



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

VYUŽITÍ VLNKOVÉ TRANSFORMACE PRO FÚZI OBRAZOVÝCH DAT

THE USE OF WAVELET TRANSFORM FOR IMAGE DATA FUSION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

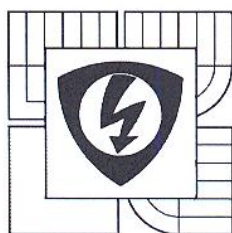
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN DEMEL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR WALEK

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Biomedicínská technika a bioinformatika

Student: Jan Demel

Ročník: 3

ID: 125017

Akademický rok: 2011/12

NÁZEV TÉMATU:

Využití vlnkové transformace pro fúzi obrazových dat

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Prostudujte princip dvourozměrné vlnkové transformace a proveďte literární rešerši využití vlnkové transformace pro fúzi obrazových dat. 2) Seznamte se se zpracováním obrazů v programovacím prostředí MATLAB. Zaměřte se zejména na využití možností, které nabízí Image Processing Toolbox. 3) S využitím funkcí Image Processing Toolbox navrhnete a realizujete algoritmus, který bude provádět dvourozměrnou vlnkovou transformaci se zobrazením výsledného rozkladu. Algoritmus doplňte jednoduchým uživatelským rozhraním, které bude umožňovat volbu mateřské vlnky a stupně rozkladu. 4) Vytvořte testovací databázi dvojic fotografií, kde v každé dvojici budou fotografie jinak zaostřeny. 5) Navrhnete a realizujete algoritmus pro slučování vlnkových rozkladů dvojice obrazů s ohledem na charakter dat ve vytvořené databázi. 6) Algoritmy z bodů 3 a 5 spojte do jednoho programu, který bude vytvářet tzv. multifokální fúzované obrazy pomocí vlnkové transformace. 7) Proveďte diskuzi a zhodnocení dosažených výsledků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] JAN, J. Medical Image Processing, Reconstruction and Restoration: Concepts and Methods, CRC Press, 2005. ISBN 0-8247-5849-8
[2] PAJARES, G., CRUZ, J. A wavelet-based image fusion tutorial. Pattern Recognition, vol. 37, no. 9, p. 1855-1872, September 2004. ISSN 0031-3203

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Petr Walek

Konzultanti bakalářské práce:



prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou možností využití vlnkové transformace k multifokálních fúzi obrazů. Nejprve je popsán základní princip vlnkové transformace a její aplikací v oblasti fúze obrazových dat. Následuje základní popis fúze a jejího principu, včetně popisu základních pravidel fúze. Vlastní programové řešení vlnkové dekompozice a fúze je v práci popsáno ve čtvrté kapitole. V práci je také provedeno kvantitativní statistické srovnání jednotlivých pravidel pro fúzování dekomponovaných obrazů a jejich zhodnocení společně s ukázkou vytvořených multifokálních obrazů. Bylo vytvořeno GUI pro fúzi obrazů, kde uživatel může nastavit různé parametry pro dosažení nejlepších výsledků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vlnková transformace, Dvourozměrná vlnková transformace, Fúze obrazů, Pravidla fúze, Multifokální obrazy

ABSTRACT

This bachelor thesis analyzes the possibility of using the wavelet transform in multifocal image fusion. First, it describes the basic principle of the wavelet transform and its use for image data fusion. Basic description of the fusion and its principles follows, including a description of the basic fusion rules. Actual software solution for wavelet decomposition and fusion is described in the fourth chapter of this work. In this thesis there is also a quantitative statistical comparison of different rules for fusing decomposed images and their evaluation along with examples of created multifocal images. GUI for image fusion was created where the user can set various parameters to achieve the best results.

KEYWORDS

Wavelet Transform, Two-dimensional Wavelet Transform, Image Fusion, Fusion Rules, Multifocal Images

DEMEL, Jan *Využití vlnkové transformace pro fúzi obrazových dat*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství, 2012. 49 s. Vedoucí práce byl Ing. Petr Walek

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Využití vlnkové transformace pro fúzi obrazových dat“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Walkovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Také bych chtěl poděkovat mému kamarádovi Tomáši Janovičovi za pomoc při vytváření databáze fotografií.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	9
1 Vlnková Transformace	10
1.1 Úvod do vlnkové transformace	10
1.2 Vlnky	10
1.3 Spojitá vlnková transformace (CWT)	12
1.3.1 Inverzní CWT	14
1.4 Diskrétní vlnková transformace	14
1.4.1 DWT	14
1.4.2 Realizace DWT bankou filtrů	14
1.4.3 Ilustrační příklad	16
1.4.4 Inverzní DWT (IDWT)	17
2 2D vlnková transformace	19
2.1 Dekompozice obrazu	19
2.2 Rekonstrukce obrazu	20
2.3 Příklady dekompozice	21
3 Fúze dvojice obrazů pomocí DWT	22
3.1 Pravidla fúze	23
3.1.1 Výpočet úrovně aktivity	23
3.1.2 Metody seskupení koeficientů	24
3.1.3 Metody kombinace koeficientů	24
4 Popis programu	26
4.1 Popis programu a jeho GUI	26
4.2 Použité metody	28
4.2.1 Výpočet úrovně aktivity	28
4.2.2 Kombinace koeficientů	30
4.3 Ukázky kódu	31
4.3.1 Rozklad do buněk	31
4.3.2 Výpočet metod a rekonstrukce	32
4.3.3 Kontrola konzistence	36
5 Hodnocení výsledků	38
5.1 Metodika testování	38
5.2 Výsledky testování	39
5.2.1 Srovnání vlnek	39

5.2.2	Srovnání metod	41
5.2.3	Ukázka výsledků	43
6	Závěr	46
	Literatura	47
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	49

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Příklad vykreslení koeficientů vlnkové transformace	11
1.2	Mateřská vlnka a její dilatované posunuté verze	12
1.3	Časově frekvenční rozlišení WT	13
1.4	3 stupňová DWT dekompozice	16
1.5	Příklad DWT	17
1.6	Třístupňová DWT rekonstrukce	18
2.1	Jeden stupeň 2D DWT	19
2.2	DWT reprezentace obrazu	20
2.3	Příklad 2D DWT dekompozice	21
2.4	Druhý řádek 2D DWT dekompozice	21
3.1	Schéma fúze dvojice obrazů pomocí DWT	22
4.1	GUI programu k fúzi dvou obrazů	26
4.2	Blokové schéma programu k fúzi dvou obrazů	27
5.1	Srovnání RMSE jednotlivých vlnek s použitím metod <i>Umocnění +</i> <i>Výběr maxima</i>	40
5.2	Srovnání RMSE jednotlivých vlnek s použitím metod WAWBA + GWA	40
5.3	Srovnání kvality fúzovaných obrazů v závislosti na použitých meto- dách (vlnka <i>db4</i> , $N = 3$)	42
5.4	Srovnání kvality fúzovaných obrazů v závislosti na použitém stupni rozkladu (vlnka <i>db4</i> , kombinace metod <i>Směrodatná odchylka + Výběr</i> <i>maxima</i>	42
5.5	Srovnání kvality fúzovaných obrazů v závislosti na použitém stupni rozkladu (vlnka <i>db4</i> , kombinace metod <i>Rozsah + Výběr maxima</i> . . .	43
5.6	Dvojice uměle rozostřených obrazů určených k fúzi	44
5.7	Srovnání originálního a fúzovaného obrazu	44
5.8	Dvojice pořízených fotografií určených k fúzi	45
5.9	Dvojice pořízených fotografií určených k fúzi	45
5.10	Výsledné fúzované obrazy	45

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá využitím vlnkové transformace pro fúzi obrazových dat v oblasti nestejně zaostřených dvojic fotografií. Než bude možné vysvětlit a provést samotnou fúzi, je nejprve nutné prostudovat samotnou vlnkovou transformaci jednorozměrných signálů, kterou lze najít v první kapitole. Druhá kapitola se věnuje dvourozměrné transformaci. Seznámení se s principem transformace byl také první úkol zadání této práce, který je zpracován právě v těchto dvou kapitolách.

V první kapitole jsou využity především poznatky z [11][13], z první citované jsou použity především tvary vztahů, i když některé jsou převzaty i z jiných zdrojů. V [6] je problematika vlnkové transformace zpracovávána především ve frekvenční oblasti, v této práci je ale problém popsán v časové oblasti pro zjednodušenou představu. Popis ilustračního příkladu byl částečně převzat z [10], kde je uveden jednoduchý úvod do problematiky, i když často velmi stručný. Názvosloví se v jednotlivých pramenech literatury poměrně liší, většina byla převzata podle [4], ale také byla snaha o sjednocení názvosloví s ostatní literaturou.

Ve druhé kapitole je k vysvětlení 2D vlnkové transformace využíváno především obrázků, které byly převzaty z [9][2]. Podle těchto znázornění a schémat lze dvourozměrnou transformaci velmi dobře pochopit.

Druhým úkolem v zadání bylo seznámení se s Image Processing Toolbox v programu MATLAB, které proběhlo čistě prakticky a není obsahem této práce. Třetí úkol byl vymyslet algoritmus, který bude provádět vlnkovou transformaci obrazu. Obrazy dekomponované tímto algoritmem jsou součástí druhé kapitoly.

Součástí práce je také teoretický popis principu fúze a její praktická aplikace. Princip fúze je popsán ve třetí kapitole, přičemž informace jsou čerpány především z [9][15]. Zde znovu nastal problém s různými odlišnostmi postupu fúze mezi jednotlivými autory, a tak byly použity hlavně tyto dva zdroje, protože se shodovaly a oba byly také poměrně detailní, co se týče problematiky fúze dvou obrazů.

Praktická část práce spočívala v realizaci programu, který provádí fúzi dvou různě zaostřených obrazů pomocí vlnkové transformace, jejímž výsledkem je multifokální obraz. Program využívá algoritmus dekompozice z druhé kapitoly a různé metody fúze popsané ve třetí kapitole plus nějaké další, které nejsou vzaty z pramenů literatury, ale byly doplněny jako určitá forma testování.

Srovnání těchto různých metod je obsahem páté kapitoly. Testování probíhalo na databázi dvojic fotografií z části pořízených různým zaostřením fotoaparátu a z části získaných rozostřením již existující fotografie. Vytvoření této databáze fotografií bylo také jedním z úkolů této práce.

Shrnutí práce je sepsáno v závěru.

1 VLNKOVÁ TRANSFORMACE

1.1 Úvod do vlnkové transformace

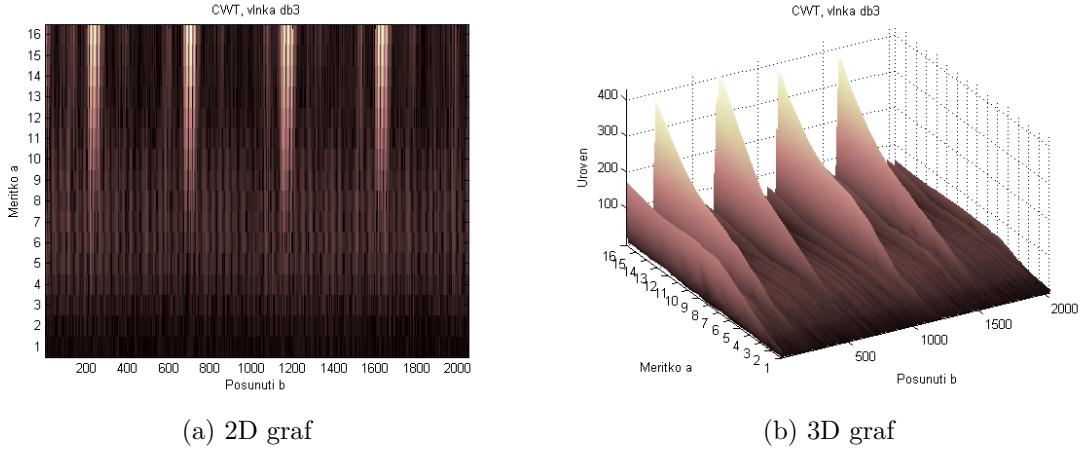
Ve Fourierově transformaci (FT – Fourier Transform) jsme schopni provést přesnou frekvenční analýzu, ale nemůžeme určit, kdy přesně se daná frekvence objevila (např. při výstřelu zjistíme, jaké frekvence zvuk obsahoval, ale už nevíme, kdy se stal). Toto je známo jako Heisenbergův princip neurčitosti. Ten říká, že určité páry souvisejících fyzických veličin nemohou být určeny s libovolnou přesností, v našem případě jsou těmito veličinami frekvence a čas. Konkrétně součin směrodatných odchylek času a frekvence je větší než $1/2$, $\sigma_t \sigma_f \geq 1/2$. Lze si to představit jako obdelník s konstantní plochou [11][13].

Vlnková transformace (WT – Wavelet Transform) se snaží tento nedostatek FT překonat, její pomocí můžeme lehce měnit výšku a šířku tohoto obdelníku (při zachování jeho plochy), je způsobem, jak provést časově-frekvenční analýzu. Místo používání harmonických funkcí, jako ve Fourierově transformaci, vybereme mateřskou vlnku a pro transformaci použijeme její různě posunutou a dilatovanou verzi, k čemuž se používají dva parametry, dilatace (měřítko) a posunutí. Dilatací se určí frekvence, na kterou se chceme v analyzovaném signálu zaměřit, a posunutí určuje místo (čas), ve kterém chceme transformaci provést. Výběr mateřské vlnky záleží na tom, k jakému účelu chceme WT použít, a není předem dán [11][8].

Pokud vlnka s danými parametry dilatace a umístění dobře koreluje se signálem, tak je hodnota transformace vysoká. Tyto hodnoty jsou spočítány pro různé dilatace a posunutí, v případě CWT (vlnková transformace se spojitým časem – Continuous Wavelet Transform) jsou oba parametry spojité (v praxi je signál vzorkovaný, tak se i parametry mění o velmi malý krok, viz [11]). Naopak pokud jde o DWT (disktréní vlnková transformace – Discrete Wavelet Transform), tak se oba parametry mění skokově. Všechny hodnoty transformace se poté vykreslí do grafu, ve kterém osa y představuje dilataci (frekvenci) a osa x posunutí (čas). Hodnoty transformace (koeficienty) jsou potom zobrazeny pomocí různých barev, gradací barev, nebo se může využít 3D grafu, kde na ose z budou koeficienty vlnkové transformace (záleží už na použitém softwaru). Jiným způsobem vykreslení koeficientů je poskládat je za sebe do řady, jak je vidět na obr. 1.5b [11].

