

Meteorologické družice Meteosat třetí generace (MTG)

Meteosat third generation (MTG) meteorological satellites

Martin Setvák, Blanka Piskala Gvoždíková, Jindřich Štáštka

Český hydrometeorologický ústav
oddělení družicové
Generála Šišky 1/942, 143 00 Praha 412-Kamýk
✉ martin.setvak@chmi.cz

The article targets the Meteosat Third Generation (MTG) satellites, the first representative of which, MTG I1, was launched into orbit on 13 December 2022. It also describes briefly the Meteosat first and second generation satellites, the history of the MTG program preparations, and progress of development of the MTG satellites themselves. The paper also gives reasons for splitting the MTG program into two branches, MTG-Imager (MTG-I), focusing at imaging instruments, and MTG-Sounder (MTG-S), aimed at atmospheric soundings. Next, the paper focuses on detailed description of two main instruments of the MTG-I satellites, the Flexible Combined Imager (FCI) and the Lightning Imager (LI), and a brief description of two main instruments of the MTG-S satellites, the Infrared Sounder (IRS) and Sentinel-4. Furthermore, the paper also discusses commissioning of the MTG-I1 satellite and preparations for its operational use, foreseen for the end of 2023. Finally, the main expected benefits of the MTG satellites are briefly summarized.

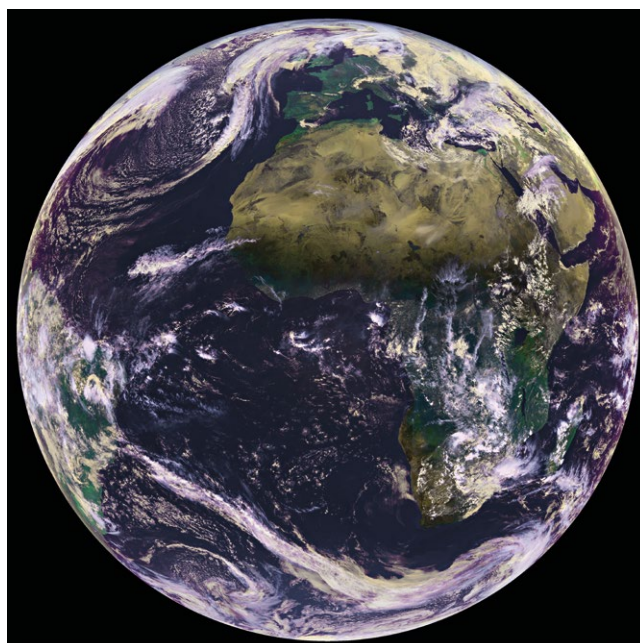
KLÍČOVÁ SLOVA: družice meteorologická – Meteosat – MSG – MTG – EUMETSAT

KEYWORDS: Meteorological satellite – Meteosat – MSG – MTG – EUMETSAT

Úvod

Dne 13. prosince 2022 byla vypuštěna nová meteorologická družice, MTG-I1, první zástupce družic Meteosat třetí generace (Meteosat Third Generation, MTG). Družice MTG navazují na předchozí dvě generace družic Meteosat, postupně provozované od roku 1977. Družice Meteosat jsou evropskými meteorologickými družicemi, financovanými a provozovanými organizací EUMETSAT (viz níže), umístěnými na geostacionární dráze – tedy zdánlivě „zavěšenými“ nad určitým pevným místem na Zemi ve výšce přibližně 35 790 km, snímajícími neustále stejnou část zemského disku. První z nich, Meteosat-1, byl vypuštěn v roce 1977 a patřil k první generaci družic Meteosat, která čítala celkem sedm družic. Data z družic Meteosat (první generace) se v ČHMÚ začala pravidelně přijímat od roku 1991

