

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geoinformatiky

**RADAROVÁ DATA PRO URČENÍ MOCNOSTI
A POHYBU LEDU V POLÁRNÍCH OBLASTECH**

Magisterská práce

Bc. Marie HRUDIČKOVÁ

Vedoucí práce Jakub MIŘIJOVSKÝ, Ph.D.

Olomouc 2016

Geoinformatika

ANOTACE

Diplomová práce reaguje na rozvoj radarového snímkování zemského povrchu. Díky vlastnostem mikrovln je analýza radarových dat nejen vhodným doplňkem při analýzách snímků pořízených tradičními metodami v optické části elektromagnetického spektra. Radarová data mohou být také použita pro specifické typy analýz.

S globálním oteplováním se stále více hovoří i o rozvoji technik monitoringu jeho dopadů na prostředí, jako je v tomto případě tání ledovců v polárních oblastech. Tato práce se zaměřuje z větší míry na oblasti nacházející se na severní polokouli - Grónsku. Analýzy byly prováděny na radarových datech z družice Sentinel-1A, pomocí Sentinel-1 Toolboxu, který je přímo určen pro zpracování těchto dat.

KLÍČOVÁ SLOVA

SAR, Sentinel-1, interferometrie, polární oblasti

Počet stran práce: 68

Počet příloh: 6 (z toho 2 volné a 4 elektronické)

ANOTATION

This master thesis is reaction to development of radar remote sensing. Based on properties of microwaves is analysis of radar data good complement of traditional remote sensing in the optical (visible) part of the electromagnetic spectrum, but they can also be used for specific types of analysis.

With global warming are increasingly talking about the development of techniques of the monitoring of impacts of global warming on the environment, such as in this case, the melting of glaciers in the polar regions. This work is mainly focused on areas located in the northern hemisphere - Greenland. The analyses were performed on radar data from satellite Sentinel-1A, using the Sentinel-1 Toolbox, which was specifically created for processing radar data.

KEYWORDS

SAR, Sentinel-1, interferometry, polar regions

Number of pages

Number of appendixes

Prohlašuji, že

- diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracovala samostatně a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu

- jsem si vědoma, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo,

- beru na vědomí, že Univerzita Palackého v Olomouci (dále UP Olomouc) má právo nevydělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užívat (§ 35 odst. 3),

- souhlasím, aby jeden výtisk diplomové práce byl uložen v Knihovně UP k prezenčnímu nahlédnutí,

- souhlasím, že údaje o mé diplomové práci budou zveřejněny ve Studijním informačním systému UP,

- v případě zájmu UP Olomouc uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užití výsledky a výstupy mé diplomové práce v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,

- použít výsledky a výstupy mé diplomové práce nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem UP Olomouc, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly UP Olomouc na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Olomouci dne

Bc. Marie HRUDIČKOVÁ

Děkuji vedoucímu práce RNDr. Jakubovi Miřijovskému Ph.D, za podněty a připomínky při vypracování práce. Dále děkuji Ing. Milanovi Lazeckému Ph.D. za rady a připomínky při pracování práce.

Vevázaný originál **zadání** bakalářské/magisterské práce (s podpisem vedoucího katedry a razítkem katedry). Ve druhém výtisku práce je vevázána fotokopie zadání.

Zde je konec prvního oddílu, kde není číslování stránek. Následující strana patří již do druhého oddílu, který má nastaveno číslování stránek.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	9
ÚVOD	11
1 CÍLE PRÁCE.....	12
2 METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ.....	13
3 COPERNICUS	15
3.1 Program Sentinel	15
3.1.1 Sentinel-1	16
3.1.2 Sentinel-2	20
3.1.3 Sentinel-3	20
3.1.4 Sentinel-4	21
3.1.5 Sentinel-5	21
3.1.6 Sentinel-5 Precursor	21
3.1.7 Sentinel-6	22
4 POUŽITÍ DAT SENTINEL-1.....	22
4.1 Sledování mořské hladiny	22
4.1.1 Monitoring lodí.....	22
4.1.2 Monitoring ropných havárií	23
4.1.3 Monitoring mořského větru	24
4.2 Změny na zemském povrchu	24
4.2.1 Sledování ledu a sněhu	24
4.2.2 Těžba	24
4.2.3 Zemětřesení	25
4.2.4 Monitorování v hydrologii	26
4.2.5 Lesnictví a zemědělství	26
5 MONITORING KRYOSFÉRY	27
5.1 Pozemní monitoring	28
5.1.1 KAPRI	28
5.2 Monitoring pomocí družic.....	28
5.2.1 CryoSat.....	28
5.2.2 ICESat	28
5.3 Instituce zajišťující monitoring kryosféry	29
5.3.1 UNEP.....	29
5.3.2 WGMS	29
5.3.3 ESA CCI.....	30
5.4 Monitoring ledovců v Arktidě.....	30
5.4.1 Ledovec Jakobshavn	31
5.4.2 Ledovec Austfonna	32
5.4.3 Ledovce Severní země	33
5.5 CryoClim	33

6	RADAR.....	34
6.1	Radar se syntetickou aperturou	35
6.2	Dopplerův posun frekvencí.....	36
6.3	Vlnová délka radarového signálu.....	36
6.4	Polarizace radarového signálu	36
6.5	Přístup k datům ESA	37
6.5.1	První interface.....	38
6.5.2	Druhý interface.....	39
6.6	Přístup k datům ASF	40
7	RADAROVÁ INTERFEROMETRIE.....	41
7.1	InSAR.....	42
7.2	DInSAR	43
7.3	Snímek.....	43
7.4	Popis snímku.....	44
7.5	Chování vody a ledu na SAR snímcích.....	45
8	SENTINEL-1 TOOLBOX.....	46
8.1.1	Práce se S1TBX.....	46
8.2	Další SW pracující s S-1A daty.....	49
9	POSTUP PRÁCE.....	49
9.1	Polarimetrie	49
9.1.1	Polarimetrická dekompozice	49
9.1.2	Klasifikace	50
9.2	Interferometrie.....	51
9.3	Koregistrace.....	51
9.3.1	Výběr DEM pro polární oblasti.....	53
9.3.2	Tvorba interferogramu.....	54
9.3.3	Debursting.....	56
9.3.4	Odstranění topografické fáze	56
9.3.5	Filtrování	57
9.3.6	Geometrické korekce	58
10	VÝSLEDKY	58
10.1	Pobřežní oblast	58
10.2	Ledovec Jakobshavn	62
10.3	Shrnutí.....	65
11	DISKUZE.....	66
12	ZÁVĚR	68
	POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE	
	PŘÍLOHY	

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
AATSR	Advanced Along Track Scanning Radiometer
AFS	Alaska Satellite Facilities
CCI	Climate Change Initiative
DInSAR	Differential InSAR
DPZ	Dálkový průzkum země
DTAR	Distributed Target Ambiguity Ratio
Envisat	Environmental Satellite
ERS	European Remote Sensing
ESA	European Space Agency
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
EW	Extra wide-swath mode
FAGS	Federation of Astronomical and Geophysical Data Analysis Services
FoG	Fluctuation of Glaciers
GEOSS	Global Earth Observation System of Systems
GMES	Global Monitoring of Environment and security
GMTSAR	Generic Mapping Tools SAR
GNU	General Public License
GRD	Ground Range Detected
H	horizontální
HTML	HyperText Markup Language
IACS	International of Astronomical and Geophysical Data Analyses Services
ICESat	Ice, Cloud and land Elevation Satellite
ICSU	(International Council for Science
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
IW	Interferometric wide-swath mode
JASON	Joint Altimetry Satellite Oceanography Network)
KAPRI	Ku-band Advanced Polarimetric Radar Interferometer
KML	Keyhole Markup Language
KSAT	Kongsberg Satellite Services
MetOp	Meteorological Operational satellite programme
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NSO	Netherlands Space Office
OCN	Ocean

OLCI	Ocean and land Colour Instrument
OMI	Ozone Monitoring Instrument
ORB	Oriented fast and rotated brief
OSN	Organizace spojených národů
PSFG	Permanen Servise on Fluctuation of Glaciers
S-1A	Sentinel-1A
S1TBX	Sentinel-1 Toolbox
SAFE	Standart Archive Format for Europe
SAR	Synthetic aperture radar
SCIAMACHY	Scanning Imaging Absorbing Spectrometer for Atmospheric Chartography
SLC	Single-look complex
SLSTR	Sea and Land Surface Temperature Radiometer
SM	Strip map mode
SNAP	Sentinel Application Platform
SPOT	satellite pour l'observation de la terre
SRAL	Synthetic Radar Altimeter
SRN	Signal-to-Noise Ratio
TOPSAR	Terrain Observation with Progressive Scans SAR
TROPOMI	Tropospheric Monitoring Instrument
TTS/WGI	Temporal technical Secretariat/World Glacier Inventory
UNEP	United Nation Environment Program
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UVNS	Ultraviolet Visible Near-Infrared Shortwave
V	vertikální
WDS	World Data System
WGMS	World Glacier Monitoring Service
WMO	World Meteorological organization
WV	Wave-mode
XML	Extensible Markup Language

ÚVOD

Dlouho se mluví o globálním oteplování. O jeho možných vlivech na planetu, zvířata, lidi. Globální oteplování s sebou nese velké změny na naší planetě. Jednou z největší z nich je zvyšování skleníkových plynů a s tím související oteplování planety, tání ledovců a zvyšování mořské hladiny.

Právě pro monitoring ledovců se poslední desetiletí využívají stále modernější techniky, mezi které patří i dálkový průzkum země. Díky jeho rozvoji je možné sledovat polární oblasti nejen pomocí optických, ale i radarových senzorů nesoucí družicemi.

Již počet stávajících družic, které sbírají data o povrchu, v roce 2014 rozšířila družice Sentinel-1A, kterou vypustila na oběžnou dráhu Evropská kosmická agentura. Právě díky datům z této družice je možné zachytit i nepatrné změny nejen v rámci kryosféry.

1 CÍLE PRÁCE

Cílem této diplomové práce je mapování vybraných částí Arktidy ve dvou případových studiích, za pomoci využití radarových dat z družicového systému Sentinel-1.

Práce bude obsahovat tři základní části. Prvním z nich je postup zpracování v programu pro ně určeném a hodnocení práce s tímto programem. Další částí bude stanovení možností využití dat Sentinel-1 pro mapování v polárních oblastech. Poslední, třetí, část se bude zabývat konkrétním zjištěním mocností a pohybu ledu v arktických oblastech.

Vyhotoveny budou webové stránky, poster a výsledky budou uloženy na DVD-ROM.

2 METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ

Cílem této diplomové práce je zpracovat SAR snímky družice Sentinel-1A, jež mají za cíl doplnit a do budoucna nahradit SAR snímky družic, které jsou v současné době v provozu.

Tato práce je zaměřena na sledování pohybu ledu v polárních oblastech resp. v Arktidě.

Použité metody

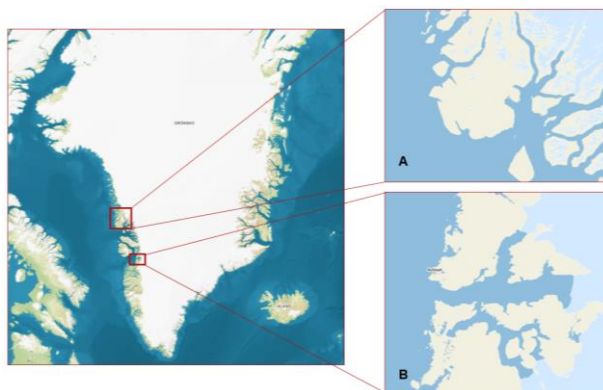
Využita bude metoda InSAR (podkapitola 7.1). Kdy dochází k porovnání dvou po sobě jdoucích SAR snímků o stejné polarizaci za účelem detekce změn ve sledovaném území. V práci byla zpracována i duálně polarizovaná data pomocí neřízení klasifikace a polarimetrické dekompozice (podkapitola 9.1.1).

Použitá data

Pro tuto práci byla využita data družicového systému Sentinel-1A. Ta jsou poskytována Evropskou kosmickou agenturou a jsou po registraci zdarma dostupné na stránkách Sentinels Scientific Data Hub (<https://scihub.copernicus.eu>).

Sledovány budou dvě oblasti – obě na západu Grónska (obr. 1). První, je část západního pobřeží. Druhou oblastí je ledovec Jakobshavn, který, který je sledován od roku 1851.¹

Pro výslednou vizualizaci byly použity snímky družice Landsat-7 (LE70100112002150EDC00 a LE70150092002121EDC00).



Obr. 1: Označené oblasti pro sledování územní – A) západní pobřeží, B) ledovec Jakobshavn.²

Použité programy

Pro zpracování radarových snímků byl použit program Sentinel-1 Toolbox 1.1.1 a SNAP Sentinel-1 3.0.0. ESA (Evropská kosmická agentura) tak těmito programy navazuje na původní dva, NEST (Next ESA SAR Toolbox) a PolSARpro, které byly stejně jako Sentinel-1 Toolbox vytvořeny pro zpracování radarových snímků Evropskou kosmickou agenturou.

Výsledné mapové výstupy byly vytvořeny v programu ArcMap 10.3 a přiložený poster v programu Inkscape.

¹ *Jakobshavn record retreat - Arctic Sea Ice* [online]. 2015 [cit. 2016-02-12]. Dostupné z: <http://neven1.typepad.com/blog/2015/08/jakobshavn-record-retreat.html>

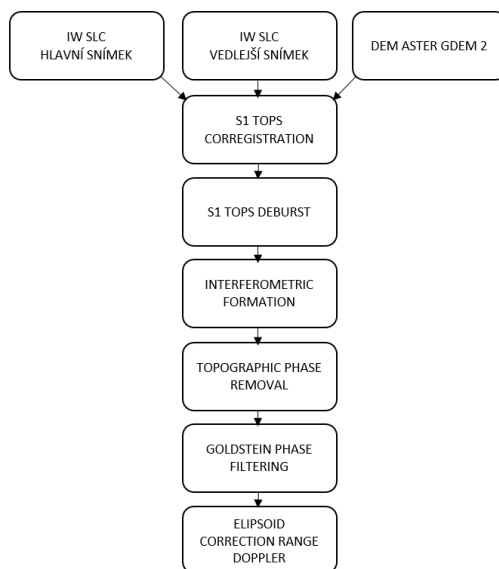
² *Mapy.cz* [online]. 2016 [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: <http://mapy.cz/zakladni?x=-43.7229115&y=68.1376617&z=5>

Postup zpracování

Tato práce se zabývá možnostmi využití radarových dat družice Sentinel-1. Pracováno bylo jak se single polarizovanými snímky určenými pro radarovou interferometrii (obr. 2), tak i s duálně polarizovanými snímky určenými pro polarimetrii.

Radarová interferometrie

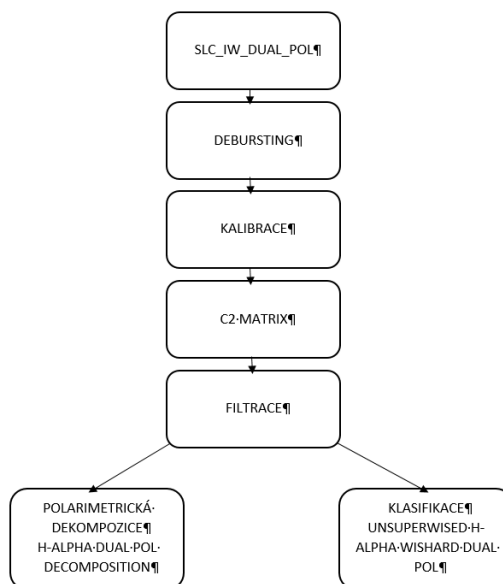
Na obrázku 2 je schéma postupu pro tvorbu interferogramu. Blíže je tato metoda popsána v podkapitole 10.2.



Obr. 2: Schéma zpracování single polarizovaných snímku.

Polarimetrie

Schéma zpracování duálně polarizovaných dat je zobrazeno na obrázku 3. Podrobněji je zpracování těchto dat popsáno v podkapitole 10.1.



Obr. 3: Schéma zpracování duálně polarizovaných snímků.

3 COPERNICUS

Program Copernicus navázal na program GMES (Global Monitoring of Environment and security), který vznikl v květnu roku 1998. Jednalo se o program EU, kdy bylo pro monitoring životního prostředí využíváno metod DPZ resp. družicových snímků. Na podzim roku 2010 byl reformován podle Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 911/2010 o *Evropském programu monitorování Země (GMES) a jeho počátečních provozních činnostech (2011–2013)*. Díky tomuto nařízení došlo k vydání potřebných dotací pro následnou reformaci programu, díky které byl v roce 2014 program GMES přejmenován na Copernicus. Tento program zastřešuje Evropská komise ve spolupráci s ESA (European Space Agency).³

Program Copernicus je již více komplexním programem. Kromě monitoringu klimatických změn, bude přispívat k vývoji bezpečnostních aplikací na základě získaných environmentálních dat či vývoji dalších služeb. V současné době jsou již některé z těchto vytyčených aplikací v provozu. Jedná se o monitoring půdy a krizový management, v přípravě je pak monitoring ovzduší a moří a ve fázi vývoje je monitoring a na něj navazující bezpečnostní služby.

Cílem programu je poskytovat komplexní geografická data pro jednotlivé evropské státy. Nejen občané, ale i podniky, tak budou mít přístup k informacím o stavu životního prostředí, které pak budou moci dále využívat jak v profesním, tak i v soukromém životě.

ESA zpracovává data z více než 30 satelitů. V současnosti vyvíjí novou síť družic Sentinel. Systém těchto družic pak bude poskytovat úplné data sety pozorování zemského povrchu za jakéhokoliv počasí. Díky tomu, že kosmický segment je plně v kompetenci ESA, přispívá tak daty o evropském území do systému GEOSS (Global Earth Observation System of Systems).⁴

3.1 Program Sentinel

Tento program vytvořený ESA má za cíl poskytnout komplexní pohled na zemský povrch. Skládá se z šesti misí, kdy je každá družice či skupina družic zaměřena na pozorování určitého procesu na zemském povrchu ze zemské orbity. Jednotlivé mise Sentinel, tak nahradí stávající družice, které jsou využívány pro sledování zemského povrchu a vyhodnocování změn životního prostředí.⁵

³ *Copernicus* [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <http://www.eea.europa.eu/about-us/what/seis-initiatives/copernicus>

⁴ Overview / Copernicus / Observing the Earth / Our Activities / ESA. *ESA, Copernicus observing the Earth* [online]. [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview3

⁵ *Missions - Sentinel Online* [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions>

Tab. 1: Přehled jednotlivých misí Sentinel ⁶

Mise	Počet družic	Pozorování	Pásmo pozorování	Náhrada za:
Sentinel-1	2	denní noční	SAR – pásmo C	ERS-1, ERS-2 Envisat RADARSAT-1, RADARSAT-2
Sentinel-2	2	denní	optické	Landsat SPOT
Sentinel-3	3	denní noční	Optické SAR – pásmo C a Ku	ERS Envisat SPOT
Sentinel-4	1	denní	Optické	Envisat
Sentinel-5	-	denní	Optické	Envisat
Sentinel-5P	1	denní	Optické	ERS-2 MetOp-A Envisat Aura
Sentinel-6	-	denní noční	SAR	CryoSat Jason

3.1.1 Sentinel-1

Tato mise se skládá ze dvou družic s polárním typem dráhy – Sentinel-1A a Sentinel-1B. V současnosti se již na orbitě nachází pouze obě družice. První vypuštěnou byla Sentinel-1A, vypuštěna 3. 4. 2014. Ta snímá povrch ve výšce 693 km a jeho perioda snímání je 12 dní. Vypuštění druhé družice, Sentinel-1B, bylo plánováno 18 měsíců po vypuštění první družice. Družice měla být vypuštěna 22. dubna 2016, ale díky technickým anomáliím byl start odložen na 25. dubna 2016.⁷

Oba tyto satelity (Sentinel-1A a Sentinel-1B) mají stejnou dráhu letu (heliosynchronní, blízká polární), stejný počet orbit v jednom cyklu (179). Jediným rozdílem bude 180° orbitální fázový rozdíl (obr. 4), a právě díky tomu se sníží operační cyklus (doba, kdy družice pořídí snímek na stejné orbitě nad stejným místem) z dvanácti na šest dní.⁸

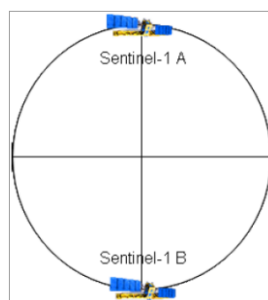
V polovině prosince roku 2015, byla podepsána smlouva na postavení dalších dvou satelitů systému Sentinel-1 (Sentinel-1C a Sentinel-1D), které by měly být v operačním stavu do roku 2030.⁹

⁶ *Missions - Sentinel Online* [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions>

⁷ *Hitching a ride with Sentinel-1B - News - Sentinel-1: ESA Future Missions - Earth Online - ESA* [online]. 2016 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/sentinel-1/news/-/article/hitching-a-ride-with-sentinel-1b>

⁸ *Satellite constellation / Sentinel-1 / Copernicus / Observing the Earth / Our Activities / ESA* [online]. http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Satellite_constellation, 2015 [cit. 2016-02-06]

⁹ *Deal sealed for new Sentinel-1 satellites / Sentinel-1 / Copernicus / Observing the Earth / Our Activities / ESA. ESA, Sentinel-1* [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Deal_sealed_for_new_Sentinel-1_satellites



Obr. 4: Systém Sentinel-1, postavení v plném operačním režimu.¹⁰

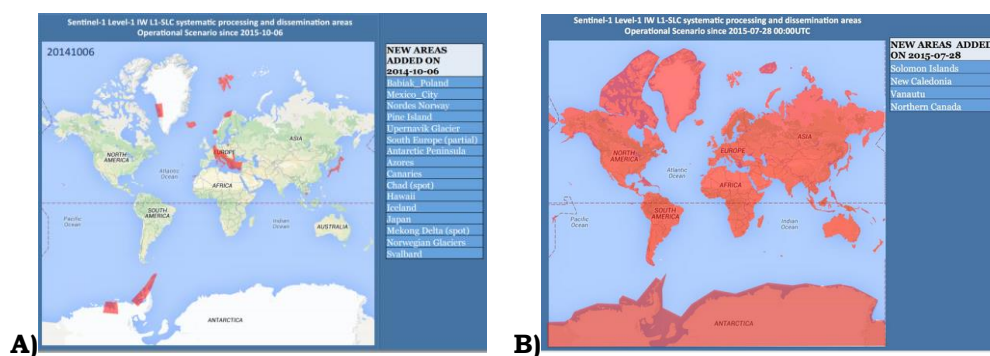
Průběh startu

Ostrý start, kdy bude snímky pokryta veškerá pevnina, byl plánován na 28. července 2015. K tomuto dni byly přidány snímky posledních chybějících oblastí – Šalamounovy ostrovy, Nová Kaledonie, Vanuatu a sever Kanady.

Systematicky byla data přidávána a odebírána od 3. října 2014 (Obr. 5) přesně dle jednotlivých scénářů tak, aby byla všechna data Level-1 SLC (slide look complex) dostupná právě do již zmiňovaného konce července roku 2015.

Data jsou k dispozici do 24 hodin od pozorování. Organizace či uskupení, které data potřebují v reálném čase, např. evakuace obyvatel při blížící se vlně tsunami, pak snímky získávají díky satelitům, které signál dál přenáší na pozemní stanice, odkud si mohou tyto organizace snímek stáhnout.¹¹

Protože je tato služba spuštěna relativně krátce (od roku 2014) stále ještě není možné využívat možnosti snímkování v celém jeho rozsahu. Snímkování bylo rozděleno do několika etap. Kdy byly v průběhu měsíců zpřístupňovány snímky pro nové oblasti (obr. 5).^{12 13}



Obr. 5: Fáze operačního stavu Sentinel-1A – A) první fáze, B) plný operační stav.¹⁴

¹⁰ Sentinel-1 User Handbook [online]. 2013, s. 80 [cit. 2016-02-08]. Dostupné z: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1_User_Handbook, str. 13

¹¹ Copernicus: Sentinel-1 - Satellite Missions - eoPortal Directory [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-1>

¹² Sentinel-1 - Data Products: Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/data-products>

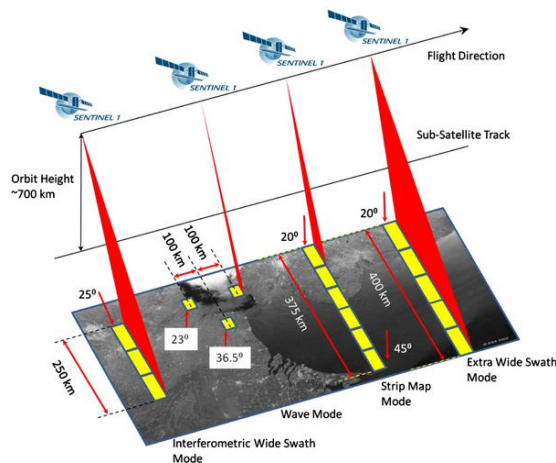
¹³ Sentinel-1 - Data Distribution Schedule: Missions - Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/data-distribution-schedule>

¹⁴ Production Scenario: Sentinel-1 - Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/production-scenario>

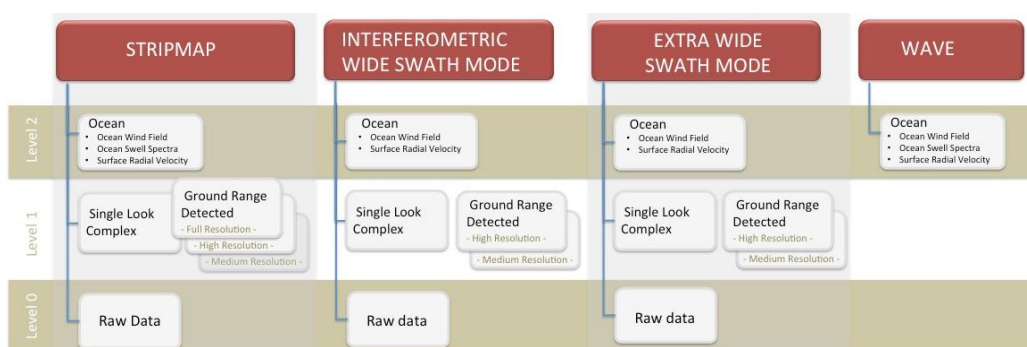
Typy scén

Prostorové rozlišení je proměnlivé v závislosti na typu radarového snímku (obr. 6).

K dispozici jsou čtyři typy snímků (tab. 2), kdy každý typ snímku je ESA doporučen pro jiný typ analýz (obr. 7). Snímá v pásmu C o frekvenci 5 405 MHz, vlnové délce 5,55 cm a duální polarizaci – HH+HV, VV+VH.¹⁵



Obr. 6: Jednotlivé typy scén Sentinel-1A.¹⁶



Obr. 7: Typy SAR snímků a jejich využití.¹⁷

¹⁵ Sentinel-1 - Instrument Payload: Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/instrument-payload>

¹⁶ Sentinel-1 - Instrument Payload: Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/instrument-payload>

¹⁷ Sentinel-1 - Data Products: Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/data-products>

Tab. 2: Typy snímků družice Sentinel^{18 19 20}

Scéna	Velikost scény [km]	Úhel dopadu [°]	Radiometrická hloubka [bit]	Prostorové rozlišení [m]	Polarizace
Wave-mode	20x20	22 – 35 35 – 46	10	20x20	HH, VV
Strip map mode	80x80	20 – 46	10	5x5	HH+HV VH+VV HH, VV
Interferometric wide-swath mode	250x250	29 – 46	10	5x20	HH+HV VH+VV HH, VV
Extra wide-swath mode	400x400	19 – 47	10	20x40	HH+HV VH+VV HH, VV

- **Wave-mode – WV**

Převážně využívá společně s modelem oceánských vln pro určování směr, výšku vln na otevřených mořích. Snímány je každých 100 km, avšak snímky se stejným úhlem dopadu jsou pořízeny každých 200 m (obr. 6).

- **Strip map mode – SM**

Navazuje na družice ERS-1 a ERS-2 a Envisat.

- **Interferometric wide-swath mode – IW**

Využívá režim TOPSAR namísto ScanSAR. Na rozdíl od režimu ScanSAR má rovnoměrnou SRN (Signal-to-Noise Ratio) a DTAR (Distributed Target Ambiguity Ratio). Tím je zajištěna kvalita obrazu v celém záběru.

- **Extra wide-swath mode – EW**

Lze jej stejně jako IW použít pro interferometrii. Tento typ scén se využívá pro monitoring polárních a námořních oblastí. Sleduje se tak tání ledovců, ale havárie v podobě úniku ropy do oceánu.²¹

Typy dat

Radarová data jsou všechna volně přístupná veřejnosti, vědcům, ale i soukromému sektoru. Snímky jsou v souladu se standardy poskytováním snímků stažitelné ve formátu *.SAFE a lze je stáhnout ve čtyřech úrovních – Level-0, Level-1 SLC, Level-1 GRD (Ground Range Detected) a Level-2 OCN (Ocean).

- **Level-0**

Jsou tzv. hrubá data, která je nutné před použitím dekomprimovat a předzpracovat.

