Optimalna hardverska realizacija direktnog podopsežnog transformatora

GORAN S. SAVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički fakultet, Beograd

MILAN D. PROKIN, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički fakultet, Beograd

VLADIMIR M. RAJOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički fakultet, Beograd

DRAGANA Z. PROKIN, Visoka škola elektrotehnike

i računarstva strukovnih studija, Beograd

Originalni naučni rad

UDC: 621.314

DOI: 10.5937/tehnika1505815S

Realizacije direktnog podopsežnog transformatora prema postojećem stanju tehnike zahtevaju korišćenje sinhronizacionih memorija značajnog kapaciteta između različitih nivoa dekompozicije slike. U ovom radu je prezentovana optimalna hardverska realizacija direktnog podopsežnog transformatora bez korišćenja sinhronizacionih memorija između različitih nivoa dekompozicije. Ovo rešenje takođe omogućava značajnu uštedu u memorijskim i logičkim resursima, kao i minimalno kašnjenje koje u sistem za kompresiju slike unosi direktni podopsežni transformator.

Ključne reči: direktna podopsežna transformacija, dvodimenzionalno filtriranje slike, kompresija slike, minimizacija utrošenih resursa

1. UVOD

Direktni podopsežni transformatori ulazne nekomprimovane slike prema postojećem stanju tehnike zahtevaju korišćenje sinhronizacionih memorija između različitih nivoa dekompozicije. Značajna pažnja se posvećuje nastojanjima da se redukuje količina memorije potrebne za sinhronizaciju. Rezultati postignuti u tom pravcu se ogledaju u smanjenju kapaciteta utrošenih sinhronizacionih memorija i prezentovani su u radovima [1] – [9]. Generalno, blok šema direktnog podopsežnog transformatora ulazne nekomprimovane slike prema postojećem stanju tehnike sa sinhronizacionim memorijama i sa 3 nivoa dekompozicije, je prikazana na slici 1.

Svaki od blokova (Blok 0, Blok 1 i Blok 2) obavlja dvodimenzionalno direktno filtriranje podataka koji su dovedeni na njegov ulaz. Dvodimenzionalno direktno filtriranje se sastoji od razdvojene primene jednodimenzionalnog direktnog filtriranja, prvo horizontalno duž redova, a zatim i vertikalno duž kolona.

Rezultati dvodimenzionalnog direktnog filtriranja

Adresa autora: Goran Savić, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

Rad primljen: 06.03.2015.

Rad prihvaćen: 17.07.2015.

u okviru jednog nivoa dekompozicije su četiri podopsega transformacionih koeficijenata: LL, LH, HL i HH.

Podopseg LL odgovara niskofrekventnom (NF) filtriranju duž redova i NF filtriranju duž kolona, i sadrži istovremeno informaciju o niskim učestanostima horizontalno i informaciju o niskim učestanostima vertikalno.

Podopseg LH odgovara NF filtriranju duž redova i visokofrekventnom (VF) filtriranju duž kolona, i sadrži istovremeno informaciju o niskim učestanostima horizontalno i informaciju o visokim učestanostima vertikalno, tj. informaciju o horizontalnim ivicama.

Podopseg HL odgovara VF filtriranju duž redova i NF filtriranju duž kolona, i sadrži istovremeno informaciju o visokim učestanostima horizontalno i informaciju o niskim učestanostima vertikalno, tj. informaciju o vertikalnim ivicama.

Podopseg HH odgovara VF filtriranju duž redova i VF filtriranju duž kolona, i sadrži istovremeno informaciju o visokim učestanostima horizontalno i informaciju o visokim učestanostima vertikalno, tj. informaciju o dijagonalnim ivicama.

