (NF) filtriranja duž vrsta i direktnog NF filtriranja duž kolona. Podopseg HL predstavlja rezultat direktnog NF filtriranja duž vrsta i direktnog visokofrekventnog (VF) filtriranja duž kolona. Podopseg LH predstavlja rezultat direktnog VF filtriranja duž vrsta i direktnog NF filtriranja duž kolona. Konačno, podopseg HH predstavlja rezultat direktnog VF filtriranja duž vrsta i

direktnog VF filtriranja duž kolona.

Odbirci signala $z_B[m,n]$ se dalje vertikalno filtriraju pomoću "Vertikalnog filtra B" koji na svom izlazu generiše odbirke signala $y_B[m,n]$:

$$y_B[m,n] = \begin{cases} y_H^{(j)}[m,k], & \text{za } n = 2k \\ y_L^{(j)}[m,k], & \text{za } n = 2k + 1 \end{cases} \quad (2)$$

gde $y_H^{(j)}[m,k]$ predstavlja visokofrekventne komponente signala iz nivoa j ($j=2,3,4,5$) koje potom treba da se horizontalno filtriraju, a $y_L^{(j)}[m,k]$ predstavlja niskofrekventne komponente signala iz nivoa j ($j=2,3,4,5$) koje treba da se horizontalno filtriraju. Odbirci signala $y_B[m,n]$ se zatim propuštaju kroz demultiplekser i horizontalno filtriraju pomoću "Horizontalnog filtra nivoa j " ($j=2,3,4,5$), koji na svom izlazu generiše komponente dekomponovanog signala $z_{LL}^{(j-1)}[m,n]$ ($j=2,3,4,5$) koje će kasnije biti iskorišćene za inverzno filtriranje na nivou $j-1$.



Sl. 1. Blok dijagram hardverske implementacije 2-D inverzne DWT sa 5/3 filtra.

Komponente $z_{HH}^{(1)}[m,n]$, $z_{HL}^{(1)}[m,n]$, $z_{LH}^{(1)}[m,n]$ i $z_{LL}^{(1)}[m,n]$ koje pripadaju podopsezima HH, HL, LH i LL, respektivno, nivoa 1 kompozicije, prihvataju se u odgovarajuće registre "Ulazni registar nivoa 1", a zatim se propuštaju kroz multiplexer na čijem izlazu se pojavljuju odbirci signala $z_A[m,n]$:

$$z_A[m,n] = \begin{cases} z_{LH}^{(1)}[m,k], & \text{za } m = 2l, n = 2k \\ z_{LL}^{(1)}[m,k], & \text{za } m = 2l, n = 2k + 1 \\ z_{HH}^{(1)}[m,k], & \text{za } m = 2l + 1, n = 2k \\ z_{HL}^{(1)}[m,k], & \text{za } m = 2l + 1, n = 2k + 1 \end{cases} \quad (3)$$

Odbirci signala $z_A[m,n]$ se dalje vertikalno filtriraju pomoću "Vertikalnog filtra A" koji na svom izlazu generiše odbirke signala $y_A[m,n]$:

$$y_A[m,n] = \begin{cases} y_H^{(1)}[m,k], & \text{za } n = 2k \\ y_L^{(1)}[m,k], & \text{za } n = 2k + 1 \end{cases}, \quad (4)$$

gde $y_H^{(1)}[m,k]$ predstavlja visokofrekventne komponente signala iz nivoa 1 koje potom treba da se horizontalno filtriraju, a $y_L^{(1)}[m,k]$ predstavlja niskofrekventne komponente signala iz nivoa 1 koje treba da se horizontalno filtriraju. Odbirci signala $y_A[m,n]$ se zatim horizontalno filtriraju pomoću "Horizontalnog filtra nivoa 1", koji na svom izlazu generiše piksele rekonstruisane slike $w[m,n]$.