- **Level-1 SLC**

Data už jsou georeferencovaná za použití informací o orbitě a zeměpisné šířce. Zajištěn je nulový dopplerův posun, zachována je fázová informace.

¹⁸ Gisat - Přehled družicových systémů Sentinel-1 A: Sentinel-1 A [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <http://www.gisat.cz/content/cz/dpz/prehled-druzicovych-systemu/satelite/sentinel-1-a>

¹⁹ Sentinel-1 - Instrument Payload: Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/instrument-payload>

²⁰ <https://earth.esa.int/web/sentinel/sentinel-1-sar-wiki/-/wiki/Sentinel%20One/Level+1b+Products>

²¹ Sentinel-1 - Instrument Payload: Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/instrument-payload>

- **Level-1 GRD**

Pro úpravu dat byl využit elipsoid. Snímek má přibližně čtvercové pixely. To umožňuje snížit tzv. zrnitost snímku, avšak na úkor geometrické přesnosti. Tomuto typu snímku zcela chybí informace o fázi. Avšak jsou poskytována ve třech úrovních rozlišení – plném, vysokém a středním.

- **Level-2 OCN**

Tento typ snímku navazuje na snímky družice ERS a ASAR. Navíc obsahuje dvě nové komponenty. Jimiž jsou OWF (Ocean Wind Fields) a RVL (Surface Radial Velocities), na základě kterých je možné stanovovat rychlost a směr větru u vodní hladiny.

3.1.2 Sentinel-2

Tato mise je zaměřená na sledování změn vegetačního povrchu ať už v zemědělství či lesnictví, při různých humanitárních operacích či při mapování rizik. Stejně jako družice Landsat či SPOT budou družice snímat v optické části spektra do třinácti spektrálních pásem – čtyři o prostorovém rozlišení 10 m, šest pásem o prostorovém rozlišení 20 m a zbylá tři pásma o rozlišení 60 m.²²

Družice byla vypuštěna 23. června 2015 a doba oběhu družice Sentinel-2A je 10 dní. Vypuštění druhé družice Sentinel-2B je plánováno na rok 2016.²³

Od 28. listopadu 2015 jsou veřejnosti dostupné ortorektifikované snímky.²⁴

3.1.3 Sentinel-3

Satelity Sentinel-3 budou využívány globálně pro sledování změn klimatu. Se svým zaměřením – sledování hladiny oceánů budou data Sentinel-3 využívána i pro predikci hurikánů, bouří nebo záplav a to na základě monitoringu povětrnostních vlivů. S tím jsou spojeny i atmosférické služby v podobě zjišťování povrchové teploty oceánů či rychlost větru u vodní hladiny. Sledována bude i činnost člověka na moři, v podobě případného znečištění vody v důsledku lodních havárií, zajištění bezpečnosti osobních plavidel.

Pro monitoring hladiny bude použit SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer), který přímo navazuje na radiometr AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer), jež byl využíván družicí Envisat. K devíti pásmům, v nichž bude SLSTR snímat budou přidána ještě další dvě, která budou využívána pro monitorování požárů. Snímkovat bude povrch v optické, blízké infračervené a termální části spektra.

Stejně jako SLSTR bude na senzor Envisatu MERIS navazovat i OLCI (Ocean and Land Colour Instrument). Jeho snímek, na rozdíl od snímku Envisatu, kdy se snímek skládal z 15 pásem, bude využívat 21 pásem.

Kromě těchto dvou senzorů družice ponese senzor SRAL (Synthetic Radar Altimeter), který bude pořizováním snímků navazovat na snímky z družice CryoSat.²⁵

²² Sentinel-2 - Overview: Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/overview>

²³ Sentinel-2 - ESA Operational EO Missions: Earth Online - ESA [online]. 2016 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/sentinel-2>

²⁴ Scientific Data Hub [online]. 2016 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <https://scihub.copernicus.eu/twiki/do/view/SciHubNews/WebHome?start=0;limit=10>

²⁵ Sentinel-3 Copernicus Observing the Earth Our Activities ESA: Our Activities ESA [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-3

Prozatím byla na oběžnou dráhu vypuštěna družice Sentinel-3A (16. únor 2016), vypuštění další družice Sentinel-3B je prozatím plánováno na rok 2017 a družice Sentinel-3C do roku 2020.²⁶

3.1.4 Sentinel-4

Tato družice s geostacionární jsou určené pro monitoring atmosféry a budou provozovány organizací EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites). Informace budou primárně sbírány pro Evropu a severní Afriku. Přesněji bude sledována celková kvalita ovzduší, mocnost stratosférického ozonu a samotné sluneční záření.

Sentinel-4 bude nahrazovat třetí generaci družic Envisat UVNS (Ultraviolet Visible Near-Infrared Shortwave) spektrometrem. Po dobu 8,5 let bude snímat ve třech pásmech – ultrafialové (305–400 μm), viditelné (400–500 μm) a blízké infračervené (750–775 μm).²⁷

3.1.5 Sentinel-5

Sentinel-5 navazuje taktéž na družice Envisat stejně jako Sentinel-4. Cílem této mise bude 7,5 roční monitoring atmosféry pro následně určování celkové kvality ovzduší a monitoring klimatu v globálním měřítku.²⁸

Pro tuto misi jsou stanoveny dva hlavní cíle. Prvním z nich bude zaměření na sledování klíčových koncentrací plynů v atmosféře jako ozón, oxid dusičitý, oxid siřičitý, oxid uhelnatý, metan, formaldehyd a další plyny pro sledování klimatu. Druhým cílem bude monitoring troposférického složení včetně znečištění v mezní vrstvě atmosféry pro zlepšení kvality ovzduší.²⁹

3.1.6 Sentinel-5 Precursor

Tato družice, zkráceně také Sentinel-5P, je určena pro monitorování atmosféry a klimatických změn. Mise byla umožněna na základě spolupráce ESA a NSO (Netherlands Space Office). Družice bude snímkovat pomocí spektrometru TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument) v ultrafialovém, viditelném, blízkém infračerveném a krátkém infračerveném pásmu.³⁰

Družice je koncipována jako sedmiletý pokračovatel hned několika družic (tab. 1) s tím, že navíc její data budou vyplňovat pětiletou pauzu mezi daty z družic Envisat – spektrometr SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorbing Spectrometer for Atmospheric Chartography) a družici Aura – spektrometr OMI (Ozone Monitoring Instrument) americké NASA (National Aeronautics and Space Administration) a družicí Sentinel-5. Její vypuštění je plánované na rok 2016.³¹

²⁶ Sentinel-3 - ESA EO Missions: Earth Online - ESA [online]. 2016 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-future-missions/sentinel-3>

²⁷ Sentinel-4 - Missions: Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-4>

²⁸ Sentinel-5 - Missions: Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5>

²⁹ Sentinel-5 - EUMETSAT [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/FutureSatellites/CopernicusSatellites/Sentinel5/index.html>

³⁰ Sentinels -4/-5 and -5P Copernicus Observing the Earth: Our Activities ESA [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinels_-4_-5_and_-5P

³¹ Sentinel-5P - Earth Online - ESA [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-future-missions/sentinel-5P>

3.1.7 Sentinel-6

Tato družice bude využívána pro stanovení přesné topografie oceánu. Snímky budou důležité pro stálé sledování změn hladiny oceánů, což je důležité nejen v kartografii, ale i klimatologii.

Mapováno bude primárně oceán a led. Díky své velké přesnosti bude možné ze snímků analyzovat důležité informace o mořských proudech či velikost vln na moři. Na základě těchto dat bude možné kontrolovat bezpečnost pobřežní zóny.³²

Navíc budou data využívána jako doplňující data pro numerické meteorologické předpovědi.

Kromě ESA na systému podílí i NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), která bude nápomocná při startu systému, a USA, které poskytnou podporu pozemního segmentu. Spolupodílet se na financování systému a vývoji družice bude EUMETSAT. Systém družic Sentinel-6 bude v období 2020–2030 navazovat na stávající mise družic JASON (Joint Altimetry Satellite Oceanography Network), v podobě dvou satelitů JASON-CS-A a JASON-CS-B.³³

4 POUŽITÍ DAT SENTINEL-1

4.1 Sledování mořské hladiny

Mořská hladina je sledována hned z několika důvodů. Prvním z nich je sledování tání ledovců. Ledovce se pomocí SAR metod sledují ve dvou hlavních směrech. Prvním je monitoring změn ledové pokrývky v důsledku změn klimatu a druhým je přímý důsledek tání ledovců, a to sledování volně plovoucích kusů ledu, jež by mohly být přímým ohrožením pro lodní dopravu. Dále je sledován pohyb lodí, vítr ovlivňující vlnění mořské hladiny či ropné havárie.³⁴

4.1.1 Monitoring lodí

Na rozdíl od Envisatu, může Sentinel-1 zachytit na mořské hladině daleko menší lodě (obr. 7). Radarová data jsou proto využívána k monitoringu lodí. Dopravní společnosti, tak mohou mít snadný přehled o místech, kde je lodí velké množství. Mohou ale i kontrolovat správnou trajektorii lodí. Lodě, jejich posádky a náklad je tak možné adekvátně chránit, bez použití doprovodných letadel či dalších lodí. Další výhodou radarových dat je, že je možné lodě sledovat za jakéhokoliv počasí a v jakoukoliv dobu. Snadný a rychlý přístup k datům pak zajišťují místní pozemní stanice, které jsou podporovány Evropskou komisí a vládami jednotlivých zainteresovaných států.³⁵

Jedním z případů kdy byla družice Sentinel-1A využita přímo, bylo odtáhnutí ztroskotané lodi Costa Concordia, která u Italských břehů najela na mělčinu.

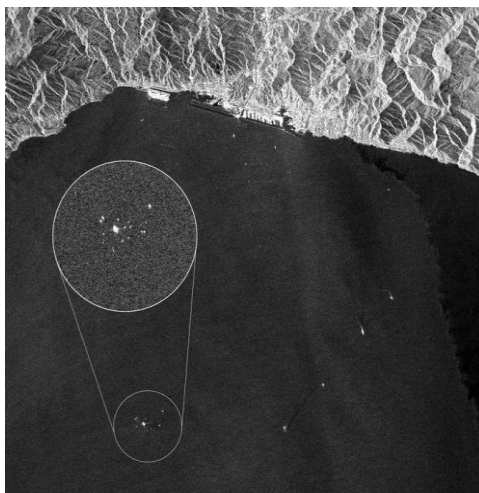
³² Sentinel-6 Copernicus Observing the Earth: Our Activities ESA [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-6

³³ Sentinel-6 – EUMETSAT [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/FutureSatellites/CopernicusSatellites/Sentinel6/index.html>

³⁴ Sentinel-1 User Handbook [online]. 2013, s. 80 [cit. 2016-02-08]. Dostupné z: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1_User_Handbook, str. 42

³⁵ Sentinel-1 User Handbook [online]. 2013 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1_User_Handbook, str. 43

Záchranná akce byla provedena na základě satelitních snímků. Díky takto získaným datům bylo vytvořeno několik scénářů, které by mohly během záchranné akce nastat.³⁶



Obr. 8: Tažení lodě Costa Concordia 26. června 2014.³⁷

4.1.2 Monitoring ropných havárií

SAR data jsou využívána také k monitoringu ropných skvrn na mořské hladině. Ať už jsou to skvrny vzniklé na základě havárie na ropné plošině, havárie tankeru, narušení pláště lodi či samovolný přirozený únik ropy do okolní vody.

Toto poskytuje norská KSAT (Kongsberg Satellite Services). Tato služba provádí detekce ropných skvrn na základě radarových snímků. Havárie monitoruje již od roku 1996. Tuto služby kromě vlády ovšem využívají i samotné naftařské společnosti.³⁸



Obr. 9: Ropná skvrna zachycená družicí Sentinel-1A, polarizace VV.³⁹

³⁶ *Costa Concordia: Recovery operations assisted from space* [online]. 2013, s. 2 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/Copernicus_Factsheet_CostaConcordia_Issue41_December2013.pdf

³⁷ *Space in Images - 2014 - 07 - Towing the Costa Concordia* [online]. 2014 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/07/Towing_the_Costa_Concordia

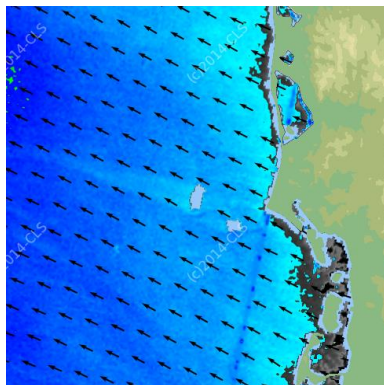
³⁸ *Oil Slick Detection Service: Kongsberg Gruppen* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://ksat.no/en/services%20ksat/oil%20slick%20detection%20service%20-%20page/>

³⁹ The role of Sentinel-1 in oil spill surveillance. *Interspill* [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <http://interspill.org/previous-events/2015/WhitePapers/Interspill2015ConferenceProceedings/25%20MARCH%202015/Sensing%20&%20Surveillance%20-%20Part%201/The-Role-of-Sentinel-1-in-Oil-Spill%20Surveillance.pdf>

4.1.3 Monitoring mořského větru

Výsledný radarový snímek je závislý na typu povrchu, který je monitorován. S různým typem povrchu dochází i k různým typům odrazu. Na základě toho, lze určit směr a výšku vlny na mořské hladině (obr. 10).

Díky tomu se dále odvíjí například předpovědi počasí, predikce šíření ropných skvrn či pro plánování trasy pro loďní dopravu.⁴⁰



Obr. 10: Výsledek monitorování směru a síly větru u mořské hladiny.⁴¹

4.2 Změny na zemském povrchu

4.2.1 Sledování ledu a sněhu

Ledovce, spolu s jejich táním, jsou sledovány ze dvou důvodů. Prvním z nich jsou změny, jež nastaly v důsledku globálního oteplování. Mezi tyto změny patří např. telení ledovců v pobřežních oblastech, či změna rozsahu zámruzu např. Severního ledového oceánu.

Druhý důvod, proč je tání ledovců sledováno, je samotný jeho důsledek, kterým jsou plovoucí kusy ledu. Tyto odlomené části ledovců je nutné monitorovat hlavně kvůli zachování bezpečnosti plaveb lodí.⁴²

4.2.2 Těžba

Pomocí družice Sentinel-1A byly zaznamenány změny povrchu v oblasti 30 000 km². Ropná pole jsou na výsledném snímku (Obr. 11) znázorněny černě, místa poklesu povrchu červeně a místa modrá, jsou místa sání.⁴³

V České republice se tímto problémem zabýval ve své rigorózní práci „Monitoring of Terrain Relief Changes using Synthetic Aperture Radar Interferometry: Application of SAR Interferometry Techniques in a Specific Undermined Ostrava-Karviná District“ M. Lazecký. Ten ve své práci využíval několik zdrojů SAR snímků (ERS, Envisat a Alos

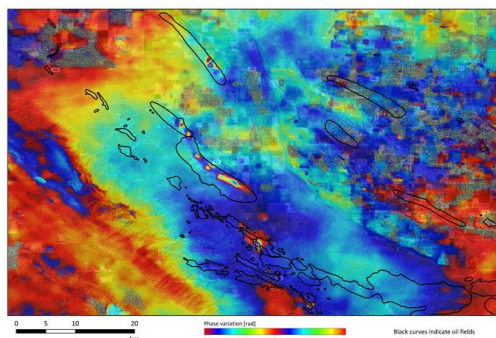
⁴⁰ Sentinel-1 User Handbook [online]. 2013 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1_User_Handbook, str. 44

⁴¹ EODA [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: https://eoda.cls.fr/login?came_from=%2F

⁴² Oceans and ice / Sentinel-1 / Copernicus / Observing the Earth / Our Activities / ESA [online]. 2015 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Oceans_and_ice

⁴³ Space in Images - 2015 - 03 - Sentinel-1A interferogram, San Joaquin Valley. ESA [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2015/03/Sentinel-1A_interferogram_San_Joaquin_Valley

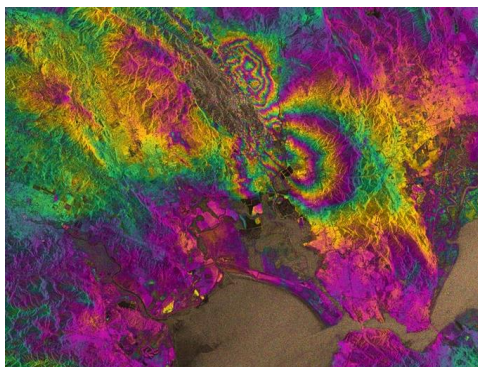
Palsar).⁴⁴ Diferenční interferometrii použili ve své práci F. Miao a kol. „Application of DInSAR and GIS for underground mine subsidence monitoring“, kdy na základě snímků tandemem ERS a družice Envisat sledovali změny terénu v důsledku těžby v oblasti Tang Shan v provincii Hebei.⁴⁵



Obr. 11: Interferogram – údolí San Joaquin.⁴⁶

4.2.3 Zemětřesení

Družici Sentinel-1A byly také zaznamenány změny povrchu po jednom z největších zemětřesení v Kalifornii za posledních 25 let, které proběhlo 24. srpna 2014 v údolí Napa. Sledovány byly změny mezi snímky pořízenými 7. srpna a 21. srpna. Výsledný interferogram (obr. 12) ukazuje deformaci zemského povrchu v místě zemětřesení. Radarový snímek je schopný, jako v tomto případě, zachytit i nepatrné změny v průběhu zemského povrchu. Na obrázku (obr. 12) je vidět typický efekt tzv. butterfly effect, který je typický pro interferogramy zachycující změnu povrchu po zemětřesení.⁴⁷



Obr. 12: Interferogram – údolí Nappa.⁴⁸

⁴⁴ LAZECKÝ, Milan. *Application of SAR Interferometry techniques in a specific undermined region of Northern Moravia*. 2011. Rigorózní práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

⁴⁵ MIAO, Fang a kol. Application of DInSAR and GIS for underground mine subsidence monitoring. *The International Archives of the Photogrammetry: Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. 2008, (Vol. XXXVII) [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/41.pdf

⁴⁶ Space in Images - 2015 - 03 - Sentinel-1A interferogram, San Joaquin Valley. ESA [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2015/03/Sentinel-1A_interferogram_San_Joaquin_Valley

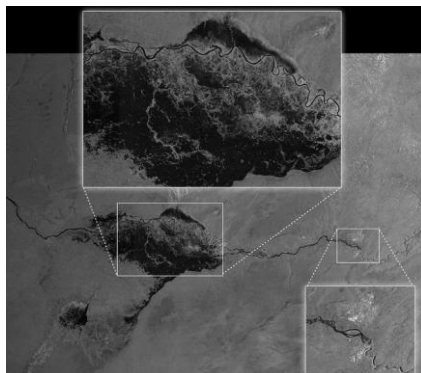
⁴⁷ Space in Images - 2014 - 09: Napa Valley quake [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/09/Napa_Valley_quake

⁴⁸ Space in Images - 2014 - 09: Napa Valley quake [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/09/Napa_Valley_quake

4.2.4 Monitorování v hydrologii

SAR snímky se využívají v hydrologii nejen po povodních pro stanovení následných škod a změn průběhu reliéfu, tak jak tomu bylo v případě magisterské práce A. Tkačíkové. Ta na základě radarových dat pomocí metody InSAR určovala změny terénu po povodních v roce 1997.⁴⁹

Dále se snímky využívají i pro monitoring průběhu záplav. Radarový signál na rozdíl od signálu z optické část spektra projde mraky a je tak možné tato data zpracovávat přímo během probíhajících záplav. Tak jako tomu bylo u záplav v Namibii na řece Zambezi (obr. 13).⁵⁰



Obr. 13: Záplavy v Namibii na řece Zambezi z 13. dubna 2014.⁵¹

Pomocí radarových snímků lze sledovat téměř jakékoliv změny na zemském povrchu. Kromě monitorování změny průběhu zemského povrchu, ať už způsobené, zemětřesením, těžbou či poklesem hladiny podzemní vody. Podobně tak byla za pomoci radarových dat monitorována změna průběhu říční delty Dunaje v Rumunsku, která je zapsaná na seznamu UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization).⁵² Právě v tomto případě mise Sentinel-1A doplňuje data družice CryoSat. Využity byly dva snímky, z 2. a 14. března 2014.⁵³

4.2.5 Lesnictví a zemědělství

Díky rozdílným typům odrazů na různých typech povrchů se radarová data využívají i při monitoringu vegetačního povrchu. Data se využívají pro určování různých typů stromů. Ale převážně se využívají při sledování správného hospodaření resp. při sledování nezákonné těžby či vypalování lesů, převážně v deštných pralesích.

⁴⁹ TKÁČIKOVÁ, Andrea. *Využitie radarovej interferometrie k vyhodnoteniu zmien terénu po povodniach v roku 1997*. 2010. Diplomová práce. Vysoká škola báňská — Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Milan Lazecký

⁵⁰ *Space in Images - 2014 - 04 - Namibia from Sentinel-1A* [online]. 2014 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/04/Namibia_from_Sentinel-1A

⁵¹ *Space in Images - 2014 - 04 - Namibia from Sentinel-1A* [online]. 2014 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/04/Namibia_from_Sentinel-1A

⁵² *Danube Delta - UNESCO World Heritage Centre* [online]. 2015 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://whc.unesco.org/en/list/588>

⁵³ *Space in Images - 2015 - 06 - Danube Delta interferogram* [online]. 2015 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2015/06/Danube_Delta_interferogram

Nejen pro sledování využití zemědělské půdy, sledování a následného určování typů pěstovaných plodin se využívají SAR data. Sledovány jsou i změny produkce, ať už následkem nedostatku vody či nesprávném hospodaření a využívání zemědělské půdy.⁵⁴

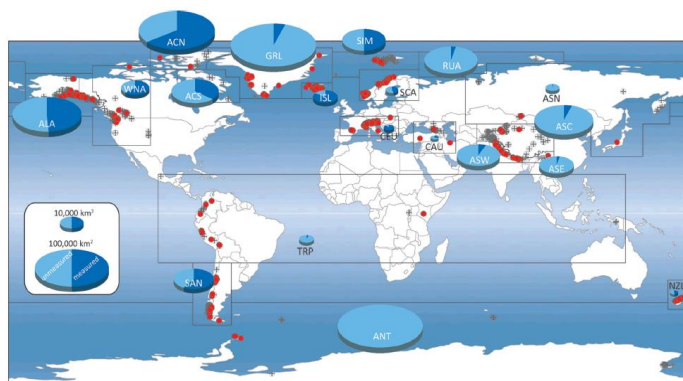
Zpracování projektu na toto téma se v roce 2013 ujaly Vídeňská Technická, Švédská zemědělská univerzita, švédská Technologická univerzita Chalmers a irská firma TreeMetrics v projektu “Advanced Techniques for Forest Biomass and Biomass Change Mapping Using Novel Combination of Active Remote Sensing Sensor“. Tato skupina zpracovávala data jak ze Sentinel1 (pásmo C), tak i ALOS 2 PALSAR 2 (pásmo L), ale i družice TerraSAR-X (pásmo X). Cílem projektu bylo vyvinutí nových metod na základě kombinace satelitních snímků s 3D daty pro sledování biomasy a detekce jejích změn.⁵⁵

Pro detekci změn krajiny v čase využíval radarová data družice Sentinel-1 i J. Vanko ve své diplomové práci „Monitoring Landscape changes using satellite radar imagery“. Ve své práci pak pracoval kromě snímků z družice Sentinel-1 i se snímky z družice TerraSAR-X. Pomocí těchto snímků porovnával změny krajiny.⁵⁶

5 MONITORING KRYOSFÉRY

V současné době, kdy dochází k rapidnímu zrychlování tání ledovců. Jsou radarová data pro monitoring těchto změn velmi využívána. Sledovány jsou jak pevninské, tak i mořské ledovce. V Evropě se tomu to problému věnují převážně Alpské státy, jako je Švýcarsko, Rakousko či Francie, Ale i severské státy jako Norsko, Švédsko či Island.

Jak uvádí M. Zemp a kol. ve své práci „Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century“ není možné sledovat všechny ledovce, avšak pro regionální analýzu je vhodné využít 19 regionů (obr. 14), tak jak je definovaly v roce 2010 V. Radić a R. Hock, a tam, kde je to nutné lze jednotlivé regiony rozdělit na další podregiony.⁵⁷



Obr. 14: Mapa definovaných 19 regionů.⁵⁸

⁵⁴ Land Monitoring - Sentinel-1 SAR - User Guides - Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/applications/land-monitoring>

⁵⁵ Advanced Techniques for Forest Biomass and Biomass Change Mapping Using Novel Combination of Active Remote Sensing Sensor: Copernicus [online]. 2015 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://www.copernicus.eu/projects/advancedsar>

⁵⁶ VANKO, Jakub. *Monitoring Landscape changes using satellite radar imagery*. Bratislava, 2015. Diplomová. Slovenská technická univerzita v Bratislavě. Vedoucí práce Ing. Juraj Papčo Ph.D.

⁵⁷ ZEMP, Michael, Holger FREY, Isabelle GÄRTNER-ROER, et al. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of Glaciology*. 2015, 61(228), 745-762. DOI: 10.3189/2015JoG15J017. ISSN 00221430. Dostupné také z: <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article>

⁵⁸ ZEMP, Michael, Holger FREY, Isabelle GÄRTNER-ROER, et al. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of Glaciology*. 2015, 61(228), 745-762. DOI: 10.3189/2015JoG15J017. ISSN 00221430. Dostupné také z: <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article>

5.1 Pozemní monitoring

Pozemní monitoring pomocí radaru probíhá na základě dat získaných z pozemních radarů.

5.1.1 KAPRI

Švýcarská polytechnická univerzita ETH Curych (Eidgenössische Technische Hochschule), kde pro monitoring ledovců používají jak družicová, letecká, ale i pozemní radarová data. Jejich pozemní radarový senzorový systém nese název KAPRI (Ku-band Advanced Polarimetric Radar Interferometer). Snímáno je v pásmu Ku díky anténám, které jsou polarizované horizontálně i vertikálně, mohou používat plně polarizovaná radarová data. Tento systém byl instalován v létě v roce 2015 pro sledování ledovce Bisgletscher.

Snímky byly pořizovány každé dvě minuty v průběhu letních měsíců a tato naměřená data byla zpracována pro real-time monitoring ledovce. Navíc je možné tento dataset použít pro vývoj a testování nových technik pro zpracování časových řad interferometrických a polarimetrických dat.⁵⁹

5.2 Monitoring pomocí družic

Sledování polárních oblastí, probíhá již řadu let. Data se využívají jednak z družic, jež byly přímo určeny pro monitoring polárních oblastí, ale i dat z družic ne přímo k tomu určených.

5.2.1 CryoSat

Družice Cryosat (od roku 2010 v provozu CryoSat-2) snímá zemský povrch radarovým altimetrem SIRAL (SAR Interferometric Radar Altimeter).⁶⁰ Pomocí něj lze měřit např. tloušťku plovoucího ledu. Hlavním cílem je potvrdit předpověď ztenčování arktického ledovcového pokryvu v důsledku globálního oteplování.⁶¹

Na stránkách Centre for Polar Observation and Modelling Data Portal je pak každé čtyři dny vložena aktuální mapa mocnosti ledovcové pokrývky severní polokoule.⁶²

5.2.2 ICESat

Družice ICESat (Ice, Cloud and land Elevation Satellite) byla v roce 2003 vypuštěna NASA na oběžnou dráhu země pro snímkování pomocí radarové altimetrie zemský povrch za účelem monitorování ledovcové pokrývky, topografie a vegetačních charakteristik, ale i mraků.⁶³

⁵⁹ *Ground-based remote sensing with KAPRI – Chair of Earth Observation and Remote Sensing: ETH Zurich* [online]. 2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <https://www.ethz.ch/content/specialinterest/baug/institute-ifu/eo/en/forschung/ground-based-radar-investigations-with-kapri.html>

⁶⁰ *Overview - Earth Online: ESA* [online]. 2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/cryosat/overview>

⁶¹ *Objectives - Earth Online: ESA* [online]. 2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/cryosat/objectives>

⁶² *CryoSat Operational Monitoring: Sea Ice* [online]. 2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://www.cpom.ucl.ac.uk/csopr/seaice.html?lat=76.00&lon=154.83&thk_period=28&season=Autumn&year=2014&basin_selected=12&ts_area_or_point=point&select_thk_vol=select_thk

⁶³ *NASA: ICESat* [online]. 2015 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/index.php>

5.3 Instituce zajišťující monitoring kryosféry

5.3.1 UNEP

Program UNEP (United Nation Environment Program) patřící pod OSN se, mimo jiné, zabývá táním ledovců. V publikaci, *Global Glacier Changes: facts and figures*, kterou UNEP vydal, jsou shrnuty změny ledovcové pokrývky na světě v průběhu let. Informace v této publikaci jsou převážně čerpány z WGMS (World Glacier Monitoring Service).⁶⁴

5.3.2 WGMS

Založení organizace WGMS byla iniciováno už v roce 1894 Na šestém mezinárodním geologickém kongresu v Curychu. Založena pak byla o dva roky později sloučením PSFG (Permanen Servise on Fluctuation of Glaciers) a TTS/WGI (Temporal technical Secretariat/World Glacier Inventory), kdy začaly být sbírány informace o změnách ledovcového pokryvu. V současné době má WGMS 29 členů (příloha č. 2).