1.2 Vlnky

Mateřská vlnka je definovaná jako funkce $\psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$, která je limitovaná v časové oblasti (tzn. má hodnoty určitém pásmu, mimo toto pásmo jsou hodnoty nula,



Obr. 1.1: Příklad vykreslení koeficientů vlnkové transformace

nebo jsou zanedbatelně malé). Díky tomu je kterákoliv hodnota koeficientů WT ovlivněna pouze krátkým úsekem signálu, který pokrývá daná vlnka (vlnky mají konečnou časovou podporu). Tyto funkce ale po částech (parametr posunutí) pokrývají celý analyzovaný signál, takže je zachována úplná informace. Jednotlivé vlnky jsou odvozeny z původní mateřské vlnky $\psi(t)$ podle vztahu [11]:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right), \quad (1.1)$$

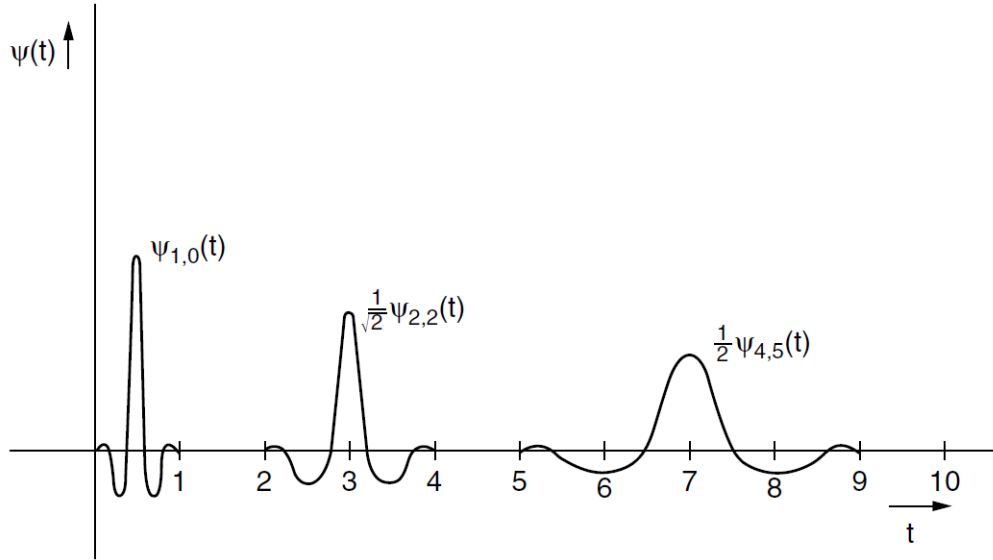
kde $a \in \mathbb{R}^+$ určuje dilataci (frekvenční spektrum vlnky), a parametr $b \in \mathbb{R}$ určuje časové posunutí (pozici vlnky), neboli oblast našeho zájmu, ψ^* značí komplexně sdruženou funkci k mateřské vlnce ψ . Vynásobením zlomkem $1/\sqrt{a}$ zajišťuje zachování energie vlnky. Příklad jedné mateřské vlnky a jejich dvou dilatovaných a posunutých verzí je vidět na obr.1.2 [4][6][13].

Obecně jsou vlnky navrženy jako rychle oscilující funkce krátkého trvání, které umožňují detekovat v analyzovaném signálu lokální detaily, tedy vysokofrekvenční složky signálu (samotná detekovaná frekvence ale závisí na dilataci a). Důvodem je, že signály často obsahují ostré hrany, impulsy nebo nespojitosti, a WT poskytuje dobrou aproximaci s menším počtem spektrálních členů. WT je tedy pro popis praktických typů signálu vhodnější než klasická spektra jako v FT, která potřebují mnoho spektrálních koeficientů pro dostatečně přesný popis signálu [4].

I když může být tvar mateřské vlnky libovolný, tak musí splňovat určité podmínky [11]:

- Podmínka přípustnosti:

$$C_\psi = \int_0^\infty \frac{|\hat{\psi}(\omega)|}{\omega} d\omega < \infty, \quad (1.2)$$



Obr. 1.2: Mateřská vlnka a její dilatované posunuté verze

kde $\hat{\psi}(\omega)$ značí Fourierovu transformaci mateřské vlnky $\psi(t)$. Tato podmínka zajišťuje, že $\hat{\psi}(\omega) \rightarrow 0$ s tím, jak $\omega \rightarrow 0$, a musí být splněna, aby byla možná rekonstrukce signálu [11][13].

- Z předchozí podmínky plyne, že vlnky mají nulovou střední hodnotu:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0. \quad (1.3)$$

- Poslední vlastností je, že mateřská vlnka je normalizovaná, jinak řečeno její energie je rovna 1:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt = 1. \quad (1.4)$$

Pokud mateřská vlnka splňuje tuto podmínku, tak ji budou splňovat i její různě dilatované verze díky násobení zlomkem $1/\sqrt{a}$ v rovnici (1.1) [4].

1.3 Spojitá vlnková transformace (CWT)

Pokud máme vlnku s předcházejícími vlastnostmi, tak Morlet-Grossmannova definice CWT pro funkci $x(t) \in L^2(\mathbb{R})$ je [6][12][13]:

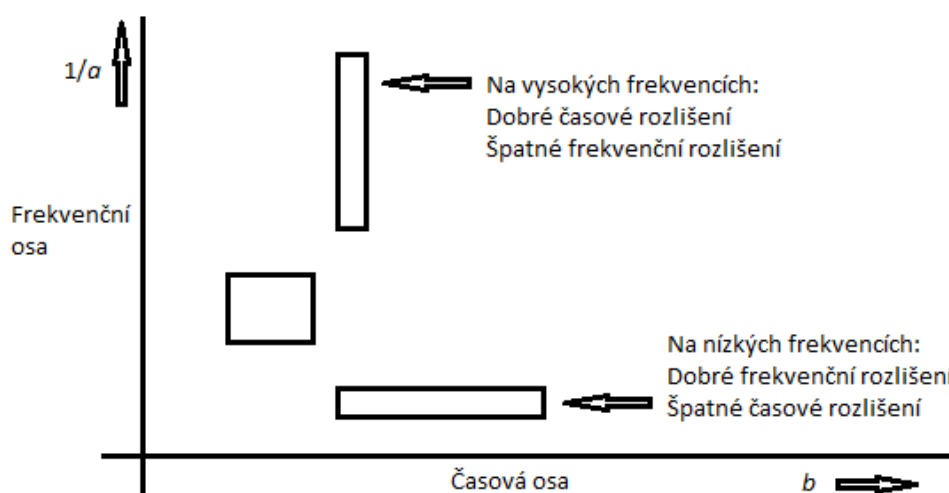
$$y(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}(t) dt = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1.5)$$

kde $y(a, b)$ značí časově frekvenční analýzu. Jedná se vlastně o korelaci vlnky se signálem $x(t)$. $\psi_{a,b}(t)$ je vlnka dosazená z rovnice (1.1) [6]. Lze si všimnout, že výsledná funkce $y(a, b)$ je popsána dvěma parametry, narozdíl od původní funkce $x(t)$,

která je popsána pouze časovým parametrem. To znamená, že se mění jednoparametrické vyjádření na dvouparametrické, což nám umožňuje provést časově-frekvenční analýzu [8].

Díky tomu, že je parametr a v rovnici (1.1) ve jmenovateli, tak to znamená, že s $a > 1$ bude docházet k rozšíření vlnky, což koresponduje s nízkými frekvencemi, a s $a < 1$ bude naopak docházet ke zúžení, což koresponduje s vysokými frekvencemi. Neboli jinými slovy platí $f = 1/a$, takže s velkým a se detekují v signálu nízké frekvence a s nízkým a se detekují vysoké frekvence [10].

S tímto také souvisí časové a frekvenční rozlišení WT, které je vidět na obr. 1.3 [11]. Každý obdelník zde představuje jednu hodnotu WT. Jak je vidět, tak s rostoucí frekvencí se zlepšuje časové rozlišení (obdelník se zužuje), ale zase se zhoršuje frekvenční rozlišení (obdelník je vyšší). Na nízkých frekvencích je to přesně naopak, lepší je frekvenční rozlišení, ale to časové je naopak horší. Je ale důležité poznamenat, že se nemění plocha obdelníků, takže je stále zachován princip neurčitosti. Toto časové a frekvenční rozlišení dává smysl, pokud bychom analyzovali signál, který se skládá z komponent o nízké frekvenci, jenž trvají delší dobu (klidně skrz celý průběh signálu, kde potom žádné časové rozlišení nepotřebujeme), a z komponent o vyšší frekvenci, které se objevují v krátkých časových intervalech. Většina signálů vyskytujících se v praktických aplikacích je tohoto typu, takže proto je WT velmi výhodná [11][10]. Tímto se také CWT odlišuje od STFT (Krátkodobá Fourierova transformace – Short-time Fourier Transform), protože v případě STFT je při použití jednoho okna časově-frekvenční rozlišení stejné skrz celé spektrum. Obrázek 1.3 by v případě STFT byl složen ze samých obdelníků/čtverců, které by měly stejné rozměry [11].



Obr. 1.3: Časově frekvenční rozlišení WT

1.3.1 Inverzní CWT

Pokud máme CWT $y(a, b)$ funkce $x(t)$, tak je inverzní spojitá vlnková transformace definovaná jako [13]:

$$x(t) = \frac{1}{C_\chi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{1}{\sqrt{a}} y(a, b) \chi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{da \cdot db}{a^2}, \quad (1.6)$$

kde C_χ značí podmínku přípustnosti definovanou v (1.2). Obvykle $\chi(t) = \psi(t)$, ale v některých případech a aplikacích nemusí být $\chi(t)$ ani vlnkou, ale například funkcí s nezápornými hodnotami [13].

1.4 Diskrétní vlnková transformace

1.4.1 DWT

Narozdíl od CWT, která obsahuje velké množství redundantní informace a kde se oba parametry mění spojitě nebo se vzorkují velmi jemně, se u DWT (diskrétní vlnková transformace – Discrete Wavelet Transform) mění oba parametry skokově. DWT získáme tak, že se do rovnice (1.5) dosadí $a = a_0^m$ a $b = a_0^m kT$, kde $a_0 > 1$ a $T > 0$, $m, k \in \mathbb{Z}^+$. Nejčastěji se volí $a_0 = 2$ a $T = 1$, takže po dosazení nám vyjde vztah [11][6]:

$$y(m, k) = \int_{-\infty}^\infty x(t) 2^{-m/2} \psi^*(2^{-m}t - k) dt. \quad (1.7)$$

Nyní představuje m dilataci a k posunutí. Tento typ DWT se nazývá dyadická. Hodnota vzorkování spektrálních hodnot v čase (a tím časová rozlišovací schopnost) se zmenšuje se vzrůstajícím měřítkem a . To vyplývá také z toho, že delší vlnka zabírá delší časový úsek signálu. Výsledkem je (obecně nekonečná) množina koeficientů $y(m, k)$ nerovnoměrně rozložených v časově-frekvenční rovině. Má-li být možná přesná rekonstrukce signálu $x(t) = DWT^{-1}[y(m, k)]$, musí být jednotlivé koeficienty vzájemně nezávislé, což je splněno, tvoří-li vlnky ortogonální systém [6][4].

1.4.2 Realizace DWT bankou filtrů

Účel DWT zůstává stejný jako u CWT, získat časově-frekvenční analýzu signálu pomocí digitální filtrace. Analýzu signálu získáme buď korelací vlnky se signálem (tak jako u CWT), nebo v případě DWT můžeme využít dvojici filtrů – horní a dolní propust. Signál prochází sérií filtrů horní propust pro analýzu vysokých frekvencí a filtrů dolní propust pro analýzu nízkých frekvencí. Výsledné rozlišení se mění pomocí operací zmíněných filtrů a dilatace se mění pomocí podvzorkování (dekompozice) a nadvzorkování (rekompozice). Dvojnásobné podvzorkování znamená, že se

sníží počet vzorků dvakrát. Oba filtry mají konečnou impulsní charakteristiku (FIR z anglického Finite Impulse Response) a jsou provedeny tak, že filtrují polovinu spektra. To znamená, že má-li signál spektrum $\langle 0; \pi \rangle$, tak po průchodu dolní propustí bude mít spektrum $\langle 0; \pi/2 \rangle$, a po průchodu horní propustí bude mít $\langle \pi/2; \pi \rangle$. Matematické vyjádření FIR filtrů je následující, jedná se o konvoluci [10]:

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} h(i)x(n-i), \quad (1.8)$$

kde N je počet vzorků impulsní charakteristiky, h je impulsní charakteristika jednoho z filtrů a $x(n)$ je původní signál. Díky tomu, že jsme tímto filtrem snížili šířku spektra na polovinu, tak můžeme snížit také vzorkovací frekvenci výstupního signálu $y(n)$ na polovinu. Z toho plyne, že každý druhý vzorek v signálu je zde nadbytečný a můžeme ho jednoduše vypustit. Podvzorkování se provádí přímo v konvoluci (1.8) tím, že se bere v úvahu každý druhý vzorek signálu $x(n)$. Takže pro dolní propust nám vyjde vztah (1.10) [10][6]:

$$d_0(n) = x(n), \quad (1.9)$$

$$d_m(n) = \sum_{i=0}^{N_d-1} h_d(i)d_{m-1}(2n-i), \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (1.10)$$

a pro horní propust [6]:

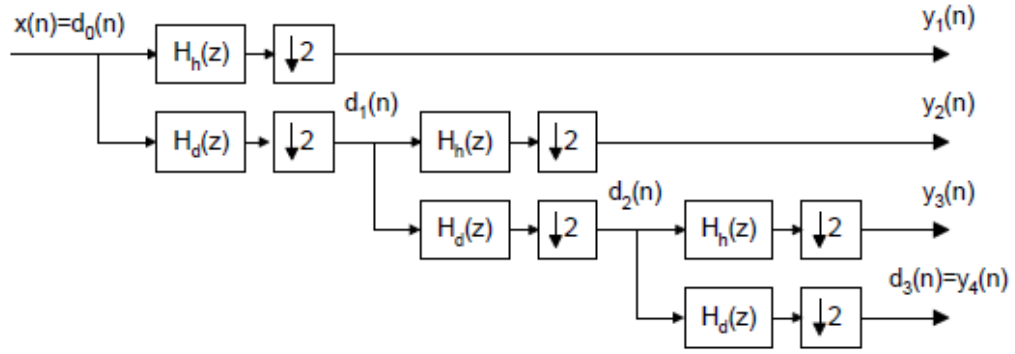
$$y_m(n) = \sum_{i=0}^{N_h-1} h_h(i)d_{m-1}(2n-i), \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (1.11)$$

$$y_{M+1}(n) = d_M(n). \quad (1.12)$$

V rovnicích jsou h_d a h_h impulsní charakteristiky filtrů dolní a horní propust, N_d a N_h jsou jejich délky, $d_m(n)$ je podvzorkovaný výstup m -té dolní propusti, $y_m(n)$ je vektor koeficientů DWT v m -tém stupni dekompozice, když $y_{M+1}(n)$ je vektor koeficientů korespondujících s nejnižším frekvenčním pásmem po M -stupňovém rozkladu [6].

Koeficient 2 u n v rovnicích (1.10) a (1.11) způsobuje podvzorkování signálu. Díky tomu, že se sníží délka spektra na polovinu, tak se zároveň zlepší dvojnásobně frekvenční rozlišení. Ale na druhou stranu se snížením počtu vzorků signálu na polovinu sníží rozlišení časové. Rovnice (1.9) slouží pouze jako označení pro rovnici (1.10), a rovnice (1.12) slouží jako označení $y_{M+1}(n)$ na konci dekompozice [10].

Na obr. 1.4 [6] je vidět realizace třístupňové dekompozice. Lze vidět, že hodnoty po průchodu horní propustí se berou rovnou jako koeficienty DWT (označované jako details), zatímco hodnoty na výstupu dolních propustí (aproximace) jsou dále filtrovány, až se nakonec výstup poslední dolní propustí v posledním stupni dekompozice označí taky jako vektor koeficientů DWT. V případě, že se provede úplný rozklad signálu, tak se jedná o jediné číslo, které vyjadřuje střední hodnotu analyzovaného signálu [4].