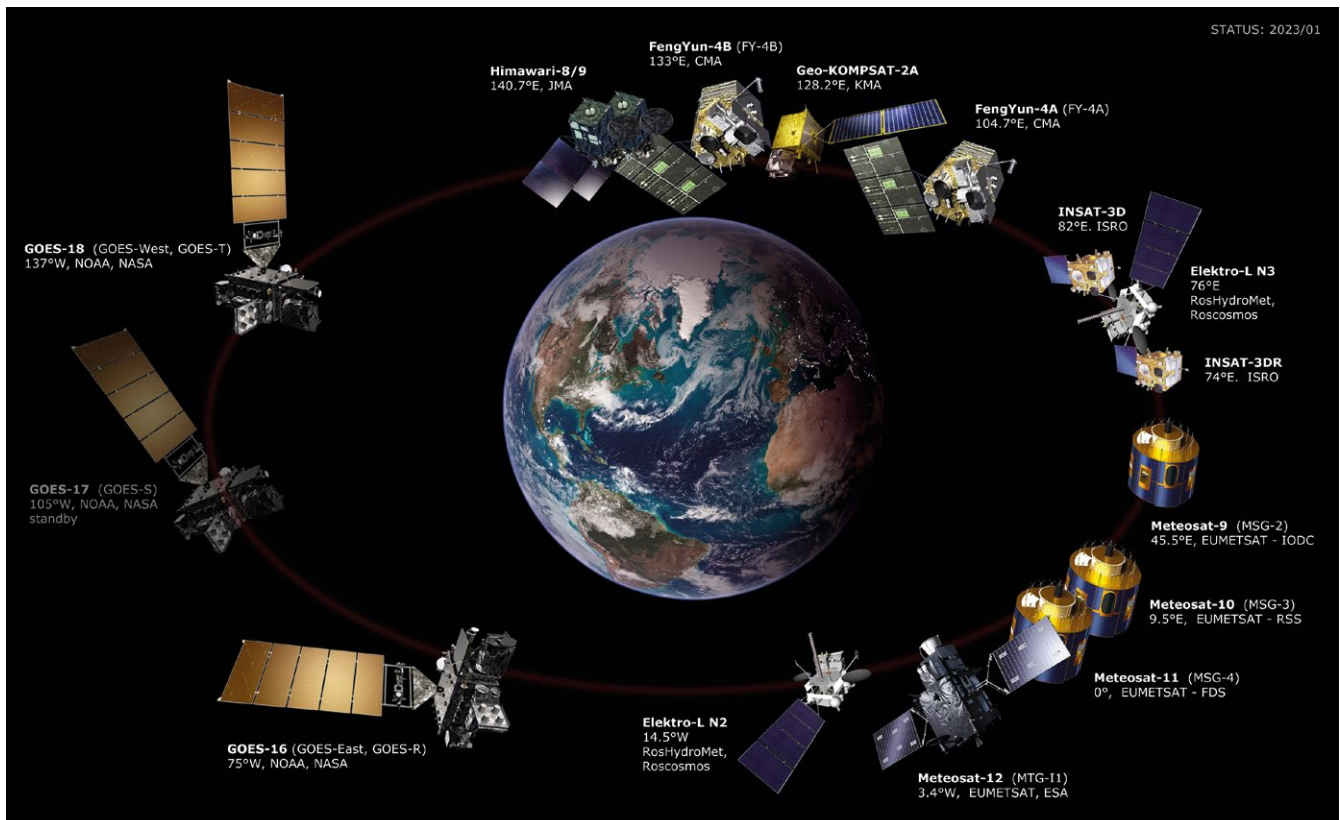
– nejdříve v analogovém režimu WEFAX (Weather Facsimile) systémem SDUS (Secondary Data User Station), od roku 1995 pak v digitálním režimu HRI (High Resolution Imagery) systémem PDUS (Primary Data User Station, Setvák et al. 1996). V srpnu 2002 byl vypuštěn první z Meteosatů druhé generace (Meteosat Second Generation, MSG – Schmetz et al. 2002; Setvák 2004), družice Meteosat-8 (MSG-1)¹; pravidelný příjem dat z MSG začal v ČHMÚ v prosinci 2004. V současnosti jsou



Obr. 1 Geografické pokrytí Země z pohledu družic Meteosat, umístěných nad průsečíkem rovníku a nultého poledníku. RGB kompozitní snímek složený z kanálů VIS 0.6, VIS 0.8 a IR 10.8 přístroje SEVIRI družic MSG, provozně v ČHMÚ označovaný jako VIS-IR produkt.

