

Meteorologické družice:

Základy družicové (pasivní) hyperspektrální sondáže atmosféry,
přístroje aktivní sondáže (radary, lidary) z oběžné dráhy

RNDr. Martin Setvák, CSc.

družicové oddělení ČHMÚ

E-mail: martin.setvak@chmi.cz

osobní stránky: www.setvak.cz

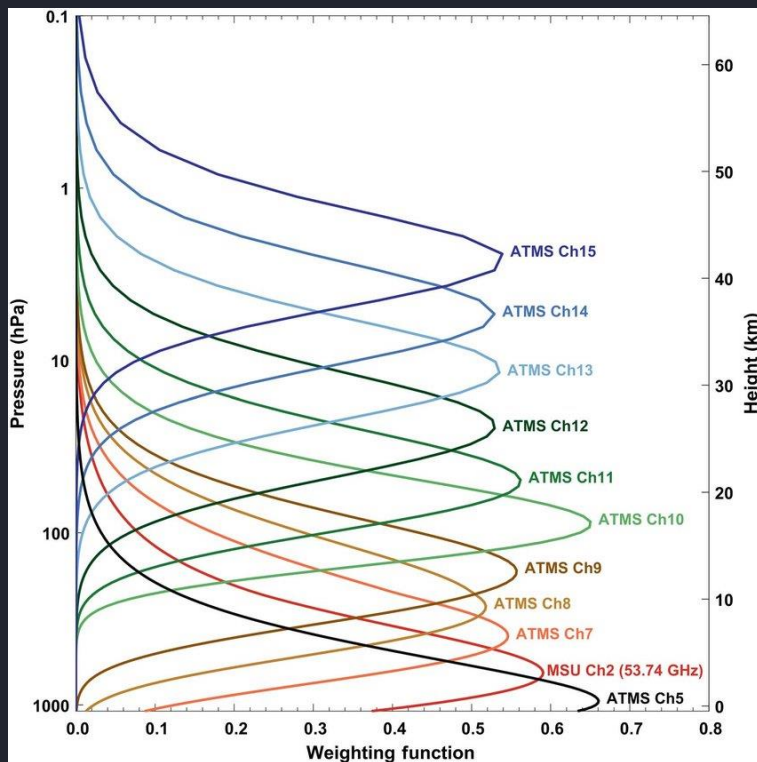
Družicová sondáž atmosféry

- přehled metod družicové sondáže atmosféry
- podstata metod pasivní vertikální IR hyperspektrální a mikrovlnné sondáže atmosféry
- družice a jejich přístroje pro pasivní IR hyperspektrální a MW sondáž atmosféry (Aqua/AIRS, Metop/IASI, JPSS/CrIS, FY-4/GIIRS, MTG-S/IRS, AWS/MWR a EPS-Sterna/MWS)
- družice a jejich přístroje pro aktivní sondáž oblačnosti, aerosolů a proudění (CloudSat, CALIPSO, EarthCARE, Aeolus a EPS-Aeolus)

Družicová sondáž atmosféry

- pasivní vertikální sondáž atmosféry
 - mikrovlnná (MW)
 - infračervená (IR)
- limbová (tečná) sondáž atmosféry
 - infračervená (IR) a mikrovlnná (MW) pasivní sondáž
 - radio-okultační metody (ROM) – zákryty signálu z GNSS (Global Navigation Satellite Systems) družic (GPS, GLOSNASS, Galileo, ...)
- aktivní vertikální sondáž atmosféry (oblačnost, aerosoly, proudění)
 - radarová
 - lidarová

Podstata pasivní vertikální MW a IR hyperspektrální sondáže atmosféry



Příklad váhových funkcí přístroje **ATMS** (Advanced Technology Microwave Sounder, SNPP, NOAA-20 a NOAA-21), resp. jeho předchůdce **AMSU-A** (Advanced Microwave Sounding Unit-A, Aqua, NOAA-15 až NOAA-19, Metop-A, B, C)

zdroj: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aau0049>

Různé spektrální kanály mají maximum příspěvku naměřené intenzity záření v různých hladinách nad zemským povrchem, což je vyjádřeno pomocí tzv. váhových funkcí.

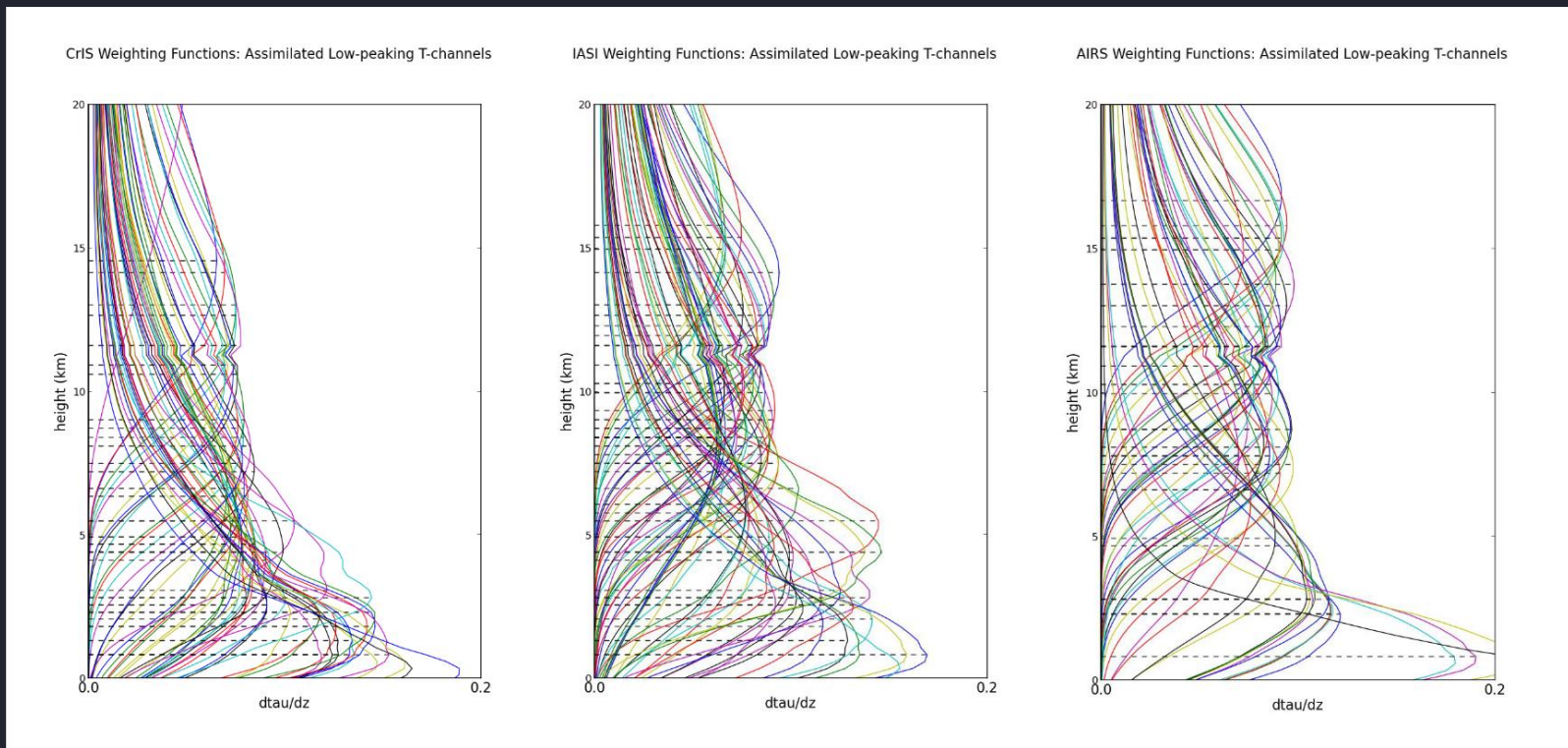
Pro družicovou sondáž se používají přístroje pracující buď v IR nebo MW oblasti elmg. záření.

Konkrétní hladina maxima váhových funkcí jednotlivých kanálů ale závisí na reálném stavu atmosféry (tj. profilu teploty a množství absorbujících plynů – H₂O, CO₂, CO, O₃, CH₄, N₂O, SO₂ aj.). Zpracování naměřených hodnot IR a MW radiancí (intenzit záření) tedy není elementární záležitostí – zpracování dat ze sondážních přístrojů vyžaduje využití RTM (Radiative Transfer Model) a výstupů z NWP.

Hlavní využití dat z MW a IR hyperspektrální sondáže atmosféry – asimilace dat do modelů NWP, doplnění klasických aerologických sondáží v oblastech, kde tyto chybí, nowcasting, globální monitorování atmosféry, klimatologie.

Hlavní rozdíl mezi MW a IR přístroji – pro IR záření je oblačnost překážkou a IR sondážní přístroje skrz ni nemohou měřit, zatímco MW záření oblačností proniká a tedy MW sondážní přístroje jsou použitelné i v oblastech pokrytých oblačností. Hyperspektrální IR sondáže – lepší horizontální i vertikální rozlišení než MW sondáže.

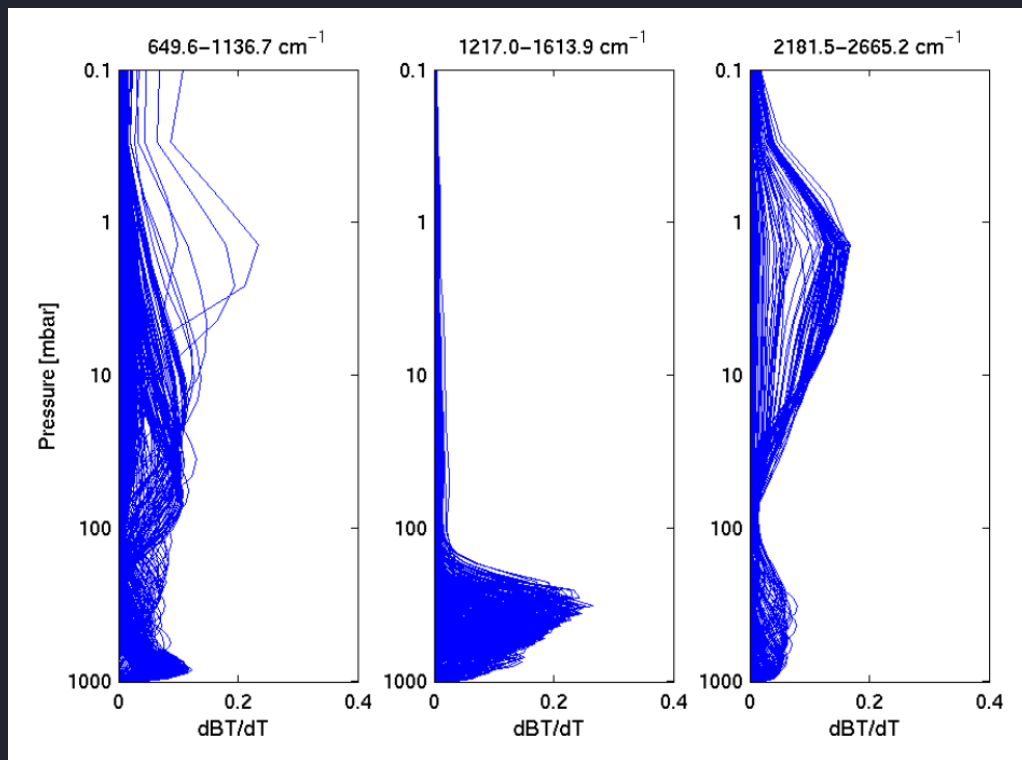
Podstata vertikální IR hyperspektrální sondáže atmosféry – CrIS, IASI a AIRS



Zatímco u MW přístrojů se počty spektrálních kanálů pohybují řádově v jednotkách až desítkách, moderní IR sondážní přístroje pracují s počty kanálů ve stovkách až několika tisících – proto termín hyperspektrální sondáž atmosféry. Zde příklady váhových funkcí CrIS, IASI a AIRS pro kanály mající maximum své váhové funkce do hladiny 20 km.

zdroj: [https://www.star.nesdis.noaa.gov/jps/documents/AMM_All/CrIS_SDR/Validated/Bell_Met\[1\].pdf](https://www.star.nesdis.noaa.gov/jps/documents/AMM_All/CrIS_SDR/Validated/Bell_Met[1].pdf)

Podstata vertikální IR hyperspektrální sondáže atmosféry – AIRS



zdroj: <https://cimss.ssec.wisc.edu/dbs/China2011/Day4/Lectures/AIRS/AIRS-Instrument.pdf>

Ukázka váhových funkcí přístroje AIRS (Aqua) až do hladiny 0.1 hPa.

AIRS – tři skupiny spektrálních kanálů, pracujících v různém rozsahu vlnových délek.

U přístrojů sondáže atmosféry je častější označení jednotlivých kanálů jejich středním vlnovým číslem (wavenumber) nebo frekvencí kanálu, nikoliv vlnovou délkou. Totéž pro rozsahy jednotlivých spektrálních pásem.

vlnové číslo = $1 / \text{vlnová délka}$, nejčastěji [cm⁻¹]

převodník jednotek záření např. zde: [Energy Unit Conversions](#)

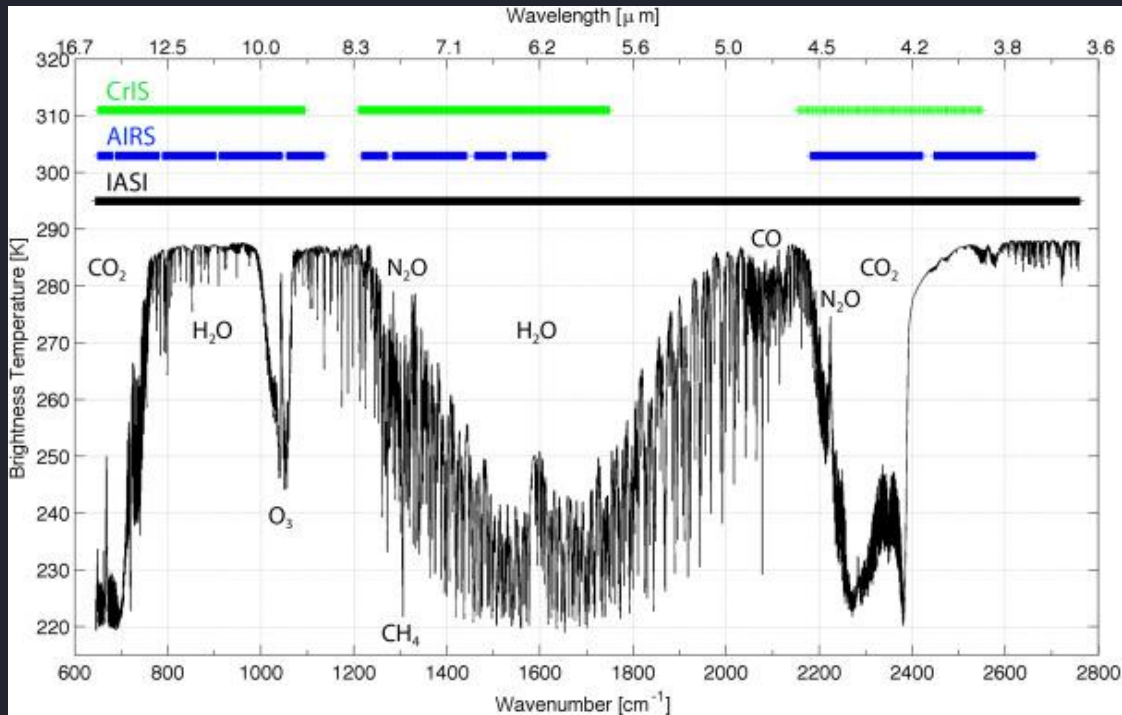
Historie, současnost a budoucnost pasivní vertikální sondáže atmosféry

- první teoretická práce, která položila základy pro budoucí vertikální družicovou sondáž atmosféry: Lewis Kaplan, 1959 – [Inference of Atmospheric Structure from Remote Radiation Measurements](#)
- první pokusy o sondáž z družic: [NIMBUS-3](#) (start 1969) přístroje Satellite Infrared Spectrometer (SIRS) a Infrared Interferometer spectrometer (IRIS)
- další obdobné přístroje na družicích NIMBUS-4 až 7 (do r. 1994)
- výrazné zdokonalení a určitá standardizace sondážních přístrojů počínaje družicí TIROS-N (1978), na následných družicích NOAA-6 až NOAA-19, družicí Aqua (2002, NASA) a evropských družicích METOP-1 až 3 (od r. 2006 do současnosti)

Historie, současnost a budoucnost pasivní vertikální sondáže atmosféry

- první teoretická práce, která položila základy pro budoucí vertikální družicovou sondáž atmosféry: Lewis Kaplan, 1959 – Inference of Atmospheric Structure from Remote Radiation Measurements
- první pokusy o sondáž z družic: NIMBUS-3 (start 1969) přístroje Satellite Infrared Spectrometer (SIRS) a Infrared Interferometer spectrometer (IRIS)
- další obdobné přístroje na družicích NIMBUS-4 až 7 (do r. 1994)
- výrazné zdokonalení a určitá standardizace sondážních přístrojů počínaje družicí TIROS-N (1978), na následných družicích NOAA-6 až NOAA-19, družicí Aqua (2002, NASA) a evropských družicích METOP-1 až 3 (od r. 2006 do současnosti)
- v současnosti tři nejvýznamnější IR hyperspektrální sondážní přístroje:
AIRS, [Atmospheric Infra-Red Sounder](#) – družice Aqua (2002)
IASI, [Infrared Atmospheric Sounding Interferometer](#) – družice Metop-1 až 3 (od 2006)
CrIS, [Cross-track Infrared Sounder](#) – družice SNPP (2011), NOAA-20 (2017), NOAA-21 (2022) a budoucích NOAA-22 (JPSS-3) a NOAA-23 (JPSS-4)
- nejbližší budoucnost: IRS, [InfraRed Sounder](#) – družice MTG-S1 (2025/07) a MTG-S2 (~ 2035)

Porovnání spektrálních rozsahů a využívaných pásem přístroji CrIS, AIRS a IASI



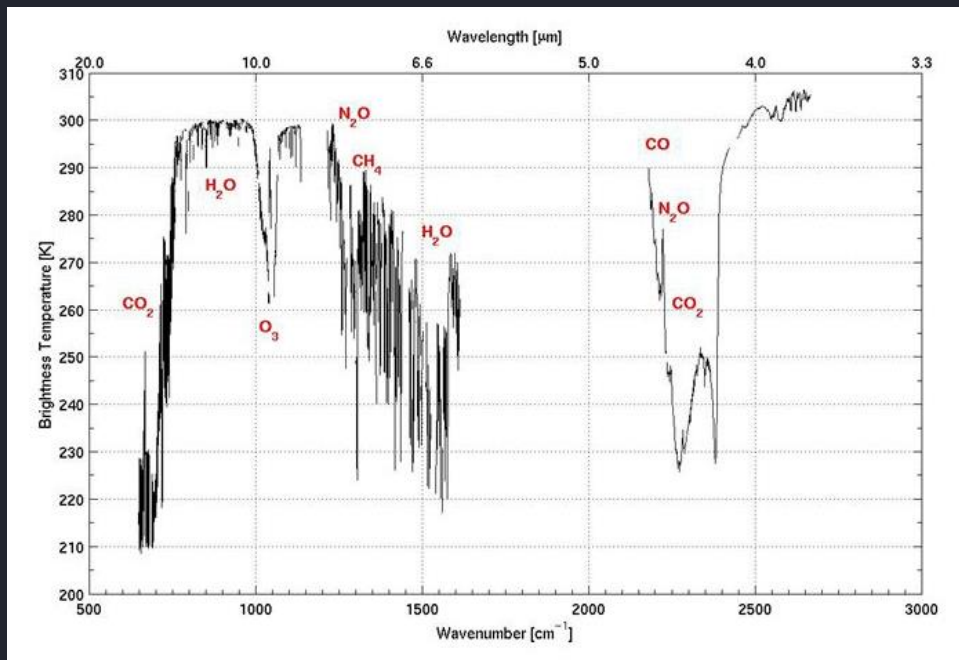
zdroj: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/aqua-satellite>

Pouze IASI kontinuální pokrytí celého pásma od $\sim 3.6 \mu\text{m}$ do $15.5 \mu\text{m}$ (600 až 2800 cm^{-1}). Přístroje AIRS a CrIS tři oddělená pásma.