Obr. 1.4: 3 stupňová DWT dekompozice

Mezi oběma impulsními charakteristikami platí následující vztah [11]:

$$h_d(n) = (-1)^n h_h(N - 1 - n), \quad (1.13)$$

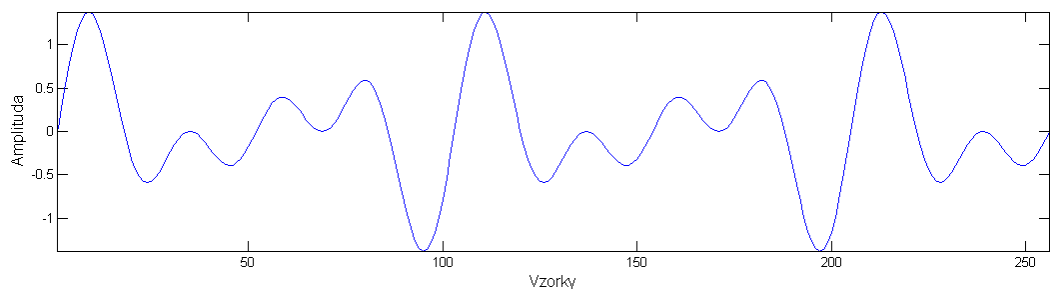
kde N je jejich délka. Tato dvojice filtrů se nazývá *zrcadlově kvadraturní filtry*. Za vztahu plyne, že $h_d(n)$ získáme časovou reverzí $h_h(n)$ a každý lichý prvek vynásobíme -1 . Impulsní charakteristika h_h je získána jako časově reverzní posloupnost vzorků vlnky, takže délka obou charakteristik filtrů, N_d a N_h , je rovna délce nenulové části odpovídající vlnky [4]. Více o problému získání impulsních charakteristik těchto filtrů se je možné dočíst v [11].

1.4.3 Ilustrační příklad

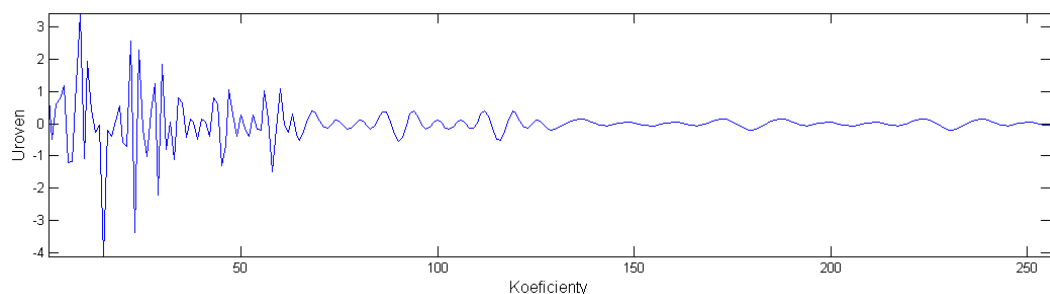
Mějme signál o délce 256 vzorků, jako je obr. 1.5a. Na obr. 1.5b je zobrazena jeho sedmistupňová DWT dekompozice. Signál projde nejprve horní propustí, z čehož získáme posloupnost prvních 128 vzorků detailů obsahujících vysoké frekvence, a dolní propustí, čímž získáme 128 vzorků aproximace (nízké frekvence) [10].

Tím skončil první stupeň dekompozice, do dalšího stupně dekompozice už vstupuje pouze 128 vzorků aproximace získaných dolní propustí. Ten probíhá úplně stejným způsobem, takže získáme 64 vzorků detailů z horní propusti a 64 vzorků aproximace z dolní propusti. Tak pokračujeme dále, až nakonec v sedmém stupni dekompozice získáme dvě hodnoty detailů z horní propusti a poslední dvě hodnoty aproximace, což jsou koeficienty DWT korespondující s nejnižším frekvenčním pásem. Počet všech koeficientů DWT je tedy $128 + 64 + 32 + 16 + 8 + 4 + 2 + 2 = 256$, což je stejně, jako počet vzorků signálu. V příkladu je ale použita vlnka *bior1.1*, při složitějších vlnkách se nedělí pásma přesně na polovinu a počet koeficientů je o něco větší než počet vzorků signálu [10].

Po provedení dekompozice se všechny koeficienty seřadí od nejnižších frekvenčních pásem po ty nejvyšší (od nejnižších stupňů dekompozice po ty nejvyšší) a mohou



(a) Signál



(b) Koefficienty DWT

Obr. 1.5: Příklad DWT

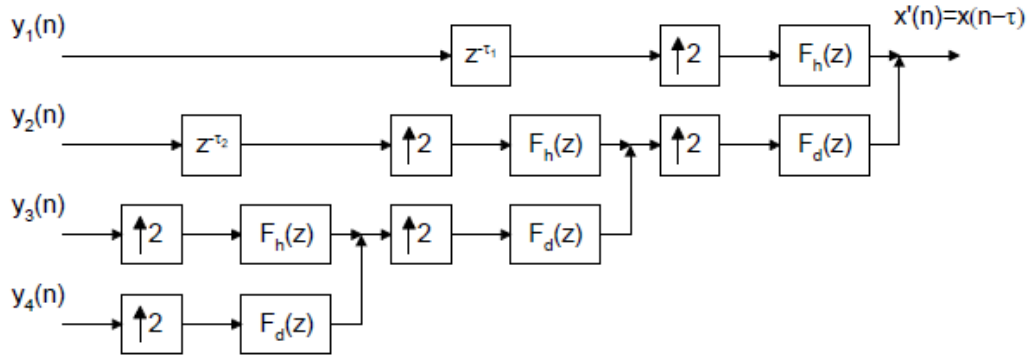
se vykreslit, tak jak je vidět právě na obr. 1.5b. Z něho lze poznat, že posledních 128 vzorků (nejvyšší frekvence) nenesou žádnou relevantní informaci, takže bychom je mohli z hlediska komprese dat vyřadit, a v případě rekonstrukce je nahradit nulami. Z toho vyplývá, že DWT lze využít například pro kompresi dat, protože má dobré kompaktní vlastnosti [10].

1.4.4 Inverzní DWT (IDWT)

Inverzní DWT je velice jednoduchá, probíhá v obráceném pořadí než proces popsany výše. Signál je v každém stupni rekonstrukce nadvzorkován, což probíhá vložení nuly mezi každý druhý prvek, následně prochází rekonstrukčním filtrem, kterým je znovu horní nebo dolní propust. Rekonstrukční filtr musí být vhodným protějškem korespondujícího dekompozičního filtru. V případě použití ortogonálních dekompozičních filtrů jsou rekonstrukční a dekompoziční filtry shodné, ale časově reverzní ($\tilde{h}(n) = h(-n)$). Na obr. 1.6 [6] lze vidět rekonstrukci signálu, který byl rozložen na obr. 1.4 [11][13][8]. Na obr. 1.6 jsou rekonstrukční filtry značeny jako f_h a f_d , ale v textu nesou označení \tilde{h}_h a \tilde{h}_d .

IDWT může být vyjádřena následující rovnicí (1.15) [11]:

$$d_M(n) = y_{M+1}(n), \quad (1.14)$$



Obr. 1.6: Třístupňová DWT rekonstrukce

$$d_{m-1}(n) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} y_m(i) \tilde{h}_h(n-2i) + \sum_{i=-\infty}^{\infty} d_m(i) \tilde{h}_d(n-2i), \quad m = M, \dots, 2, 1, \quad (1.15)$$

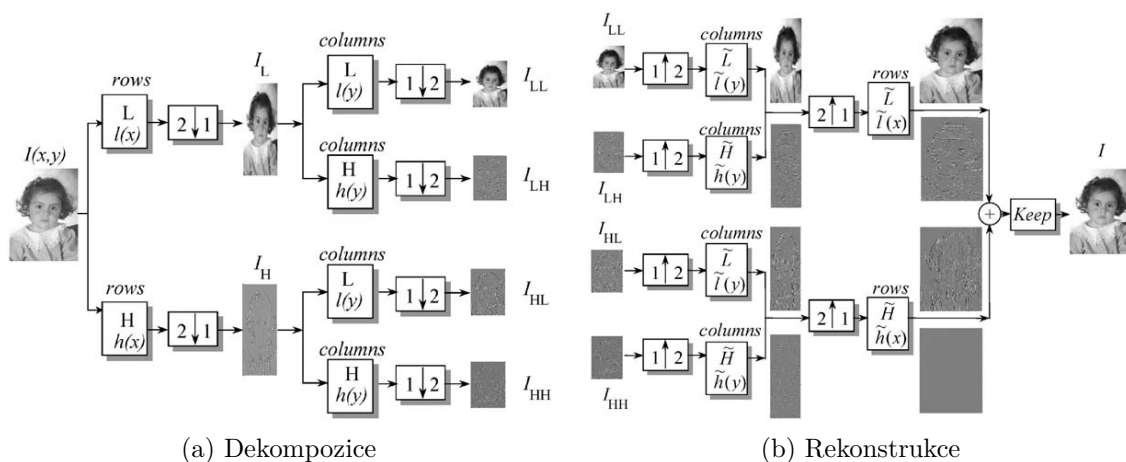
$$x(n) = d_0(n), \quad (1.16)$$

kde $y_m(n)$ jsou koeficienty DWT m -tého stupně dekompozice představující vyšší frekvence, $d_m(n)$ jsou koeficienty nižších frekvencí, které se vypočítávají s výjimkou prvního $d_M(n)$, který se získá jako nejnižší DWT koeficienty, toto označení vyjadřuje rovnice (1.14). \tilde{h}_h a \tilde{h}_d jsou impulsní charakteristiky rekonstrukčních filtrů horní, respektive dolní propusti. Poslední $d_0(n)$ je původní signál $x(n)$, který jsme chtěli rekonstrukci získat, to je vyjádřeno v rovnici (1.16). M představuje nejvyšší stupeň původní dekompozice [6].

2 2D VLNKOVÁ TRANSFORMACE

2.1 Dekompozice obrazu

V případě aplikace CWT na dvourozměrný obraz by mělo výsledné spektrum celkem čtyři parametry (dvě dilatace a dvě posunutí), což by bylo obtížné pro vizuální zobrazení, a tak se CWT ve zpracování obrazu prakticky nepoužívá [5]. Místo CWT se v praxi používá, stejně jako u jednorozměrných signálů, dyadická DWT. Postup dekompozice je zachycen na obr. 2.1a [9].



Obr. 2.1: Jeden stupeň 2D DWT

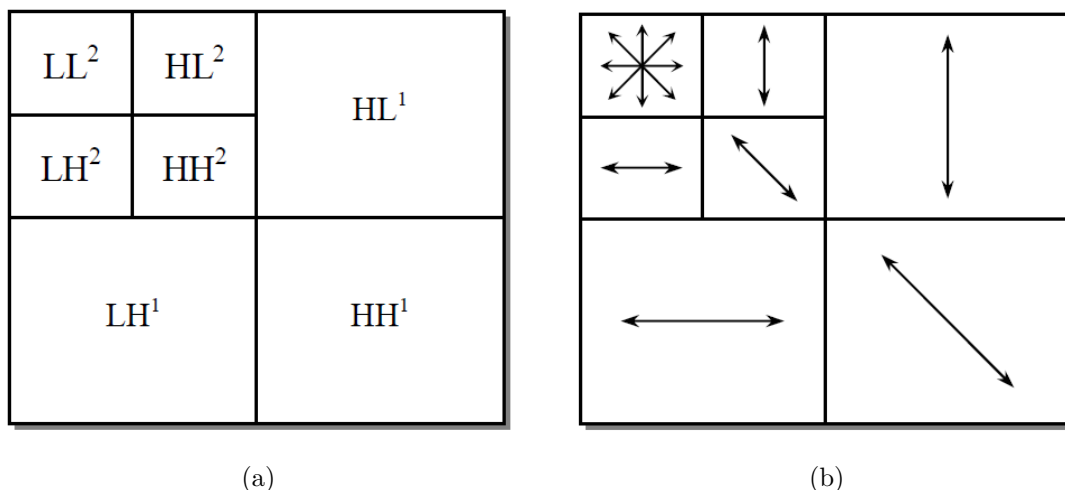
Dekompozice se provádí pomocí stejných filtrů, jako v případě jednorozměrných signálů, ale ve dvou směrech – vertikálním a horizontálním. Nejprve se provede filtrace v horizontálním směru, která se aplikuje na řádky (*rows*), pomocí filtru dolní propust L , kde $l(i)$ je jeho impulsní charakteristika, a filtru horní propust H , kde $h(j)$ je jeho impulsní charakteristika. Po těchto filtracích následuje podvzorkování pouze v řádcích. Z originálního obrazu $I(x,y)$ vzniknou tedy dvě matice koeficientů $I_L(x,y)$ a $I_H(x,y)$. Následuje vertikální filtrace použitím filtrů L a H tentokrát na sloupce (*columns*) s následným podvzorkováním také ve sloupcích. Výsledkem jsou čtyři matice koeficientů (neboli podobrazy) $I_{LL}(x,y)$, $I_{LH}(x,y)$, $I_{HL}(x,y)$ a $I_{HH}(x,y)$. Tím je dokončen jeden stupeň dekompozice. Případný další stupeň dekompozice probíhá úplně stejně, ale jako vstupní obraz se bere $I_{LL}(x,y)$, který je výsledkem filtrace pouze dolní propustí a představuje tedy aproximaci původního obrazu, jinými slovy to je vyhlazený a zmenšený originál $I(x,y)$. Podobrazy $I_{LH}(x,y)$, $I_{HL}(x,y)$ a $I_{HH}(x,y)$ představují obrazy detailů a reprezentují původní obraz postupně v horizontálním, vertikálním a diagonálním směru, jak je znázorněno na obr. 2.2b [2]. Praktické provedení dekompozice lze vidět na obrázcích 2.3 a 2.4 [9][2][7].

Na obr. 2.2a [2] lze vidět reprezentaci vstupního obrazu pomocí DWT po provedení dvoustupňové dekompozice. Obrazy LH^1 , HH^1 a HL^1 jsou detaily z prvního stupně, LH^2 , LH^2 a LH^2 jsou detaily z druhého stupně a LL^2 představuje aproximaci, z které by mohl být proveden třetí stupeň dekompozice. Díky podvzorkování je celková velikost podobrazů téměř stejná, jako velikost původního obrazu (odlišnosti záleží na konkrétním typu použité vlnky). Hodnoty aproximace I_{LL} mají všechny pozitivní hodnotu, ale hodnoty koeficientů obrazů všech tří detailů kolísají kolem nuly, tzn. mohou být i záporné [9][7].

Z obrázku 2.2a je také patrné, že počet vzniklých podobrazů lze vyjádřit vztahem:

$$n = 3 \cdot N + 1, \quad (2.1)$$

kde N je počet stupňů dekompozice.