V současné době WGMS sbírá data o změnách objemu, plochy a délky ledovců, dále jsou sbírány statistická data o celoročním ledovcovém pokryvu. Tato získaná data jsou důležitá pro další modelování změn klimatu. Nejobsáhlejší informace jsou pořízeny pro oblast Alp a Skandinávie. Pro tyto oblasti jsou k dispozici dlouhodobé a nepřerušované datasety.⁶⁵

Kromě UNEP s WGMS spolupracuje nejen členské státy, ale i další organizace spadající jako je například UNESCO nebo se švýcarskými institucemi jako je Komise pro kryosféru švýcarské Akademie věd či Švýcarský úřad pro životní prostředí, ale i s WMO (World Meteorological organization) či s ICSU (International Council for Science), kde spolupracuje s IACS (International of Astronomical and Geophysical Data Analyses Services), FAGS (Federation of Astronomical and Geophysical Data Analysis Services) a WDS (World Data Systém).⁶⁶

Od roku 1965 vydává WGMS jednou za pět let zprávu – FoG (Fluctuation of Glaciers). Poslední dostupná je pro roky 2005-2010, obsahující základní informace o změnách na sledovaných ledovcích.⁶⁷ V roce 2013, bylo vydáno první číslo bulletinu, který obsahuje standardizované informace, včetně map, tabulek a grafů, pro sledované ledovce.⁶⁸

V prosinci 2015 byla v Paříži na Klimatické konferenci COP21 uveřejněna aplikace pro mobilní telefony – Glacier App, která vznikla za spolupráce WGMS, Švýcarské agentury pro rozvoj a spolupráci společně se Spolkovým úřadem meteorologie a klimatologie MeteoSwis. Hlavním cílem této aplikace je pomoc reflektovat změny v ledovcovém pokryvu, jak na vládní, tak na vědecké úrovni.⁶⁹

⁶⁴ ZEMP, Michael. *Global glacier changes: facts and figures* [online]. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme, 2008 [cit. 2016-04-25]. ISBN 978-928-0728-989. Dostupné z: <http://www.grid.unep.ch/glaciers/pdfs/glaciers.pdf>

⁶⁵ *About WGMS world glacier monitoring service: World Glacier Monitoring Service* [online]. 2015 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://wgms.ch/about_wgms/

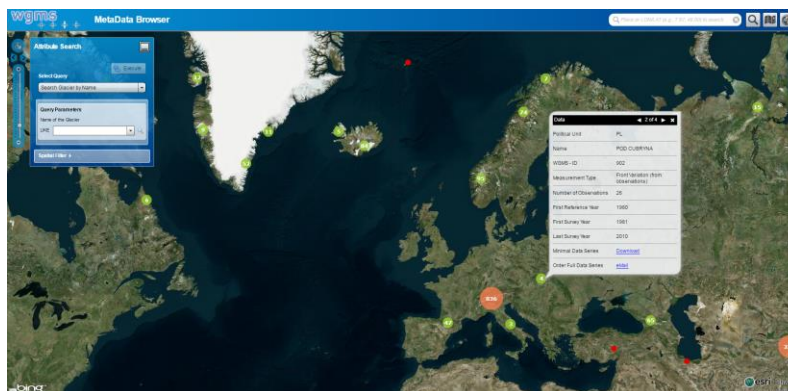
⁶⁶ *About WGMS world glacier monitoring service: World Glacier Monitoring Service* [online]. 2015 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://wgms.ch/about_funding/s

⁶⁷ *About WGMS world glacier monitoring service: World Glacier Monitoring Service* [online]. 2015 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://wgms.ch/products_fog/

⁶⁸ ZEMP, Michael, Isabelle GÄRTNER-ROER a Samuel U. NUSSBAUMER. *GLOBAL GLACIER CHANGE BULLETIN* [online]. In: . 1. Zurich, 2014, s. 242 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://wgms.ch/downloads/WGMS_GGCB_01.pdf

⁶⁹ *About WGMS world glacier monitoring service: World Glacier Monitoring Service* [online]. 2015 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://wgms.ch/glacierapp/>

Na stránce <http://www.wgms.ch/metadatabrowser.html> je k dispozici MetaData Browser, kde lze prohlížet základní informace o sledovaných ledovcích (obr. 15).⁷⁰



Obr. 15: Ukázka metadatového prohlížeče WGMS.

5.3.3 ESA CCI

Projekt Glaciers CCI (Climate Change Initiative) má za cíl pomoci vytvořit úplný a podrobný seznam ledovců. Cílem je sběr dat ve vybraných časových obdobích a vytvořit tak podrobné datasey. Tyto nově získané informace mohou velkým dílem přispět k modelování následků tání ledovců jako je vzestup hladiny světového oceánu.

Projekt si na víc bere za cíl vyvinout nové algoritmy a metody zpracování získaných dat. Takovým to dílčím cílem je vytvoření metodiky pro určování nejistoty při klasifikaci v ledovcových oblastech na základě fuzzy logiky.⁷¹

Dalším cílem je vytvoření CCI Toolboxu, který bude schopný zpracovávat klimatická data získaná kontinuálním monitoringem. V současné době je na stránkách ESA (<http://cci.esa.int/sites/default/files/CCITBX-UR-Questionnaire.pdf>) dostupný dotazník, jehož vyplnění přispěje k vytvoření plnohodnotného nástroje pro zpracování klimatických dat o různých formátech.⁷²

5.4 Monitoring ledovců v Arktidě

Již v minulém století byla Grónsku a sledování jeho ledovců věnována velká pozornost. Což dokazuje Satellite image atlas of Glacier of the World z roku 1995, který se věnuje významným Grónským ledovcům.⁷³

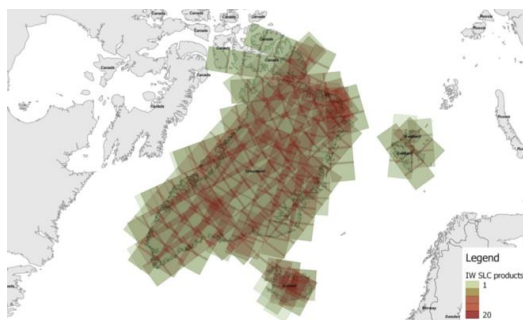
Z roku 1995 ESA využila data z družice S-1A pro monitoring ledovců v Grónsku. Použita byla data od ledna do června roku 2015. Tento dataset byl navíc doplněn o data z družic Radarsat-1 a 2, TerraSAR-X a TanDEM-X, ALOS a Cosmo-Skymed. Na základě těchto dat byla vytvořena mapa pohybu pevninských ledovců Grónska.

⁷⁰ WGMS: MetaData Browser [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.wgms.ch/metadatabrowser.html>

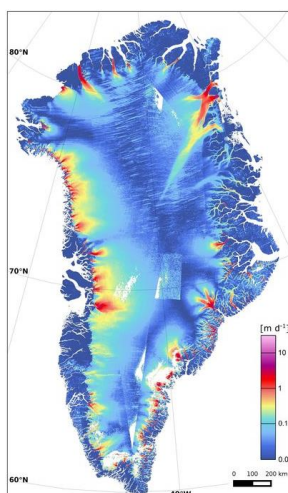
⁷¹ Overview: ESA CCI glaciers website [online]. 2010 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.esa-glaciers-cci.org/index.php?q=overview>

⁷² CCI Toolbox – take our survey: CCI Open Data Portal [online]. 2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://cci.esa.int/content/cci-toolbox-take-our-survey>

⁷³ WILLIAMS, Richard S. a Jane G. FERRIGNO. *Satellite Image Atlas of Glaciers Of the World - Greenland: U.S. Geological Survey Professional paper 1386-C* [online]. Washington: United States Government Printing Office, 1995 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=5ijwAAAAMAAJ&pg=SL3-PA40&dq=Harald+Moltke+Glacier&hl=cs&source=gbs_selected_pages&cad=2#v=onepage&q=Harald%20Moltke%20Glacier&f=false



Obr. 16: Pokrytí Grónska snímky družice S-1A v období 16. 1. – 9. 3. 2015.⁷⁴



Obr. 17: Rychlost tání pevninských ledovců v Grónsku za období leden – červen 2015.⁷⁵

Na čtyři Grónské ledovce se ve své práci „Rapid ice discharge from southeast Greenland glaciers“ zaměřil E. Rignot a kol., kdy pomocí metody InSAR sledovali pohyby ledovců na základě snímků z družic ERS-1 a ERS-2.⁷⁶

5.4.1 Ledovec Jakobshavn

Velká pozornost je v posledních několika letech věnována právě tomuto ledovci. Nejen díky tomu, že je fjord Illulisad od roku 2004 na seznamu památek UNESCO.⁷⁷ Historie sledování tohoto ledovce sahá do poloviny 19. století (obr. 18).

Telení tohoto ledovce 28. května 2008 bylo zachyceno i pro film „Chasing Ice“ Jamesem Balog. Toto telení bylo označeno jako největší kamarou.⁷⁸

⁷⁴ *Space in Images - 2015 - 11: Greenland coverage from Sentinel-1A* [online]. 2015 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2015/11/Greenland_coverage_from_Sentinel-1A

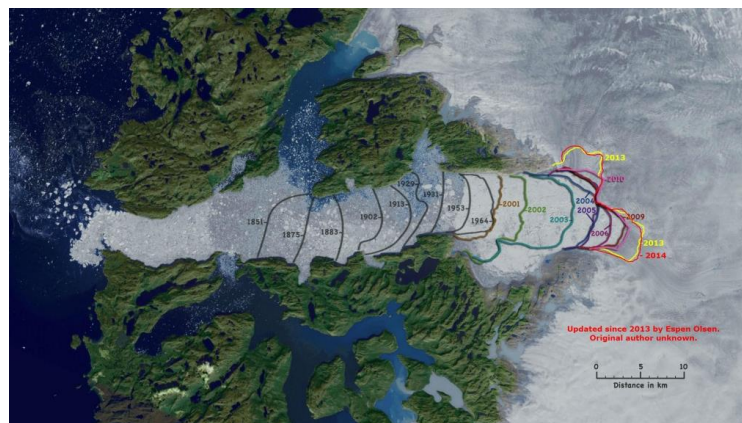
⁷⁵ *Space in Images - 2015 - 11: Ice sheet in motion* [online]. 2015 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2015/11/Ice_sheet_in_motion

⁷⁶ RIGNOT, E. et al. Rapid ice discharge from southeast Greenland glaciers. *Geophysical Research Letters* [online]. 2004, **31**(10), n/a-n/a [cit. 2016-04-25]. DOI: 10.1029/2004GL019474. ISSN 00948276. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1029/2004GL019474>

⁷⁷ *Ilulissat Icefjord: UNESCO World Heritage Centre* [online]. 2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://whc.unesco.org/en/list/1149>

⁷⁸ *Massive Calving of Jakobshavn Isbræ: The Great White Con* [online]. 2015 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://greatwhitecon.info/2015/02/shock-news-massive-calving-of-jakobshavn-isbrae/>

Kromě optických snímků byla právě pro monitoring úbytku využita i radarová data. V minulosti byl používán tandem družic ERS-1 a 2 či družice CryoSat.^{79 80} V současnosti ESA využívá dat družice S-1A.⁸¹



Obr. 18:Přehled hranic tání ledovce Jakobhavn.⁸²

5.4.2 Ledovec Austfonna

Ledovec Austfonna je největší ledovou masou severního souostroví Špicberky. Tento ledovec je díky své poloze velmi náchylný na změny klimatu, díky čemuž je velmi obtížné předpovídat jeho vývoj.

Sledování změn mocnosti tohoto ledovce popsal G. Moholdt a kol. ve své práci „Geometric changes and mass balance of the Austfonna ice cap, Svalbard“. V této práci porovnávali data jak z družicových, leteckých, tak i pozemních senzorů.⁸³

Rapidní úbytek ledu ledovce Austfonna na Špicberkách (obr. 19) zaznamenaly družice Sentinel-1 a CryoSat. Kromě zmenšení došlo i ke zrychlení jeho pohybu.⁸⁴

⁷⁹ *Ice sheet highs, lows and loss: CryoSat Observing the Earth* ESA [online]. 2014 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/CryoSat/Ice_sheet_highs_lows_and_loss

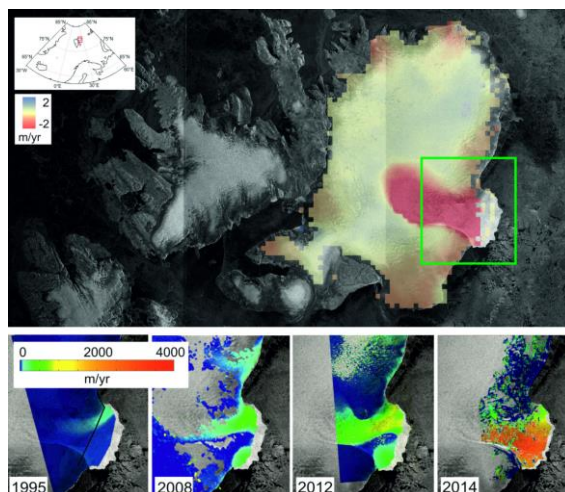
⁸⁰ *Radar Ice Motion Interferometry* [online]. 2014 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/workshops/ers97/papers/goldstein/>

⁸¹ *Chasing ice: Sentinel-1* [online]. 2015 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Chasing_ice

⁸² *Massive Calving of Jakobshavn Isbræ: The Great White Con* [online]. 2015 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://greatwhitecon.info/wp-content/uploads/2015/02/Jakobshavn-calving1851-2014-1024x595.jpg>

⁸³ MOHOLDT, G., J. O. HAGEN, T. EIKEN a T. V. SCHULER. Geometric changes and mass balance of the Austfonna ice cap, Svalbard. *The Cryosphere*. 2010, **4**(1), 21-34. DOI: 10.5194/tc-4-21-2010. ISSN 1994-0424. Dostupné také z: <http://www.the-cryosphere.net/4/21/2010/>

⁸⁴ *Monitorování polárních oblastí díl II: Dálkový průzkum Země a jeho využití v meteorologii a klimatologii* [online]. 2016 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.pocasicz.cz/aktuality-o-pocasi/dalkovy-pruzkum-zeme-a-jeho-vyuziti-v-meteorologii-a-klimatologii-2455/monitorovani-polarnich-oblasti-dil-ii-2488>



Obr. 19: Ukázka vývoje masivního tání ledovce Austfonna, Špicberky.⁸⁵

5.4.3 Ledovce Severní země

Sledováním ledovců Severní země se ve své práci „Form and flow of the Academy of Sciences Ice Cap, Severnaya Zemlya, Russian High Arctic“ zabýval J. A. Dowdeswell a kol. v té práci byla použita data – optická, SLAR i SAR. Výsledný interferometogram byl vytvořen na základě snímků tandemu ERS.⁸⁶

Kombinaci diferenční interferometrie a altimetrie byla použita v práci „Mapping and interpreting glacier changes in Severnaya Zemlya with the aid of differential interferometry and altimetry“. Použita byla data z družic ERS-1 a 2 a ICESat.⁸⁷

Nejen pro Severní zemi, ale pro celou Euroasijskou Arktidu byl na základě spolupráce ESA a v projektu MAIRES vytvořen online atlas ledovců Euroasijské Arktidy. Mapováno bylo v období 1950 – 2010. Používána byla interferometrická data z družic ERS a TamDEM-X a data radarové altimetrie z družic ICESat a CryoSat. V rámci atlasu jsou výstupy k dispozici ve formátu pdf, animace pak ve formátu gif.⁸⁸

5.5 CryoClim

CryoClim je internetová služba poskytující výstupní data klimatických analýz vytvořených na základě družicových dat dostupná na stránce http://www.cryoclim.net/cryoclim/subsites/data_portal/. Tento portál umožňuje jak hledání, prohlížení, ale i stahování dat. CryoClim poskytuje data převážně pro oblast Norska a Špicberků.^{89 90}

⁸⁵ *Satellites catch Austfonna shedding ice* [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <http://phys.org/news/2015-01-satellites-austfonna-ice.html>

⁸⁶ DOWDESWELL, J. A., R. P. BASSFORD, M. R. GORMAN, et al. Form and flow of the Academy of Sciences Ice Cap, Severnaya Zemlya, Russian High Arctic. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2002, 107(B4), EPM 5-1-EPM 5-15. DOI: 10.1029/2000JB000129. ISSN 01480227. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1029/2000JB000129>

⁸⁷ SHAROV, Aleksey I. a Alexandra Yu. TYUKAVINA. *Mapping and interpreting glacier changes in Severnaya Zemlya with the aid of differential interferometry and altimetry*. 2009, „FRINGE'09 Workshop Proc., Frascati, ESA SP-677

⁸⁸ MAIRES - *Monitoring Arctic Land and Sea Ice from Russian and European Satellites* [online]. 2016 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: [view-source:http://dib.joanneum.at/MAIRES/index.php?page=atlas](http://dib.joanneum.at/MAIRES/index.php?page=atlas)

⁸⁹ SOLBERG, Rune, Mari Anne KILLIE, Liss Marie ANDREASSEN a Max KÖNIG. *CRYOCLIM: A NEW OPERATIONAL SYSTEM AND SERVICE FOR CLIMATE MONITORING OF THE CRYOSPHERE*. 2008, , 7.

⁹⁰ *CryoClim* [online]. 2015 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://www.cryoclim.net/cryoclim/subsites/data_portal/

6 RADAR

Využívání radaru, dálkového průzkumu v mikrovlnné části spektra, se využívá stále více. Avšak z důvodů jeho velké technické náročnosti a z důvodů vojenského utajení se jeho použití v běžných environmentálních aplikacích značně opozdilo.⁹¹

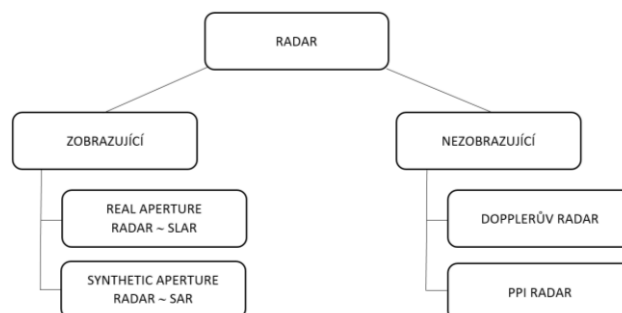
Mikrovlnnou částí spektra se rozumí vlnové délky v intervalu od 1 mm do 1 m. Má základní výhody oproti klasickému snímkování ve vlnových délkách od 390 μm do 1 mm. Hlavní výhodou je, že mikrovlnné záření se své nižší frekvenci šíří atmosférou za jakýchkoliv podmínek bez ohledu na počasí. Mikrovlnné záření je schopné procházet deštěm, oblačností, sněhem, a denní dobu. Navíc je mikrovlnné záření schopné proniknout i do určité hloubky v sedimentech nebo částečně skrz vegetaci.

Na rozdíl od charakteristik objektů na zemském povrchu v optické části spektra (odrazové a vyzařovací charakteristiky), jsou v tomto případě odrazové charakteristiky ovlivňovány drsností a obsahem vody v objektu. Hladké povrchy se ve viditelné části spektra mohou jevit jako drsné a naopak.

Pomocí mikrovlnné části spektra lze zemský povrch snímat, jak aktivními metodami DPZ, tak i těmi pasivními.⁹²

Radar se dělí na dvě základní skupiny – zobrazující a nezobrazující. Mezi nezobrazující patří Dopplerův radar, který se používá ke stanovení rychlosti vozidel. Jak samotný název napovídá, využívá známého Dopplerova efektu posunu frekvencí ve vyslaném a přijatém signálu. Naopak PPI radar se používá v meteorologii nebo pro navigaci. Typickým zástupcem je pak právě meteorologický radar, kdy se úzká radarový paprsek otáčí a zaznamenává odražený signál tzv. echo z území o poloměru až několika set kilometrů, tak jak je tomu například na území ČR, které pokrývají pouze dva meteorologické radary (obr. 20).

V DPZ se využívá radar zobrazující. Který je rozdělen na dvě skupiny, první je radar s reálnou aperturou, který se nejčastěji využívá při leteckém snímkování, a proto je možné se v tomto případě setkat i s označením SLAR (Side Looking Airborne RADAR). Naopak pro radar se syntetickou aperturou označovaný jako SAR (Synthetic Aperture RADAR) jsou jako nosiče využívány družice.



Obr. 20: Dělení radaru.⁹³

První družicí nesoucí radarový skener byla družice SEASAT, která byla vypuštěna v roce 1978. Následována sovětskou družicí KOSMOS. Až v roce 1991 byly na oběžnou dráhu vyneseny další tři družice – sovětský ALMAZ-1, evropský ERS-1 a Japonský

⁹¹ DOBROVOLNÝ, Petr. *Dálkový průzkum země: Digitální zpracování obrazu*. 1. Brno, 1998, s. 58.

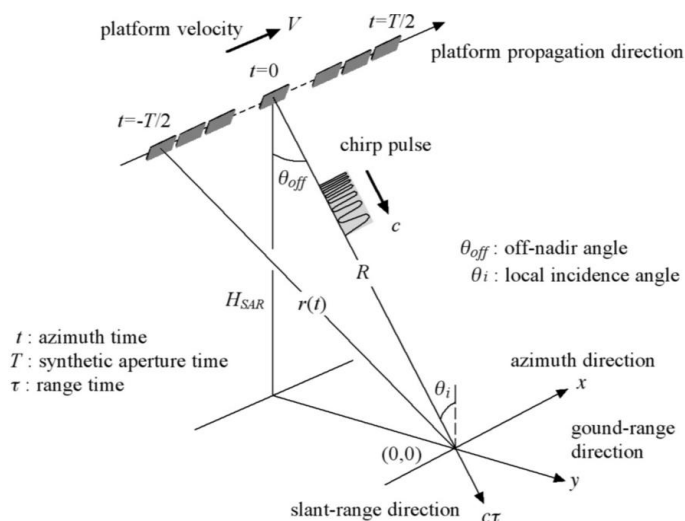
⁹² DOBROVOLNÝ, Petr. *Dálkový průzkum země: Digitální zpracování obrazu*. 1. Brno, 1998, str. 57.

⁹³ DOBROVOLNÝ, Petr. *Dálkový průzkum země: Digitální zpracování obrazu*. 1. Brno, 1998, str. 57.

JESR-1. O čtyři roky později pak následovalo vypuštění kanadské družice RADARSAT.⁹⁴

6.1 Radar se syntetickou aperturou

Na rozdíl od SLAR, je technicky složitější, což umožňuje pořizování snímků z oběžné dráhy. SAR nese fyzicky krátkou anténu, která je zaznamenáním echa modifikovaná a následně syntetizována. Při vyslání mikrovlnného signálu je zaznamenán čas odeslání, mikrovlnný paprsek se odrazí od sledovaného objektu na zemském povrchu a čas, kdy odražený signál anténa přijme je znovu zaznamenán. Syntetizování antény znamená, že je signál zpracován tak, jako by byl přijat anténou, jejíž velikost je shodná s dráhou, kterou nosič antény (v tomto případě družice) urazí za dobu, kdy je snímán objekt v jeho zorném poli.⁹⁵



Obr. 21: Schéma snímkování SAR.⁹⁶

Schéma (obr. 21) popisuje základní veličiny, které jsou ve snímkování pomocí SAR důležité. Hlavní z nich H_{SAR} , což je výška, ve které družice snímkuje zemský povrch. Rychlost nosiče V (platform velocity) je společně s výškou družice důležitá hodnota pro stanovení přesné polohy družice na oběžné dráze, což je rozhodující pro výpočet dalších veličin. Mezi ty patří úhel pohledu θ_{off} (look angle, v tomto případě off-nadir angle), jeho hodnota je důležitá proto, že radarové snímky nejsou pořizovány, na rozdíl od optických snímků, kolmo na zemský povrch, ale vždy pod určitým úhlem. Úhel, pod kterým paprsek dopadá – úhel dopadu θ_i (local incidence angle) je závislý na průběhu terénu, který je snímán. Vzdálenost mezi družicí a povrchem R se nazývá vzdálenost v šikmém pohledu (slant-range direction), vzdálenost ve směru kolmém na směr letu y (ground-range direction) je promítnutí vzdálenosti v šikmém pohledu do nulové hladiny, směr letu x (azimuth direction) je rovnoběžný s dráhou družice.⁹⁷

⁹⁴ DOBROVOLNÝ, Petr. *Dálkový průzkum země: Digitální zpracování obrazu*. 1. Brno, 1998, str. 58.

⁹⁵ DOBROVOLNÝ, Petr. *Dálkový průzkum země: Digitální zpracování obrazu*. 1. Brno, 1998, str. 52.

⁹⁶ *Remote Sensing | Free Full-Text | Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with Selected Topics* [online]. 2013 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2072-4292/5/2/716/htm>

⁹⁷ *Remote Sensing | Free Full-Text | Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with Selected Topics* [online]. 2013 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2072-4292/5/2/716/htm>

6.2 Dopplerův posun frekvencí

Dopplerův posun frekvencí je velmi důležitý, díky němu dochází ke zlepšení prostorové rozlišovací schopnosti v azimutálním směru. Jde o změnu frekvence signálu, využívá se toho, že signál zaznamenaný v oblasti před nosičem má vyšší frekvenci než signál zaznamenaný od objektů za nosičem. SAR zpracovává pouze střední část zaznamenaného paprsku, ve které se Dopplerův efekt neprojevuje (v této části paprsku nedochází k posuvu frekvencí).⁹⁸

Dopplerův efekt je dán vztahem:

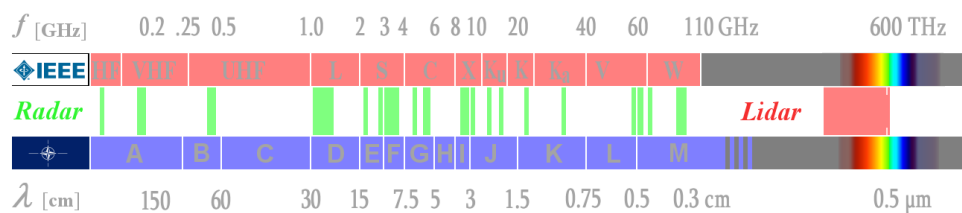
$$f_{D1} - f_{D2} = \frac{2V \cdot \varphi_a}{\lambda} \quad (1)$$

pro který platí, f_{D1} je frekvence signálu před nosičem, f_{D2} je frekvence signálu za nosičem, V je rychlost nosiče, φ_a je šířka paprsku a λ je vlnová délka mikrovlnného záření.

6.3 Vlnová délka radarového signálu

Čím vyšší je frekvence mikrovlnného signálu, tím více je signál ovlivněn okolními povětrnostními podmínkami. Na druhou stranu, čím vyšší je frekvence signálu, tím přesnější systém je.

Pásmo signálu může být zadáno dvěma způsoby, buď podle vlnové délky (v DPZ používaný) nebo podle frekvence (obr. 22).



Obr. 22: Rozdělení mikrovlnného vlnění na jednotlivá pásma.⁹⁹

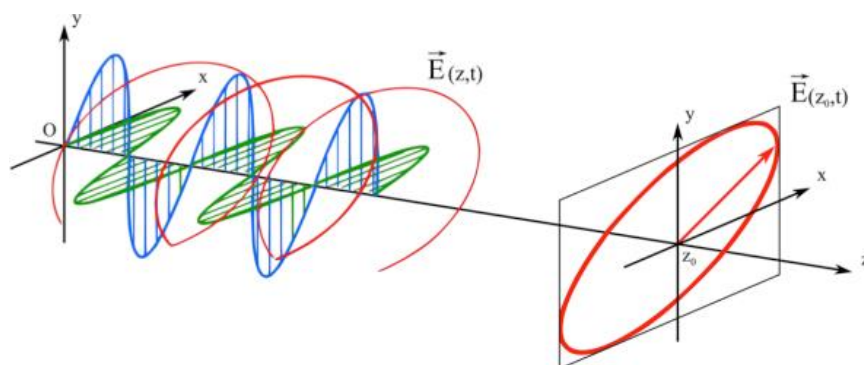
6.4 Polarizace radarového signálu

Existuje šest základních druhů polarizace elektromagnetického signálu. V DPZ se však u radarových systémů využívají pouze dva základní typy polarizace – vertikální (V) a horizontální (H) (obr. 23). Vertikálně polarizovaná vlna se šíří ve směru z a její amplituda se mění vertikálně, ve směru osy y. Naopak u horizontálně polarizované vlny se mění amplituda ve směru x. Globální elektromagnetické pole odpovídá kompozici těchto dvou polarizací. Jejich kombinace pak tvoří eliptickou polarizaci. Pro tuto část elektromagnetického spektra je polarizace velmi důležitá, protože odlišné typy polarizací odlišně interagují se sledovaným povrchem. Oba tyto typy polarizace může družice vysílat, ale i přijímat.¹⁰⁰

⁹⁸ DOBROVOLNÝ, Petr. *Dálkový průzkum země: Digitální zpracování obrazu*. 1. Brno, 1998, str. 63.

