

Efikasna hardverska implementacija dvodimenzionalne direktne DWT korišćenjem 5/3 filtara

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

Apstrakt—U ovom radu je prezentovana efikasna hardverska implementacija dvodimenzionalne direktne diskretne *wavelet* transformacije (DWT) koja koristi 5/3 filtre kao osnovne gradivne blokove. Predložena implementacija zahteva korišćenje manjeg broja konfiguracionih logičkih blokova u poređenju sa ostalim implementacijama poznatim iz literature. Predložena implementacija zahteva i korišćenje memorije manjeg kapaciteta od bilo koje druge do sada objavljene implementacije. Opisana implementacija ima maksimalnu radnu frekvenciju uporedivu sa drugim implementacijama iz literature, i pritom ima manju potrošnju u poređenju sa njima. Prezentovana implementacija je pogodna za korišćenje u sistemima za kompresiju digitalne slike koji koriste 5/3 filtre, kao što je npr. JPEG 2000.

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

I. UVOD

Značaj i prednosti *wavelet* transformacije u odnosu na konvencionalne transformacione postupke su prepoznati i opisani u [1]. Stoga je *wavelet* transformacija postala standardna tehnika u postupku kompresije digitalne slike otkad je u [2] predložena multirezoluciona reprezentacija signala zasnovana na *wavelet* dekompoziciji. Dvodimenzionalna (2-D) diskretna *wavelet* transformacija (DWT) je potom postala deo poznatog standarda za kompresiju mirne slike JPEG 2000 [3].

Prema JPEG 2000 standardu, digitalna slika ili njeni delovi se dekomponuju kroz različite nivoe dekompozicije korišćenjem 2-D DWT. Svaki od nivoa dekompozicije se sastoji od po četiri podopsega koji sadrže odbirke signala koji opisuju horizontalne i vertikalne karakteristike prostorne frekvencije nekomprimovane slike ili njenih delova. U cilju izvođenja 2-D direktne DWT, JPEG 2000 standard koristi jednodimenzionalnu (1-D) dekompoziciju na podopsege odbiraka signala horizontalno po vrstama i odbiraka signala vertikalno po kolonama, transformišući ih u niskofrekventne i visokofrekventne rezultujuće odbirke. Osnovna reverzibilna

transformacija koja se koristi u JPEG 2000 standardu, je realizovana korišćenjem Le Galovih 5/3 filtara [4].

U literaturi je do sada prezentovan veći broj hardverskih implementacija 2-D direktne DWT sa 5/3 filtrima. U radu [5] je opisana generalizovana blokovska implementacija sa četiri procesora koja je programabilna i veoma fleksibilna, ali koja zahteva korišćenje memorije velikog kapaciteta. Ova implementacija podržava ne samo filtriranje pomoću 5/3 filtara, već i filtriranje pomoću niza drugih filtara. Hardverska implementacija paralelne 2-D DWT zasnovane na dizanju (*lifting*), koja procesira veći broj nivoa dekompozicije pomoću jednog procesora koji računa i predikcione korake i korake za ažuriranje unutar osnovnog 5/3 filtra, predstavljena je u [6]. Za izračunavanje 2-D DWT je u [7] prezentovana protočna hardverska implementacija sa više nivoa dekompozicije (tzv. *pipelined multilevel architecture* - PMA) koja koristi metod skeniranja piksela u parovima i koja omogućava procesiranje na visokoj radnoj frekvenciji, koja ima malo kašnjenje i nizak nivo potrošnje u poređenju sa postojećim implementacijama 2-D DWT. U istom radu je predložena i hardverski efikasna rekurzivna implementacija 2-D DWT sa više nivoa dekompozicije (tzv. *recursive multilevel architecture* - RMA). Hardverska implementacija 2-D DWT, zasnovana na linijskom filtriranju koja podržava filtriranje pomoću 5/3 filtara i 9/7 filtara, opisana je u [8]. Ova implementacija istovremeno procesira dve linije, redukujući utrošak memorijskih resursa. Protočna arhitektura i optimizacija računskih operacija obezbeđuje veliku brzinu procesiranja, dok kombinacija dva različita tipa filtara u okviru iste strukture doprinosi smanjenju zauzete površine unutar čipa sa programabilnom logikom. U radu [9] je predložena hardverska implementacija 2-D direktne DWT zasnovane na dizanju i filtriranju liniju po liniju. Realizacija se sastoji od jednog procesora vrsta i jednog procesora kolona, od kojih svaki sadrži po četiri filtra. Procesor vrsta radi paralelno sa procesorom kolona. Operacije množenja su zamenjene kombinacijama operacija bitskih pomeranja i sabiranja u cilju postizanja što veće optimizacije dizajna, dok je protočnošću dizajna povećana maksimalna radna frekvencija. U okviru hardverske implementacije JPEG 2000 enkodera, prezentovane u [10], opisana je i realizacija 2-D DWT sa prostornim kombinatornim algoritmom zasnovanim na dizanju sa redukovanom kompleksnošću računskih operacija.

