Vedecká rada Fakulty elektrotechniky a informatiky
Slovenská Technická Univerzita v Bratislave

Radoslav Vargic

Autoreferát dizertačnej práce

Kompresia statického obrazu s využitím waveletovej transformácie a lifting schémy

na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor

v odbore doktorandského štúdia:
26–27–9 telekomunikácie

Bratislava, február 1999

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre telekomunikácií FEI STU v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Radoslav Vargic
Katedra telekomunikácií FEI STU Bratislava
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: Doc. Ing. Jana Kotuliaková, CSc.
Katedra telekomunikácií FEI STU Bratislava

Oponenti: ....

....

....

....

....

....

Autoreferát bol rozoslaný: ....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná .... o .... hod.
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie dňa ....

26–27–9 telekomunikácie

na Katedre telekomunikácií, FEI STU, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Predseda spoločnej odborovej komisie:

Obsah

1 Úvod

V posledných rokoch našla svoje využitie pri kompresii obrazu *waveletová transformácia* (WT) [7]-[19], ktorá umožňuje reprezentovať obraz vzhľadom na ľudský vizuálny systém prirodzenejšie ako klasické blokové transformácie. Kompresné postupy používajúce WT sú v súčasnosti jedny z najúčinnejších, pričom umožňujú progresívny prenos informácií [77][81][75]. Použitie waveletovej transformácie (resp. diskrétnej waveletovej transformácie - DWT) pri kompresii obrazu spadá do oblasti transformačného kódovania, kde sa používajú diskrétne lineárne transformácie (DLT). Keďže každú DLT môžme nahradiť *bankou filtrov* (FB) [7], subpásmové kódovanie tesne súvisí s transformačným kódovaním. Waveletová transformácia požitá pri kompresii obrazu svojou matematickou podstatou a praktickou realizáciou zjednocuje princípy transformačného a subpásmového kódovania obrazu.

Efektívna realizácia WT pomocou postupu známeho ako *lifting schéma* [61]-[64] umožňuje okrem zefektívnenia výpočtu aj jednoduché rozšírenie klasického konceptu WT.

2 Waveletová transformácia v kompresii obrazu - súčasný stav

V práci sú pri prehľade súčasného stavu diskutované základné spôsoby rozkladu signálu a spôsob ich použitia pri transformačnom kódovaní [7][11]. Dôraz je pritom kladený na rozklad bankami filtrov (a predovšetkým 2-kanálovej FB), ktoré sú prostriedkom na výpočet DWT. Samotná WT je zavedená vo všetkých svojich najviac používaných tvaroch a zovšeobecneniach [11][13][8]. Sú ukázané jej výhody oproti Fourierovej analýze [28] a spojitosti s konceptom FB ústiace do realizácie rýchlej waveletovej transformácie (FWT) [7]. V krátkosti sú zhrnuté vlastnosti WT (a odpovedajúcich bánk filtrov) dôležité pri použití na kompresiu obrazu [11][12][37].

V ďalšej časti je zavedená lifting schéma[61]-[64] ako rýchla metóda výpočtu DWT použitím faktorizovaných FB. Táto metóda spája princípy trasformačného a predikčného kódovania, pričom okrem zjednodušenia a urýchlenia výpočtu umožňuje realizovať aj viaceré obmedzenia klasických transformačných prístupov ako napríklad konštrukciu nelineárnych transformácií [65][67][69]-[73].

V závere prehľadu súčasného stavu je uvedený prehľad spôsobov využitia waveletovej transformácie a lifting schémy v súčasných metódach kompresie obrazu [11][12][69][70] a charakteristiky najznámejších waveletových kompresných postupov [77][81][75]. Väčšina v súčasnosti najúspešnejších waveletových kompresných postupov pri kompresii obrazu má klasickú zreťazenú štruktúru transformačného kódera [4]: Transformácia-Kvatnizácia-Kódovanie. V tejto časti je uvedený prehľad spôsobov výpočtu dvojrozmernej WT, používané spôsoby kvantizácie a alokácie bitov, prehľad používaných entropických kóderov. Vysvetlené sú princípy a spôsoby náväznosti týchto blokov vo waveletových kompresných postupoch. Veľká pozornosť je venovaná najmä tzv. *progresívnym kóderom*, resp. konceptu progresívneho prenosu informácií, pri ktorom sa požaduje prednostný prenos informácie, ktorá nám najviac redukuje chybu pri rekonštrukcii.

3 Ciele práce

Na základe štúdia problematiky transformačných kompresných postupov a možností využitia waveletovej transformácie sme ako základ stanovili lifting schému a progresívne kódovanie obrazu. Ako jedny s najmodernejších postupov používaných pri kompresii obrazu použitím WT tvoria teoretický a aplikačný rámec dizertačnej práce. Konkrétne oblasti práce sme sformulovali v nasledovných bodoch:

- efektívne využitie známych blokových transformácií v progresívnom kóderi
- rozšírenie waveletovej transformácie zmiešaním báz viacerých typov waveletových transformácií, t.j. hybridizáciou ich báz
- realizácia čo najjednoduchších neseparovateľných dvojrozmerných waveletových transformácií
- použitie dvojrozmerných prediktorov v lifting schéme
- zvýraznenie predikčného princípu v lifting schéme pri návrhu nových transformácií
- využitie priečkových štruktúr lifting schémy pri filtrácii obrazu

Základnou požiadavkou je, že ak vzniknú nejaké nové konštrukcie WT, mali by byť vhodné aj na použitie pri progresívnom kódovaní obrazu. Cieľom je, aby vo vzniknutých postupoch bola možnosť využitia lifting schémy, t.j. možnosť použitia celočíselnej aritmetiky a tým jednoduchej hardverovej implementácie a uvedenia do praxe.