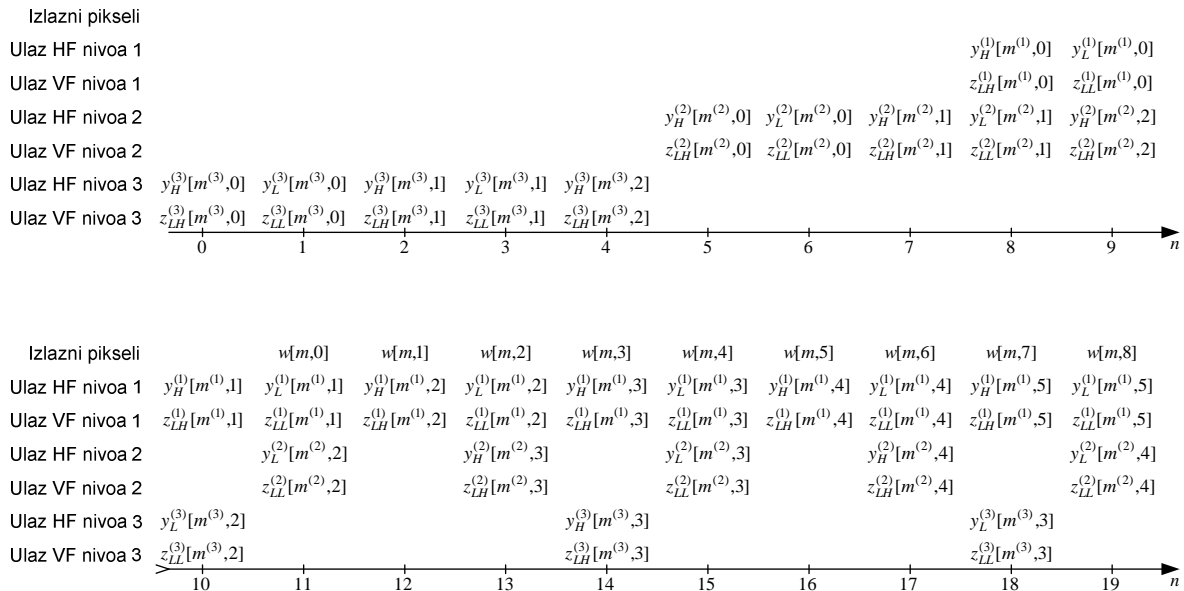
Svi horizontalni i vertikalni filtri u realizaciji sa Sl. 1 su implementirani kao 1-D inverzni Le Galovi 5/3 filtri.

Vremenski dijagram koji opisuje dinamiku 2-D inverznog filtriranja na početku parnih linija (brojeći od 0) za digitalnu sliku *high definition* (HD) rezolucije (dimenzija 1920×1080

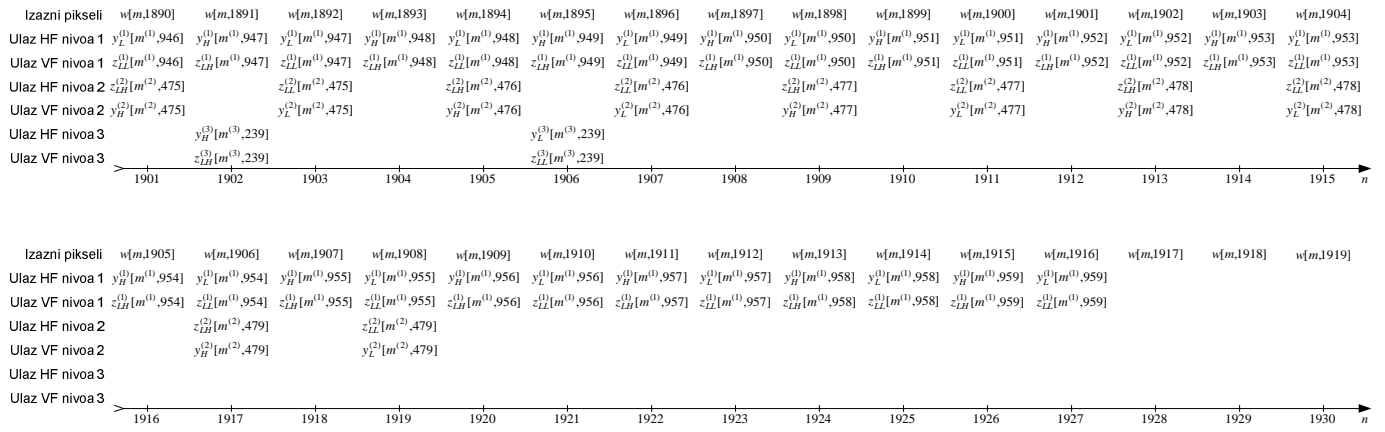
piksela) je prikazan na Sl. 2. Vremenski dijagram prikazuje linije sa prva tri nivoa kompozicije u slučaju kada su linije sa svakog od prikazanih nivoa parne (jer samo parne linije sadrže komponente dekomponovanog signala iz LL podopsega, a upravo ove komponente su neophodne za dalje inverzno filtriranje na narednom nivou kompozicije). Prikazani obrazac inverznog filtriranja na početku parnih linija se takođe primenjuje i na ostale nivoe kompozicije ($j=4,5$), koji nisu prikazani na Sl. 2.