Dvodimenzionalno direktno filtriranje u više nivoa dekompozicije prema postojećem stanju tehnike se obavlja dvodimenzionalnim direktnim filtriranjem ulazne nekomprimovane slike na nivou 0 dekompozicije

ili podopsega LL_{i-1} na narednom nivou dekompozicije i , proizvedenim kao rezultat prethodnog filtriranja. Podopsezi nivoa i dekompozicije (generisani od strane Bloka i) su LL_i , LH_i , HL_i i HH_i .

Slika 1 – Blok šema direktnog podopsežnog transformatora ulazne nekomprimovane slike prema postojećem stanju tehnike

Da bi svi transformacioni koeficijenti bili na vreme raspoloživi za dalje procesiranje u okviru sistema za kompresiju slike (kvantizacija, procena verovatnoće, entropijsko kodovanje), neophodno je izvršiti i kompenzaciju kašnjenja koje se javlja u postupku filtriranja. U tu svrhu se koriste sinhronizacione memorije z^{-D} i z^{-2D} sa slike 1.

2. OPTIMALNI DIREKTNI PODOPSEŽNI TRANSFORMATOR

Blok šema optimalnog direktnog podopsežnog transformatora ulazne nekomprimovane slike bez sinhronizacionih memorija i sa 3 nivoa dekompozicije, koja prikazuje osnovni koncept čija će realizacija biti opisana u narednoj sekciji, je prikazana na slici 2.

Ovaj sistem procesira ulaznu nekomprimovanu sliku, kao i koeficijente dobijene filtriranjem u okviru nivoa 0 ili nivoa 1 dekompozicije, bez korišćenja sinhronizacionih memorija.

Svaki od blokova (Blok 0, Blok 1 i Blok 2) obavlja dvodimenzionalno direktno filtriranje podataka koji su dovedeni na njegov ulaz. Dvodimenzionalno direktno filtriranje se sastoji od razdvojene primene jednodimenzionalnog direktnog filtriranja, prvo horizontalno duž redova, a zatim i vertikalno duž kolona.

Podopsezi nivoa 0 dekompozicije LL_0 , LH_0 , HL_0 i HH_0 su generisani od strane Bloka 0 dvodimenzionalnim direktnim filtriranjem ulazne nekomprimovane slike. Podopsezi nivoa 1 dekompozicije

LL_1 , LH_1 , HL_1 i HH_1 su generisani od strane Bloka 1 dvodimenzionalnim direktnim filtriranjem podopsega LL_0 . Podopsezi nivoa 2 dekompozicije LL_2 , LH_2 , HL_2 i HH_2 su generisani od strane Bloka 2 dvodimenzionalnim direktnim filtriranjem podopsega LL_1 .

Slika 2 – Blok šema optimalnog direktnog podopsežnog transformatora ulazne nekomprimovane slike

U okviru svakog od blokova, postupak filtriranja započinje jednodimenzionalnim horizontalnim filtriranjem ulaznih podataka, liniju po liniju, počev od prve linije. Početak vertikalnog filtriranja ne čeka kompletiranje horizontalnog filtriranja po svim linijama, već počinje čim bude spreman minimalan broj koeficijenata potreban za vertikalno filtriranje. Čim se završi horizontalno filtriranje prve dve linije i započne horizontalno filtriranje treće linije, prvi rezultujući koeficijenti vertikalnog filtriranja se generišu na osnovu ulaznih koeficijenata dobijenih horizontalnim filtriranjem. Zatim sledi horizontalno filtriranje narednih linija ulazne nekomprimovane slike, pri čemu se vertikalno filtriranje nastavlja čim budu spremni naredni koeficijenti dobijeni horizontalnim filtriranjem, a koji su potrebni za nastavak vertikalnog filtriranja.