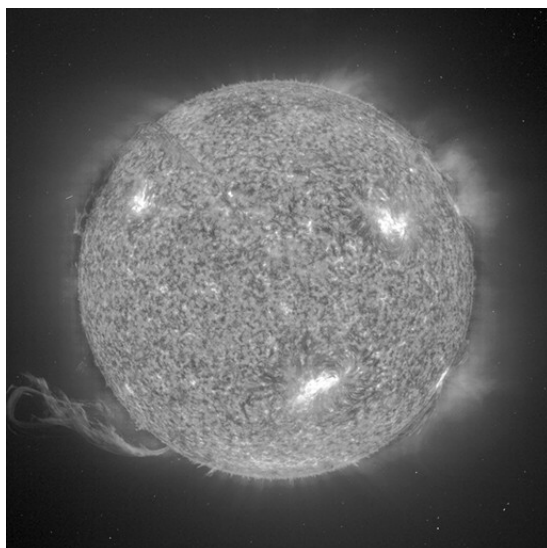
Obr. 2.2: DWT reprezentace obrazu

2.2 Rekonstrukce obrazu

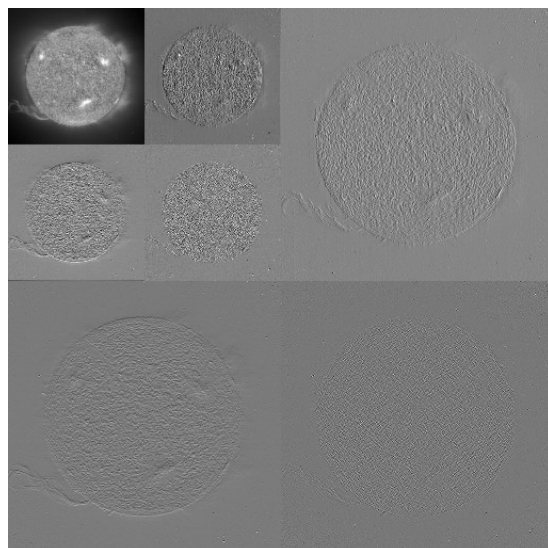
Inverzní 2D DWT může být implementována použitím zpětného pyramidového algoritmu, obráceně než při dekompozici. Rekonstrukce obrazu se skládá z nadvzorkování a vertikální filtrace použitím filtru dolní propust \tilde{L} (s impulsní charakteristikou $\tilde{l}(i)$) a filtru horní propust \tilde{H} (s impulsní charakteristikou $\tilde{h}(j)$) pro každý sloupec všech čtyř podobrazů. Poté následuje nadvzorkování a horizontální filtrace pro každý řádek vzniklých obrazů s použitím stejných filtrů \tilde{H} a \tilde{L} . Nakonec se všechny čtyři vzniklé obrazy sečtou. Jeden stupeň rekonstrukce je znázorněn na obr. 2.1b [9].

2.3 Příklady dekompozice

Na tomto místě jsou uvedeny dva příklady dekompozice vytvořené v programovém prostředí MATLAB. V obou případech byla použita vlnka *haar*.

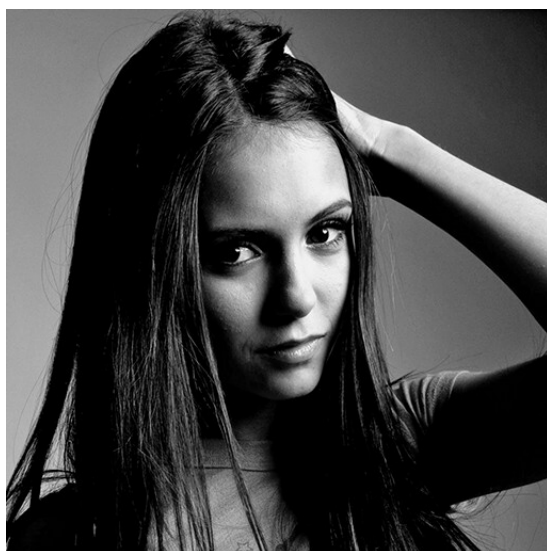


(a) Originální obraz

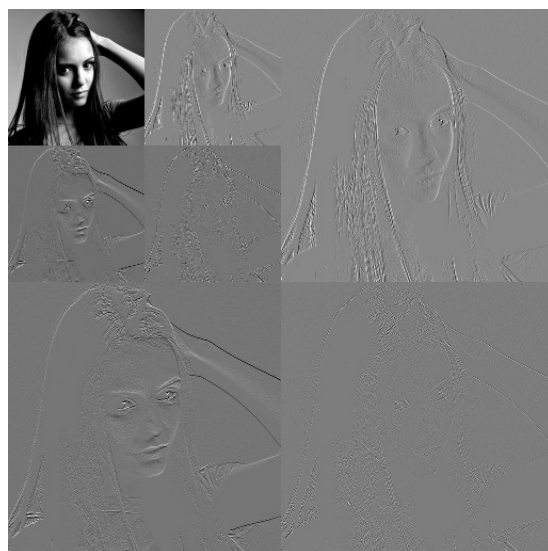


(b) Dvoustupňová dekompozice

Obr. 2.3: Příklad 2D DWT dekompozice



(a) Originální obraz



(b) Dvoustupňová dekompozice

Obr. 2.4: Druhý příklad 2D DWT dekompozice

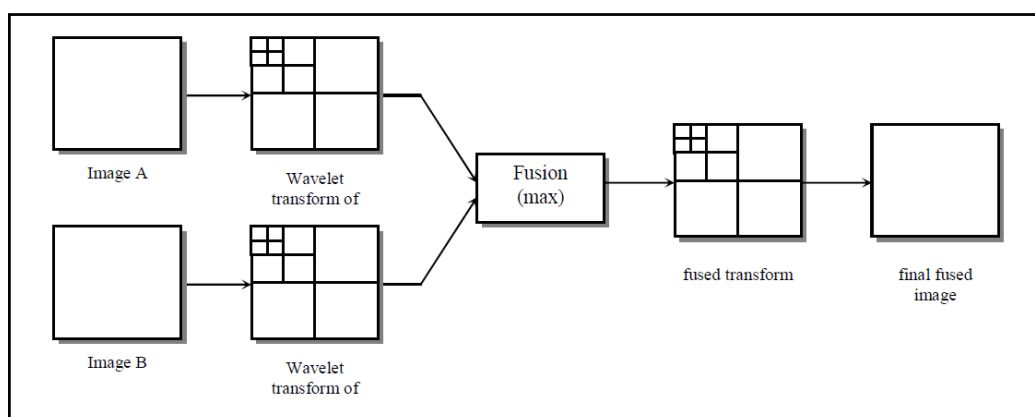
3 FÚZE DVOJICE OBRAZŮ POMOCÍ DWT

Fúze obrazů je proces, při kterém se kombinuje informace ze dvou nebo více různých obrazů, které byly pořízeny stejným nebo různým typem senzorů, za účelem dosažení přesného, komplexního a spolehlivého obrazového popisu dané scény a získání informací, které nejsou obsaženy v jednotlivých obrazech samostatně. Fúzovaný obraz je vhodnější pro vnímání lidským zrakem nebo pro počítačové zpracování, jako je segmentace, výtah informací a rozpoznávání objektů v obraze. V této práci budu dále obecně popisovat fúzi pouze dvou obrazů, i když jejich počet není nijak omezen.

Z aplikací, kde jsou vstupní obrazy pořízeny stejným typem senzorů, je častá fúze dvou obrazů, které jsou zaostřeny na různé objekty, a jejich fúzí se získá obraz, který bude zaostřen na oba tyto objekty. Další aplikací může být fúze časových řad obrazů, například při snímání perfuze ledvin na MRI nebo RTG.

Fúze obrazů, kde je jedna scéna pořízena různými senzory, se využívá třeba v případě, když je stejná scéna pořízena ve viditelném a v infračerveném spektru a oba výsledné obrazy se zfúzují. Jiným příkladem může být fúze obrazů pořízených na CT a MRI [16][2].

Prvním krokem před fúzí je z hlediska zpracování obrazů jejich registrace (lícování) a případné převzorkování na stejnou velikost [9]. Lícování zajistí, že informace, která se nachází v obou obrazech na stejných místech, odkazuje na stejnou fyzickou strukturu v prostředí (jinými slovy oba obrazy spolu korespondují). Použití lícování je nutné, jsou-li mezi oběma obrazy různé geometrické transformace, jako posunutí nebo otočení, které mohou vzniknout různým umístěním senzorů (různé úhly pohledu) nebo sejmutím obrazů v různém čase (pohyb scény). Obrazy, se kterými se pracuje v této práci, budeme považovat za registrované, více se je možné o tomto problému dozvědět například v [2].



Obr. 3.1: Schéma fúze dvojice obrazů pomocí DWT

Po slícování je u obou provedena dekompozice pomocí 2D DWT, což je znázorněno na obr. 3.1 [2]. Předpokládejme, že máme dva obrazy o stejném rozlišení. Při použití stejného typu vlnky na oba obrazy budou mít stejné rozlišení i jejich podobrazy ze stejného stupně dekompozice. Nyní se mohou obě DWT reprezentace obrazů zfúzovat, přičemž se fúzují vždy korespondující podobrazy ze stejného stupně dekompozice. I když v praxi mohou mít oba originální obrazy jiné rozlišení a mohou podstoupit jiný stupeň dekompozice, fúzovat se smí pouze podobrazy se stejným rozlišením [9]. K samotné fúzi se využijí pravidla, mezi něž je zahrnut výpočet úrovně aktivity, metody seskupení koeficientů a metody kombinace koeficientů (včetně ověření konzistence koeficientů). Posledním krokem k získání fúzovaného obrazu je provedení rekonstrukce pomocí 2D IDWT. Pravidla fúze jsou dále popsána tak, jak jsou uvedena v [9] a [15].

3.1 Pravidla fúze

3.1.1 Výpočet úrovně aktivity

Výpočet úrovně aktivity jinými slovy znamená měření úrovně informace. Úroveň aktivity je proporcionální k energii vysokých frekvencí, což koresponduje s předpokladem, že vysoké frekvence tvoří v obraze důležité detaily nesoucí informace důležité pro vizuální vnímání. Tyto detaily chceme do fúzovaného obrazu přenést, takže je snaha o zachování koeficientů s větší úrovní aktivity. To se využívá u metod kombinací koeficientů, které jsou uvedeny dále [14].

Existují celkem tři kategorie metod pro výpočet úrovně aktivity: CBA (Aktivita založená na koeficientu – Coefficient-Based Activity), WBA (Aktivita založená na okně – Window-Based Activity) a RBA (Aktivita založená na oblasti – Region-Based Activity). CBA bere v úvahu každý koeficient odděleně, úroveň aktivity je brána jako absolutní hodnota koeficientu nebo její druhá mocnina. WBA používá k výpočtu úrovně aktivity koeficientu okno, nejčastěji velikosti 3×3 nebo 5×5 . Výpočet v tomto okně bývá různý, možné jsou například váhované průměry nebo jiné statistické vlastnosti, jako směrodatná odchylka. Jiným způsobem je seřazení absolutních hodnot koeficientů v okně a jako úroveň aktivity centrálního koeficientu se poté označí vždy jedna v pořadí (například vždy pátá). Výběr způsobu výpočtu záleží na použití fúze [9]. Jako poslední je aktivita založená na oblasti RBA, kde oblasti fungují podobně jako okna, akorát mají různé tvary. Nejprve se, například pomocí detekce hran, označí v obraze oblasti, které korespondují s konkrétním objektem v obraze, nebo jeho částí. Tyto oblasti mají korespondující koeficienty v každém podobraze. Úroveň aktivity oblasti se vypočítá jako průměr z úrovní aktivit jednotlivých koeficientů získaných metodou CBA. Jakmile známe úroveň každého regionu,

jsou jednotlivým koeficientům přiřazeny úrovně podle následujícího klíče. Jestliže se koeficient nachází na okraji dané oblasti, tak jeho úroveň aktivity bude ta vypočtena metodou CBA nebo WBA. Jestliže se koeficient nachází uvnitř dané oblasti, tak jeho úroveň aktivity bude úroveň aktivity této oblasti.

3.1.2 Metody seskupení koeficientů

Každý koeficient v každém z podobrazů dekompozice má korespondující koeficienty v ostatních podobrazech této dekompozice (korespondující koeficienty jsou v podobrazech na stejných místech). Tyto korespondující koeficienty vždy souvisí se stejnou skupinou pixelů v originálních obrazech. Ve většině přístupů nejsou při fúzi tyto koeficienty propojeny mezi sebou. V těchto případech se neprovádí žádné seskupení koeficientů. Pokud korespondující koeficienty z podobrazů stejného stupně dekompozice musí fúzovat stejným způsobem (všechny musí být vzaty do fúzovaného obrazu se stejnou důležitostí), tak se jedná o jednostupňové seskupení, korespondující koeficienty z různých stupňů dekompozice nejsou nijak svázány. Poslední a nejvíce omezující je případ, pokud všechny korespondující koeficienty ze všech podobrazů dané dekompozice musí fúzovat stejným způsobem, potom se jedná o mnohastupňové seskupení.

3.1.3 Metody kombinace koeficientů

Existují dvě základní metody kombinace koeficientů, které jsou výběr maxima a váhovaný průměr. Při metodě výběru maxima se do fúzované dekompozice přiřadí ten koeficient z jednotlivých dekompozic obou obrazů, který má jednoduše větší aktivitu. Jak již bylo řečeno, hodnoty koeficientů (pixelů) v obrazech detailů kolísají kolem nuly. Větší absolutní hodnoty v těchto obrazech korespondují s ostrými změnami jasu a tím pádem s nejvýznamnějšími znaky, jako jsou okraje, linky a různé ostré přechody [7]. Tato metoda je také naznačena na obr. 3.1 [2] a může být vyjádřena podle následujícího vztahu [9]:

$$A_i(p) = \max(A_X(p), A_Y(p)), \quad (3.1)$$

$$D_Z(p) = D_i(p), \quad (3.2)$$

kde X a Y označují originální obrazy, Z značí fúzovaný obraz, A představuje úroveň aktivity a D hodnotu koeficientu. $p = (m, n, k, l)$ značí pozici daného koeficientu, přičemž k je stupeň dekompozice, l je jeden z podobrazů tohoto stupně a m, n představují umístění koeficientu v tomto podobraze. V závislosti na výsledku rovnice 3.1 bude $i = X$ nebo Y .

Při této metodě je vhodná tzn. kontrola konzistence (z anglického *consistency verification*). Základním způsobem je použití většinového filtru (*majority filter*). Fúzované koeficienty jsou procházeny oknem velikosti 3×3 nebo 5×5 a pokud daný koeficient pochází z obrazu X , ale většina sousedících koeficientů pochází z obrazu Y , tak je i tento koeficient nahrazen odpovídajícím koeficientem z obrazu Y a naopak. K tomuto je samozřejmě nutné vytvoření binární mapy, která zaznamená, z které obrazu který koeficient pochází.

Druhou velmi často používanou metodou pro kombinaci koeficientů je váhovaný průměr. Jeho vyjádření je následující [9][1]:

$$D_Z(p) = w_X(p)D_X(p) + w_Y(p)D_Y(p). \quad (3.3)$$

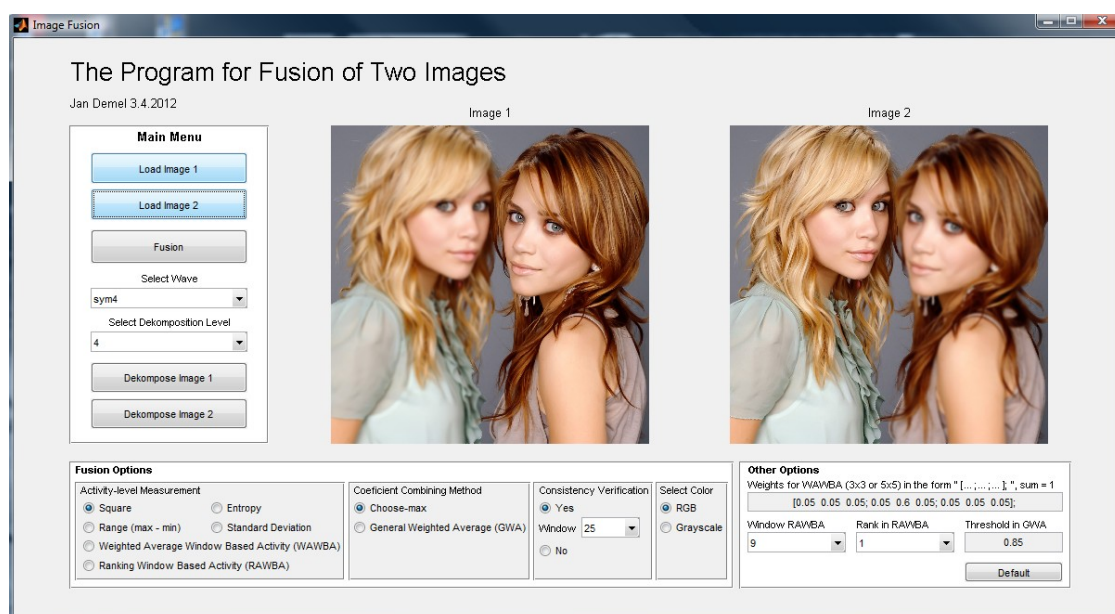
Jednotlivé proměnné mají stejný význam jako v rovnicích 3.1 a 3.2. Váhy w_X a w_Y mohou být závislé na aktivitě daných vstupních koeficientů a na podobnosti zdrojových obrazů na dané pozici. Pro váhy platí $w_X + w_Y = 1$.