⁹⁹ *Radar Basics* [online]. 2014 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/07.waves/Waves%20and%20Frequency%20Ranges.en.html>

¹⁰⁰ *Téledétection RADAR: Chapture 1 - Généralités* [online]. In: . [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://stream.ensg.eu:8800/teledetection/portail/3/1/co/3sequence1.html#segment_M6dQk4Jro8cmiVNr60hjj1

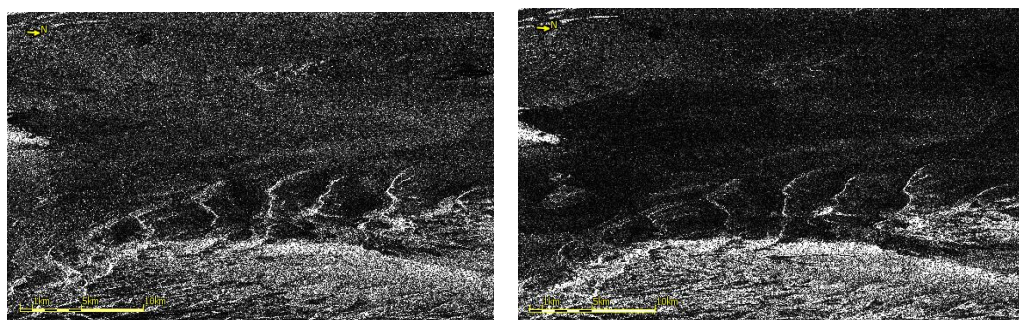


Obr. 23: Schéma polarizace.¹⁰¹

Tab. 3: Typy polarizací používaných v mikrovlnné části spektra

	Vyzáření horizontální polarizace (H)	Vyzáření vertikální polarizace (V)
Příjem horizontální polarizace (H)	HH	HV
Příjem vertikální polarizace (V)	VH	VV

Polarizací se při zpracování radarových dat využívá převážně v polarimetrii. Některé systémy jako je například Alos Palsar poskytují všechny typy polarizací pro jedno sledované území. Na základě odpovědi odraženého signálu, si může uživatel vybrat, který typ polarizace má pro jeho zájmovou oblast vyšší informační hodnotu.¹⁰²



Obr. 24: Ukázka polarizací duálního snímku S-1 – HH (vlevo) a HV (vpravo) pro vybranou oblast na území Antarktidy.

6.5 Přístup k datům ESA

Snímky ESA poskytuje prostřednictvím aplikace Sentinels Scientific Data Hub (www.scihub.esa.int). Pro stahování snímků, které je zcela zdarma, je však nutná

¹⁰¹ Télédétection Radar - Chapitre 1 : Généralités. *E-ENSG* [online]. 2013 [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: <http://stream.ensg.eu:8800/teledetection/portail/3/1/res/schema11.png>

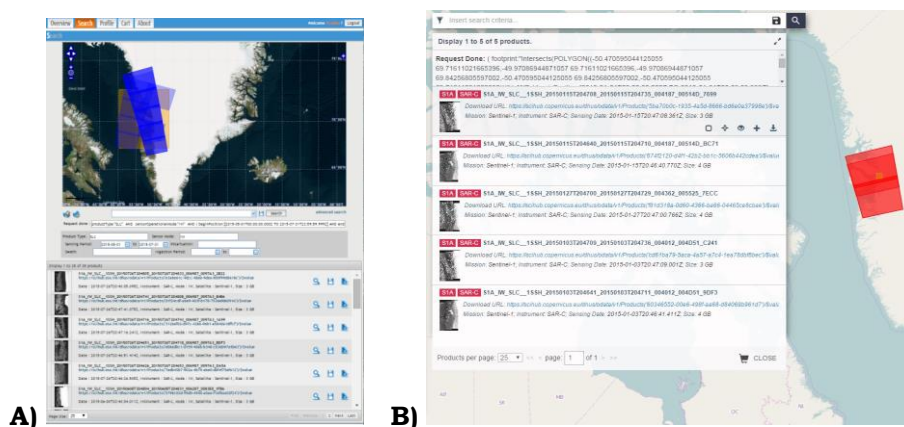
¹⁰² LILLESAND, Thomas M. *Remote sensing and image interpretation*. 4rd ed. New York: John Wiley, 2000. ISBN 978-0471255154, str.651-654

registrace uživatele. Po úspěšné registraci, již může uživatel plně vyhledávat, stahovat a následně i využívat jím vybrané snímky.

K 18. srpnu 2015 bylo registrováno více než 10 000 uživatelů. Přičemž ESA nerozlišuje uživatele na komerční a nekomerční sféru nebo na uživatele evropské a ostatní z jiných částí světa.¹⁰³

Od 7. prosince 2015 se společně s rozšířením vyhledávání snímků o snímky z družice Sentinel-2 byl změněn grafický interface Sentinel Data Hubu. Grafický je portál přehlednější a uživatelsky přívětivější oproti původní verzi (obr. 25). Stále je ovšem možné se z nové verze přepnout do verze původní.

K dispozici jsou dva druhy snímků duálně polarizované (DualPol) a se signle polarizací. V souvislosti s typem polarizací je odlišná i velikost souboru obsahujícího radarová data. Pro DualPol se tato velikost pohybuje okolo 7,5 GB, pro single polarizaci se velikost celého souboru pohybuje kolem 3,6 GB.



Obr. 25: Změna interface Sentinel Data Hub – A) první verze, B) verze po 7. prosinci 2015.¹⁰⁴

6.5.1 První interface

Po přihlášení se uživateli otevře okno „Overview“, kde je možné vyhledávat na základě jednotlivých parametrů radarového snímku a vydefinovanou oblast zájmu.

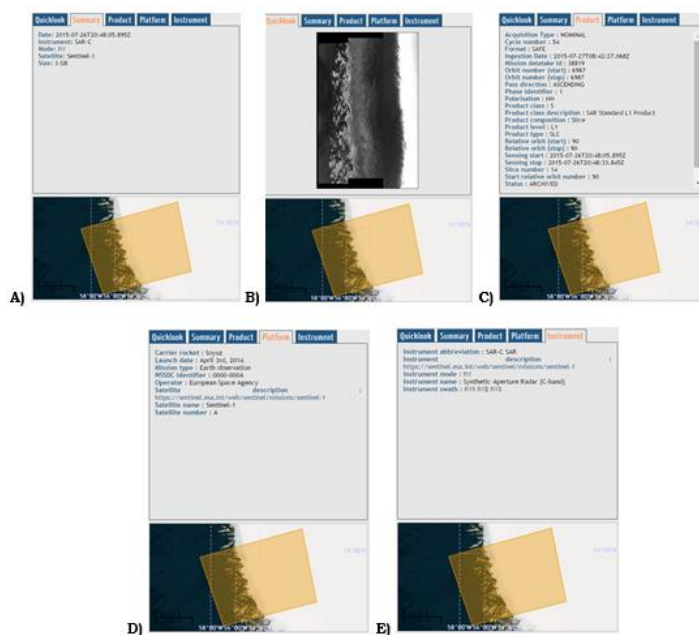
Snímky, jež odpovídají zadaným parametrům pro vyhledávání, se následně objeví jak na přehledové mapce, hlavního panelu, tak i pod ní jednotlivě.

Pokud se chce uživatel dozvědět více o jednotlivých snímcích, stačí pouze kliknout na vybraný snímek, u něhož jsou na výběr tři ikony – prohlédnout si podrobně snímek (metadata), stáhnout snímek a přidat snímek do fronty na stahování.

V případě, že si chce uživatel snímek prohlédnout, klikne na ikonu s lupou a dle metadata zjistí, jestli snímek přesně odpovídá požadavkům (obr. 26).

¹⁰³ *Scientific Data Hub* [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <https://scihub.copernicus.eu/news/News00032>

¹⁰⁴ *Scientific Data Hub* [online]. 2015 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <https://scihub.esa.int/>



Obr. 26: Popis radarového snímku v první aplikaci Sentinels Scientific Data Hub.¹⁰⁵

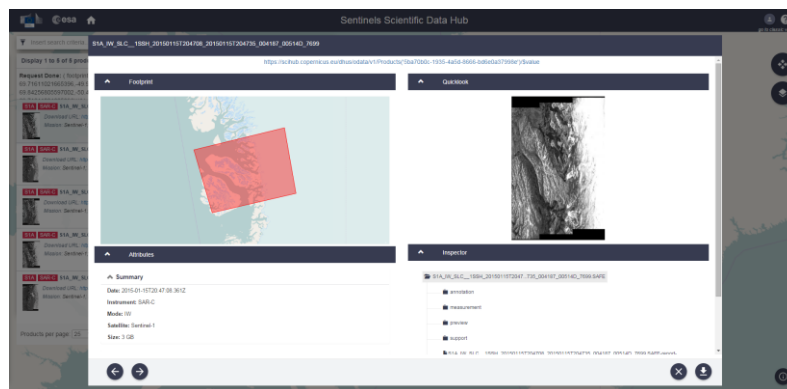
Dál může obyvatel přejít na druhou záložku „Summary“, kde jsou vypsány základní informace o snímku. Na záložce „Quick Look“ je pak vidět jak vypadá samotný uživatelem vybraný radarový snímek. V záložce „Product“ je snímek přesně popsán – kdy byl snímek pořízen a jak, je zde uvedeno číslo orbity, číslo snímky, typ snímku či polarizace. Předposlední záložka „Platform“ obsahuje základní informace, které mají všechny snímky stejné, a to jaká raketa vynesla družici na oběžnou dráhu a kdy ji družice dosáhla, název a typ družice a identifikační číslo družce a vlastník. Poslední záložka „Instrument“ pak popisuje typ senzoru.

6.5.2 Druhý interface

Uživatel se hned na začátku může přepnout do modu pro vyhledávání snímku buď Sentinel-1 nebo snímků Sentinel-2. Samotné zadávání vstupních parametrů pro vyhledávání snímků je mnohem jednodušší, uživatel má při zadávání na výběr. Buď může parametry vybrat ručně, nebo si může parametry vybrat pomocí předpřipravené nabídky.

Po zadání parametrů a vydefinování lokality se uživateli stejně jako v předchozí verzi zobrazí footprinty jednotlivých snímků, ze kterých si pomocí jednotlivých náhledů vybere potřebné snímky (obr. 27).

¹⁰⁵ *Scientific Data Hub* [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://scihub.esa.int>



Obr. 27: Popis radarového snímku v druhé aplikaci Sentinel Scientific Data Hub.¹⁰⁶

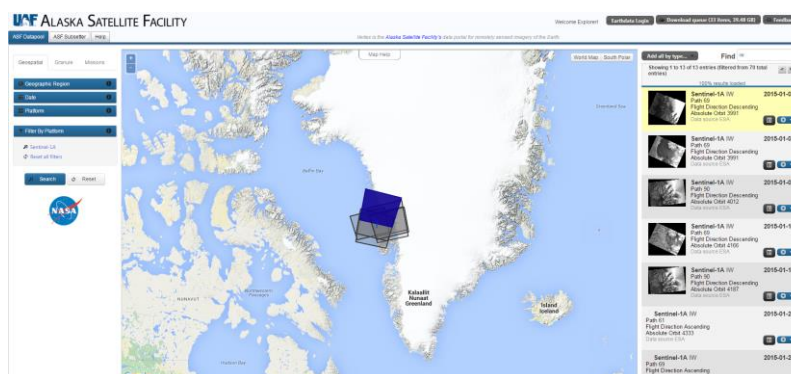
Oproti původní verzi je prohlížení metadat snímků mnohem jednodušší a mezi snímky lze pomocí šipky procházet. Tato možnost v předchozí verzi nebyla možná a uživatel musel zdlouhavě klikat na každý snímek zvlášť.

V obou případech je možné snímky stahovat jak jednotlivě, tak i hromadně.

6.6 Přístup k datům ASF

Data z družice Sentinel-1 lze navíc stáhnout i ze stránek AFS (Alaska Satellite Facilities) (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>). Tato organizace je součástí Geofyzikálního ústavu Aljašské univerzity. Jejím cílem je snadnější přístup k datům dálkového průzkumu země. Cílem je pak národní, ale i mezinárodní podpora využívání dálkového průzkumu země, jak na akademické půdě, tak i v komerční sféře, v takové kvalitě aby tato data bylo co nejvíce ku prospěchu společnosti.¹⁰⁷

Tento datový sklad umožňuje přístup k řadě radarových dat, jako jsou data z Radarsat 1, SeaSat nebo Alos Palsar. U produktů družice Sentinel-1 není možné nadefinovat přesné parametry, tak jako u Sentinel Data Hub. To ovšem nebrání v případném výpadku Sentinel Data Hub využívat pro stahování dat právě tento datový sklad.



Obr. 28: Interface ASF.¹⁰⁸

¹⁰⁶ *Scientific Data Hub* [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

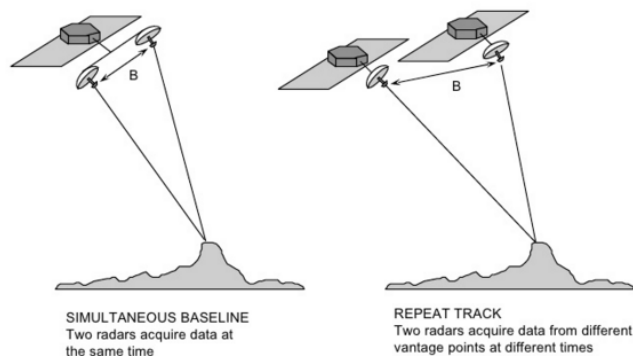
¹⁰⁷ *Alaska Satellite Facility* [online]. 2016 [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <https://www.asf.alaska.edu/about/asf/>

¹⁰⁸ *ASF's Data Portal: ASF's Data Portal* [online]. 2016 [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>

7 RADAROVÁ INTERFEROMETRIE

Interferometrie je metoda využívající rozdílů fází minimálně dvou radarových snímků.¹⁰⁹

Interferogram lze vytvořit ze dvojice snímků, které byly pořízeny na základě tzv. jednoobletové (single-pass) nebo víceobletové (repeat-pass) interferometrie. Jednoobletová interferometrie je založena na principu snímání stejného území pomocí jedné družice nesoucí dvě antény. Snímky tvořící interferometrický pár jsou tak pořízeny ve stejnou chvíli. U víceobletové interferometrie interferometrický pár tvoří snímky stejného území pořízených v různých časových obdobích.¹¹⁰



Obr. 29: Schéma jednoobletové a víceobletové interferometrie.¹¹¹

Funguje na principu, kdy v podobě komplexního čísla obsahuje pixel výsledného snímku a nese informaci, jak o intenzitě, tak i o fázi odraženého záření ve tvaru

$$s = a e^{i\varphi} \quad (2)$$

kde a je amplituda odraženého signálu a φ je jeho fáze.

Amplituda signálu je funkce skládající si se z parametrů – frekvence, polarizace a úhel dopadu a dále ji ovlivňuje i drsnost povrchu v měřítku vlnové délky, geometrie povrchu a dielektrické vlastnosti povrchu.

Čím větší je amplituda pixelu, tím lepší je kvalita signálu. Fáze je pak fázovým posunem mezi vlnou vyzářenou družicí a od povrchu odraženou vlnou.¹¹² Fázový posun je pak ekvivalentní fázovému rozdílu mezi vyslaným a přijatým signálem v rozsahu $<0,2\pi$). Díky cestě signálu k povrchu a zpátky, se jedná o dvojnásobek skutečného fázového posunu.¹¹³

Interferogram je vytvářen nejčastěji ze dvou snímků. První ze snímků, je snímkem hlavním (master), druhý je pak nazýván vedlejší (slave). Protože je zemský povrch snímán pomocí družic, není možné zajistit přesnou polohu družice na orbitě při

¹⁰⁹ VAN GORP, Sébastien. *Identification et Utilisation des Réflecteurs: Permanents en Interférométrie RADAR* [online]. In: . s. 26 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://www.ipgp.fr/~vangorp/rapport_DEA_2003.pdf, str. 2

¹¹⁰ KRAMER, Herbert J. *Observation of the Earth and Its Environment: Survey of Missions and Sensors*. Fourth edition. Springer Science & Business Media, 2002. ISBN 978-3-642-62688-3, str. 34-35

¹¹¹ *Radar-ppt* [online]. 2011 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/MSingihPulukadang/radarppt>

¹¹² VAN GORP, Sébastien. *Identification et Utilisation des Réflecteurs: Permanents en Interférométrie RADAR* [online]. In: . s. 26 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://www.ipgp.fr/~vangorp/rapport_DEA_2003.pdf, str. 2

¹¹³ CAPALINIOVÁ, Květa. *Filtrace interferometrických dat*. Praha, 2006. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Lenka Halounová, CSc., str. 12

snímání dané lokality. Rozdíl mezi polohou družice při prvním a druhém snímání (v případě víceobletové interferometrie), tak jak je tomu u družice Sentinel-1A, a rozdíl mezi vzdáleností dvou antén od sebe (v případě jednoobletové interferometrie) se nazývá interferometrická základna (interferometric baseline) na obrázku 29 označena B. Kromě prostorové základny se u víceobletové interferometrie určuje i časová základna (temporal baseline). Ta pak u snímků určuje dobu mezi pořízením snímků tvořících interferometrický pár. V případě družice Sentinel-1A je pak časová základna 12 dní.¹¹⁴ Čím je ovšem časová základna větší, tím větší je pravděpodobnost, že se změní odrazové vlastnosti sledovaného povrchu, ale zároveň tak klesá koherence signálu. Signál se takto může stát plně nekoherentním a dochází tak k časové dekolaci signálu. Dekorelace nastává v závislosti na vegetačním období například u zemědělských ploch a u vodních ploch v závislosti na aktuálním stavu počasí.¹¹⁵

Z povahy radarového vlnění má na signál minimální vliv atmosféra. Fáze signálu závisí na povrchu a jeho odrazových vlastnostech, ale i na vzdálenosti mezi anténou a sledovaným povrchem. Buňka má rozměry, které mnohonásobně převyšují vlnovou délku daného pásma. Každý objekt na ploše, která tvoří buňku, odráží signál odlišným způsobem. Výsledný obraz v dané buňce je součtem všech jednotlivých odrazů.¹¹⁶

7.1 InSAR

Metoda InSAR neboli radarová interferometrie umožňuje sledování deformací na územích o větších rozlohách. Tato metoda je vhodná pro dlouhodobé sledování, kdy je využíváno zpracování většího množství snímků. Nejčastěji se při používání této metody využívá sledování na sledovaném území trvalých bodů tzv. odražečů. Těmi bývají nejčastěji mosty, budovy nebo skály. Touto metodou lze stanovit deformační změny v terénu už od 1 mm.

Výhodnější je ovšem použití co nejpřesnějšího digitálního modelu terénu. Výsledkem je pak interferogram, resp. mapa deformací daného území.

Výsledný interferogram je tvořen barevnými proužky tzv. fringe, které znamenají změnu fáze o jeden cyklus. Tyto proužky mohou znázorňovat jak topografii, tak deformace ale i atmosferické vlivy.¹¹⁷

V případě že dochází k dekolaci (koherence je nízká) mezi snímky interferometrického páru, ta část obrazu, kde k dekolaci došlo, se jeví zrnitě. Dekorelace může nastat z několika důvodů, kterými může být špatný výběr snímků, vegetace, ale i vodní plochy nebo úpravy povrchů. Území, kde nedochází k žádným pohybům je na interferogramu znázorněno jednolitou barvou a má vysokou koherenci.¹¹⁸

¹¹⁴ PALÚCHOVÁ, Miroslava. *Analýza využitelnosti družicových dat pro monitoring pohybu skalních ledovců*. Praha, 2014. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze. Vedoucí práce Mgr. Lukáš Brůha.

¹¹⁵ ROTT, H. Advances in interferometric synthetic aperture radar (InSAR) in earth system science. *Progress in Physical Geography* [online]. 2009, 33(6), 769-791 [cit. 2016-04-11]. DOI: 10.1177/0309133309350263. ISSN 0309-1333. Dostupné z: <http://ppg.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0309133309350263>

¹¹⁶ CATANI, Filippo, Paolo FARINA, Sandro MORETTI, Giovanni NICO a Tazio STROZZI. On the application of SAR interferometry to geomorphological studies: estimation of landform attributes and mass movements. *Geomorphology*. 2005, 66(1-4), 119-131. DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.08.012. ISSN 0169555x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555X04002168>

¹¹⁷ *Radarová interferometrie* [online]. 2015 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: http://www.insar.cz/insar_info.pdf

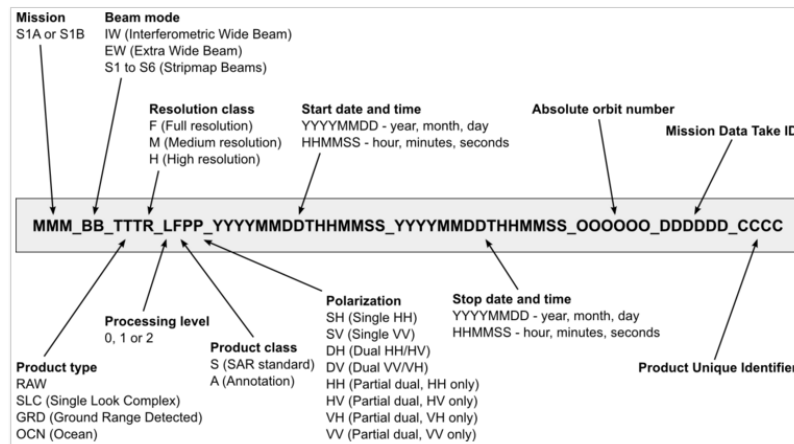
¹¹⁸ MICHOVSKÝ, Petr. *Vyhodnocení území podezřelých z poklesů určených metodou interferometrie*. Praha, 2005. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Lena Halounová, CSc, str. 12.

7.2 DInSAR

Diferenční interferometrie, DInSAR (Differential InSAR), se používá hlavně pro snímky, které mají nulovou nebo k nule blížící se kolmou základnu. Pomocí této metody je porovnána fázová složka dvou a více SAR snímků. Přesnost této metody je v závislosti na podmínkách lepší než 1 cm.¹¹⁹

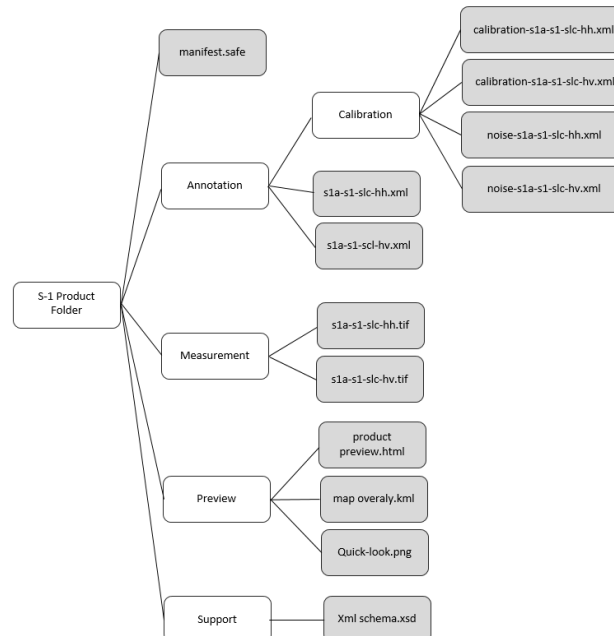
7.3 Snímek

ID každého snímku je generováno na základě několika parametrů, jako je datum, polarizace či typ snímku (obr. 30).



Obr. 30: Popis názvu snímku Sentinel-1.¹²⁰

Pro tvorbu interferogramů se používají tzv. SLC IW typy snímků.



Obr. 31: Schéma struktury SAR souboru.¹²¹

¹¹⁹ *Gisat: Radarová interferometrie* [online]. 2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.gisat.cz/content/cz/dpz/zpracovani-dat/radarova-interferometrie>

¹²⁰ *Alaska Satellite Facility* [online]. [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <https://www.asf.alaska.edu/sentinel/data/>

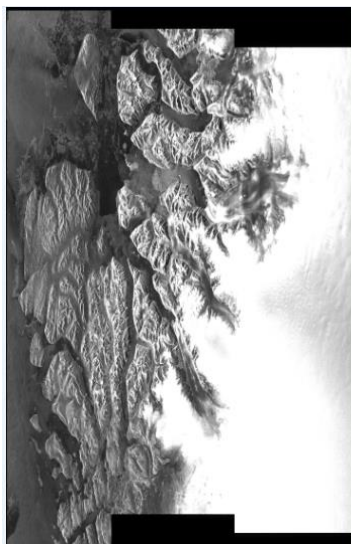
SAR snímek, který si uživatel spustí např. v S1TBX (Sentinel-1 Toolbox), se skládá z pěti souborů. Prvním z nich je soubor „manifest.safe“. Formát SAFE (Standart Archive Format for Europe) byl vytvořen jako společný formát pro archivování a práci s daty ESA a obsahuje povinná metadata.¹²²

Dalším souborem je soubor „Annotation“, který obsahuje metadata popisující příslušenství a charakteristiky měření a postupu měření. Metadata jako jsou informace o polarizaci, Dopplerově posunu nebo o geografické lokalizaci jsou zde pro každé pásmo.

Soubor „Measurement“ obsahuje binární data pro každou polarizaci, které jsou ve formátu TIFF.

Předposlední soubor „Preview“ obsahuje tři soubory. Prvním z nich je soubor „quick-look.png“, nesoucí obrazovou informaci o snímky složeném z jednotlivých pásů obrazu tzv. beamů (obr. 32). Druhým souborem je HTML (Hyper Text Markup Language) odkaz na informace o snímku a posledním je KML (Keyhole Markup Language) soubor snímaného místa.

Posledním souborem je „Support“ obsahující XML (Extensible Markup Language) schéma.¹²³



Obr. 32: Celý SAR snímek z družice Sentinel-1A, quick_look_png.

7.4 Popis snímku

Území je snímáno pomocí tří beamů, které jsou následně spojeny do jednoho radarového snímku. Výsledný snímek (intensity) je tvořen dvěma snímky, z nichž první nese informace o fázi a druhý amplitudou. Každá buňka tohoto snímku nese informaci o odraženém mikrovlnném záření v podobě komplexního čísla (2). Tento snímek je pouze virtuální a při načtení se vypočítává vždy nově.¹²⁴

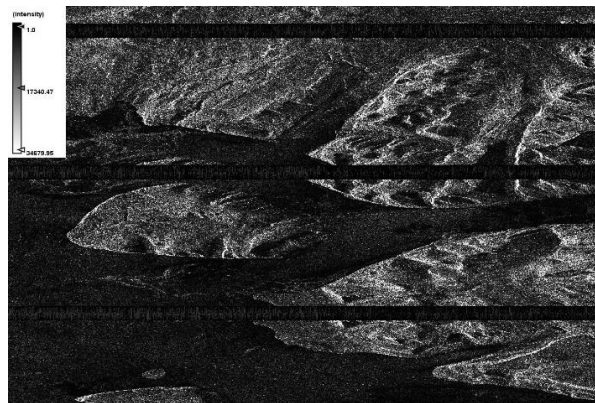
¹²¹ *User Guides - Sentinel-1 SAR: SAR Formats - Sentinel Online* [online]. 2016 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/data-formats/sar-formats>

¹²² *User Guides - Sentinel-1 SAR: SAFE Specification - Sentinel Online* [online]. 2016 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/data-formats/safe-specification>

¹²³ *User Guides - Sentinel-1 SAR: SAR Formats - Sentinel Online* [online]. 2016 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/data-formats/sar-formats>

¹²⁴ *InSAR principles: guidelines for SAR interferometry processing and interpretation*. 1. Noordwijk, the Netherlands: ESA Publications, ESTEC, 2007. ESA TM, 19. ISBN 978-929-0922-339.

Snímky družice S-1A se skládají ze série 10 burstů. Kdy je každý burst zpracováván jako samostatný SLC obraz. Jednotlivé bursty jsou pak mezi sebou odděleny černou hranicí, podobně jako je tomu u snímků ENVISAT Asar ScanSAR SLC. V Případě Sentinel-1 SLC je délka každého burstu 2,75 sekundy a přesah činí asi 0,4 sekundy (obr. 33).^{125 126}



Obr. 33: Ukázka surového SLC SAR snímku družice Sentinel-1A.

Obraz snímku pro jednotlivé pixely, je vyjádřen komplexním číslem dle vzorce

$$P = I + iQ = re^{i\varphi} \quad (3)$$

kde P je výsledné komplexní číslo,

$$i = \sqrt{-1} . \quad (4)$$

Hodnota I (in-phase) má stejnou fázi jako komplexní číslo referenční frekvence podle vzorce

$$I = r \sin(\varphi) , \quad (5)$$

Q (quadrature) má hodnotu fáze o 90° posunutou, kdy

$$Q = r \cos(\varphi) , \quad (6)$$

pro které platí, že φ je fáze komplexního čísla z (komplexní amplituda) a hodnota r neboli magnitudo se vypočítá jako

$$r = \sqrt{I^2 + Q^2} . \quad (7)$$

7.5 Chování vody a ledu na SAR snímcích

Hladké povrchy se chovají jako zrcadlo a signál se zpátky k družici nevrací. Naopak u hrubého povrchu dochází k odrazu o různé intenzitě. V případě vody byla tato hypotéza dokázána na základě sledování vody družicí Seasat (pásmo L), kdy bylo dokázáno, že je možné pomocí radaru detekovat vlny vyšší jak 100 cm. Detekce různých typů ledu je pak závislá na dielektrických vlastnostech sledovaného ledu. Pomocí radaru lze u ledu sledovat stáří ledu, povrch ledu ale i teplotu. Pro sledování ledu se nejčastěji používají pásma C, L a X. Pásma C a X se využívají pro určení typu ledu, jeho porušení

¹²⁵ User Guides - Sentinel-1 SAR: Level-1 - Sentinel Online [online]. 2016 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/product-types-processing-levels/level-1>

¹²⁶ ESA: Sentinel Online [online]. 2016 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath>

nebo tloušťku. Pásmo L se převážně využívá pro sledování rozsahu ledu na povrchu. V tomto pásmu už většinou není možné určit jeho stáří nebo tloušťku.¹²⁷

8 SENTINEL-1 TOOLBOX

Sentinel-1 Toolbox prošel během prvního roku používání velkou proměnou. A to i díky startu provozu družice Sentinel-2. Právě díky tomu ESA přešla od pojmenování Sentinel-1 Toolbox na SNAP.