Inverzno filtriranje inicijalnih pet komponenti signala u liniji na nivou j se sprovodi nakon inverznog filtriranja inicijalnih pet komponenti signala na nivou $j+1$, ali pre inverznog filtriranja inicijalnih pet komponenti signala na nivou $j-1$. Ciklusi takta za inverzno filtriranje šeste komponente signala na različitim nivoima kompozicije su izabrani na način da se postigne ispravno učešljanje tih ciklusa takta sa ciljem da se omogući korišćenje istog vertikalnog filtra za nivoe kompozicije od 2 do 5. Sve ostale komponente signala na nivou 4 se filtriraju u svakom osmom ciklusu takta, a sve ostale komponente signala na nivou 5 se filtriraju u svakom šesnaestom ciklusu takta. Čim se odgovarajuća komponenta signala sa nivoa j inverzno vertikalno isfiltrira, vrši se i njeno inverzno horizontalno filtriranje u istom ciklusu takta na istom nivou kompozicije.

Početni ciklus takta za filtriranje prvog odbirka signala na svakom od nivoa se bira na način koji omogućava ispravno učešljanje ciklusa takta u kojima se odbirci signala vertikalno filtriraju. Ovakav pristup omogućava korišćenje jednog inverznog vertikalnog filtra za nivo 1 kompozicije ("Vertikalni filter A") i drugog inverznog vertikalnog filtra za sve ostale nivoe kompozicije ("Vertikalni filter B"), jer je izbegnuto bilo kakvo preklapanje ciklusa takta kada se koristi "Vertikalni filter B" na različitim nivoima kompozicije.



Sl. 2. Vremenski dijagram dinamike 2-D inverznog filtriranja na početku parnih linija.



Sl. 3. Vremenski dijagram dinamike 2-D inverznog filtriranja na kraju parnih linija.

Vremenski dijagram koji ilustruje dinamiku 2-D inverznog filtriranja na samom kraju parnih linija čiji je početak prikazan na Sl. 2, prikazan je na Sl. 3. Za nivo 1 kompozicije je obrazac filtriranja na kraju linije isti kao i na početku te linije. Za sve ostale nivoe kompozicije, obrazac filtriranja je isti kao i na početku linije počev od šeste komponente signala unutar linije za svaki od nivoa. Zadnji piksel rekonstruisane slike ($w[m,1919]$) se generiše tri ciklusa takta nakon filtriranja zadnje komponente signala unutar linije na nivou 1.