Existují také další způsoby kombinace koeficientů (adaptivní váhovaný průměr, různé nelineární kombinace nebo využití seřazování), ale tyto dva se objevují v literatuře nejčastěji.

4 POPIS PROGRAMU

4.1 Popis programu a jeho GUI

Na obrázku 4.1 je vyobrazeno GUI (Grafické rozhraní – Graphic User Interface) programu, který má sloužit k vytváření multifokálních fúzovaných obrazů s užitím vlnkové transformace. Fúzi lze provést s různým nastavením parametrů, které si uživatel může volně volit a v případě nespokojenosti s výsledkem může provést fúzi znovu s jiným nastavením. Program lze aplikovat na jiné použití než vytvoření multifokálních fúzovaných obrazů, ale pro tyto případy nemusí obsahovat vhodné metody výpočtu aktivity a kombinace koeficientů.

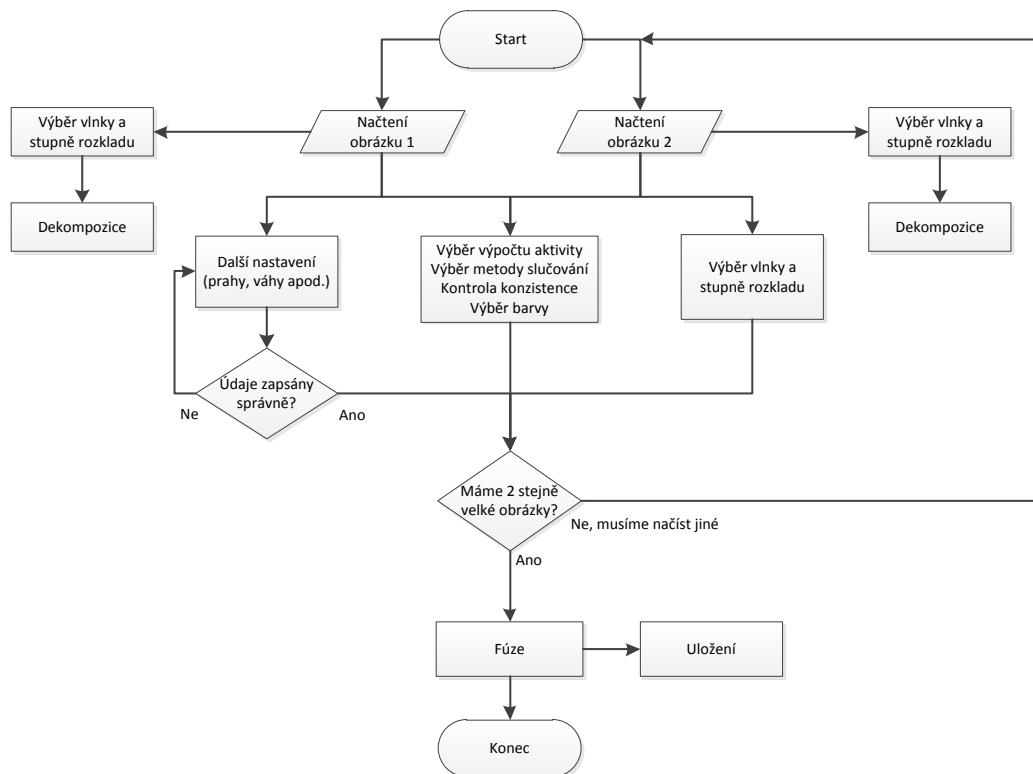


Obr. 4.1: GUI programu k fúzi dvou obrazů

Pro lepší pochopení je na obrázku 4.2 uvedeno jeho blokové schéma. Po spuštění je nejprve nutno načíst dvojici obrázků. Pokud uživatel požaduje zobrazit pouze dekompozici, stačí nahrát pouze jeden, vybrat požadovanou vlnku a stupeň rozkladu. V případě fúze je již samozřejmě nutné nahrát obrázky dva. Velikost nahrávaných obrázků není nijak omezena, ale po stisku tlačítka *Fusion* následuje kontrola, jestli mají oba stejnou velikost. V případě že nemají, objeví se chybové hlášení se sdělením nutnosti nahrát obrázky stejné velikosti. Shoda velikosti představuje první nutnou podmínku pro provedení fúze, další podmínky jsou, aby obrazy zobrazovaly stejnou scénu a byly slícované, jinak bude výsledek fúze postrádat smysl.

Tlačítka *Decomposition* zobrazují pouze vlnkovou dekompozici daného obrázku, pro samotnou fúzi je není nutno používat. Pro zobrazení dekompozice mohou mít

obrázky jakoukoliv, i odlišnou, velikost. Všechny podobrazy dekompozice jsou převedeny do stupňů šedi a transformovány tak, aby byla využita celá škála stupňů šedi, jak je vidět na obrázcích 2.3b a 2.4b.



Obr. 4.2: Blokové schéma programu k fúzi dvou obrázků

Poté, co uživatel nahrál dva obrázky, může si zvolit požadovanou vlnku a stupeň dekompozice, ve kterém má být fúze provedena, požadovanou metodu výpočtu aktivity (*Activity-level Measurement*), metodu kombinace koeficientů (*Coefficient Combining Method*), kontrolu konzistence (*Consistency Verification*) a zda bude fúze provedena barevně, nebo černobíle (*Select Color*). Program obsahuje po spuštění základní nastavení parametrů fúze, které může být uživatelem modifikováno za účelem dosažení co nejlepších výsledků v závislosti na charakteru obrazových dat. Na základě vybrané metody výpočtu aktivity a kombinace koeficientů může uživatel provést další rozšiřující nastavení (panel *Other Options*), které ale souvisí pouze s některými metodami. Před vlastní fúzí je ještě nutná kontrola správnosti zapsaných údajů, protože uživatel může zapsat do políčka teoreticky cokoliv, což by samozřejmě vyústilo v chybu (vzhledem k použití funkce *eval* je ale možné použít příkazy MATLABu, jako jsou třeba *rand* nebo *ones*, pokud jejich výstup bude mít správné hodnoty v požadovaném rozsahu). V případě, že bude tato kontrola

neúspěšná, nastaví se právě změněná proměnná na hodnotu předchozí. Tlačítko *Default* vrátí hodnoty v panelu *Other Options* a *Consistency Verification* na původní základní hodnoty.

Po korektním nastavení všech parametrů je fúze provedena stiskem tlačítka *Fusion*. Objeví se okno s fúzovaným rekonstruovaným obrázkem, které navíc obsahuje volbu pro případné uložení výsledného obrazu. Při fúzi může ještě nastat problém s nedostatkem paměti, zejména, jedná-li se o obrázky s vysokým rozlišením nebo se pracuje na počítači s malou operační pamětí. V případě velkých obrázků je také nutné počítat s delším výpočetním časem. Výsledné obrázky fúze nebo dekompozice jsou zobrazeny v reálné velikosti. V případě, že by se nevešly na obrazovku, tak jsou zobrazeny ve zmenšené velikosti.

4.2 Použité metody

4.2.1 Výpočet úrovně aktivity

Do programu je zakomponováno celkem šest metod výpočtu úrovně aktivity. Jsou to:

Umocnění (*Square*) – Toto je základní metoda, i když podává relativně dobré výsledky. Při této metodě je každá hodnota koeficientu ve vlnkové dekompozici umocněna na druhou a získané hodnoty jsou považovány za úroveň aktivity [9]:

$$A_I(p) = (D_I(p))^2, \quad (4.1)$$

kde I značí jeden ze dvou originálních obrazů (X a Y), A představuje úroveň aktivity, D hodnoty koeficientů a p označuje pozici daného koeficientu, stejně jako v rovnicích 3.1 a 3.2.

Entropie (*Entropy*) – Entropie je chápána jako statistická míra neurčitosti a vyjadřuje množství informace v obraze. Použití entropie vychází úvahy, že s ostrými hranami v obraze se zvyšuje neurčitost a s tím roste entropie. Pro potřeby fúze ale nemá význam počítat entropii šedotónového obrazu jako celku, protože je potřeba získat hodnotu aktivity pro každý koeficient dekompozice. Z toho důvodu je za hodnotu aktivity dosazena entropie, která je počítána z okolí každého bodu dekompozice velikosti 9×9 . K tomuto účelu slouží příkaz *entropyfilt* v MATLABu. Entropie je v něm definována jako [3]:

$$E = - \sum_i (p_i \log_2(p_i)), \quad (4.2)$$

kde p představuje normalizované hodnoty histogramu daného okna (jinými slovy je to pravděpodobnost výskytu daného stupně šedi), i je index stupně

šedi. V případě barevného obrazu je každá ze tří barevných komponent brána jako jeden šedotónový obraz a pro každý je entropie počítána zvlášť.

Rozsah (*Range*) – Při této metodě jsou podobrazy dekompozice procházeny oknem o velikosti 3×3 a za centrální koeficient je dosazena úroveň aktivity jako rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou v tomto okně.

Směrodatná odchylka (*Standard Deviation*) – Podobně jako v předchozím případě, i zde jsou podobrazy dekompozice procházeny oknem o velikost 3×3 , tentokrát je ale vypočtena směrodatná odchylka a ta dosazena za úroveň aktivity.

Vážený průměr v okně (*Weighted Average Window Based Activity* – WAWBA)

– V této metodě jsou podobrazy koeficientů umocněny na druhou a procházeny maskou s vahami, jejichž součet musí být 1. Jedná se vlastně o 2D konvoluci masky s umocněnými koeficienty dekompozice. Výsledek této konvoluce je požadovaná úroveň aktivity. To můžeme zapsat jako:

$$A_I(p) = \sum_{s \in S, t \in T} w(s, t) (D_I(m + s, n + t, k, l))^2, \quad (4.3)$$

kde A , D a I jsou popsány stejně jako v 4.1, $p = (m, n, k, l)$ značí pozici daného koeficientu, přičemž k je stupeň dekompozice, l je jeden z podobrazů tohoto stupně a m , n představují umístění koeficientu v tomto podobraze, $w(s, t)$ značí konvoluční masku, S a T jsou množiny horizontálních a vertikálních indexů popisujících aktuální okno, s a t jsou konkrétní souřadnice v masce. Tento vzorec byl převzat z [9] a modifikován tak, aby byl konzistentní s tímto textem. Velikost masky může být teoreticky libovolná, ale v praxi bývají většinou využívány velikosti 3×3 nebo 5×5 a v programu si může uživatel masku libovolně volit. V případě, že by její velikost byla 1×1 a hodnota tedy 1, tak by se jednalo o metodu *Umocnění*. Defaultní konvoluční maska má podobu:

$$w_{S,T} = \begin{bmatrix} 0,05 & 0,05 & 0,05 \\ 0,05 & 0,60 & 0,05 \\ 0,05 & 0,05 & 0,05 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Výpočet pořadí v okně (*Rank Filter Window Based Activity* – RFWBA) – Tato

metoda, jak již název napovídá, využívá také procházení oknem (jako u všech metod se započítává centrální prvek a jeho okolí). Prvky v okně se vždy umocní a následně seřadí, a jako úroveň aktivity se vezme nejvyšší hodnota (ta se již neomocňuje). Není nutné vždy brát pouze nejvyšší hodnotu, v některých případech je vhodné zvolit druhý nebo třetí prvek v pořadí pro potlačení impulsního šumu. Pořadí prvku, který bude brán jako úroveň aktivity, si v programu uživatel volí, stejně jako velikost okna (v nabídce jsou přítomny dvě možnosti – 3×3 a 5×5).

4.2.2 Kombinace koeficientů

Kromě těchto metod výpočtu úrovně aktivity program obsahuje také dvě základní metody kombinace koeficientů:

Výběr maxima (*Choose-max*) – Jedná se o nejjednodušší metodu. Metoda již byla popsána v předcházející kapitole v části 3.1.3 včetně kontroly konzistence. Ta je v programu součástí této metody a uživatel si může zvolit, jestli se bude provádět, a pokud ano, tak v jak velkém okně.

Vážený průměr (*General Weighted Average* – GWA) – Tato metoda byla naznačena také v předcházející kapitole v části 3.1.3. Zde nastává problém určení vah, na jejichž základě se přiřadí koeficienty do fúzovaného obrazu. Jeden z možných postupů je naznačen v [15], kde je převzat z [1]. Tento způsob je založen na výpočtu normované korelace obou vstupních obrazů v každém místě p . K tomu se využije předem zjištěná úroveň aktivity:

$$M_{XY}(p) = \frac{\sum_{s \in S, t \in T} w(s, t) D_X(m + s, n + t, k, l) D_Y(m + s, n + t, k, l)}{A_X(p) + A_Y(p)}. \quad (4.5)$$

Jednotlivé proměnné mají stejný význam jako v rovnici 4.3 (A značí již vypočtenou úroveň aktivity). X a Y představují jeden ze dvou obrazů vstupujících do fúze. V případě, že se pro výpočet úrovně aktivity použila metoda WAWBA, je zde použita maska vah $w(s, t)$ shodná s maskou v rovnici 4.3. Díky tomu je zajištěno, že hodnota korelace M_{XY} se bude pohybovat v rozmezí $\langle -1; 1 \rangle$. Při použití metod *Umocnění* a RFWBA má maska rozměr 1×1 a hodnotu 1, protože v těchto metodách se nevyužívá žádných masek, které by počítaly hodnotu úrovně aktivity váhovaním a už z jejich principu a uvedeného vzorce pro korelaci plyne, že hodnota M_{XY} bude také v rozmezí $\langle -1; 1 \rangle$. U zbylých metod výpočtu aktivity by ale hodnota korelace nebyla v tomto rozmezí, což by znemožnilo následné prahování, a tak nemohou být tyto metody použity v kombinaci s GWA. Omezení použití metody GWA pouze s metodami *Umocnění*, WAWBA a RFWBA je zabudováno také do programu.

Dále se vždy porovnají hodnoty úrovně aktivity v daném místě. Předpokládejme nyní, že $A_X(p) > A_Y(p)$. Následně se vypočtené hodnoty korelace M_{XY} porovnají s prahem, který si uživatel v programu může určit. Je-li $M_{XY}(p) < \text{prah}$, tak mají výsledné váhy pro vztah 3.3 hodnoty $w_X = 1$ a $w_Y = 0$. V případě, že $M_{XY}(p) \geq \text{prah}$, tak jsou hodnoty vah určeny z následujících vztahů:

$$w_Y = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{1 - M_{XY}}{1 - \text{prah}} \right), \quad (4.6)$$

$$w_X = 1 - w_Y. \quad (4.7)$$

V případě $A_X(p) < A_Y(p)$ se váhy počítají úplně stejným způsobem, pouze se prohodí w_X a w_Y . Pro každý výstupní koeficient $D_Z(p)$ se samozřejmě musí vždy vypočítat váhy nové.