Kromě dat z družic Sentinel-1 je v něm možné pracovat i s ostatními radarovými daty jako jsou data z družic Envisat, ERS-1 a ERS-2, Radarsat 2, Alos, TerraSAR-X a COSMO-SkyMed.

Obsahuje nástroje, jak nástroje pro polarimetrii, interferometrii, ale i kalibraci, koregistraci, ortorektifikaci nebo konverzi dat.

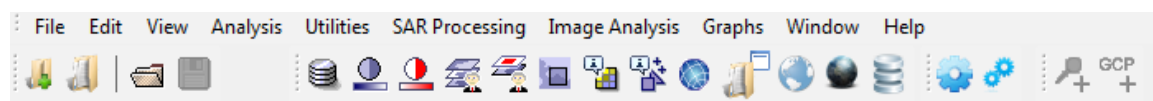
Aktuální verze 3.0.0 (vydaná 31. března 2016) je volně ke stažení na stránkách ESA <http://step.esa.int/main/download/>. Existuje několik verzí v závislosti, na operačním systému a požadavcích uživatele. Jako první byl vytvořen program pouze pro zpracování radarových snímků s názvem Sentinel 1 Toolbox 1.1.1, která je stále volně dostupná, stejně jako všechny ostatní po ní následující verze programu, ke stažení na stránkách ESA <http://step.esa.int/main/download/previous-versions/>.

8.1.1 Práce se S1TBX

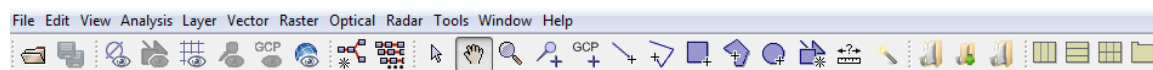
Prostředí S1TBX je na první pohled podobné prostředí programu NEST, který mu předcházel. Na rozdíl od softwaru NEST byly přidány i polarimetrické operátory, které bylo do té doby možné používat pouze v programu PolSARpro.

Práce s programem byla ze začátku snadnější díky manuálům, které jsou na stránkách ESA <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1/tutorials>. Základy práce s programem jsou popsány v manuálu (příloha č. 5).

Jednotlivé verze, které byly v průběhu doby, kdy byl S1TBX zpřístupněn veřejnosti se od sebe svým prostředím příliš neliší. Mezi první a aktuální verzí S1TBX došlo ke znatelné proměně prostředí (obr. 34 a 35), které bylo zapříčiněno přidáním nástrojů pro práci s optickými snímky z družice Sentinel-2A.



Obr. 34: Lišta nástroj v prostředí Sentinel-1 Toolbox 1.1.1.

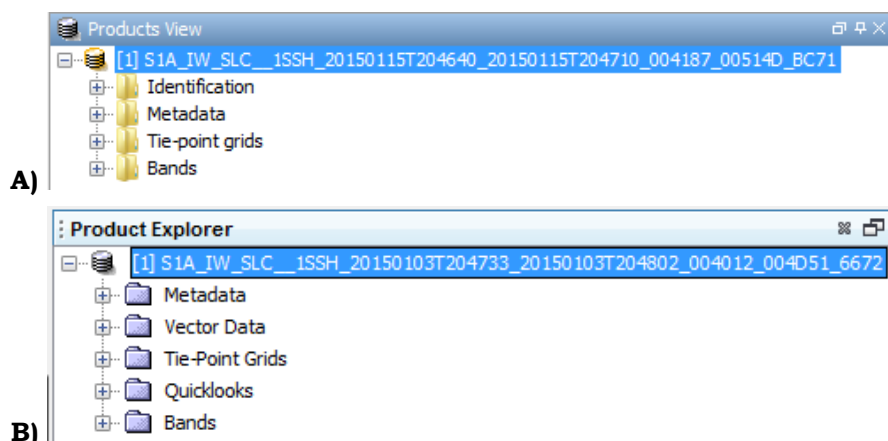


Obr. 35: Lišta nástrojů v prostředí SNAP – S1TBX.

Proměnil se i vzhled struktury načteného snímku. V první verzi tvořili stromovou strukturu snímky položky – Identification, Metadata, Tie-point grids a Bands. Naopak v aktuální verzi je tato struktura tvořena – Metadata, Vector Data, Tie-Point Grids, Quicklooks a Bands (obr. 36). Zmizela tak možnost zobrazit parametry zobrazovaného

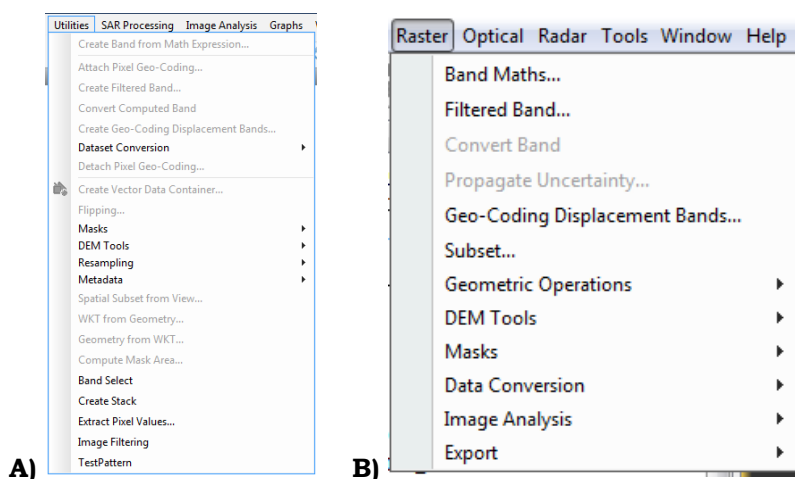
¹²⁷ LILLESAND, Thomas M. *Remote sensing and image interpretation*. 4rd ed. New York: John Wiley, 2000. ISBN 978-0471255154, str. 663-664

snímky, ale přibýly možnosti zobrazení celého snímku (všechny tři beamy) a zobrazení vektorových dat.



Obr. 36: Změna zobrazované struktury radarových dat.

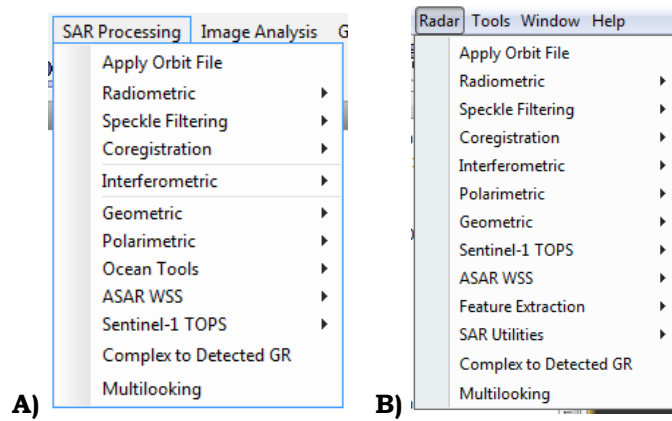
Základní nástroje zůstaly stejné. Ve verzi SNAP 3.0.0 byly další doplňující nástroje přesunuty z boční lišty na lištu horní pro jejich lepší přehlednost. Navíc byly přidány další nástroje umožňující práci s vektorovými daty a upravena byla i struktura jednotlivých nástrojů (obr. 37).



Obr. 37: Změna v nabídce nástrojů – A) Sentinel-1 Toolbox 1.1.1, B) SNAP S1TBX 3.0.0.

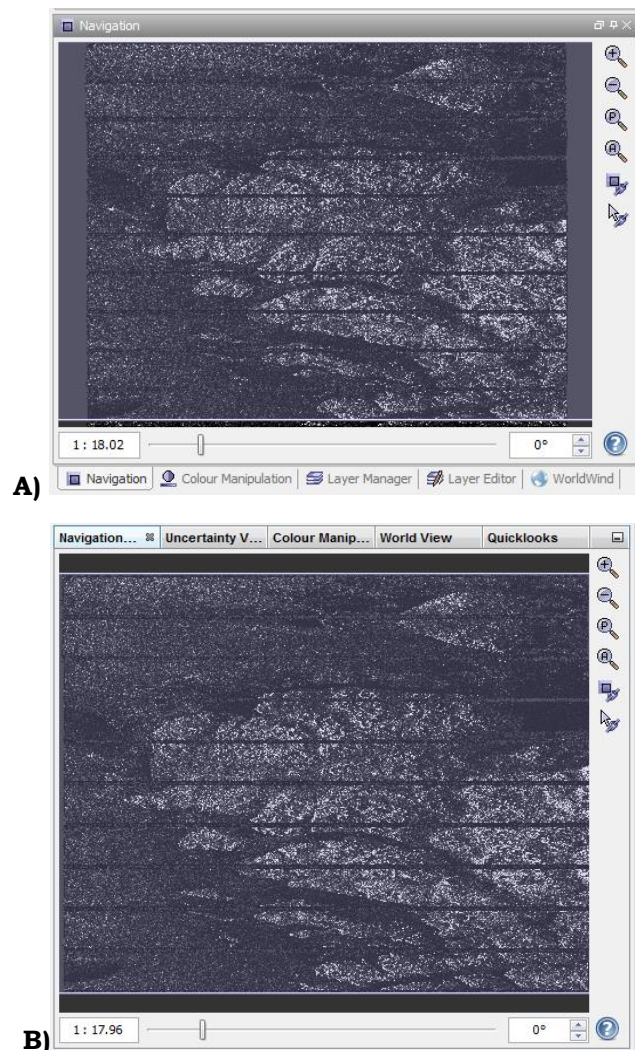
Sada nástrojů „SAR Processing“ první verze programu byla v aktuální verzi přejmenována na „Radar“ (obr. 38). Kromě této kosmetické úpravy se staly nástroje „Ocean Tools“ součástí „feature Extraction“, kdy k těmto nástrojům přibyl nástroj „Urban areas“, který stanovuje heterogenitu urbanizovaných oblastí na radarovém snímku. V této sadě nástrojů navíc přibýly nástroje, jako je převzorkování (oversampling), spadající pod „SAR Utilities“¹²⁸.

¹²⁸ ESA SNAP: HELP Topics. 2016.



Obr. 38: Změna v uspořádání a pojmenování nástrojů – A) 1.1.1 B) S1TBX 3.0.0.

Částečnou vizuální proměnou prošla i dolní část Product Exploreru oproti první verzi přibyly záložky – Uncertainty Visualisation a Quicklooks (obr. 39). A naopak neobsahuje záložky – Layer Manager a Layer Editor. Tyto dva nástroje obsahuje v horní liště záložka „Layers“.



Obr. 39: Dolní část Product Exploreru – A) Sentinel-1 Toolbox 1.1.1, B) SNAP S1TBX 3.0.0.

Další patrná změna byla provedena u možnostech exportu snímku. V první verzi programu bylo možné v rámci snímku vyexportovat i legendu, to u nejnovější verze možné není a legendu je nutné vyexportovat zvlášť.

Značná omezení pro práci se SAR snímky je značná výpočtová náročnost, což souvisí s jejich velikostí (podkapitola 6.5).

Mezi problémy nové verzi S1TBX je fakt, že správně nefunguje koregistrace snímků. Kdy nedojde k ztotožnění a výsledný vedlejší snímek je rastr s prázdnými hodnotami. Proto musí uživatel koregistraci nejprve provést ve staré verzi programu. S koregistrovanými snímky lze následně pracovat v nové verzi programu.

8.2 Další SW pracující s S-1A daty

Kromě S1TBX se SAR daty již umí pracovat i ENVI SARscape® verze 5.2 a program GMTSAR,, který je šířen pod licencí GNU (General Public License).^{129 130 131}

Pro sledování pohybu ledu mezi Grónskem a Severní zemí pracující na základě algoritmu ORB (Oriented fast and Rotated Brief). Tento nástroj pracuje s daty typu EW GRDM a lze jej stáhnout na stránkách GitHub (https://github.com/nansencenter/sea_ice_drift).¹³²

9 POSTUP PRÁCE

9.1 Polarimetrie

Využití DualPol SAR dat je stále více využíváno. Rozvoji používání těchto metod přispěje i mise tandemu Sentinel-1 (podrobněji je postup práce popsán v Příloze č. 5).

9.1.1 Polarimetrická dekompozice

Pro práci se SAR daty je prvním krokem jejich debursting (podrobnější popis v podkapitole 10.3.3). Odstranění demarkačních linií následuje kalibrace radarového snímku.

Kalibrace

Úprava snímků pomocí radiometrické kalibrace je nutná, protože snímky Level-1 tyto korekce neobsahují. Pomocí korekci je tak možné srovnávat mezi s sebou jednotlivé snímky ze stejného senzoru, ale i napříč senzory. Protože až po kalibraci jednotlivé pixely představují správné hodnoty zpětného odrazu radarového signálu. S1TBX provádí kalibraci pro data ze senzorů – Sentinel-1, ASAR, ERS a RADARSAT.

Cílem kalibrace je vytvořit snímek, kde jsou hodnoty pixelů spojeny se zpětným rozptylem scény

C2 matrix

Pomocí tohoto nástroje se vytvoří C2 matice, která je tvořena čtyřmi pásmy C11, C12_real, C12_imag a C22.

¹²⁹ *What's New in ENVI SARscape 5.2: SaRScape* [online]. 2015 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://main.inforest.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=196&Itemid=1

¹³⁰ *Sentinel-1A TOPS processing in GMTSAR - GMT5SAR: GMT — The Generic Mapping Tools* [online]. 2016 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://gmt.soest.hawaii.edu/news/23>

¹³¹ *GMTSAR* [online]. 2016 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://gmt.soest.hawaii.edu/>

¹³² MUCKENHUBER, Stefan, Anton Andreevich KOROSOV a Stein SANDVEN. Open-source feature-tracking algorithm for sea ice drift retrieval from Sentinel-1 SAR imagery. *The Cryosphere*. 2016, 10(2), 913-925. DOI: 10.5194/tc-10-913-2016. ISSN 1994-0424. Dostupné také z: <http://www.the-cryosphere.net/10/913/2016/>

Filtrace

Pomocí filtrace pro částečné odstranění typické struktury „pepř a sůl“. Díky tomuto kolísání intenzity vzniká nekoherentní obraz. K snížení koherence také přispívá fakt, že vlnové délka radarového signálu je menší než je velikost buňky, díky tomu může jedna buňka snímku obsahovat náhodné hodnoty odrazu signálu na principu superpozice. Filtrace ovšem tento jev částečně odstraní.¹³³

Polarimetrická dekompozice

H-Alfa Dual Pol Decomposition probíhá na základě matic, kdy je sestavena matice pro každý pixel radarového snímku. Každý pixel je tak reprezentovaný 2x2 koherenční maticí T_{dual} :¹³⁴

$$T_{dual} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{12}^* & T_{22} \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \lambda_1 & \\ & \lambda_2 \end{bmatrix} [U]^*{}^T = \lambda_1 u_1 u_1^*{}^T + \lambda_2 u_2 u_2^*{}^T, \quad (8)$$

$$[U] = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{bmatrix} = [u_1 \ u_2] \quad (9)$$

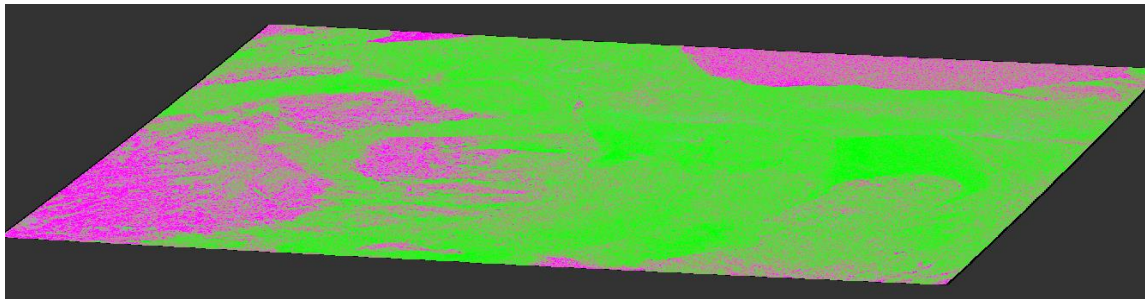
$$u_i = [\cos \alpha_i \ \sin \alpha_i e^{j \delta_i}]^T : (i = 1,2) \quad (10)$$

Platí, že U je ortogonální koherenční matice α_j je parametr indikující závislost polarizace, δ_j je relativní fázový rozdíl. T a $*$ označují komplexně sdružené číslo. Polarimetrická entropie H a rozptyl úhlu α jsou definovány jako

$$H = -P_1 \log_2 P_1 - P_2 \log_2 P_2 \quad (11)$$

$$\bar{\alpha} = P_1 \cos^{-1}(|U_{11}|) + P_2 \cos^{-1}(|U_{12}|) \quad (12)$$

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2} : (i = 1,2) . \quad (13)$$



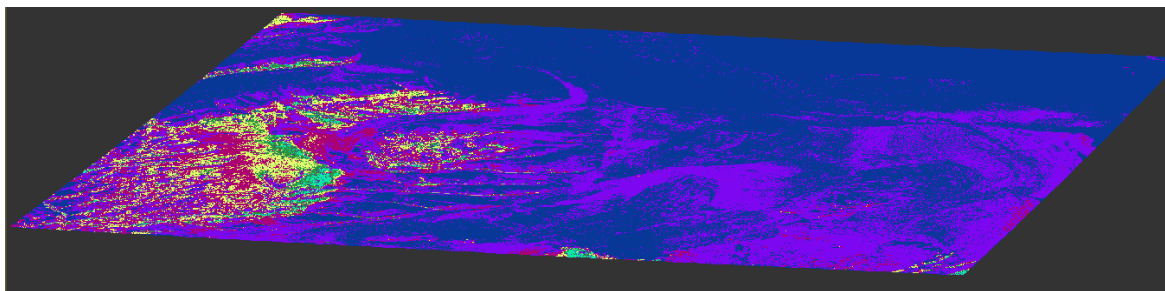
Obr. 40: Výsledek polarimetrické dekompozice H-Alfa Dual Pol Decomposition.

9.1.2 Klasifikace

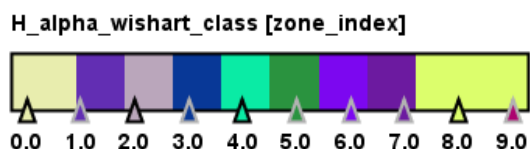
V tomto případě byla použita neřízená klasifikace H Alfa Wishart Dual Pol (obr.), jejíž výsledkem je devět tříd (obr. 41 a 42). Bez referenčních dat nelze výsledek jakkoli dále klasifikovat a výsledek reprezentovat.

¹³³ ESA SNAP: HELP Topics. 2016.

¹³⁴ SUGIMOTO, Mitsunobu, Kazuo OUCH a Yasuhiro NAKAMURA. *Remote sensing letters: On the similarity between dual- and quad-eigenvalue analysis in SAR polarimetry*. 1. Taylor & Francis, 2013. ISBN 10.1080/2150704X.2013.820002, str. 958.



Obr. 41: Výsledek Neřízení klasifikace – H Alfa Wishart Dual Pol.



Obr. 42: Legenda pro neřízenou klasifikaci – H Alfa Wishart Dual Pol.

9.2 Interferometrie

Pro zpracování SAR snímků je klíčový jejich výběr. Snímky, které budou tvořit interferometrický pár, musí být pořízeny, vždy pro stejnou shodnou oblast, které se zcela překrývají. Pokud budou do koregistrace vstupovat snímky, které se překrývají jen částečně, koregistraci nebude možné provést.

9.3 Koregistrace

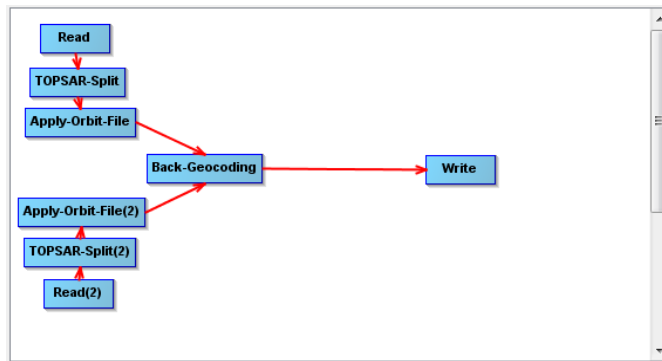
Prvním důležitým krokem pro zpracování radarových snímků je koregistrace nebo tzv. ztotožnění snímků. Je to základní krok pro tvorbu interferometrie (InSAR).

Pomocí tohoto operátoru jsou koregistrovány dva snímky tvořící interferometrický pár – master a slave. Nejprve jsou snímky rozděleny na jednotlivé beamy. Do výpočtu vstupují hodnoty orbit pro jednotlivé snímky, které jsou při procesu koregistrace automaticky stahovány, a digitální model terénu.

Pomocí koregistrace jsou pixely vedlejšího snímku posunuty podle pixelů hlavního snímku se sub-pixelovou přesností (0,05 pixelu v případě SLC). Tak zajištěn stejný rozsah a azimut pro oba snímky.¹³⁵

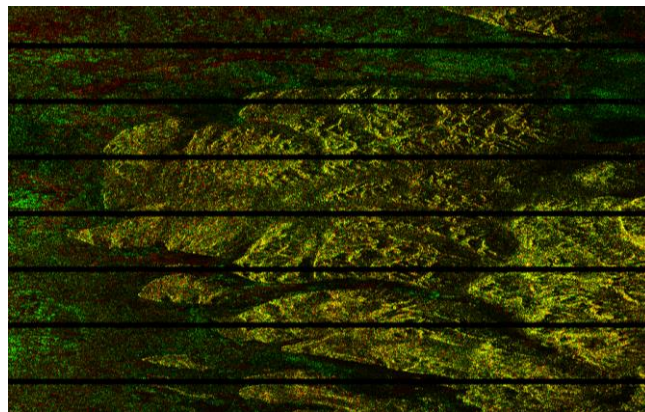
V prvním kroku dojde k načtení dvou snímků, které tvoří interferometrický pár. Tyto snímky jsou následně rozděleny na jednotlivé beamy. Do dalšího kroku, kdy do výpočtu vstupují hodnoty orbit daného snímku, již koregistrace počítá pouze s jedním, uživatelem, vybraným beamem. Následuje pak zpětné geokódování podle uživatelem zvoleného digitálního modelu a vytvoření výsledného souboru.

¹³⁵ *Tutorials - Sentinel-1 Toolbox: TOPS Interferometry Tutorial* [online]. 2015 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://sentinel1.s3.amazonaws.com/docs/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial.pdf>



Obr. 43: Model koregistrace v S1TBX.

Jako hlavní a vedlejší snímek v tomto případě vstupují dva SLC snímky. Tyto snímky musí být oba stejného typu a musí mít stejný souřadnicový systém. V případě, že snímky nebudou mít stejný souřadnicový systém, vedlejší snímek bude ztotožněn do stejného souřadnicového systému, jako je u hlavního snímku. Ve výsledku na sebe budou snímky přesně ležet (obr. 44).



Obr. 44: Výsledná koregistrace – červeně master, zeleně slave.

Nástroj koregistrace v případě, snímky nespĺňují její parametry, jako jsou nevhodně zvolené snímky, které se překrývají jen částečně, nebo snímky leží mimo zvolený digitální model, který do koregistrace vstupuje či pro dané snímky nejsou zveřejněny hodnoty orbit, u dolního okraje okna se objeví červená chybová hláška, která uživatele upozorní na chybu při zadávání parametrů koregistrace (obr 45.).

- A) Error in graph: Back-Geocoding: Entire image is outside of SRTM valid area. Please use another DEM.
- B) Error in graph: Back-Geocoding: Same sub-swath is expected.
- C) Apply-Orbit-File: No valid orbit file found for 27-FEB-2016 20:45:54.341991 Orbit files may be downloaded from <https://qc.sentinel1.eo.esa.int/a...>

Obr. 45: Možné chybové hlášky při zadávání parametrů koregistrace – A) snímky mimo oblast vybraného DEM, B) zvolené rozdílné beamy, C) nezveřejněné parametry orbit.

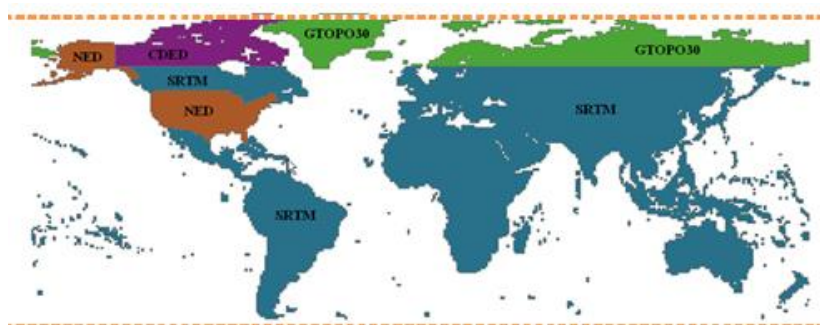
9.3.1 Výběr DEM pro polární oblasti

V S1TBX je možné pracovat s několika digitálními modely. Pro polární oblasti resp. severní pól je obtížnější pracovat s přesným digitálním modelem, jako je model SRTM. Ten je totiž k dispozici jen mezi 56°jihozápadní šířky a 60°severozápadní šířky.¹³⁶

Pro Arktidu jsou dostupné tři digitální modely – GTOPO30, ACE a ASTER.

GTOPO30

Byl po třech letech vytvořen v roce 1996 [U.S. Geological Survey's](#) Center for Earth Resources Observation and Science a pokrývá celý svět. Rozestup mezi gridy je 30 úhlových vteřin, což je asi 0,00833°. Výšková odchylka je od -407 do 8,752 m. Místa, kde se nachází oceán, jsou pak vymaskována hodnotou -9999. Díky tomu GTOPO30 nepokrývá ostrovy, které jsou menší než 1 km². Je zdarma dostupný (<http://earthexplorer.usgs.gov/>).¹³⁷ Právě pro svoji značnou neaktuálnost nebyl tento digitální model v práci použit.



Obr. 46: Dostupnost DEM GTOPO30 pro polární oblasti na severní polokouli.¹³⁸

ACE2

Digitální model ACE2 (Altimeter Corrected Elevations) je k dispozici ve třech prostorových rozlišeních. S1TBX má pro práci s radovými daty defaultně nastavené rozlišení 30". Dataset pro ACE30 je k dispozici od roku 2009.

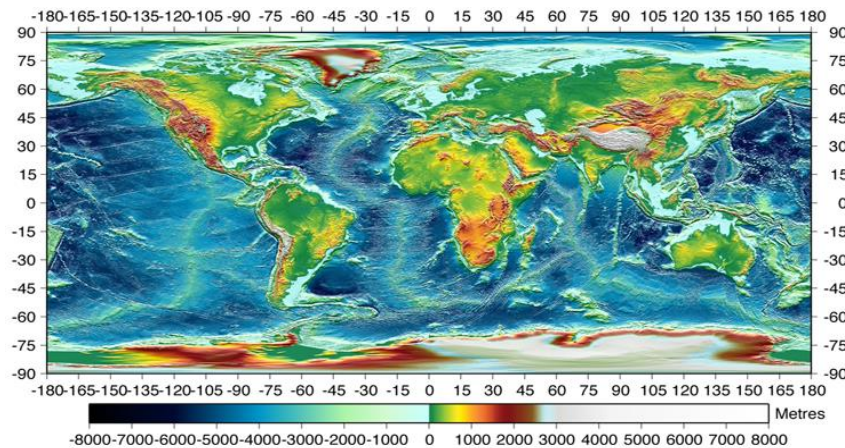
Oblati nad Grónskem a Antarktidou byly zcela odvozeny z altimetrických měření misí ERS-1, ERS-2 a Envisat pomocí Delaunay triangulace a bilineární interpolace.¹³⁹

¹³⁶ *Gisat: SRTM DEM* [online]. 2016 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.gisat.cz/content/cz/produkty/digitalni-model-terenu/srtm-dem>

¹³⁷ *Global 30 Arc-Second Elevation (GTOPO30) The Long Term Archive: GTOPO30 Documentation* [online]. 2015 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>

¹³⁸ *GLCF: Global Land Survey (GLS) DEM* [online]. 2014 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.glcf.umd.edu/data/glsdem/description.shtml>

¹³⁹ BERRY, P.A.M., R.G. SMITH a J. BENVENISTE. *ACE2: The New Global Digital Elevation Model* [online]. 2010 [cit. 2016-04-24].