Vremenski dijagram koji opisuje dinamiku 2-D inverznog filtriranja neparnih linija je skoro isti kao i u slučaju inverznog filtriranja parnih linija, ali uz dve razlike. Prva razlika je u tome što svaka parna komponenta signala (brojeći od 0) koja se pojavljuje na ulazu inverznog vertikalnog filtra ($z_{HH}^{(1)}[m^{(1)}, n^{(1)}]$), pripada podopsegu HH (umesto podopsegu LH), dok svaka neparna komponenta signala koja se pojavljuje na ulazu inverznog vertikalnog filtra ($z_{HL}^{(1)}[m^{(1)}, n^{(1)}]$), pripada podopsegu HL (umesto podopsegu LL). Druga razlika je u tome što je nivo 1 kompozicije ujedno i jedini nivo kompozicije, pošto ni komponente signala iz podopsega HH, niti komponente signala iz podopsega HL nisu generisane na osnovu komponenti signala iz prethodnih nivoa kompozicije.

Ilustracija inverznog filtriranja po linijama digitalne slike HD rezolucije, za predloženu hardversku implementaciju 2-D inverzne DWT, je prikazana na Sl. 4.

Parne linije $2k$ (brojeći od 0) komponenti signala iz nivoa 3 na ulazu u "Vertikalni filter B" sadrže komponente signala naizmenično iz podopsega LH i LL, tj. sledeću sekvencu odbiraka: $z_{LH}^{(3)}[2k,0]$, $z_{LL}^{(3)}[2k,0]$, $z_{LH}^{(3)}[2k,1]$, $z_{LL}^{(3)}[2k,1]$, $z_{LH}^{(3)}[2k,2]$, $z_{LL}^{(3)}[2k,2]$, itd., dok neparne linije $2k+1$ sadrže sekvencu komponenti signala iz podopsega HH i HL: $z_{HH}^{(3)}[2k+1,0]$, $z_{HL}^{(3)}[2k+1,0]$, $z_{HH}^{(3)}[2k+1,1]$, $z_{HL}^{(3)}[2k+1,1]$, $z_{HH}^{(3)}[2k+1,2]$, $z_{HL}^{(3)}[2k+1,2]$, itd. Ove komponente signala se inverzno vertikalno filtriraju pomoću "Vertikalnog filtra B", a zatim se inverzno horizontalno filtriraju pomoću "Horizontalnog filtra nivoa 3". Počev od linije 2 komponenti

signala iz nivoa 3, nakon inverznog vertikalnog i inverznog horizontalnog filtriranja generišu se komponente signala $z_{LL}^{(2)}[m^{(2)}, n^{(2)}]$ iz podopsega LL iz nivoa 2 kompozicije. Ove komponente signala ($z_{LL}^{(2)}[m^{(2)}, n^{(2)}]$) se kasnije koriste za inverzno vertikalno filtriranje na nivou 2. Sličan obrazac inverznog filtriranja po linijama važi i za ostale nivoe kompozicije, tj. parne linije komponenti signala na ulazu u odgovarajući inverzni vertikalni filter sadrže komponente signala naizmenično iz podopsega LH i LL, dok neparne linije sadrže sekvencu komponenti signala naizmenično iz podopsega HH i HL, s tim što se pauze između filtriranja susednih linija razlikuju u zavisnosti od nivoa, u skladu sa dinamikom predstavljenom na Sl. 4. Kao rezultat inverznog vertikalnog i inverznog horizontalnog filtriranja na nivou j ($j>1$) generišu se komponente signala $z_{LL}^{(j-1)}[m^{(j-1)}, n^{(j-1)}]$ iz podopsega LL iz nivoa $j-1$ kompozicije, koje se kasnije koriste za inverzno vertikalno filtriranje odgovarajućim filtrom na nivou $j-1$. Kao rezultat inverznog vertikalnog i inverznog horizontalnog filtriranja na nivou 1 nastaju linije rekonstruisane slike.