4.3 Ukázky kódu

4.3.1 Rozklad do buněk

K samotné vlnkové transformaci obrazů je použita funkce *wavedec2*, která provádí 2D DWT dekompozici. Jejím výstupem jsou vektor C a matice S , kde ve vektoru C jsou uloženy koeficienty dekompozice v jednom řádku za sebou. Na začátku jsou koeficienty aproximace, poté následují koeficienty detailů z posledního stupně dekompozice, a to v pořadí horizontální, vertikální a nakonec diagonální. Za nimi jsou koeficienty detailů z nižšího stupně dekompozice ve stejném pořadí, a tak dále až po první stupeň dekompozice. Koeficienty všech podobrazů jsou do vektoru C rozloženy po sloupcích. Matice S obsahuje velikosti jednotlivých podobrazů, v prvním sloupci jsou jejich výšky a ve druhém šířky. Na prvním řádku je zapsána velikost obrazu aproximace, na dalších potom velikosti obrazů detailů, kde jeden řádek představuje jeden stupeň dekompozice, a na posledním řádku je velikost původního obrazu.

Pro fúzi je možné za určitých okolností (podle zvolené metody výpočtu aktivity a slučování) ponechat vektor C beze změny a pracovat přímo s ním, ale pro vykreslení dekomponovaných obrazů je nutné části vektoru odpovídající jednotlivým obrazům přeskládat na matice. Za tímto účelem byla naprogramována funkce *rozloz.m*. Níže je zobrazen algoritmus, kterým jsou koeficienty poskládány z jednoho řádku do obrazových matic:

```

1 N = size(S,1)-2;
2 bunka = cell(1,3*N+1); % vytvoreni cell pro transformovany obraz
3 % rozdeleni vektoru C do jednotlivych obrazu
4 index = 1;
5 bunka{1} = reshape(C((index):(S(1,1)*S(1,2))),S(1,1),S(1,2)); %
    prvni obraz, mimo cyklus
6 index = S(1,1)*S(1,2);
7 for i=2:(N+1) % N+1 = length(S)-1;
8     for j = 2:4
9         index2 = index + S(i,2)*S(i,1);
10        bunka{(i-2)*3+j} = reshape(C((index+1):(index2)),S(i,1),S(i,2))
11        ;
12        index = index2;
13    end
14 end

```

Přeskládané obrazy jsou ukládány do proměnné *bunka*, která se skládá z buněk a do každé buňky je uložena matice jednoho podobrazu. Proměnná N značí počet

stupňů dekompozice, proměnné *index* a *index2* jsou pomocné a značí první a poslední pozici koeficientů jednoho konkrétního podobrazu ve vektoru *C*. Koeficienty aproximace jsou ukládány mimo cyklus, protože jsou ve vektoru pouze jednou, koeficienty detailů už jsou ukládány v cyklu, kde *i* značí stupeň dekompozice a *j* jeden ze tří obrazů detailů. Samotný převod z vektoru na matici probíhá pomocí funkce *reshape*, do které vstupují jako proměnné vektor, který se má přeskládat na novou matici, a rozměry nové matice. Za vektor je dosazena vždy část vektoru *C*, omezená pomocí proměnných *index* a *index2*, jejichž hodnoty jsou určeny pomocí matice *S*. Za rozměry jsou ve funkci *reshape* dosazeny rozměry podobrazu, který se zrovna zpracovává. Díky tomu, že *reshape* přepisuje matici po sloupcích, a koeficienty jsou ve vektoru *C* poskládány také po sloupcích, tak výsledná matice bude přímo požadovaný podobraz. Výsledkem jsou matice jednotlivých podobrazů uložené v buňkovém poli *bunka*.

Jelikož je tento algoritmus používán v průběhu celého programu několikrát (záleží na zvolených metodách), je realizován v samostatné funkci *rozloz.m*, jejímiž vstupy jsou vektor *C* a matice *S* a výstupem je buňkové pole obsahující matice jednotlivých podobrazů. Podokončení fúze je potřeba obraz rekonstruovat, k čemuž se využívá funkce *waverec2*, do které vstupuje vektor *C* (vzniklý fúzí obou obrazů), matice *S* (ta se nijak nemění, oba obrazy ji mají v případě stejné velikosti stejnou), získanou na začátku funkcí *wavedec2*, a typ vlnky *wname*. Při použití některých výše popsaných metod nevznikne díky použití funkce *rozloz.m* vektor *C*, ale buňkové pole zfúzovaných podobrazů, bylo tedy nutné naprogramovat funkci *sloz.m*, která dělá přesný opak, tedy složí buňkové pole jednotlivých podobrazů na jeden vektor, tak aby mohla být provedena rekonstrukce.

4.3.2 Výpočet metod a rekonstrukce

Pro každou metodu je uveden náznak jejího výpočtu v programovém prostředí MATLAB a některé kratší metody jsou uvedeny celé. Využívané proměnné mají následující význam: *C1* a *C2* jsou vektory dekompozice obou vstupních obrazů získané funkcí *wavedec2*, *dekom1* a *dekom2* jsou tyto vektory přeskládány do buněk funkcí *rozloz.m*, *dekom* je fúzovaná dekompozice, *a1* a *a2* jsou hodnoty úrovně aktivity, v závislosti na výpočtu buď ve formě buněk nebo vektorů. *N* je stupeň dekompozice, často se zde také vyskytuje výraz $3 * N + 1$, který značí počet vzniklých podobrazů dekompozice.

Umocnění – Základní metoda, její naprogramování je také velice jednoduché.

```
1 a1 = C1.^2;
2 a2 = C2.^2;
```

Tímto získáme hodnoty úrovně aktivity jako vektory.

Entropie, Rozsah, Směrodatná odchylka – Všechny tyto tři metody se počítají stejným způsobem, liší se pouze v použitém příkazu v cyklu.

```

1 dekom1 = rozloz(C1,S); % serazeni do bunek
2 dekom2 = rozloz(C2,S);
3 a1 = cell(1,3*N+1); % vytvoreni bunek
4 a2 = cell(1,3*N+1);
5 for i = 1:(3*N+1)
6     a1{i} = entropyfilt(dekom1{i});
7     a2{i} = entropyfilt(dekom2{i});
8 end

```

V případě entropie je tento příkaz *entropyfilt* a pro další dva způsoby jsou použity funkce *rangefilt* (rozsah) a *stdfilt* (směrodatná odchylka). Ještě před cyklem jsou vektory *C1* a *C2* rozloženy do buněk a také jsou připravena buňková pole, kam se budou vkládat úrovně aktivity.

WAWBA – Při této metodě je využito 2D konvoluce umocněných podobrazů dekompozice s maskou vah příkazem *conv2*.

```

1 dekom1 = rozloz(C1,S); % serazeni do bunek
2 dekom2 = rozloz(C2,S);
3 a1 = cell(1,3*N+1); % vytvoreni bunek
4 a2 = cell(1,3*N+1);
5 w = eval(data.w); % nacteni vah
6 for i = 1:(3*N+1)
7     a1{i} = conv2((dekom1{i}.^2),w,'same'); % konvoluce s
        vahami
8     % to same pro druhy obraz
9     a2{i} = conv2((dekom2{i}.^2),w,'same');
10 end

```

Začátek algoritmu je naprosto stejný jako u předchozích metod, poté se načte maska vah zadaná uživatelem. Parametr *'same'* ve funkci *conv2* znamená, že výstup konvoluce bude mít stejnou velikost jako *dekom1* (*dekom2*). Znamená to, že funkce automaticky doplní vstupní obraz nulami na místech, kde maska při výpočtu přesahuje okraj obrazu.

RFWBA – V případě volby této metody uživatel zadává dvě proměnné, velikost okna a pořadí prvku v seřazené posloupnosti, který bude následně vybrán. Proměnná *ps* značí „půl strany“ zvoleného okna, zaokrouhleno k zápornému nekonečnu. Tato proměnná je nutná pro ošetření krajních bodů podobrazů, na kterých by zvolené okno přesahovalo mimo rozsah obrazu. Místo toho se na jejich místě úroveň aktivity získá umocněním, proto okraje matic aktivity o velikosti *ps* budou mít stejnou hodnotu, jako by byly spočteny metodou *umocnění*. První čtyři příkazy jsou znovu stejné jako u předchozí metody.

```

1 dekom1 = rozloz(C1,S); % serazeni do bunek
2 dekom2 = rozloz(C2,S);
3 a1 = cell(1,3*N+1); % vytvoreni bunek
4 a2 = cell(1,3*N+1);

```

```

5 ranking = data.ranking; % kolikaty prvek v poradí se vybere (v
   okne)
6 velikostokna = data.rfwba_okno; % pocet prvku (9 nebo 25)
7 ps = floor(sqrt(velikostokna)/2); % pulstrany
8
9 for i = 1:(3*N+1)
10     for j = (ps+1):(size(dekom1{i},1)-ps) % radky
11         for k = (ps+1):(size(dekom1{i},2)-ps) % sloupce
12             okno = sort(reshape... % zmena matice na vektor
13                 (dekom1{i}(j-ps:j+ps,k-ps:k+ps).^2,1,velikostokna)...
14                 ,2,'descend'); % serazeni radku sestupne
15
16             a1{i}(j-ps,k-ps) = okno(ranking); % vložení aktivity jako
               poradí
17             % to same pro druhy obraz
18             okno = sort(reshape...
19                 (dekom2{i}(j-ps:j+ps,k-ps:k+ps).^2,1,velikostokna)...
20                 ,2,'descend');
21             a2{i}(j-ps,k-ps) = okno(ranking);
22         end
23     end
24 % vložení krajní aktivity jako umocnened hodnoty
25 ...
26 end

```

Hodnoty pokryté oknem jsou umocněny a přeformátovány na vektor funkcí *reshape*, aby bylo možné snadno využít funkci *sort*. Parametr *'descend'* u této funkce zajišťuje, že prvky budou seřazeny sestupně. Jako úroveň aktivity na daném místě je vložen určitý prvek v pořadí, podle velikosti zvolené proměnné *ranking*.

Toto byly metody výpočtu úrovní aktivity, nyní následují metody kombinace koeficientů:

Výběr maxima – Naprogramování této základní metody je velice jednoduché. Na začátku je přítomna kontrola, v jakém tvaru vstupují úrovně aktivity, zda jako vektory, nebo jako buňková pole. V druhém případě dojde k jejich přerovnání na dva vektory.

```

1 if iscell(a1) % v jakem tvaru je aktivita z predchoziho switch
2     a1 = sloz(a1,S); % serazeni do vektoru
3     a2 = sloz(a2,S);
4 end
5 % pripadna kontrola konzistence
6 ...
7 B = a1 > a2; % porovnani
8 dekom = zeros(1,length(B));
9 dekom(B) = C1(B); % prirazeni prvku podle binarni mapy
10 dekom(~B) = C2(~B);

```

Následuje porovnání hodnot úrovní aktivity a vznikne binární mapa přiřazování koeficientů, na jejímž základě jsou potom přiřazeny do proměnné *dekom* jednotlivé koeficienty z *C1* nebo z *C2*. Binární mapa může ještě projít kontro-

lou konzistence, jejíž kód je popsán v části 4.3.3 (zde tři tečky).

GWA – Tato metoda je ze všech nejrozsáhlejší a obsahuje velké množství podmínek, proto je zde uveden pouze algoritmus popsáný v části 4.2.2. Vynechaná část obsahuje definování vah w (které jsou stejné jako u WAWBA nebo 1 v případě použití RFWBA a *umocnění*), načtení proměnné *prah* a úpravu proměnných a_1 , a_2 , *dekom1* a *dekom2* na buňkové pole pomocí funkce *rozloz.m*.

```

1  for i = 1:(3*N+1) % ktery podobraz
2      % vypocet korelace, hodnoty <-1;1>
3      M = (2.*conv2(dekom1{i}.*dekom2{i},w,'same'))./(a1{i} + a2{i}
        });
4      M(isnan(M)) = 1; % kvuli deleni nulou
5      for j = 1:size(dekom1{i},1) % radky
6          for k = 1:size(dekom1{i},2) % sloupce
7              if a1{i}(j,k) < a2{i}(j,k)
8                  % pokud jsou aktivity shodne, tak je M = 1 a vahy
9                  % jsou 0.5 (aritmeticky prumer)
10                 if M(j,k) < prah
11                     % pokud je korelace nizsi nez prah
12                     w1 = 0;
13                     w2 = 1;
14                 else
15                     w1 = 0.5-0.5*((1-M(j,k))/(1-prah));
16                     w2 = 1 - w1;
17                 end
18             else
19                 % to stejne pro druhy pripad
20                 if M(j,k) < prah
21                     w1 = 1;
22                     w2 = 0;
23                 else
24                     w2 = 0.5-0.5*((1-M(j,k))/(1-prah));
25                     w1 = 1 - w2;
26                 end
27             end
28             dekom{i}(j,k) = w1*dekom1{i}(j,k) + w2*dekom2{i}(j,k);
29         end
30     end
31 end
32 dekom = sloz(dekom,S); % slozeni do jednoho vektoru

```

Postup je naprosto stejný jako ve zmíněné podkapitole. Korelace M je počítána vždy najednou pro jednu dvojici podobrazů označenou indexem i . Indexy j a k označují řádky, respektive sloupce v těchto podobrazech. Následuje porovnání hodnoty úrovně aktivity a již výše popsáný algoritmus výpočtu vah w_1 a w_2 . Dále pak přiřazení hodnoty fúzované dekompozice na daném místě do proměnné *dekom* z proměnných *dekom1* a *dekom2* na základě velikosti těchto vah. Z proměnné *dekom* se na závěr vytvoří vektor pomocí funkce *sloz.m* pro potřeby rekonstrukce.

V případě šedotónových obrazů algoritmus fúze proběhne pouze jednou. Provádí-li se fúze barevných obrazů, algoritmus proběhne celkem třikrát, pro každou barvu zvlášť. Obdobná situace nastává i u rekonstrukce obrazů.

```
1 % rekonstrukce obrazu
2 rekonstrukce(:, :, colour) = waverec2(dekom, S, wname);
```

Vstupy funkce *waverec2* již byly popsány v části 4.3.1. Jedná-li se o fúzi šedotónového obrazu, má proměnná *colour* hodnotu pouze 1, jedná-li se o fúzi barevného obrazu, nabývá proměnná *colour* postupně hodnoty 1 až 3, a tak v jednom okamžiku dojde k rekonstrukce pouze jedné barevné komponenty, takže se rekonstrukce provede celkem třikrát.

4.3.3 Kontrola konzistence

Použitá kontrola konzistence, neboli ověření souladu, byla popsána v části 3.1.3. V programu jsou k dispozici okna o velikosti 3×3 a 5×5 . Práh (proměnná *prah*) většinového filtru je nastaven napevno na 70 %. Okno je vybíráno z binární mapy *B*, která vznikla porovnáním úrovní aktivity obou obrazů. Nové hodnoty jsou ukládány do binární mapy *newB*.

