

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geoinformatiky

Michal VOSTRČIL

**VYUŽITÍ WAVELETOVÉ TRANSFORMACE PRO
ANALÝZU RELIÉFU**

Diplomová práce

Vedoucí práce: RNDr. Jana Svobodová, Ph.D.

Olomouc 2014

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci magisterského studia oboru Geoinformatika vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Jany Svobodové, Ph.D.

Všechny použité materiály a zdroje jsou citovány s ohledem na vědeckou etiku, autorská práva a zákony na ochranu duševního vlastnictví.

Všechna poskytnutá i vytvořená digitální data nebudu bez souhlasu školy poskytovat.

V Olomouci 23. dubna 2014

Děkuji vedoucí práce RNDr. Janě Svobodové, Ph.D., za podněty a připomínky při vypracování práce. Velký dík patří Ing. Milanu Chladovi, Ph.D., za cenné rady a předání bohatých zkušeností. Rovněž děkuji Ing. Zdeňku Převorovskému, CSc., za poskytnutí nejen teoretického zázemí.

Za poskytnutá data děkuji Katedře geoinformatiky.

Vložený originál **zadání** bakalářské/diplomové práce (s podpisy vedoucího katedry, vedoucího práce a razítkem katedry). Ve druhém výtisku práce je vevázána fotokopie zadání.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	6
ÚVOD	7
1 CÍLE PRÁCE.....	8
2 POUŽITÉ METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ	9
2.1 Použitá data	9
2.2 Použité programy	9
2.3 Postup zpracování	10
3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	11
3.1 Teorie matematické transformace	11
3.1.1 Fourierova transformace	11
3.1.2 Okénková Fourierova transformace	12
3.1.3 Waveletová transformace	13
3.2 Využití WT v současnosti	17
4 ZPRACOVÁNÍ DAT.....	20
4.1 Metoda procházení	21
4.1.1 Výběr pro čtvercové pole.....	21
4.1.2 Výběr pro kruhové pole	22
4.2 Metoda mřížky	23
5 WAVELETOVÁ TRANSFORMACE.....	27
5.1 Postup WT využitím nástrojů wavemenu	27
5.2 Postup WT použitím zesílení a zeslabení.....	30
5.2.1 Stanovení hodnot waveletových koeficientů	31
5.2.2 Vyhazení chybných hodnot	32
5.2.3 Výstup dat.....	32
6 POROVNÁVÁNÍ A HODNOCENÍ VÝSTUPŮ.....	34
6.1 Porovnání metod a nastavení	35
6.2 Srovnání mateřských waveletů	39
6.3 Srovnání terénu	44
7 VÝSLEDKY	49
8 DISKUZE	52
9 ZÁVĚR	54
POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE	
SUMMARY	
PŘÍLOHY	

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
FT	Fourierova transformace
STFT	Okénková Fourierova transformace (Short Time Fourier Transform)
WT	Waveletová transformace
CWT	Spojité waveletové transformace (Continuous WT)
DWT	Diskrétní Waveletová Transformace (Discrete WT)
Lidar	Light Detection And Ranging
ED	ekvidistantní data
WCs	waveletové koeficienty
MRA	Multiresolution analýza
DB	území s využitím Daubechies 6 waveletu
CO	území s využitím Coiflet 4 waveletu

ÚVOD

Naše okolí obsahuje velké množství signálů. Význam slova signál ale nemusí být spojen pouze s telekomunikačními službami nebo navigací. Signál totiž může nést rozmanitou škálu informací. Mnohé z nich dokážeme analyzovat a tím o nich získat cenné poznatky, které zůstávají lidskému oku skryty.

Ani získaný signál však nemusí ve své běžné podobě předat všechny informace, které s sebou přenáší. Představme si běžně známý signál elektrokardiogramu neboli EKG. Zobrazuje vývoj srdeční aktivity v závislosti na čase. Pokud nás zajímá pouze časový průběh tohoto signálu, je takový záznam naprosto dostačující. Co když ale signál obsahuje malé odchylky či nespojitosti, které nejsou z časového průběhu patrné? V takovém případě přistoupíme k použití matematické transformace. Jejím využitím lze získat informace o frekvencích, které se v signálu vyskytují a tím lze odhalit i malé poruchy signálu, které byly do té doby neviditelné. Ne však každá transformace svede takovou analýzu, při níž by dokázala odhalit současně časové i frekvenční chování najednou. Co více, aby zároveň dokázala frekvenci přizpůsobit časovému průběhu během analýzy. Takové možnosti nabízí právě waveletová transformace.

Pokud převedeme signál z lékařského prostředí do tematiky analýzy reliéfu, platí totéž. Aproximací jednotlivých naměřených bodů lze získat také takový signál a analýzou jeho nespojitostí či náhlých výkyvů lze upravovat jeho frekvenční chování. Signál se rozkládá do určitého počtu úrovní a úpravou každé z nich lze dojít k různým využitím při analýze reliéfu.

1 CÍLE PRÁCE

Cílem diplomové práce je popsat základní principy waveletové transformace a její využití pro analýzu reliéfu. Principy a její možnosti využití budou zpracovány v teoretické části. Druhá část práce bude praktická a na několika konkrétních případech bude dokumentovat možnosti využití waveletové transformace pro analýzu reliéfu. Vstupními daty budou data z leteckého laserového skenování části obce Vysoké Pole.

Waveletová transformace (dále WT – Wavelet Transform) byla vyvinuta jako propracovanější alternativa k okénkové Fourierově transformaci (dále STFT – Short Time Fourier Transform). Pokud je digitální model terénu uložen ve formě vlnkových koeficientů (dále WCs – wavelet coefficients), je možné určit jeho spektrální chování a úpravou WCs lze dosáhnout vytvoření modelů s různou mírou frekvenční informace v nich obsažené.

2 POUŽITÉ METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ

Na základě studia odborné literatury byly vybrány vhodné metody a zvoleny ideální postupy zpracování diplomové práce. Postup této práce byl rovněž konzultován s odborníky na problematiku waveletové transformace, jimiž byli Ing. Milan Chlada, Ph.D., a Ing. Zdeněk Převorovský, CSc., z Ústavu termomechaniky AV ČR, v. v. i.

2.1 Použitá data

Použitá data byla zakoupena od společnosti GEODIS BRNO, spol. s r. o., Katedrou geoinformatiky Univerzity Palackého v Olomouci. Jedná se o data leteckého laserového skenování obsahující část katastrálního území obce Vysoké Pole na Zlínsku ve formátu *.las.

Data byla pořízena 27. 6. 2012 skenerem Leica ALS50II na nosiči C402 při průměrné výšce letu 1000 metrů při maximální rychlosti letounu 241 km/h. Data se skládají z pěti letových řad s nominálním příčným překryvem 35 % a skenovacím úhlem 25°.

Reálná hustota bodů skenování činí 5,272 bodů na metr čtvereční, z toho tvoří 3,229 bodů terén. Výsledná laserová data jsou klasifikována a uložena do tříd dle ASPRS standardu (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing).

Tab. 1 Klasifikace dle ASPRS standardu (zdroj: Metadata k zdrojovým datům)

<i>ASPRS Standard LIDAR Point Classes</i>	
<i>Classification Value (bits 0:4)</i>	<i>Meaning</i>
0	Created, never classified
1	Unclassified ¹
2	Ground
3	Low Vegetation
4	Medium Vegetation
5	High Vegetation
6	Building
7	Low Point (noise)
8	Model Key-point (mass point)
9	Water
10	<i>Reserved for ASPRS Definition</i>
11	<i>Reserved for ASPRS Definition</i>
12	Overlap Points ²
13-31	<i>Reserved for ASPRS Definition</i>

2.2 Použité programy

Zpracování dat z leteckého laserového skenování proběhlo stejně tak jako jejich následná analýza waveletovou transformací v prostředí programu MATLAB verze R2012a společnosti MathWorks.

K následnému porovnávání výstupů a jejich hodnocení bylo využito programu ArcGIS 10 společnosti ESRI.

Zpracování fotografií proběhlo v programu Adobe Photoshop 7.0 společnosti Adobe.

Zpracování a vizualizace výsledků umožnily aplikace kancelářského balíku Microsoft Office 2010 společnosti Microsoft.

2.3 Postup zpracování

Na základě studia literatury a odborných konzultací proběhlo šetření využitelnosti waveletové transformace pro analýzy reliéfu a možnosti zpracování.

Nejdříve bylo nutné vhodně zpracovat data leteckého laserového skenování (dále surová data), která byla pro waveletovou transformaci krajně nevhodná. Bylo třeba vytvořit data ekvidistantní, a tedy jediná vhodná. K tomuto účelu vznikla řada algoritmů pro zpracování dat v programu MATLAB. Pro větší různorodost vstupních dat byly navrženy postupy, které zpracují surová data pro různé metody výpočtu a rovněž pro rozdílné tolerance vstupních bodů.

Takto vytvořené ekvidistantní vrstvy bodů mohly vstoupit do procesu waveletové analýzy. Nejprve došlo k výběru konkrétního mateřského waveletu. Poté byla každá vrstva rozložena do určitého počtu frekvenčních částí podle předem zvolené úrovně rozkladu. Dle nastavení počtu koeficientů podle chtěných frekvencí v datech došlo k jejich zpětné syntéze. Tento proces byl zaměřen na kategorii nízkofrekvenční složek reliéfu. Celý postup se opakoval pro několik zpracovaných vrstev bodů.

Výstupní ekvidistantní vrstvy zpracované waveletovou transformací byly exportovány do souborů formátu *.txt a dále importovány jako bodové vrstvy do prostředí ArcGIS. Zde došlo k jejich převodům na rastrové vrstvy a jejich porovnávání a hodnocení.

Porovnávání bylo prováděno s referenčními daty, jimiž byla data leteckého laserového skenování převedená do rastrového formátu se stejnou velikostí buňky 1 metr a upravená metodou průměru. Bylo využito nízkofrekvenčních výstupů jako vrstev odpovídajících samotnému terénu a byly porovnávány s kategorií terénu dle ASPRS. K porovnávání bylo využito funkcí mapové algebry a standardních statistických metod, jako je aritmetický průměr a směrodatná odchylka.

3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Při pozorování okolního světa získáváme řadu různých signálů (seismické chvění, lidská řeč, vibrace strojů, finanční údaje, radarové signály, obrazové signály atd.), které je třeba analyzovat. Analýzou těchto signálů rozumíme jejich popis, filtraci, kompresi, rekonstrukci, rozpoznávání, lokalizaci atd. Waveletová analýza je relativně nový a slibný soubor nástrojů a technik, který toto zpracování signálů umožňuje.¹ Tato kapitola obsahuje nezbytné souvislosti pro chápání WT, stejně tak jako její dosavadní využití.

3.1 Teorie matematické transformace

Matematické transformace mohou poskytnout informace o signálu, které zůstávají v jeho syrové podobě skryty. Většina signálů se totiž zobrazuje v jejich časové doméně. Takováto reprezentace však není vždy pro zpracování signálu nejlepší. Naopak v mnoha případech se významná informace ukrývá v doméně frekvenční. V některých případech nám ale ani tato informace nepostačuje a je třeba konfrontovat časovou a frekvenční doménu najednou. Takových informací lze dosáhnout použitím matematické transformace.

I když teorie waveletové transformace není příliš starou technikou, její základy byly položeny již v první polovině 20. století. Matematické základy, které se později ukázaly jako nezbytné pro vznik takovéto metody, byly položeny již počátkem 19. století Josephem Fourierem a jeho teorií frekvenční analýzy, dnes nazývané Fourierova transformace.

3.1.1 Fourierova transformace

Fourierova transformace (dále FT) je matematická metoda, kterou lze úspěšně použít pro analýzu signálu. Jedná se o vyjádření funkce popisující signál pomocí integrální transformace. Fourierova analýza spočívá v rozkladu libovolného periodického signálu do funkcí *sin* a *cos* s různou frekvencí a fází. Tato transformace vychází z Fourierovy řady a má množství využití.²

FT umožňuje získat informace, které jsou v časové doméně nečitelné, převodem na doménu frekvenční (spektrální). Transformace je reverzní, umožňuje tedy přechod mezi surovým a zpracovaným signálem. Tyto dva signály však není možné pozorovat najednou. To znamená, že informace o frekvenci není dostupná v časovém spektru signálu a informace o čase není dostupná ve frekvenčním spektru.

¹ PŘEVOROVSKÝ, David. *Waveletová transformace a její využití při zpracování jednorozměrných signálů*. Praha: Ústav termomechaniky AV ČR, v. v. i., In print, s. 2.

² *(Diskrétní) Fourierova transformace* [online]. [cit. 2014-02-13]. Katedra experimentální fyziky. Dostupné z WWW: <http://apfyz.upol.cz/ucebnice/down/mini/fourtrans.pdf>.

FT rozkládá signál na komplexní exponenciální funkce různých frekvencí:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-2j\pi ft} dt \quad (1)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \cdot e^{2j\pi ft} df \quad (2)$$

kde f značí frekvenci, t značí čas a x původní signál. Rovnice 1 je Fourierova transformace $x(t)$ a rovnice 2 je inverzní Fourierova transformace $X(f)$.

Pokud je výsledkem integrace velká hodnota, znamená to, že signál má dominantní spektrální (frekvenční) složku ve frekvenci f . Hlavní část tohoto signálu je tedy z této frekvence složená. Pokud je výsledkem integrace malá hodnota, lze říci, že signál neobsahuje hlavní frekvenční část. Výsledek nula znamená, že signál frekvenci f vůbec neobsahuje.

FT tedy poskytuje informaci o tom, kolik jednotlivých frekvencí existuje v signálu, neříká však, v jakých časech se tyto frekvence objevují. Pokud se jedná o stacionární signál, není tato informace nutná, protože v tomto případě se frekvence opakují ve všech časech. Problém nastává ve chvíli, kdy je třeba zpracovat nestacionární signál, tedy signál, jehož frekvence se mění v čase. Může totiž dojít k tomu, že dva rozdílné signály (stacionární a nestacionární) ukáží po transformaci stejné frekvenční hodnoty.

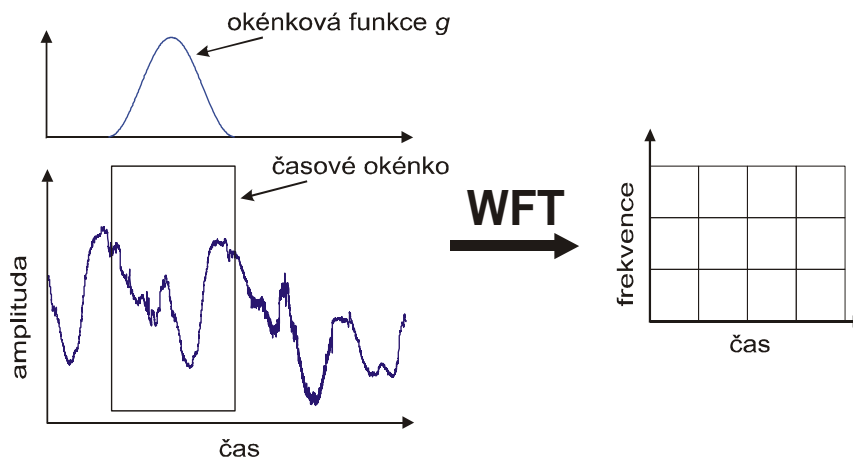
FT tedy není vhodná pro nestacionární signál s výjimkou signálu, u kterého není nutná informace o frekvenci v konkrétním čase. Jako řešení této indispozice byla vyvinuta okénková Fourierova transformace (Short Time Fourier Transform).³

3.1.2 Okénková Fourierova transformace

Okénková Fourierova transformace (dále STFT) napravuje nedostatek Fourierovy transformace, tedy nemožnost jejího využití při zpracování nestacionárního signálu.

STFT pracuje s myšlenkou, že velice malá část nestacionárního signálu může být stacionární. STFT tedy dělí signál na malé části, které lze za stacionární považovat. Z tohoto důvodu zavádí funkci w , která se nazývá okenní funkce a její šířka je rovna části signálu, který je stacionární.

³ HLEDÍK, Stanislav. *Fourierova transformace* [online]. [cit. 2014-02-21]. Ústav fyziky Filozoficko-přírodovědecké fakulty Slezské univerzity v Opavě. Dostupné z: http://nora.fpf.slu.cz/~hledik/pub/teach/classes/latex/output_samples/BryjovaI-AppsDEFG.pdf.



Obr. 1 Grafické znázornění okénkové Fourierovy transformace (WFT) (autor: D. Převorovský).

Postup STFT je následující: okenní funkce je umístěna na začátek signálu ($t=0$). Předpokládaná šířka signálu je T . V čase $t=0$ bude okenní funkce překrývat prvních $T/2$ sekund. Dojde k vynásobení signálu s okenní funkcí. Výsledkem je běžný signál, který je zpracován Fourierovou transformací. Výstupem je frekvenční reprezentace prvních $T/2$ sekund signálu. Dalším krokem je posunutí okna na čas $t=1$, vynásobení okenní funkce a signálu a opět provedení FT. Celý proces se opakuje, dokud není dosaženo konce signálu. STFT vyjadřuje následující rovnice:

$$STFT_x^{(w)}(t, f) = \int_t [x(t) \cdot w^*(t-t')] \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (3)$$

$x(t)$ je signál, $w(t)$ okenní funkce, * komplexně sdružená hodnota.

Pokud se vytvoří nekonečně velká okenní funkce, jedná se vlastně o dosažení Fourierovy transformace. V tom případě se získá dokonalé frekvenční rozlišení, ale žádná informace o čase. Konečné okno STFT způsobuje, že frekvenční rozlišení je chudší a je známo pouze pásmo existujících frekvencí, zato však dojde k získání informace o časovém rozlišení. Lze tedy říci, že čím širší je okno, tím lepší lze získat frekvenční rozlišení a horší časové rozlišení a naopak, čím je okno užší, tím lepší lze získat časové rozlišení a horší frekvenční rozlišení.