Nakon što se sve linije sa komponentama signala isfiltriraju pomoću odgovarajućeg inverznog vertikalnog filtra i odgovarajućeg inverznog horizontalnog filtra, u zadnja dva vremenska intervala u trajanju od jedne linije po intervalu u okviru posmatranog nivoa kompozicije, odgovarajući vertikalni filter se koristi za procesiranje internih međurezultata "privremeni rezultat 1" i "privremeni rezultat 2". Ovi interni međurezultati iz nivoa j ($j>1$) se koriste za generisanje zadnje dve linije rezultujućih komponenti signala iz podopsega LL iz nivoa $j-1$. Slično tome, dve linije internih međurezultata iz nivoa 1 se koriste za generisanje zadnje dve linije rekonstruisane slike.

"Memorija na čipu - A" i "Memorija na čipu - B" se koriste za smeštanje međurezultata u procesu izračunavanja rezultata inverznog vertikalnog filtriranja za nivo 1 kompozicije i za nivo j ($j=2,3,4,5$) kompozicije, respektivno.

Ulazne linije	Ulaz VF nivoa 3	Ulaz VF nivoa 2	Ulaz VF nivoa 1	Izlazne linije
0	linija 0 ⁽³⁾			
1	linija 1 ⁽³⁾			
2	linija 2 ⁽³⁾			
3		linija 0 ⁽²⁾		
4	linija 3 ⁽³⁾	linija 1 ⁽²⁾		
5		linija 2 ⁽²⁾	linija 0 ⁽¹⁾	
6		linija 3 ⁽²⁾	linija 1 ⁽¹⁾	linija 0
7			linija 2 ⁽¹⁾	linija 1
8	linija 4 ⁽³⁾	linija 4 ⁽²⁾	linija 3 ⁽¹⁾	linija 2
9			linija 4 ⁽¹⁾	linija 3
10		linija 5 ⁽²⁾	linija 5 ⁽¹⁾	linija 4
11			linija 6 ⁽¹⁾	linija 5
12	linija 5 ⁽³⁾	linija 6 ⁽²⁾	linija 7 ⁽¹⁾	linija 6
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
1068	linija 269 ⁽³⁾	linija 534 ⁽²⁾	linija 1064 ⁽¹⁾	linija 1062
1069			linija 1065 ⁽¹⁾	linija 1063
1070		linija 535 ⁽²⁾	linija 1066 ⁽¹⁾	linija 1064
1071			linija 1067 ⁽¹⁾	linija 1065
1072	privremeni rezultat 1 ⁽³⁾	linija 536 ⁽²⁾	linija 1068 ⁽¹⁾	linija 1066
1073			linija 1069 ⁽¹⁾	linija 1067
1074		linija 537 ⁽²⁾	linija 1070 ⁽¹⁾	linija 1068
1075			linija 1071 ⁽¹⁾	linija 1069
1076	privremeni rezultat 2 ⁽³⁾	linija 538 ⁽²⁾	linija 1072 ⁽¹⁾	linija 1070
1077			linija 1073 ⁽¹⁾	linija 1071
1078		linija 539 ⁽²⁾	linija 1074 ⁽¹⁾	linija 1072
1079			linija 1075 ⁽¹⁾	linija 1073
		privremeni rezultat 1 ⁽²⁾	linija 1076 ⁽¹⁾	linija 1074
		privremeni rezultat 2 ⁽²⁾	linija 1077 ⁽¹⁾	linija 1075
			linija 1078 ⁽¹⁾	linija 1076
			linija 1079 ⁽¹⁾	linija 1077
			privremeni rezultat 1 ⁽¹⁾	linija 1078
			privremeni rezultat 2 ⁽¹⁾	linija 1079

Sl. 4. Inverzno filtriranje po linijama.