4 Modifikované a nové prístupy k aplikácii WT pri kompresii obrazu

Obsahovú náplň dizertačnej práce (v súlade s vytýčenými cieľmi) tvoria predovšetkým rozšírenia a spôsoby aplikácie waveletovej transformácie (WT) v transformačných kóderoch na kompresiu obrazu. Sú odvodené a vytvorené viaceré modifikácie WT, ktorých vlastnosti a účinnosť pri kompresii obrazu sú otestované na reálnych obrazoch. Väčšina diskutovaných modifikácií WT využíva lifting schému, čím je umožnená bezstratová kompresia a jednoduchá hardverová realizácia. Pri kompresii obrazu pomocou všetkých vytvorených WT bol použitý princíp progresívneho kódovania adaptáciou algoritmu SPIHT, ktorý bol v práci využitý aj na efektívny spôsob kompresie obrazu využitím rôznych typov blokových transformácií. Od hlavného smerovania práce, t.j. stratovej kompresii obrazu sa odchyľuje vytvorenie algoritmu na bezstratovú dolnopriepustnú (DP) filtráciu obrazu, ktorý využíva princípy lifting schémy. Výsledky boli získané implementáciou uvedených postupov v jazyku C do prostredia Unix aj DOS. Viaceré časti práce tvoria aj teoretické príspevky týkajúce sa základov diskutovaných oblastí.

4.1 Progresívne kódovanie s využitím blokových transformácií

V nedávnej dobe začali vznikať aplikácie snažiace sa spojiť typ progresívneho kódera navrhnutého pôvodne pre DWT (EZW, SPIHT) s transformáciou DCT II [52], prípadne s prekryvnými transformáciami (GenLot, GLBT) [56]. Po adekvátnom preusporiadaní koeficientov môžeme v progresívnom kóderi efektívne využiť širokú triedu existujúcich blokových transformácií.

V práci sa zaoberáme spôsobom nahradenia DWT blokovými transformáciami (BT) v algoritme SPIHT a ďalším zlepšením výsledkov uvedených v [52] rozšírením uvedeného prístupu: a)zväčšením blokov b)opakovaním blokovej tansformácie v dolnopriepustnej časti preusporiadaného spektra c)použitím rôznych blokových ortogonálnych transformácií c)použitím algoritmov na potláčanie blokového efektu. Zväčšovaním bloku sú dosahované lepšie výsledky (po veľkosť bloku 16 príp. 32) v zmysle PSNR, pričom blokový jav je výrazne menej rušivý ako pri bloku veľkosti 8 (pri danej bitovej náročnosti). Pri viacerých obrazoch sú výsledky dokonca lepšie až o 1.5dB ako pri originálnom algoritme SPIHT používajúcom FBI 9-7 pár filtrov. Pri veľkosti bloku 16, ktorá sa javila ako najvhodnejšia, by sme mohli použitím iterácie v DP časti spektra zlepšiť PSNR ďalej o 0.1-0.15dB. Použitím ďalších ortogonálnych BT dostávame v niektorých prípadoch výsledky lepšie ako JPEG a EZW.

4.2 Hybridné wavelety

V práci sa venujeme rozšíreniu DWT zmiešavaním *(hybridizáciou)* báz viacerých DWT. Báza výslednej DWT potom nie je tvorená posunmi a zmenou mierky jedného základného waveletu. Principiálne môžeme rozlíšiť dva postupy zmiešavania:

1. zmiešanie báz v jednom rozmere použitím rôznych koeficientov pre zmenu rozlíšenia, t.j. použitie rôznych bánk filtrov na rôznych úrovniach rozlíšenia
2. zmiešanie báz prechodom do viacerých rozmerov, t.j. použitie rôznych báz v rôznych rozmeroch

V postupe č.1 v prípade zmiešania rôznych ortogonálnych WT ostávajú zachované vzťahy ortogonality medzi podpriestormi a ich bázami. Postup č.2 implikuje použitie separovateľných rozkladov vo viacerých rozmeroch. Použitím DOT bol tento koncept tvorby zmiešaných báz rozpracovaný v [22]. Použitím oboch uvedených postupov dostávame nové bázy s vlastnosťami, ktoré môžeme ovplyvniť výberom vhodných waveletov a spôsobom ich zmiešania. Zároveň možno tieto princípy aplikovať na iné zovšeobecnenia WT (napr. biortogonálne wavelety, wavelety na intervale, waveletové pakety). Hybridné wavelety získané postupom č. 1 majú stupeň voľnosti v možnosti rôzne dekorelovať resp. reprezentovať signál na rôznych úrovniach rozlíšenia. Na základe výsledkov dosiahnutých pri rôznych usporiadaniach hybridných WT je ukázané, že z hybridizácie môžeme ťažiť , a to pri vysokých, ako aj nízkych kompresných pomeroch.