Dle fungování STFT vyvstávají problémy s rozlišením, tedy jak široké okno zvolit, respektive o jakém rozlišení získat přesnější informaci. Tyto problémy řeší waveletová transformace.⁴

3.1.3 Waveletová transformace

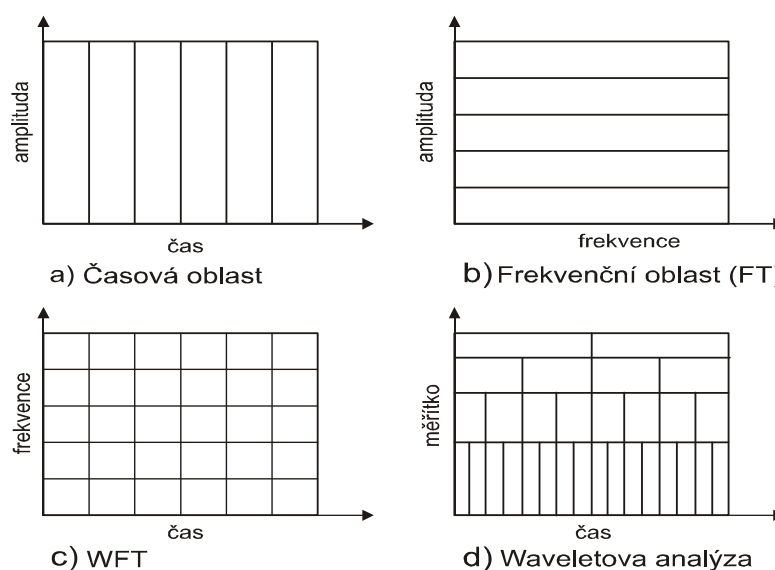
Waveletová transformace, někdy také waveletová analýza (dále WT), patří do kategorie tzv. Multiresolution analýzy (dále MRA). Tato analýza pracuje se signálem

⁴ POLIKAR, Robi. *The Wavelet Tutorial Part 2* [online]. [cit. 2014-02-22]. Rowan University. Dostupné z: <http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTpart2.html>. (Do češtiny přeloženo autorem.)

různých frekvencí s různým rozlišením. Každá část spektra tedy není určována stejně, jak tomu bylo u STFT.

MRA podává dobré časové a špatné frekvenční rozlišení ve vysokých frekvencích a dobré frekvenční a špatné časové rozlišení v nízkých frekvencích. Tento přístup je vhodný pro signály s krátce trvajících vysokými frekvencemi a dlouho trvajících nízkými frekvencemi, tedy i pro analýzu reliéfu. Vysoké frekvence totiž mohou odpovídat náhlým změnám výšky povrchu a signalizovat tak např. vegetaci, zatímco nízké frekvence mohou ukatovat plynulé kolísání výšek a naznačovat samotný terén.

Vlastnosti rozlišení jednotlivých transformací ukazuje obr. 2.



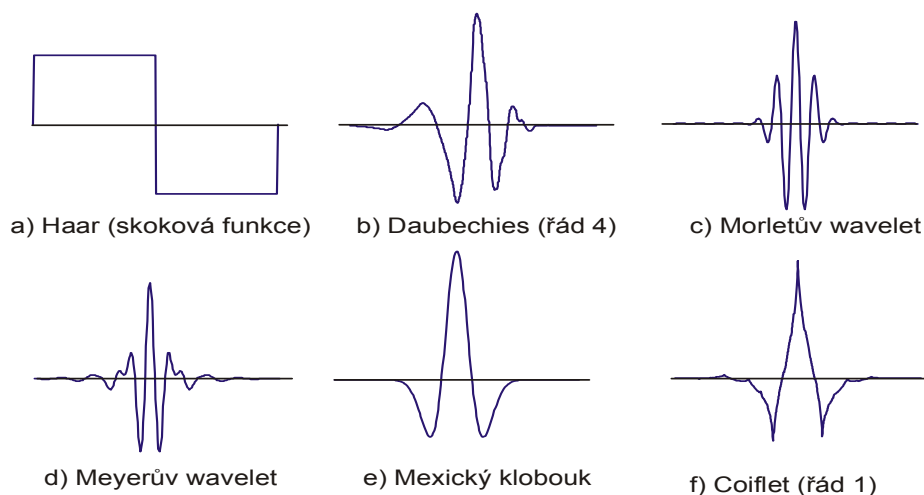
Obr. 2 Srovnání různých typů pohledů na analyzovaný signál (autor: D. Převorovský).

Spojité waveletové transformace (dále CWT) byla vyvinuta jako alternativní metoda k STFT pro překonání problémů s rozlišením. I u CWT je signál násoben s funkcí (tentokrát je to wavelet) a transformace je počítána odděleně pro různé části časové oblasti signálu. Hlavním a nejvýznamnějším rozdílem je, že dochází ke změně šířky okna během výpočtu jednotlivých spektrálních částí.

Spojitou waveletovou transformaci vyjadřuje následující rovnice:

$$CWT_x^\psi(\tau, s) = \Psi_x^\psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int x(t) \psi * \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt \quad (4)$$

Transformovaný signál je funkce proměnné τ a s (tedy translation (posunutí) a scale (měřítko)), $\psi(t)$ je transformační funkce zvaná mateřský wavelet.



Obr. 3 Některé základní typy mateřských waveletů (autor: D. Převorovský).

Termín wavelet znamená malou vlnu (viz rovněž vlnková transformace). Wavelet má konečnou délku a je kmitavý. Mateřský znamená, že funkce použité při transformaci jsou od něho odvozené. Termín posunutí (translation) je použit stejně jako u STFT při umísťování okna napříč signálem a odpovídá informaci o čase. Termín frekvence je u CWT nahrazen měřítkem (scale) definovaným jako $1/\text{frekvence}$.

Parametr měřítka lze přirovnat k měřítkovému číslu používanému v mapách. Velké měřítko (nízká frekvence) odpovídá globální informaci o obrazu a malé měřítko (vysoká frekvence) odpovídá detailní informaci o obrazu. Změnami měřítka dochází k rozšiřování a stlačování signálu. Větší měřítko signál natahuje a menší ho naopak stlačuje.

Obecný výpočet CWT funguje následovně. Je vybrán signál $x(t)$ a mateřský wavelet, který poslouží jako vzor pro okenní funkce, které jsou roztažením (stlačením) a posunutím mateřského waveletu (obr. 3 zobrazuje vybrané mateřské wavelety). Po výběru waveletu začíná výpočet pro $s=1$ a nulový čas odpovídající začátku signálu. CWT je pak počítána pro všechny hodnoty s , které jsou obvykle omezeny určitým intervalem. Waveletová funkce v měřítku $s=1$ je vynásobena signálem a integrována. Finální výsledek transformace je hodnota CWT v čase $t=0$ a měřítku 1 v časově-měřítkové ploše. Wavelet stejného měřítka je dále posunut v čase na $t=1$ a dochází ke stejnému výpočtu. Celý proces se opakuje, dokud wavelet nedosáhne konce signálu. Tento postup vyplní jednu řadu bodů v časově-měřítkové ploše. Potom dojde ke změně hodnoty s a celý proces se opakuje pro všechny jeho hodnoty, čímž je výpočet CWT kompletní.⁵

Druhou část tvoří diskrétní waveletová transformace (dále DWT). Časově-měřítková reprezentace signálu je získána pomocí filtrací. Filtry jsou použity pro oddělení různých měřítek signálu; vysokofrekvenční filtry slouží k analýze vysokých frekvencí a nízkofrekvenční filtry k analýze nízkých frekvencí.

⁵ POLIKAR, Robi. *The Wavelet Tutorial Part 3* [online]. [cit. 2014-02-22]. Rowan University. Dostupné z: <http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTpart3.html>. (Do češtiny přeloženo autorem.)

Filtrací se změní množství detailní informace obsažené v signálu, tedy rozlišení, a nadvzorkováním (podvzorkováním) se změní měřítko. Podvzorkování signálu znamená snížení vzorkovacího poměru neboli odstranění některých částí signálu. Podvzorkování faktorem n znamená odstranění každého n -tého vzorku signálu. Nadvzorkování signálu znamená zvýšení vzorkovacího poměru, tedy přidání nových vzorků signálu (např. interpolací). Nadvzorkování signálu faktorem n znamená zvýšení počtu vzorků n -krát.

DWT je schopna poskytnout časovou i frekvenční informaci zároveň, podává tedy časově-frekvenční reprezentaci signálu. Obecně funguje DWT tak, že se na časovou oblast signálu aplikují různé nízkofrekvenční a vysokofrekvenční filtry. Tento proces se opakuje a část signálu vždy odpovídá frekvencím, které budou odstraněny.

Příklad může být popsán na signálu s frekvencí 1000 Hz. V prvním kroku dojde k jeho rozdělení na dvě části aplikací nízkofrekvenčního a vysokofrekvenčního filtru. Tím vzniknou dvě verze signálu – nízkofrekvenční část 0–500 Hz a vysokofrekvenční část 500–1000 Hz. Ve druhém kroku dojde k dekompozici, kdy se první, obvykle nízkofrekvenční část rozdělí stejně jako v prvním kroku. Dojde k rozdělení signálu na 0–250 Hz, 250–500 Hz a 500–1000 Hz. V dalším kroku se druhý krok opakuje opět na nízkofrekvenční části. Takovýto rozklad se opakuje, dokud není dosaženo předdefinované úrovně. Takto vzniklá sada signálů odpovídá jiné frekvenční části téhož původního signálu. Nyní je známo, který signál odpovídá jaké frekvenční části a při zobrazení do 3D grafu lze získat časově-frekvenční závislost společně s jejich amplitudou. Tak je snadné určit, které frekvence se vyskytují v čase. Princip neurčitosti však zaručí, že není možné zjistit přesné frekvence v přesném čase, pouze frekvenční části v časových intervalech. DWT dává tedy různé rozlišení. Konkrétní vysoká frekvence se lépe určí v čase, zatímco nízká frekvence se lépe určí ve frekvenci.⁶

Waveletová transformace je způsob analýzy signálu, který signál z časové oblasti transformuje do oblasti časově-frekvenční, což umožňuje sledovat časový vývoj jednotlivých frekvenčních složek. Oproti klasickým metodám analýzy, jako je Fourierova analýza, zachovává waveletová transformace informaci i o časovém průběhu signálu a možnost volby frekvenčního a časového kroku upřednostňuje tento typ analýzy před ostatními typy časově-frekvenčních analýz. Existence rychlých signálových procesorů umožňuje v dnešní době zpracování signálů a dat v reálném čase pomocí algoritmu rychlé waveletové transformace.⁷

Rozborem waveletové transformace, zejména jejím podrobným výkladem, se zabývají také práce, které se snaží vysvětlit WT nejen matematickými důkazy. Jsou to *A Friendly Guide to Wavelets* (Gerald Kaiser), *A Really Friendly Guide to Wavelets* (Clemens Valens) a *A Practical Guide to Wavelet Analysis* (Christopher Torrence). Množství

⁶ POLIKAR, Robi. *The Wavelet Tutorial Part 4* [online]. [cit. 2014-02-22]. Rowan University. Dostupné z: <http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTpart4.html>. (Do češtiny přeloženo autorem.)

⁷ PŘEVOROVSKÝ, David. *Waveletová transformace a její využití při zpracování jednorozměrných signálů*. Praha: Ústav termomechaniky AV ČR, v. v. i., In print, s. 25.

teoretických znalostí i praktických použití je rovněž obsaženo v uživatelské příručce *Wavelet Toolbox – User's Guide*.

3.2 Využití WT v současnosti

Waveletovou transformaci je možné využít všude tam, kde dochází ke zpracování signálů. Uplatnění najde při identifikaci frekvencí krátkého trvání, detekci krátkých nespojitostí signálu nebo separování časových intervalů signálu atd. Významnou pozici má waveletová transformace u komprese signálů a odstraňování šumu.

Aplikací waveletové transformace je celá řada, lze je snadno nalézt v oblastech jako je lékařství (zpracování a analýza signálů EKG a EEG), strojírenství (nedestruktivní testování, určování životnosti a únavy materiálů, vyhledávání různých forem závad), obecná fyzika (hydrodynamické a termodynamické jevy), ekonomie, astronomie a v neposlední řadě vědy o zemi, jako např. geofyzika.

Detailnější pohled na využití waveletové transformace ukáže, že je tato analýza využívána i v celé řadě dílčích oborů, pro které není obvyklým nástrojem výzkumu. O to více může být zajímavější pozorovat její počínání, jak se tomu děje i v geoinformatice a vědách s ní spojených.

Kalbermatten a kol. využívá waveletovou transformaci k detekci geomorfologických jevů a jejich základních prvků. Ty je nutné identifikovat ve specifických měřících, ve kterých se objevují důležité prvky spolu s jejich vnitřními vztahy. Jako přístup je zvolena extrakce geomorfologických indikátorů v různých měřících a je tedy nezbytné uvažovat o modelech v jejich frekvenční oblasti.

Předchozí výzkum ukazuje, že prostředí je tvořeno mnoha frekvenčními informacemi, které charakterizují časovou i prostorovou oblast. Téměř každý prvek na zemi se vyvíjí, je dynamický a skládá se z mnoha procesů a strukturálních elementů, které mají různá měřítka a jsou na sobě vzájemně závislé a propojují se v přirozený systém, který má také svoje prostorové rozlišení.

Pokud dojde ke správnému odhadu základních geomorfologických tvarů, je možné je reprezentovat jako funkci a využít prostorově frekvenční analýzu. Nejlepší reprezentace této funkce pak bude při určitém stupni měřítka ilustrovat, které typy struktur vycházejí ze stejné úrovně.

K tomuto účelu je použita waveletová transformace, pro nestatickou strukturu zemského povrchu, která je schopná kombinovat prostorovou a spektrální polohu.

Dochází tedy k analýze měřítka topografických prvků na základě výpočtu waveletové transformace. Potom dochází využitím inverzní WT k rekonstrukci obrazu s vysokým rozlišením a tím dojde k získání vysokofrekvenčních informací. Tato metoda je použita na digitální výškový model sesuvu půdy v jižním Švýcarsku.

Charakterizované prvky byly porovnány s různými vysokofrekvenčními obrazy, vypočítanými pro identifikaci prvků a jejich měřítkových intervalů. Výsledky se shodují se standardními geomorfologickými analýzami uplatněnými v této oblasti.⁸

Ačkoli je v této studii využito pokročilých nástrojů, analýza pouze potvrzuje výsledky, kterých lze dosáhnout běžně používanými metodami např. zpracováním obrazu. Navíc jsou vybrané zkoumané prvky poměrně velké, čímž nedochází k testování nástroje při použití na detailních prvcích.

Hani a kol. čerpá z poznatků waveletové transformace pro výpočty drsnosti povrchu z digitálního modelu terénu. Výpočet bere v úvahu, že tři dominantní prvky terénu (hory, údolí a svahy) mají rozdílné křivosti. Proto je drsnost povrchu jednotlivých buněk modelu reliéfu vypočítána podle křivosti a drsnosti každé jednotlivé hory, údolí a svahu. Výpočet umožňuje lokalizaci a kvantifikaci křivostí, takže poskytuje vhodné informace o drsnosti povrchu pro konkrétní části povrchu různých měřítek.

Drsnost povrchu je užitečný nástroj pro analýzu terénu, protože odráží množství geofyzikálních jevů, jako jsou např. charakteristiky reliéfu nebo odhady eroze.⁹

Tento výzkum zobrazuje, jak lze zajímavým způsobem odhadovat křivosti modelů terénu. Nebere však v potaz menší celky a tím může dojít ke ztrátě některých detailních informací.

V další práci Hani a kol. využil frekvenční analýzy a jejího úrovňového rozkladu k výpočtu drsnosti povrchu digitálního modelu terénu. Nejdříve byly vytvořeny modely použitím systému navyšování. To znamená, že jednotlivé oblasti buněk byly upraveny vypočtením konkrétních měřítek. Získané plochy byly rozděleny v modelu tak, aby každá odpovídala pravděpodobnostní funkci. Tohoto rozdělení bylo použito k výpočtu průměrné velikosti ploch stejných křivosti modelu terénu. Rozdělením křivosti bylo dosaženo průměrné drsnosti.¹⁰

Navržený algoritmus vytváří parametr drsnosti povrchu, jenž dobře odpovídá amplitudám a frekvencím terénu. Není však vhodný pro výpočet drsnosti povrchu jednotlivých buněk modelu, protože předpokládá, že křivosti jsou v terénu rozloženy rovnoměrně.

⁸ KALBERMATTEN, Michael et al. Multiscale analysis of geomorphological and geological features in high resolution digital elevation models using the wavelet transform. *Geomorphology*, 2012, č. 138, s. 352–363.

⁹ HANI, Ahmad Fadzil Mohamad, SATHYAMOORTHY, Dinesh, ASIRVADAM, Vijanth Sagayan. Computing surface roughness of individual cells of digital elevation models via multiscale analysis. *Computers & Geosciences*, 2012, č. 43, 137–146.

¹⁰ HANI, Ahmad Fadzil Mohamad, SATHYAMOORTHY, Dinesh, ASIRVADAM, Vijanth Sagayan. A method for computation of surface roughness of digital elevation model terrains via multiscale analysis. *Computers & Geosciences*, 2011, č. 37, 177–192.

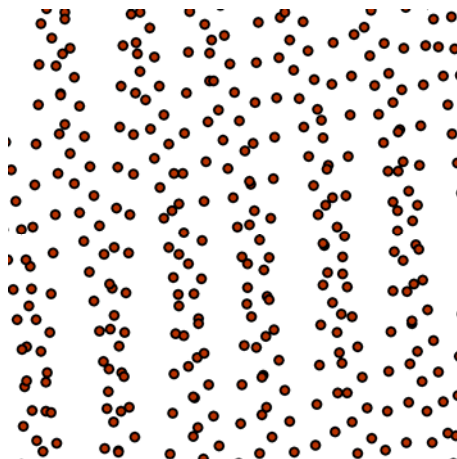
Thierry Blu a Michael Unser definují nový typ waveletové transformace založené na přesně definované skupině funkcí měřítka. Těmito funkcemi jsou fraktální B-spliny. Tato skupina funkcí dokáže provést interpolaci mezi celočíselnými stupni polynomických B-splinů a tím umožňuje vytvořit i neceločíselné aproximace.¹¹

Využití B-splinů v kombinaci s waveletovou transformací je dalším trendem a lze očekávat jeho rozvoj. Díky neceločíselným aproximacím lze dosáhnout přesnějších digitálních modelů terénu.

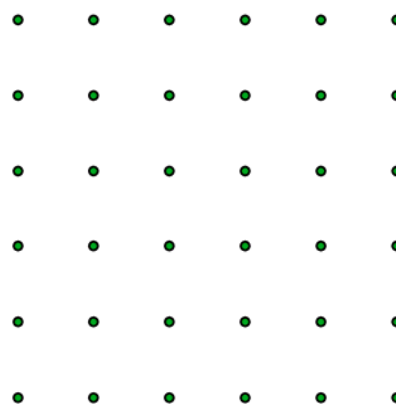
¹¹ BLU, Thierry, UNSER, Michael. The fractional spline wavelet transform: definition and implementation. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing Proceedings*. 2012, č. 1.

4 ZPRACOVÁNÍ DAT

Data pořízená leteckým laserovým skenováním v podobě mračka bodů byla pro waveletovou transformaci nepoužitelná. Aby mělo smysl uvažovat o frekvenční analýze, je nezbytné uspořádat data do ekvidistantní formy, což znamená zachování konstantní vzdálenosti mezi všemi sousedními body.



Obr. 4 Původní lidarová data.



Obr. 5 Ekvidistantní data.

Pro takové zpracování dat byl použit program MATLAB. Veškeré zpracování dat proběhlo v jeho prostředí verze 2012a.

Postup byl následující: surová data byla uložena ve formátu *.las ve čtyřech oddělených souborech, které bylo nutné sloučit do jednoho, čímž vznikl jednotný soubor „data“. Ten byl vytvořen postupným načítáním každého souboru do jedné proměnné. Soubor obsahuje 8 354 224 řádků a 3 sloupce v pořadí souřadnice x, souřadnice y, nadmořská výška.