Podrobnosti k jednotlivým přístrojům dále.

AIRS – Atmospheric Infrared Sounder
družice Aqua (od 2002, doposud aktivní)

AIRS – Atmospheric Infrared Sounder, Aqua



Spektrální rozsah kanálů AIRS, zdroj: [AIRS Instrument Characteristics](#) (PDF)

Další podrobnější informace k přístroji AIRS: [AIRS Project Instrument Suite](#).

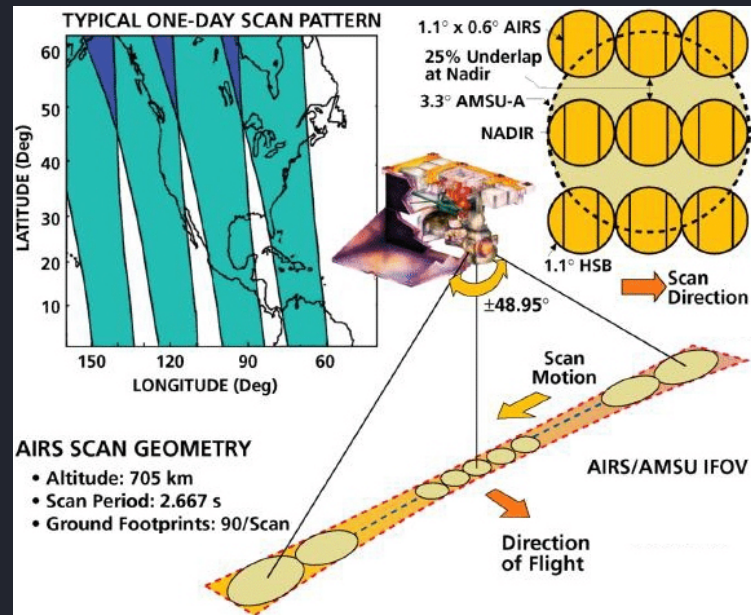
schéma skenování přístrojem AIRS >>>

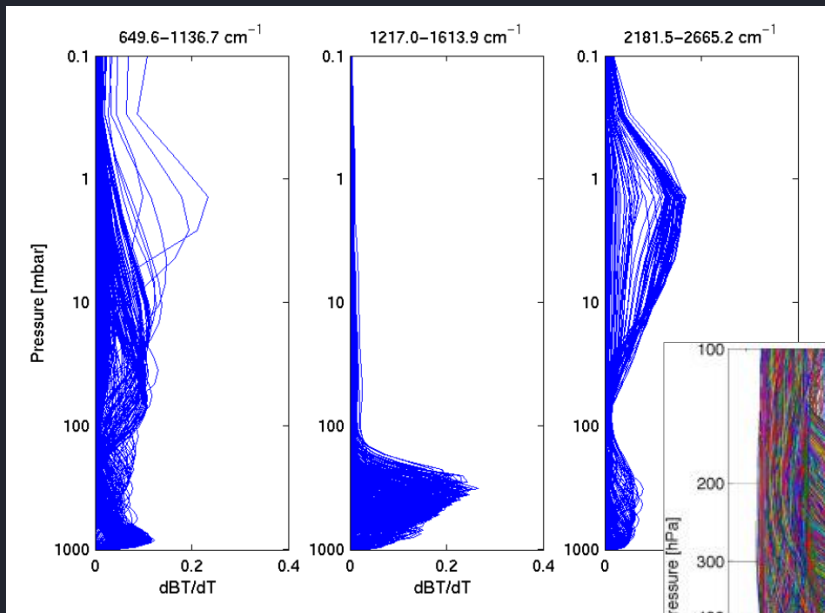
Mřížkový spektrometr (na rozdíl od všech následujících přístrojů, využívajících Michelsonův interferometr), detaily konstrukce a principu přístroje AIRS [zde](#)

celkem 2378 individuálních kanálů
(3.74 – 4.61 μm, 6.20 – 8.22 μm, 8.80 – 15.4 μm)

šířka snímaného pásu území přístrojem AIRS: 1650 km

konstantní velikost snímacího úhlu přístroje 1.1°, což odpovídá rozlišení 13.5 km v nadiru (nejlepší rozlišení)

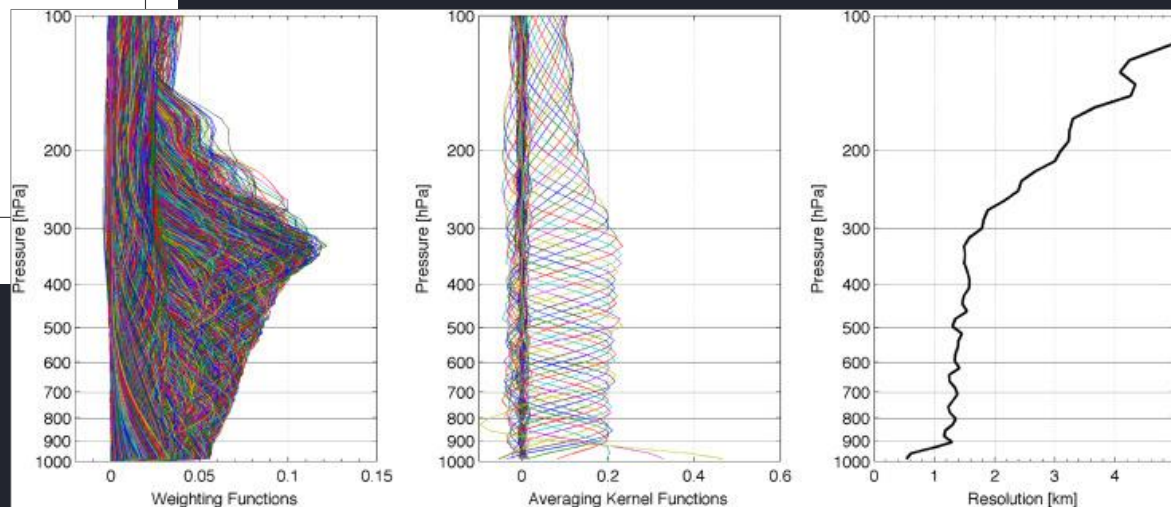




Váhové funkce přístroje AIRS do hladiny 0.1 hPa. Tři skupiny spektrálních kanálů, pracujících v různém rozsahu vlnových délek.

zdroj: <https://cimss.ssec.wisc.edu/dbs/China2011/Day4/Lectures/AIRS/AIRS-Instrument.pdf>

Váhové funkce přístroje AIRS do hladiny 100 hPa, zpracované „Kernel Functions“, a vertikální rozlišení v různých hladinách.

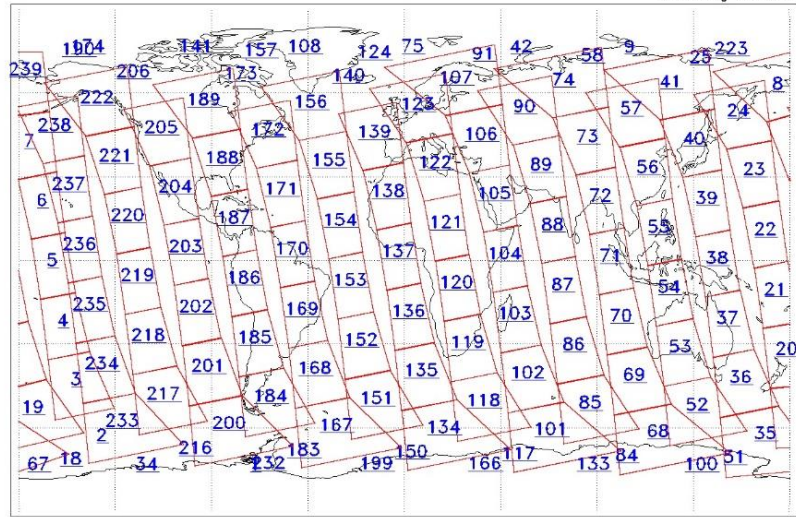


zdroj: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/aqua-satellite>

AIRS – formáty a dostupnost dat

L1B Availability
AMSU Granules: 240
HSB Granules: 0
AIRS Granules: 240

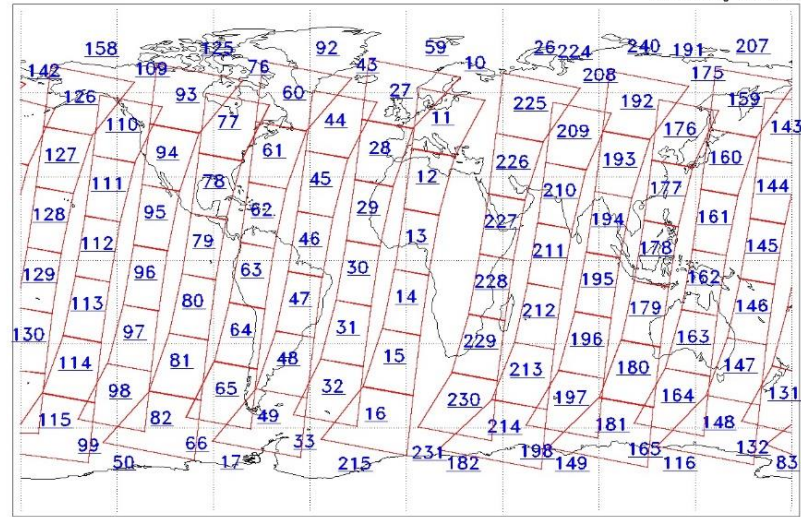
11 Jun 2018
DoY 162
Aqua Day 5882
Ascending Granules



Legend: AMSU Available, HSB Available, AIRS Available

L1B Availability
AMSU Granules: 240
HSB Granules: 0
AIRS Granules: 240

11 Jun 2018
DoY 162
Aqua Day 5882
Descending Granules



Legend: AMSU Available, HSB Available, AIRS Available

Data a produkty dostupné uživatelům:

- Level 1B (L1B) – naměřené kalibrované a geolokované radiance
- Level 1C (L1C) – L1B zhlazené a opravené o různé chyby měření, plus syntetické kanály (doplnění chybějících dat z jiných přístrojů)
- Level 2 a 3 (L2, L3) – různé odvozené produkty

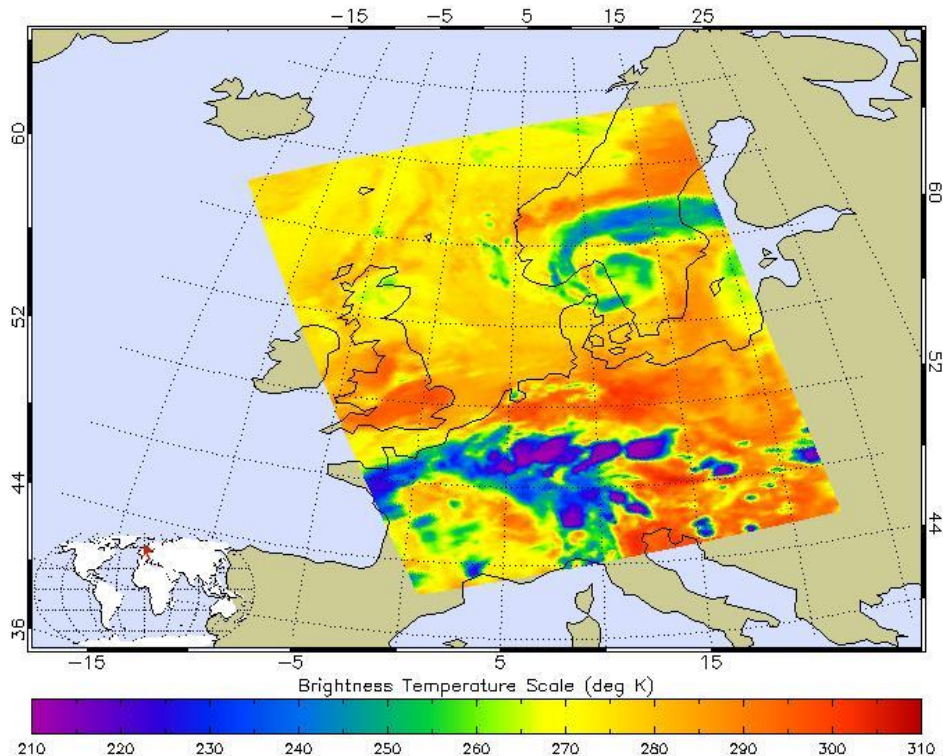
Data (L1B, L1C a L2) organizována do 6-minutových „granulí“, výběr požadovaných granulí zde:

https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/AIRXAMAP_005/summary

AIRS – formáty a dostupnost dat – granule

AIRS Level-1B Quick Browse Image

11.08 μm Brightness Temperature Jun 11, 2018 12:17:21 UTC Granule 123



Granule Id = AIRS.2018.06.11.123.L1B.AIRS_Rad.v5.0.23.0.G18163110422.hdf

Data L1B a L1C (kalibrované a geolokované radiance, $\text{mW}/\text{m}^2/\text{cm}^{-1}/\text{sr}$)

Každá obrazová granule sestává z celkem 135 nasnímaných řádků dat (*lines*), každý nasnímaný řádek sestává z 90 pixelů (*footprints*).

Typická velikost granule: ~ 125 MB

Každých 24 hodin je standardně nasnímáno celkem 240 granulí, z čehož je 120 ve vzestupné (denní) a 120 v sestupné (noční) části dráhy družice.

Objednání dat – archiv, nutná bezplatná registrace:

L1B (AIRIBRAD)

https://airs1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/Aqua_AIRS_Level1/AIRIBRAD.005/

L1C (AIRICRAD)

https://airs1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/Aqua_AIRS_Level1/AIRICRAD.6.7/

Poznámka: L1C stejný formát jako L1B, ale navíc různé „syntetické“ kanály > číslování L1C kanálů neodpovídá číslování L1B kanálů

Ukázka využití AIRS L1B dat pro detekci gravitačních vln v horní stratosféře (variací teploty)



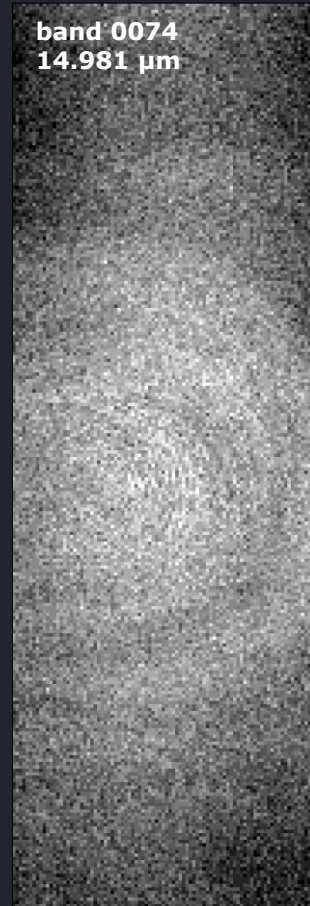
Koncentrické gravitační vlny (CGW) vygenerované silnými konvektivními bouřkami nad Bangladéšem, zviditelněné díky airglow v hladinách 85–100 km.

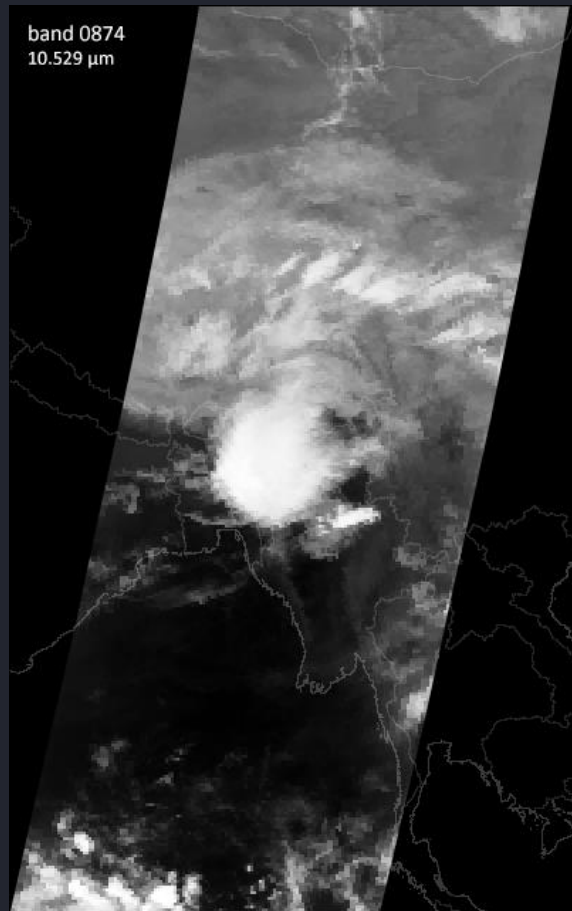
Foto: Jeff Dai, 2014-04-27 15:57 UTC, Tibetská náhorní plošina, Čína

zdroj: <https://www.flickr.com/photos/jeffdai/14845763849/>

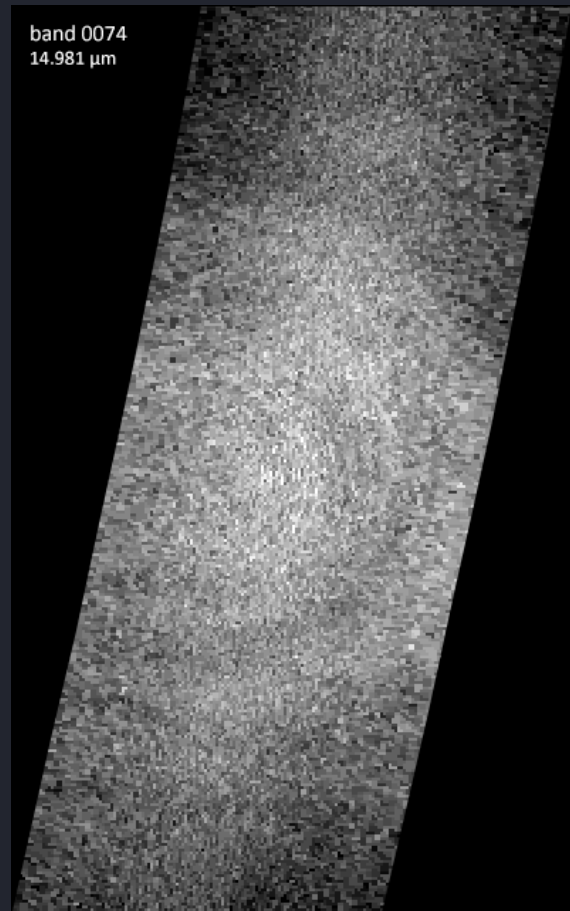
nebo: <https://apod.nasa.gov/apod/ap221120.html>

Tytéž gravitační vlny, zaznamenané v absorpčních kanálech CO₂ přístroje AIRS družice Aqua, 19:29 – 19:41 UTC, v horní stratosféře (cca 40 – 45 km). Vlevo pro porovnání snímek v atmosférickém okně.