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).

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

Blok dijagram hardverske implementacije 2-D direktne DWT sa 5/3 filtrima i $J = 5$ nivoa dekompozicije, opisane u ovom radu, je prikazan na Sl. 1.

Pikseli nekomprimovane slike $p[m,n]$ se prihvataju u "HF ulazni registar nivoa 1" i zatim horizontalno filtriraju "Horizontalnim filtrom nivoa 1", liniju po liniju. Svi horizontalni filtri u realizaciji sa Sl. 1 su implementirani kao 1-D direktni Le Galovi 5/3 filtri, koji na svom izlazu generišu naizmenično visokofrekventne i niskofrekventne rezultujuće odbirke signala. Kao rezultat, na izlazu "Horizontalnog filtra nivoa 1" se generišu odbirci $y_A[m,n]$:

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

gde $y_H^{(1)}[m,k]$ predstavlja visokofrekventne komponente horizontalno filtriranih piksela na nivou 1 dekompozicije, a $y_L^{(1)}[m,k]$ predstavlja niskofrekventne komponente horizontalno filtriranih piksela na nivou 1 dekompozicije.

Odbirci signala $y_A[m,n]$ se dalje vertikalno filtriraju "Vertikalnim filtrom A", pri čemu se generišu rezultujući odbirci dekomponovanog signala $z_A[m,n]$:

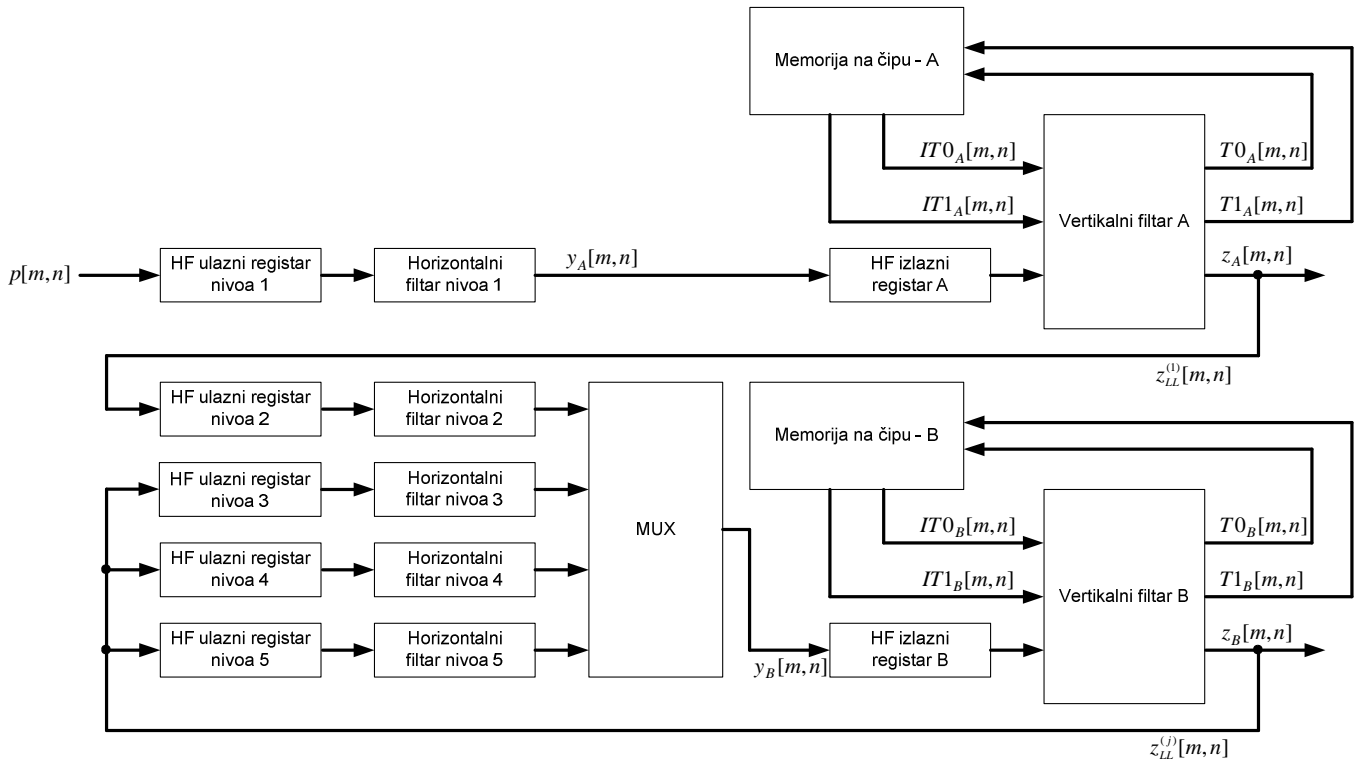
$$z_A[m,n] = \begin{cases} z_{LH}^{(1)}[m,k], & za\ m = 2l, n = 2k \\ z_{LL}^{(1)}[m,k], & za\ m = 2l, n = 2k + 1 \\ z_{HH}^{(1)}[m,k], & za\ m = 2l + 1, n = 2k \\ z_{HL}^{(1)}[m,k], & za\ m = 2l + 1, n = 2k + 1 \end{cases}. \quad (2)$$

Rezultujući odbirci dekomponovanog signala na nivou 1 dekompozicije: $z_{LH}^{(1)}[m,n]$, $z_{LL}^{(1)}[m,n]$, $z_{HH}^{(1)}[m,n]$ i $z_{HL}^{(1)}[m,n]$ pripadaju podopsezima LH, LL, HH i HL sa nivoa 1, respektivno.

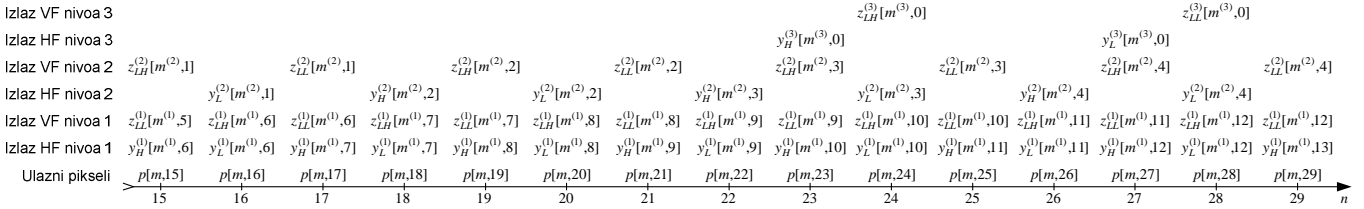
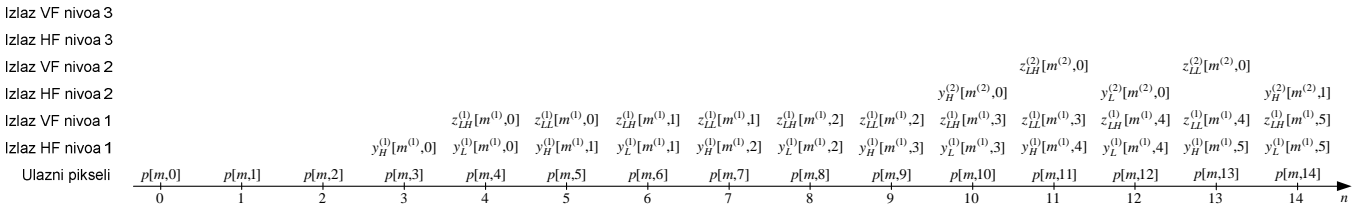
Odbirci $z_{LL}^{(1)}[m,n]$ se prihvataju jedan po jedan u "HF ulazni registar nivoa 2" i zatim horizontalno filtriraju "Horizontalnim filtrom nivoa 2", nakon čega se propuštaju kroz multiplekser, čime se generišu odbirci signala $y_B[m,n]$:

$$y_B[m,n] = \begin{cases} y_H^{(j)}[m,k], & za\ n = 2k \\ y_L^{(j)}[m,k], & za\ n = 2k + 1 \end{cases}, \quad (3)$$

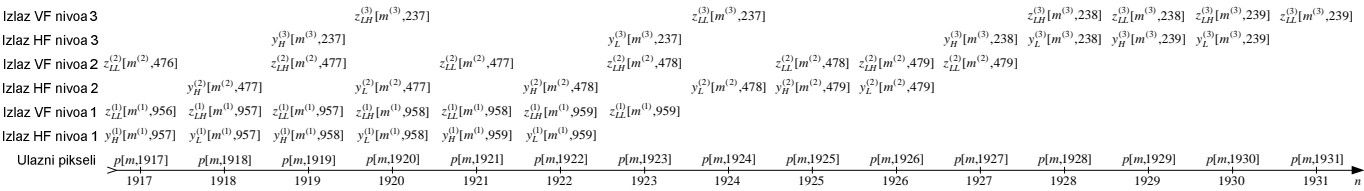
gde $y_H^{(j)}[m,k]$ predstavlja visokofrekventne komponente horizontalno filtriranih odbiraka na nivou j ($j=2,3,4,5$) dekompozicije, a $y_L^{(j)}[m,k]$ predstavlja niskofrekventne komponente horizontalno filtriranih odbiraka na nivou j ($j=2,3,4,5$) dekompozicije.



Sl. 1. Blok dijagram hardverske implementacije 2-D direktne DWT sa 5/3 filtrima.



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



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

Odbirci signala $y_B[m,n]$ se dalje vertikalno filtriraju “Vertikalnim filtrom B”, pri čemu se generišu rezultujući odbirci dekomponovanog signala $z_B[m,n]$:

$$z_B[m,n] = \begin{cases} z_{LH}^{(j)}[m,k], & \text{za } m = 2l, n = 2k \\ z_{LL}^{(j)}[m,k], & \text{za } m = 2l, n = 2k + 1 \\ z_{HH}^{(j)}[m,k], & \text{za } m = 2l + 1, n = 2k \\ z_{HL}^{(j)}[m,k], & \text{za } m = 2l + 1, n = 2k + 1 \end{cases} \quad (4)$$

Rezultujući odbirci dekomponovanog signala na nivou j dekompozicije: $z_{LH}^{(j)}[m,n]$, $z_{LL}^{(j)}[m,n]$, $z_{HH}^{(j)}[m,n]$ i $z_{HL}^{(j)}[m,n]$ pripadaju podopsezima LH, LL, HH i HL sa nivoa j ($j=2,3,4,5$), respektivno.

Odbirci $z_{LL}^{(j)}[m,n]$ ($j=2,3,4$) se prihvataju jedan po jedan u “HF ulazni registar nivoa $j+1$ ” i zatim horizontalno filtriraju “Horizontalnim filtrom nivoa $j+1$ ”, nakon čega se propuštaju kroz multiplexer zajedno sa odbircima sa ostalih nivoa dekompozicije od 2 do 5, čime se generišu odbirci signala $y_B[m,n]$.