Z takto uspořádaných bodů byla ekvidistantní data zpracována dvěma různými metodami. První zpracování umožňuje výpočet pomocí různým metod pro jednoduché čtvercové pole (např. 1x1 metr) jako jeden postup a zobrazuje způsob, jak využít pro výběr bodů pole kruhové jako druhý postup. Druhé zpracování předvádí výpočet pro čtvercová pole s různou tolerancí a nabízí efektivnější a tím i rychlejší řešení.

Všechny metody zpracování a tedy všechny ekvidistantní datové sady vytvořené v této práci uvažují vzájemnou vzdálenost bodů 1 metr.

4.1 Metoda procházení

Program MATLAB byl zvolen jako vhodné prostředí pro matematické operace s maticemi. Následující programový kód popisuje, jak bylo prostředí využito k jejich vytvoření.

Tato metoda byla vytvořena pro základní zpracování dat do ekvidistantní podoby. Definováním základních parametrů matice je možné vytvořit pole různého tvaru a velikosti. Z tohoto pole jsou poté vybírány body, jejichž výškové hodnoty jsou různými metodami výpočtu převedeny v ekvidistantní bod.

Nejprve bylo nutné identifikovat souřadnice původních dat z proměnné „data“ a definovat souřadnice nové matice.

```
%% vytvoření souřadnic a matice
xmin=min(data(:,1));
xmax=max(data(:,1));
ymin=min(data(:,2));
ymax=max(data(:,2));
krok=1;
krocx=(xmax-xmin)/krok;
krocy=(ymax-ymin)/krok;
[xi,yi]=meshgrid(xmin:krocx:xmax,ymin:krocy:ymax);
sour_x=[xmin+krocx/2:krocx:xmax];
sour_y=[ymin+krocy/2:krocy:ymax];
```

Nyní existuje matice bodů s definovaným středem každé buňky a krokem jeden metr, který je možné měnit a tím dosáhnout různé vzdálenosti ekvidistantních bodů. Dále dojde k naplnění matice konkrétními hodnotami pro každý ekvidistantní bod.

V tomto případě lze zvolit různé postupy pro vytvoření výběrového pole, ze kterého jsou body vybírány. První postup vytváří pole jako rozdíl kroků od středové souřadnice budoucího ekvidistantního bodu a pole tak má čtvercový tvar. Jako metoda výpočtu je v tomto případě uveden průměr.

4.1.1 Výběr pro čtvercové pole

Tento postup vytváří čtvercové pole pro výběr bodů. V tomto případě je rozměr pole vytvořen jako rozdíl středové x-ové a y-ové souřadnice a půlky kroku v x-ovém i y-ovém směru, čímž dojde k vytvoření pole jeden krát jeden metr.

```
%% vyplnění matice hodnotami bodů ze čtvercového pole metodou průměr
radku=length(sour_y);
sloupcu=length(sour_x);
grid_data=zeros(radku,sloupcu);
for radek=1:radku
    disp(radek);
```

```

for sloupec=1:sloupcu
    kdex=sour_x(sloupec);
    kdey=sour_y(radek);
    ii=find(data(:,1)>kdex-0.5*krok & data(:,1)<kdex+0.5*krok &
    data(:,2)>kdey-0.5*krok & data(:,2)<kdey+0.5*krok);
    pom=mean(data(ii,3));
    if ~isempty(pom) & ~isnan(pom), grid_data(radek,sloupec)=pom;
    end
end
end
end

```

Do kódu byla zahrnuta podmínka, která anuluje některé chybné hodnoty. Pokud je dané čtvercové pole prázdné nebo obsahuje chybnou nekonečnou hodnotu, dojde k přiřazení právě průměrné hodnoty výslednému bodu.

4.1.2 Výběr pro kruhové pole

Druhou variantu vytvoření výběrového pole zobrazuje následující kód. Bylo vytvořeno kruhové pole, ze kterého se vybírají body k výpočtu, v tomto případě pole vepsané čtverci. Na závěr dojde opět k anulování chyb.

```

%% vyplnění matice hodnotami bodů z kruhového pole metodou medián
radku=length(sour_y);
sloupcu=length(sour_x);
grid_data=zeros(radku,sloupcu);
for radek=1:radku
    for sloupec=1:sloupcu
        kdex=sour_x(sloupec);
        kdey=sour_y(radek);
        polomer=(krok/2);
        vzdaleni=sqrt((data(:,1)-kdex).^2+(data(:,2)-kdey).^2);
        ii=find(vzdaleni<polomer);
        pom=median(data(ii,3));
        if ~isempty(pom) & ~isnan(pom), grid_data(radek,sloupec)=pom;
        end
    end
end
end
end

```

Takovýto postup vytváření ekvidistantních bodů představuje jednoduchý výpočet a umožňuje rovněž využít různé metody vymezení polí pro výběr bodů. Jeho nevýhodou je časová náročnost výpočtu, z důvodu procházení všech bodů z matice a proto není postup vhodný pro zpracování objemnějších dat. Pro představu, výpočet matice o velikosti 256x256 bodů pro výběr ze čtvercového pole bodů o hraně 1 metr metodou průměr probíhal jednu až dvě hodiny. Proto bylo nezbytné vytvořit efektivnější způsob výpočtu, popsany v kapitole 4.2 Metoda mřížky.

4.2 Metoda mřížky

Efektivnější postup spočívá ve vytvoření mřížky, kterou se přeloží počáteční bodová vrstva a dle průměrování souřadnicových hodnot se každý bod přiřadí do své odpovídající buňky. Není tedy třeba procházet opakovaně všechny body, jako tomu bylo u první metody.

```
%% vytvoření mřížky a seznamu
xmin=floor(min(data(:,1)));
xmax=ceil(max(data(:,1)));
ymin=floor(min(data(:,2)));
ymax=ceil(max(data(:,2)));
sour_x=[1:(xmax-xmin+1)];
sour_y=[1:(ymax-ymin+1)];

clear seznam;
for i=1:length(sour_x),
    for j=1:length(sour_y),
        seznam.x(i).y(j).vycet=[];
    end
end

for rrr=1:length(data(:,1)),
    kam_x=round(data(rrr,1)-xmin+1);
    kam_y=round(data(rrr,2)-ymin+1);
    seznam.x(kam_x).y(kam_y).vycet=[seznam.x(kam_x).y(kam_y).vycet;
    rrr];
end
```

Odpovídající hodnota vypočítaná v tomto případě metodou modus se zapíše do středu každého pole o hraně 1x1 metr. Dle tolerance nula budou pro výpočet vybrány pouze body z metrového pole. Tolerance jedna přidá na každou stranu jeden metr, dojde tedy k výpočtu pro pole 3x3 metry. Také v tomto případě dochází na závěr k anulování chybných hodnot.

```
%% naplnění matice body dle mřížky metodou modus s tolerancí 0
mezx=length(sour_x);
mezy=length(sour_y);
grid_data=zeros(mezx,mezy);
for i=1:mezx,
    for j=1:mezy,
        tolerance=0;
        posunuti=[-tolerance:tolerance];
        kandidati=[];
```

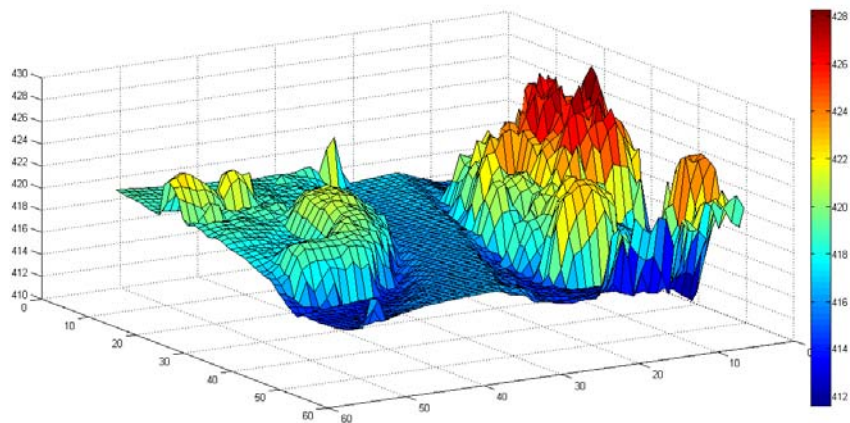
```

for iii=1:length(posunuti);
    for jjj=1:length(posunuti);
        kam_x=i+posunuti(iii);
        kam_y=j+posunuti(jjj);
        if kam_x>=1 & kam_x<=mezx & kam_y>=1 & kam_y<=mezy,
            kandidati=[kandidati;seznam.x(kam_x).y(kam_y).vycet];
        end
    end
end

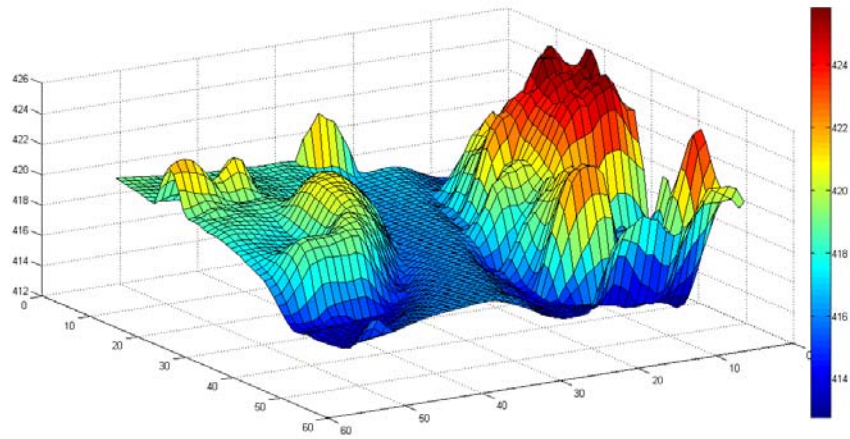
pom=mode(data(kandidati,3));
if ~isempty(pom) & ~isnan(pom), grid_data(i,j)=pom;
end
end
end
end

```

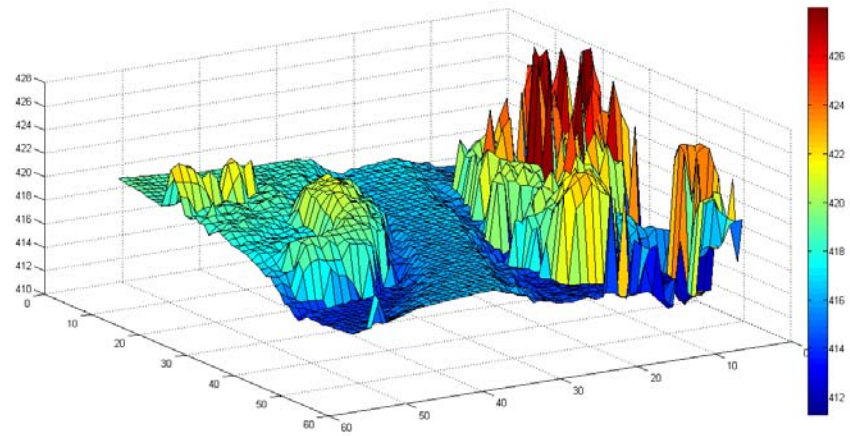
Takto zpracovaná ekvidistantní data je již možné získat za poměrně krátký časový úsek (v řádu jednotek vteřin). Ten ale samozřejmě se zvyšující se tolerancí nepoměrně roste. Bylo využito metody průměr, medián, modus, minimum a maximum a všechny metody byly vypočteny s tolerancí nula (výpočet pro pole 1x1 metr) a jedna (výpočet pro pole 3x3 metry). Se zvyšující se tolerancí narůstá shlazení výsledných dat, jak je vidět na obr. 7 a 9.



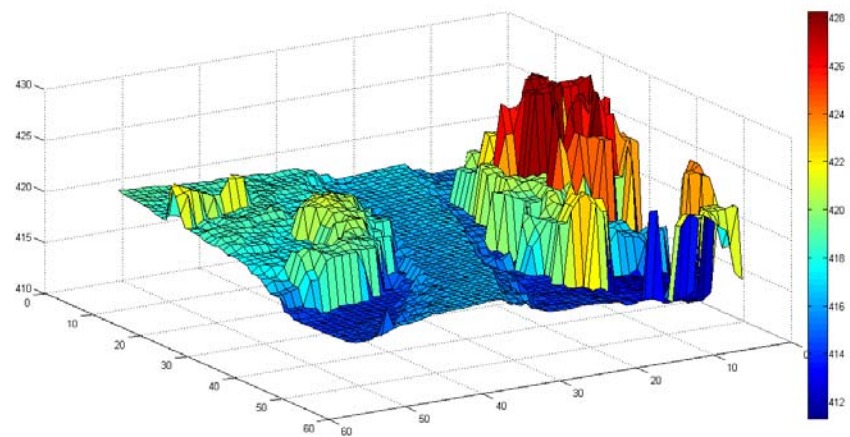
Obr. 6 Část ekvidistantních dat vypočítaná metodou průměr pro toleranci 0.



Obr. 7 Část ekvidistančních dat vypočítaná metodou průměr pro toleranci 1.



Obr. 8 Část ekvidistančních dat vypočítaná metodou modus pro toleranci 0.



Obr. 9 Část ekvidistančních dat vypočítaná metodou modus pro toleranci 1.

V tuto chvíli je možné zvolit pro vlastní provedení waveletové transformace jeden ze dvou možných postupů. Do dalšího zpracování budou vstupovat pouze data vytvořená zpracováním dle kapitoly 4.2 Metoda mřížky pro její rychlost provedení výpočtu a možnost nastavení tolerance.

Takto zpracovaná data mají vždy rozestup bodů jeden metr, vypočtena jsou pro toleranci nula a jedna a zpracována jsou různými metodami výpočtu. Do závěrečného porovnání však vstoupí pouze data vytvořená metodou průměru pro toleranci nula a jedna.

5 WAVELETOVÁ TRANSFORMACE

V tuto chvíli je možné zvolit pro vlastní provedení waveletové transformace jeden ze dvou postupů. Je možné jimi docílit podobných výsledků, první postup je však více intuitivní a obsahuje grafické znázornění postupné analýzy. To je výhodné pro okamžitou zpětnou vazbu a snazší identifikaci výsledného obrazu a tedy i jednotlivých prvků, které v sobě obsahuje. Umožňuje okamžitou úpravu přidáváním či ubíráním počtu jednotlivých waveletových koeficientů a tím snazší naladění vhodného výstupu.

Nevýhodou tohoto postupu je však samotné prostředí pro waveletovou analýzu. To totiž vyžaduje data složená nejen z ekvidistantních bodů, ale také ze stejného počtu řádků a sloupců a v neposlední řadě i hodnot v rozmezí 0–256. Před analýzou je tedy nezbytné provést další výpočty, které vyvažují výhodu lepší práce s transformováním. Avšak největší nevýhodou tohoto přístupu je fakt, že jeho výsledky produkují pro výškovou souřadnici pouze celá čísla. Tím je celý proces značně ochuzen. K cílovým výstupům byl vzhledem k výše popsáným důvodům použit druhý postup.

Druhý postup se skládá pouze z programového kódu. Umožňuje vstup ekvidistantních dat bez dalších úprav, výsledky analýzy je však nutné převádět do příkazového okna a až poté je možné je zobrazit. Tento postup tedy nabízí rychlejší proces zpracování než předchozí, úprava waveletových koeficientů pro změnu výstupu je pak ovšem delší. Pro názornost a možnost dalšího použití budou představeny oba postupy.

Oběma postupy byly testovány různé míry nastavení waveletových koeficientů a zjišťováno jejich chování. Pozornost celého zpracování se však ubírá směrem k extrakci takové kombinace frekvencí, které mohou být určeny jako nosné frekvence samotného terénu.

5.1 Postup WT využitím nástrojů wavemenu

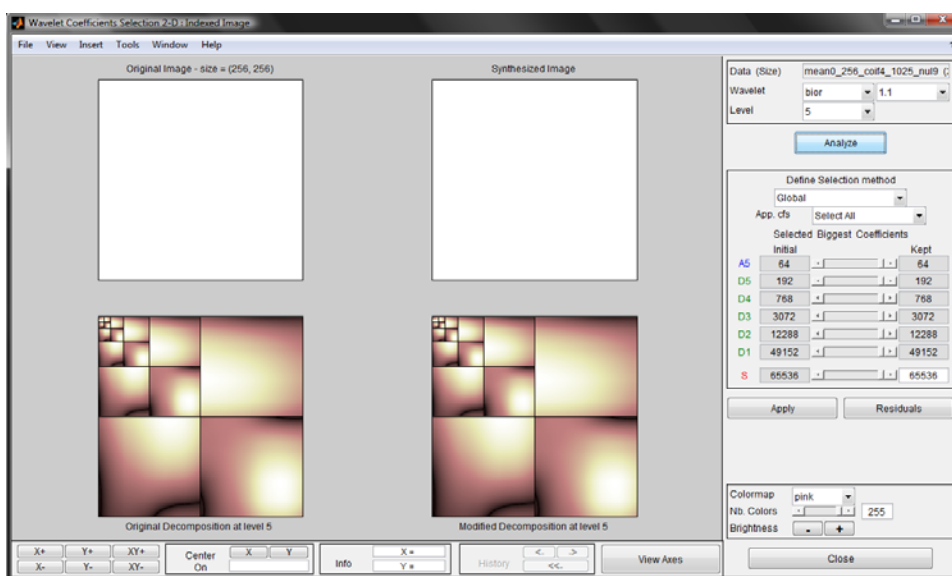
Vzniklou matici bodů s hodnotami výšek v rozmezí několikaset metrů je tedy nutné převést na matici s hodnotami 0–256 metrů. Takováto transformace proběhla dle programového kódu níže.

```
%% Upravení hodnot na pole 256x256 pro vstup do WT
mean_256=(mean(10:265,10:265));
mean_256(mean_256==0)=mean(mean(mean_256));
mean_256_minus=(mean_256-(min(min(mean_256))));
mean_256_minus_deleno=(mean_256_minus/(max(max(mean_256_minus))));
mean_256_minus_deleno_krat=256*(mean_256_minus_deleno);
```

Nejdříve byla vybrána data souměrné velikosti, v tomto případě 256x256. Pak došlo k nahrazení nul průměrnou hodnotou, aby výsledné body nedosáhly záporných hodnot. Následně bylo od základní vrstvy odečteno minimum, čímž bylo dosaženo nuly jako spodní hranice výškové hodnoty. Dále byla data dělena maximem, aby bylo vytvořeno rozmezí výšek mezi 0 a 1. Na závěr byla celá vrstva vynásobena 256, čímž bylo docíleno