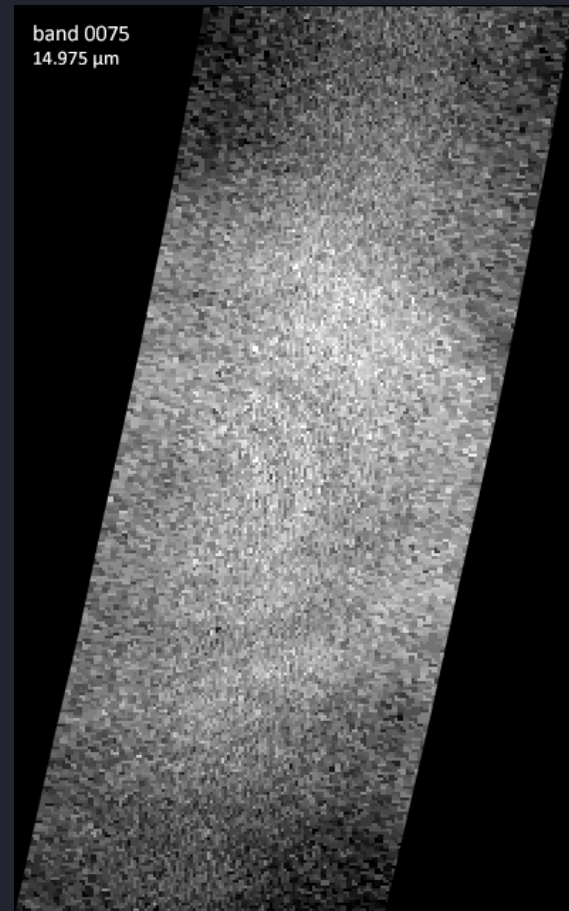


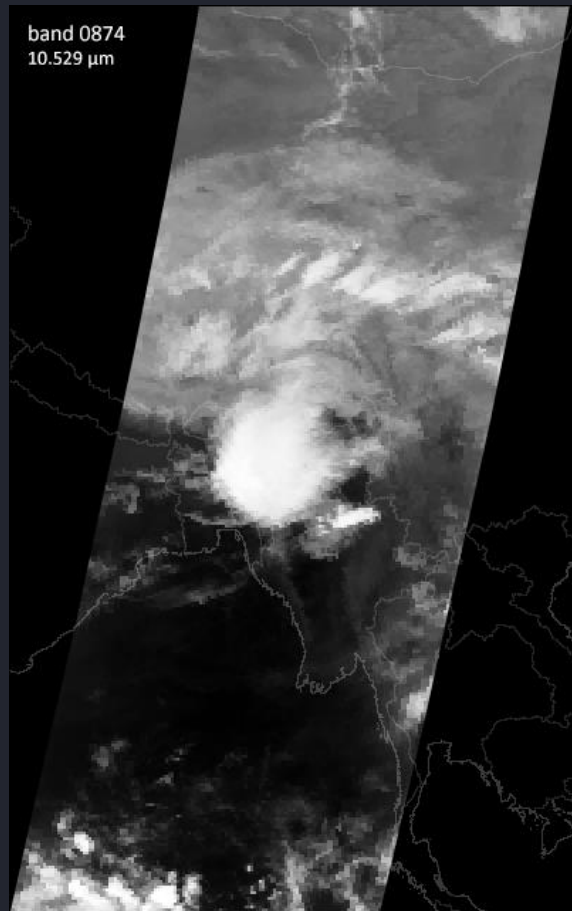


Atmosférické okno 10.5 μm

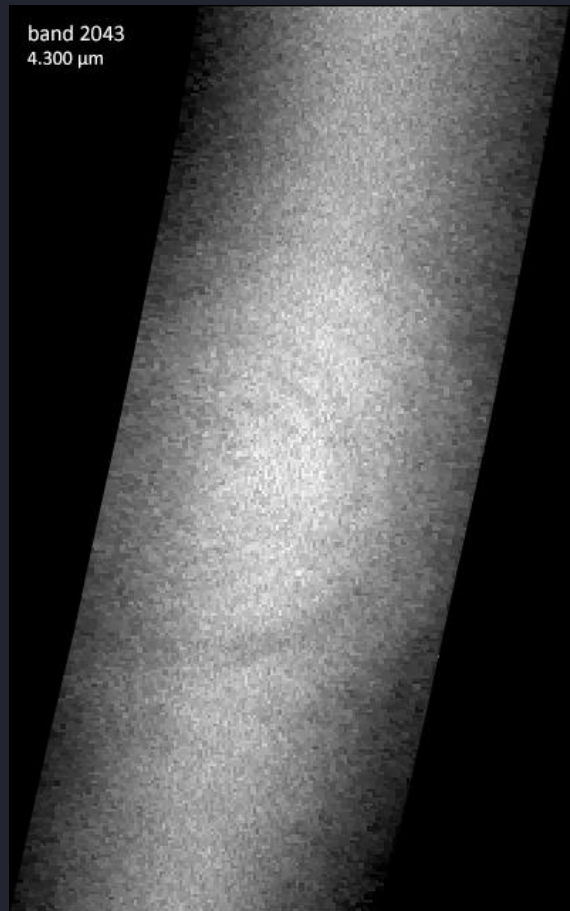


Absorpční kanály CO₂. Viditelnost gravitačních vln v konkrétních kanálech se pro různé případy může lišit.

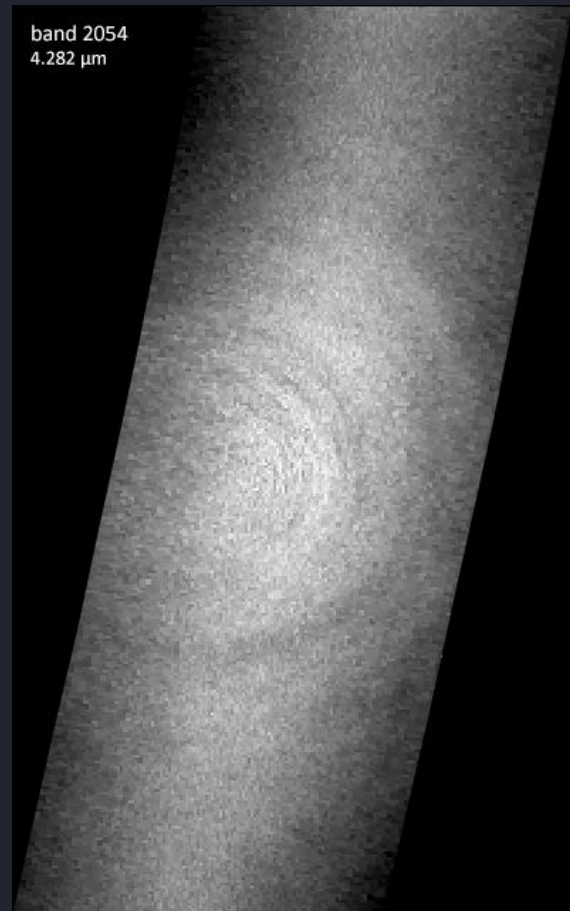


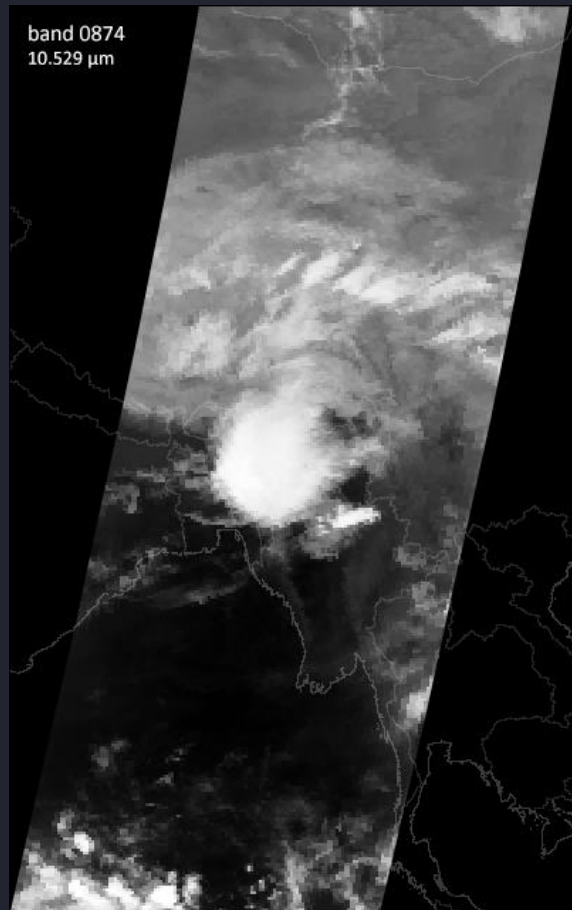


Atmosférické okno 10.5 μm

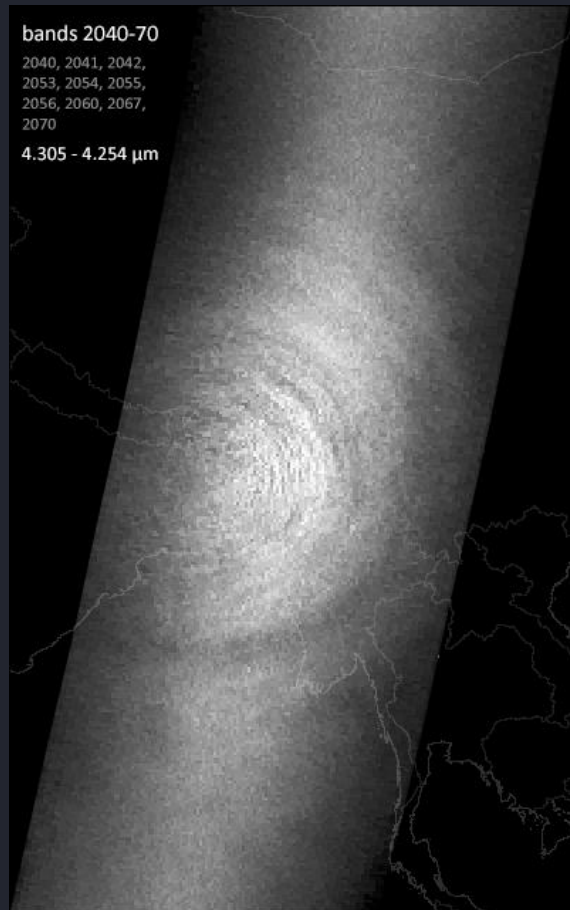


Absorpční kanály CO₂. Viditelnost gravitačních vln v konkrétních kanálech se pro různé případy může lišit.

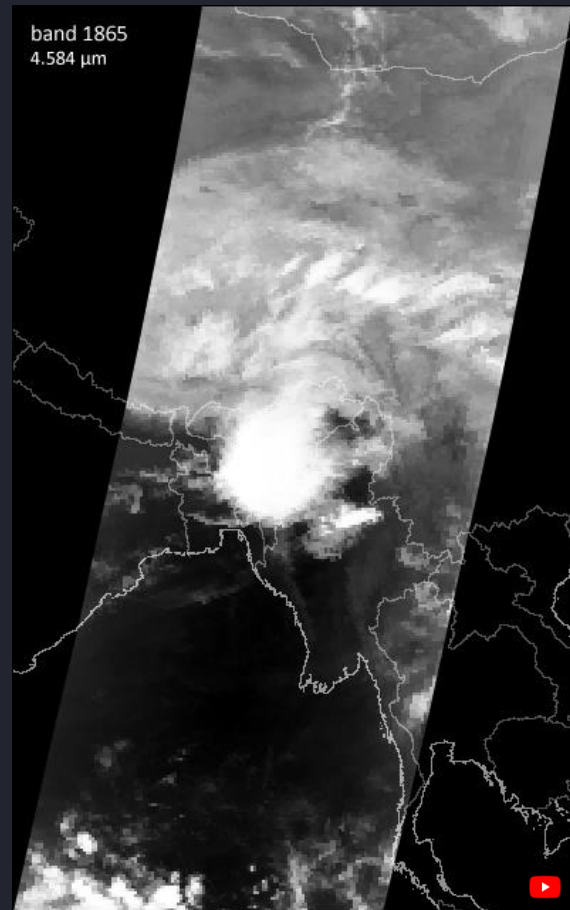




Atmosférické okno 10.5 μm

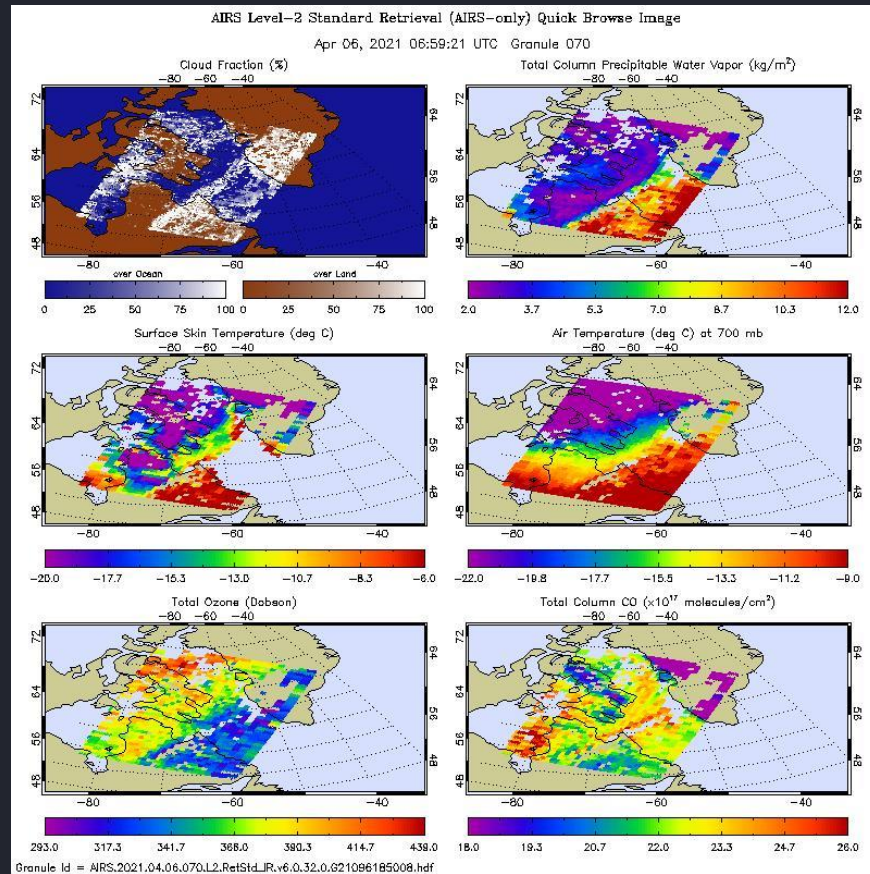
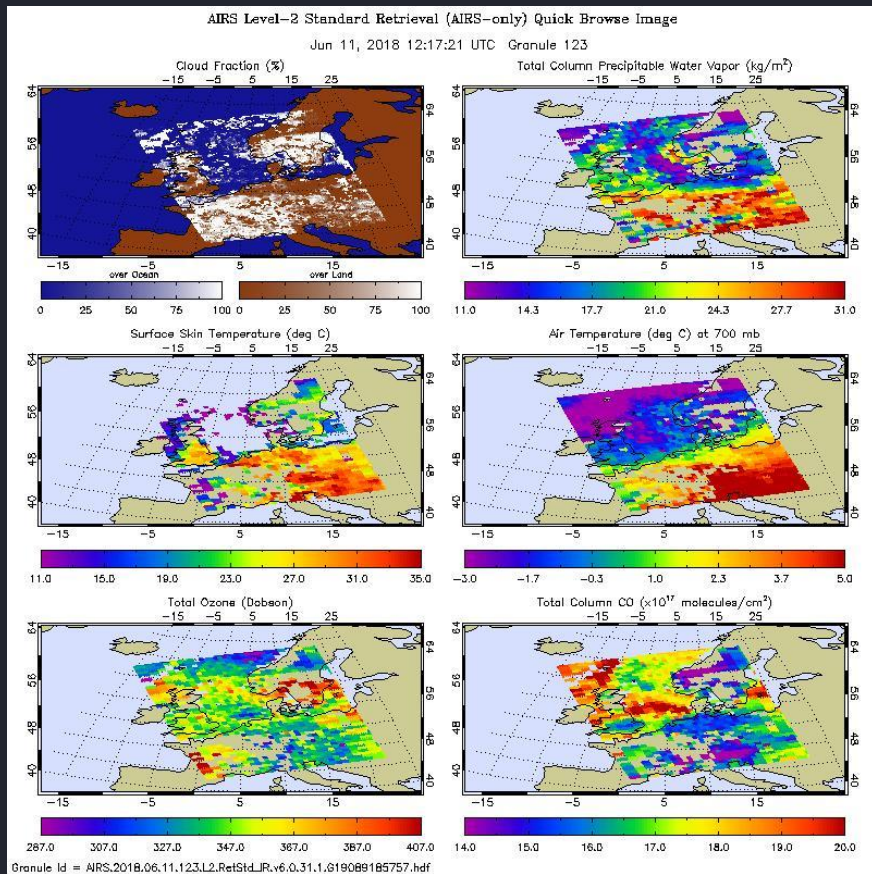