4.3 Lifting schéma a algotitmus SPIHT

Lifting schéma, zavedená pomocou konceptu polyfázového rozkladu banky filtrov (FB), obsahuje v analyzačnej hornopriepustnej (HP) časti FB oneskorenie. Klasická interpretácia krokov liftingu (operácií predikcie a aktualizácie) vzniknutých faktorizáciou polyfázovej matice však obsahuje predstih [64], ktorý podmieňuje prirodzenejšie delenie signálu na párne a nepárne zložky. V práci sú uvedené a dokázané 2 lemmy poskytujúce súvis spomenutých prípadov a návod na prechod z jedného tvaru do tvaru druhého. Zároveň je za pomoci konceptu "elementárnych" filtrov vysvetlený spôsob eliminácie aliasingu v lifting schéme.

Po vykonaní WT pomocou lifting schémy spôsobom "in-place" (t.j. nepoužitím prídavnej pamäte v priebehu výpočtu) ostane spektrum preuspriadané v tzv. lifting reprezentácii odlišnej od klasickej štruktúry subpásiem (tzv. Mallatova reprezentácia). V práci sú odvodené postupy preusporiadania waveletových koeficientov pre viaceré spôsoby realizácie DWT založené na bitových manipuláciách s indexami koeficientov.

V práci sú diskutované spôsoby realizácie a výhody symetrického rozšírenia signálu pri lifting schéme. Pritom je testovaná jeho efektivita pri použití SPIHT algoritmu. Efektivita SPIHT algoritmu výrazne závisí aj od normalizačných konštant faktorizovaných filtrov, t.j. výsledného dynamického rozsahu spektra. Použitím vhodnej renormalizačnej konštanty r je zlepšené PSNR o 0-0.2dB pre široký rozsah kompresných pomerov a pri použití rôznych filtrov (pri danej bitovej náročnosti). Renormalizačný proces má charakter HP filtrácie.

4.4 Kompresia obrazu pomocou neseparovateľných WT

V práci je navrhnuté dvojrozmerné (2D) rozšírenie lifting schémy, ktoré v dvoch fázach implementuje jednoduché neseparovateľné WT použitím vzorkovania Quincunx. Do tohto rámca je adaptovaná trieda tzv. Nevillových filtrov [46]. Je skonštruovaná *TORING* ($1D \rightarrow 2D$) transformácia mapujúca prediktory jednorozmerných (1D) prototypových WT spĺňajúcich určené podmienky na 2D prediktory tvoriace neseparovateľné 2D WT s izotropnými bázovými funkciami. Predstavuje zovšeobecnenie prístupu v [48]. Priamou motiváciou tejto konštrukcie boli nedostatky prístupu použitého v [46]. Nevillove filtre, na ktorých je prístup [46] postavený, v princípe neumožňujú dekorelovať signál použitím všetkých dostupných informácií v okolí predikovaného/aktualizovaného bodu. Transformácia TORING sa zakladá na fakte, že ak máme symetrické prediktory (priestorovo aj hodnotovo) v 1D prípade, môžeme ich interpretovať ako prototypové 1D prstence. Jednoduchým priestorovým preusporiadaním a renormalizáciou môžeme vytvárať ich viacrozmerné (resp. 2D) verzie. Veľa užitočných vlastností pritom máme implicitne zaručených použitím lifting schémy. Efektivita oboch prístupov pri kompresii obrazu je porovnaná navzájom a aj voči pôvodnému separovateľnému prípadu a to najmä z hľadísk: kompakcie energie, aproximačných vlastností, počtu operácií, ortogonality, subjektívneho a objektívneho vyhodnotenia kvality rekonštruovaného obrazu.

Možnosť použitia ľubovoľných prediktorov v lifting schéme pri zaručenej úplnej rekonštrukcii je využitá na návrh smerových prediktorov realizujúcich neseparovateľnú smerovú DWT pre 8 základných smerov. Smerové DWT môžu byť použité napr. pri kompresii obrazov pohybovo rozostrených alebo obsahujúcich výrazné korelácie v istom smere. Je navrhnutý vhodnejší spôsob symetrického rozšírenia signálu, zohľadňujúci smerovosť waveletov. Pri kompresii pohybovo rozostreného obrazu je efektivita smerových waveletov porovnaná so separovateľnými waveletmi a waveletmi, ktoré odpovedajú Nevillovým filtrom.

4.5 Predikčné kódovanie s max. počtom nulových momentov

Lifting schéma nám poskytuje široký rámec možností manipulácií s dátami pri zaručenej úplnej rekonštrukcii. Ak naša aplikácia nevyžaduje rekurzívnu predikciu (resp. stačí malá hĺbka rekurzie), prípadne potrebujeme venovať maximálne úsilie predikcii, môžeme navrhnúť filtre tak, aby sme získali maximálny počet nulových momentov pre analyzujúci wavelet (= max. polynomické predikčné schopnosti). S výhodou na to môžeme použiť Nevillov rekurzívny algoritmus na polynomickú interpoláciu [3]. Ak chceme mať maximálnu mieru dekorelácie, musíme na predikciu použiť body z bezprostredného okolia predikovaného bodu. V tom prípade musíme mať prediktor nutne faktorizovaný, v opačnom prípade by bol ťažko invertovateľný, resp. nestabilný. Výkon uvedenej triedy prediktorov resp. odpovedajúcich WT je ukázaný na príklade prediktora 4. rádu. S rastom hĺbky rekurzie tu klesá účinnosť prediktora v dôsledku malej regularity analyzačnej časti (a tým aj celkovej nestability). Avšak bez rekurzie dosahuje lepšie výsledky než používané wavelety obdobného rádu.