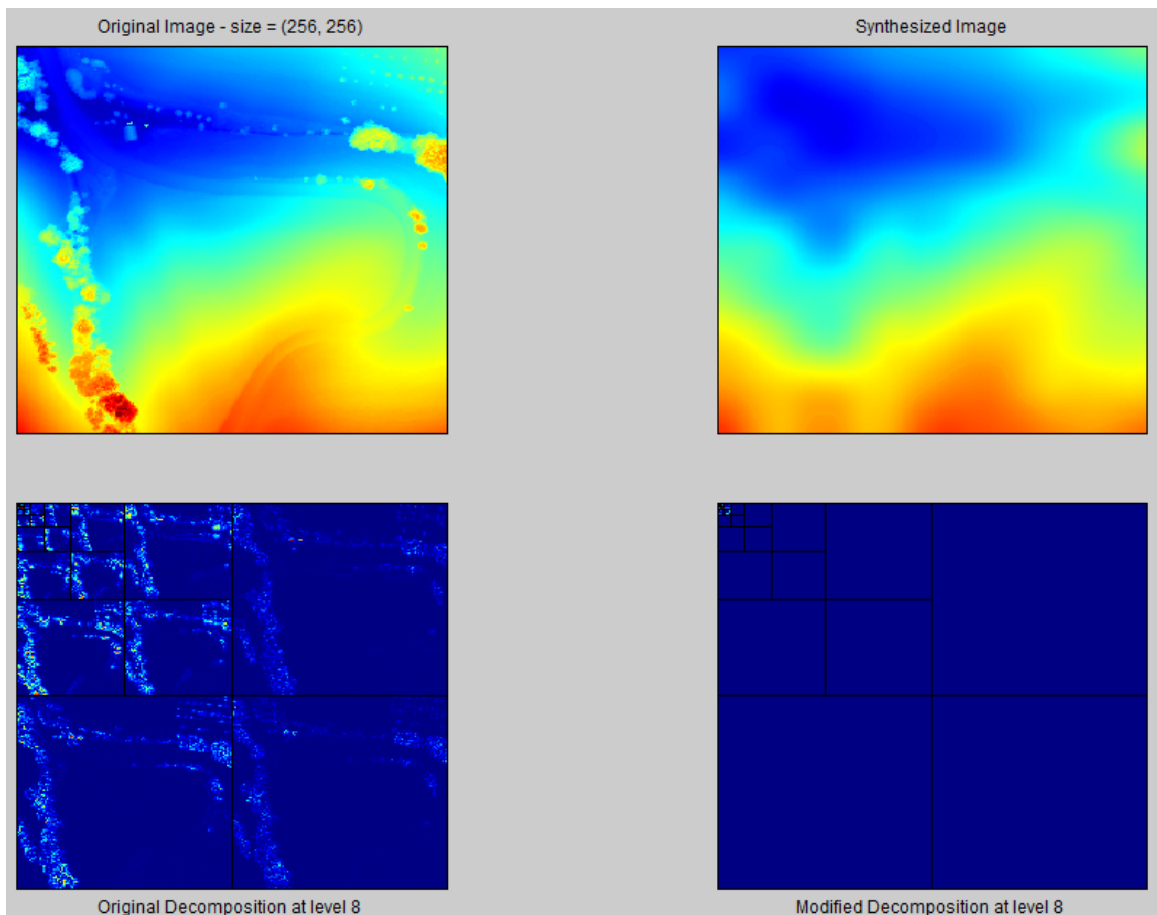
výškových hodnot od 0 do 256. Jedině takováto data mohla vstoupit do procesu rozkladu waveletových koeficientů v nástroji *wavemenu* z Wavelet Toolboxu.

Celé prostředí (obr. 10) se skládá ze dvou hlavních částí – obrazové plochy (obr. 11) a ovládací plochy (obr. 12). Obrazová plocha slouží k zobrazení původních a zpracovaných dat a jejich rozložení dle úrovně rozkladu před a po úpravě waveletových koeficientů. Ovládací plocha umožňuje spustit waveletovou analýzu a následnou úpravu jednotlivých úrovní rozkladu pomocí úprav waveletových koeficientů.



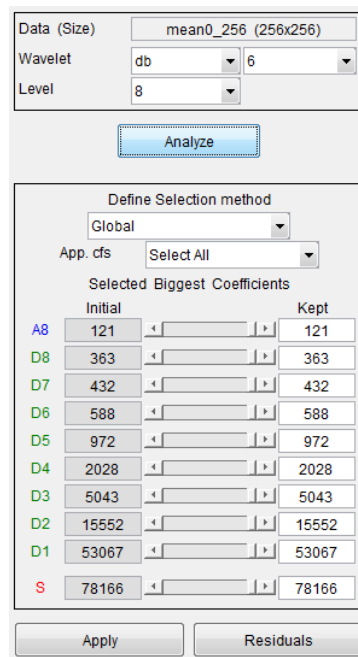
Obr. 10 Prostředí Wavelet Coefficients Selection 2-D (zdroj: MATLAB).

Postup funguje následujícím způsobem: z *wavemenu* se vybere *Wavelet Coefficients Selection 2-D*. V právě zobrazeném okně se vybere *File – Import Image from Workspace*, kde se zvolí souměrná sada bodů s hodnotami 0–256. Nyní jsou zvolená data zobrazena v levém horním čtverci. Na ovládací ploše se vybere mateřský wavelet, který bude pro analýzu použit a počet úrovní rozkladu. Čím více je úrovní, tím většího rozložení dat na detailní frekvenční části lze dosáhnout. Poté je možné spustit analýzu příslušným tlačítkem. Tím dojde k analýze obrazu dle nastaveného počtu úrovní a zpětné syntéze obrazu, přičemž byl použit maximální počet všech koeficientů a tak je výsledný výstup v pravém horním rohu totožný s původními daty.



Obr. 11 Obrazová plocha pro analýzu dle waveletových koeficientů s importovanými daty 256x256 metrů (zdroj: MATLAB).

Nyní lze vidět na ovládací ploše jednotlivé úrovně rozkladu společně s posuvníky. Těmito posuvníky nebo přímo vyplněním konkrétního čísla dojde k úpravě počtu waveletových koeficientů. Nižší úrovně rozkladu (D1) znamenají zpravidla vysoké frekvence a naopak vyšší úrovně rozkladu (D8) zastupují nízké frekvence. Změnami počtu waveletových koeficientů tedy dochází k ubírání (přidávání) výsledných frekvencí v syntetizovaném výstupu.



Obr. 12 Ovládací plocha pro analyzování dle waveletových koeficientů (zdroj: MATLAB).

Výsledná data lze exportovat zpět do *Workspace* jako proměnou pomocí *File – Export Image to Workspace*. To je však, jak již bylo zmíněno, nutné převést inverzním provedením předešlých výpočtů zpět na reálné výškové hodnoty, které budou po transformaci tímto způsobem zaokrouhleny na celá čísla. Tento postup neprošel do dalšího zpracování, protože neumožňuje exportovat výsledné hodnoty jinak než jako celá čísla.

5.2 Postup WT použitím zesílení a zeslabení

Do tohoto postupu může vstupovat matice bodů s přirozenými hodnotami výšky libovolných rozměrů. Postup využívá rozklad a poměrné zesílení (potlačení) dané úrovně waveletových koeficientů. Kód zpracuje data v proměnné „obr“ dle počtu úrovní rozkladu „N“ na základě vektoru „utlumpy“. Právě tento vektor ovlivňuje výsledný terén a jeho hodnoty budou popisovány v průběhu celé práce. Rozklad zahrnuje i poslední aproximaci a tím má o jednu složku navíc. Následující kód popisuje rozklad pro wavelet Daubechies 6, výsledek uloží do proměnné „vysledek“.

```
%zesileni (potlaceni) waveletovych koeficientu
wname='db6';
utlumpy=[1 1 0.25 0 0 0 0 0 0];
N=length(utlumpy)-1;
[C,S] = wavedec2(obr,N,wname);
pom=utlumpy(1)*ones(1,S(1,1)*S(1,2));
for wkomponenta=1:N,
```

```

pom=[pom
utlumpy(wkkomponenta+1)*ones(1,3*S(wkkomponenta+1,1)*S(wkkomponenta+1,2))
];
end
C=C.*pom;
vysledek=waverec2(C,S,wname);

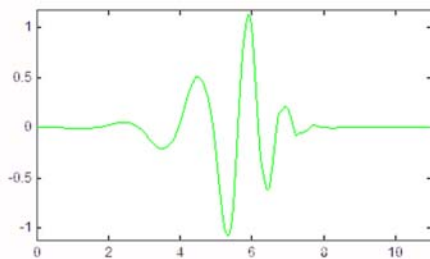
```

Funkce "wavedec2" vytvoří do vektoru "C" koeficienty waveletového rozkladu podle zadaných parametrů (počet úrovní a jméno waveletu). Dle potřeby jednotlivých úrovní lze upravit příslušné koeficienty. Jinými slovy tento postup rozdělí signál na jednotlivé frekvenční části, které se upravené dle útlumů sečtou. Pokud se nachází ve vektoru útlumy nula, příslušná úroveň se vymaže, je-li tam číslo jedna, úroveň zůstane zachována a čísla v intervalu od nuly do jedné ji spojitě upravují.

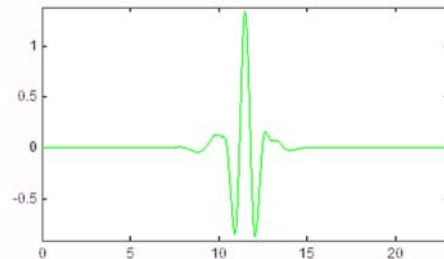
Tento postup byl zvolen jako jediný vhodný a byl proveden pro území o velikosti 256x256 metrů využitím waveletu Daubechies 6 a Coiflet 4 s metodou průměru a tolerancí 0 a 1.

5.2.1 Stanovení hodnot waveletových koeficientů

Pro stanovení hodnot waveletových koeficientů byly testovány dva vybrané mateřské wavelety – wavelet Daubechies 6 (obr. 13) a wavelet Coiflet 4 (obr. 14). Každý má jiný tvar a tím i jinak vystihuje konkrétní části reliéfu. Každý wavelet byl vyzkoušen s největším počtem úrovní rozkladu, jelikož rozebírá data do největších možných detailů.



Obr. 13 Wavelet Daubechies 6



Obr. 14 Wavelet Coiflet 4.

Postup byl následující: po načtení dat dojde k rozkladu a jejich zpětné syntéze. Pokud se koeficienty neupraví, jsou defaultně nastaveny na stejné plné hodnoty a složený obraz je tedy totožný s obrazem vstupním. Rozložená data tedy obsahují různé druhy frekvencí. Separaci vysokých frekvencí a tedy vyšších úrovní rozkladu (např. A8) lze dosáhnout samotného terénu. Je však nutné vyzkoušet mnoho nastavení, neboť se každá část reliéfu chová jinak, každý wavelet působí na data jiným způsobem a použité metody se různí.

Pro wavelet Daubechies i Coiflet bylo použito nastavení pro testování separace vysokých frekvencí a tím získání nízkých frekvencí následovně:

```

utlummy=[1 1 1 0.75 0 0 0 0 0];
utlummy=[1 1 1 0.5 0 0 0 0 0];
utlummy=[1 1 1 0.25 0 0 0 0 0];
utlummy=[1 1 1 0 0 0 0 0 0];
utlummy=[1 1 0.75 0 0 0 0 0 0];
utlummy=[1 1 0.5 0 0 0 0 0 0];
utlummy=[1 1 0.25 0 0 0 0 0 0];

```

Takovéto nastavení potlačení (zesílení) různých frekvencí bylo použito pro testování podobnosti nízkých frekvencí s terénem.

5.2.2 Vyhlazení chybných hodnot

Data pořízená leteckým laserovým skenování obsahují i přes veškeré úpravy řadu chybných hodnot výškové souřadnice. Část z nich byla odstraněna již při výpočtu ekvidistantních dat. Byly to chyby, které měly přiřazenu hodnotu nekonečno. Dalším případem byly body vzniklé v poli, které žádné body neobsahovaly a byly nahrazeny průměrem.

Mnoho chybných hodnot však bylo stále obsaženo v datech. Bylo komplikované je odstranit, protože ačkoli vyčnívaly významně nad úroveň terénu, málokdy byly vyšší než maximální výška (nižší než minimální výška). Metoda jejich odstranění je rovněž příkladem využití waveletové transformace. Poté, co bylo dosaženo waveletovou transformací pouze nízkých frekvencí v podobě samotného terénu, byl tento terén odečten od původní vrstvy ekvidistantních dat. Tím zbyly pouze vysokofrekvenční hodnoty v téměř rovinném zobrazení a bylo snadné takové výkyvy odhalit a odstranit.

```

kandidati=(relief-mapa)>3;
mapa(kandidati)=relief(kandidati);
kandidati=(relief-mapa)<-15;
mapa(kandidati)=relief(kandidati);

```

Proměnná „kandidati“ je vypočtena jako rozdíl proměnných „relief“ a „mapa“ větší než 3 a menší než -15. Postup počítá s proměnnou „mapa“ jako s původními ekvidistantními daty a s proměnnou „relief“ jako se separovaným terénem. První výpočet vyhlazuje chybné hodnoty pod úrovní původního terénu větší než 3 metry a druhý výpočet vyhlazuje chybné hodnoty nad úrovní původního terénu větší než 15 metrů.

5.2.3 Výstup dat

Všechny vzorky bylo nutné exportovat z matice do vhodného formátu pro program ArcGIS. (program byl zvolen z důvodu jeho nabídky analýz mapové algebry a jeho možnostem vizualizace). Jako formát byl použit univerzální formát *.txt. Export vypadal následovně:


```

%% Uložení dat do *.txt [x,y,z]
xmin=floor(min(data(:,1)));
ymin=min(data(:,2));
[radku,sloupcu]=size(vysledek);
pro_export=zeros(radku*sloupcu,4);
for radek=1:radku
    for sloupec=1:sloupcu
        qqg=(radek-1)*radku+sloupec;

pro_export(qqg,:)= [qqg, radek+xmin, sloupec+ymin, vysledek(radek, sloupec)
    ];
    end
end

fid = fopen('c:\MATLAB\vysledek.txt','wt');
formaty='%10.0f\t %10.2f\t %10.2f\t %15.3f\n';
fprintf(fid,'id\tx\ty\tz\n');
fprintf(fid,formaty,pro_export');
fclose(fid);

```

Všechny vzorky bylo nutné exportovat z matice do vhodného formátu pro vstup do programu ArcGIS, jak ukazuje tento kód. Pro hodnoty výšky jsou nastaveny tři desetinná místa. Každý sloupec je pojmenován odpovídajícím názvem.

6 POROVNÁVÁNÍ A HODNOCENÍ VÝSTUPŮ

Hodnocení a porovnávání výstupů waveletové transformace proběhlo v prostředí programu ArcGIS. Proces byl založen na porovnávání rastrových sad, které vznikly jednak převodem z lidarových dat (dále rovněž referenční data) a také převodem ekvidistantních dat jako výsledků waveletové analýzy (využitím nástrojů *LAS to Multipoint* a *Point to Raster*).

Z různých možností nastavení a variant výstupních dat zpracovaných WT byla vybrána pro hodnocení pouze data vypočtená metodou průměr, tolerancí 0 a 1, použitím waveletů Daubechies 6 a Coiflet 4 pro území 256x256 metrů.

WT byla využita pro separaci vysokofrekvenčních složek reliéfu a tím k získání samotného terénu. Obdobně lze hodnotit i opačný postup získávání vysokofrekvenčních informací, tímto postupem se však tato práce nezabývá.

Porovnávána byla vždy data stejného území se stejnou velikostí jedné buňky (1 metr), stejnou metodou výpočtu a stejnou tolerancí výběru bodů. K porovnávání byla vybrána oblast dat velikost 256x256 metrů, která se nachází v rozsahu původních lidarových dat.

Aby bylo možné srovnat výsledky waveletové analýzy s původním terénem, bylo nejdříve třeba najít hodnoty útlumů, kde se výsledný terén nejvíce podobá skutečnosti. To znamená vyhledat hranice zesílení (zeslabení) úrovní waveletového rozkladu, které budou oddělovat již příliš plochý terén při přílišném zeslabení a terén s již velkým množstvím vyšších frekvencí způsobený nadměrným zesílením. Hranice byly vytvořeny na základě vizuálního porovnání jednotlivých výstupů a určeny pro konkrétní útlumy jako příliš vysokofrekvenční informace na jedné straně a jako příliš nízkofrekvenční informace na druhé straně. Výsledné hraniční plochy terénu jsou zobrazeny na obr. 17 a obr. 18.

Dále bylo třeba porovnat, jak se liší výstupy z WT pro použití různých tolerancí, jimiž byly tolerance 0 (pole 1x1 metr) a 1 (3x3 metry). Pro srovnání byla použita první oblast dat s Daubechies waveletem.

Dalším cílem srovnávání a hodnocení bylo určení rozdílů, mezi použitými mateřskými wavelety. Pro určení patrných rozdílů bylo pro začátek použito jejich vizuálního srovnání. Byly hodnoceny wavelety Daubechies 6 a Coiflet 4.

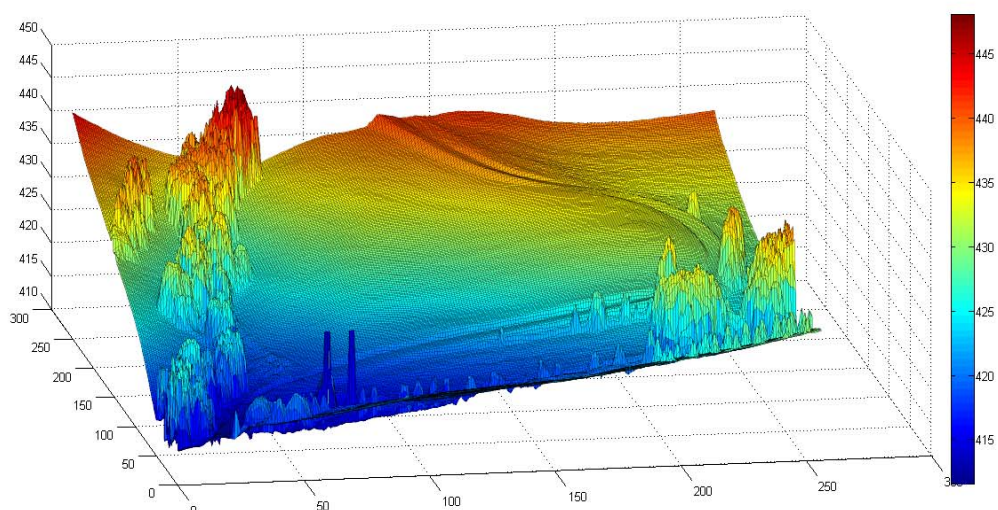
Následujícím krokem bylo již samotné porovnávání terénů. Porovnáván byl vždy výstup z waveletové transformace jako vrstva bodů samotného terénu převedená na rastrovou vrstvu. Takovýto výstup byl konfrontován s původními lidarovými daty převedenými rovněž na rastr o stejné velikosti buňky 1 metr metodou průměru. K tomuto účelu byl použit nástroj *Raster Calculator* a *Raster Properties*. První z nich byl použit k odečtení sady vytvořené WT od sady původních ekvidistantních dat. Nástroj *Raster Properties* byl využit k zjištění statistických informací.