Průměrná radiance z deseti vybraných kanálů
(potlačení šumu)



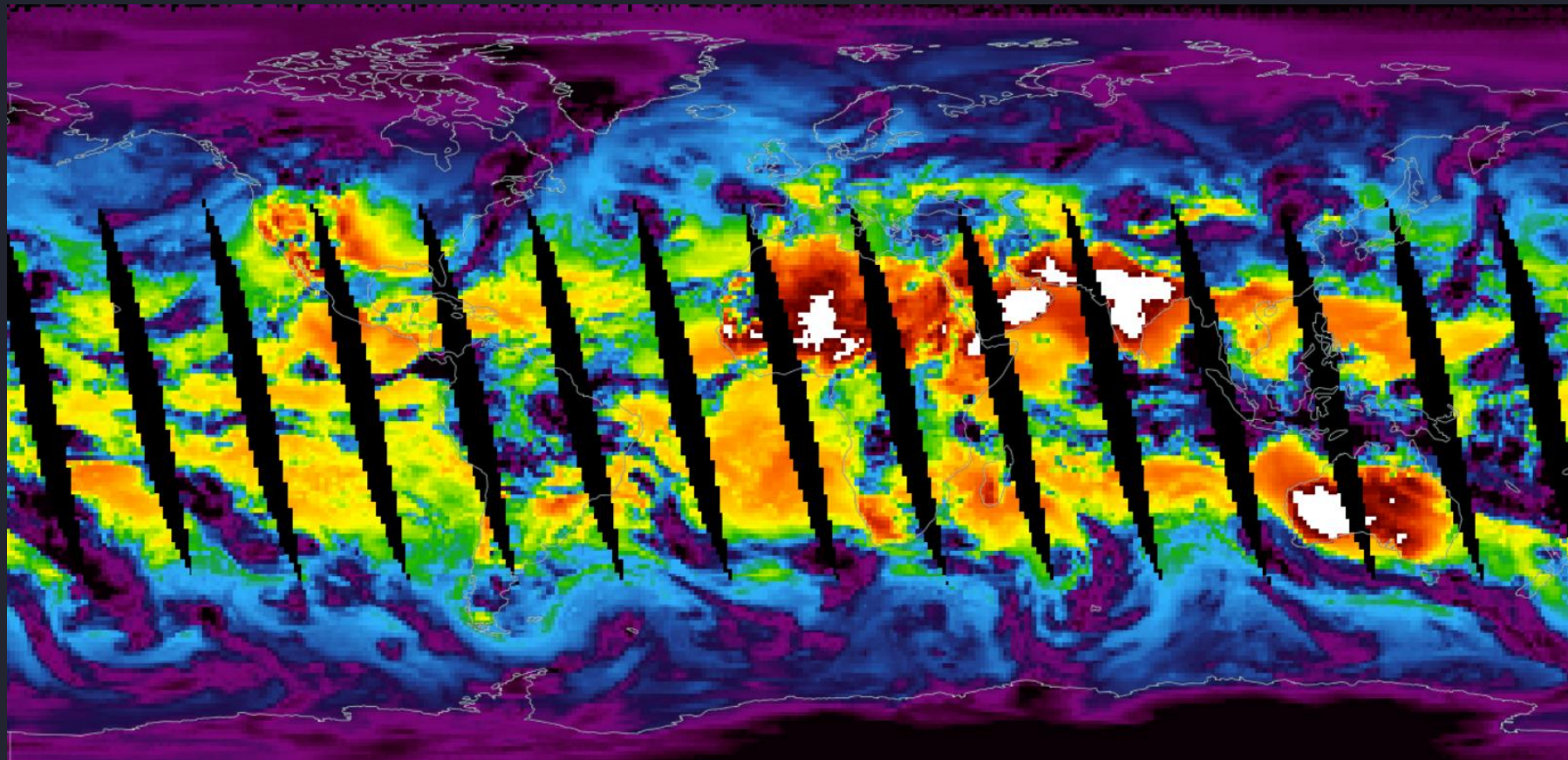
Ukázka proměnlivosti viditelnosti a vzhledu CGW
v jednotlivých kanálech AIRS (pouze kanály 1865
až 2144)

Ukázky produktů AIRS L2



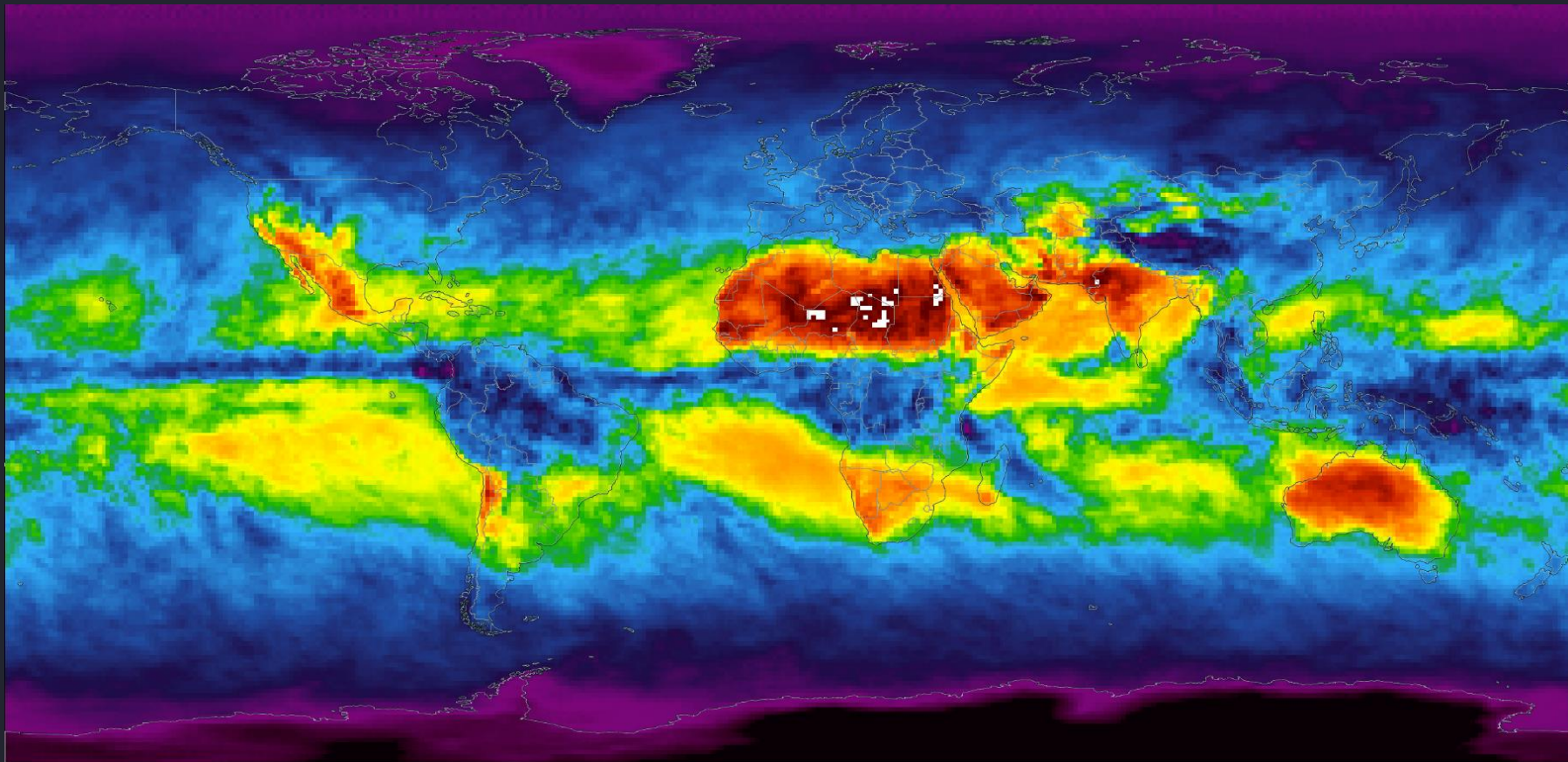
AIRS/Aqua [L2 Standard Physical Retrieval \(AIRS-only\) V006 \(AIRS2RET\)](#)

Ukázky produktů AIRS L3 (různé denní, několikadenní, měsíční, roční produkty)



Outgoing Longwave Radiation (L3, Day, Daily), [NASA EOS Worldview](#)

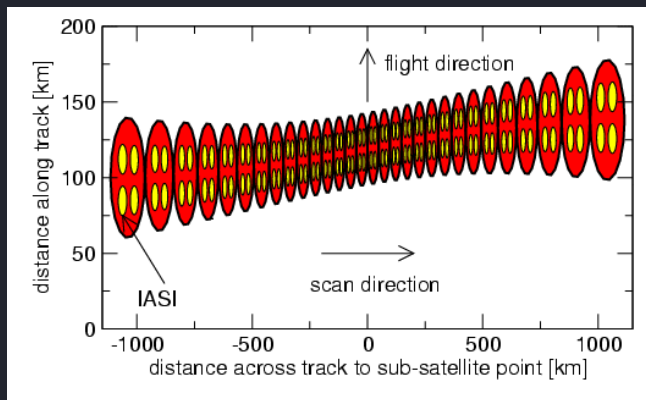
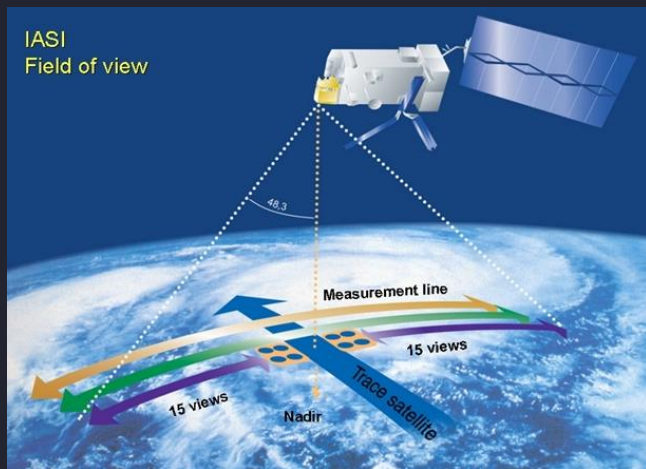
Ukázky produktů AIRS L3 (různé denní, několikadenní, měsíční, roční produkty)



Outgoing Longwave Radiation (L3, Day, Monthly), [NASA EOS Worldview](#)

IASI – Infrared Atmospheric Sounding Interferometer
družice Metop 1 až 3 (první generace, od 2007)

IASI – Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, Metop 1 – 3

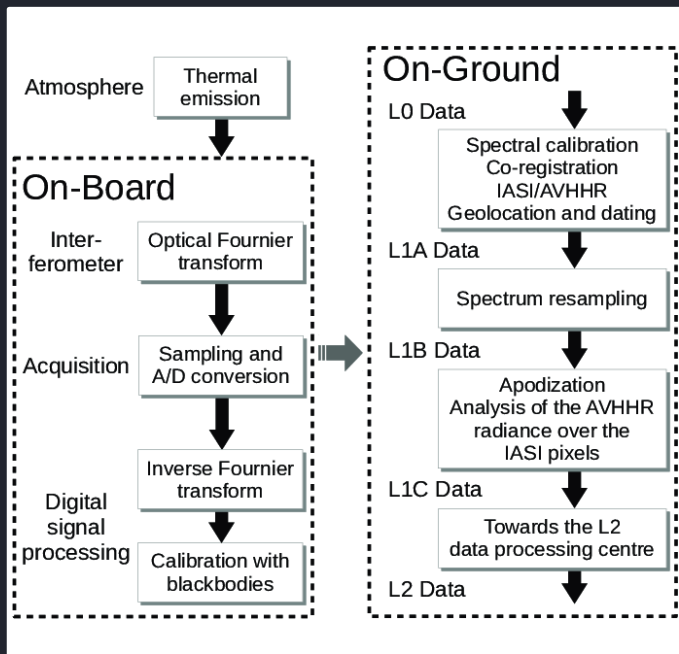


- Krokující Michelsonův interferometr (metoda „stop and stare“), v průběhu jednoho skenu 30 EFOV (elementary fields of view), v každém z nich měření ve 4 IFOV (instantaneous fields of view), v každém IFOV změřen tzv. interferogram. Velikost IFOV v nadiru 12 km, na kraji snímaného pásu 39x20 km. Celková šířka pásu dat cca 2200 km.
- Měření interferogramů v celkem 8461 kanálech, pokrývajících kontinuálně celé pásmo 3.63 až 15.5 μm ($645\text{--}2760\text{ cm}^{-1}$), rozdělené na tři navazující dílčí pásma:

Band 1 645 - 1210 cm^{-1} , 8.26 - 15.50 μm
 Band 2 1210 - 2000 cm^{-1} , 5.00 - 8.26 μm
 Band 3 2000 - 2760 cm^{-1} , 3.62 - 5.00 μm

Band	Name of region	Spectral region (cm^{-1})	Absorption band	Usage
B1	R1	650 - 770	CO_2	Temperature profile
B1	R2	790 - 980	Atmospheric window	Surface and Cloud properties
B1	R3	1000 - 1070	O_3	O_3 sounding
B1	R4	1080 - 1150	Atmospheric window	Surface and Cloud properties
B2	R5	1210 - 1650	H_2O	Humidity profiles; CH_4 and N_2O properties
B3	R6	2100 - 2150	CO	CO column amount
B3	R7	2150 - 2250	N_2O and CO_2	Temperature profile; N_2O column amount
B3	R8	2350 - 2420	CO_2	Temperature profile
B3	R9	2420 - 2700	Atmospheric window	Surface and cloud properties
B3	R10	2700 - 2760	CH_4	CH_4 column amount

IASI – zpracování dat, jejich úrovně a dostupnost



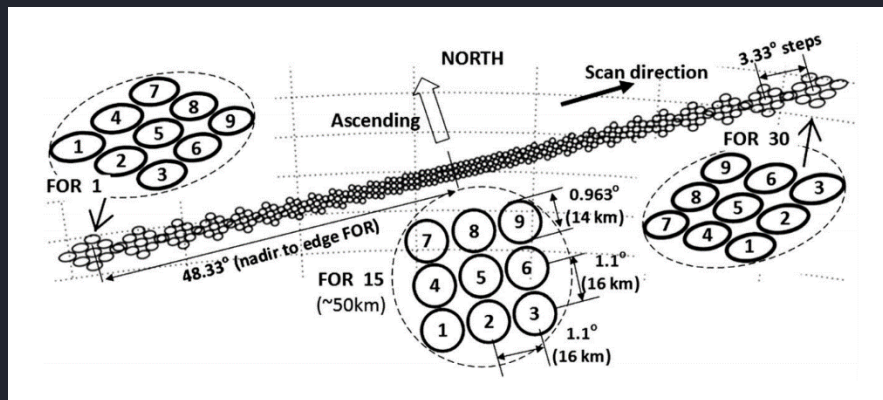
- Vzhledem k přidělené přenosové kapacitě 1.5 Mbps pro IASI (přenos dat z družic Metop do přijímacích, resp. zpracovatelských center) a objemu dat generovaného samotným přístrojem IASI (cca 45 Mbps) je nutná redukce naměřených dat již na družici, před jejich přenosem.
- Jednotlivé kroky poměrně složitého zpracování naměřených dat a jejich komprese podrobně popsány např. zde: Hyperspectral IASI L1C Data Compression, DOI: [10.3390/s17061404](https://doi.org/10.3390/s17061404) (2017), nebo stručně [zde \(Wikipedia\)](#).
- Přístup k datům (L1C a L2) např.:
 - [EUMETSAT Data Centre](#)
 - [NOAA CLASS Archive](#)
 - [IASI Portal](#)
- Data L1C jsou rovněž distribuována v téměř reálném čase (NRT, Near-Real Time) prostřednictvím služby EUMETCast.
- Popis L1 dat zde: [IASI Level 1 Product Guide](#)
- Popis L2 produktů: [IASI Level 2 Product Guide](#)

Na budoucích polárních družicích EUMETSATu systému EPS-SG bude jedním z přístrojů **IASI-NG**, zde podrobněji nerozebírán, detailní popis např. zde: <https://www-cdn.eumetsat.int/files/2023-10/4.%20Giordano%20Bruni%2016.45.pdf>

CrIS – Cross-track Infrared Sounder

**S-NPP (2012), NOAA-20 (2017), NOAA-21 (2022)
a budoucích NOAA-22 a NOAA-23**

CrIS – Cross-track Infrared Sounder, S-NPP, NOAA-20, NOAA-21 a budoucí navazující



Michelsonův interferometr (stejně jako IASI), v průběhu jednoho skenu 30 tzv. FOR (fields of regard), v každém z nich měření v 9 FOV (fields of view), v každém FOV změřen interferogram. Velikost FOV v nadiru 14 km. Celková šířka pásu dat cca 2200 km.

Měření interferogramů v celkem 1305 kanálech na S-NPP do 2.11.2015 (Normal Spectral Resolution, NSR), resp. ve 2223 kanálech na S-NPP od 2.11.2015, na NOAA-20 a novějších budoucích družicích (Full Spectral Resolution, FSR), pokrývajících pásmo 3.9 až 15.4 μm ($650\text{--}2550\text{ cm}^{-1}$), které je rozdělené na tři nesouvislá, oddělená dílčí pásma:

LWIR	650 - 1095 cm^{-1} ,	9.13 - 15.40 μm
MWIR	1210 - 1750 cm^{-1} ,	5.71 - 8.26 μm
SWIR	2155 - 2550 cm^{-1} ,	3.92 - 4.64 μm

Zpracování dat obdobné IASI, částečně na družici (redukce objemu dat), ostatní po přenosu do pozemního zpracovatelského centra. Podrobnosti ke zpracování dat CrIS viz např.

[Cross Track Infrared Sounder \(CrIS\) Sensor Data Record \(SDR\) User's Guide](#)

nebo

[Suomi NPP CrIS measurements, sensor data record algorithm, calibration and validation activities, and record data quality](#)

CrIS – úrovně dat a jejich dostupnost

Level	Description
Level 0 (RDR's)	Raw Data Records (RDR)s from CrIS sensor formatted to CCSDS transmission standards. Unprocessed raw data packages of instrument data at original resolution, are time ordered (no overlap), with duplicate packets removed. Contents of data record include sensor raw science data, housekeeping and calibration data merged with spacecraft orbit information (ephemeris, attitude, and time data). The data granule is assumed to be 1.25 orbits maximum. → RDR sensor output
Level 1A (intermediate level)	Level 0 data (including reconstructed interferograms) which may have been reformatted or transformed reversibly, located to a coordinate system, and packaged with needed calibration characterization data needed to begin calibration procedure.
Level 1B (SDR's)	Radiometrically, spectrally (frequency), and geolocated calibrated spectra mapped onto EDR channel sets with specific ILS and apodization, with annotated quality indicators.
Level 2 (EDR's)	Environmental variables retrieved from Level 1 data. Geolocated profiles of pressure, temperature, and humidity of the atmosphere. Land and ocean skin temperature, and total column ozone.