Prvky v okně jsou vždy sečteny a součet je porovnáván s prahem. Na základě výsledku je buď změněna hodnota centrálního prvku, nebo je ponechána, tomuto se říká většinový filtr. Porovnávání s prahem je přítomno dvakrát, nejprve pro případ, kdy je okno tvořeno převážně hodnotami *true*, a poté pro případ, že je tvořeno zejména hodnotami *false*. Ve druhém případě je součet porovnáván s hodnotou, která je rovna rozdílu *velikostokna* – *prah*.

```
1 B = rozloz(B,S); % binarni mapa
2 newB = B; % druha mapa, kontrola konzistence
3 velikostokna = data.con_okno; % pocet prvku (9 nebo 25)
4 prah = velikostokna*0.7; % prah pro kontrolu, 70%
5 ps = floor(sqrt(velikostokna)/2); % pulstrany
6
7 % kontrola konzistence
8 for i = 1:(3*N+1)
9     for j = (ps+1):(size(B{i},1)-ps) % radky
10        for k = (ps+1):(size(B{i},2)-ps) % sloupce
11            % okno
12            okno = B{i}(j-ps:j+ps,k-ps:k+ps);
13            soucet = sum(sum(okno,2),1); % soucet v okne
14            if soucet >= prah
15                % prepsani, jestli stred je odlišný od
16                % zbytku okna
17                if okno(ps+1,ps+1) == false
18                    % nahrazení 0 za 1, kterých je více
19                    newB{i}(j,k) = true;
20                end
21                % pro false se detekuje většina nul
22                elseif soucet <= (velikostokna - prah)
```

```

23         if okno(ps+1,ps+1) == true
24             newB{i}(j,k) = false;
25         end
26     end
27 end
28 end
29 end
30
31 B = newB;
32 clear newB
33 B = sloz(B,S); % binarni mapu slozim do vektoru

```

Na konci je původní binární mapa nahrazena novou a následně je složena do vektoru. Nyní již nepotřebná mapa *newB* je vymazána kvůli úspoře místa v operační paměti.

5 HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

5.1 Metodika testování

Jelikož má každá dvojice obrázků jiný charakter a pro dosažení dobrých výsledků bude potřeba různého nastavení typů metod, vlnek a parametrů. Přesto je obsahem této kapitoly snaha o porovnání jednotlivých metod a zhodnocení výsledků získaných pomocí algoritmů popsanych v předcházející kapitole. Z toho důvodu bylo důležité získat soubor obrazů, na kterém probíhalo statistické testování a který pokrýval co největší množství různých situací. Proto byla databáze vytvářena jak umělým rozostřením, tak focením různých objektů s různou hloubkou ostrosti, v interiéru i exteriéru.

Získání databáze dvojic obrazů by se tedy dalo rozdělit na dva základní způsoby způsoby. Prvním bylo získání testovací dvojice umělým rozostřením nepřekrývajících se částí originálního obrazu. Obrazy byly vybrány tak, aby obsahovaly dva dominantní objekty (dvě postavy, dva automobily) a vždy byl rozostřen první objekt, čímž se získal první obraz z dvojice, následně byl v originálním obrazu rozostřen druhý objekt a byl tak získán druhý obraz. Pro rozostřování byl použit program *Adobe Photoshop* a jeho vestavěné *blur* filtry, kterých bylo pro různorodost použito několik („*Blur More*“, *Gaussian Blur*, *Lens Blur*, *Motion Blur*). Tímto způsobem bylo vytvořeno celkem deset dvojic. Ke každé dvojici navíc patřil jeden originální obraz, se kterým mohl být fúzovaný obraz srovnáván. Dokonalou fúzí by byly vybrány z každého obrazu pouze části, které nebyly rozostřeny, a fúzovaný obraz by byl identický s originálem.

Druhým způsobem bylo vytvoření dvojic obrazů focením s různým zaostřením, aby nebylo obrazy nutné slícovat, byl použit stativ. Focená scéna byla naaranžována tak, že byly na stůl umístěny dva objekty, jeden blíže a druhý dále od objektivu, a byly pořízeny dvě fotografie, přičemž každá byla zaostřena na jiný z dvojice objektů. Jako objekt focení byla také například stránka textu, která byla vyfocena pod určitým úhlem a jednou bylo zaostřeno na její spodní část a poté horní část. Kromě této uměle vytvořené scény byly foceny také přirozené objekty, jako jsou například auta na parkovišti se stromy v pozadí, nebo značka a za ní stojící dům. Nevýhoda získávání dvojic obrazů tímto způsobem spočívala v neexistenci „originálního“ obrazu, neboli standardu, se kterým by mohl být fúzovaný obraz srovnáván. Z tohoto důvodu byly při testování srovnávány vždy dva výřezy z fúzovaného obrazu s jedním výřezem z každého obrazu dané dvojice. Oblasti výřezů v původních fotografiích byly voleny tak, aby obsahovaly zaostřenou část, která by měla být přítomna ve fúzovaném obraze. Výřezy ve fúzovaném obraze byly následně provedeny na stejných

místech.

Výsledkem byla databáze celkově 20 dvojic obrazů použitých pro testování. Jako kritérium pro určení kvality fúzovaného obrazu byla zvolena odmocnina ze střední kvadratické chyby (Root-mean-square Error – RMSE) mezi originálním obrazem (nebo výřezem z jedné dvojice) a fúzovaným obrazem (nebo výřezem z něj) [9]:

$$e_{rms} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [I_o(x, y) - I_f(x, y)]^2}, \quad (5.1)$$

kde I_o je originální obraz, I_f je fúzovaný obraz, M a N jsou rozměry obrazu (nebo daného výřezu), x a y jsou indexy řádku, respektive sloupce. Jelikož se pracuje s barevnými obrazy, bylo RMSE počítáno pro každou barevnou složku zvlášť a výsledná hodnota RMSE je dána jejich aritmetickým průměrem. I když bylo k dispozici pouze 20 dvojic fotografií (tzn. 20 fúzovaných obrazů), díky srovnávání výřezů bylo při každém nastavení algoritmu získáno 27 hodnot e_{rms} .

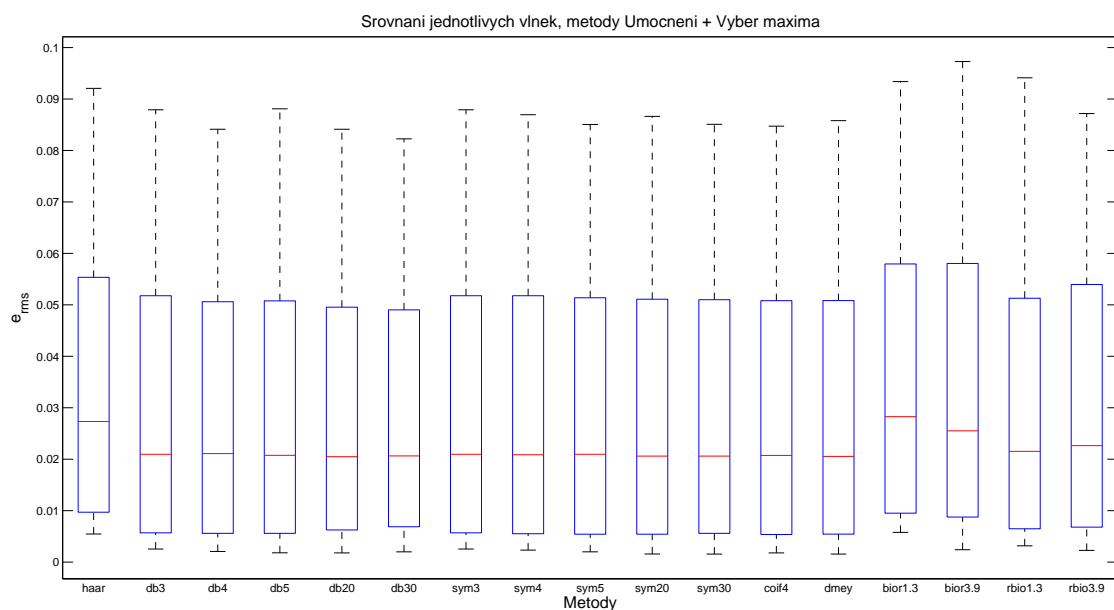
5.2 Výsledky testování

5.2.1 Srovnání vlnek

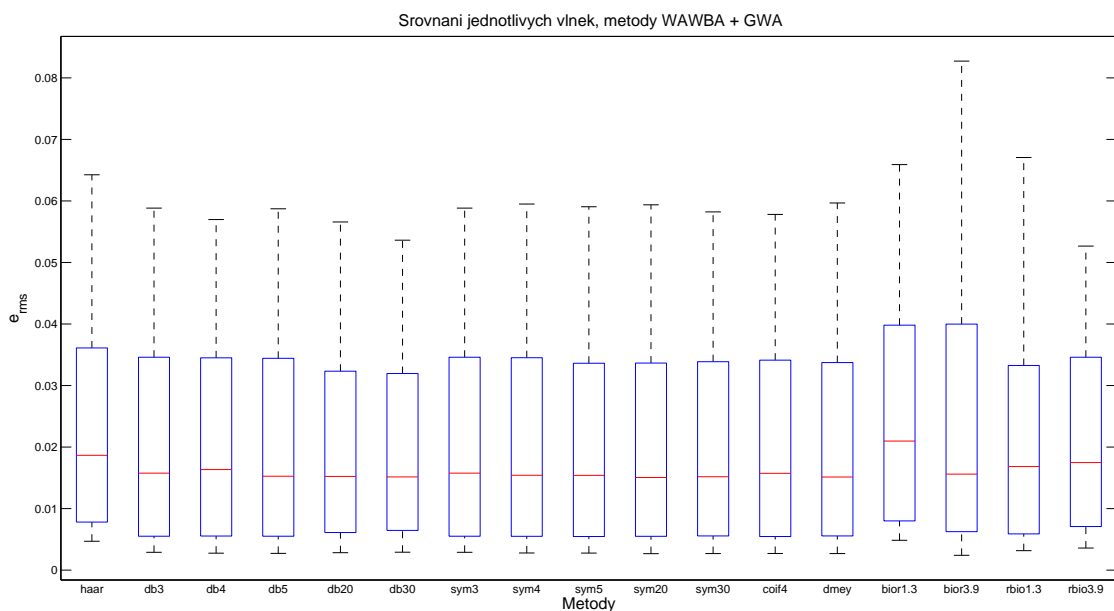
Samotné testování probíhalo ve dvou fázích. První fází jsou srovnávány jednotlivé vlnky, přičemž vlnka, která v první fázi podávala nejpříjemnější výsledky, byla následně použita ve druhé fázi, kde byly srovnávány jednotlivé metody. Při použití pouze jedné metody fúze by srovnání mohlo být ovlivněno vlastnostmi této metody, proto bylo prováděno dvakrát, pokaždé s jiným nastavením. Při prvním běhu bylo nastavení výpočtu úrovně aktivity *Umocnění* a pro kombinaci koeficientů byl použit *Výběr maxima*, kontrola konzistence byla provedena s oknem velikosti 25. Výsledné hodnoty RMSE pro různé použité vlnky jsou vyobrazeny na obrázku 5.1 ve formě krabicových grafů. V druhém případě byla úroveň aktivity vypočtena metodou WAWBA s vahami uvedenými ve vzorci 4.4 a kombinace koeficientů pomocí metody GWA s prahem 0,85. Výsledek je zobrazen na obrázku 5.2 ve formě krabicových grafů. Na všech obrázcích představuje červená čára *medián*, okraje krabic jsou horní a dolní *kvartil* a koncové úsečky jsou maximální a minimální hodnoty (v případě, že statistický soubor neobsahuje odlehlé hodnoty). V některých grafech se ještě objevují červené křížky, které značí odlehlé hodnoty.

Jak již bylo řečeno v podkapitole 5.1, každá položka obsahuje 27 hodnot odmocniny ze střední kvadratické chyby. Z důvodu výpočetní a časové náročnosti nebyly srovnávány všechny vlnky, které jsou k dispozici v programu MATLAB, ale do srovnávání byly zahrnuty pouze tyto vlnky (názvy jsou uvedeny formou zkratk, které jsou převzaty z programového prostředí MATLAB): *haar*, *db3*, *db4*, *db5*, *db20*, *db30*,

$sym3$, $sym4$, $sym5$, $sym20$, $sym30$, $coif4$, $dmey$, $bior1.3$, $bior3.9$, $rbio1.3$, $rbio3.9$.
U všech byl použit stupeň rozkladu 3.



Obr. 5.1: Srovnání RMSE jednotlivých vlnek s použitím metod *Umocnění + Výběr maxima*



Obr. 5.2: Srovnání RMSE jednotlivých vlnek s použitím metod WAWBA + GWA

Jak lze vidět na obrázku 5.1, naprostá většina vlnek dává velmi podobné výsledky. Nejhůře dopadly vlnky *haar*, *bior1.3* a *bior3.9* a naopak dobře si vedly

například vlnky *db4*, *20*, *db30* a *sym5*. Mediány všech vlnek kolísají kolem hodnoty $e_{rms} = 0,021$, výraznější odlišnosti jsou spíše v kvartilech a maximálních a minimálních hodnotách.

Na obrázku 5.2 je graf srovnání vlnek při použití jiných metod výpočtu. Zde opět dopadly špatně vlnky *haar* a *bior3.9* a *bior1.3*. Nejlepší výsledky jsou u vlnek *db30* a *rbio3.9*. Medián většiny vlnek tentokrát kolísal kolem hodnoty $e_{rms} = 0,015$. Pro následné testování byla zvolena vlnka *db4* z důvodu nízké výpočetní náročnosti a dostatečně dobrých hodnot RMSE při obou nastaveních v porovnání s ostatními vlnkami (například výpočet pomocí vlnky *db30* trval několikanásobně déle).

5.2.2 Srovnání metod

Při následném testování jednotlivých metod s využitím vlnky *db4* (stupeň rozkladu 3) bylo využito devíti kombinací metod výpočtu úrovně aktivity a slučování koeficientů. U metod, které vyžadují nastavení parametrů, je toto nastavení následující:

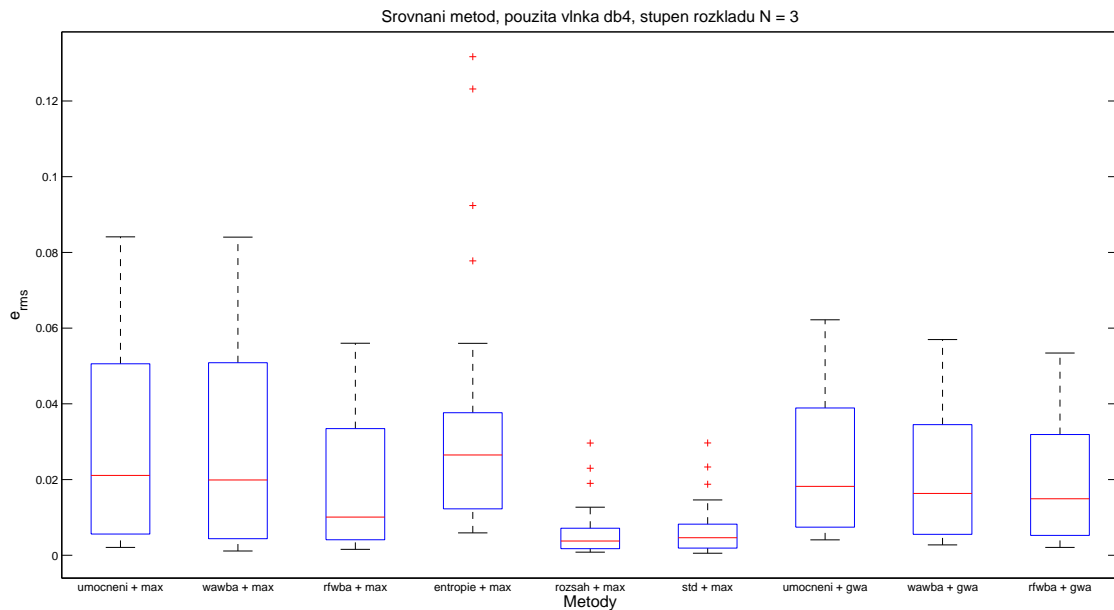
- *Výběr maxima* – konzistence povolena, okno velikosti 25,
- GWA – práh 0,85,
- WAWBA – konvoluční maska ze vzorce 4.4,
- RFWBA – okno velikosti 25 a výběr 1. prvku v pořadí.