Na rozdílech vrstev popsanych v předchozím odstavci je popsáno, jak se vyvíjí změny analyzovaného terénu vůči referenčním datům. Je zde ukázáno, které hodnoty se shodují s terénem referenčních dat a jejich rozdíl se tedy blíží nule. Zatímco vyšší záporné

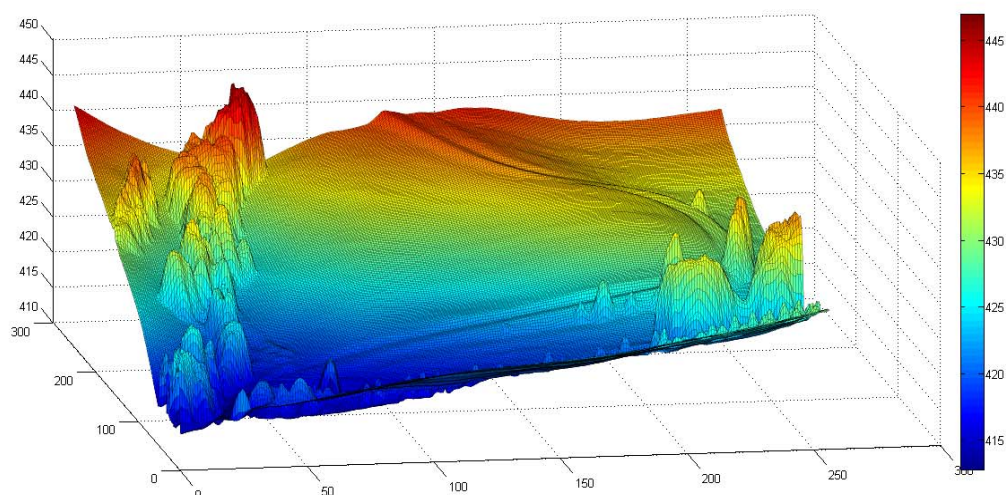
hodnoty naznačují nadhodnocení terénu vzniklého WT a vyšší kladné hodnoty ukazují na podhodnocení výstupů z WT. Vizuální porovnání je doplněno statistickými údaji těchto rozdílů jako průměr a směrodatná odchylka.

6.1 Porovnání metod a nastavení

Analyzované území se nachází v jihozápadní části původních lidarových dat. Jeho minimální nadmořská výška činí 412 metrů, maximální je 448 metrů. Toto území bylo vybráno z několika důvodů. Jedná se o část, kde se nachází všechny typy vegetace dle tabulky ASPRS, obsahuje plynulý mírně zvlněný terén s několika ostřejšími změnami a také touto částí prochází komunikace, dobře patrná z obr. 15. Rovněž lze pozorovat shlazení modelu v případě použití tolerance 1, viz obr. 16. Část tedy obsahuje mnoho prvků, které je možné konfrontovat s modely terénu vystupujícími z waveletové transformace.

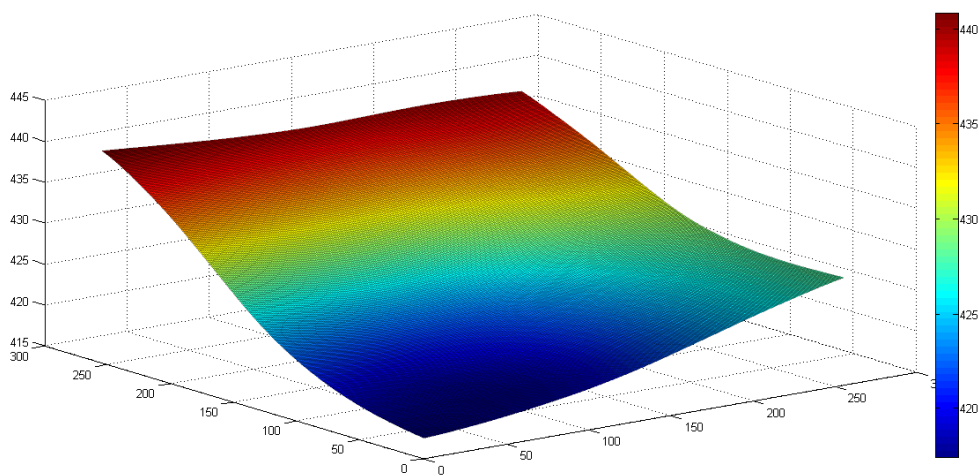


Obr. 15 Analyzované území pro metodu průměr s tolerancí 0.

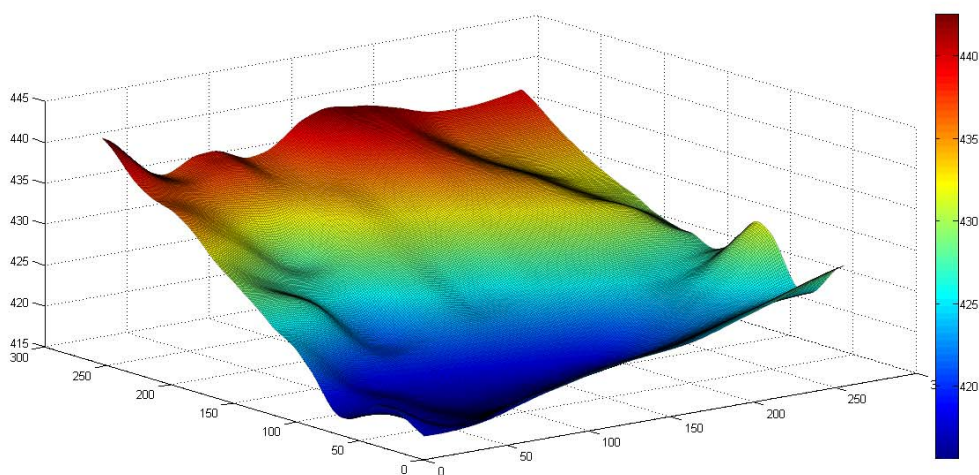


Obr. 16 Analyzované území pro metodu průměr s tolerancí 1.

Pro určení hodnot zesílení (zeslabení) úrovní rozkladu waveletových koeficientů a jejich porovnávání bylo třeba určit interval, ve kterém má takovéto hledání smysl. To bylo provedeno vizuálním srovnáním výstupů pro jednotlivé hodnoty zesílení a výsledky jsou patrné z obr. 17 a obr. 18. Je zde vidět, jaké hodnoty ještě ovlivňují formu terénu a naopak jaké ho již příliš nemění. Hodnoty útlumů nižší než [1 1 0 0 0 0 0 0] představují terén příliš plochý pro použití skutečně nízkých frekvencí a vyšší hodnoty než [1 1 1 1 0 0 0 0] naopak přidávají terénu nadbytečné vysoké frekvence. Jak je z těchto obrázků patrné, pro vytvoření věrného modelu terénu bylo nežádoucí využít širšího intervalu hodnot pro zesílení či potlačení jednotlivých úrovní.

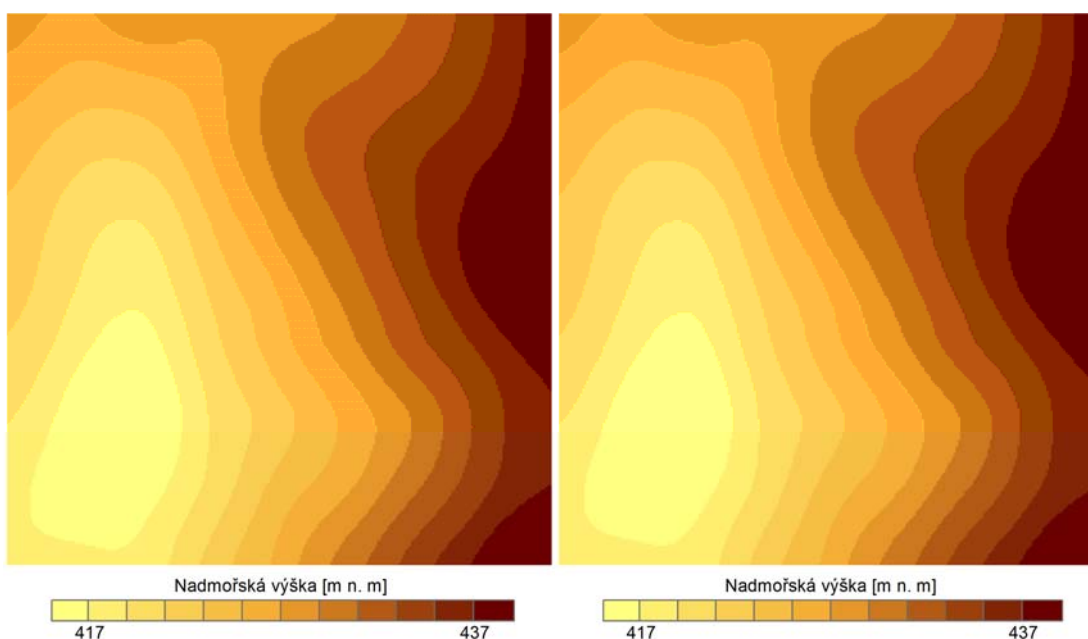


Obr. 17 Území při nastavení útlumů [1 1 0 0 0 0 0 0].



Obr. 18 Území při nastavení útlumů [1 1 1 1 0 0 0 0].

Veškerá bodová data, jak původní ekvidistantní tak ta zpracovaná waveletovou transformací, byla vytvářena pro toleranci 0 a 1. Jak ale ukazují obr. 19 a obr. 20, v porovnání těchto dvou tolerancí jsou rozdíly velice malé a nemá tedy zvláštní význam zahrnout obě tolerance do celkového hodnocení (intervaly hodnot odpovídají kvantilovému rozdělení). Do dalšího porovnávání tedy vstoupí pouze data vytvořená pomocí tolerance 0 s tím, že data pro toleranci 1 jsou oproti nim mírně shlazená, jak ukazují hodnoty směrodatné odchylky v tab. 3. Dle tab. 2 je zřejmé, jak malé jsou rozdíly mezi tolerancí 0 a 1. Z 65 536 bodů se svým zařazením do jiného intervalu lišilo pouhých 1 750 bodů (hodnoty byly vytvořeny reklasifikací dat z obr. 19 a obr. 20). Pro porovnání byly vybrány datové sady analyzované waveletovou transformací dle útlumů [1 1 1 0.75 0 0 0 0 0] s využitím waveletu Daubechies 6.



Obr. 19 Data pro toleranci 0.

Obr. 20 Data pro toleranci 1.

Tab. 2 Srovnání množství pixelů jednotlivých intervalů tolerancí 0 a 1

interval	tolerance 1	tolerance 0	rozdíl
1	5113	5364	251
2	5731	5646	85
3	5501	5452	49
4	5526	5523	3
5	5508	5532	24
6	5712	5346	366
7	5605	5657	52
8	5474	5435	39
9	5309	5553	244

10	5226	5514	288
11	5317	5333	16
12	5514	5181	333

Tab. 3 Srovnání průměru a směrodatné odchylky tolerancí 0 a 1

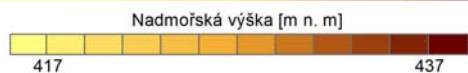
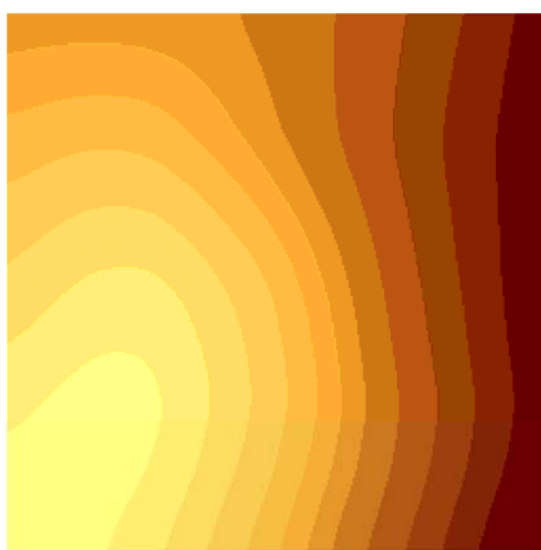
metoda	tolerance 0	tolerance 1
průměr	442,05	442,06
směr. odchylka	6,9693	6,9687

Zatímco hodnoty obou tolerancí jsou velice podobné, použití různých mateřských waveletů již vykazuje značné rozdíly. K porovnání byly vybrány wavelety Daubechies 6 a Coiflet 4. K vizuálnímu porovnání rozdílů mezi těmito dvěma wavelety byly zvoleny útlumy [1 1 1 0.75 0 0 0 0] a [1 1 0.25 0 0 0 0 0]. Opět se jedná o původní území velikosti 256x256 metrů.

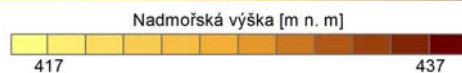
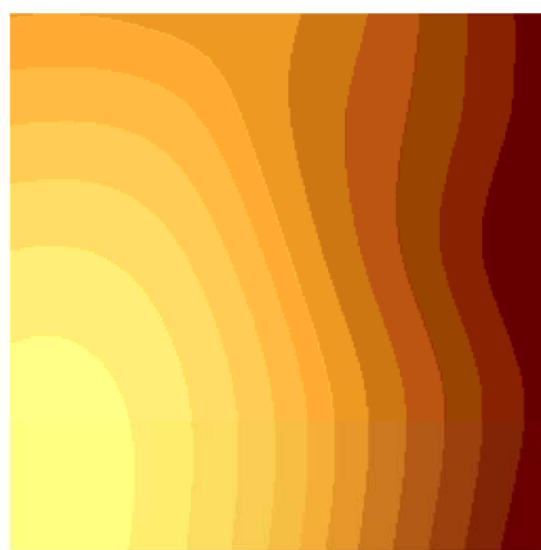
Daubechies wavelet

Coiflet wavelet

útlumy [1 1 0.25 0 0 0 0 0]

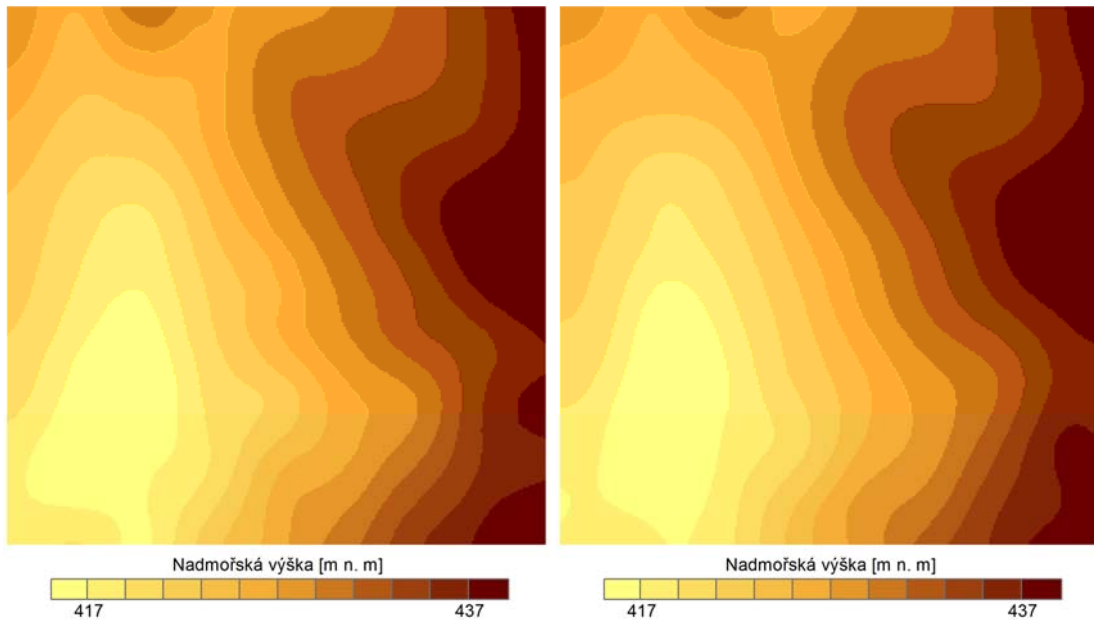


Obr. 21 Data nízkofrekvenčního terénu.



Obr. 22 Data nízkofrekvenčního terénu.

útlumy [1 1 1 0.75 0 0 0 0]



Obr. 23 Data vysokofrekvenčního terénu.

Obr. 24 Data vysokofrekvenčního terénu.

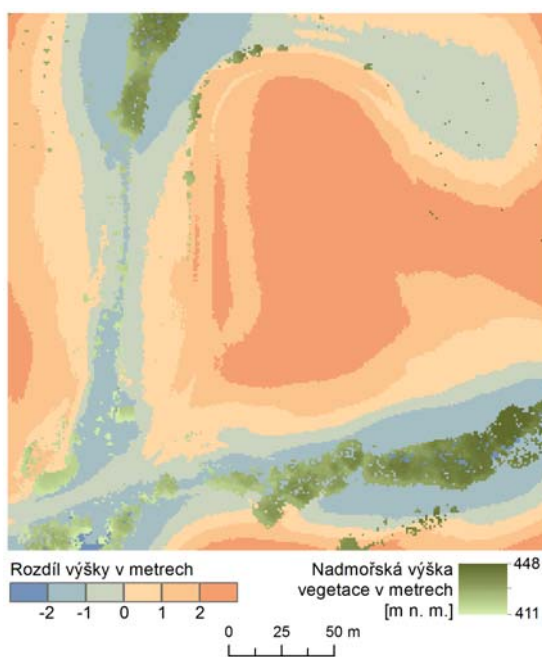
Rozdíly patrné mezi obr. 21 a obr. 22 respektive obr. 23 a obr. 24 dokazují, že dochází ke změnám v rozložení výškových hodnot, což znamená, že volba různého mateřského waveletu má za následek nezanedbatelné změny výškových poměrů terénu. Data vytvořená pro rozdílný mateřský wavelet má tedy význam porovnávat a hodnotit.

6.2 Srovnání mateřských waveletů

V této kapitole jsou srovnávány výstupy WT reprezentující terén a původní lidarová data (třída 2 dle klasifikace ASPRS), obě sady převedené na rastr s velikostí buňky 1x1 metr.

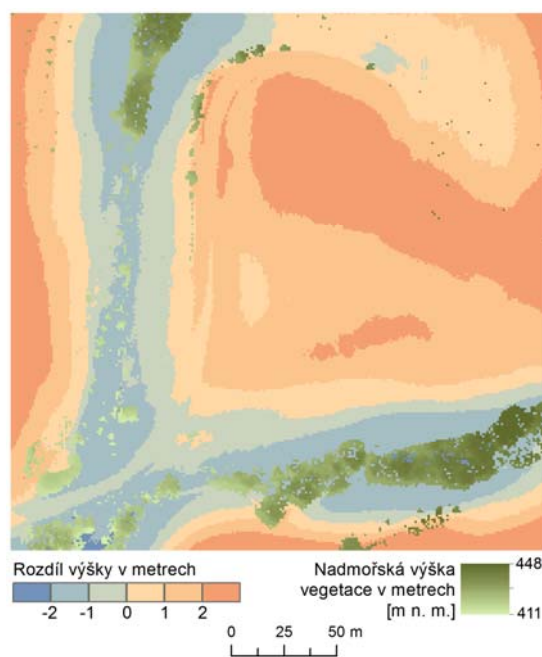
Barevná škála volí studené barvy pro záporné hodnoty a teplé barvy pro kladné hodnoty. Takže použití teplých barev na jedné straně značí kladný rozdíl, a tedy podhodnocení terénu z WT, barvy studené ukazují záporné hodnoty rozdílu a tím nadhodnocení terénu z WT. Barva vegetace byla zvolena pro jasného odlišení od terénu a logickou podobnost.