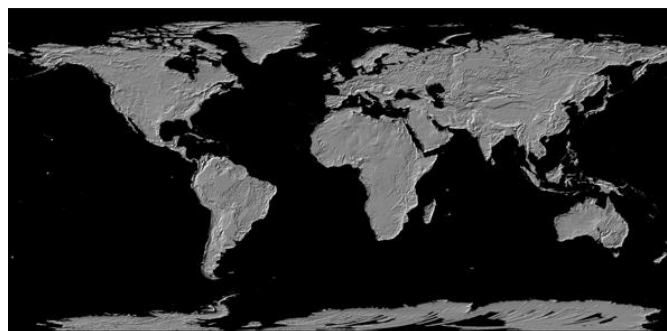


Obr. 47: Digitální model ACE2.¹⁴⁰

ASTER GDEM

Tento model vznikl na základě spolupráce NASA s japonským ministerstvem ekonomie, průmyslu a obchodu. Model je pojmenován po skeneru na družici Terra. ASTER. Zemský povrch je modelem pokryt od 83°severní šířky do 83°jižní šířky. Model je rozdělený na dlaždice, kdy se dlaždice mezi sebou překrývají o jeden pixel, přičemž velikost dlaždic je 3 601x3 601 pixelů. Zeměpisné souřadnice každé dlaždice začínají vždy v levém dolním rohu. Výšková odchylka se pohybuje pro 95 % povrchu okolo 30 m.

V současnosti je aktuální verze 2, který byla vytvořena v roce 2011. ASTER GDEM V2 je stejně jako jeho předchůdce volně stažitelný.¹⁴¹



Obr. 48: Pokrytí zemského povrchu pomocí ASTER GDEM V2.¹⁴²

9.3.2 Tvorba interferogramu

Samotný interferogram je vytvořen křížovým násobením hlavního snímku s komplexně sdruženými čísli vedlejšího snímku.

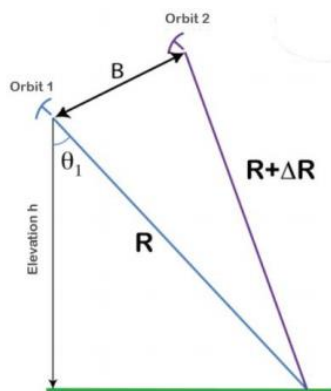
V případě, že je interferogram, jako v tomto případě tvořen ze dvou snímků pořízených ze stejného místa s jistým časovým odstupem, může dojít ke změně vzdálenosti k objektu na základě změny v interferometrické fázi. V případě, že se velikost kolmé základny (obr. 49 – označena B) blíží nule, výsledný interferogram je sice méně podrobný, ale výškově členitý terén je dobře čitelný. Tyto

¹⁴⁰ ACE2 [online]. 2016 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://tethys.eaprs.cse.dmu.ac.uk/ACE2/>

¹⁴¹ ASTER Global Digital Elevation Model v2: Data specification[online]. 2012 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/4.html>

¹⁴² ASTER Global Digital Elevation Model v2: Data specification[online]. 2012 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/image/10.jpg>

interferogramy jsou vhodné při analýzách deformací zemského povrchu. Naopak, pokud je kolmá základna velmi dlouhá, interferogram je podrobný a výškově členitý terén je méně čitelný. Takovéto interferogramy se používají při tvorbě digitálního modelu. Zároveň však kolmá základna nesmí být příliš dlouhá. Pokud její délka překročí určitou mez, dochází pak k dekorelaci signálu a výsledný interferogram nese minimum informací o změně sledovaného povrchu.



Obr. 49: Schéma snímování družicí Sentinel-1A.¹⁴³

Základní vzorec pro tvorbu interferogramu, kde není předpokládán např. vliv atmosféry v podobě atmosferického zpoždění, je snímek pořízený jako první v pořadí definován

$$\varphi_1 = \frac{4\pi R}{\lambda}, \quad (14)$$

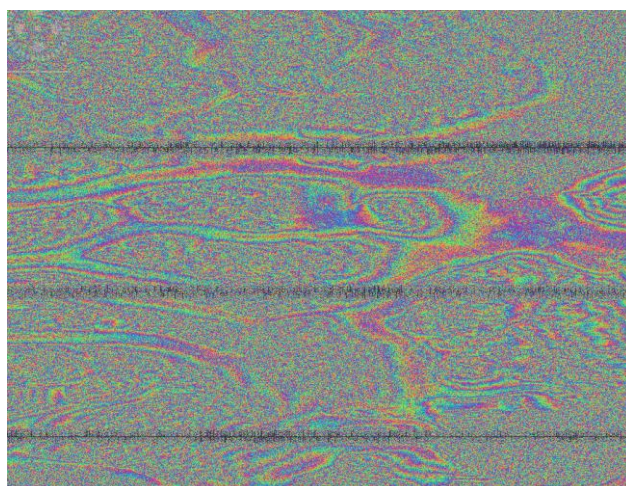
a snímek jako v druhý pořadí (slave) je definován

$$\varphi_2 = \frac{4\pi(R+\Delta R)}{\lambda}. \quad (15)$$

Interferometrická fáze se vypočítá pomocí rozdílu dílčích fází každého snímku.

$$\Delta\phi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{4\pi\Delta R}{\lambda}. \quad (16)$$

Výsledný interferogram je pak na obrázku 50.



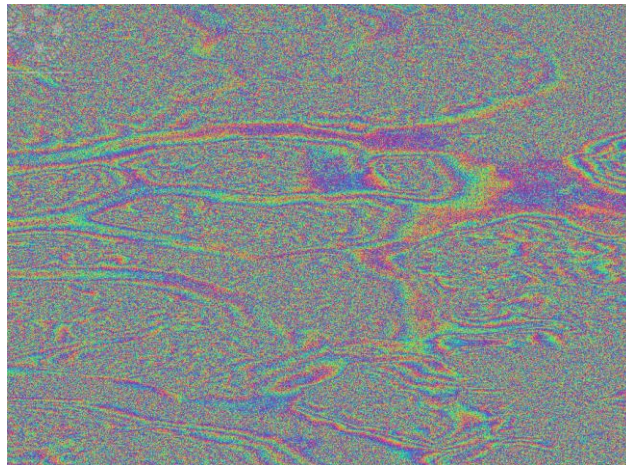
Obr. 50: Část výsledného interferogramu.

¹⁴³ VEI, Luis. *Tutorials - Sentinel-1 Toolbox: Sentinel Online* [online]. In: . s. 21 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://sentinel1.s3.amazonaws.com/docs/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial.pdf>

9.3.3 Debursting

V dalším kroku jsou odstraněny černé demarkační linie oddělující jednotlivé dílčí šířky záběru. Tento princip pořizování snímků je obdobný jako je tomu u snímků družice ENVISAT ASAR Wide ScanSAR SLC product. Avšak na rozdíl od WSS (Wide ScanSAR) jsou přesahy pro jednotlivé beamy, jen do takové míry, aby bylo zajištěno souvislé pokrytí území snímky.¹⁴⁴ V praxi pak překryv činí asi 2 km.

Po odstranění demarkačních linií dojde ke sloučení jednotlivých dílčích šířek záběru.¹⁴⁵ Přesný postup pak uvádí R. Grandin ve své práci „Interferometric processing of SLC Sentinel-1 TOPS data“.¹⁴⁶



Obr. 51: Část výsledného interferometrogramu deburstingu.

9.3.4 Odstranění topografické fáze

Za pomoci tohoto operátoru dojde k odečtení vlivu fáze na interferometrogram. Do výpočtu opět vstupuje digitální model, který musí být shodný s digitálním modelem, který vstupoval do procesu koregistrace, což byl v tomto případě ASTER GDEM V2.

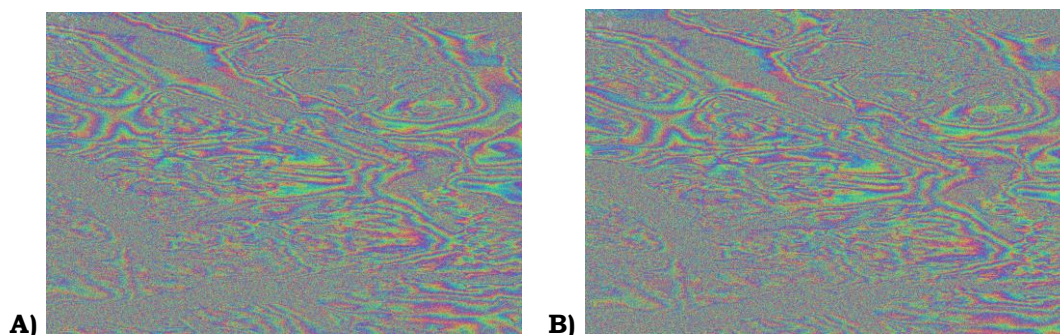
Topografická fáze je vypočítána ve dvou krocích, prvním krokem je přepočítání digitálního modelu do souřadnicového systému hlavního snímku. V tomto bodu vypočítaná referenční fáze je uložena, protože je využita ve výpočtu v následujícím kroku. Kde je tato referenční fáze interpolovaná na celou mřížku souřadnic hlavního snímku na základě Delaunay triangulace. Delaunay triangulation library, jež je využívána, byla vytvořena speciálně pro program NEST, na který S1TBX navazuje.¹⁴⁷

¹⁴⁴ ESA SNAP: HELP Topics. 2016.

¹⁴⁵ ESA: Sentinel Online [online]. 2016 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath>

¹⁴⁶ GRANDIN, Raphaël. *Interferometric processing of SLC Sentinel-1 TOPS data* [online]. , 7 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://www.ipgp.jussieu.fr/~grandin/Raphael_Grandin_personal_web_page/Publications_files/Grandin_Fringe2015.pdf

¹⁴⁷ ESA SNAP: HELP Topics. 2016.



Obr. 52: Porovnání části interferogramu – A) před odstraněním topografické fáze, B) po jejím odstranění.

9.3.5 Filtrování

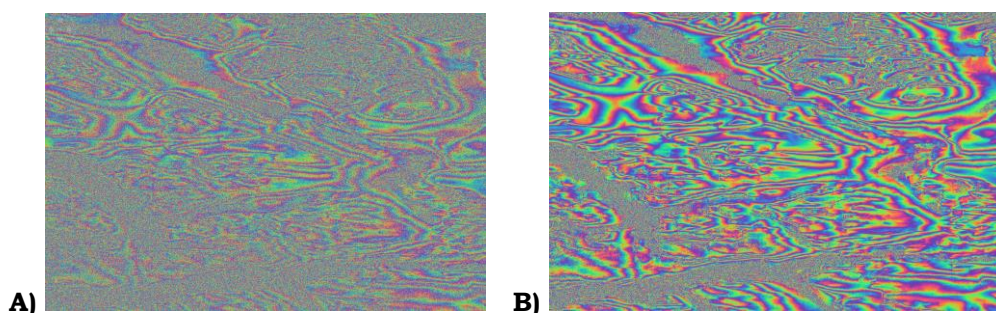
Pro finální filtrování výsledných interferogramů byl použit Goldsteinův filtr fází. Tento filtr je jedním ze tří filtrů, které lze v S1TBX použít. Použit byl na základě doporučení ESA, pro práci se SLC SAR snímky.

Goldsteinův filtr fází je nelineární adaptivní algoritmus vytvoření Goldsteinem a Wernerem v roce 1998. Jako vstup jsou zde načteny výsledné interferogramy, které vznikly po odstranění topografické fáze. Pomocí tohoto filtru jsou sníženy rezidua v dalším rozbalování fáze.

Tento filtr pracuje na základě násobení Fourierova spektra $Z(u,v)$ malého pole interferogramu jeho shlazenou absolutní hodnotou $S\{|Z(u,v)|\}$, jehož exponentem je parametr filtru α dle vzorce

$$H(u, v) = S\{|Z(u, v)|\}^\alpha * Z(u, v) \quad (17)$$

kde $H(u,v)$ je odpověď filtru (spektrum filtrovaného interferogramu), $S\{\}$ je operátor shlazení, u a v jsou prostorové frekvence a α je parametr filtru. Pole interferogramu jsou definovány jako malé části interferogramu, kterou jsou navzájem překryty, aby se zabránilo nespojitostem na hranicích jednotlivých polí. V případě, že se koeficient $\alpha=0$, násobící koeficient bude jedna a nedojde k žádnému filtrování. Čím je však koeficient α větší, tím je výsledné filtrování výraznější.¹⁴⁸



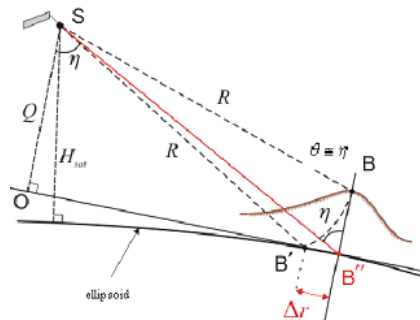
Obr. 53: Porovnání interferogramu – A) nefiltrovaného B) vyfiltrovaného.

¹⁴⁸ BARAN, Ireneusz. A Modification to the Goldstein Radar Interferogram Filter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2003, 41(9), 2114 - 2118. DOI: 10.1109/TGRS.2003.817212. ISSN 0196-2892.

9.3.6 Geometrické korekce

V této práci byl pro geometrické korekce snímků použit operátor „Ellipsoid Correction – Range Doppler“. Na interferogramu je použita Range Doppler ortorektifikační metoda.

Terénní korekce jsou určeny jako ke kompenzaci zkreslení, které nastaly v důsledku snímání povrchu. Obrazová data nejsou pořízena v nadiru. Po použití terénních korekcí dojde ke kompenzaci těchto zkreslení a výsledný obraz, tak bude nejbližší poloze reálného snímaného povrchu. Na obrázku X je náčrt principu distorze, kde H_{sat} je výška družice na orbitě, sledovaný objekt B, který je ve výšce h nad elipsoidem, se zobrazuje v B' , i když je jeho skutečná poloha B'' . Vzdálenost mezi B' a B'' je označena jako Δr udává topografické zkreslení.¹⁴⁹



Obr. 54: Princip topografické distorze.

10 VÝSLEDKY

Do programu S1TBX byly nahrány vybrané snímky s polarizací HH. Provedena byla koregistrace snímků, následně byl snímek ořezán na danou zájmovou oblast, aby celý proces tvorby interferogramu nebyl natolik výpočetně náročný.

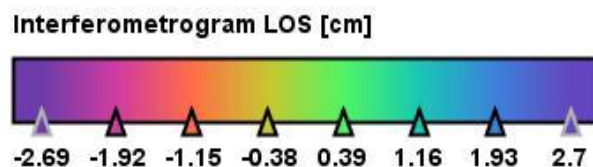
Snímky byly zpracovány na základě manuálu „Sentinel-1 TOPSAR Interferometry“, který je k dispozici na stránkách ESA (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1/tutorials>).

10.1 Pobřežní oblast

Pro tuto oblast bylo celkem vytvořeno šest interferogramů pro rok 2015 a pouze jeden interferogram pro rok 2016. Což bylo způsobeno nezveřejněnými hodnotami orbit pro snímky, jež byly pořízeny od poloviny února.

2015

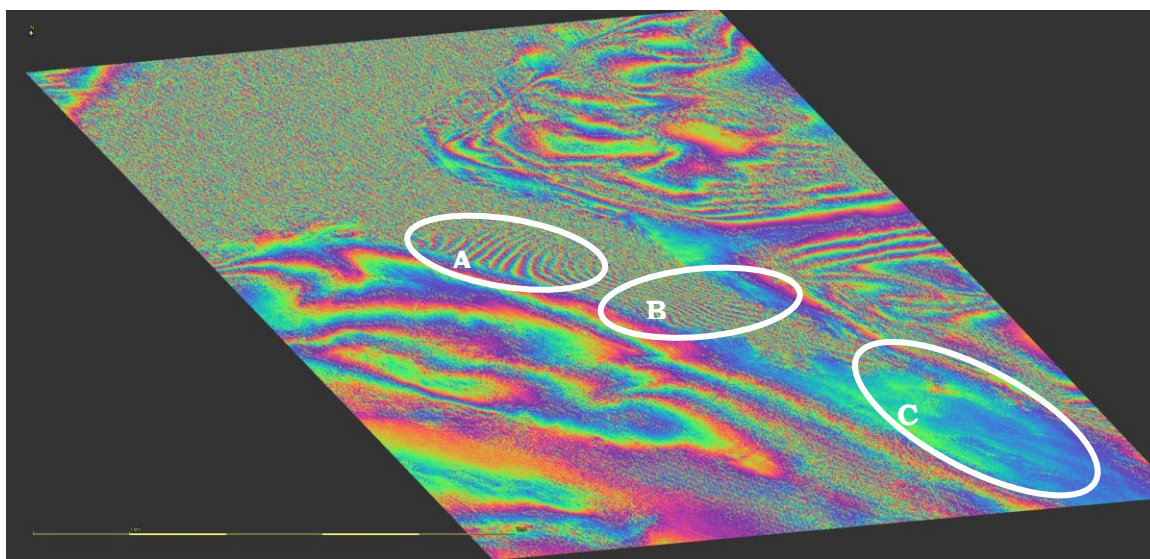
Pro všechny snímky platí stejná legenda (obr. 55).



Obr. 55: Legenda pro jednotlivé interferogramy.

¹⁴⁹ ESA SNAP: HELP Topics. 2016.

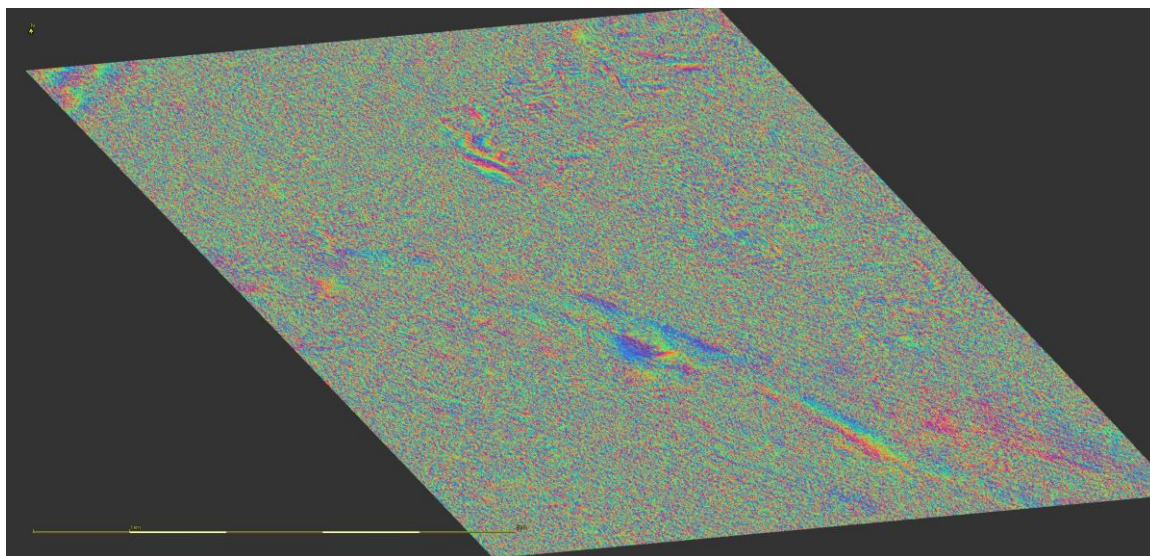
Interferometrický pár: 3. 1. – 15. 1. 2015



Obr. 56: Výsledný interferogram – pár 3. 1. – 15. 1. 2015.

Na první pohled mezi snímky z 3. 1. a 15. 1. není viditelná markantní změna pohybu (na obr. 56, označeno A). Ústí jen nepatrně (na obr. označeno B). Nejvíce patrné jsou změny u západní části zálivu, kde došlo k výškové změně okolo 90 cm. Naopak u ledovcového splazu (na obr. označeno C) nedošlo téměř k pohybu.

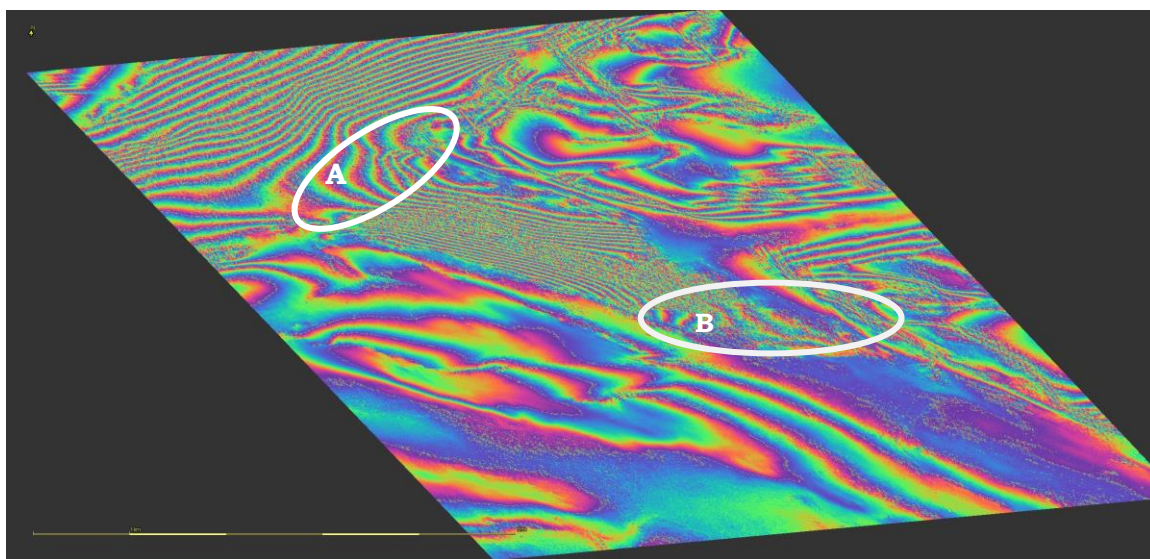
Interferometrický pár: 15. 1. – 4. 3. 2015:



Obr. 57: Výsledný interferogram – pár 15. 1. – 4. 3. 2015.

Díky výslednému zcela nekoherentnímu obrazu není možné výsledný interferogram správně interpretovat. Tato chyba je s největší pravděpodobností způsobena velkým časovým rozestupem mezi snímky interferometrického páru.

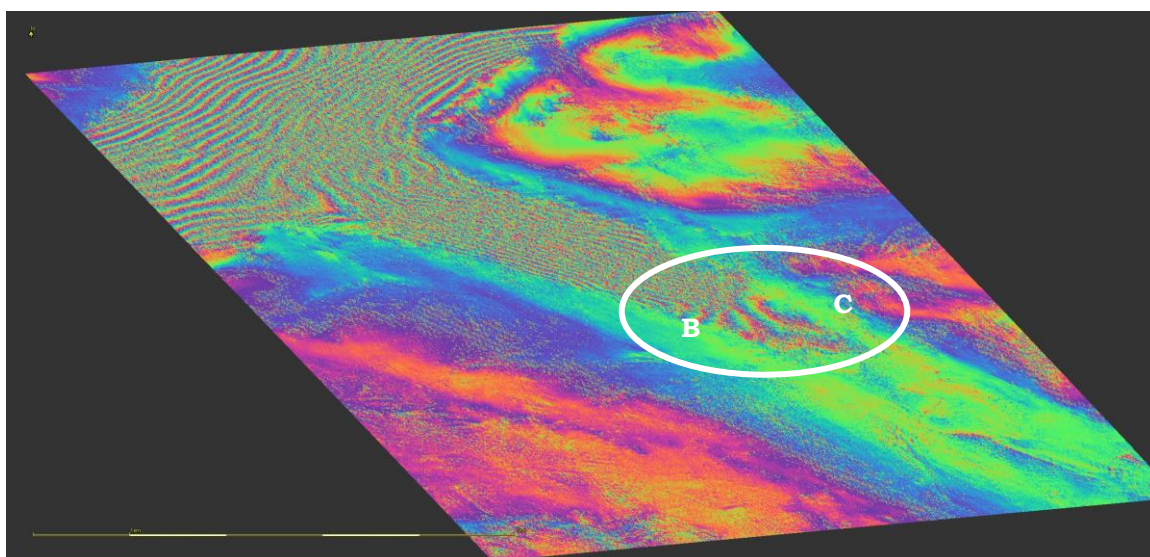
Interferometrický pár: 4. 3. – 16. 3. 2015



Obr. 58: Výsledný interferogram – pár 4. 3. – 16. 3. 2015.

V případě tohoto interferogramu je viditelných hned několik dílčích hranic, kdy dochází k pohybu. První z nich (obr. 58, označeno A) v místě ústí zálivu, kde se ledovcový splaz nachází. K vertikálnímu pohybu došlo i na čele ledovcového splazu (obr. 58, označeno B), kdy se výška ledu snížila asi o 33 cm.

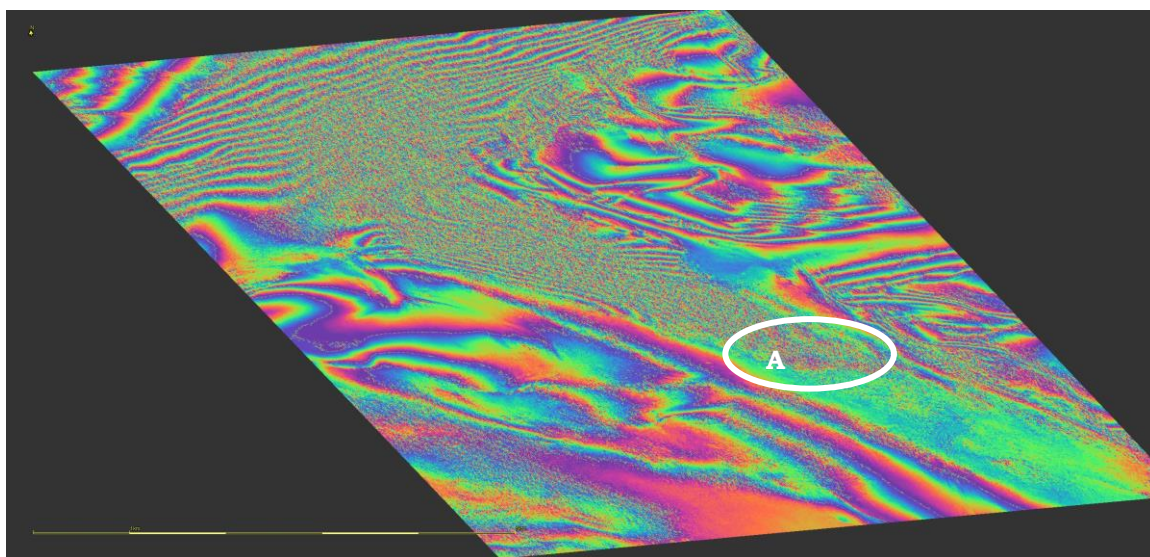
Interferometrický pár: 16. 3. – 28. 3. 2015



Obr. 59: Výsledný interferogram – pár: 4. 3. – 16. 3. 2015.

U tohoto interferogramu je patrný miskovitý tvar vzniklý ústí. U levé části ledovcového splazu došlo ke změně asi o 25 cm (obr. 59, označené B), na pravé části ledovcového splazu jen o 11 cm (obr. 59, označené C).

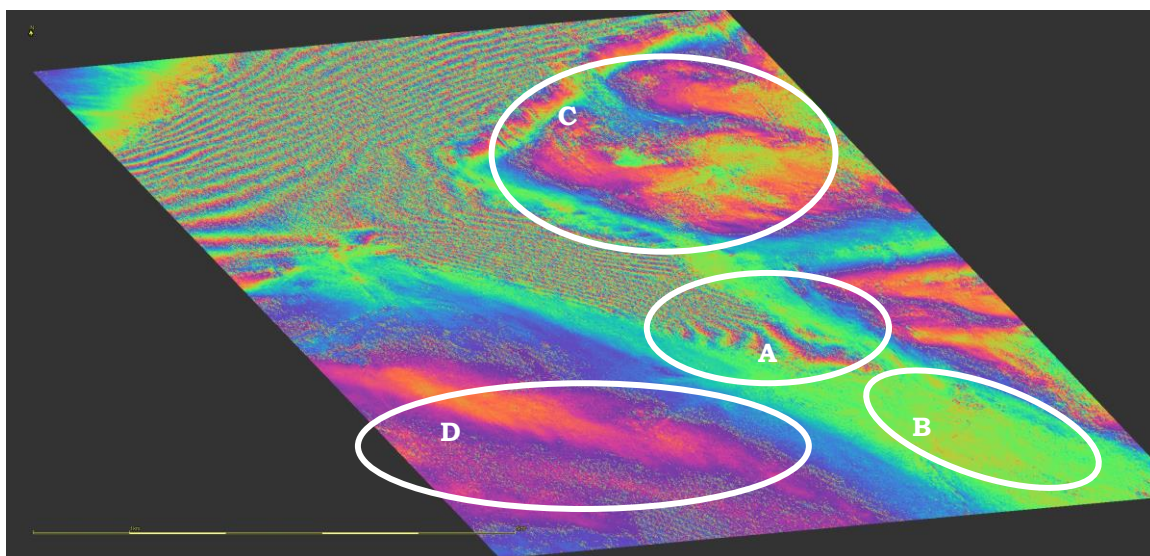
Interferometrický pár: 28. 3. – 9. 4. 2015



Obr. 60: Výsledný interferogram – pár 28. 3. – 9. 4. 2015.