Vremenski dijagram koji opisuje dinamiku 2-D filtriranja na početku parnih linija (brojeći od 0) digitalne slike *high definition* (HD) rezolucije (dimenzija 1920×1080 piksela) je prikazan na Sl. 2. Vremenski dijagram prikazuje linije sa prva tri nivoa dekompozicije u slučaju kada su linije sa svakog od prikazanih nivoa parne (jer samo kod parnih linija se generišu rezultujući odbirci dekomponovanog signala iz LL

podopsega, koji se dalje filtriraju na narednim nivoima dekompozicije). Prikazani obrazac filtriranja na početku parnih linija se nastavlja i na ostalim nivoima dekompozicije ($j=4,5$), koji nisu predstavljeni na Sl. 2. Horizontalno filtriranje linije na nivou j dekompozicije započinje nakon što prvi rezultujući odbirak iz podopsega LL sa nivoa $j-1$ dekompozicije bude prihvaćen od strane horizontalnog filtra sa nivoa j . Čim se taj odbirak horizontalno isfiltrira, vrši se i njegovo vertikalno filtriranje u sledećem ciklusu takta na istom nivou dekompozicije.

Rezultujući isfiltrirani odbirci signala na nivou 4 se generišu u svakom osmom ciklusu takta, dok se rezultujući isfiltrirani odbirci signala na nivou 5 generišu u svakom šesnaestom ciklusu takta. Početni trenutak za generisanje prvog rezultujućeg odbirka signala na svakom od nivoa dekompozicije je izabran na način da bude omogućeno odgovarajuće učešljanje ciklusa takta u kojima se generišu rezultujući vertikalno isfiltrirani odbirci signala. Ovakav pristup omogućava korišćenje jednog vertikalnog filtra za nivo 1 dekompozicije (“Vertikalni filter A”) i jednog vertikalnog filtra za sve ostale nivoe dekompozicije (“Vertikalni filter B”), s obzirom da je izbegnuto preklapanje ciklusa takta kada se koristi “Vertikalni filter B” na različitim nivoima dekompozicije.

Vremenski dijagram dinamike filtriranja na samom kraju parnih linija čiji je početak prikazan na Sl. 2, prikazan je na Sl. 3.

Ulazne linije	Izlaz VF nivoa 1	Izlaz VF nivoa 2	Izlaz VF nivoa 3
0	privremeni rezultat 1 ⁽¹⁾		
1	privremeni rezultat 2 ⁽¹⁾		
2	linija 0 ⁽¹⁾	privremeni rezultat 1 ⁽²⁾	
3	linija 1 ⁽¹⁾		
4	linija 2 ⁽¹⁾	privremeni rezultat 2 ⁽²⁾	
5	linija 3 ⁽¹⁾		
6	linija 4 ⁽¹⁾	linija 0 ⁽²⁾	privremeni rezultat 1 ⁽³⁾
7	linija 5 ⁽¹⁾	linija 1 ⁽²⁾	
8	linija 6 ⁽¹⁾	linija 2 ⁽²⁾	
9	linija 7 ⁽¹⁾		
10	linija 8 ⁽¹⁾	linija 3 ⁽²⁾	privremeni rezultat 2 ⁽³⁾
11	linija 9 ⁽¹⁾		
12	linija 10 ⁽¹⁾	linija 4 ⁽²⁾	
13	linija 11 ⁽¹⁾	linija 5 ⁽²⁾	
14	linija 12 ⁽¹⁾	linija 6 ⁽²⁾	linija 0 ⁽³⁾
15	linija 13 ⁽¹⁾		
16	linija 14 ⁽¹⁾		
17	linija 15 ⁽¹⁾		
18	linija 16 ⁽¹⁾	linija 37 ⁽²⁾	linija 1 ⁽³⁾
•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
1074	linija 1072 ⁽¹⁾	linija 534 ⁽²⁾	linija 265 ⁽³⁾
1075	linija 1073 ⁽¹⁾		
1076	linija 1074 ⁽¹⁾	linija 535 ⁽²⁾	
1077	linija 1075 ⁽¹⁾		
1078	linija 1076 ⁽¹⁾	linija 536 ⁽²⁾	linija 266 ⁽³⁾
1079	linija 1077 ⁽¹⁾		
	linija 1078 ⁽¹⁾	linija 537 ⁽²⁾	linija 267 ⁽³⁾
	linija 1079 ⁽¹⁾	linija 538 ⁽²⁾	linija 268 ⁽³⁾
		linija 539 ⁽²⁾	linija 269 ⁽³⁾