4.6 Výpočet invertovateľných DP filtrácií

Na vyhladzovanie signálu v praxi často používané filtračné postupy neumožňujú úplne rekonštruovať pôvodné dáta z dát filtrovaných. V práci navrhovaný algoritmus využíva podobné priečkové štruktúry ako lifting schéma, čím umožňuje úplnú rekonštrukciu signálu pri rovnakej komplexnosti výpočtu. Priečková štruktúra zodpovedajúca procesu filtrácie používa prediktory iba na operácie aktualizácie, a to tak, aby sme obraz vyhladili a zachovali pritom pôvodný dynamický rozsah. Aby sme zachovali dynamický rozsah, musia byť zavedené násobičky v pozdĺžnych vetvách, pričom však nesmie dôjsť k strate informácie, t.j. treba pracovať s reálnymi číslami. Pri iterovaní postupu celý signál konverguje k svojej jednosmernej zložke. Konvergencia sa urýchli pri väčšej váhe prediktora , avšak rozdiel medzi oboma navzájom sa aktualizujúcimi množinami bodov je výraznejší (negatívny vizuálny efekt). Pri každom iteračnom kroku narastá potreba pamätať si viac bitov na uchovanie desatinných miest koeficientov. Inverzná transformácia, resp. rekonštrukcia vyšších frekvencií v obraze sa vykoná jednoduchým obrátením všetkých vykonaných krokov podobne ako tomu bolo pri lifting schéme. Pokračovaním inverznej transformácie (HP filtrácia) môžeme obraz zostriť.

Filtračný algoritmus je implementovaný separovateľne aj neseparovateľne (použitím Quincunx vzorkovania). Výsledky filtrácie sú porovnané s klasickým filtračným postupom gaussovskými filtrami.

5 Záver

Hlavné prínosy súvisiace s výsledkami dizertačnej práce môžme rozdeliť na prínosy v oblasti teoretickej a oblasti aplikačnej:

1. pôvodné prínosy v teoretickej oblasti

    - odvodenie biortogonálnych podmienok úplnej rekonštrukcie v maticovom tvare a maticového tvaru DWT použitím filtračných matíc
    - rozšírenie WT zavedením konceptu hybridných waveletov
    - formulácia a dôkaz dvoch liem pomáhajúcich prechádzať medzi tvarmi polyfázovej reprezentácie FB, vysvetlenie eliminácie aliasingu v lifting schéme, odvodenie algorimov preusporiadania keficientov medzi Mallatovou a lifitng reprezentáciou waveletových koeficientov
    - navrhnutie konceptu neseparovateľných dvojrozmerných WT použitím vzorkovania Quincunx a dvojrozmerných prediktorov s využitím lifting schémy
    - odvodenie $1D \rightarrow 2D$ transformácie TORING mapujúcej prediktory prototypových jednorozmerných WT spĺňajúcich určené podmienky na dvojrozmerné prediktory tvoriace neseparovateľné dvojrozmerné WT s izotropnými bázovými funkciami

2. pôvodné prínosy v aplikačenj oblasti

    - zlepšenie kompresného pomeru pri zachovaní rovnakého skreslenia použitím a)opakovania transformácie v DP pásme b) primeraným zväčšením transformačného bloku (aj vizuálne menej rušivé) vo waveletovom progresívnom kóderi využívajúcom blokové transformácie
    - zlepšenie kompresného pomeru pri použití rôznych DWT pri algoritme SPIHT použitím renormalizácie filtrov
    - konštrukcia, implementácia a overenie vlastností izotropných dvojrozmerných waveletov pomocou transformácie TORING a dvojrozmerných smerových waveletov
    - konštrukcia a overenie vlastností separovateľných WT s maximálnou schopnosťou polynomicej predikcie
    - vytvorenie a realizácia algoritmu výpočtu jednoducho invertovateľných dolnopriepustných filtrácií, ktoré nevedú k strate informácie

V práci obsiahnutá problematika transformačného kódovania použitím waveletovej transformácie je veľmi rozsiahla, v súčastnosti sa rýchlo rozvíjajúca a poskytuje široký priestor pre ďalšiu prácu. Niektoré z aplikovaných princípov sa ukázali ako čiastočne účinné (WT s maximálnou schopnosťou polynomickej predikcie), avšak väčšina potvrdila svoj potenciál pri kompresii, resp. spracovaní obrazu. S prácou najtesnejšie súvisiace okruhy, na ktoré by sme sa chceli v budúcnosti zamerať (s ohľadom na dosiahnuté výsledky a najnovšie trendy), môžme zhrnúť nasledovne:

- použitie separovateľných waveletov s orientáciou hlavne na podmieňovanie, t.j. prediktívne zohľadnenie reprezentácie objektov vo waveletovom spektre
- konštrukcia progresívneho kódera s využitím blokových transformácií a algoritmov na potlačenie blokového efektu
- optimalizácia zmiešavania báz, predovšetkým štúdium zmiešaných báz pri použití waveletových paketových transformácií (WPT) a výber najlepšej bázy
- konštrukcia neseparovateľných waveletov s využitím princípov transformácie TO-RING pri iných typoch vzorkovania, rozšírenie konceptu aj pre WPT
- rozšírenie konceptu smerových waveletov - zabudovanie adaptivity a vyvinutie kompletného kódovacieho procesu
- vyvinutie všeobecnejších filtračných algoritmov využitím lifting schémy