Tento interferometrický pár vykazuje pouze minimální změny (obr. 60, označeno A), kdy došlo ke změnám maximálně o 10 cm.

Interferometrický pár: 9. 4. – 21. 4. 2015



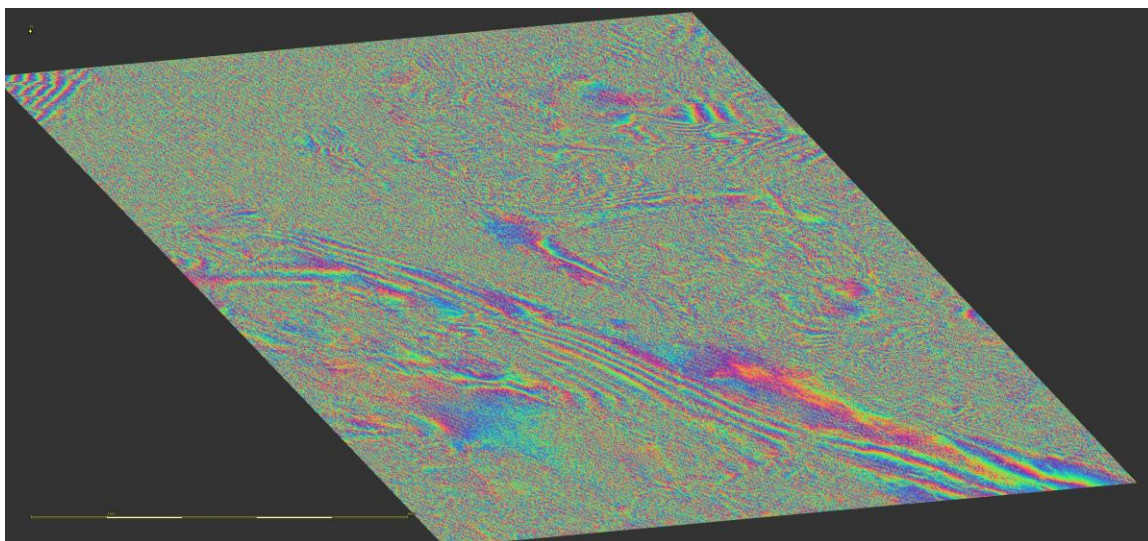
Obr. 61: Výsledný interferogram – pár 9. 4. – 21. 4. 2015.

U tohoto interferogramu je jasně viditelné natávání čela ústí (obr. 61, označeno A), kdy se výška čela změnila o téměř 28 cm. Na druhou stranu, je patrný téměř nulový pohyb samotného ledovcového splazu (obr. 61, označen B).

V porovnání s přechozím interferogramem (obr. 60) už nedochází k výrazným změnám na místě pevniny (obr. 61, označeno C a D).

2016

Interferometrický pár: 10. 1. – 15. 2. 2015



Obr. 62: Výsledný interferogram – pár 10. 1. – 15. 2. 2015.

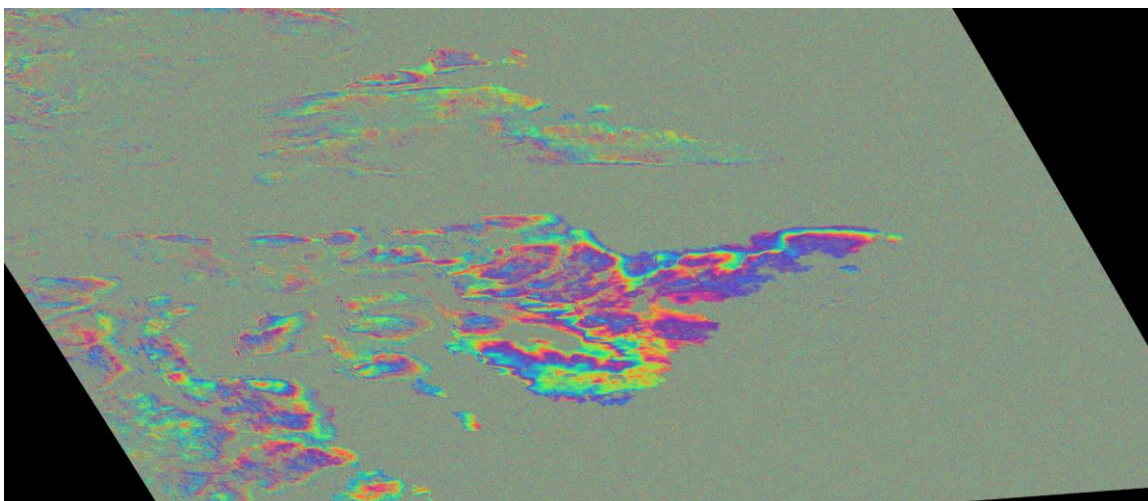
U tohoto interferogramu není možné odečíst jakékoliv změny povrchu, protože je z převážné části tvořen pouze šumem. To je s největší pravděpodobností dáno nekoherentními snímky, což je dáno velkou časovou základnou pro tento interferometrický pár.

10.2 Ledovec Jakobshavn

Hranice pro jednotlivé interferogramy jsou vizualizovány v příloze č. 4.

2015

Interferometrický pár: 15. 1. – 4. 3. 2015

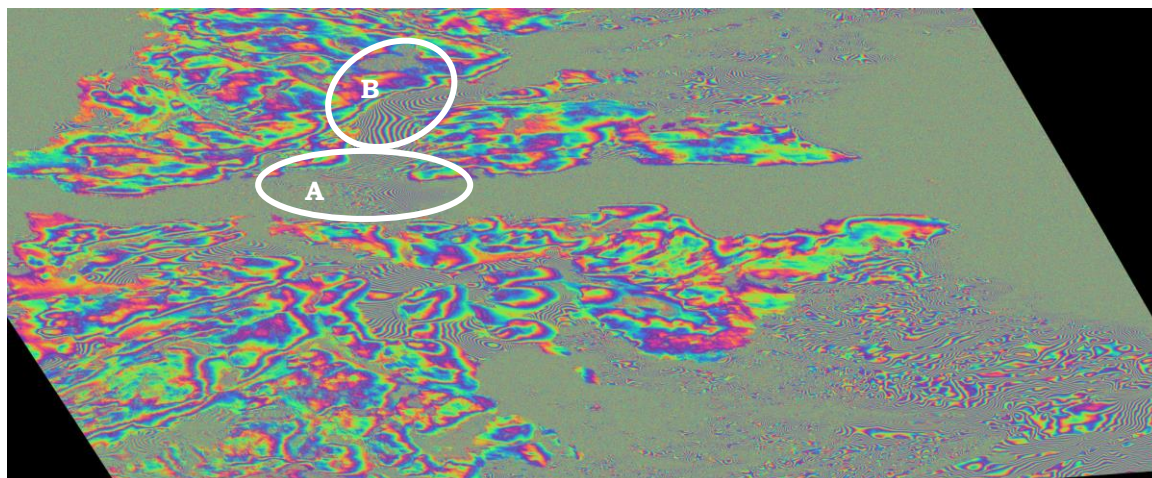


Obr. 63: Výsledný interferogram – pár 15. 1. – 4. 3. 2015

Interpretace tohoto interferogramu je obtížná stejně jako je tomu u předešlých interferogramů (obr. a obr.) z důvodu velké časové základny. V tomto případě činí

časová prodleva 49 dní. Díky tomu je výsledný obraz velmi nekoherentní a nelze správně interpretovat.

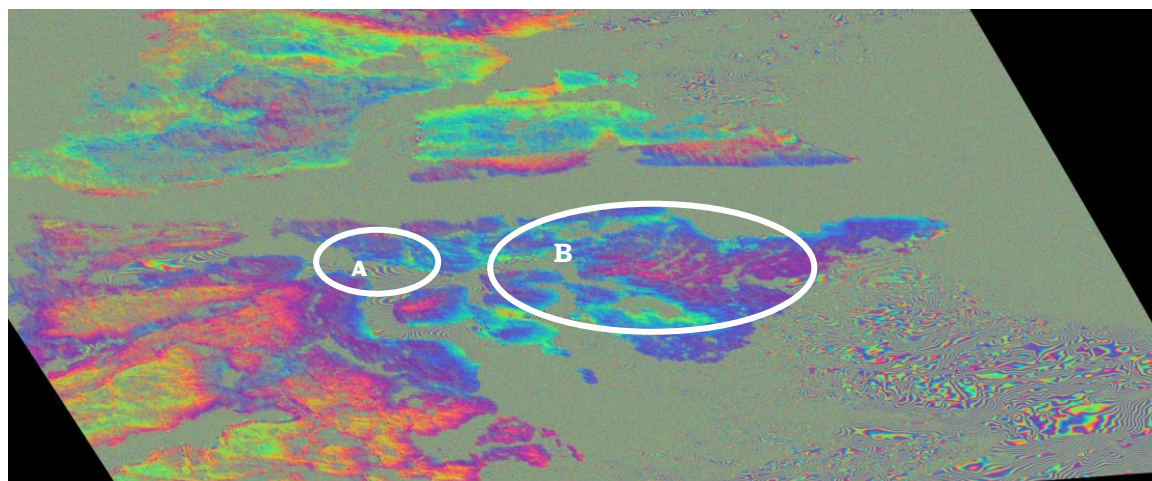
Interferometrický pár: 4. 3. – 16. 3. 2015



Obr. 64: Výsledný interferogram – pár 4. 3. – 16. 3. 2015.

Na obrázku jsou viditelné tři hlavní místa tání. V tomto případě se nejedná o tání ledovce, ale o změny ve výšce zmrzlého ledu v zálivu. Výška ledové pokrývky se v hlavním zálivu změnila o 1 m (na obr. 64 označeno A). K dalším změnám došlo převážně ve vedlejších zálivech. Hlavní změny ve vedlejších zálivech (na obr. 64 označeno B) došlo ke změně až o 55 cm.

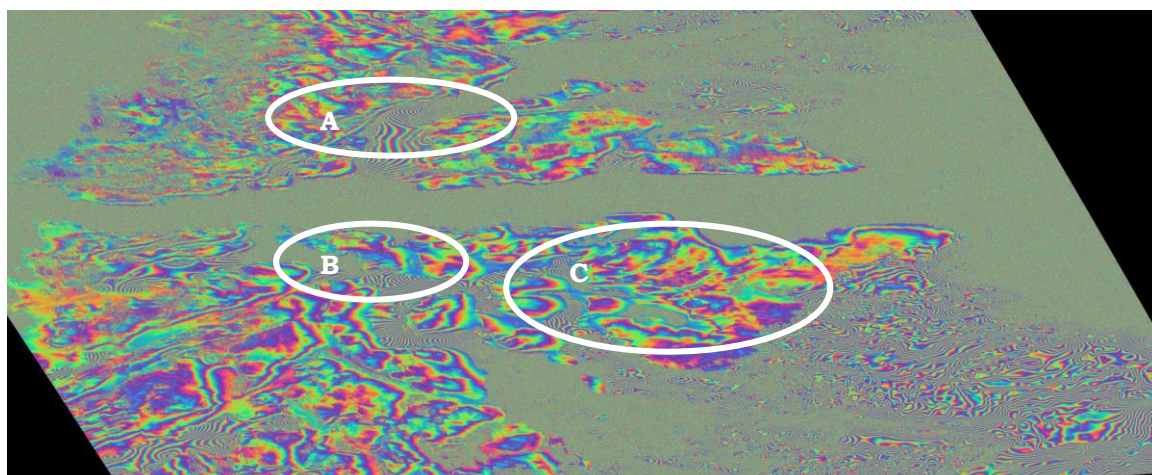
Interferometrický pár: 16. 3. – 28. 3. 2015



Obr. 65: Výsledný interferogram – pár 16. 3. – 28. 3. 2015

V tomto případě došlo ke změně pouze v jednom z vedlejších zálivů (na obr. 65 označen jako A). Kdy se jednalo o změnu asi 44 cm.

Interferometrický pár: 28. 3. – 9. 4. 2015

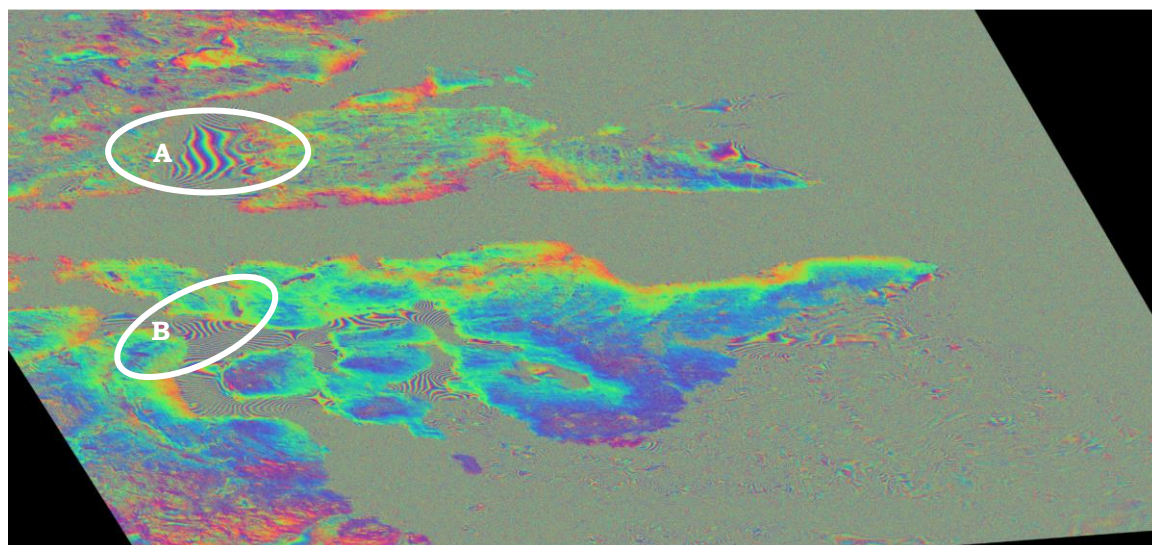


Obr. 66: Výsledný interferogram – pár 28. 3. – 9. 4. 2015

V tomto případě došlo mezi 28. březnem a 9. dubnem k velkým změnám jen ve dvou vedlejších zálivech. V prvním z nich (na obr. 66 označen jako A) došlo ke změně asi o 39 cm a na druhém z nich (na obr. 66 označen jako B) ke změně asi o 30 cm.

V porovnání s předcházejícím interferogramem (obr. 65) došlo k výrazným změnám na pevnině (na obr. 65 označeno jako B, na obr. 66 jako C).

Interferometrický pár: 9. 4. – 21. 4. 2015



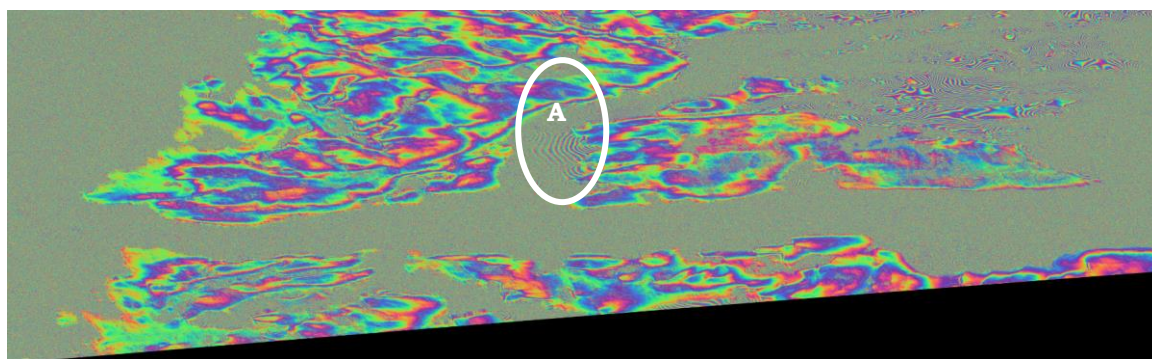
Obr. 67: Výsledný interferogram – pár 9. 4. – 21. 4. 2015

I v tomto případě došlo k pohybu jen dvou vedlejších zálivů. V případě prvního (na obr. 67 označen jako A) došlo ke změně o zhruba 34 cm. Naopak u druhého (na obr. 67 značen jako B) došlo k podstatně větším výškovým změnám a to téměř o 50 cm.

2016

Z důvodu změny snímání povrchu došlo k posunutí snímků. Proto se pro tuto oblast výřezy pro jednotlivé roky liší.

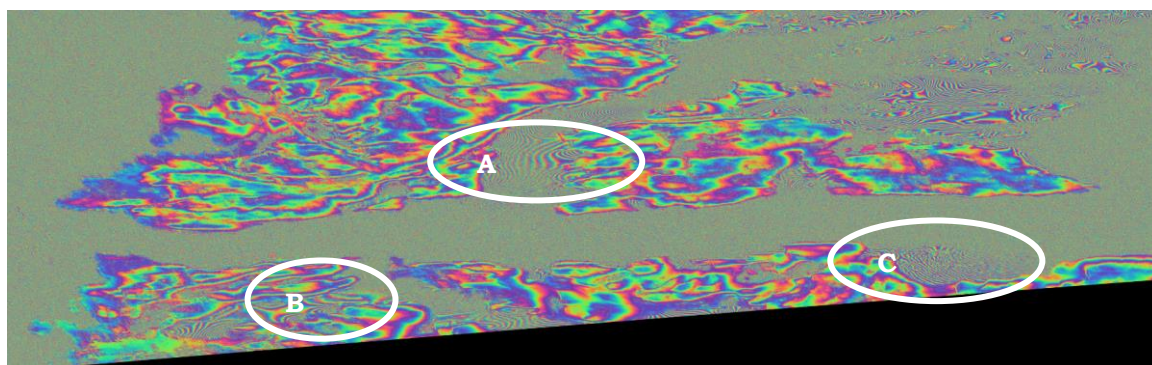
Interferometrický pár: 22. 1. – 3. 2. 2016



Obr. 67: Výsledný interferogram – pár 3. 2. – 15. 2. 2016

Na prvním interferogramu pro rok 2016 je v oblasti ledovce patrné pouze jedno místo, kde došlo k pohybu (na obr. 67 označeno jako A). Dle interferogrammetru došlo k pohybu o téměř 67 cm. Zbylá část ledovce je tvořena pouze šumem. Dá se tedy usuzovat, že v této části k pohybu nedošlo.

Interferometrický pár: 3. 2. – 15. 2. 2016



Obr. 67: Výsledný interferogram – pár 3. 2. – 15. 2. 2016

Poslední interferogram pro rok 2016 ukazuje již pohyb na mnoha místech. Prvním z nich (na obr. 67 označen jako A) je pohyb u ústí vedlejšího zálivu. K největším pohybům zde dochází v těsné blízkosti břehu, kdy se jednalo o změny výšky okolo 30 cm. Naopak- Další velký zaznamenaný pohyb je (na obr. 67 označen jako B) v jižní oblasti ledovce. V tomto případě se jednalo o změnu okolo 20 cm. Další velká změna proběhla v blízkosti čela ledovce (na obr. 67 označeno jako C), kde došlo k velkým změnám, avšak počet jednotlivých proužků interferogramu není pouhým okem stanovitelný. Z tohoto důvodu není možné změně výšky stanovit.

10.3 Shrnutí

Na základě nedostatku snímků pro rok 2016 pro první zvolenou oblast, pobřežní, není možné zhodnotit meziroční změny v pohybu ledu. Na základě výsledné digitalizace hranic deformace (Příloha č. 3) je viditelný úbytek ledu na přelomu března a dubna.

Pro ledovec Jakobshavn (Příloha č. 4) není možné provést taktéž díky absenci snímků meziroční srovnání hranic deformací ledu.

11 DISKUZE

V této práci bylo vyzkoušeno několik metod práce se zcela novými radarovými daty v zcela novém softwaru. Cílem práce bylo seznámit se jak se základními principy práce s radarovými snímky, které jsou zcela odlišné, od práce s optickými snímky.

Praktické výstupy této práce byly negativně ovlivněny hned několika faktory. Prvním z nich byl nedostatečný počet polarimetrických snímků dostupných pro polární oblasti. DualPol snímky pro polární oblasti byly dostupné pouze v módu HH+HV, pouze pro jednu oblast Antarktidy. Přičemž tato data bylo možné stáhnout až od ledna roku 2016, v průběhu roku 2015 bylo sice možné duálně polarizované snímky stáhnout ovšem ne pro polární oblasti.

Dalším problémem byla dostupnost jednoduše polarizovaných dat. Nedostatek snímků vstupujících do daných časových řad negativně ovlivnil výsledné interferogramy, jak dokazují obrázek 57, obrázek 62 a obrázek 63. Kdy doba mezi pořízením jednotlivých snímků tvořících interferometrický pár se z deklarovaných 12 dní prodloužila na 45 dní pro interferometrický pár 15. 1. – 4. 3. 2015, a na 36 dní v případě interferometrického páru 10. 1. – 15. 2. 2016. Výsledné interferogramy jsou tvořeny převážně šumem v důsledku nekoherentnosti obrazu. Tyto interferogramy byly vytvořeny pro zachování časové kontinuity. V případě, že by byly dostupné opravdu všechny snímky časovou základnou 12 dní, nebyla by porušena časová kontinuita a výsledné interferogramy by byly koherentní.

Počet výstupů pro rok 2016 je pak ovlivněn pro uživatele nedostupnými hodnotami orbit pro snímky pořízené od konce února. Z tohoto důvodu nebylo možné s těmito snímky pracovat.

Samotná práce s programem byla ve svých počátcích velmi problematická. Kdy byly ze začátku v programu opravovány chyby. K upozornění na chybu v programu slouží fórum pro uživatele jak S1TBX, tak i S2TBX. V průběhu necelých dvou let, kdy byl S1TBX postupně opravován, jej lze nyní bez větších komplikací použít pro práci s radarovými daty a to i DualPol nebo QuadPol.

Práci se zcela novým softwarem byť vzhledově podobným se svým předchůdcem NEST, usnadňovaly četné manuály, které bylo možné stáhnout na stránkách ESA, ale i video manuálu uveřejněné na Youtube. Díky kterým nebylo větším problémem s radarovými daty pracovat. V případě jakýchkoli problémů při práci s programem bylo navíc vhodné a uživateli hojně využívané využít diskuzního fóra pro uživatele S1TBX, kdy Luis Iveci, který má na starosti část týkající se Sentinelu-1 a který je i autorem zmíněných tutoriálů, odpovídal na dotazy, řešil problémy a dával uživatelům cenné rady.

V průběhu doby, mezi vydáním první verze programu a vydáním té prozatím poslední. Došlo k betatestování jednotlivých nástrojů, kdy byly ke stažení rychle se aktualizující beta testovací verze S1TBX. Pro tuto práci byly používány dvě verze tohoto programu. První byla první plnohodnotnou verzí Sentinel-1 Toolbox 1.1.1. a druhou verzí byla aktuální verze dostupná od 30. 3. 2016. Důvodem použití obou verzí byl fakt, že stávající nová verze s největší pravděpodobností obsahuje chybu v algoritmu pro vytvoření koregistrovaných dat, kdy výstupní slave snímek neobsahuje žádné hodnoty. Proto byly snímky nejprve koregistrovány ve verzi 1.1.1 a následně s nimi bylo pracováno v aktuální verzi programu 3.0.0, kde jsou vylepšené funkce, jako je např. Split. V případě, že však v další verzi programu bude chyba v algoritmu koregistrace odstraněna, nese s sebou nová verze velkou výhodu a to v rozšířeném

nástroj „Split“, pomocí něhož si uživatel nejenže může vybrat beam, ale i jednotlivé bursty, což se velmi kladně podepíše délce trvání jednotlivých analýz. Použití jednotlivých nástrojů je tak při současném stavu procesingově náročné, za což může objem dat. V současnosti je praktické nemožné tato data zpracovávat na stroji s menší pamětí RAM jak 16 GB.

12 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo pracovat s radarovými daty pořízenými družicí Sentinel-1A. Data byla zpracována v programu k tomu určeném, Sentinel-1 Toolbox. Ten nahradil program NEST a částečně i program PolSARproText, ve kterých byla vesměs radarová data do té doby zpracovávána.

Tato práce se zaměřovala na ověření možnosti práce se snímky pro polární oblasti resp. Arktidu. Na Sentinel Data Hub byla v souladu se zadáním práce vybrána dvě území, jež byly zpracovány pomocí metody InSAR a jedna oblast pro použití polarimetrie. Kvůli nedostupnosti duálně polarizovaných snímků pro severní polární oblasti, byla na základě konzultace s vedoucím práce vybrána oblast na pobřeží Antarktidy, kde bylo pracováno s jedním DualPol snímkem.

Celkem bylo v této práci zpracováno 16 radarových snímků. Výběr snímků byl omezen jednak oblastí – Arktida. Od toho se odvíjelo další omezení v důsledku dostupnosti většího počtu snímků pro tuto oblast. Další nevýhodou pro výběr snímků byl fakt, že družice Galileo byla v operačním stavu velmi krátkou dobu, proto jsou snímky ovlivněny časově – začátkem ledna 2015. Snímky byly rozříděny pro jednotlivé oblasti Arktidy rozděleny do dvou časových řad. První z nich byla pro rok 2015 a druhá pro rok 2016. Jak už bylo zmíněno v diskuzi, práce se snímky patřící do časové řady pro rok 2016 byla navíc ovlivněna tím, že i když snímky byly na Sentinel Data Hub dostupné, z důvodu chybějících informací o parametrech orbit družice, při pořizování daných snímků, s nimi nebylo možné pracovat. Problémem byly i snímky s duální polarizací, které pro Arktidu nebyly dostupné. Pro polární oblasti jako takové jsou duálně polarizovaná data dostupná až od ledna 2016 pro oblast Antarktidy. Z tohoto důvodu nebylo s těmito daty více pracováno.

Pomocí radarové interferometrie bylo vytvořeno pobřežní oblast sedm interferogramů (šest pro rok 2015 a jeden pro rok 2016). Pomocí nichž byly zachyceny pohyby ledu ve vebraném zálivu pro obě časové řady přímo v místě ústí zálivu, který byl sledován. Pro ledovec Jakobshavn bylo taktéž vytvořeno celkem sedm interferogramů (pět pro rok 2015 a dva pro rok 2016). U tohoto ledovce však byly sledovány pohyby ledu pouze v postranních zálivech ledovce. Pohyb samotného ledovce v tomto případě nebyl zaznamenán. To je pravděpodobně způsobeno sledovaným obdobím, kdy ledovec ještě netaje.

DualPol data podrobně, tak jako tomu bylo v případě single polarizovaných snímků, zpracována nebyla. Jedním z hlavních důvodů byla nedostupnost tohoto typu snímků pro danou oblast uvedenou v zadání práce. Dalším omezením byl fakt, že pro tento typ analýzy nebyla vhodná referenční data. Bez kterých nelze určit, jak pro výsledky polarimetrické dekompozice, tak i pro výsledky řízené klasifikaci, jednotlivé typy výsledných tříd.

Výstupem této práce je dále český manuál pro práci s radarovými daty tandemu Sentinel-1, který vycházel jednak z praktických zkušeností autorky, ale i z dostupných tutoriálů připravených pro práci v prostředí S1TBX.

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

Knihy

DOBROVOLNÝ, Petr. Dálkový průzkum země: Digitální zpracování obrazu. 1. Brno, 1998

ESA SNAP: HELP Topics. 2016

LILLESAND, Thomas M. Remote sensing and image interpretation. 4rd ed. New York: John Wiley, 2000. ISBN 978-0471255154.

KRAMER, Herbert J. Observation of the Earth and Its Environment: Survey of Missions and Sensors. Fourth edition. Springer Science & Business Media, 2002. ISBN 978-3-642-62688-3

RIGNOT, E. et all. Rapid ice discharge from southeast Greenland glaciers. Geophysical Research Letters [online]. 2004,31(10), n/a-n/a [cit. 2016-04-25]. DOI: 10.1029/2004GL019474. ISSN 00948276. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1029/2004GL019474>

Akademické práce

CAPALINIOVÁ, Květa. Filtrace interferometrických dat. Praha, 2006. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Lenka Halounová, CSc.

LAZECKÝ, Milan. Application of SAR Interferometry techniques in a specific undermined region of Northern Moravia. 2011. Rigorózní práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

MICHOVSKÝ, Petr. Vyhodnocení území podezřelých z poklesů určených metodou interferometrie. Praha, 2005. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Lena Halounová, CSc.

PALÚCHOVÁ, Miroslava. Analýza využitelnosti družicových dat pro monitoring pohybu skalních ledovců. Praha, 2014. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze. Vedoucí práce Mgr. Lukáš Brůha

TKÁČIKOVÁ, Andrea. Využitie radarovej interferometrie k vyhodnoteniu zmien terénu po povodniach v roku 1997. 2010. Diplomová práce. Vysoká škola báňská — Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Milan Lazecký

VANKO, Jakub. Monitoring Landscape changes using satellite radar imagery. Bratislava, 2015. Diplomová. Slovenská technická univerzita v Bratislavě. Vedoucí práce Ing. Juraj Papčo Ph.D.

Články

BARAN, Ireneusz. A Modification to the Goldstein Radar Interferogram Filter. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003, 41(9), 2114 - 2118. DOI: 10.1109/TGRS.2003.817212. ISSN 0196-2892.