Takođe, filtriranje podopsega LL_i (nastalog kao rezultat dvodimenzionalnog filtriranja u okviru Bloka i) Blokom $i+1$, počinje odmah čim budu spremni koeficijenti prve horizontalne linije podopsega LL_i . Drugim rečima, Blok $i+1$ „ne čeka“ da kompletno dvodimenzionalno direktno filtriranje iz prethodnog Bloka i bude kompletirano, već filtriranje svojih ulaznih podataka obavlja čim bude spreman minimalan potreban broj linija isfiltriranih (i horizontalno i vertikalno) prethodnim Blokom i . Na ovaj način se postiže da konačni rezultati direktnog filtriranja iz sva tri

podopsega budu raspoloživi na izlazu sistema, bez potrebe za korišćenjem sinhronizacionih memorija, čime se postiže ušteda u memorijskim resursima.

Hardverska realizacija opisanog koncepta je prikazana u sledećoj sekciji.

3. OPTIMALNA HARDVERSKA REALIZACIJA DIREKTOG PODOPSEŽNOG TRANSFORMATORA

Principijska blok šema optimalne hardverske realizacije direktnog podopsežnog transformatora ulazne nekomprimovane slike je predstavljena na slici 3 (deo za procesiranje podataka) i slici 8 (deo za generisanje kontrolnih signala).

Slika 3 – Principijska blok šema optimalne hardverske realizacije direktnog podopsežnog transformatora ulazne nekomprimovane slike – deo za procesiranje podataka

Kao horizontalni i kao vertikalni filter sa slike 3 korišćen je direktni vremenski nestacionarni filter prezentovan u [10]. Pomenuti filter je izabran jer zahteva manji utrošak logičkih resursa u odnosu na druge realizacije prema trenutnom stanju tehnike, što je i opisano u radu [10]. Diferencne jednačine koje opisuju NF filtriranje i VF filtriranje koeficijenata su date sa (1) i (2), respektivno.

$$y_0[n] = -\frac{1}{8}x[n] + \frac{1}{4}x[n-1] + \frac{3}{4}x[n-2] + \frac{1}{4}x[n-3] - \frac{1}{8}x[n-4] \quad (1)$$

$$y_1[n] = -\frac{1}{2}x[n-1] + x[n-2] - \frac{1}{2}x[n-3] \quad (2)$$

Podaci se na ulaz horizontalnog filtera dovode preko multipleksera koji obezbeđuje da se u odgovarajućim vremenskim slotovima direktno filtriraju ili ulazni pikseli ili koeficijenti iz nivoa 1 dekompozicije ili koeficijenti iz nivoa 2 dekompozicije. Kontrolnim signalima *ctrl_coeff* i *ctrl_mux* se obezbeđuje da u okviru svake linije ulazne nekomprimovane slike na ulaz horizontalnog filtera najpre dospevaju ulazni pikseli i to sukcesivno prva tri piksela iz odgovarajuće linije, koja su neophodna za generisanje prvih rezultata filtriranja horizontalnog filtera. Potom ti signali obezbeđuju da na ulazu horizontalnog filtera bude prisutan prvi koeficijent odgovarajuće linije nivoa 1 dekompozicije, koji je u međuvremenu izgenerisan filtriranjem horizontalnim i vertikalnim filterom. Zatim se pomenutim kontrolnim signalima obezbeđuje da se nakon svaka dva nova piksela ulazne slike na ulazu horizontalnog filtera pojavi jedan koeficijent odgovarajuće linije nivoa 1 dekompozicije, koji je u međuvremenu izgenerisan filtriranjem horizontalnim i vertikalnim filterom.

Prvi koeficijent odgovarajuće linije nivoa 2 dekompozicije, koji je u međuvremenu izgenerisan filtriranjem horizontalnim i vertikalnim filterom, se pojavljuje na ulazu horizontalnog filtera nakon što se završi horizontalno i vertikalno filtriranje prva tri koeficijenta odgovarajuće linije nivoa 1 dekompozicije. Svaki naredni koeficijent odgovarajuće linije nivoa 2 dekompozicije se pojavljuje na ulazu horizontalnog filtera nakon svaka dva nova koeficijenta odgovarajuće linije nivoa 1 dekompozicije koja su i horizontalno i vertikalno isfiltrirana.