Sl. 4. Filtriranje po linijama.

Za nivo 1 je obrazac filtriranja na kraju linije isti kao i na početku te linije. Za sve ostale nivoe dekompozicije, obrazac filtriranja je isti kao i na početku linije sve do trenutka kada se izgeneriše zadnji rezultujući odbirak iz podopsega LL sa prethodnog nivoa dekompozicije. Počevši od narednog ciklusa takta, svi preostali rezultujući odbirci na tekućem nivou dekompozicije se generišu u uzastopnim ciklusima takta.

Vremenski dijagram koji opisuje dinamiku 2-D filtriranja neparnih linija je skoro isti kao i u slučaju filtriranja parnih linija, ali uz dve razlike. Prva razlika je u tome što svaki parni (brojeći od 0) rezultujući odbirak $z_{HH}^{(1)}[m^{(1)}, n^{(1)}]$, isfiltriran i horizontalno i vertikalno, pripada podopsegu HH (umesto podopsegu LH), dok svaki neparni rezultujući odbirak $z_{HL}^{(1)}[m^{(1)}, n^{(1)}]$, isfiltriran i horizontalno i vertikalno, pripada podopsegu HL (umesto podopsegu LL). Druga razlika je u tome što je nivo 1 dekompozicije ujedno i jedini nivo dekompozicije, jer se rezultujući odbirci iz podopsega HH i podopsega HL ne filtriraju dalje na narednim nivoima dekompozicije.

Ilustracija filtriranja po linijama digitalne slike HD rezolucije, za predloženu hardversku implementaciju 2-D

direktne DWT, je prikazana na Sl. 4. Nakon horizontalnog filtriranja linije 0 ulazne slike, “Vertikalni filter A” generiše “privremeni rezultat 1” (koji zapravo predstavlja niz odbiraka nulte vrednosti) za nivo 1 dekompozicije, izračunavajući pritom interne međurezultate koji će kasnije biti iskorišćeni za generisanje validnih rezultujućih odbiraka na nivou 1. Nakon horizontalnog filtriranja linije 1 ulazne slike, “Vertikalni filter A” generiše “privremeni rezultat 2” (koji zapravo predstavlja niz odbiraka nulte vrednosti) za nivo 1 dekompozicije, izračunavajući pritom interne međurezultate koji će kasnije biti iskorišćeni za generisanje validnih rezultujućih odbiraka na nivou 1. Nakon horizontalnog filtriranja linije 2 ulazne slike, “Vertikalni filter A” generiše liniju 0 validnih rezultujućih odbiraka na nivou 1. Ta linija sadrži rezultujuće odbirke naizmenično iz podopsega LH i LL, tj. sledeću sekvencu odbiraka: $z_{LH}^{(1)}[0,0]$, $z_{LL}^{(1)}[0,0]$, $z_{LH}^{(1)}[0,1]$, $z_{LL}^{(1)}[0,1]$, $z_{LH}^{(1)}[0,2]$, $z_{LL}^{(1)}[0,2]$, itd. Nakon horizontalnog filtriranja linije 3 ulazne slike, “Vertikalni filter A” generiše liniju 1 validnih rezultujućih odbiraka na nivou 1. Ta linija sadrži rezultujuće odbirke naizmenično iz podopsega HH i HL, tj. sledeću sekvencu odbiraka: $z_{HH}^{(1)}[1,0]$, $z_{HL}^{(1)}[1,0]$, $z_{HH}^{(1)}[1,1]$, $z_{HL}^{(1)}[1,1]$,