Okrem uvedených okruhov môžme širší rámec ďalšej práce sformulovať v týchto bodoch:

- použitie multiwaveletov, adekvátne rozšírenie lifting schémy a úprava kompresných algoritmov
- viac sa zamerať na oblasť fraktálovo-waveletových kóderov
- využitie WT resp. WPT pri kódovaní objektov v obraze
- návrh nelineárnych WT

Dizertačná práca bola vypracovaná v rámci medzinárodného výskumného projektu COST 257 - *Methods for Performance Evaluation and Design of Broadband Multiservice Networks* a grantových úloh základného výskumu 1/3164/96 - *Číslicové spracovanie obrazových a zvukových signálov a ich prenos cez rôzne typy telekomunikačných kanálov*, 95/5195/296 - *Telekomunikačné siete a služby.*

Literatúra

[1] Pratt,W.,K.: *Digital Image Processing*, John Wiley & Sons, New York, 1978.

[2] Rosenfeld, A., Kak, A., C.: *Digital Picture Processing*, Vol. 1, Academic Press, London, 1982.

[3] Stoer, J., Bulirsch, R.: *Introduction to Numerical Analysis*, Springer Verlag, New York, 1980.

[4] Rabbani, M., Jones, P., W.: *Digital Image Compression Techniques*, Published by SPIE - The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington, 1991

[5] Wallace, G., K.: *The JPEG still Picture Compression Standard*, Communications of the ACM, Vol.34, No.4, April 1991, str. 30-44

[6] Malvar, H., S.: *Signal processing with Lapped Transforms*, Artech House, 1991

[7] Akanasu, A., N., Haddad, R., A.: *Multiresolution signal decomposition* , Academic press, 1992.

[8] Daubechies, I.: *Ten lectures on wavelets*, SIAM, 1992.

[9] Chui, Ch., K.: *An introduction to wavelets*, Academic press, NewYork, 1992.

[10] Chui, Ch., K. editor: *Wavelets: A tutorial in Theory and Applications*, Academic Press, 1992.

[11] Vetterli, M., Kovačević, J.: *Wavelets and Subband Coding*, Prentice Hall, 1995.

[12] Strang, G.,Nguyen, T.: *Wavelets and Filter Banks*, Wellesley-Cambridge Press, 1996.

[13] Burrus, S., C., Gopinath, A., Guo, H.: *Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms*, Prentice Hall, 1998.

[14] Akanasu, A., N., Smith M.(editors): Subband and Wavelet Transforms, Design and Application, Kluwer Academic Publishers, 1988.

[15] Cohen, A.: *Wavelets and multiscale Signal processing*, Champan& Hall, 1995.

[16] Newland,D.E.: *An introduction to Random vibrations, spectral and wavelet analysis*, Longman Scientific & Technical, 1993.

[17] Erlenbacher.G, editor: *Wavelets: theory and applications*, Oxford University Press, 1996.

[18] Benedetto,J., Frazier,M.,W.: *Wavelets: mathematics and applications*, CRC, 1994.

[19] Meyer.Y.: *Wavelets:algoritms and applications*, SIAM, 1993.

[20] SIGGRAPH 95 Course Notes: *Wavelets and their Applications in Computer Graphics*, organized by Fournier,A., University of British Columbia, 1995.

[21] Polec, J., Pavlovičová, J., Oravec, M.: *Vybrané metódy kompresie dát*, Faber, Bratislava, 1996.

[22] Polec, J.: *Neštandardné postupy v použití diskrétnych ortogonálnych transformácií pre kompresiu údajov*, Dizertačná práca, EF STU, Bratislava, 1993.

[23] Coifman R., Wickerhauser, M., V.: *Entrophy-Based Algorithms for Best Basis Selection*, IEEE Transaction on Information theory, Vol. 38, March 1992.

[24] Ramchandran, K., Vetterli, M.: *Best wavelet packet bases in rate-distortion sense*, IEEE Transaction on Image Processing, Vol. 2, April 1993.

[25] Herley,C., Vetterli,M.: *Orthogonal Time-Varying Filter Banks and Wavelet Packets*, IEEE Transactions on signal processing, Vol.42, October 1994.

[26] Ramchandran,K., Vetterli,M., Herley,C.: *Wavelets, Subband Coding, and Best Bases*, Proceedings of the IEEE, Vol. 84, No.4, pp 541-560, 1996.

[27] Xiong, Z., Ramchandran, K., Orchard, M., T.: *Space-Frequency Quantization for Wavelet Image Coding*, IEEE Trans. on Image Processing, May 1997, Vol. 6, str. 677-693.

[28] Davis, G., Nosratinia, A.: *Wavelet-based Image Coding: An Overview*, Applied and Computational Control, Signals, and Circuits, Vol. 1, No. 1, Spring 1998.

[29] Sweldens, W.: *Wavelets: What Next?*, Proc. of the IEEE, Vol. 84, Nr. 4, str. 680-685, 1996.

[30] Fischer,Y., editor: *Fractal Image compression*, Springer-Verlag, 1994.

[31] Krupnik,H., Malah D., Karnin E.: *Fractal representation of images via the discrete wavelet transform*, in IEEE 18-th Conv. of EE in Israel, Tel-Aviv, Mar.1 1995

[32] Davis, M., G.: *A Wavelet-Based Analysis of Fractal Image Compression*, IEEE Transaction on Image Processing, Vol. 6, 1997.