Daubechies wavelet

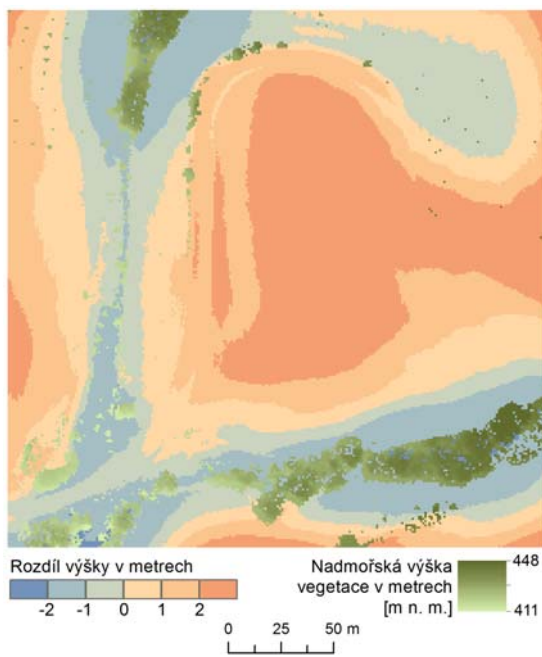


Obr. 25 Útlumy [1 1 0.25 0 0 0 0 0].

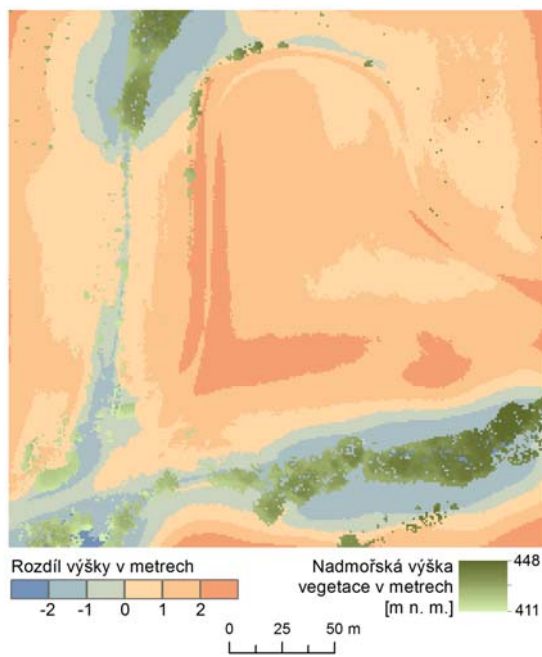
Coiflet wavelet



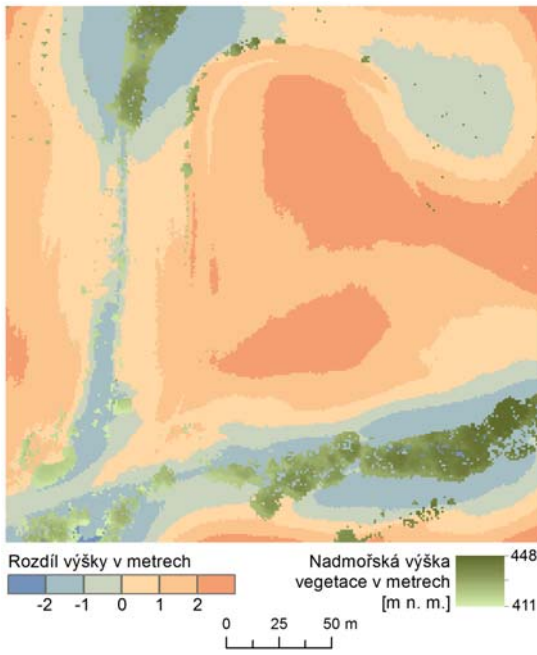
Obr. 26 Útlumy [1 1 0.25 0 0 0 0 0].



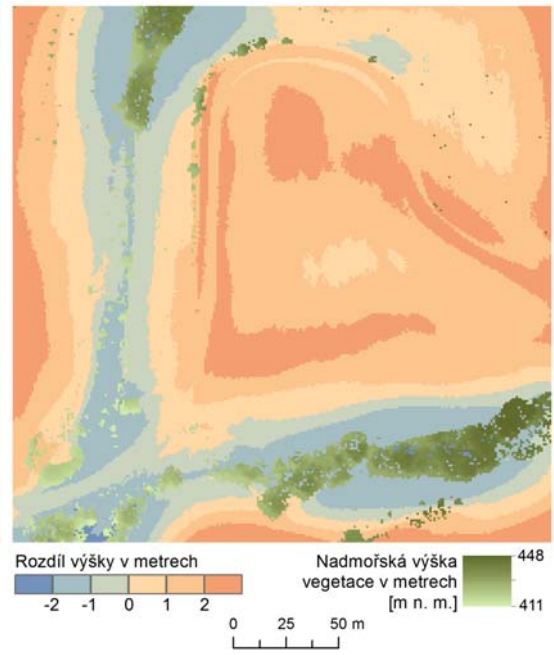
Obr. 27 Útlumy [1 1 0.5 0 0 0 0 0].



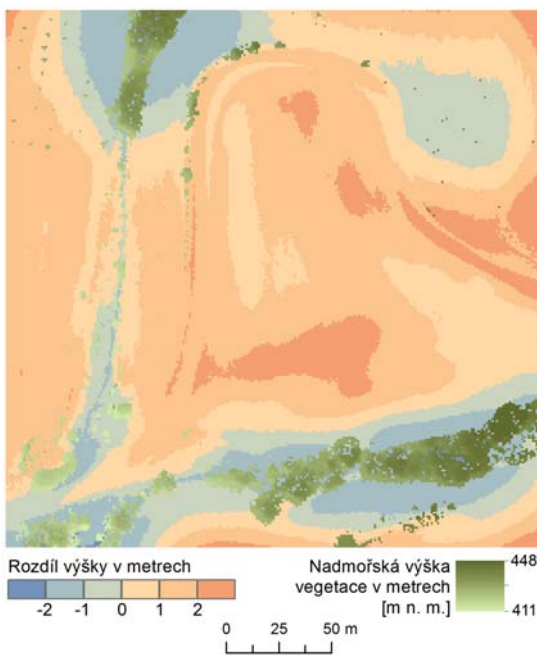
Obr. 28 Útlumy [1 1 0.5 0 0 0 0 0].



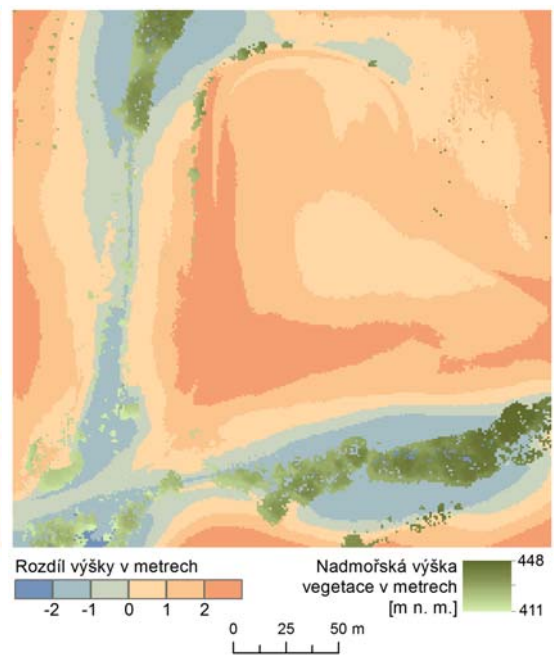
Obr. 29 Útlumy [1 1 0.75 0 0 0 0 0].



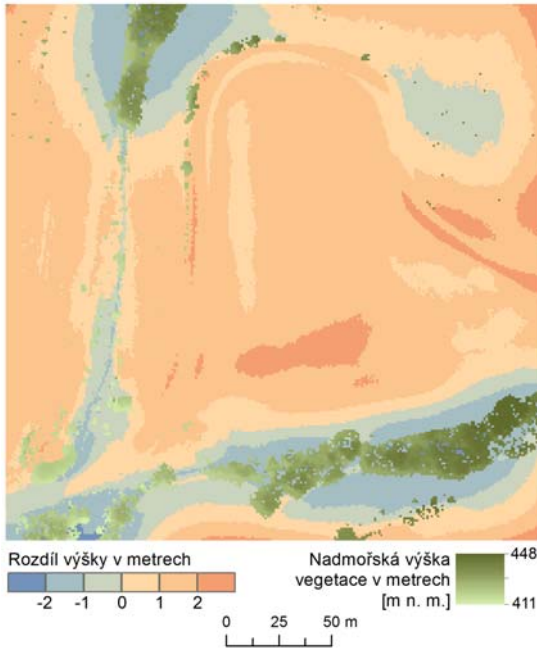
Obr. 30 Útlumy [1 1 0.75 0 0 0 0 0].



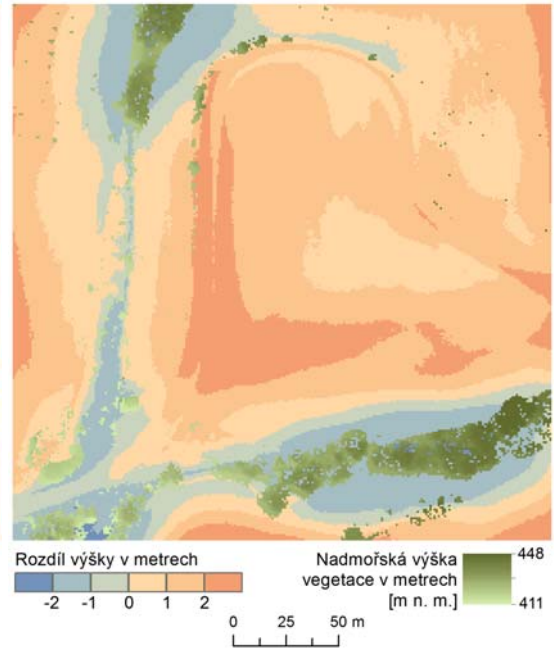
Obr. 31 Útlumy [1 1 1 0 0 0 0 0].



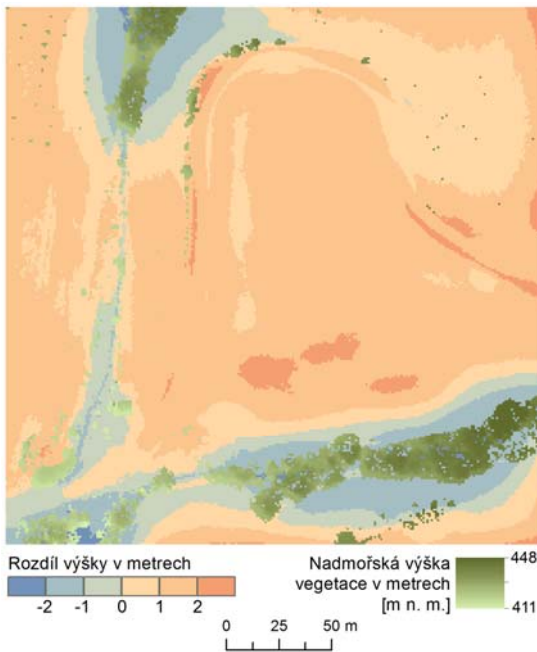
Obr. 32 Útlumy [1 1 1 0 0 0 0 0].



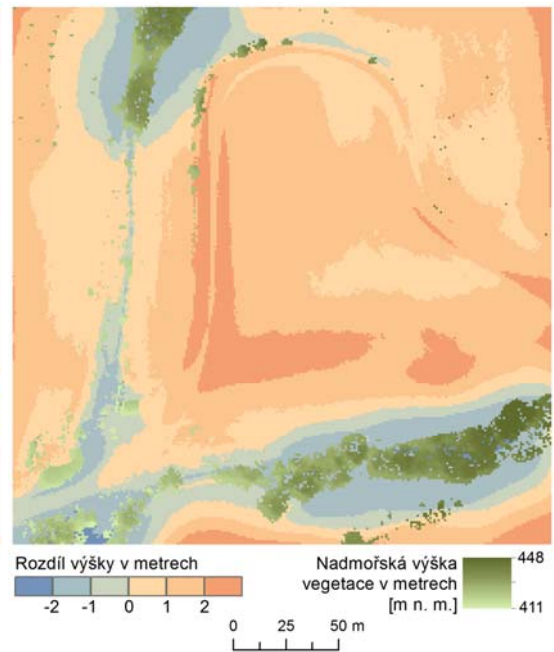
Obr. 32 Útlumy [1 1 1 0.25 0 0 0 0].



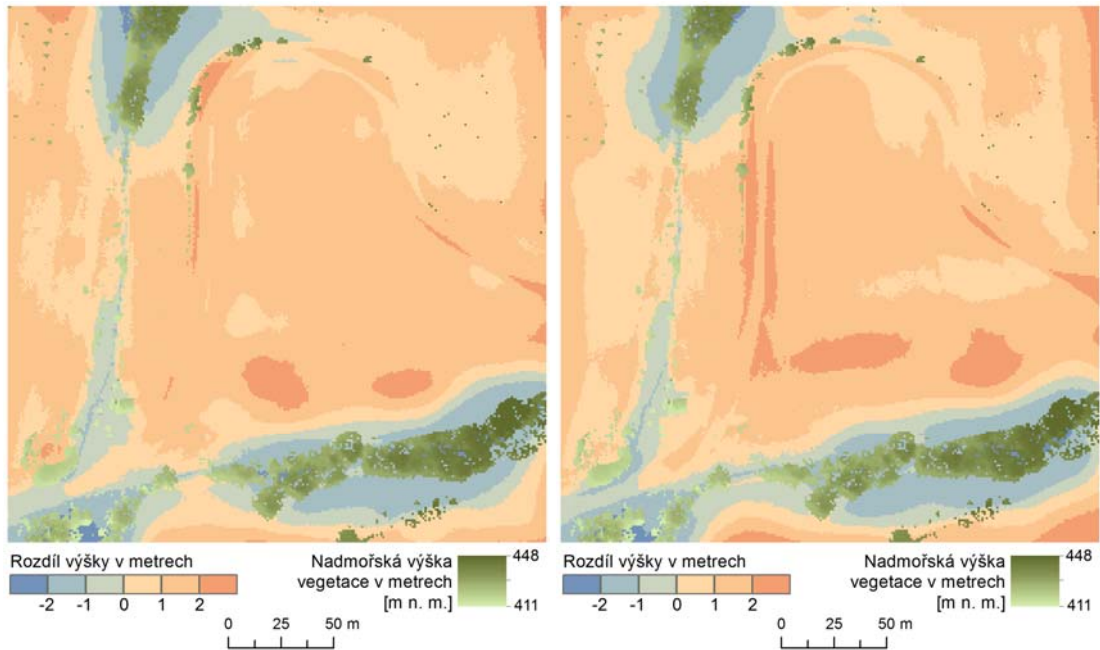
Obr. 33 Útlumy [1 1 1 0.25 0 0 0 0].



Obr. 34 Útlumy [1 1 1 0.5 0 0 0 0].



Obr. 35 Útlumy [1 1 1 0.5 0 0 0 0].



Obr. 36 Útlumy [1 1 1 0.75 0 0 0 0 0].

Obr. 37 Útlumy [1 1 1 0.75 0 0 0 0 0].

Srovnání vychází od nižších frekvencí a postupuje přidáváním vyšších frekvencí. Odstíny modré barvy znamenají, že je analyzovaný terén vyšší než jeho referenční vrstva, červené naopak ukazují nižší hodnoty výšky než referenční vrstva.

- Hned z prvního srovnání je patrné, že terén s využitím waveletu Daubechies (dále DB) je oproti terénu s waveletem Coiflet (dále CO) podhodnocený v místech sytější červené barvy a nachází se tedy pod ním, zatímco v místech sytější modré je naopak nadhodnocen, nachází se tedy nad ním. Modré barvy v obraze věrně kopírují vegetaci, a tedy složky vyšších frekvencí.
- Druhé srovnání ukazuje velice dobrou podobnost CO s původním terénem, DB velice zaostává v kladných i záporných hodnotách.
- Ve třetí variantě se vyrovnávají výškové hodnoty DB, protože ubývá extrémů na obou stranách, naopak CO si na obou stranách spíše pohoršil.
- Další srovnání ukazuje pro DB pokračování ubývání extrémních hodnot a jeho výškový růst, jenž je patrný při ubývání červených barev. CO také nepatrně roste, ale spíše stagnuje a jeho výkyvy rozdílu jsou větší než u DB.
- Páté srovnání již vykazuje pomalé plynulé snižování extrémních hodnot, které dokazuje nárůst vyšších frekvencí v datech. CO má opět více extrémních hodnot.
- Další srovnání potvrzuje trend vyrovnávání rozdílů přibýváním světlých barev, CO obsahuje stále nepatrně více extrémů než DB, ale rozdíly si jsou velice podobné.
- Poslední srovnání je velice podobné tomu předchozímu, tentokrát došlo k větším změnám u CO, v některých místech se objevují vyšší hodnoty výšky, které zde znamenají úbytek tmavší červené barvy.

Porovnání ukazuje, že v analyzovaném území dosahuje v prvních srovnáních uspokojivých výsledků s waveletem Coiflet, zejména jeho verze z obr. 28. V nízkých frekvencích se mu podobností nemůže Daubechies wavelet rovnat. Přidáváním vyšších frekvencí ale varianta s Coiflet waveletem stagnuje a lepší podobnosti dosahuje terén s Daubechies waveletem. Poslední tři srovnání jsou si již velice podobné, jak dochází k dalšímu zvyšování vysokých frekvencí ve vrstvách terénu.