Online články

BERRY, P.A.M., R.G. SMITH a J. BENVENISTE. ACE2: The New Global Digital Elevation Model [online]. 2010 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://tethys.eaprs.cse.dmu.ac.uk/ACE2/docs/ACE2_userguide.pdf

CATANI, Filippo, Paolo FARINA, Sandro MORETTI, Giovanni NICO a Tazio STROZZI. On the application of SAR interferometry to geomorphological studies: estimation of

landform attributes and mass movements. *Geomorphology*. 2005, 66(1-4), 119-131. DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.08.012. ISSN 0169555x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555X04002168>

DOWDESWELL, J. A., R. P. BASSFORD, M. R. GORMAN, et al. Form and flow of the Academy of Sciences Ice Cap, Severnaya Zemlya, Russian High Arctic. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2002, 107(B4), EPM 5-1-EPM 5-15. DOI: 10.1029/2000JB000129. ISSN 01480227. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1029/2000JB000129>

MIAO, Fang a kol. Application of DInSAR and GIS for underground mine subsidence monitoring. *The International Archives of the Photogrammetry: Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. 2008, (Vol. XXXVII) [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/41.pdf

MOHOLDT, G., J. O. HAGEN, T. EIKEN a T. V. SCHULER. Geometric changes and mass balance of the Austfonna ice cap, Svalbard. *The Cryosphere*. 2010, 4(1), 21-34. DOI: 10.5194/tc-4-21-2010. ISSN 1994-0424. Dostupné také z: <http://www.the-cryosphere.net/4/21/2010/>

MUCKENHUBER, Stefan, Anton Andreevich KOROSOV a Stein SANDVEN. Open-source feature-tracking algorithm for sea ice drift retrieval from Sentinel-1 SAR imagery. *The Cryosphere*. 2016, 10(2), 913-925. DOI: 10.5194/tc-10-913-2016. ISSN 1994-0424. Dostupné také z: <http://www.the-cryosphere.net/10/913/2016/>

ROTT, H. Advances in interferometric synthetic aperture radar (InSAR) in earth system science. *Progress in Physical Geography* [online]. 2009, 33(6), 769-791 [cit. 2016-04-11]. DOI: 10.1177/0309133309350263. ISSN 0309-1333. Dostupné z: <http://ppg.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0309133309350263>

ZEMP, Michael, Holger FREY, Isabelle GÄRTNER-ROER, et al. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of Glaciology*. 2015, 61(228), 745-762. DOI: 10.3189/2015JoG15J017. ISSN 00221430. Dostupné také z: <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article>

ZEMP, Michael, Isabelle GÄRTNER-ROER a Samuel U. NUSSBAUMER. GLOBAL GLACIER CHANGE BULLETIN [online]. In: . 1. Zurich, 2014, s. 242 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://wgms.ch/downloads/WGMS_GGCB_01.pdf

ZEMP, Michael. Global glacier changes: facts and figures [online]. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme, 2008 [cit. 2016-04-25]. ISBN 978-928-0728-989. Dostupné z: <http://www.grid.unep.ch/glaciers/pdfs/glaciers.pdf>

Internetové zdroje

About WGMS world glacier monitoring service: World Glacier Monitoring Service [online]. 2015 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://wgms.ch/about_wgms/

About WGMS world glacier monitoring service: World Glacier Monitoring Service [online]. 2015 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://wgms.ch/about_funding/s

About WGMS world glacier monitoring service: World Glacier Monitoring Service [online]. 2015 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://wgms.ch/products_fog/

About WGMS world glacier monitoring service: World Glacier Monitoring Service [online]. 2015 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://wgms.ch/glacierapp/>

ACE2 [online]. 2016 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://tethys.eaprs.cse.dmu.ac.uk/ACE2/>

Advanced Techniques for Forest Biomass and Biomass Change Mapping Using Novel Combination of Active Remote Sensing Sensor: Copernicus [online]. 2015 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://www.copernicus.eu/projects/advancedsar>

Alaska Satellite Facility [online]. [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <https://www.asf.alaska.edu/sentinel/data/>

Alaska Satellite Facility [online]. 2016 [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <https://www.asf.alaska.edu/about/asf/>

ASF's Data Portal: ASF's Data Portal [online]. 2016 [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>

ASTER Global Digital Elevation Model v2: Data specification[online]. 2012 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/4.html>

ASTER Global Digital Elevation Model v2: Data specification[online]. 2012 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/image/10.jpg>

Copernicus [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <http://www.eea.europa.eu/about-us/what/seis-initiatives/copernicus>

Copernicus: Sentinel-1 - Satellite Missions - eoPortal Directory [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-1>

Costa Concordia: Recovery operations assisted from space [online]. 2013, s. 2 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/Copernicus_Factsheet_CostaConcordia_Issue41_December2013.pdf

CryoClim [online]. 2015 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://www.cryoclim.net/cryoclim/subsites/data_portal/

CryoSat Operational Monitoring: Sea Ice [online]. 2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://www.cpom.ucl.ac.uk/csopr/seaice.html?lat=76.00&lon=154.83&thk_period=28&season=Autumn&year=2014&basin_selected=12&ts_area_or_point=point&select_thk_vol=select_thk

Danube Delta - UNESCO World Heritage Centre [online]. 2015 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://whc.unesco.org/en/list/588>

Deal sealed for new Sentinel-1 satellites / Sentinel-1 / Copernicus / Observing the Earth / Our Activities / ESA. ESA, Sentinel-1 [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Deal_sealed_for_new_Sentinel-1_satellites

EODA [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: https://eoda.cls.fr/login?came_from=%2F

ESA: Sentinel Online [online]. 2016 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath>

Gisat - Přehled družicových systémů Sentinel-1 A: Sentinel-1 A [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <http://www.gisat.cz/content/cz/dpz/prehled-druzicovych-systemu/satelite/sentinel-1-a>

Gisat: Radarová interferometrie [online]. 2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.gisat.cz/content/cz/dpz/zpracovani-dat/radarova-interferometrie>

Gisat: SRTM DEM [online]. 2016 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.gisat.cz/content/cz/produkty/digitalni-model-terenu/srtm-dem>

GLCF: Global Land Survey (GLS) DEM [online]. 2014 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.glcfc.umd.edu/data/glsdem/description.shtml>

Global 30 Arc-Second Elevation (GTOPO30) The Long Term Archive: GTOPO30 Documentation [online]. 2015 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>

GMTSAR [online]. 2016 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://gmt.soest.hawaii.edu/>

GRANDIN, Raphaël. Interferometric processing of SLC Sentinel-1 TOPS data [online]. , 7 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://www.ipgp.jussieu.fr/~grandin/Raphael_Grandin_personal_web_page/Publications_files/Grandin_Fringe2015.pdf

Ground-based remote sensing with KAPRI – Chair of Earth Observation and Remote Sensing: ETH Zurich [online]. 2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <https://www.ethz.ch/content/specialinterest/baug/institute-ifu/eo/en/forschung/ground-based-radar-investigations-with-kapri.html>

Hitching a ride with Sentinel-1B - News - Sentinel-1: ESA Future Missions - Earth Online - ESA [online]. 2016 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/sentinel-1/news/-/article/hitching-a-ride-with-sentinel-1b>

Chasing ice: Sentinel-1 [online]. 2015 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Chasing_ice

Ice sheet highs, lows and loss: CryoSat Observing the Earth ESA [online]. 2014 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/CryoSat/Ice_sheet_highs_lows_and_loss

Ilulissat Icefjord: UNESCO World Heritage Centre [online]. 2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://whc.unesco.org/en/list/1149>

InSAR principles: guidelines for SAR interferometry processing and interpretation. 1. Noordwijk, the Netherlands: ESA Publications, ESTEC, 2007. ESA TM, 19. ISBN 978-929-0922-339.

Jakobshavn record retreat - Arctic Sea Ice [online]. 2015 [cit. 2016-02-12]. Dostupné z: <http://neven1.typepad.com/blog/2015/08/jakobshavn-record-retreat.html>

Land Monitoring - Sentinel-1 SAR - User Guides - Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/applications/land-monitoring>

MAIRES - Monitoring Arctic Land and Sea Ice from Russian and European Satellites [online]. 2016 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: view-source:<http://dib.joanneum.at/MAIRES/index.php?page=atlas>

Mapy.cz [online]. 2016 [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: <http://mapy.cz/zakladni?x=-43.7229115&y=68.1376617&z=5>

Massive Calving of Jakobshavn Isbræ: The Great White Con [online]. 2015 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://greatwhitecon.info/2015/02/shock-news-massive-calving-of-jakobshavn-isbrae/>

Massive Calving of Jakobshavn Isbræ: The Great White Con [online]. 2015 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://greatwhitecon.info/wp-content/uploads/2015/02/Jakobshavn-calving1851-2014-1024x595.jpg>

Missions - Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions>

Missions - Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions>

Monitorování polárních oblastí díl II: Dálkový průzkum Země a jeho využití v meteorologii a klimatologii [online]. 2016 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.pocasicz.cz/aktuality-o-pocasi/dalkovy-pruzkum-zeme-a-jeho-vyuziti-v-meteorologii-a-klimatologii-2455/monitorovani-polarnich-oblasti-dil-ii-2488>

NASA: ICESat [online]. 2015 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/index.php>

Objectives - Earth Online: ESA [online]. 2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/cryosat/objectives>

Oceans and ice / Sentinel-1 / Copernicus / Observing the Earth / Our Activities / ESA [online]. 2015 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Oceans_and_ice

Oil Slick Detection Service: Kongsberg Gruppen [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://ksat.no/en/services%20ksat/oil%20slick%20detection%20service%20-%20page/>

Overview - Earth Online: ESA [online]. 2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/cryosat/overview>

Overview / Copernicus / Observing the Earth / Our Activities / ESA. ESA, Copernicus observing the Earth [online]. [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview3

Production Scenario: Sentinel-1 - Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/production-scenario>

Radar Basics [online]. 2014 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/07.waves/Waves%20and%20Frequency%20Ranges.en.html>

Radar Ice Motion Interferometry [online]. 2014 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/workshops/ers97/papers/goldstein/>

Radarová interferometrie [online]. 2015 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: http://www.insar.cz/insar_info.pdf

Radar-ppt [online]. 2011 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/MSinggihPulukadang/radarppt>

Remote Sensing | Free Full-Text | Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with Selected Topics [online]. 2013 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2072-4292/5/2/716/htm>

Satellite constellation / Sentinel-1 / Copernicus / Observing the Earth / Our Activities / ESA [online]. http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Satellite_constellation, 2015 [cit. 2016-02-06]

Satellites catch Austfonna shedding ice [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <http://phys.org/news/2015-01-satellites-austfonna-ice.html>

Scientific Data Hub [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://scihub.esa.int>

Scientific Data Hub [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

Scientific Data Hub [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <https://scihub.copernicus.eu/news/News00032>

Scientific Data Hub [online]. 2015 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <https://scihub.esa.int/>

Scientific Data Hub [online]. 2016 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <https://scihub.copernicus.eu/twiki/do/view/SciHubNews/WebHome?start=0;limit=10>

Sentinel -1 User Handbook [online]. 2013 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1_User_Handbook, str. 43

Sentinel -1 User Handbook [online]. 2013 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1_User_Handbook, str. 44

Sentinel-1 - Data Distribution Schedule: Missions - Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/data-distribution-schedule>

Sentinel-1 - Data Products: Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/data-products>

Sentinel-1 - Instrument Payload: Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/instrument-payload>

Sentinel-1 User Handbook [online]. 2013, s. 80 [cit. 2016-02-08]. Dostupné z: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1_User_Handbook, str. 13

Sentinel-1 User Handbook [online]. 2013, s. 80 [cit. 2016-02-08]. Dostupné z: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1_User_Handbook, str. 42

Sentinel-1A TOPS processing in GMTSAR - GMT5SAR: GMT — The Generic Mapping Tools [online]. 2016 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://gmt.soest.hawaii.edu/news/23>

Sentinel-2 - ESA Operational EO Missions: Earth Online - ESA [online]. 2016 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/sentinel-2>

Sentinel-2 - Overview: Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/overview>

Sentinel-3 - ESA EO Missions: Earth Online - ESA [online]. 2016 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-future-missions/sentinel-3>

Sentinel-3 Copernicus Observing the Earth Our Activities ESA: Our Activities ESA [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-3

Sentinel-3 Copernicus Observing the Earth Our Activities ESA: Our Activities ESA [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-3

Sentinel-4 - Missions: Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-4>

Sentinel-5 - EUMETSAT [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/FutureSatellites/CopernicusSatellites/Sentinel5/index.html>

Sentinel-5 - Missions: Sentinel Online [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5>

Sentinel-5P - Earth Online - ESA [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-future-missions/sentinel-5P>

Sentinel-6 - EUMETSAT [online]. 2015 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/FutureSatellites/CopernicusSatellites/Sentinel6/index.html>

Sentinel-6 Copernicus Observing the Earth: Our Activities ESA [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-6

Sentinels -4/-5 and -5P Copernicus Observing the Earth: Our Activities ESA [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinels_-4_-5_and_-5P

SHAROV, Aleksey I. a Alexandra Yu. TYUKAVINA. Mapping and interpreting glacier changes in Severnaya Zemlya with the aid of differential interferometry and altimetry. 2009, ,FRINGE'09 Workshop Proc., Frascati, ESA SP-677

SOLBERG, Rune, Mari Anne KILLIE, Liss Marie ANDREASSEN a Max KÖNIG. CRYOCLIM: A NEW OPERATIONAL SYSTEM AND SERVICE FOR CLIMATE MONITORING OF THE CRYOSPHERE. 2008, , 7.

Space in Images - 2014 - 04 - Namibia from Sentinel-1A [online]. 2014 [cit. 2016-02-06].
Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/04/Namibia_from_Sentinel-1A

Space in Images - 2014 - 07 - Towing the Costa Concordia [online]. 2014 [cit. 2016-02-06].
Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/07/Towing_the_Costa_Concordia

Space in Images - 2014 - 09: Napa Valley quake [online]. 2015 [cit. 2015-11-13].
Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/09/Napa_Valley_quake

Space in Images - 2014 - 09: Napa Valley quake [online]. 2015 [cit. 2015-11-13].
Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/09/Napa_Valley_quake

Space in Images - 2015 - 03 - Sentinel-1A interferogram, San Joaquin Valley. ESA [online]. 2015 [cit. 2016-02-06].
Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2015/03/Sentinel-1A_interferogram_San_Joaquin_Valley

Space in Images - 2015 - 06 - Danube Delta interferogram [online]. 2015 [cit. 2016-02-11].
Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2015/06/Danube_Delta_interferogram

Space in Images - 2015 - 11: Greenland coverage from Sentinel-1A [online]. 2015 [cit. 2016-04-25].
Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2015/11/Greenland_coverage_from_Sentinel-1A

Space in Images - 2015 - 11: Ice sheet in motion [online]. 2015 [cit. 2016-04-25].
Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2015/11/Ice_sheet_in_motion

SUGIMOTO, Mitsunobu, Kazuo OUCHI a Yasuhiro NAKAMURA. Remote sensing letters: On the similarity between dual- and quad-eigenvalue analysis in SAR polarimetry. 1. Taylor & Francis, 2013. ISBN 10.1080/2150704X.2013.820002, str. 958.

Téledétection Radar - Chapitre 1 : Généralités. E-ENSG [online]. 2013 [cit. 2016-04-11].
Dostupné z: <http://stream.ensg.eu:8800/teledetection/portail/3/1/res/schema11.png>

Téledétection RADAR: Chapitre 1 - Généralités [online]. In: . [cit. 2016-04-24].
Dostupné z: http://stream.ensg.eu:8800/teledetection/portail/3/1/co/3sequence1.html#segment_M6dQk4Jro8cmiVNr60hjj1

The role of Sentinel-1 in oil spill surveillance. Interspill [online]. 2015 [cit. 2016-02-06].
Dostupné z: <http://interspill.org/previous-events/2015/WhitePapers/Interspill2015ConferenceProceedings/25%20MARCH%202015/Sensing%20&%20Surveillance%20-%20Part%201/The-Role-of-Sentinel-1-in-Oil-Spill%20Surveillance.pdf>

Tutorials - Sentinel-1 Toolbox: TOPS Interferometry Tutorial [online]. 2015 [cit. 2016-04-15].
Dostupné z: <http://sentinel1.s3.amazonaws.com/docs/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial.pdf>

User Guides - Sentinel-1 SAR: Level-1 - Sentinel Online [online]. 2016 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/product-types-processing-levels/level-1>

User Guides - Sentinel-1 SAR: SAFE Specification - Sentinel Online [online]. 2016 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/data-formats/safe-specification>

User Guides - Sentinel-1 SAR: SAR Formats - Sentinel Online [online]. 2016 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/data-formats/sar-formats>

User Guides - Sentinel-1 SAR: SAR Formats - Sentinel Online [online]. 2016 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/data-formats/sar-formats>

VAN GORP, Sébastien. Identification et Utilisation des Réflecteurs: Permanents en Interférométrie RADAR [online]. In: . s. 26 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://www.ipgp.fr/~vangorp/rapport_DEA_2003.pdf.

VECI, Luis. Tutorials - Sentinel-1 Toolbox: Sentinel Online [online]. In: . s. 21 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://sentinel1.s3.amazonaws.com/docs/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial.pdf>

What's New in ENVI SARscape 5.2: SaRScape [online]. 2015 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://main.inforest.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=196&Itemid=1

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

Vázané přílohy:

Příloha č. 1: Seznam použitých snímků

Příloha č. 2: Přehled hlavních institutů spolupracujících s WGMS

Příloha č. 3: Mapa pobřežní oblast

Příloha č. 4: Mapa ledovec Jakobshavn

Volné přílohy:

Příloha č. 5: DVD

Příloha č. 6: Poster

Příloha č. 1: Seznam použitých snímků

Pobřežní oblast

Rok 2015

S1A_IW_SLC__1SSH_20150103T204733_20150103T204802_004012_004D51_6672

- **Mise:** SENTINEL-1A
- **Typ:** SLC
- **Datum a čas pořízení snímku:** 3. leden 2015 20:4:33.824454
- **Směr dráhy:** ASCENDING
- **Dráha:** 90
- **Orbita:** 4012

• **S1A_IW_SLC__1SSH_20150115T204733_20150115T204801_004187_00514D_151F**

- **Mise:** SENTINEL-1A
- **Typ:** SLC
- **Datum a čas pořízení snímku:** 15. leden 2015 20:47:33.180598
- **Směr dráhy:** ASCENDING
- **Dráha:** 90
- **Orbita:** 4187

• **S1A_IW_SLC__1SSH_20150304T204732_20150304T204800_004887_006173_4ED7**

- **Mise:** SENTINEL-1A
- **Typ:** SLC
- **Datum a čas pořízení snímku:** 4. březen 2015 20:47:32.610953
- **Směr dráhy:** ASCENDING
- **Dráha:** 90
- **Orbita:** 4887

• **S1A_IW_SLC__1SSH_20150316T204733_20150316T204801_005062_0065B4_B133**

- **Mise:** SENTINEL-1A
- **Typ:** SLC
- **Datum a čas pořízení snímku:** 16. březen 2015 20:47:33.048991
- **Směr dráhy:** ASCENDING
- **Dráha:** 90
- **Orbita:** 5062

• **S1A_IW_SLC__1SSH_20150328T204733_20150328T204801_005237_0069CF_BF4F**

- **Mise:** SENTINEL-1A
- **Typ:** SLC
- **Datum a čas pořízení snímku:** 28. březen 2015 20:47:33.383863
- **Směr dráhy:** ASCENDING
- **Dráha:** 90
- **Orbita:** 5237

• **S1A_IW_SLC__1SSH_20150409T204733_20150409T204801_005412_006E25_3E77**

- **Mise:** SENTINEL-1A
- **Typ:** SLC
- **Datum a čas pořízení snímku:** 9. duben 2015 20:47:33.422280
- **Směr dráhy:** ASCENDING
- **Dráha:** 90
- **Orbita:** 5412

- **S1A_IW_SLC__1SSH_20150421T204734_20150421T204801_005587_00725F_9A55**
 - **Mise:** SENTINEL-1A
 - **Typ:** SLC
 - **Datum a čas pořízení snímku:** 21. duben 2015 20:47:34.011159
 - **Směr dráhy:** ASCENDING
 - **Dráha:** 90
 - **Orbita:** 5587

Rok 2016

- **S1A_IW_SLC__1SSH_20160110T204752_20160110T204819_009437_00DAD1_6F8E**
 - **Mise:** SENTINEL-1A
 - **Typ:** SLC
 - **Datum a čas pořízení snímku:** 10. leden 2016 20:47:52.584961
 - **Směr dráhy:** ASCENDING
 - **Dráha:** 90
 - **Orbita:** 9437
- **S1A_IW_SLC__1SSH_20160215T204751_20160215T204818_009962_00EA20_E409**
 - **Mise:** SENTINEL-1A
 - **Typ:** SLC
 - **Datum a čas pořízení snímku:** 15. února 2016 20:47:51.844862
 - **Směr dráhy:** ASCENDING
 - **Dráha:** 90
 - **Orbita:** 9962

Ledovec Jakoshavn

Rok 2015

- **S1A_IW_SLC__1SSH_20150115T204640_20150115T204710_004187_00514D_BC71**
 - **Mise:** SENTINEL-1A
 - **Typ:** SLC
 - **Datum a čas pořízení snímku:** 15. leden 2015 40:46:40.770079
 - **Směr dráhy:** ASCENDING
 - **Dráha:** 90
 - **Orbita:** 4187
- **S1A_IW_SLC__1SSH_20150304T204640_20150304T204710_004887_006173_C630**
 - **Mise:** SENTINEL-1A
 - **Typ:** SLC
 - **Datum a čas pořízení snímku:** 4. březen 2015 20:46:40.204546
 - **Směr dráhy:** ASCENDING
 - **Dráha:** 90
 - **Orbita:** 4887
- **S1A_IW_SLC__1SSH_20150316T204640_20150316T204710_005062_0065B4_OCB4**
 - **Mise:** SENTINEL-1A
 - **Typ:** SLC
 - **Datum a čas pořízení snímku:** 16. březen 2015 20:46:40.646696
 - **Směr dráhy:** ASCENDING
 - **Dráha:** 90
 - **Orbita:** 5062

2016

- **S1A_IW_SLC_1SSH_20160110T204702_20160110T204729_009437_00DAD1_54D2**
 - **Mise:** SENTINEL-1A
 - **Typ:** SLC
 - **Datum a čas pořízení snímku:** 10. leden 2016 20:47:02.941221
 - **Směr dráhy:** ASCENDING
 - **Dráha:** 90
 - **Orbita:** 9437
- **S1A_IW_SLC_1SSH_20160122T204702_20160122T204729_009612_00DFF2_A283**
 - **Mise:** SENTINEL-1A
 - **Typ:** SLC
 - **Datum a čas pořízení snímku:** 22. leden 2016 20:47:02.609249
 - **Směr dráhy:** ASCENDING
 - **Dráha:** 90
 - **Orbita:** 9612
- **S1A_IW_SLC_1SSH_20160203T204702_20160203T204729_009787_00E501_758B**
 - **Mise:** SENTINEL-1A
 - **Typ:** SLC
 - **Datum a čas pořízení snímku:** 3. únor 2016 20:47:02.426882
 - **Směr dráhy:** ASCENDING
 - **Dráha:** 90
 - **Orbita:** 9787
- **S1A_IW_SLC_1SSH_20160215T204702_20160215T204729_009962_00EA20_666F**
 - **Mise:** SENTINEL-1A
 - **Typ:** SLC
 - **Datum a čas pořízení snímku:** 15. únor 2016 20:47:02.192900
 - **Směr dráhy:** ASCENDING
 - **Dráha:** 90
 - **Orbita:** 9962

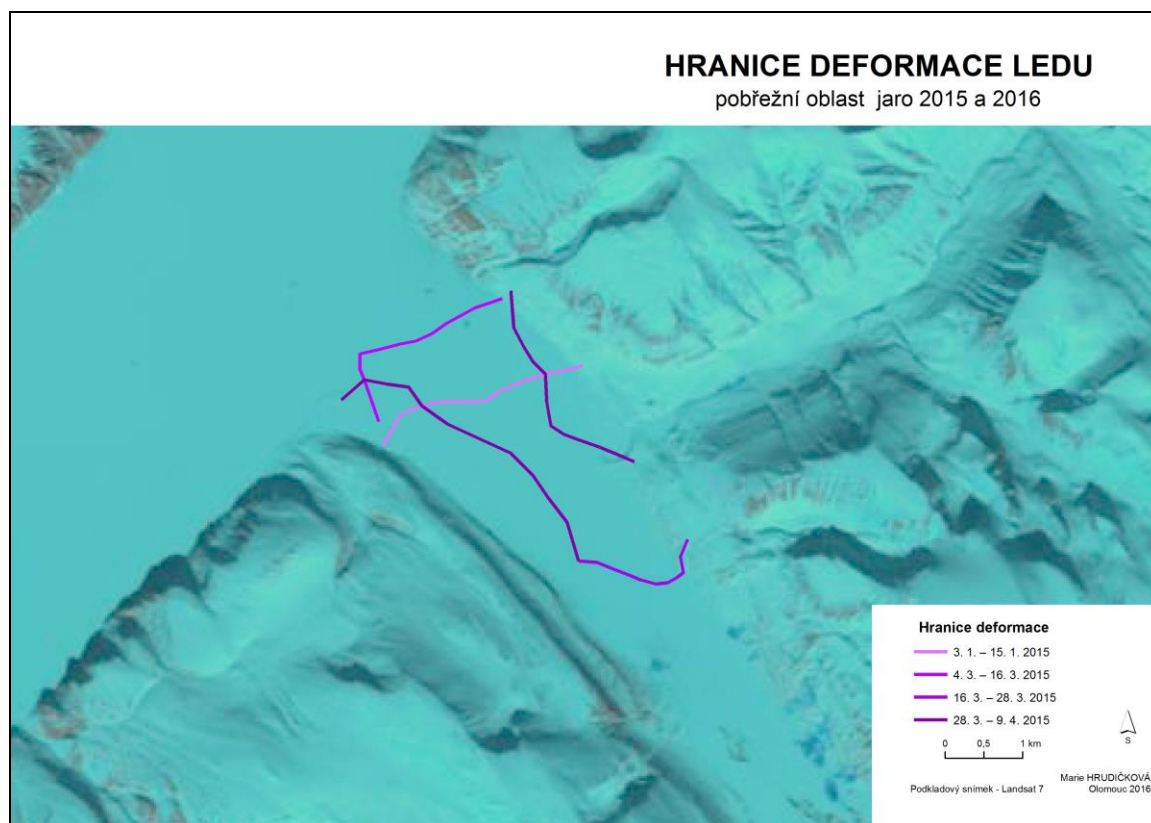
Příloha č. 2: Přehled hlavních institutů spolupracujících s WGMS¹⁵⁰

ZEMĚ	INSTITUTE
Argentina/Antarktida	IANIGLA – Instituto Argentino de Nivología y Glaciología
Austrálie/Antarktida	North Adelaide
Bolívie	IHN – Instituto de Hidráulica e Hidrología SENAMI – Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
Čína	Tianshan Glaciological Station CAREERI – Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute CAS – Chinese Academy of Sciences
Ekvádor	INAHMI – Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología IRD – Institut de echerche pour le développement
Francie	CNRS – Centre national de la recherche scientifique
Grónsko	GEUS – The Geological Survey of Denmark and Greenland (Department of Quaternary Geology)
Chile	Centro de Estudios Científicos
Indie	Geological Survey of India (Glaciology Division)
Island	Natioanl Energy Authority (Hydrological Service)
Itálie	Universita di Padua (Dipartimento di Geografia)
Japonsko/Nepál	DHAS – Department of Hydrospheric-Atmospheric Sciences Nagoya University (Hydrospheric Atmospheric Research Center)
Kanada	Natural Resources Canada, Geological Survey of Canada
Kolumbie	INGEOMINAS
Kazachstán	Institute of Geography of the Ministry-Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan
Mexiko	Universidad Nacional Autónoma de México (Instituto de Geofísica)
Německo	Bvarian Academy of Sciences (Commision for Glaciology)
Norsko	Section of Physical Geography University of Oslo (Departement of Geosciences)
Nový Zéland	Alpine and Polar Processes Consultancy
Pákistán	Head Water Resources Section GCISC – Global Change Impact Studies Centre
Peru	Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos INRENA – Instituto Nacional de Recursos Naturales
Polsko	University of Silesia (Departement of Geomorfology)
Rakousko	Iniversity of Innsbruck (Institute of meteorology and

¹⁵⁰ ZEMP, Michael. *Global glacier changes: facts and figures* [online]. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme, 2008 [cit. 2016-04-25]. ISBN 978-928-0728-989. Dostupné z: <http://www.grid.unep.ch/glaciers/pdfs/glaciers.pdf>, str. 64-65

	Geophysics)
Rusko	Moscow State university (Geographical Faculty)
Španělsko	Ingenieria 75, S.A.
Švédsko	Univrsty of Stockholm (Department of Physical Geography and Quaternary Geology)
Švýcarsko	University od Fribourg (Department od Geosciences)
USA	US Geological Survey
Uzbekistán	UzHydromet – The Center of Hydrometeorological Service

Příloha č. 3: Mapa Pobřežní oblast



Příloha č. 4: Mapa Ledovec Jakobshavn