Podrobnější popis všech jednotlivých dostupných produktů L1B a L2 a jejich dostupnost např. zde: [NASA EarthData GES DISC](#)

Produkty úrovně L0 (RDR) a L1A (obojí nedostupné výše), L1B (SDR) a L2 (EDR) dostupné prostřednictvím [NOAA CLASS Archive](#) (tam zařazené mezi produkty JPSS).

AWS (Arctic Weather Satellite) a program EPS-Sterna

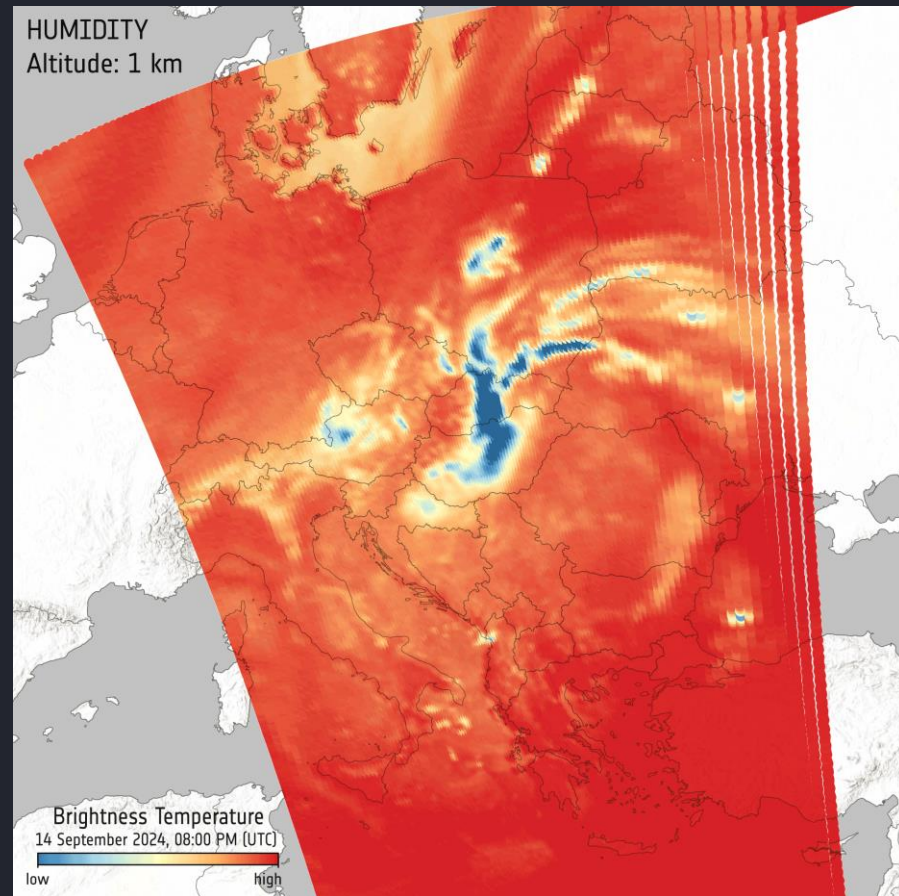
AWS – Arctic Weather Satellite (ESA)

start: 11. srpna 2024

AWS Microwave Radiometer (MWR):

- celkem 19 kanálů (50 - 325 GHz)
- zdroj dat pro NWP
- zpřesnění předpovědí především v polárních oblastech

prototyp budoucích operativních družic programu EPS-Sterna



zdroj: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Missions/Arctic_Weather_Satellite/

EPS–Sterna (ESA a EUMETSAT)

Návazný operativní program EUMETSATu na AWS

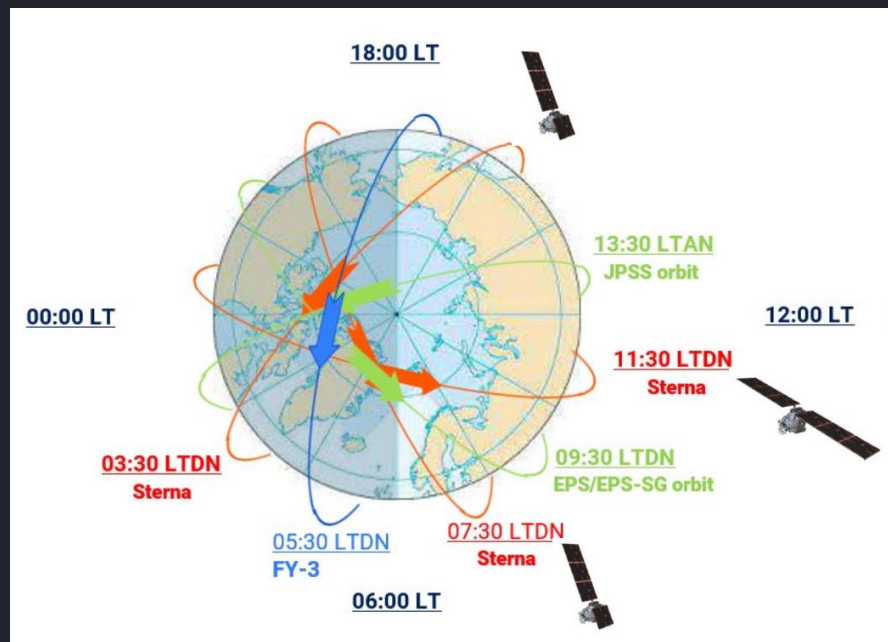
Microwave Sounder (MWS):

- celkem 19 kanálů (50 - 325 GHz)
- zdroj dat pro NWP, vertikální profily teploty a vlhkosti
- zpřesnění předpovědí v globálním měřítku (zahuštění oběžných rovin ostatních družic (JPSS, EPS/EPS-SG a FY3), poskytujících obdobná data

Oběžná dráha:

- výška dráhy 595 km, sklon dráhy 98° (polární heliosynchronní dráha)
- celkem tři oběžné roviny
- v jedné oběžné rovině vždy dvě aktivní družice

Start prvních šesti družic v roce 2029, druhá šestice kolem roku 2034, dvě družice jako záložní.



Hyperspektrální sondáž z geostacionární dráhy

GIIRS – Geostationary Interferometric Infrared Sounder

FY-4A (od 2018), FY-4B (2021) a následující

GIIRS – Geostationary Interferometric Infrared Sounder, FY-4A a FY-4B

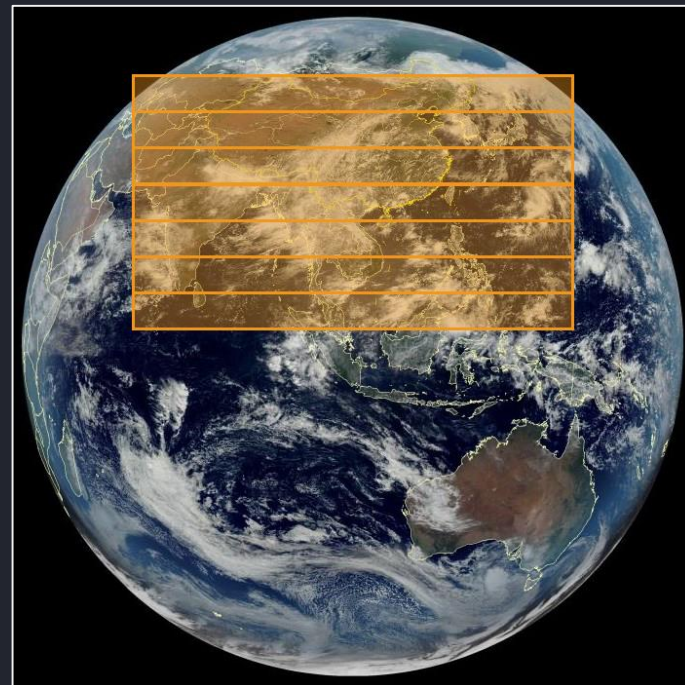
	FY-4A (R&D)				FY-4B (Operational)			
		Range(cm ⁻¹)	Resolution	Channels		Range(cm ⁻¹)	Resolution	Channels
Spectral Parameters(Normal mode)	LWIR	700 ~ 1130	0.8	538	LWIR	700 ~ 1130	0.625	688
	S/MIR	1650 ~ 2250	1.6	375	S/MIR	1650 ~ 2250	1.2	500
	VIS	0.55-0.75μm		1	VIS	0.55-0.75μm		1
Spatial Resolution	LWIR/S/MIR		16km SSP		LWIR/S/MIR		8km SSP	
	VIS		2km SSP					
Operational Mode	China area		5000 × 5000 km ²		China area		5000 × 5000 km ²	
	Mesoscale area		1000 × 1000 km ²		Mesoscale area		1000 × 1000 km ²	
Temporal Resolution	China area		< 1 hr		China area		< 1 hr	
	Mesoscale area		< ½ hr		Mesoscale area		< ½ hr	
Sensitivity (mW/m ² sr cm ⁻¹)	LWIR		0.5 ~ 1.1		LWIR		0.3	
	S/MIR		0.1 ~ 0.14		S/MIR		0.06	
	VIS		S/N > 200(ρ=100%)		VIS		S/N > 200(ρ=100%)	
Calibration accuracy (radiation)	1.5k (3σ)				1.0k (3σ)			
Calibration accuracy (spectrum)	10 ppm (3σ)				5 ppm (3σ)			
Quantization Bits	13				13			

První hyperspektrální sounder na geostacionární dráze, na FY-4A testovací prototyp, na FY-4B již plná operativní verze. Podobný princip jako IASI a CrIS, dvě pásma: LWIR 700-1130cm⁻¹ (8.85-14.29μm) a S/MIR 1650-2250cm⁻¹ (4.44-6.06μm), detaily viz tabulka výše.

Na rozdíl od plánovaného IS na MSG-S pokrytí pouze oblasti Číny, nikoli celé zemské polokoule.

Podrobnosti ke GIIRS např. zde: [Brief introduction of the hyper-spectral infrared sounder from FY-4A and FY-3D \(2017\)](#) nebo zde: [Review of Geostationary Interferometric Infrared Sounder \(2018\)](#)

Poznámka: data z GIIRS využívána v rámci příprav na budoucí IRS MTG-S (plánovaný start 2025/07)



IRS – InfraRed Sounder

MTG-S1 (2025), MTG-S2 (~ 2035)

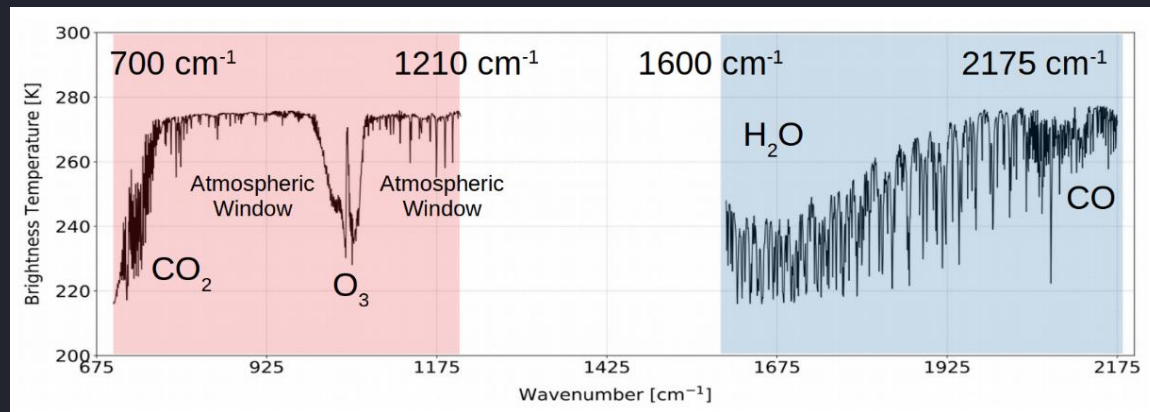
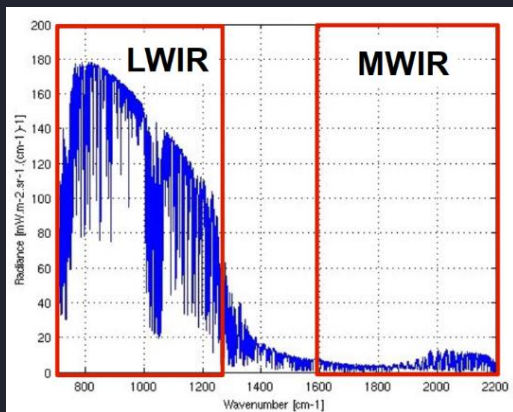
MTG-S InfraRed Sounder (IRS)

Hyperspektrální interferometrická sondáž atmosféry

- Podobně jako IASI, CrIS a GIIRS, Michelsonův krokující interferometr (metoda „*stop and stare*“), trochu odlišná terminologie, viz dále.
- Měření „interferogramů“ v pásmu 4.44 až 14.70 μm ($680\text{--}2250\text{ cm}^{-1}$), rozděleném na dvě dílčí oddělená pásma:

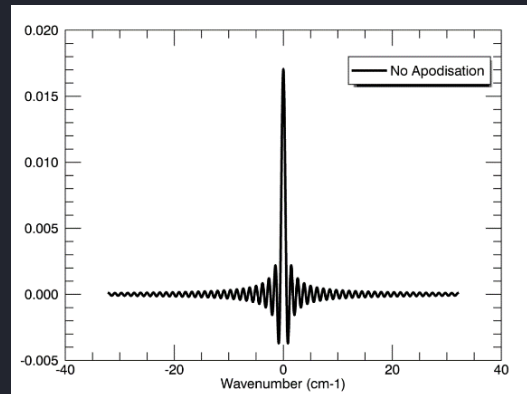
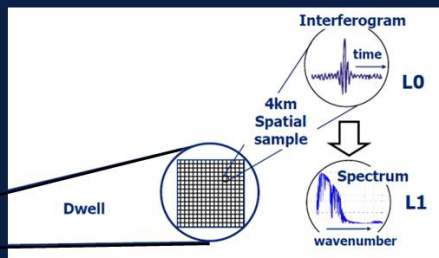
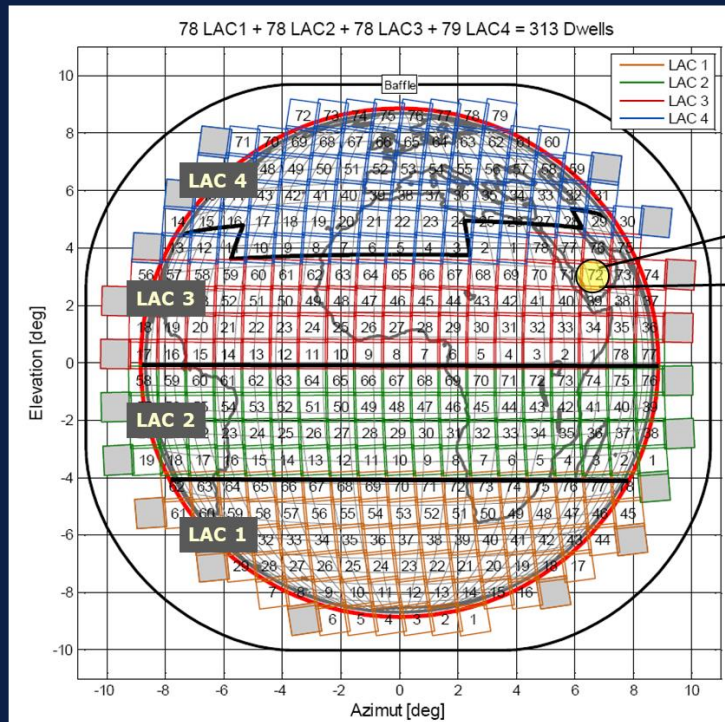
LWIR 680 - 1210 cm^{-1} , 8.26 - 14.70 μm (cca 800 kanálů)

MWIR 1600 - 2250 cm^{-1} , 4.44 - 6.25 μm (cca 900 kanálů)



MTG-S InfraRed Sounder (IRS)

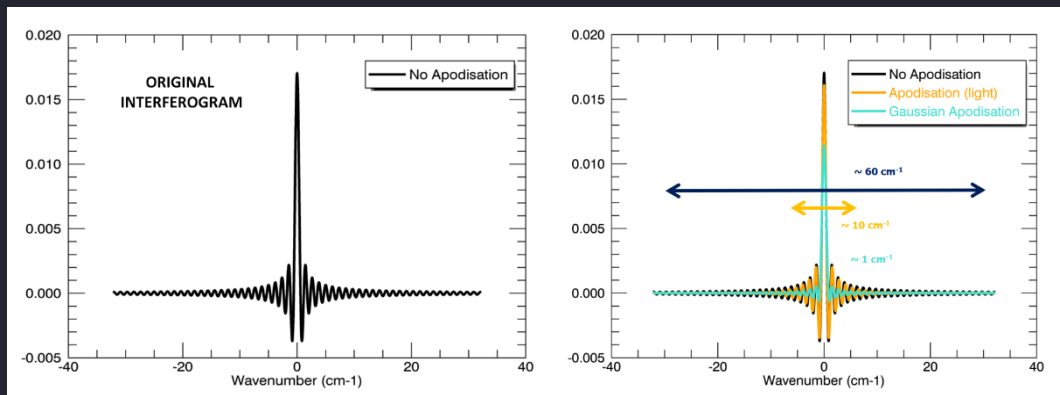
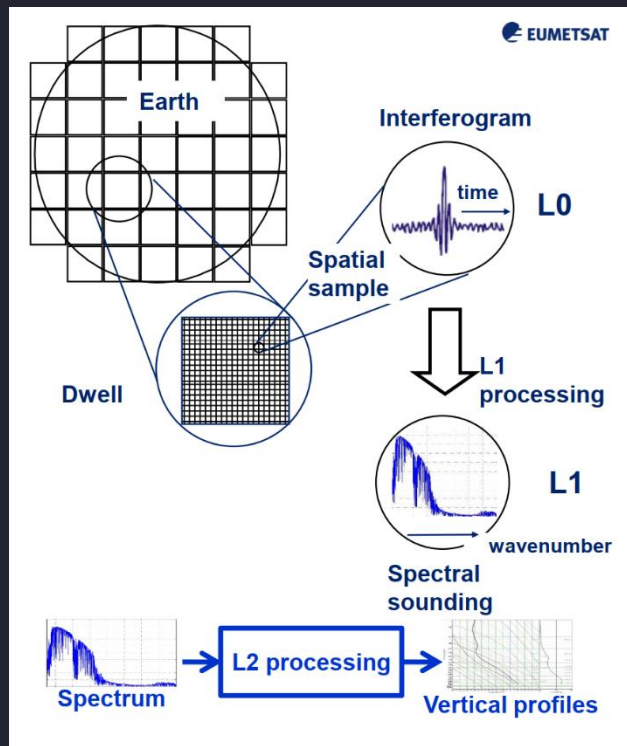
Princip snímání



- Zemský disk rozdělen na 4 oblasti (Local Area Coverage, LAC),
- každá LAC obsahuje 78 – 79 „dwells“, zastávky krokujícího mechanismu IRS
- doba měření v každém „dwellu“ přibližně 10s
- snímač (odpovídající rozsahu „dwellu“) obsahuje 160 × 160 dílčích pixelů, v nichž je při každé zastávce naměřen **interferogram** (L0 data), který je primárně zpracován na družici a následně odeslán k dalšímu zpracování na zemi, kde jsou z něj pak postupně odvozena L1 a další data.
- rozlišení jednotlivých dílčích pixelů „dwellu“ je 4 × 4 km v nadiru, cca 5 × 8 km v oblasti střední Evropy
- oblast Evropy (LAC 4) bude snímána každých 30 minut
- celý zemský disk snímán každou hodinu až několik hodin (max. 6 h) – bude teprve upřesněno, informace se zatím poněkud liší.