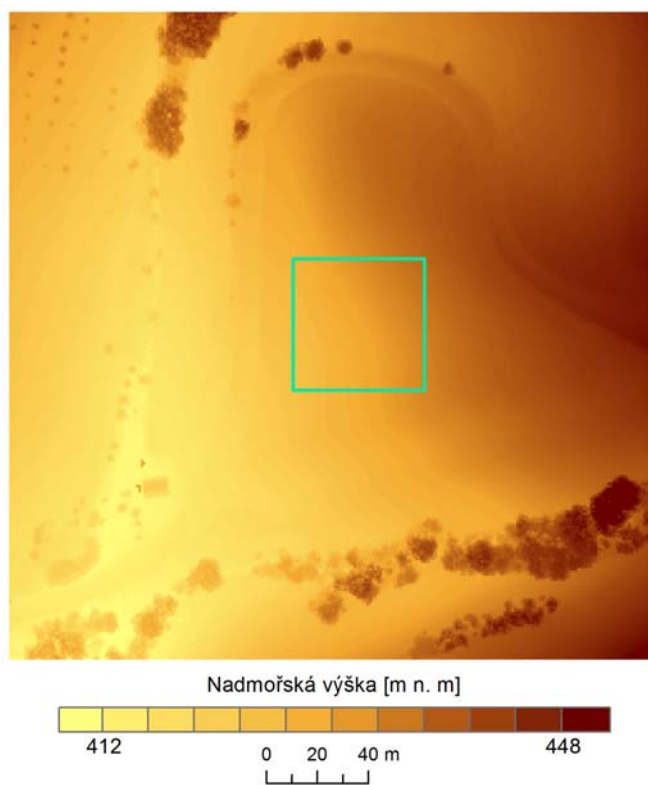
Hodnoty průměrů a směrodatných odchylek zobrazují hlavní trend podobnosti: s přibýváním vysokých frekvencí v datech jejich podobnost s referenčními daty roste. Je zde však patrný stejný rozdíl jako při vizuálním porovnávání: směrodatná odchylka je pro Coiflet wavelet nižší pro první dvě nejnižší frekvence, poté dochází k obratu a nižší hodnoty obsahuje Daubechies Wavelet. Průměr naznačuje, že Daubechies wavelet je zpočátku nadhodnocenější než Coiflet wavelet, postupně se rozdíl smazává.

Tab. 4 Hodnoty průměrů a směrodatných odchylek Daubechies a Coiflet waveletu pro různé hodnoty útlumů

útlumy	Daubechies wavelet		Coiflet wavelet	
	průměr	s. odchylka	průměr	s. odchylka
1 1 1 0.75 0 0 0 0 0	-0,22	1,09	-0,22	1,11
1 1 1 0.5 0 0 0 0 0	-0,23	1,08	-0,23	1,15
1 1 1 0.25 0 0 0 0 0	-0,24	1,1	-0,23	1,23
1 1 1 0 0 0 0 0 0	-0,25	1,14	-0,23	1,32
1 1 0.75 0 0 0 0 0 0	-0,28	1,33	-0,25	1,38
1 1 0.5 0 0 0 0 0 0	-0,31	1,6	-0,28	1,55
1 1 0.25 0 0 0 0 0 0	-0,34	1,91	-0,3	1,81

6.3 Srovnání terénu

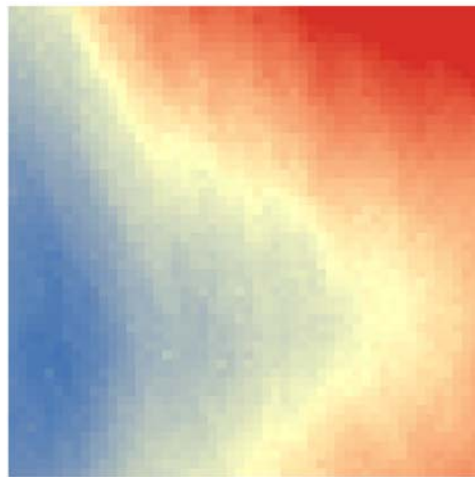
Protože výsledky předchozího porovnávání nejsou jednoznačné, bylo porovnávané území zmenšeno na plochu 50x50 metrů (viz obr. 38) a vybráno území zpracované pouze pro Coiflet wavelet. Plocha původních lidarových dat, jak lze vidět na obr. 39, reprezentuje samotný terén, a je tedy jednou z nevhodnějších ploch pro srovnání. Data referenční i zpracovaná WT jsou zobrazena dle rozdílu směrodatných odchylek. Pokud se podíváme na rozdíly v obrázcích, je z nich patrné, že plochý terén odpovídá poměrně věrně odchylkám původního terénu a s rostoucími frekvencemi v datech se významně mění, až se dokonce stává opačným. I přes tyto poznatky ale hodnoty průměru a směrodatné odchylky ukazují stejný trend jako v předchozím případě, a to že s rostoucími frekvencemi v datech průměr i směrodatná odchylka klesají.



Obr. 38 Poloha menšího čtvercového území o hraně 50 metrů (vyznačený zeleně).

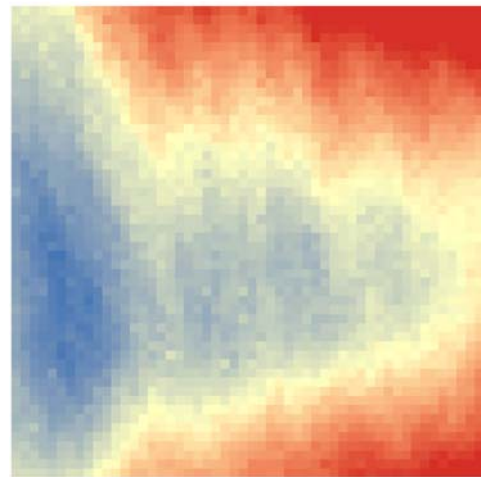


Obr. 39 Původní lidarová data.



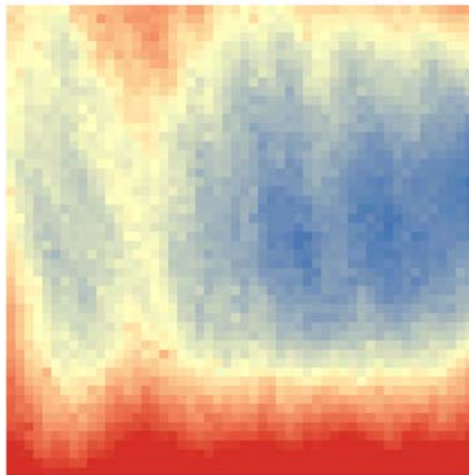
Vzdálenost od průměru nejvyšší kladná
nejvyšší záporná 0 5 10 m

Obr. 40 Útlumy [1 1 0.25 0 0 0 0 0].



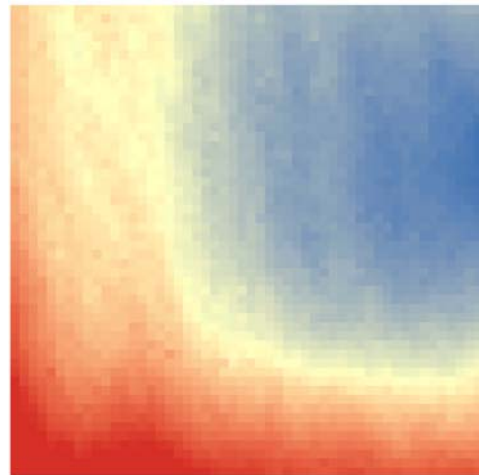
Vzdálenost od průměru nejvyšší kladná
nejvyšší záporná 0 5 10 m

Obr. 41 Útlumy [1 1 0.5 0 0 0 0 0].



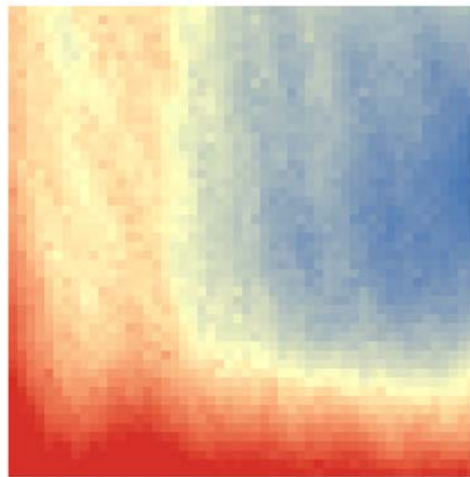
Vzdálenost od průměru nejvyšší kladná
nejvyšší záporná 0 5 10 m

Obr. 42 Útlumy [1 1 0.75 0 0 0 0 0].



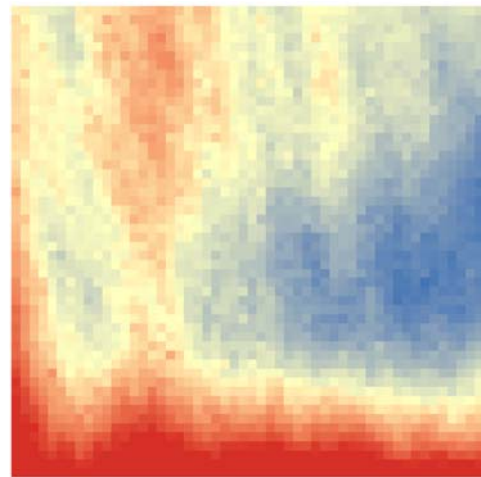
Vzdálenost od průměru nejvyšší kladná
nejvyšší záporná 0 5 10 m

Obr. 43 Útlumy [1 1 1 0 0 0 0 0].



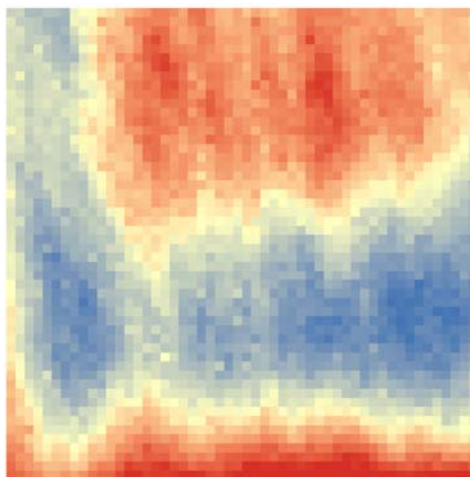
Vzdálenost od průměru
nejvyšší kladná
nejvyšší záporná
0 5 10 m

Obr. 44 Útlumy [1 1 1 0.25 0 0 0 0 0].



Vzdálenost od průměru
nejvyšší kladná
nejvyšší záporná
0 5 10 m

Obr. 45 Útlumy [1 1 1 0.5 0 0 0 0 0].



Vzdálenost od průměru
nejvyšší kladná
nejvyšší záporná
0 5 10 m

Obr. 46 Útlumy [1 1 1 0.75 0 0 0 0 0].

Jak lze vidět z obrázků, terén s útlumy [1 1 0,25 0 0 0 0 0 0] (obr. 40) vystihuje poměrně věrně terén referenčních dat, zatímco s přibýváním vysokých frekvencí v datech došlo až k variantě opačné, tedy že terén se skloňoval opačným směrem než je tomu ve skutečnosti (obr. 43, 44 a 45), až dochází úplnému rozrušení dat, jak je patrné z obr. 46. Největší podobnost tedy ukazuje první varianta útlumů.

Jak je patrné z tab. 5, ačkoli se směrodatné odchylky opět snižují s rostoucími vysokými frekvencemi, průměr zpočátku roste a poté opět klesá. Nejlepšího průměru dosáhly útlumy [1 1 0.25 0 0 0 0 0 0]. I přes vyšší směrodatnou odchylku lze konstatovat, že tento průměr a tím i celková podobnost vybraných dat s vybranou referenční plochou jsou si podobné nejvíce.

Tab. 5 Hodnoty průměrů a směrodatných odchylek Daubechies a Coiflet waveletu pro různé hodnoty útlumů území 50x50 metrů

útlumy	Daubechies wavelet	
	průměr	s. odchylka
1 1 1 0.75	-0,17	0,17
1 1 1 0.5	-0,21	0,21
1 1 1 0.25	-0,25	0,35
1 1 1	-0,29	0,52
1 1 0.75	-0,2	0,26
1 1 0.5	-0,11	0,29
1 1 0.25	-0,02	0,57

Porovnáním a hodnocením jednotlivých výstupů waveletové transformace byly pozorovány následující charakteristiky:

- Porovnáním průměrů a směrodatných odchylek stejné metody mezi lidarovými daty pro třídu terénu a jednotlivými výstupy z waveletové analýzy byl pozorován růst průměrů a směrodatných odchylek se zvyšující se mírou vysokých frekvencí v datech. To je způsobeno vyšší členitostí terénu a tedy vyšší celkovou podobností. Ačkoli je totiž terén referenčních dat bez vegetace, má stále velkou míru vlnitosti. Potom musí být těmto datům přirozeně podobnější data s vysokými frekvencemi, ačkoli jejich části už zabíhají do třídy vegetace.
- Z porovnání waveletů Daubechies a Coiflet vychází jako podobnější referenčním datům varianta s využitím waveletu Coiflet při nižších testovaných frekvencích, jako podobnější referenčním datům varianta s využitím waveletu Daubechies při středních testovaných frekvencích a shodně podobné s referenčními daty obě varianty waveletů při vyšších testovaných frekvencích.
- Kolem vegetace je ve všech variantách viditelný nárůst vyšších frekvencí v upravených datech, který se projevuje ve zkoumaných rozdílech vyššími zápornými hodnotami, které provází více či méně celé srovnávání.
- Při srovnání menších celků dat, kde se nachází pouze část terénu, vykazuje nejshodnější průměrný rozdíl verze útlumů [1 1 0.25 0 0 0 0 0], její směrodatná odchylka je však z porovnávaných částí nejvyšší.
- Srovnání dat proběhlo i s verzí původních ekvidistantních dat. Jelikož ukazovalo shodné výsledky s porovnáním referenčních dat, nebylo do textové části práce zahrnuto, vrstvy těchto rozdílů však lze najít na přiloženém CD.

7 VÝSLEDKY

Studiem odborné literatury, internetových zdrojů a odbornými konzultacemi byla vytvořena teoretická část této práce. V rozsahu jedné kapitoly popisuje matematické transformace jako nezbytné nástroje pro zpracování a analýzu signálu. Postupuje systematicky a logicky, začíná od méně náročné Fourierovy transformace, přes vysvětlení okénkové Fourierovy transformace až k pochopení významu a využití waveletové transformace. Druhá teoretická kapitola se zabývá využitím waveletové transformace v praxi a zaměřuje se na využití geoinformatické či geografické.

Praktická část začíná kapitolou zpracování dat. Ta vychází z potřeby samotné waveletové transformace, kterou je nutnost ekvidistantních dat pro její fungování. Kapitola popisuje, jakými postupy lze dosáhnout takovýchto dat v podobě bodů se stejnými rozestupy v prostředí programu MATLAB. Nejdříve jsou v kapitole 4.1 navrženy dva podobné postupy. Oba vychází z předpokladu, že výsledné ekvidistantní body s rozestupy jeden metr naplní prázdný prostor nově vytvořené matice. Stanovením minimálních a maximálních hodnot souřadnic dle x-ové a y-ové osy, vytvořením kroku, který činí jeden metr (je možné ho nahradit jinou hodnotou), a vytvořením nových souřadnic x a y došlo k definování nové matice a mohlo se přistoupit k jejímu naplnění konkrétními body. Naplnění matice může být provedeno dvěma způsoby v závislosti na velikosti a zejména tvaru pole, ze kterého bude vypočítán výsledný ekvidistantní bod.

První postup nabízí zpracování pro čtvercové pole výběru bodů. Definovaný pomocí polovičního kroku od souřadnic budoucího bodu ve směru souřadnic x i y vytváří pole 1x1 metr. Změnou velikosti kroku lze změnit velikost pole. Druhý postup umožňuje výpočet pro kruhové pole výběru bodů. Je vytvořen měnitelný poloměr a proměnná vzdálenosti, která vytváří kruhové pole. Následně se hledají body, jejichž vzdálenosti jsou menší než poloměr. Oba postupy lze využít pro všechny metody výpočtu, které program obsahuje (např. průměr, medián, minimum atd.). Oba postupy zároveň obsahují podmínku, která zajistí, že prázdné nebo nekonečné pole bodů budou nahrazeny průměrnou hodnotou. Tyto dva postupy umožňují jednoduchý výpočet, avšak časově náročný. Z tohoto důvodu je vytvořena nová metoda výpočtu.

Kapitola 4.2 popisuje rychlejší způsob výpočtu ekvidistantních bodů. Metoda vytváří pravidelnou čtvercovou mřížku a zaokrouhlením každého bodu dojde k jeho přiřazení příslušné buňce. Navíc je vytvořena hodnota tolerance, která udává, jak rozměrné pole bude použito pro výběr bodů k výpočtu. Tolerance nula znamená pole 1x1 metr, tolerance jedna vybírá z pole 3x3 metry atd. Metoda umožňuje tak jako metoda předchozí různé metody výpočtu (průměr atd.). Tento způsob zpracování byl také použit jako hlavní postup zpracování ekvidistantních dat a všechny datové sady nazývané jako ekvidistantní znamenají po zbytek práce, že k jejich dosažení byla využita právě tato metoda.

Další kapitola zobrazuje, jak byla ekvidistantní data použita pro zpracování waveletovou analýzou. Byly testovány dva různé přístupy zpracování. První z nich popisuje v podkapitole 5.1 využití nástrojů waveletového toolboxu programu MATLAB. Nabízí intuitivní prostředí pro analýzu dat a umožňuje okamžitou zpětnou vazbu díky

zpětné syntéze, která ihned zobrazí upravená data. Po výběru mateřského waveletu a zadání výsledné úrovně rozkladu dojde k rozkladu dat dle počtu úrovní rozkladu a zpětná syntéza zobrazí data dle plného nastavení všech úrovní. Poté lze volit úpravou jednotlivých úrovní počet waveletových koeficientů každé z nich a tím měnit poměr frekvencí ve výsledném zpracování. I přes snadné ovládání však tento postup vyžaduje další operace v podobě předzpracování vstupních dat. Ekvidistantní body jsou pro tento postup správné, nástroj však umožňuje zpracovat pouze hodnoty pro body s výškovým rozpětím 0–256 metrů a souměrným počtem bodů (např. 512x512). K získání takových dat jsou nezbytné další výpočty, které postup komplikují. Po analýze je samozřejmě nutné převést body zpět do jejich původních výškových hodnot. Větší překážku však představuje fakt, že výstupní hodnoty výšky se zaokrouhlují na celá čísla. Tím dochází k značné degradaci předešlých procesů. Pro lepší přesnost byl tedy vytvořen další postup.

Druhý přístup ke zpracování lze nalézt v podkapitole 5.2. Využívá zesílení a zeslabení jednotlivých úrovní waveletového rozkladu. Definicí mateřského waveletu a zvolením počtu útlumů dochází k úpravě každé úrovně. Útlumy nula úroveň nulují, útlumy jedna úroveň zachovávají a hodnoty mezi nimi určují poměrné zastoupení úrovně. Toto zpracování není zatíženo chybou zaokrouhlování ani nevyžaduje jiné předzpracování a bylo využito jako primární přístup zpracování.

K nastavení útlumů jednotlivých úrovní tak, aby odpovídaly terénu, bylo zvoleno vizuální porovnání jednotlivých výstupů. To je možné nalézt v části porovnávání v podkapitole 6.1. Je zde patrné, jaký interval útlumů zvolit pro výběr terénu a jeho testování.

Oba postupy zpracování byly testovány pro získání terénních dat, tedy nízkých frekvencí odpovídajících samotnému terénu. Pro větší přesnost tedy vstupuje do kapitoly 6 Porovnávání pouze druhý postup zpracování.