Opisana dinamika direktnog filtriranja piksela i koeficijenata početnog dela linija koje se filtriraju je prikazana vremenskim dijagramom na slici 4. Pravougaonicima su označeni trenuci u kojima se obavlja horizontalno filtriranje odgovarajućeg piksela ili koeficijenta, a elipsama trenuci u kojima se obavlja vertikalno filtriranje odgovarajućeg koeficijenta.

Ovakvom dinamikom se postiže minimizacija kašnjenja koje direktni podopsežni transformator unosi u sistem za kompresiju slike, jer se koeficijenti iz nivoa 1 i 2 dekompozicije filtriraju odmah nakon što budu izgenerisani filtriranjem na prethodnom nivou dekompozicije.

Slika 4 – Filtriranje po pikselima početnog dela linije

Završetak filtriranja u okviru jedne linije se odvija na način da multiplexer, nakon što svi pikseli ulazne slike budu direktno isfiltrirani, prosledi na ulaz horizontalnog filtra sve preostale koeficijente odgovarajuće linije iz nivoa 1 dekompozicije, koji su već izgenerisani horizontalnim i vertikalnim filtriranjem ulaznih piksela. Time se dovršava proces generisanja ulaznih koeficijenata za filtriranje na nivou 2 dekompozicije, nakon čega multiplexer te koeficijente dovodi na ulaz filtera. Horizontalnim, a potom i vertikalnim filtriranjem preostalih koeficijenata iz nivoa 1 dekompozicije, se završava filtriranje odgovarajuće linije nivoa 2 dekompozicije. Dinamika filtriranja piksela i koeficijenata završnog dela linija koje se filtriraju je prikazana vremenskim dijagramom na slici 5.

Slika 5 – Filtriranje po pikselima završnog dela linije

Vertikalno filtriranje svakog od koeficijenata se obavlja u prvom narednom vremenskom slotu nakon horizontalnog filtriranja, što je obezbeđeno kaskadnim vezivanjem horizontalnog i vertikalnog filtera. Horizontalno filtriranje se aktivira odgovarajućim kontrolnim signalom iz grupe signala *ctrl_h_filter*, dok se vertikalno filtriranje aktivira odgovarajućim kontrolnim signalom iz grupe signala *ctrl_v_filter*. Izlazni koeficijenti iz vertikalnog filtera se povratnom spregom vraćaju na ulaz multipleksera (ako su u pitanju koeficijenti koji predstavljaju izlaz nivoa 0 ili 1 dekompozicije) ili se prosleđuju na izlaz direktnog podopsežnog transformatora (ako su u pitanju koeficijenti koji predstavljaju izlaz nivoa 2 dekompozicije).

Rezultati vertikalnog filtriranja prve linije koeficijenata na svakom narednom nivou dekompozicije se generišu nakon što se isfiltriraju prve tri linije piksela (za nivo 0 dekompozicije) ili koeficijenata (za nivoe 1 i 2 dekompozicije) iz prethodnog nivoa dekompozicije. Potom se rezultati vertikalnog filtriranja svake sledeće linije koeficijenata na svakom narednom nivou dekompozicije generišu nakon što se isfiltriraju sledeće dve linije piksela (za nivo 0 dekompozicije) ili koeficijenata (za nivoe 1 i 2 dekompozicije) iz prethodnog nivoa dekompozicije. Privremeno čuvanje međurezultata se obavlja u bloku Temp bafer, za koji se upis i čitanje kontrolišu kontrolnim signalima *ctrl_buffer*. Na slici 6 je prikazan vremenski dijagram koji opisuje početak dvodimenzionalnog direktnog filtriranja slike na nivou linija.

Slika 6 – Početni deo filtriranja po linijama

Nakon što se kompletira vertikalno filtriranje poslednje linije ulazne slike, prelazi se na vertikalno filtriranje svih preostalih linija koeficijenata iz nivoa 1 dekompozicije. Po završetku filtriranja svih linija koeficijenata iz nivoa 1 dekompozicije, obavlja se i vertikalno filtriranje svih preostalih linija koeficijenata iz nivoa 2 dekompozicije, čime se završava proces filtriranja i dekompozicije ulazne slike pomoću opisanog direktnog podopsežnog transformatora.