$z_{HH}^{(1)}[1,2]$, $z_{HL}^{(1)}[1,2]$, itd. Ovaj obrazac se nastavlja i za sve preostale linije na nivou 1, tj. parne linije $2k$ (brojeći od 0) sadrže sekvencu rezultujućih odbiraka iz podopsega LH i LL: $z_{LH}^{(1)}[2k,0]$, $z_{LL}^{(1)}[2k,0]$, $z_{LH}^{(1)}[2k,1]$, $z_{LL}^{(1)}[2k,1]$, $z_{LH}^{(1)}[2k,2]$, $z_{LL}^{(1)}[2k,2]$, itd., dok neparne linije $2k+1$ sadrže sekvencu rezultujućih odbiraka iz podopsega HH i HL: $z_{HH}^{(1)}[2k+1,0]$, $z_{HL}^{(1)}[2k+1,0]$, $z_{HH}^{(1)}[2k+1,1]$, $z_{HL}^{(1)}[2k+1,1]$, $z_{HH}^{(1)}[2k+1,2]$, $z_{HL}^{(1)}[2k+1,2]$, itd.

Ovaj obrazac filtriranja po linijama je skoro isti i za sve ostale nivoe dekompozicije, ali uz dve razlike u odnosu na nivo 1. Prva razlika je u tome što se filtriranje odgovarajuće linije na tekućem nivou dekompozicije vrši nakon što se validni rezultujući odbirci iz LL podopsega sa prethodnog nivoa izgenerišu, što znači da je filtriranje sukcesivnih linija na tekućem nivou učešljano sa svakom drugom linijom generisanih rezultujućih odbiraka sa prethodnog nivoa. Odstupanje od ovog pravila se javlja samo za linije

rezultujućih odbiraka koje se na tekućem nivou dekompozicije generišu počevši od linije sa prethodnog nivoa u kojoj su generisani poslednji odbirci iz LL podopsega. Nakon te linije, sve preostale linije rezultujućih odbiraka sa tekućeg nivoa se generišu uzastopno, bez praznih vremenskih slotova između susednih linija. Druga razlika u odnosu na nivo 1 dekompozicije je u tome što se nakon horizontalnog filtriranja, vertikalno filtriranje za sve ostale nivoe vrši pomoću "Vertikalnog filtra B".

Oba vertikalna filtra u realizaciji sa Sl. 1 su implementirana kao 1-D direktni Le Galovi 5/3 filtri, koji na svom izlazu generišu naizmenično niskofrekventne i visokofrekventne rezultujuće odbirke signala. "Memorija na čipu - A" i "Memorija na čipu - B" se koriste za smeštanje međurezultata u procesu izračunavanja rezultata vertikalnog filtriranja za nivo 1 dekompozicije i za nivo j ($j=2,3,4,5$) dekompozicije, respektivno, obavljajući time ulogu elemenata za kašnjenje (koji unose kašnjenje u trajanju od jedne linije) unutar vertikalnih filtara.

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

2-D direktna DWT sa 5/3 filtrima	[6]	PMA [7]	Predložena implementacija	RMA [7]	Predložena implementacija
Broj nivoa dekompozicije	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 konfiguracionih logičkih blokova	1052	1178	1046	1040	1154
Maksimalna radna frekvencija [MHz]	221	539	238	n/a	174

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

2-D direktna DWT sa 5/3 filtrima	[5]	[8]	[9]	[10]	[6]	Predložena implementacija
Broj nivoa dekompozicije	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 POTROŠNJA KOD RAZLIČITIH IMPLEMENTACIJA 2-D DIREKTNE DWT SA 5/3 FILTRIMA (NA 100MHz ZA VIRTEX-5 XC5VLX110T FPGA ČIP)

2-D direktna DWT sa 5/3 filtrima	[6]	PMA [7]	Predložena implementacija
Broj nivoa dekompozicije	1	1	5
Ukupna potrošnja [mW]	1221	1009	1227