MTG-S InfraRed Sounder (IRS)

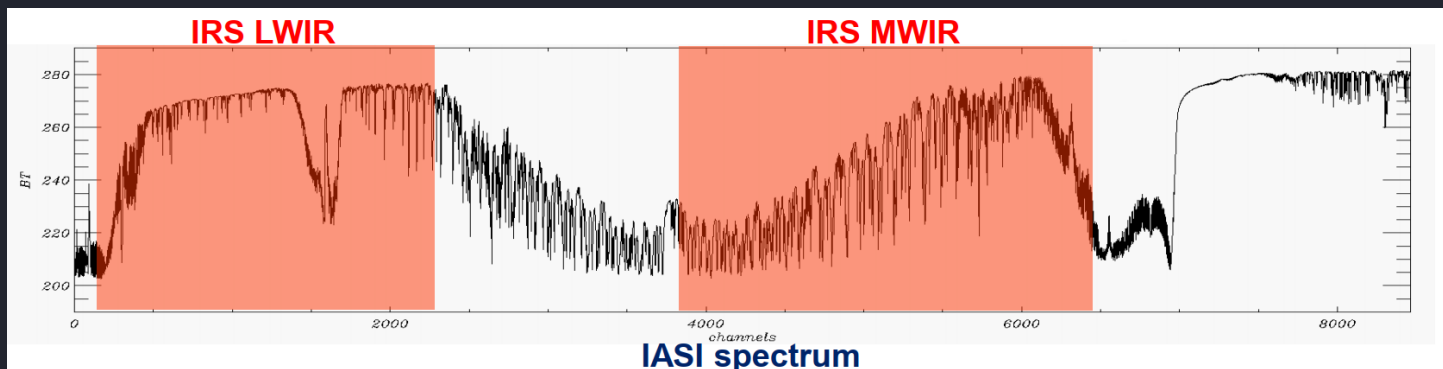
Princip zpracování



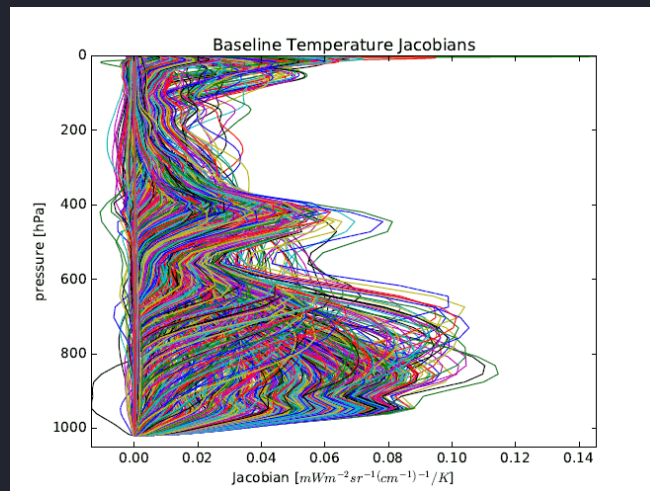
- Po naměření interferogramu v každém pixlu „dwellu“ je nejdříve, ještě na družici, za účelem snížení objemu dat určených k přenosu, provedena jejich apodizace (zjednodušení).
- Následně je takto upravený interferogram (L0) přenesen do pozemního centra k dalšímu zpracování – převodu Fourierovou transformací do „spektra“ (pro každý pixel), L1 data.
- IRS L1 data distribuována uživatelům systémem EUMETCast (Satellite) ve formátu Principal Components (PC) komprese, zvažuje se rovněž jejich distribuce ve formátu Spectral Responce Functions (SRF) prostřednictvím EUMETCast Terrestrial, určena především pro potřeby NWP.
- IRS L2 data – profily teploty, H₂O, O₃, teplota zemského povrchu, jeho emisivita, oblačnost, konvektivní parametry (nowcasting), pro LAC4 (Evropa) L2 data každých 30 minut. Další produkty budou teprve upřesněny.

Podrobněji o zpracování dat IRS viz např. https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-04/pdf_eum_users_science_pres_coopmann_20.pdf

MTG-S InfraRed Sounder (IRS)



Porovnání rozsahu IASI (plná černá čára) a IRS (LWIR a MWIR)



Ukázka (simulace) tzv. Jacobiánů IRS vertikálních profilů teploty (viz např. <https://cab.inta-csic.es/users/jrpardo/paper20.pdf>)

MTG-S IRS

Ukázka skenování

2025-11-15 00:16:10

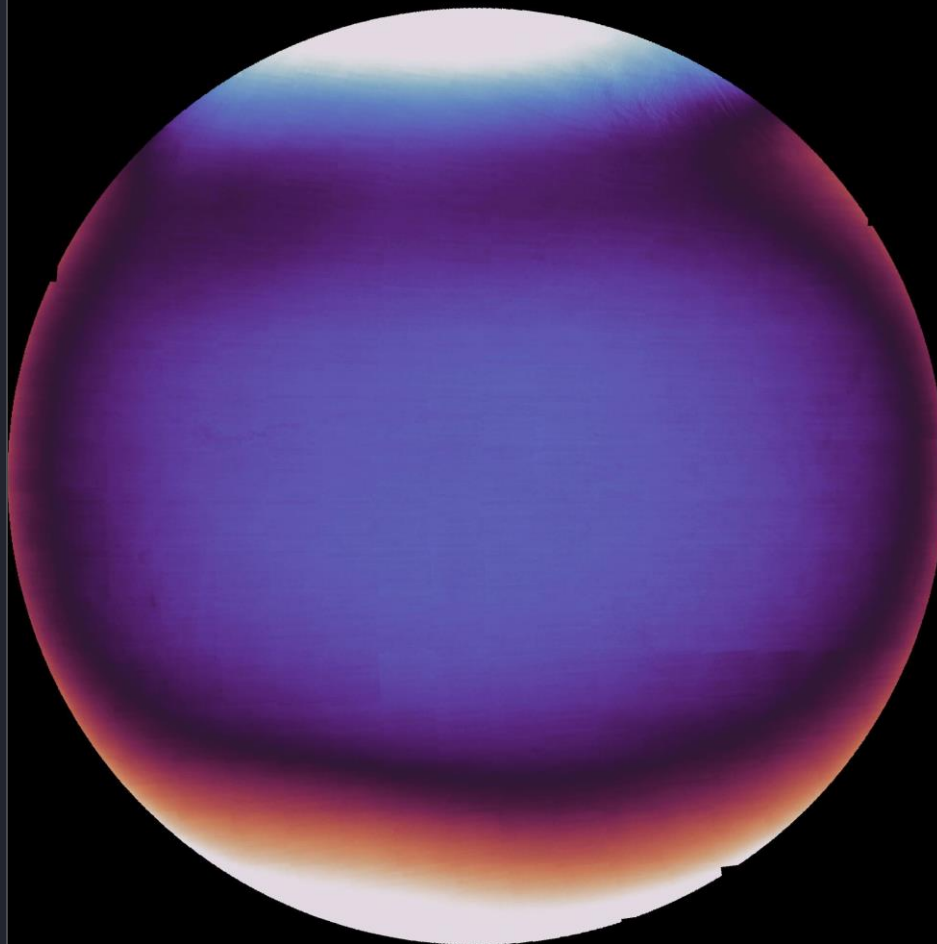


Zdroj: [EUMETSAT](#)

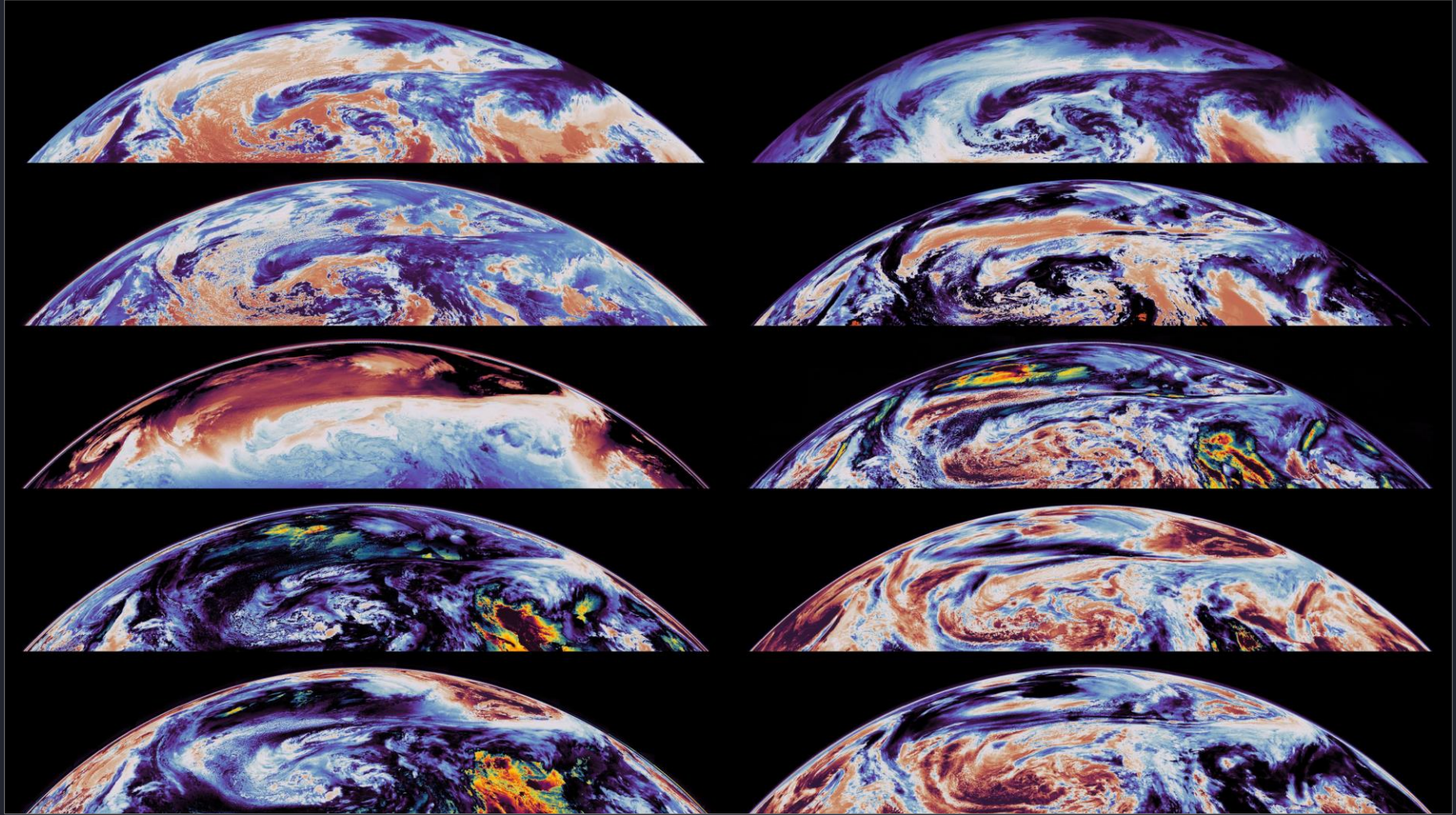
MTG-S IRS

Ukázka jednotlivých kanálů
(pouze výběr)

690.4 cm^{-1} (14.48 μm)

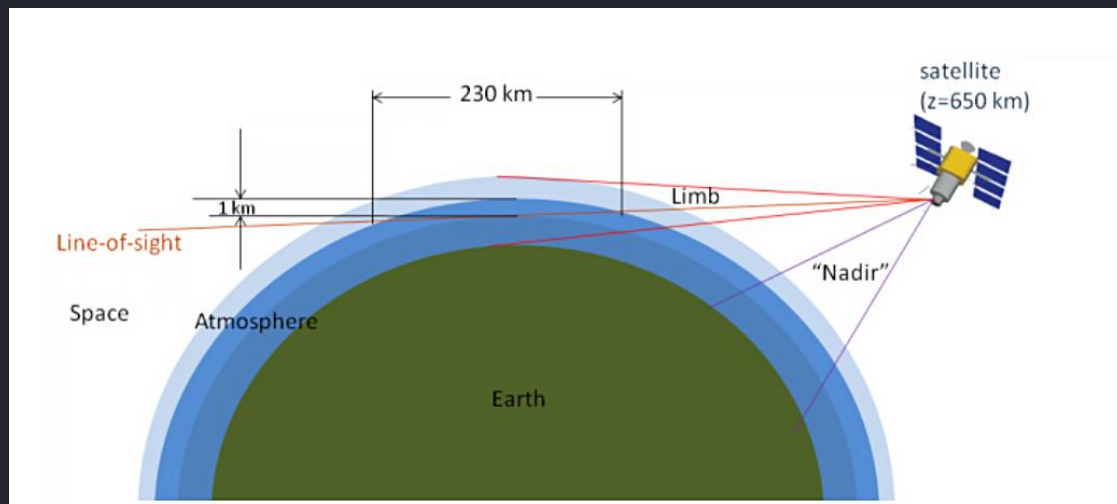


Zdroj: [EUMETSAT](#)



Limbová sondáž atmosféry

Limbová sondáž atmosféry – princip



zdroj: https://www.researchgate.net/publication/282886083_The_atmospheric_limb_sounding_satellite_ALISS

Další informace – viz např.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002240731930086X>

<https://amt.copernicus.org/articles/13/13/2020/>

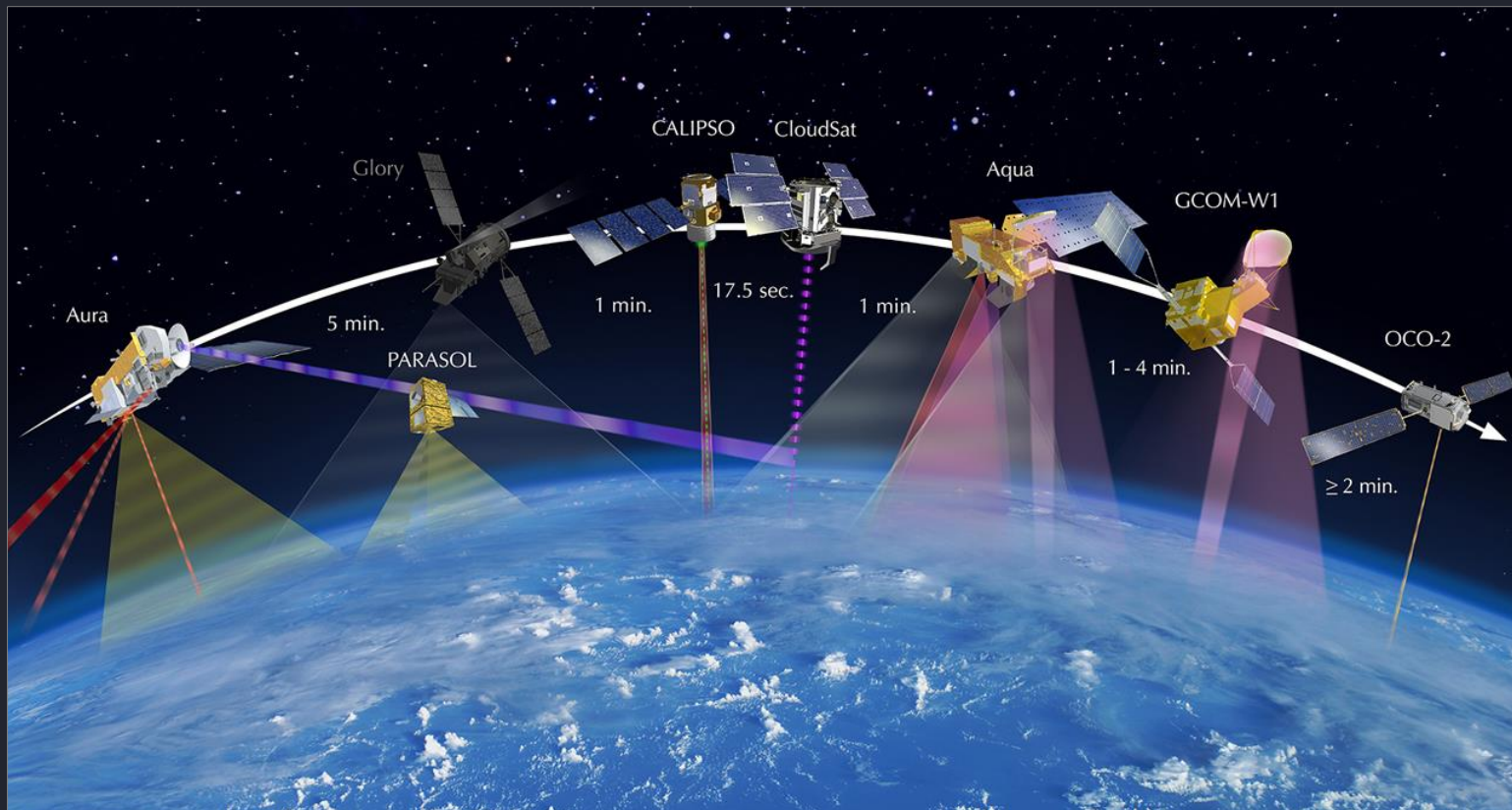
- UV, VIS, NIR, IR a MW pásma
- vertikální profily horní troposféry až horní mezoféry (teplota, vlhkost, chemické složení),
- rovněž např. detekce atmosférických gravitačních vln
- vertikální rozlišení řádově půl až spodní jednotky km, horizontální rozlišení horní desítky až spodní stovky km