Na slici 7 je prikazan vremenski dijagram koji opisuje završetak dvodimenzionalnog direktnog filtriranja slike na nivou linija.

Slika 7 – Završni deo filtriranja po linijama

Opisanim filtriranjem neparnih linija generišu se koeficijenti koji pripadaju LL i LH podopsezima za odgovarajući nivo dekompozicije, dok se filtriranjem parnih linija generišu koeficijenti koji pripadaju HL i HH podopsezima za odgovarajući nivo dekompozicije.

Za generisanje kontrolnih signala *ctrl_coeff*, *ctrl_mux*, *ctrl_h_filter* i *ctrl_buffer* ključnu ulogu igraju mašine stanja HFSM za nivoe 0, 1 i 2 dekompozicije. Svaka od njih je zadužena za odgovarajući nivo dekompozicije. Te mašine stanja prosleđuju zahteve za korišćenje horizontalnog filtera bloku *Arbiter*, koji potom odlučuje kom nivou dekompozicije će filter biti dodeljen, tj. sa kog nivoa će biti koeficijenti koji će se u datom trenutku filtrirati.

Slika 8 – Principijska blok šema optimalne hardverske realizacije direktnog podopsežnog transformatora ulazne nekomprimovane slike – deo za generisanje kontrolnih signala

Ukoliko samo jedna *HFSM* u datom trenutku prosledi zahtev za korišćenje horizontalnog filtera, blok *Arbiter* dodeljuje filter toj *HFSM*. Ukoliko više od jedne *HFSM* istovremeno upute zahtev za korišćenjem filtera, blok *Arbiter* dodeljuje filter onoj *HFSM* koja odgovara najnižem nivou dekompozicije. *HFSM* čiji je zahtev u datom trenutku prihvaćen, se o tome obaveštava odgovarajućim signalom preko povratne sprege. Mašine stanja *HFSM* zajedno sa blokom *Arbiter* obezbeđuju da dinamika generisanja kontrolnih signala bude u skladu sa već opisanom dinamikom direktnog filtriranja koeficijenata, kojom se postiže minimizacija kašnjenja koje direktni podopsežni transformator unosi u sistem za kompresiju slike. Osim signala koji omogućava korišćenje horizontalnog filtera, u grupi kontrolnih signala *ctrl_h_filter* se nalaze i signali koji određuju poziciju koeficijenta u okviru linije i nivo dekompozicije kome je filter trenutno dodeljen na korišćenje.

Za generisanje kontrolnih signala *ctrl_v_filter* ključnu ulogu igraju mašine stanja *VFSM* za nivoe 0, 1 i 2 dekompozicije. Svaka od njih je zadužena za generisanje flegova koji ukazuju na poziciju linije u okviru slike za odgovarajući nivo dekompozicije. Sa kog nivoa će biti flegovi koji će se proslediti vertikalnom filteru zavisi od multipleksera koji se kontroliše signalom koji predstavlja nivo dekompozicije kome je u prethodnom taktu dodeljen horizontalni filter.

Blok za inicijalizaciju obezbeđuje pravilnu inicijalizaciju *HFSM* i *VFSM* mašina stanja.

S obzirom da se opisanom realizacijom obavlja najpre horizontalno direktno filtriranje koeficijenata, a potom u sledećem vremenskom slotu i vertikalno direktno filtriranje, omogućava se korišćenje istih vremenskih slotova za horizontalno i vertikalno filtriranje

koeficijenata iz različitih nivoa dekompozicije. Takođe, ova realizacija omogućava korišćenje istih vremenskih slotova za horizontalno i vertikalno filtriranje susednih koeficijenata iz istog nivoa dekompozicije, kada ima potrebe za tim. Na taj način se postiže ušteda u vremenskim resursima i minimizacija kašnjenja.