[33] Rinaldo, R., Calvagno, G.: *Image Coding by Block Prediction of Multiresolution Subimages*, IEEE Transaction on Image Processing, Vol. 4, No. 7, str.909-920, July 1995.

[34] Mallat, S.: *Zero-Crossings of a Wavelet Transform*, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 37, July 1991, str. 1019-1033.

[35] Xia, X., Suter, B., W.: Vector-Valued Wavelets and Vector Filter Banks, IEEE Transactions on signal processing, Vol. 44, march 1996.

[36] Gersho, A., Gray, R., M.: *Vector quantization and signal compression*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1992.

[37] Villasenor, J.,D., Belzer, B., Liao, J.: *Wavelet filter evaluation for Image compression*, IEEE Transactions on Image processing, Vol. 4, August 1995.

[38] Goh,S.,S.: *Displacement in wavelet decomposition of images*, Signal Processing, Vol. 44, June 1995.

[39] Da Silva,E.,A.,B., Ghanbari,M.: *On the Performance of linerar Phase Wavelet Transforms in Low Bit-Rate Image Coding*, IEEE transactions on image processing, Vol. 5, May 1995.

[40] Xia, X, Geronimo,J.,S., Hardin,P., Suter,B.,W.: Design of Prefilters for Discrete Multiwavelet Transforms, IEEE Transactions on signal processing, Vol. 44, januar 1996.

[41] Antonini, M., Barlaud, M., Mathieu, P., Daubechies, I.: *Image coding using wavelet transform*, IEEE Trans. Image Proc., Vol. 3, Nr. 2, str. 205-220, April 1995.

[42] Belzer,B.m Lina Jean-Marc, Villasenor,J.: Complex, Linear-Phase Filters for Efficient Image Coding, IEEE transactions on signal processing, Vol. 43. October 1995.

[43] Rioul,O.: *Regular wavelets: A discrete-Time Approach*, IEEE Transactions on signal processing„ Vol. 41, december 1993.

[44] Shah, A., I.: *Theory, Design and Structures for Multidimensional Filter Banks and Applications in Coding of Interlaced Video*, Ph.D. Thesis, Columbia University 1994.

[45] Sweldens, W., Schröder, P.: *Building your own wavelets at home*, in Wavelets in Computer Graphics, str 15-87, ACM SIGGRAPH Course notes, 1996.

[46] Kovačević, J., Sweldens, W.: *Wavelet families of increasing order in arbitrary dimensions*, Preprint, Bell Laboratories, Lucent Technologies, December 1997.

[47] Boor, C., Ron,A.: *On multivariate polynomial interpolation*, Constr. Approx., Nr. 2, str. 287-302, 1990.

[48] Uytterhoeven, G., Bultheel, A.: *The Red-Black Wavelet Transform*, TW Report 271, Department of Computer Science, Katholieke Universiteit Leuven, December 1997.

[49] Herley, C.: *Exact Interpolation and Iterative Subdivision Schemes*, IEEE Transactions on signal processing, Vol. 43, 1995.

[50] Wong, P., W., Noyes, S.: *Space-Frequency Localized Image compression*, IEEE Transactions on image processing, Vol. 3, May 1994.

[51] Lewis, A., S., Knowles, G.: *Image Compression using the 2-D Wavelet Transform*, IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 1, No. 2, str. 244-250, December 1993.

[52] Xiong, Z., Guleryuz, I., Orchard, M., T.: *A DCT-based Embedded Image Coder*, IEEE Signal Processing Letters, vol. 3, str. 289-290, November 1996.

[53] Davis, G,. Chawla, S.: *Image Coding Using Optimized Significance Tree Quantization*, Proc. Data Compression Conference, 1997, str. 387-396.

[54] Rogers, J., K., Cosman, P.: *Wavelet Zerotree Image Compression with Packetization*, IEEE Signal Processing Letters, vol. 5, str. 105-107, May 1998.

[55] Chou, J., Crouse, M., Ramchandran, K.: *A Simple Algorithm for Removing Blocking Artifacts in Block-Transform Coded Images*, IEEE Signal Processing Letters, vol. 5, str. 33-35, February 1998.

[56] Tran, T., D., Nguyen, T., Q.: *A progressive transmission image coder using linear phase paraunitary filter banks*, 31st Asilomar Conference on SSC, Pacific Grove, CA, Nov. 1997.

[57] Manduca, Armando: *Embedded Zerotree Wavelet Compression of Medical Images*, IEEE Engineering in Medicine & Biology 17th Annual Conference, Montreal, 1995

[58] Nagarajan, K,. Kresh, E., Rao, S., S., Kresh., Y.: *Constrained ECG Compression Using Best Adapted Wavelet Packet Bases*, IEEE Signal Processing Letters, Vol. 3, No. 10, October 1996

[59] Strela, V., Heller, P., Strang, G., Topiwala, P., Heil, C.: *Multiwavelet filter banks for data compression*, Proc. IEEE ISCAS, Seattle, 1995.

[60] Strela, V., Heller, P., Strang, G., Topiwala, P., Heil, C.: *The application of multiwavelet filter banks to signal and image processing*, IEEE Trans. on Image Proc. (1998).

[61] Sweldens, W.: *The Lifting Scheme: A new philosophy in biorthogonal wavelet constructions*, In A. F. Laine and M. Unser, editors, Wavelet Applications in Signal and Image Processing III, str. 68-79, Proc. SPIE 2569, 1995.