Aktivní vertikální družicová sondáž atmosféry

(lidary a radary)

Družice CloudSat a CALIPSO

Družice **CloudSat** a **CALIPSO** – původně (do února 2018) součást seskupení družic „A-Train“, od září 2018 do srpna 2020 samostatná formace obou družic na společné nižší dráze



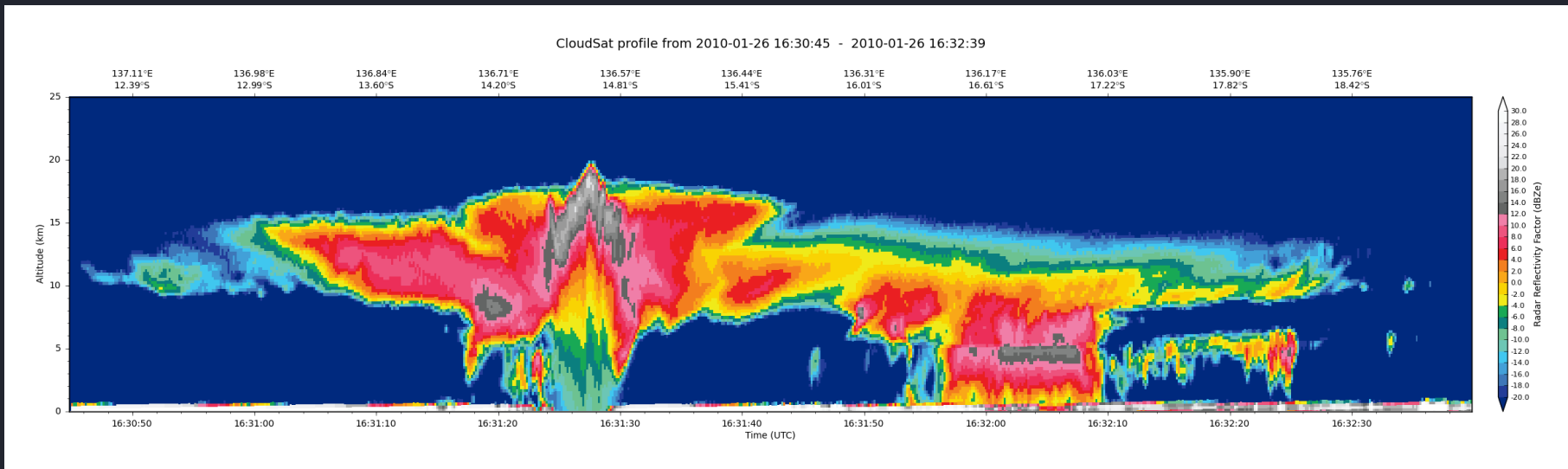
A-Train = „The Afternoon Train“ (1:30 p.m.) nebo též „Aqua Train“, <http://atrain.nasa.gov/>
Aqua: 2002/05/04, **CloudSat** a **CALIPSO**: 2006/04/28 (společný start)

CloudSat – přístroj Cloud Profiling Radar (CPR)

<https://cloudsat.atmos.colostate.edu> (???)

<https://eosps.nasa.gov/missions/cloudsat>

ukončení měření: 27. srpna 2020



94 GHz (~ 3 mm), vertikální profil oblačnosti a srážek v rovině oběžné dráhy družice („řez“ kolmo na zem)

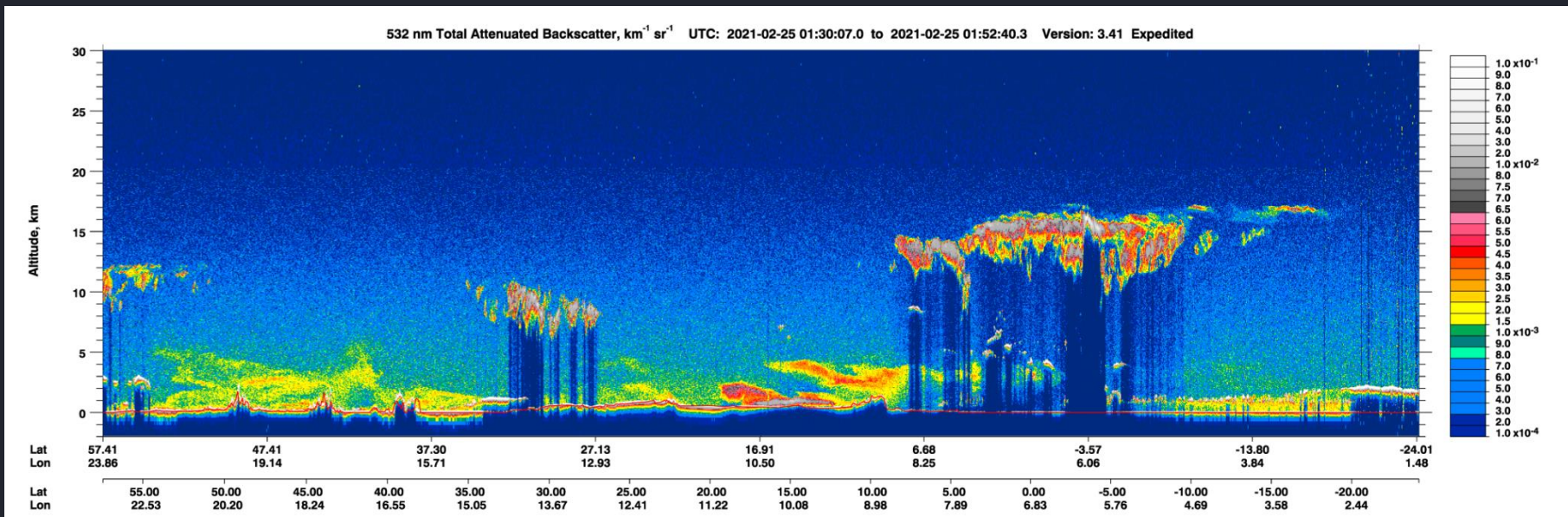
- horizontální rozlišení přibližně 1.4 km
- vertikální rozlišení 500 m
- měření od zemského povrchu do 30 km

CALIPSO – přístroj Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP)

<https://calipso.cnes.fr/en/CALIPSO/index.htm>

<https://www-calipso.larc.nasa.gov/>

ukončení měření: 1. srpna 2023



1064 nm (zpětný rozptyl, 1 kanál), 532 nm (zpětný rozptyl, 2 kanály s kolmou polarizací)
vertikální profil oblačnosti a aerosolů v rovině oběžné dráhy družice („řez“ kolmo na zem)

- vertikální rozlišení 30 - 60 m
- horizontální rozlišení (podél dráhy) 333 m

CALIPSO – další podpůrné přístroje družice:

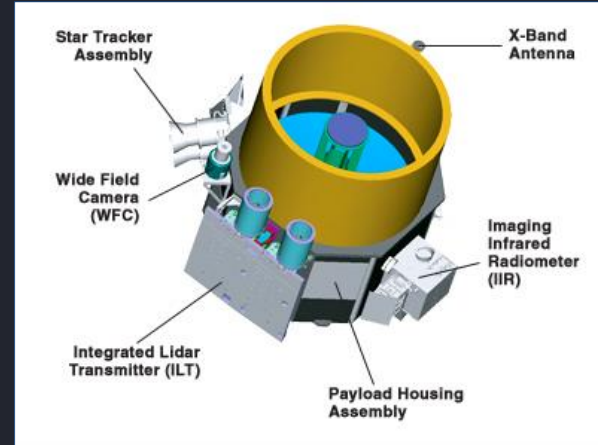
CALIPSO Wide Field Camera (WFC)

rozlišení 125 m / 1 km
šířka pásu dat: 61 km

CALIPSO Infrared Imaging Radiometer (IIR)

rozlišení 1 km
šířka pásu dat: 64 km
IR kanály 8.7, 10.6 and 12 μm

Oba přístroje vycentrovány na trajektorii CALIOP



CloudSat a CALIPSO

Hlavní oblasti využití dat CPR a CALIOP:

- studie vlastností oblačnosti (mikrofyzika, výška, optická mohutnost, ...) a aerosolů (typ, složení, původ, vlastnosti, ...), včetně různého prachu v atmosféře (z pouštních oblastí, spraš, pyl, ...), kouř z požárů, vulkanický prach, ...
- využití pro různé studie (včetně vlivu na radiační bilanci, klimatologické dopady, ...), operativní monitorování (lokální, globální), řízení leteckého provozu (při sopečných výbuších výška vleček sopečného prachu), aj.

Zdroje dat (pro přístup ke stažení dat nutná registrace, náhledy volně dostupné):

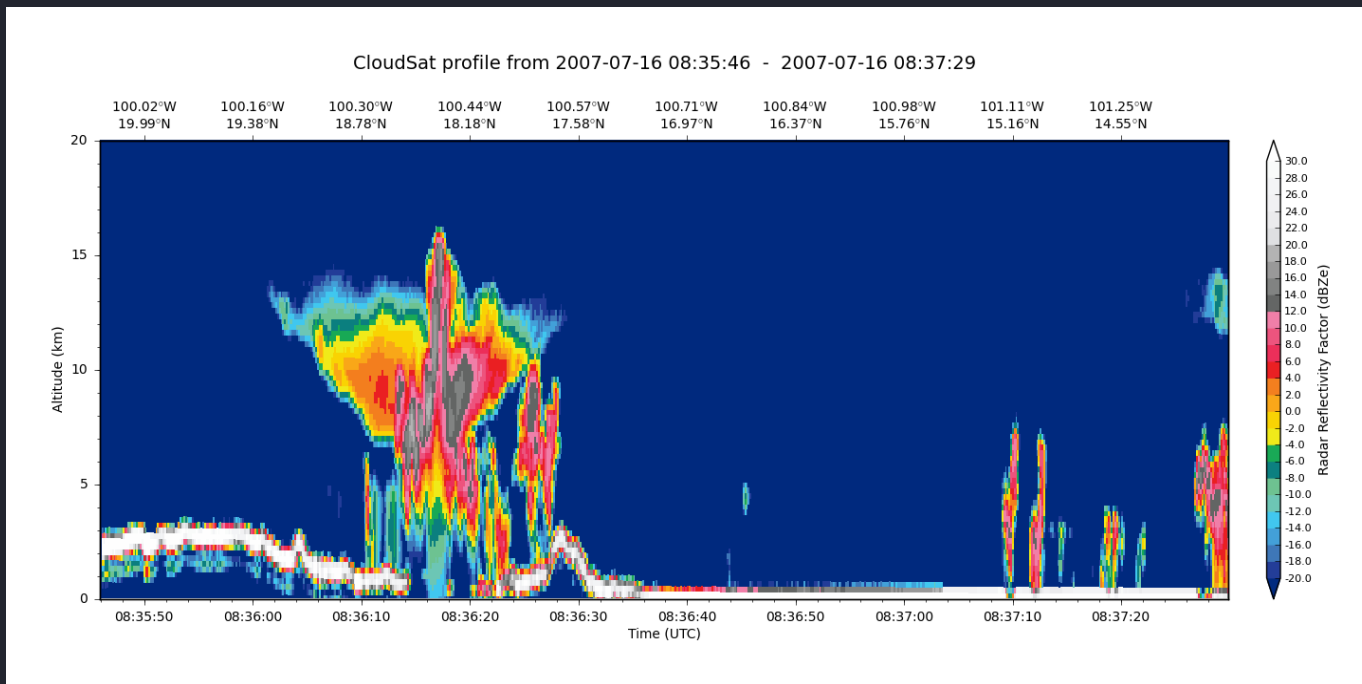
CloudSat – <https://www.cloudsat.cira.colostate.edu/>

CALIPSO – https://www-calipso.larc.nasa.gov/products/lidar/browse_images/exp_index.php

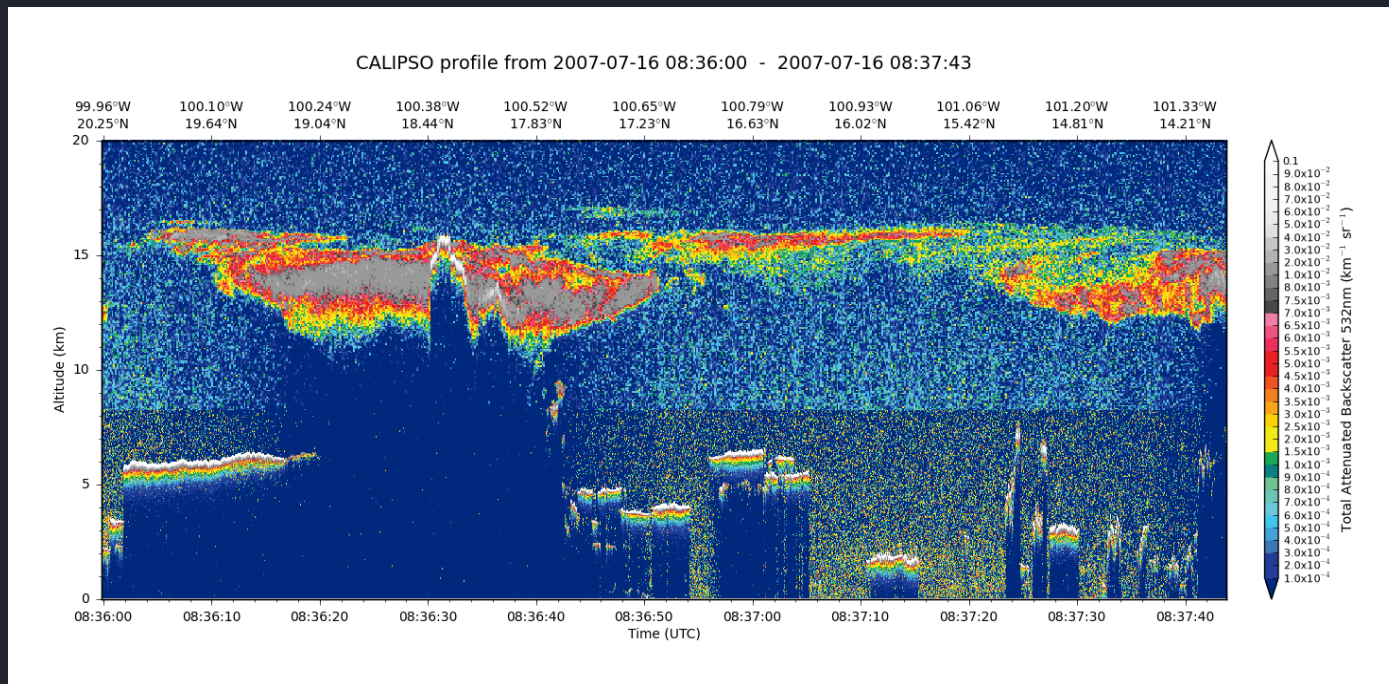
Zpracování a vizualizace dat:

ccplot – CloudSat and CALIPSO Plotting Tool, freeware, <https://ccplot.org/> (Peter Kuma)

McIDAS-V – freeware, <https://www.ssec.wisc.edu/mcidas/software/v/>



Příklad, kdy CloudSat/CPR detekuje podstatně méně řídké oblačnosti v hladinách kovadliny bouře než CALIPSO/CALIOP (viz následující snímek). V důsledku toho se horní hranice oblačnosti bouře jeví výrazně níže než na měření CALIOP, a naopak přestřelující vrchol se jeví výrazně vyšší oproti okolní oblačnosti.



Na tomto profilu z CALIPSO/CALIOIP je vidět výrazně více vysoké řídké oblačnosti než na profilu CloudSat/CPR, a to jak nad kovanadlinou bouře, tak v oblasti vpravo od bouře. V důsledku toho se zde přestřelující vrchol jeví znatelně méně výrazným než na CloudSat/CPR. Naopak, CALIOIP „nevidí“ pod bouří v důsledku útlumu signálu horními partiemi bouře.

Družice EarthCARE

Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer, ESA & JAXA/NICT

start: 29. 5. 2024

EarthCARE – Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer



- Společný program ESA (European Space Agency), JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) a NICT (National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo)
- přímá návaznost na družice CloudSat a CALIPSO
- start 29. května 2024 (Vandenberg, Falcon 9)
- heliosynchronní téměř kruhová nízká dráha (~ 394 km, velmi nízká oběžná dráha potřebná pro požadované rozlišení přístrojů, při které se ale výrazněji uplatňuje odpor vzduchu zbytkové atmosféry), oběžná doba 92.5 minut, sklon dráhy 97°, periodičita 25 dní
- LTDN (Local equator crossing Time on Descending Node): 14:00 místního času (brzké odpoledne – tedy o něco příznivější načasování než polední CloudSat a CALIPSO)
- předpokládaná doba života družice: cca do 2034
- spotřeba paliva (a tedy i životnost družice) bude záviset na aktuální sluneční aktivitě – zvýšení odporu zbytkové atmosféry při vyšší sluneční aktivitě; při vyšším odporu vzduchu větší spotřeba paliva pro udržení požadované dráhy

EarthCARE – přístrojové vybavení a měřené charakteristiky/jevy

Radiative flux profile in cloudy condition within $10\text{W}/\text{m}^2$ accuracy

Needs

Observation Needs/Target

Vertical profiles of extinction and characteristics of aerosols

Vertical profiles of liquid, supercooled and ice water, cloud overlap, particle size and extinction

Convective updraft and ice fall speed

Horizontal structure of clouds and aerosols

Shortwave and longwave fluxes at Top of Atmosphere

Techniques

Remote Sensing Techniques

Active

High Spectral Resolution LIDAR (HSRL)

Active

Millimeter-wave RADAR

Active

Doppler RADAR

Passive

Multispectral Imager

Passive

Broadband Radiometer

EarthCARE Instruments

ATLID

Atmospheric Lidar

CPR

Cloud Profiling Radar

MSI

Multispectral Imager

BBR

Broadband Radiometer

EarthCARE – přístrojové vybavení a geometrie snímání

EarthCARE Satellite

Sun-Synchronous Orbit (SSO)
Orbit Height approx. 393km
Orbit Inclination 97 deg.
Recurrent Period 25 days

CPR NICT JAXA

Cloud Profiling Radar

94GHz (W-band) Doppler Radar

ATLID esa

Atmospheric Lidar

355nm High Spectral Resolution Lidar (HSRL)

BBR esa

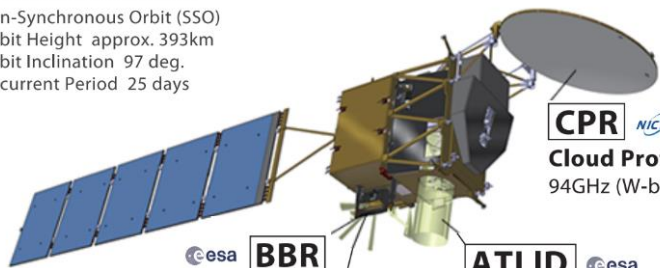
Broadband Radiometer

Radiometer for Wide Band Shortwave (SW) and Longwave (LW)