Fig. 1. Geographic coverage of the Earth as seen by Meteosat satellites, located above intersection of the equator and 0° meridian. RGB composite image of VIS 0.6, VIS 0.8 and IR 10.8 bands of the SEVIRI instrument, operationally referred to as the VIS-IR product in CHMI.

¹ Většina současných meteorologických družic má zpravidla dva názvy, resp. jména. Prvním z nich je výrobní či programové označení družice (zpravidla nějaká technická zkratka), pod kterým je družice vyvíjena, sestavována a vypouštěna na oběžnou dráhu. Druhé jméno je pak obecnější, pořadové, které je družici přiřazeno po dosažení oběžné dráhy a jejím operativním zprovozněním. Například „MSG-1“ znamená první z družic Meteosat druhé generace (MSG), „Meteosat-8“ je pak pořadové označení téže družice po jejím operativním zprovoznění, v rámci všech dosavadních družic Meteosat, bez ohledu na generaci konkrétní družice. Zdůrazňujeme, že „Meteosat“ je jménem družice, zatímco „EUMETSAT“ je zkratka názvu organizace, která družice Meteosat provozuje.



Obr. 2 Schematické rozložení v současnosti aktivních meteorologických geostacionárních družic kolem Země. U většiny družic je uvedeno jak výrobni, tak pořadové označení družice, zeměpisná délka umístění družice a její provozovatel. Grafické znázornění jednotlivých družic přibližně odpovídá jejich skutečnému vzhledu, snahou rovněž bylo zachování přibližného poměru velikostí družic. Zdroj jednotlivých obrázků družic: webové stránky jejich provozovatelů, upraveno jedním z autorů článku (MS).

Fig. 2. Schematic distribution of currently active meteorological geostationary satellites around the Earth. For most satellites, both the production and serial designations of the satellite, the longitude of the satellite's location and its operator are given. The graphical representations of the individual satellites correspond approximately to their actual appearance, and an attempt has been made to maintain an approximate ratio of satellite sizes. Source of the individual satellite images: websites of the satellite operators, modified by one of the authors of the article (MS).

aktivními družice Meteosat-10 (MSG-3) a Meteosat-11 (MSG-4, poslední ze čtyř družic série MSG), poskytující detailní meteorologické informace z oblasti Evropy, Afriky, části Jižní Ameriky a přilehlých částí Atlantského a Indického oceánu, obr. 1. Předchozí družice Meteosat-9 (MSG-2) organizace EUMETSAT provozuje nad západním Indickým oceánem, kde doplňuje pozorování starších, méně vyspělých indických družic INSAT a ruské družice Elektro-L N3. Nejstarší, Meteosat-8 (MSG-1), již byl naveden na hřbitovní dráhu (graveyard orbit), kde byl deaktivován.

Družice Meteosat jsou navrhovány, vyvíjeny, financovány a provozovány mezinárodní organizací EUMETSAT (European Organization for Exploitation of Meteorological Satellites, Evropská organizace pro využití meteorologických družic), v úzké spolupráci s organizací ESA (European Space Agency, Evropská vesmírná agentura). Sídlo organizace EUMETSAT je v německém Darmstadtu, jižně od Frankfurtu. Česká republika byla spolupracujícím členským státem EUMETSATu od roku 2005, plným členem organizace je od roku 2010. Členem ESA je ČR od roku 2008. Členství ČR v EUMETSATu je v gesci Ministerstva životního prostředí.

Družice Meteosat jsou součástí globálního pozorovacího systému Světové meteorologické organizace (World Meteorological Organization, WMO) meteorologických geostacionárních družic, jehož aktuální schéma je na obr. 2.

1. Meteosat třetí generace – historie

Historii programu Meteosat třetí generace (Meteosat Third Generation, MTG), od prvního návrhu systému navazujícího na družice Meteosat druhé generace (MSG), až po vypuštění první z družic MTG, MTG-I1, lze dohledat v systému EUMEDS (2023). Jedná se o neveřejný systém distribuce elektronických dokumentů pro jednotlivá zasedání Rady organizace EUMETSAT a jednání jejich podpůrných vědeckých, technických, administrativních a legislativních skupin, a zároveň o archiv všech obdobných dokumentů z předchozích let, od roku 1986 – rok vzniku nezávislé mezinárodní organizace EUMETSAT² – až do současnosti.