[62] Sweldens, W.: *A custom-design construction of biorthogonal wavelets*, Appl. Comput. Harmon. Anal., Vol. 3, Nr. 2, str. 186-200, 1996.

[63] Sweldens, W.: *The Lifting Scheme: A Construcion of Second Generation Wavelets*, Preprint, November 1997.

[64] Daubechies, I., Sweldens, W.: *Factoring Wavelet Transforms Into Lifting Steps*, J. Fourier Anal. Appl., Vol. 4, Nr. 3, str. 247-269, 1998.

[65] Uytterhoeven, G., Wulpen, F.: *Waili: Wavelets with Integer Lifting* Report TW262,Department of Computer Science, K.U.Leuven, July 1997.

[66] Uytterhoeven, G., Rose, D., Bultheel, A.: *Wavelet Transforms Using the Lifting Scheme*, Report ITA-Wavelets-WP1.1,Department of Computer Science, K.U.Leuven, April 1997.

[67] Fernández, G., Periaswamy, S.: *LIFTPACK: A Software Package for Wavelet Transforms using Lifting*, Technical Report TR-96-04, Department of Computer Science, University of South Carolina, 1996.

[68] Zorin, D., Schröder, P., Sweldens, W.: *Interpolating Subdivision for Meshes with Arbitrary Topology*, Computer Graphics Proceedings (SIGGRAPH 96), str. 189-192, 1996.

[69] Calderbank, R,. C., Daubechies, I., Sweldens, W., Yeo, B.: *Losless Image Compression using Integer to Integer Wavelet Transforms*, International Conference on Image Processing (ICIP) 1997, Vol. I, str. 596-599.

[70] Ramaswamy, V.: *Losless Image Compression Using Wavelet Decomposition*, PhD Thesis, University of South Florida, August 1998.

[71] Chao, H., Fisher, P.: *An Approach to Fast Integer Reversible Wavelet Transforms for Image Compression*, Proceedings of Guangzhou International Symposium on Computational Mathematics", 11-15.8 1997, Guangzhou, China

[72] Claypole, R., Davis, G., Sweldens, W., Baraniuk, R.: *Nonlinear Wavelet Transforms for Image Coding*, Proceedings of the 31st Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Vol. 1, str.662-667, 1997.

[73] Devitte, S., Cornelis, J.: *Lossless Integer Wavelet Transform*, IEEE Signal Processing Letters, Vol. 4, No. 6, June 1997.

[74] Memon, N., Wu, X., Yeo, B.: *Entropy coding techniques for lossless image compression with reversible integar wavelet transforms*, IBM Research Report, Oct. 22, 1997

[75] Wu, X.: *High-Order Context Modeling and Embedded Conditional Entropy Coding of Wavelet Coefficient for Image Compression*, Department of Computer Science, University of Western Ontario, Preprint

[76] Shapiro, J., M.: *Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients*, IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 41, str. 3445-3462, April 1992.

[77] Said, A., Pearlman, W. A.: *A new fast and efficient image codec on set partitioning in hierarchical trees*," IEEE Trans.on Circuits Syst. Video Tech., vol. 6, str. 243-250, June 1996

[78] Burrows, M., Wheeler, D., J.: *A Block-sorting Lossless Data Compression Algorithm*, Digital Systems Research Center, Research Report 124, May 1994.

[79] Nelson, M.: *Data Compression with the Burrows-Wheeler Transform*, Dr.Dobb's Journal, Sep. 1996.

[80] Guo, H., Burrus, C., S.: *Waveform and Image Compression Using the Burrows Wheeler Transform and the Wavelet Transform*, IEEE Proc. ICIP'97, submitted.

[81] Gormish, J., Schwartz, E., Boliek, M., Zandi, A., Keith, A.: *Lossless and nearly lossless compression for high quality images*, Proc. of IS&T/SPIE's 9th Annual Symposium, Vol. 3025, San Jose, February 1997.

[82] Wu, X., Memon, N.: *Context-based, Adaptive, Lossless Image Codec*, IEEE Trans. on Communications, Vol. 45, No. 4, str. 437-444, April 1997.

Zoznam publikácií autora a príslušných ohlasov

- Hudecová, M., Polec, J., Vargic, R.: *Discrete Orthogonal Transforms in Hommomorphic Filtering of Image, Image processing and Neural Networks'93*, Conference with International Participation, Liptovský Mikuláš 1993.

- Polec, J., Vargic, R.: *Decreasing of Information Redundance n-dimensional Signal with (n+1) - dimensional Discrete Orthogonal Transform*, International Conferance on Digital Signal Processing'93, Košice 1993.

  1. Oravec,M.: Kohonen and Grossberg Learning in Neural Networks for Image Compression, International Workshop on Image Processing june 1994, Journal on Communications, Vol. XLV, july - august 1994, Budapest, 1994, str. 77-79

- Polec, J., Pavlovičová, J., Vargic, R.: *New ordering sequences and bases Functions of Discrete Fourier and Discrete Hartley Transforms for Transforms Coders*, International Workshop on Image Processing, June 1994, Journal on Communications, Vol.XLV, July - August 1994, Budapest, 1994, str. 75-76.