MSI esa

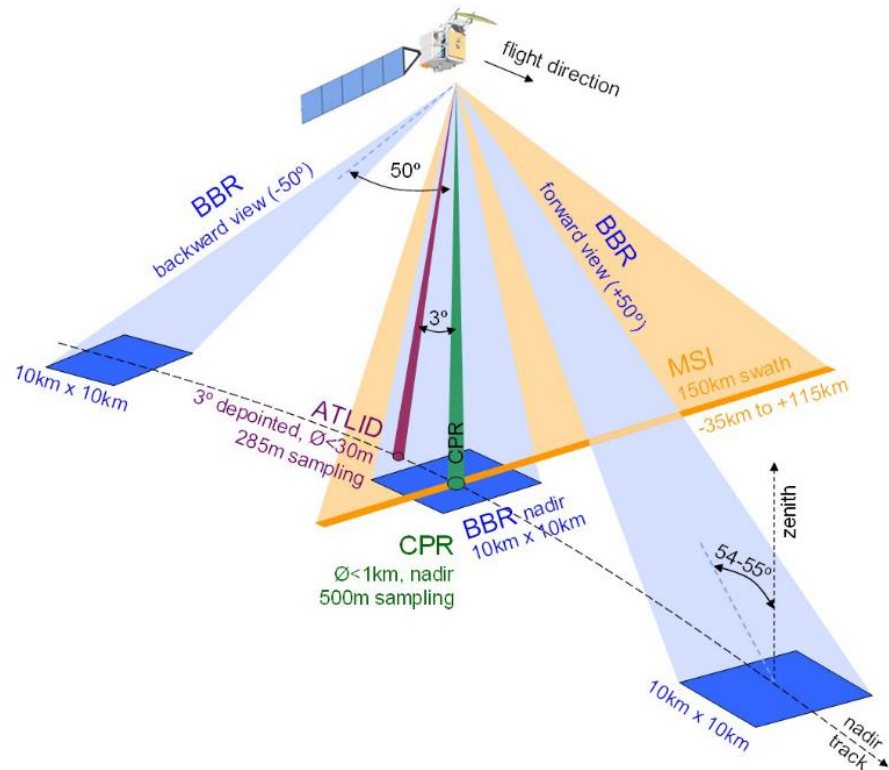
Multi-Spectral Imager

7ch Visible-Infrared Push Broom Scanner (PBS)

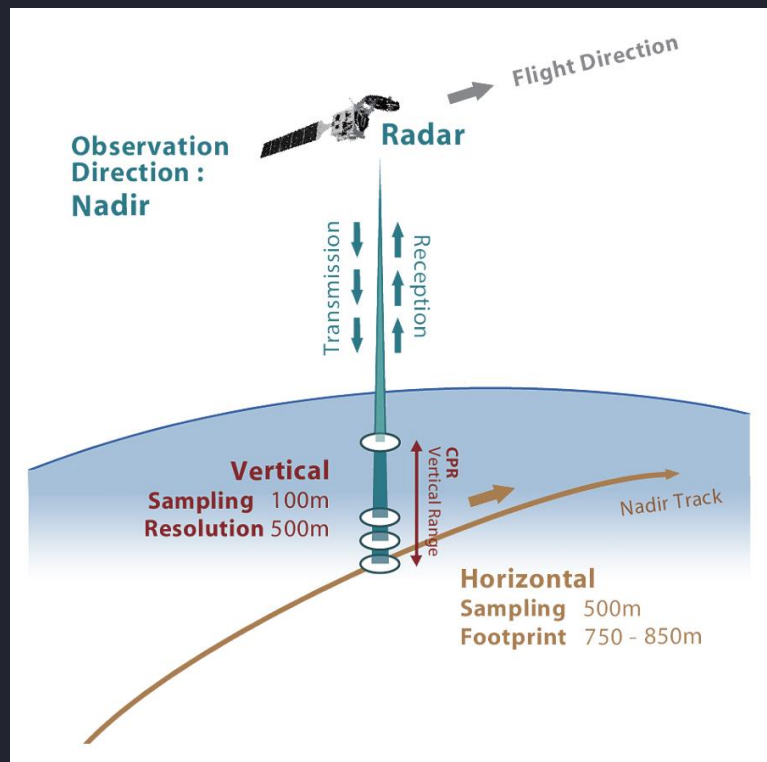


- CPR – Cloud Profiling Radar (JAXA)
- ATLID – Atmospheric Lidar (ESA)
- MSI – Multi-Spectral Imager (ESA)
- BBR – Broadband Radiometer (ESA)

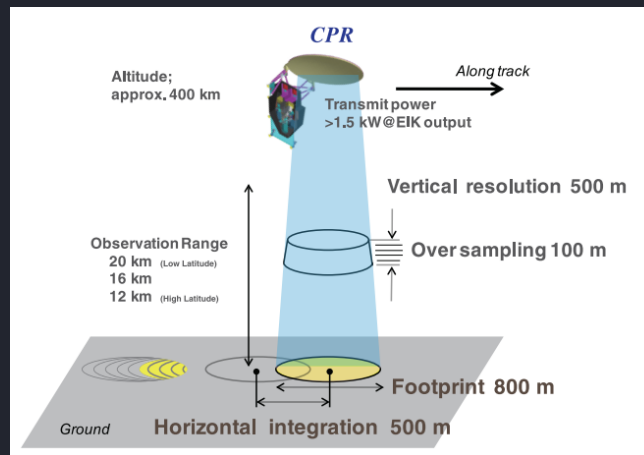
(details k jednotlivým přístrojům viz dále)



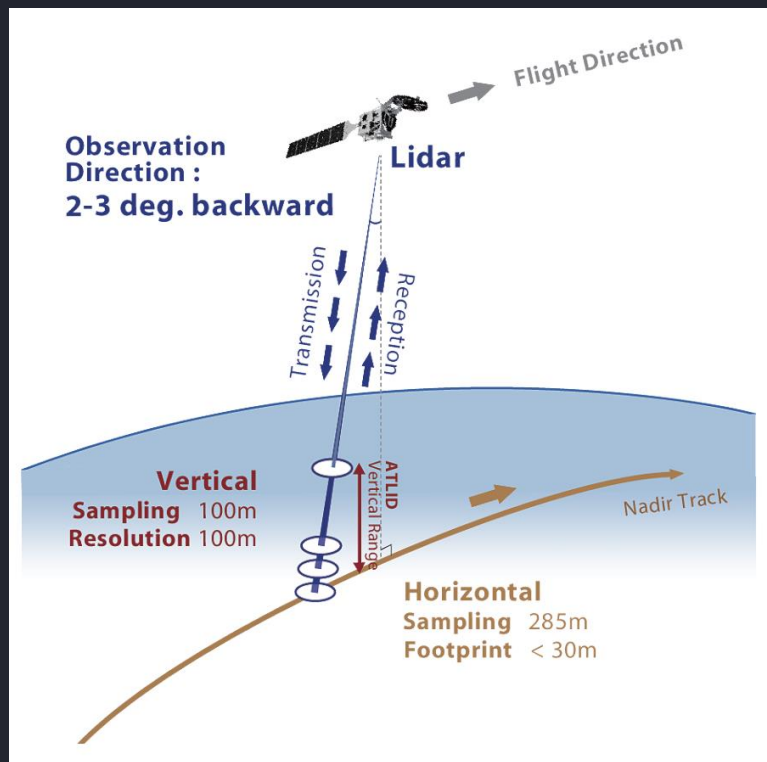
EarthCARE – CPR, Cloud Profiling Radar



- 94.05 GHz (W-pásmo) oblačný a srážkový Dopplerův radar, průměr antény radaru 2.5 m, citlivost -35 dBz, měření přesně v nadiru (kolmo na zemský povrch)
- vertikální rozsah měření – do 20 km, vertikální rozlišení 500 m, horizontální rozlišení zpracovaných dat 1 km
- rozsah dopplerovských rychlostí -10 až + 10 m/s (tedy nedostatečné pro silnější updrafty), přesnost měření 1 m/s

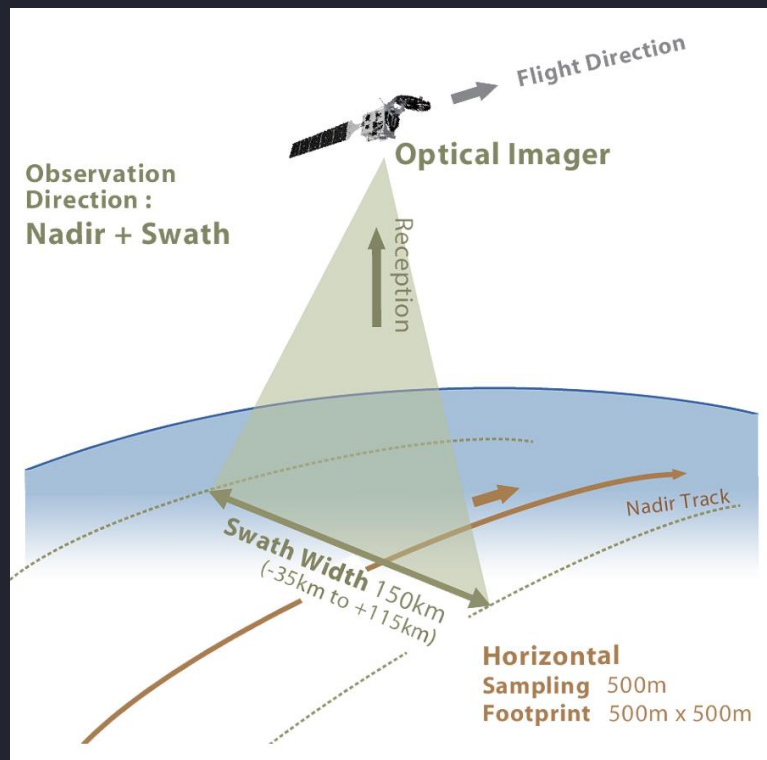


EarthCARE – ATLID, Atmospheric Lidar



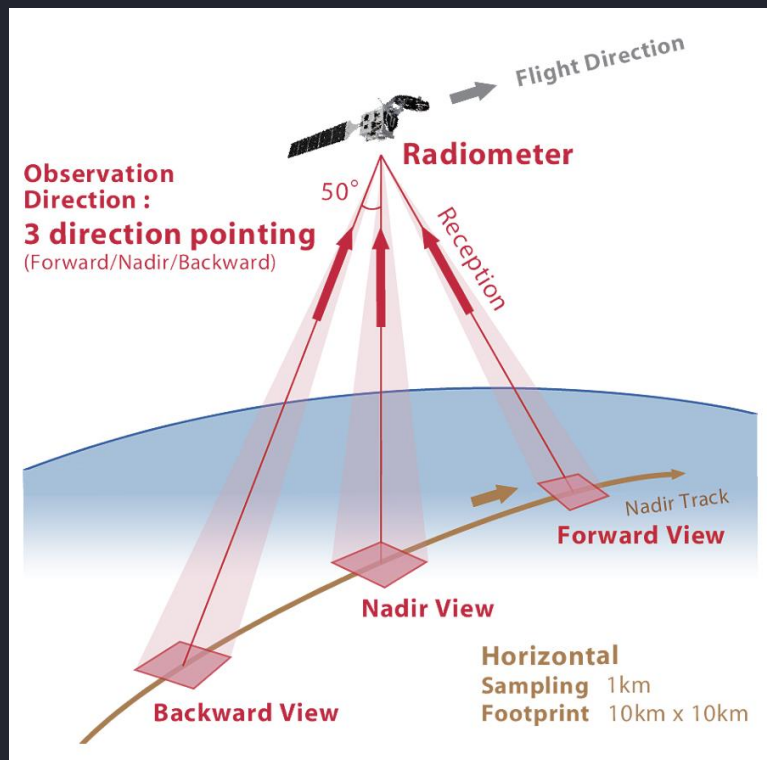
- 355 nm (UV) lidar s vysokým horizontálním rozlišením, vzorkování s horizontálním krokem 285 m a rozlišením 30 m, vertikální rozlišení 100 m
- měření odkloněno o 3° pro zamezení přímého zrcadlení na krystalech ledu (???)
- nezávislé měření molekulární extinkce a zpětného rozptylu ve dvou kolmých polarizovaných rovinách

EarthCARE – MSI, Multi-Spectral Imager



- Multispektrální radiometr, celkem 7 spektrálních kanálů: 0.67 μm , 0.865 μm , 1.65 μm , 2.21 μm , 8.8 μm , 10.8 μm a 12.0 μm
- šířka stopy (pásu měření) 150 km, odkloněná na stranu od slunce (35 km vpravo a 115 km vlevo od směru letu) pro potlačení odrazů na vodních plochách
- horizontální rozlišení (velikost pixlu) 500 x 500 m

EarthCARE – BBR, Broadband Radiometer



- Dvě spektrální pásma: 0.25 až 4.0 μm (SW) a 0.25 až 50 μm (LW)
- velikost jediného integrovaného „pixlu“ měření 10x10 km
- měření třemi teleskopy: nadir, -50° a $+50^\circ$ od nadiru
- určeno pro měření celkové radiační bilance systému země-atmosféra

EarthCARE – další informace, dostupnost dat a jejich vizualizace

Obecné informace:

<https://earth.esa.int/eogateway/missions/earthcare>

<https://www.eorc.jaxa.jp/EARTHCARE/en/index.html>

<https://space.oscar.wmo.int/satellites/view/earthcare>

<https://en.wikipedia.org/wiki/EarthCARE>

https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2011/11/EarthCARE_viewing_geometry

Data a jejich vizualizace:

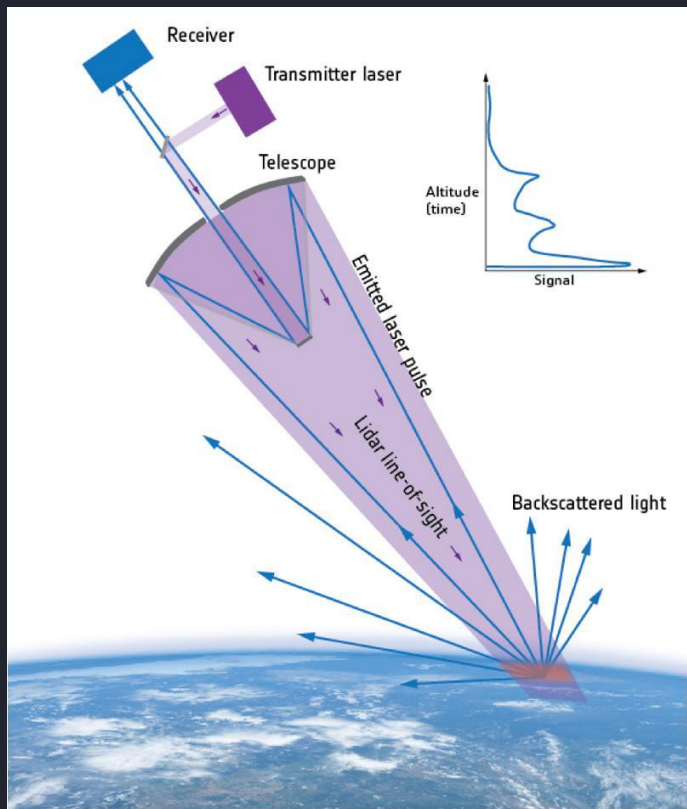
<https://earth.esa.int/eogateway/catalog/earthcare-l1-products>

<https://web.meteo.mcgill.ca/EarthCARE/>

Trajektorie družice EarthCARE (přeložená přes snímky VIIRS): [NASA Worldview](#)

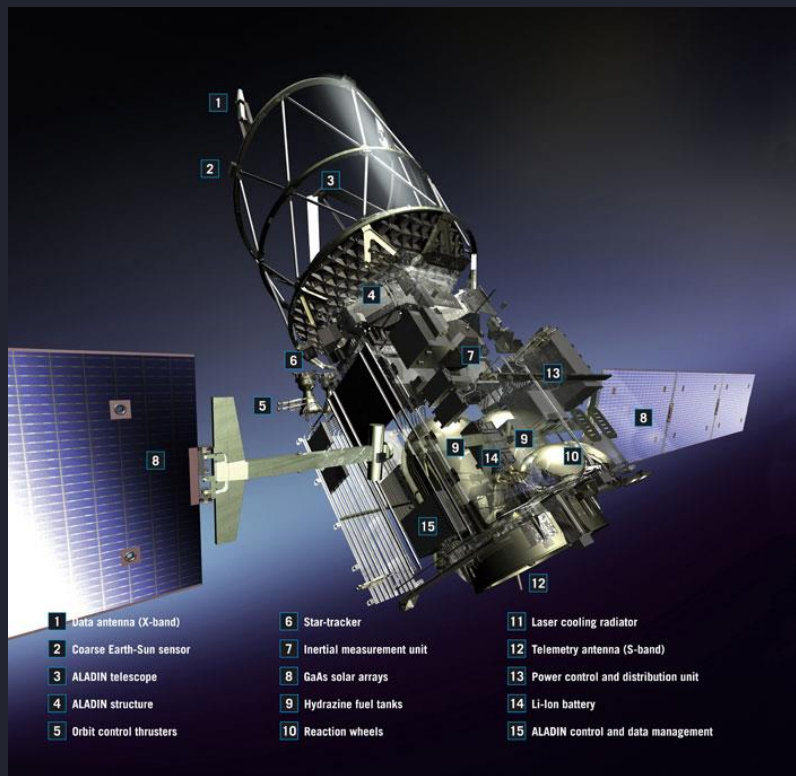
Družice Aeolus (společný program ESA a EUMETSATu)

Aeolus (ESA Earth Explorer research mission, 2018 - 2023)



- Dopplerová lidarová měření vertikálních profilů větru (proudění)
- první družice Aeolus – prototyp ESA pro vyzkoušení technologie
- především pro potřeby NWP – zejména ECMWF

EPS-Aeolus (resp. Aeolus-2) – návazný program ESA a EUMETSATu



<https://earth.esa.int/eogateway/missions/aeolus/description>

<https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/aeolus>

[https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Missions/Aeolus/\(result_type\)/videos](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Missions/Aeolus/(result_type)/videos)

https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Aeolus

Nyní (2023 - 2026) jednání o návazném operativním programu ESA (pod označením Aeolus-2) a EUMETSAT (pod označením EPS-Aeolus), přístroj DWL ([Doppler Wind Lidar](#)), který by byl rozšířením povinného programu polárních družic EUMETSATu. Schvalovací proces v rámci EUMETSATu 2026 - 2027, v případě schválení první start kolem 2030.