U tabeli 1 je prikazano poređenje kašnjenja koje optimalni direktni podopsežni transformator prezentovan u ovom radu unosi u sistem za kompresiju slike, sa kašnjenjem koje unosi transformator prezentovan u literaturi [1] - [5]. Prikazano je kašnjenje za direktne podopsežne transformatore koji imaju tri nivoa dekompozicije. Jasno se uočava da je kašnjenje koje unosi direktni podopsežni transformator predložen u ovom radu višestruko manje.

Tabela 1. Poređenje sa drugim realizacijama u pogledu kašnjenja koje direktni podopsežni transformator unosi u sistem za kompresiju slike (primer za 3 nivoa dekompozicije)

Kašnjenje	[1]-[5]	Ovaj rad
Kašnjenje (u broju linija)	28	6

Opisani koncept optimalne hardverske realizacije direktnog podopsežnog transformatora se može koristiti i za sisteme sa proizvoljno većim brojem nivoa dekompozicije. U tabeli 2 je prikazano poređenje resursa koje koristi optimalni direktni podopsežni transformator prezentovan u ovom radu sa jedne strane i resursa koje koriste direktni podopsežni transformatori prezentovani u radovima [1] - [5] sa druge strane. Prikazani su rezultati za primer N nivoa filtriranja i dekompozicije digitalne slike širine W piksela, pri čemu su u realizacijama [1] - [5] korišćeni filteri sa konačnim impulsnim odzivom dužine $2D+1$.

Tabela 2. Poređenje sa drugim realizacijama u pogledu korišćenih resursa (primer za N nivoa dekompozicije)

Resursi	[1]-[5]	Ovaj rad
Broj horizontalnih filtera	N	1
Broj vertikalnih filtera	N	1
Kapacitet sinhronizacione memorije (u broju koeficijenata)	$D \cdot W \cdot \left(2^N - 3 + \frac{1}{2^{N-1}} \right)$	0

Za razliku od rešenja prema postojećem stanju tehnike, u ovom radu se, korišćenjem samo jednog horizontalnog i samo jednog vertikalnog filtera za sve nivoe dekompozicije, postiže značajna ušteda u logičkim resursima. Takođe, postiže se i značajna ušteda u memorijskim resursima, s obzirom da predložena optimalna hardverska realizacija direktnog podopse-

žnog transformatora ne zahteva korišćenje sinhronizacionih memorija između različitih nivoa dekompozicije. Bitno je uočiti i da se količina utrošenih logičkih resursa za implementaciju filtera, kao i memorijskih resursa, u realizacijama prema postojećem stanju tehnike povećava sa povećanjem broja nivoa dekompozicije, dok kod realizacije prezentovane u ovom radu to nije slučaj.

Funkcionalna ispravnost predložene optimalne hardverske realizacije direktnog podopsežnog transformatora je eksperimentalno verifikovana implementacijom direktnog podopsežnog transformatora sa sedam nivoa dekompozicije u FPGA integrisanom kolu. Broj nivoa dekompozicije za koji je izvršena eksperimentalna verifikacija je izabran na osnovu činjenice da je HD format digitalne slike (1920x1080 piksela) često korišćen format i da je za kvalitetan proces kompresije digitalne slike HD formata neophodno izvršiti dekompoziciju nekomprimovane slike u sedam nivoa.

Tabela 3. Utrošeni hardverski resursi i maksimalna radna učestanost optimalnog direktnog podopsežnog transformatora implementiranog u FPGA integrisanom kolu EP4CE115F29C7 proizvođača Altera

Utrošeni resursi	
Logički elementi	6415/114480 (6%)
Registri	3296
Memorija (u bitima)	192512/3981312 (5%)
Radna učestanost	138,27MHz

U tabeli 3 su prikazani utrošeni hardverski resursi i maksimalna radna učestanost za optimalnu hardversku realizaciju direktnog podopsežnog transformatora ulazne nekomprimovane slike sa sedam nivoa dekompozicije, koja je implementirana u FPGA integrisanom kolu EP4CE115F29C7 korišćenjem softverskog paketa *Quartus II 12.1* proizvođača Altera.