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

U cilju poređenja performansi prezentovane hardverske realizacije 2-D direktne DWT sa 5/3 filtrima sa ostalim realizacijama iz literature, realizacija prezentovana u prethodnom poglavlju je implementirana za sliku dimenzija 512×512 piksela i 5 nivoa dekompozicije na Xilinx Virtex-4 XC4VFX100 i na Virtex-5 XC5VLX110T FPGA čipu. Rezultati sinteze za slučaj 16-bitne dužine reči su prikazani u Tabeli I. Lako se uočava da predložena hardverska implementacija 2-D direktne DWT sa 5/3 filtrima zahteva korišćenje manjeg broja konfiguracionih logičkih blokova u poređenju sa implementacijama [6] i PMA [7] koje sadrže 5 nivoa dekompozicije. Takođe, predložena implementacija zahteva korišćenje uporedivog broja konfiguracionih logičkih blokova u poređenju sa implementacijom RMA [7], iako je predložena realizacija implementirana za slike dimenzija 512×512 piksela i 5 nivoa dekompozicije, dok je arhitektura RMA [7] implementirana za slike dimenzija 256×256 piksela i 3 nivoa dekompozicije. Predložena implementacija omogućava nižu maksimalnu radnu frekvenciju od implementacije PMA [7], i višu radnu frekvenciju od implementacije [6].

U Tabeli II je prikazan utrošak memorije za različite hardverske implementacije 2-D direktne DWT sa 5/3 filtrima za 10-bitnu dužinu reči kako bi se izvršilo pravilno poređenje sa rezultatima prezentovanim u [6]. Na osnovu tih rezultata se jasno može zaključiti da predložena hardverska realizacija 2-D direktne DWT zahteva korišćenje memorije manjeg kapaciteta u odnosu na realizacije iz [5,6] i [8-10] iako je predložena realizacija implementirana za slike dimenzija 512×512 piksela i 5 nivoa dekompozicije, dok su realizacije iz [5] i [8-10] implementirane za samo 1 nivo dekompozicije, pri čemu neke od njih za slike manjih dimenzija od 512×512 piksela.

U Tabeli III je prikazana potrošnja za različite hardverske implementacije 2-D direktne DWT sa 5/3 filtrima i to na radnoj frekvenciji od 100MHz za slike dimenzija 512×512 piksela, 16-bitnu dužinu reči i Virtex-5 XC5VLX110T FPGA čip. Uočljivo je da predložena hardverska implementacija ima uporedivu potrošnju sa implementacijama [6] i PMA [7], bez obzira što je estimacija potrošnje za predloženu implementaciju urađena za 5 nivoa dekompozicije, dok je za ostale implementacije estimacija potrošnje urađena za samo 1 nivo dekompozicije.

IV. ZAKLJUČAK

Hardverska implementacija 2-D direktne DWT sa 5/3 filtrima, prezentovana u ovom radu, zahteva korišćenje manje količine logičkih resursa i memorije manjeg kapaciteta u odnosu na ostale implementacije do sada prezentovane u literaturi. To je čini veoma pogodnom za primenu u sistemima za kompresiju digitalne slike, kao što je npr. JPEG 2000. Ova veoma efikasna hardverska implementacija 2-D direktne

DWT otvara prostor za implementaciju celog JPEG 2000 enkodera u okviru jednog FPGA čipa nižeg cenovnog razreda i to bez korišćenja bilo kakve eksterne memorije.

ZAHVALNICA

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

LITERATURA

- [1] I. Daubechies, "The wavelet transform time-frequency localization and signal analysis," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 36, no. 5, pp. 961–1005, Sep. 1990.
- [2] 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.
- [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] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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 forward discrete wavelet transform (DWT) utilizing 5/3 filters as basic building blocks, is presented. 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 is quite suitable for image compression systems which utilize 5/3 filters, such as JPEG 2000.

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

Goran Savić, Milan Prokin, Vladimir Rajović, Dragana Prokin