TABELA I
REZULTATI SINTEZE RAZLIČITIH IMPLEMENTACIJA 2-D INVERZNE DWT SA 5/3 FILTRIMA

2-D inverzna DWT sa 5/3 filtra	[7]	PMA [8]	Predložena implementacija	RMA [8]	Predložena implementacija
Broj nivoa kompozicije	5	5	5	3	5
Dimenzije slike	512×512	512×512	512×512	256×256	512×512
FPGA čip	XC5VLX110T	XC5VLX110T	XC5VLX110T	XC4VFX100	XC4VFX100
Broj KLB	1052	1178	1049	1040	894
Maksimalna radna frekvencija [MHz]	221	539	248	n/a	164

TABELA II
POREĐENJE UTROŠENIH MEMORIJSKIH RESURSA KOD RAZLIČITIH IMPLEMENTACIJA 2-D INVERZNE DWT SA 5/3 FILTRIMA

2-D inverzna DWT sa 5/3 filtra	[6]	[9]	[10]	[11]	[7]	Predložena implementacija
Broj nivoa kompozicije	1	1	1	1	5	5
Dimenzije slike	128×128	256×256	512×512	512×512	512×512	512×512
Utrošena memorija [kbit]	236	>57	72	128	32	20

TABELA III
UKUPNA DISIPACIJA KOD RAZLIČITIH IMPLEMENTACIJA 2-D INVERZNE DWT SA 5/3 FILTRIMA (NA 100MHz ZA VIRTEX-5 XC5VLX110T FPGA ČIP)

2-D inverzna DWT sa 5/3 filtra	[7]	PMA [8]	Predložena implementacija
Broj nivoa kompozicije	1	1	5
Ukupna disipacija [mW]	1221	1009	1223

III. POREĐENJE PERFORMANSI RAZLIČITIH HARDVERSKIH IMPLEMENTACIJA 2-D INVERZNE DWT SA 5/3 FILTRIMA

Da bi se izvršilo poređenje rezultata sinteze prezentovane hardverske implementacije sa najboljim raspoloživim rezultatima sinteze drugih realizacija iz literature, prezentovana realizacija je implementirana za sliku dimenzija 512×512 piksela i 5 nivoa kompozicije na Xilinx Virtex-4 XC4VFX100 i na Virtex-5 XC5VLX110T FPGA čipu. Rezultati sinteze različitih implementacija 2-D inverzne DWT sa 5/3 filtrima za slučaj 16-bitne dužine reči su prikazani u Tabeli I. Može se uočiti da predložena hardverska implementacija zahteva korišćenje najmanjeg broja konfiguracionih logičkih blokova (KLB) u poređenju sa implementacijama [7] i PMA [8] koje sadrže 5 nivoa kompozicije. Takođe, predložena implementacija koristi manji broj KLB u poređenju sa implementacijom RMA [8], iako je predložena realizacija implementirana za slike dimenzija 512×512 piksela i 5 nivoa kompozicije, dok je arhitektura RMA [8] implementirana za slike manjih dimenzija i 3 nivoa kompozicije. S obzirom da implementacija PMA [8] koristi pipeline procesor u sklopu svog dizajna, ona omogućava postizanje najveće radne frekvencije.

Poređenje utrošenih memorijskih resursa različitih hardverskih implementacija 2-D inverzne DWT sa 5/3 filtrima (za 10-bitnu dužinu reči kako bi se izvršilo pravilno poređenje sa rezultatima iz [7]) je predstavljeno u Tabeli II. Ti rezultati jasno pokazuju da predložena hardverska implementacija zahteva korišćenje memorije najmanjeg kapaciteta u odnosu na implementacije iz [6,7] i [9-11] i pored toga što je predložena realizacija implementirana za slike dimenzija 512×512 piksela i 5 nivoa kompozicije, dok su realizacije iz [6] i [9-11] implementirane za samo 1 nivo kompozicije, pri čemu neke od njih za slike manjih dimenzija.

U Tabeli III su predstavljeni rezultati analize disipacije za različite hardverske implementacije 2-D inverzne DWT sa 5/3 filtrima na radnoj frekvenciji od 100MHz za slike dimenzija 512×512 piksela, 16-bitnu dužinu reči i Virtex-5 XC5VLX110T FPGA čip. Uočava se da predložena hardverska implementacija ima sličnu disipaciju kao i implementacije [7] i PMA [8], iako je estimacija disipacije za predloženu implementaciju urađena za 5 nivoa kompozicije, a za ostale samo za 1 nivo kompozicije.