4. ZAKLJUČAK

Optimalna hardverska realizacija direktnog podopsežnog transformatora ulazne nekomprimovane slike, prezentovana u ovom radu, eliminiše potrebu za korišćenjem sinhronizacionih memorija između različitih nivoa dekompozicije, čime se postiže značajna ušteda u memorijskim resursima.

Predloženom realizacijom se ostvaruje i ušteda u logičkim resursima jer se ne zahteva istovremeno horizontalno i vertikalno filtriranje koeficijenata sa različitih nivoa dekompozicije. Predloženo rešenje dodatno omogućava minimalno kašnjenje koje direktni podopsežni transformator unosi u sistem za kompresiju

slike, čime se postiže značajna ušteda i u vremenskim resursima.

5. ZAHVALNICA

Sredstva za ovaj rad su delimično obezbeđena od strane Ministarstva obrazovanja, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije u okviru projekata TR32039 i TR32043.

LITERATURA

- [1] C. Chrysafis and A. Ortega, "Line based reduced memory wavelet image compression," Proc. Data Compression Conf., Snowbird, UT, Mar. 30– Apr. 1, 1998, p. 398-407.
- [2] C. Chrysafis and A. Ortega, "An algorithm for low memory wavelet image compression," Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing (ICIP), Kobe, Japan, 24-28 Oct. 1999, p. 354-358.
- [3] C. Chrysafis and A. Ortega, "Line based reduced memory wavelet image compression," IEEE Trans. Image Processing, vol. 9, no. 3, p. 378-389, Mar. 2000.
- [4] C. Chrysafis, "Wavelet image compression rate distortion optimizations and complexity reductions," Ph.D. Thesis, University of Southern California, USA, Mar. 2000.
- [5] C. Chrysafis and A. Ortega, "Minimum memory implementations of the lifting scheme," SPIE, Int. Symp. Optical Science Tech., San Diego, CA, July 30-Aug. 4, 2000, p. 313-324.
- [6] S. Rein, S. Lehmann, and C. Gühmann, "Fractional wavelet filter for camera sensor node with external flash and extremely little RAM," Proc. Intl. ICST Mobile Multimedia Communications Conf., July 7-9, 2008.
- [7] S. Rein, S. Lehmann, and C. Gühmann, "Wavelet image two line coder for wireless sensor node with extremely little RAM," Proc. IEEE Data Compression Conf., Snowbird, UT, Mar. 2009, p. 252-261.
- [8] S. Rein and M. Reisslein, "Performance evaluation of the fractional wavelet filter: A low-memory image wavelet transform for multimedia sensor networks", Ad Hoc Networks, vol. 9, no. 4, p. 482-296, June 2011.
- [9] S. Rein, M. Reisslein, "Low-Memory wavelet transforms for wireless sensor networks: A tutorial," IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 13, no. 2, p. 291-307, 2011.
- [10] Vladimir Čeperković, Milan Prokin, "Non-stationary two-dimensional subband transformer filters," Telfor Journal, vol. 5, no. 2, p. 113-117, 2013.

SUMMARY

OPTIMAL HARDWARE REALIZATION OF DIRECT SUBBAND TRANSFORMER

State-of-the-art realizations of direct subband transformers require utilization of synchronization memory banks with significant capacity between different levels of image decomposition. This paper presents novel optimal hardware realization of direct subband transformer without synchronization memory banks between different levels of image decomposition. This solution also enables significant savings in memory and logic resources, as well as minimal delay which direct subband transformer introduces into image compression system.

Key words: *Direct subband transformation, Direct two-dimensional image filtering, Digital image compression, Minimization of used resources*