  1. Kotuliaková,J., Podhradský,P.: Metódy a algoritmy číslicového spracovania signálov, COFAX 1. medzinárodná konferencia o telekomunikačných technológiách Telekomunikácie '95, Bratislava, 31.5.-1.6.1995, str. 3-10
  2. Marček,A., Kotuliaková,J.: MICT a ich rýchle algoritmy, COFAX 1. medzinárodná konferencia o telekomunikačných technológiách Telekomunikácie '95, Bratislava, 31.5.-1.6.1995, str. 23-29
  3. Marček,A.: Celočíselná aproximácia DCT, Dizertačná práca, Bratislava, 1996
  4. Marček,A., Rozinaj,G.:Aplikácia MICT v medzin. štandarde na kompresiu obrazu JPEG, 2.mzn. konf. Telekomunikácie 96, str. 56-61:
  5. Oravec,M. a kol.: A Neural Network Interp. in I-BTC-1, Proc. of the Int. Workshop Tempus-Telecomnet, Smolenice, 1997, str. 140-144
  6. Oravec,M., Podhradský,P., Pasero,E., Fašanga,T.: A Neural Network Interpolation in BTC, 2nd Int. Workshop of TEMPUS-TELECOMNET Project: Digital Processing of Image and Speech Signals, Smolenice, 1997:

- Hudecova,M., Polec,J., Vargic,R., Pavlovičová, J.: One Application of Homomorphic Filtering, Internationale Workshop on Image Processing june 1994, Journal on Communications, Vol. XLV, july - august 1994, Budapest, 1994, str. 73-75

1. Kotuliaková,J., Podhradský,P.: Metódy a algoritmy číslicového spracovania signálov, COFAX 1. medzinárodná konferencia o telekomunikačných technológiách Telekomunikácie '95, Bratislava, 31.5.-1.6.1995, str. 3-10

- Vargic, R.: *Compression of images using orthogonal and biorhogonal wavelets*, Proceeding of internationalcompetition of student's scientific works '96 organized by Foundation of J.Murgas for Telecommunications, Bratislava, 1996.

- Polec, J., Vargic, R.: *Interpolative Methods with Orthogonal ransforms*, Proceedings of 2nd International Workshop of Tempus Telecomnet Project, February 1997, Smolenice, str. 134-139.

    1. Oravec,M.: Feature Extraction from Image Data bz Neural Network Vector Quantization, Proc. of the Int. Workshop Tempus-Telecomnet, Košice, 1997, str. 52-55

- Vargic, R.: *Kompresia obrazu pomocou waveletovej transformácie*, Rigorózna práca, FEI STU v Bratislave, Marec 1997.

- Vargic, R.: *Lifting scheme and fast wavelet transform*, Proceeding of international competition of scientific works in telecommunications'97 organized by Foundation of J.Murgaš for Telecommunications, Bratislava, May 1997.

- Polec, J., Vargic, R.: *LOT with Nonstandard Basis Functions*, Proceedings of 3rd International Workshop TEMPUS Telecomnet, Košice, Slovak Republic, 2.9.1997, str. 112-115 (in slovak).

- Vargic, R.: *Lossy image compression using multidimensional wavelets and Lifting scheme*,Proceeding of international competition of scientific works in telecommunications'98 organized by Foundation of J.Murgas for Telecommunications, Bratislava, May 1998, str. 48-51 (in slovak)

- Vargic, R.: *Embedded Coding of Still Images Using Block Transforms*, Proceedings of 3rd International Conference on Multimedia Technology and Digital Telecommunication Services, Budapest, October 28-30, 1998, str. 213-218

- Vargic, R.: *An Approach to 2 Dimensional Wavelet Transform and its use for Image Compression*, Radioengineering, Vol. 7, No. 4, Decebmer 1998., str. 1-6

Resume

This work deals with application of *wavelet transform* (WT) and it's extensions for image compression purposes. A review of present state in problematics of transform image coding is given. Especially wavelet transform, it's realization via lifting scheme and progressive image coding technics are discussed. Various modifications of WT are derived and used in progressive wavelet compression algorithm (SPIHT). This approach was also used in image compression using block transforms. Most part of presented modifications is realized using *lifting scheme* which allows lossless compression and simple hardware implementation.

Main contributions theoretical and application area can be summarized as follows:

- Matrix formulation of biortogonal perfect reconstruction conditions and derivation of DWT transform matrices.
- Extension of WT by combining bases of several wavelet transforms and their use for image compression.
- Formulation of two lemmas, which descibe transition between different polyphase filter bank representations and lifting scheme.
- Derivation of bit plane reordering algorithms for transition between Mallat's and lifting representation for various types of WT, simple explanation of alias cancelling in lifting scheme.
- Improvement of compression efficiency (in sense of PSNR) in wavelet progressive coder with block transform using two concepts: a) appropriate change of block size (also visually less disturbing) b) repetition of block transform in reordered lowest subband.
- Improvement of SPIHT compression efficiency (when various DWT are used) by simple filter renormalisation procedure.
- Realization of nonseparable 2-dimensional (2D) WT using Quincunx subsampling and lifting scheme with 2D predictors and it's use for image compression:
  - Derivation of $1D \rightarrow 2D$ transform TORING, which maps predictors of 1D prototype WT to 2D predictors. Result is nonseparable 2D WT with more isotrophic base functions as separable case.
  - Design of directional wavelets using directional 2D predictors.
- Construction of WT with maximal ability of polynomial prediction in high-pass band and it's use for image compression.
- Realization of low-pass lossless filtering algorithm using principles and strucures of lifting scheme and it's use for image filtration.