V podkapitole 5.2.2 je naznačena možnost využití waveletové transformace pro vyhlazení některých chyb, jichž se dopouští některé body extrémním hodnocením výšky. Jejím vyhlazením je míněn postup odečtení vrstvy samotného terénu od původních ekvidistantních dat. Tím mohou být vysoké frekvence, a tedy i extrémní hodnoty posazeny do roviny. Nastavením krajních hodnot pro kladné i záporné extrémy lze dojít k jejich vyloučení a zpětným přičtením původně odečteného terénu dojde k vytvoření opět kompletních ekvidistantních dat s vyhlazenými chybami.

Na závěr kapitoly 5 je zpracován postup uložení dat do souboru *.txt s názvy jednotlivých atributů pro snadný vstup do prostředí programu ArcGIS a výsledné porovnávání.

Výstupy waveletové transformace jsou srovnávány a hodnoceny v kapitole 6. Bylo vybráno území souměrných rozměrů pro porovnání vrstev terénu vytvořených waveletovou transformací a vrstvy terénu referenčních (původních lidarových) dat, která byla vytvořena výběrem kategorie 2 dle klasifikace ASPRS.

Došlo k vizuálnímu porovnání nastavení útlumů waveletové analýzy, z něž byly vyvozeny krajní hodnoty pro vytvoření dat terénu. Stejně kategorie útlumů pak byly použity pro další zpracování.

Porovnáním tolerancí 0 a 1 pro stejné nastavení útlumů bylo zjištěno, že se data různých tolerancí liší minimálně a jejich další porovnání např. s využitím různých mateřských waveletů není pro tuto práci zásadní.

Naopak porovnání vrstev s použitím různých mateřských waveletů pro stejné útlumy ukázalo, že existují výrazné rozdíly v rozdělení jejich výškových hodnot a je žádoucí tyto rozdíly porovnat.

Podkapitola 6.2 se zabývá právě srovnáním mateřských waveletů. Použity byly mateřské wavelety Daubechies 6 a Coiflet 4. Porovnávány byly vrstvy rozdílů mezi původním terénem a terénem vytvořeným WT. Porovnáním vrstev rozdílů bylo ukázáno, jak se vyvíjí rozložení výškových hodnot každé kategorie útlumu. Srovnáním průměru a směrodatné odchylky každého rozdílu byl vyvozen závěr pro vybrané území, že s rostoucím počtem vysokých frekvencí ve waveletové rekonstrukci roste jeho podobnost s původním terénem. Tento fakt potvrzují data menší i větší územní části. Je způsoben podobností vyšších frekvencí s původním reliéfem. Na druhou stranu se ukazuje vyšší podobnost s verzí waveletu Coiflet s nastavením útlumů [1 1 0.5 0 0 0 0 0]. Ačkoliv je tedy celkově terén z WT nižších frekvencí rozložením podobnější původnímu terénu a je více shlazený a tím plošší, vysokofrekvenční terén se dle statistického srovnání podobá realitě víc, přestože je v něm již zastoupeno i mnoho frekvencí spojených s vegetací. Tento trend v datech roste se zvyšujícím se zastoupením vyšších frekvencí.

Z tohoto důvodu bylo uskutečněno ještě jedno testování. Z původního území byl vybrán čtverec o hraně 50 metrů. Ten reprezentoval pouze hladký terén, jak dokazuje jeho zobrazení v podkapitole 6.3. Porovnání zde bylo provedeno pro stejné verze útlumů jako v předchozí kapitole, nyní se ale porovnávalo rozložení průměrných hodnot v datech a jejich směrodatná odchylka. Toto porovnání ukázalo, že terén vzniklý waveletovou transformací je nejpodobnější původnímu terénu ve verzi největšího potlačení úrovní, a to ve verzi útlumů [1 1 0.25 0 0 0 0 0].

Z výsledků porovnávání a hodnocení vybraného území plyne, že terén z WT hodnocený jako nejvíce plochý odpovídá dobře hladkému terénu referenčních dat, zatímco terén obsahující nejvíce vyšších frekvencí se nejlépe shoduje s celkovým vyjádřením referenčních dat.

Hodnocení výstupů waveletové transformace ukazuje odlišné využití různě upraveného terénu odpovídající jednotlivým nastaveným kritériím. Každá část terénu původního odpovídá jiné části terénu zpracovaného waveletovou transformací a tím lze dojít k odlišným využitím každé jednotlivé části.

8 DISKUZE

Všechny ekvidistantní body vytvářené v rámci této práce disponují rozestupy jeden metr. Tato vzdálenost je brána jako univerzální pro další zpracování a analýzy. Vzdálenější body mohou zbytečně zkreslovat výsledky a působit nepřesně, menší vzdálenost než jeden metr by svou přesností přesahovala rámec porovnávání a hodnocení této práce a na veškeré výpočty by působila vyšší náročnost.

Pro porovnávání výstupů z waveletové transformace byla jako referenční data zvolena původní lidarová data pro třídu terénu převedená na rastr, což plně postačuje výslednému hodnocení. Alternativou jsou data ekvidistantní zpracovaná formou popsanou v této práci. Ta by však mohla být vzhledem k provádění množství výpočtů nějakým směrem zavádějící. Vyšší přesnosti při srovnávání by bylo dosaženo využitím dat geodetického měření. Data však mají takovou přesnost, jakých zpracovaná data nedosahují a tak by srovnání s nimi pozbývalo vyššího smyslu.

Tolerance pro výběr bodů volená v průběhu práce byla stanovena hodnotami nula a jedna. Bylo by zajímavé srovnat i data pro vyšší hodnoty tolerancí, to však představuje podstatně vyšší výpočetní náročnost a zejména další sadu dat pro porovnávání. Stejně je to s použitými metodami výpočtu ekvidistantních dat a výběrem mateřského waveletu. Porovnáváním každé metody a každé možnosti waveletu by vzniklo velké množství datových sad a využitím kombinací všech verzí pro hodnocení by vznikly stovky vrstev, což nebylo účelem ani v možnostech této práce. Tyto argumenty platí také pro získávané frekvence.

Rozdíly mezi jednotlivými hodnotami útlumů tvoří jedna čtvrtina. Lze zvolit libovolný rozdíl např. v místech, kde se předpokládají změny vyšších detailů. Jemnějšími rozestupy lze odhalit menší rozdíly porovnávaných území, postup však vyžaduje mnoho testování a porovnávání většího objemu dat a tím rozsáhlejší zpracování.

Původní surová data obsahují i přes veškeré úpravy řadu chyb. V průběhu práce se ukázalo jako smysluplné tyto chyby odstraňovat různými způsoby. Práce se však chybami primárně nezabývá, a tak byly odstraňovány převážně jednoduchými metodami použitím běžně dostupných procesů.

Pro menší náročnost výpočtů a menší objem dat byly z celé oblasti získaných dat vybrány k testování pouze oblasti s rozměry 256x256 metrů. Tyto oblasti nezasahují do krajů původních dat, protože jsou tyto kraje vzorkované nespojitě, v závislosti na původním zdroji mračna bodů.

Při zpracování dat i při waveletové analýze byla použita řada programových kódů. Všechny funkce či syntaxe kódu s jejich podrobným popisem lze nalézt v nápovědě programu MATLAB.

Porovnávání dat bylo uskutečněno pomocí rastrových vrstev. Alternativou k porovnáváním těchto dat může být vytvoření jejich modelů interpolačními metodami a následné porovnání s nimi. Jako názornější byl však zvolen postup s rastry.

Každý wavelet má jiný tvar a tím ovlivňuje analyzovaný terén. Jedině však podrobným a rozsáhlým výzkumem větší skupiny waveletů by bylo možné odhalit, který wavelet je vhodnější pro jaký typ reliéfu.

Zajímavým a užitečným využitím waveletové transformace by byla např. detekce hran či nerovností terénu, které nejsou běžně rozpoznatelné. Nebyla však nalezena taková metoda, která by to umožnila, v odborné literatuře se takové využití objevuje pouze zřídka a nepřináší lepší výsledky než běžné metody zpracování obrazu. Cesta by mohla vést přes kombinaci WT a zpracování obrazu.

Výsledky vycházející z této práce mohou být použity jako podrobný návod pro provedení waveletové transformace na geografických datech libovolného měření. Kód pro zpracování ukazuje možnosti zpracování různými postupy a lze jej snadno využít. Proces waveletové analýzy lze na základě práce provést bezchybně a získat libovolné množství informací z každé úrovně rozkladu.

Práce představuje využití waveletové transformace pro analýzu reliéfu jako získání hodnot terénu libovolného území. Studium a porozuměním této práce lze navázat na její výsledky a pokračovat ve využívání waveletové transformace pro analýzu reliéfu, prostor pro další výzkum se přímo nabízí.

9 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo popsat základní principy waveletové transformace a ukázat její využití pro analýzu reliéfu. Část teoretická měla za úkol popsat její principy a možnosti využití. Cílem praktické části bylo dokumentovat možnosti využití waveletové transformace pro analýzu reliéfu na konkrétních případech. Vstupními daty byla data z leteckého laserového skenování části obce Vysoké Pole.

Celá práce začíná vysvětlením teorie matematických transformací. Nabízí náhled na jejich využití a poskytuje logické uspořádání transformací dle jejich vývoje až k waveletové transformaci. Poté teoretická část pokračuje příklady dosavadních využití WT v oblasti geoinformatiky.

Nezbytnou součástí práce je kapitola Zpracování dat. Původní vstupní data jsou pro WT nevhodná a je třeba je přeměnit do ekvidistantní podoby. K tomuto účelu byl využit program MATLAB, v němž byly vytvořeny dva různé postupy. První z nich vytváří prázdnou matici bodů, do které jsou vypočteny body s rozestupy jednoho metru pomocí čtvercového nebo kruhového pole pro výběr bodů. Postup je však shledán jako časově náročný a je vytvořena rychlejší varianta výpočtu. Druhý postup vytváří mřížku o hraně jedné buňky opět jeden metr. Každý bod se průměrováním svých souřadnic přiřadí do odpovídajícího pole. Výpočet pak probíhá s určitou tolerancí, která znamená, kolik polí bude do výpočtu zahrnuto. Oba postupy umožňují výpočet různými statistickými metodami. Pro rychlost zpracování je zvolen jako výchozí druhý postup.

Takto vytvořená ekvidistantní data mohou být zpracována WT. Byly představeny dva postupy zpracování, každý nabízí jiné možnosti a vytváří odlišný výsledek. První postup využívá nástrojů waveletového toolboxu MATLABu. Zpracování probíhá v intuitivním prostředí a s okamžitou zpětnou vazbou díky jasnému zobrazení výsledků. Prostorově však vyžaduje další předzpracování dat a výsledné hodnoty jsou zaokrouhleny na celá čísla. Proto byl vytvořen a dále jako jediný využíván druhý postup zpracování. Ten probíhá na základě programového kódu. Pomocí zesílení a zeslabení jednotlivých úrovní rozkladu dochází k výběru různých frekvencí a tím i různých variant terénu. Waveletová transformace je zde použita a dále hodnocena pro vytvoření vrstvy bodů odpovídající samotnému terénu.

Pro výběr hodnot zesílení a zeslabení jednotlivých úrovní posloužilo vizuální srovnání několika grafických výstupů. Ty ukázaly, které úrovně je důležité zachovat a které naopak potlačit.

Při testování se objevila řada chybných hodnot výšky některých bodů. Z tohoto důvodu vznikl jako vedlejší produkt práce a jako další možné využití waveletové transformace i jednoduchý návod pro vyhlazení těchto chyb.

Data terénu zpracovaná WT a uložená ve formátech *.txt s definovanými názvy atributů mohla být porovnáвана a hodnocena. Věrnost vzniklého terénu byla porovnáвана s referenčními daty, jimiž byla původní lidarová dat pro třídu terénu dle klasifikace ASPRS. Porovnávání probíhalo s vrstvami, které byly převedeny do rastrové

podoby. Hodnocena byla podobnost terénu zpracovaného WT s lidarovým terénem pro území o velikosti 256x256 metrů. Dále byla porovnávána pouze plochá část terénu vybraná z původního území o velikosti 50x50 metrů.

Srovnání terénů ukazuje, že podobnost pro větší území narůstá s vyššími frekvencemi zastoupenými ve výstupních datech. To je způsobeno většími výškovými výkyvy terénu, které více odpovídají referenční ploše, ačkoli terén již obsahuje frekvence, jenž mu nepřísluší. Porovnání menšího území však dokazuje, že terén nejvíce podobný skutečnému je ten, který zachovává pouze nejnižší frekvence.

Výsledný hladší terén tedy odpovídá spíše ploššímu území s minimem náhlých výškových rozdílů, zatímco terén s vyššími frekvencemi odpovídá více členitému terénu, zasahují do něj však již frekvence, odpovídající nízké vegetaci.

Takový terén může být použit jako alternativa k terénu klasifikovaného z lidarových dat, v dobrých podmínkách dokáže poměrně věrně odpovídat referenčnímu terénu. Značnou výhodou je, že prokládá hodnoty i v místech vegetace, tedy v místech, kde jsou lidarová data terénu vynechána.

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

Literatura

BLU, Thierry, UNSER, Michael. The fractional spline wavelet transform: definition and implementation. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing Proceedings*. 2012, č. 1.

HANI, Ahmad Fadzil Mohamad, SATHYAMOORTHY, Dinesh, ASIRVADAM, Vijanth Sagayan. A method for computation of surface roughness of digital elevation model terrains via multiscale analysis. *Computers & Geosciences*, 2011, č. 37.

HANI, Ahmad Fadzil Mohamad, SATHYAMOORTHY, Dinesh, ASIRVADAM, Vijanth Sagayan. Computing surface roughness of individual cells of digital elevation models via multiscale analysis. *Computers & Geosciences*, 2012, č. 43.

KAISER, Gerald. *A Friendly Guide to Wavelets*. Basel: Birkhäuser, 2011.

KALBERMATTEN, Michael et al. Multiscale analysis of geomorphological and geological features in high resolution digital elevation models using the wavelet transform. *Geomorfology*, 2012, č. 138.

PŘEVOROVSKÝ, David. *Waveletová transformace a její využití při zpracování jednorozměrných signálů*. Praha: Ústav termomechaniky AV ČR, v. v. i., In print.

Internetové zdroje

(Diskrétní) *Fourierova transformace* [online]. [cit. 2014-02-13]. Katedra experimentální fyziky. Dostupné z WWW: <http://apfyz.upol.cz/ucebnice/down/mini/fourtrans.pdf>.

HLEDÍK, Stanislav. *Fourierova transformace* [online]. [cit. 2014-02-21]. Ústav fyziky Filozoficko-přírodovědecké fakulty Slezské univerzity v Opavě. Dostupné z: http://nora.fpf.slu.cz/~hledik/pub/teach/classes/latex/output_samples/BryjovaI-AppsDEFG.pdf.

MISITI, Michel. *Wavelet Toolbox – User's Guide* [online]. MathWorks. Dostupné z: http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/wavelet/wavelet_ug.pdf.

POLIKAR, Robi. *The Wavelet Tutorial Part 2* [online]. [cit. 2014-02-22]. Rowan University. Dostupné z: <http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTpart2.html>.

POLIKAR, Robi. *The Wavelet Tutorial Part 3* [online]. [cit. 2014-02-22]. Rowan University. Dostupné z: <http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTpart3.html>.

POLIKAR, Robi. *The Wavelet Tutorial Part 4* [online]. [cit. 2014-02-22]. Rowan University. Dostupné z: <http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTpart4.html>.

TORRENCE, Christopher. *A Practical Guide to Wavelet Analysis* [online]. University of Colorado. Dostupné z: [http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0477\(1998\)079%3C0061%3AAPGTWA%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0477(1998)079%3C0061%3AAPGTWA%3E2.0.CO%3B2).

VALENS, Clemens. *A Really Friendly Guide to Wavelets* [online]. PolyValens. Dostupné z: <http://polyvalens.pagesperso-orange.fr/clemens/wavelets/wavelets.html>.

SUMMARY

The focus of this thesis was to describe basic principles of the Wavelet transform and its use for relief analysis. The first part of the thesis thoroughly researched the principles and the applications of the Wavelet transform, whereas the second part consists of several practical examples demonstrating the possible usage of the Wavelet transform for relief analysis. Aerial laser scanning of a part of the municipality of Vysoké Pole was used as input data.

The research into the possible usage of the Wavelet transform for relief analysis and data processing methods were based on the study of literature and consultations with several specialists.

At first, the data from the aerial laser scanning (raw data) had to be processed in a suitable way, as the raw data was not applicable for the Wavelet transform. It was necessary to create equidistant data, which was achieved through MATLAB, where a number of data processing algorithms was created. The data processed this way created equidistant layers of points that could enter the Wavelet transform process. The first step was to choose a specific mother wavelet. The next step was to decompose all the layers into the given number of frequency parts according to the predetermined level of decomposition. Due to the preset number of coefficients determined by the desired frequencies in the images led to the resynthesis of the image. This process was focused on the category of low frequency parts. The input equidistant layers processed through the Wavelet transform were exported into text files and then imported as layers of points into ArcGIS, where their transformation into raster layers, their comparison and evaluation were undertaken.

Their comparison was conducted with reference to the raw data data that was transformed into its raster form with the same cell-size of 1 meter and adjusted by the arithmetic average method. Low-frequency outputs were used as layers representing the terrain. They were compared to the terrain category according to the ASPRS. The functions of map algebra and standard statistic methods such as arithmetic average and standard deviation were used for the comparison.

The comparison of images of subtractions, using mother-wavelets Daubechies 6 and Coiflet 4, showed the progression of decomposition of the height values of each category of reduction. The comparison of the arithmetical average and the standard deviation of each subtraction lead to the conclusion that an increasing number of high frequencies in an image leads to increasing similarity with the original terrain. That is caused by the similarity of higher frequencies and the original relief. Although the terrain composition created by the Wavelet transform of lower frequencies is altogether more flattened and more similar to the original terrain, the terrain created by the Wavelet transform of higher frequencies is, according to the statistical findings, more similar to reality, even though it includes a considerable amount of vegetation-related frequencies. This trend increases with the increasing amount of higher frequencies in the image.

Another measuring was conducted for a square of side 20 m, which only represented flat terrain. The same versions of reduction were compared, however, the most important factors were the arithmetic average and the standard deviation of the data. The second test showed that the terrain created by the Wavelet transform is most similar to the original terrain in its form of the strongest suppression of levels.

The results of the comparisons and evaluations show, that the terrain created by the Wavelet transform assessed as the most flat strongly corresponds with flat terrain, while the terrain containing the most high frequencies corresponds the best with the overall interpretation of real terrain.

The evaluation of the outputs of the Wavelet transform indicate, that variously processed terrain of different criteria can be used. Each part of the original terrain corresponds to a different part of the terrain processed by the Wavelet transform, thus allowing the user to find different utilisation for each and every part.

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

Volné přílohy

Příloha 1 CD