Výsledky porovnání jednotlivých metod jsou zobrazeny na obrázku 5.3. Jak lze vidět, nejlépe dopadly metody výpočtu aktivity *Rozsah* a *Směrodatná odchylka* dohromady s použitím metody slučování koeficientů *Výběr maxima*. Jak naznačují odlehle hodnoty, ani tyto kombinace metod nemusí být vždy ideální. Dobré výsledky také poskytuje výpočet aktivity metodou RFWBA, a to v kombinaci jak s metodou *Výběr maxima*, tak s GWA.

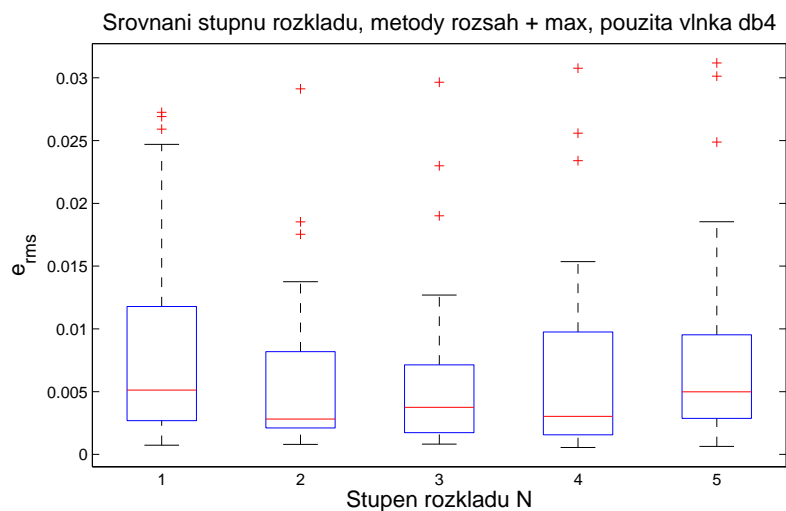
Podobné vlastnosti jako kombinace RFWBA s GWA vykazuje kombinace metod WAWBA s GWA. V případě použití metody kombinace koeficientů GWA dopadla nejhůře metoda výpočtu úrovně aktivity *Umocnění*, ale je nutno poznamenat, že všechny tři kombinace metod výpočtu aktivity s metodou GWA podávaly podobné výsledky. Poměrně špatných výsledků bylo dosaženo při použití kombinace metod výpočtu aktivity *Umocnění* a WAWBA s metodou slučování *Výběr maxima*. Nestabilní výsledky podává kombinace metod *Entropie* s *Výběr maxima*, která se pohybuje na úrovni předchozích dvou, ale zároveň lze vidět několik velmi odlehle hodnot.

Dvě nejlepší kombinace metod, *Směrodatná odchylka* a *Rozsah* s *Výběr maxima*, byly podrobeny testu rovnosti středních hodnot (jednostranný dvouvýběrový nepárový *t-test*). Na hladině významnosti 5 % jsou střední hodnoty těchto dvou kombinací metod statisticky významně menší, než střední hodnoty zbylých kombinací metod výpočtu aktivity a slučování koeficientů. Při srovnání dvou nejlepších kombinací mezi sebou oboustranným *t-testem* nebyl na stejné hladině významnosti zjištěn

statisticky významný rozdíl jejich středních hodnot.

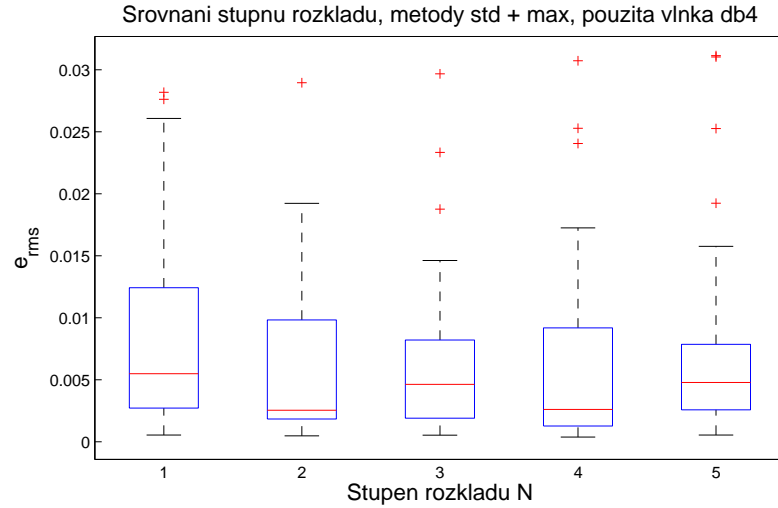


Obr. 5.3: Srovnání kvality fúzovaných obrazů v závislosti na použitých metodách (vlnka *db4*, $N = 3$)



Obr. 5.4: Srovnání kvality fúzovaných obrazů v závislosti na použitém stupni rozkladu (vlnka *db4*, kombinace metod *Směrodatná odchylka* + *Výběr maxima*)

Na dvou nejlepších kombinacích metod bylo dále provedeno testování kvality v závislosti na použitém stupni rozkladu. Výsledky tohoto testování jsou zobrazeny na obrázcích 5.4 a 5.5. Bylo provedeno srovnání všech stupňů rozkladu při dané kombinaci metod mezi sebou pomocí oboustranného dvouvýběrového *t-testu* a nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl středních hodnot na hladině významnosti 5 %



Obr. 5.5: Srovnání kvality fúzovaných obrazů v závislosti na použitém stupni rozkladu (vlnka *db4*, kombinace metod *Rozsah* + *Výběr maxima*)

mezi žádnými hodnotami stupně rozkladu N . Z toho lze vyslovit závěr, že stupeň rozkladu nemá při těchto dvou kombinacích metod na kvalitu výstupního obrazu významný vliv, i když z obrázku lze poznat, že pro hodnotu $N = 1$ byly výsledky horší než u ostatních hodnot. Také lze říct, že použití maximálního možného stupně rozkladu automaticky neznamená lepší výsledek, v některých případech dokonce horší. Velikost testovaných obrazů se pohybovala kolem 512×512 pixelů a maximální možný stupeň rozkladu byl 5 nebo 6.

5.2.3 Ukázka výsledků

Pro uměle rozostřené obrazy 5.6 bylo použito nastavení RFWBA (velikost okna 25 a 1. prvek v pořadí) s GWA (práh 0,85). Obrazy 5.8 a 5.9 byly vyfoceny s různým ostřením a při fúzi bylo použito nastavení *Směrodatná odchylka* a *Výběr maxima*, respektive *Rozsah* a *Výběr maxima*, kontrola konzistence s oknem 25.



Obr. 5.6: Dvojice uměle rozostřených obrazů určených k fúzi



(a) Originální nerozostřený obraz

(b) Výsledný fúzovaný obraz

Obr. 5.7: Srovnání originálního a fúzovaného obrazu



Obr. 5.8: Dvojice pořízených fotografií určených k fúzi



Obr. 5.9: Dvojice pořízených fotografií určených k fúzi



Obr. 5.10: Výsledné fúzované obrazy

6 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se věnuje využití vlnkové transformace pro fúzi obrazových dat. V první části je stručně popsána teorie vlnkové transformace, jsou zde uvedeny základní principy, srovnání FT a WT, které se týká především nemožnosti provést u klasické FT časově-frekvenční analýzu. Vlnkové transformace se dají aplikovat nejen na jednorozměrné signály, ale také na dvourozměrné obrazy. Jednou z oblastí praktického využití 2D DWT je fúzování obrazů, které se využívá, když každý obraz obsahuje jinou důležitou informaci, a díky fúzi dokážeme vytvořit obraz, který bude obsahovat všechny důležité informace najednou, nebo minimálně jejich podstatnou část. Jedním z možných využití fúze obrazů s pomocí vlnkové transformace je fúze tzv. multifokálních obrazů, což jsou obrazy fokusované na jiná místa ve scéně, a právě tyto dvojice obrazů jsou předmětem zájmu v této práci. Uveden je základní popis fúze, který spočívá v dekompozici obou obrazů a jejich zfúzování pomocí určitých pravidel, mezi které patří výpočet úrovně aktivity, případné seskupení koeficientů a metody kombinace koeficientů.

V práci je používáno celkem šest metod výpočtu úrovně aktivity: *Umocnění*, *WAWBA*, *RFWBA*, *Entropie*, *Rozsah* a *Směrodatná odchylka*. Spolu s nimi jsou dvě základní metody kombinace koeficientů jsou *Výběr maxima* (výběr na základě maximální úrovně aktivity) a *GWA*, kde se úroveň aktivity použije k výpočtu vah. Zde je nutno zmínit, že se pravidla fúze v jednotlivých pramenech literatury dost značně liší, například úroveň aktivity není v některých vůbec počítána, ale ke kombinaci koeficientů jsou použity přímo jejich hodnoty.

Všechny tyto metody jsou zakomponovány do programu vytvořeném v prostředí MATLAB, který umožňuje fúzi dvou obrazů o stejné velikosti. Pro snadnější práci s vytvořeným programem je také vytvořeno grafické uživatelské rozhraní.

V poslední kapitole je popsáno srovnání jednotlivých metod a vlnek, na základě jejich testování na vytvořené databázi 20 dvojic obrázků a fotografií. Nejprve jsou porovnávány vlnky, kde vlnky *haar*, *bior1.3* a *bior3.9* neposkytovaly dobré výsledky v porovnání s ostatními. Mezi zbylými vlnkami nebyly příliš velké rozdíly, a tak byla pro porovnávání metod zvolena vlnka *db4* z důvodu nízké časové náročnosti. Z porovnání různých metod vychází nejlépe kombinace metod výpočtu aktivity *Rozsah* a *Směrodatná odchylka* s metodou kombinace koeficientů *Výběr maxima*. Určení nejhorší kombinace metod není jednoznačné, nicméně velmi nestabilní výsledky podávala kombinace *Entropie* s metodou *Výběr maxima*. Lze říci, že optimální vlnku pro fúzi obrazových dat nelze s přesností určit, což je pravděpodobně dáno faktem, že každý obraz může zobrazovat jinou scénu a má jiné vlastnosti (jiné spektrum, kontrast atd.). Situace je jiná u testování metod, kde se dají, na základě popsaných výsledků, podpořených *t-testem*, obecně doporučit dvě kombinace metod.

LITERATURA

- [1] BURT, P. J. a R. J. KOLCZYNSKY. Enhanced Image Capture Through Fusion. *Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Vision*. Berlin, Germany, May 1993, pp. 173-182. ISBN: 0-8186-3870-2.
- [2] CANGA, E. F. *Image Fusion* [online]. University of Bath, June 2002 [cit. 30.12.2011]. Dostupné z URL: <<http://www.imagefusion.org/publications/theses/canga-msc-2002.pdf>>.
- [3] GONZALEZ, Rafael C., Richard E. WOODS a Steven L. EDDINS. *Digital Image Processing: Using MATLAB*. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004, ISBN 01-300-8519-7.
- [4] JAN, J. *Číslíková filtrace, analýza a restaurace signálů*. 2. upravené a rozšířené vydání. Brno: VUTIUM, 2002. ISBN 80-214-1558-4.
- [5] JAN, J. *Medical Image Processing, Reconstruction and Restoration: Concepts and Methods*. Boca Raton: CRC Press – Taylor & Francis Group, 2006. ISBN 0-8247-5849-8.
- [6] KOZUMPLÍK, J. *Vlnkové transformace a jejich využití pro filtraci signálů EKG: Habilitační práce*. Brno, Listopad 2004.
- [7] LI, H., B. S. MANJUNATH, a S. K. MITRA. Multisensor Image Fusion Using the Wavelet Transform. *Graphical Models and Image Processing*. Elsevier Inc., May 1995, Vol. 57, No. 3, pp. 235-245. ISSN 1077-3169.
- [8] LIU, C.-L. *A Tutorial of the Wavelet Transform* [online]. Taipei, February 23, 2010 [cit. 29. 11. 2011]. Dostupné z URL: <<http://disp.ee.ntu.edu.tw/tutorial/WaveletTutorial.pdf>>.
- [9] PAJARES, G. a J. M. DE LA CRUZ. A wavelet-based image fusion tutorial. *Pattern Recognition*. Kidlington (UK): Elsevier Ltd., September 2004, Vol. 37, No. 9, pp. 1855-1872. ISSN 0031-3203.
- [10] POLIKAR, R. *The Wavelet Tutorial: Engineer's Ultimate Guide to Wavelet Analysis* [online]. Glassboro, NJ: Rowan University, March 07, 1999, Last major update: January 12, 2001 [cit. 4. 12. 2011]. Dostupné z URL: <<http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTtutorial.html>>.
- [11] SOMAN, K.P. a K.I. RAMACHANDRAN. *Insight Into Wavelets: From Theory to Practice*. 1. vydání. New Delhi: Prentice-Hall of India Pvt.Ltd, 2004. ISBN 81-203-2650-4.

- [12] STARCK, J.-L., F. MURTAGH, A. BIJAOUÏ. *Image processing and data analysis: the multiscale approach*. New York: Cambridge University Press, May 1998, ISBN 978-0521599146.
- [13] STARCK, J.-L., F. MURTAGH, a J. M. FAIDLI. *Sparse Image and Signal Processing: Wavelets, Curvelets, Morphological Diversity*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. ISBN 978-0-521-11913-9.
- [14] ŠROUBEK, F., G. CRISTÓBAL, a J. FLUSSER Image Fusion Based on Level Set Segmentation. *Proceedings of 14th European Signal Processing Conference*. Florence, Italy, September 2006.
- [15] ZHANG, Z. a R. S. BLUM. A Categorization of Multiscale-Decomposition-Based Image Fusion Schemes with a Performance Study for a Digital Camera Application. *Proceedings of the IEEE*. August 1999, Vol. 87, No. 8, pp. 1315-1326. ISSN: 0018-9219.
- [16] ZHENG, Y., X. HOU, T. BIAN, a Z. QIN. Effective Image Fusion Rules Of Multi-scale Image Decomposition. *Proceedings of the 5th International Symposium on image and Signal Processing and Analysis (2007)*. Istanbul, September 2007, pp. 362-366. ISSN 1845-5921.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

WT vlnková transformace – Wavelet Transform

CWT vlnková transformace se spojitým časem – Continuous Wavelet Transform

DWT disktréní vlnková transformace – Discrete Wavelet Transform

$\psi(t)$ mateřská vlnka

IDWT Inverzní DWT

STFT Krátkodobá Fourierova transformace – Short-time Fourier Transform

FT Fourierova transformace – Fourier Transform

FIR Konečná impulsní charakteristika – Finite Impulse Response

CT Výpočetní tomografie – Computed Tomography

MRI Magnetická rezonance – Magnetic Resonance Imaging

RTG Rentgen

CBA Aktivita založená na koeficientu – Coefficient-Based Activity

WBA Aktivita založená na okně – Window-Based Activity

RBA Aktivita založená na oblasti – Region-Based Activity

GUI Grafické rozhraní – Graphic User Interface

WAWBA Weighted Average Window Based Activity

RFWBA Rank Filter Window Based Activity

GWA General Weighted Average

RMSE Root-mean-square Error