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisana hardverska implementacija 2-D inverzne DWT sa 5/3 filtrima je efikasnija u pogledu utroška logičkih i memorijskih resursa u odnosu na ostale implementacije do sada prezentovane u literaturi. Imajući u vidu da je 2-D inverzna DWT sa 5/3 filtrima deo standarda za kompresiju/dekompresiju mirne slike JPEG 2000, prezentovana implementacija omogućava realizaciju kompletnog JPEG 2000 dekodera u okviru jednog FPGA čipa nižeg cenovnog razreda i to bez korišćenja eksterne memorije.

Sredstva za ovaj rad su delimično obezbeđena od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije u okviru projekta TR32039.

LITERATURA

- [1] S. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation," *IEEE Trans. Pattern Analysis Machine Intelligence*, vol. 11, no. 7, pp. 674–693, July 1989.
- [2] M. Vetterli and J. Kovacevic, *Wavelets and Subband Coding*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.
- [3] T. Acharya and P. S. Tsai, *JPEG2000 Standard for Image Compression Concepts, Algorithms and VLSI Architectures*, Hoboken, New Jersey, John Wiley and Sons, 2004.
- [4] D. Le Gall and A. Tabatabai, "Subband coding of digital images using symmetric short kernel filters and arithmetic coding techniques," *Proc. Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Process. (ICASSP)*, pp. 761–764, Apr. 1988.
- [5] M.D. Adams and F. Kossentini, "Reversible integer-to-integer wavelet transforms for image compression: performance evaluation and analysis," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 9, no. 6, pp. 1010–1024, Jun 2000.
- [6] K. Andra, C. Chakrabarti, and T. Acharya, "A VLSI architecture for lifting-based forward and inverse wavelet transform," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 50, no. 4, pp. 966–977, Apr. 2002.
- [7] S. M. Aziz and D. M. Pham, "Efficient parallel architecture for multi-level forward discrete wavelet transform processors," *Comp. Elect. Eng.*, vol. 38, no. 5, pp. 1325–1335, Sep. 2012.
- [8] A. D. Darji, S. S. Kushwah, S. N. Merchant, and A. N. Chandorkar, "High-performance hardware architectures for multi-level lifting-based discrete wavelet transform," *Eurasip J. Image Video Process.* vol. 47, pp. 1–19, Dec. 2014.
- [9] G. Dillen, B. Georis, J. D. Legat, and O. Cantineau, "Combined line-based architecture for the 5–3 and 9–7 wavelet transform of JPEG2000," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 13, no. 9, pp. 944–950, Sept. 2003.
- [10] X. Lan, N. Zheng, and Y. Liu, "Low-power and high-speed VLSI architecture for lifting-based forward and inverse wavelet transform," *IEEE Trans. Consum. Electr.*, vol. 51, no. 2, pp. 379–385, May 2005.
- [11] L. Liu, N. Chen, H. Meng, L. Zhang, Z. Wang, and H. Chen, "A VLSI architecture of JPEG2000 encoder," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 39, no. 11, pp. 2032–2040, Nov. 2004.

ABSTRACT

In this paper, an efficient hardware implementation of two-dimensional inverse discrete wavelet transform (DWT) utilizing inverse 5/3 filters as basic building elements, is described. The proposed implementation requires less number of logic elements compared to any other implementation from the literature. The proposed implementation also requires smaller capacity of memory than any other published implementation. The described implementation has smaller power dissipation and simultaneously maximum operating frequency comparable to other implementations from the literature. The presented implementation can be utilized in image decomposition systems which utilize inverse 5/3 filters, such as JPEG 2000.

Efficient Hardware Implementation of Two-Dimensional Inverse DWT Using 5/3 Filters

Goran Savić, Milan Prokin, Vladimir Rajović, Dragana Prokin