² Rada (Council) je vrcholným rozhodovacím orgánem organizace EUMETSAT. Rada se zpravidla schází dvakrát ročně (koncem jara a koncem podzimu), jednotlivé členské státy reprezentují tzv. Vedoucí delegací (Head of Delegation) nebo jmenovaní zástupci Vedoucího. Vedoucími delegací jsou zpravidla ředitelé národních meteorologických služeb. Rozhodnutím Rady předchází jednání v různých odborných podpůrných skupinách, předkládajících svá doporučení Radě. Rada schvaluje všechny povinné a volitelné programy EUMETSATu a jejich případné změny, rozpočet na jednotlivé roky, datové licenční záležitosti, kontrakty a další smlouvy uzavírané s třetími stranami, atd.

První diskuze o budoucím programu, který by nahradil systém MSG, spadají do konce roku 1999. V té době se na 43. zasedání Rady zvažuje i možnost rozšíření série družic MSG ze čtyř na šest. Tento návrh se ale nakonec (především z důvodu dalších odkladů startu MSG-1 – nakonec až na srpen 2002) neprosadil, a postupně je rozhodnuto systém MSG nahradit systémem provizorně označovaným jako „post-MSG“ program.

Na 50. zasedání Rady (květen 2002) je schválen harmonogram příprav konceptu budoucího post-MSG systému, pro který se ustaluje označení *Meteosat Third Generation*, MTG. Na tomto zasedání Rady je rozhodnuto, že přípravné studie a přípravné programy by měly proběhnout do roku 2009, dále že vývoj, výroba a testování systému MTG proběhne v období 2009–2014, a konečně že start prvního MTG se uskuteční v roce 2015.

Na 55. zasedání Rady v květnu 2004 je předložena ke schválení první verze dokumentu MTG Mission Requirements Document, ve kterém jsou shrnuty požadavky budoucích uživatelů na systém MTG. V tomto dokumentu je mj. předběžně definováno základní přístrojové vybavení družic MTG, byť částečně pod jinými názvy, než jsou ustáleny později:

- High Resolution Fast Imagery (HRFI) – snímkování (části) Země ve vysokém rozlišení a s rychlou frekvencí
- Full Disk High Spectral Resolution Imagery (FDHSI) – multispektrální snímkování celého disku Země
- Lightning Imagery (LI) – optická detekce blesků
- Infrared Sounding (IRS) – infračervená (hyperspektrální) sondáž atmosféry
- UV/Visible sounding (UVS) – sondáž atmosféry v ultrafialovém a viditelném oboru záření

Současně je schválen technický dokument, ve kterém je poprvé zmíněna možnost různého přístrojového vybavení jednotlivých družic MTG. I nadále se předpokládá připravenost MTG-1 (osazeného přístroji HRFI, FDHSI a LI) ke startu v roce 2015. HRFI a FDHSI měly být původně dva odlišné, samostatné přístroje. V této době ještě není definován počet družic MTG.

Na 56. zasedání Rady v listopadu 2004 je předložen pro informaci návrh rozdělení programu MTG na dva samostatné programy. Na 60. zasedání Rady v listopadu 2006 je odsouhlaseno sloučení HRFI a FDHSI do jediného přístroje Flexible Combined Imager (FCI) tak, jak jej známe dnes, viz níže.

Přípravný program MTG je předložen ke schválení na 62. zasedání Rady v červenci 2007, poslední členské státy, které se zdržely hlasování na samotném zasedání Rady, jej schválily dodatečně (písemně) v průběhu roku 2008.

V říjnu 2008, na 65. mimořádném zasedání Rady, je schválena finální specifikace přístrojového vybavení družic MTG. Kromě jiného, přístroj UVS je přejmenován na UVN (Ultraviolet Visible Near-infrared Sounder), alternativně označovaný jako Sentinel-4 programu GMES (Global Monitoring for Environment and Security), později přejmenovaném na program Copernicus, provozovaný Evropskou komisí. Zároveň je potvrzeno rozdělení programu MTG na dvě větve, MTG-Imager (MTG-I) a MTG-Sounder (MTG-S). Stále se předpokládá start MTG-I1 v roce 2015. Na témže zasedání Rady je schválen draft smlouvy mezi EUMETSATem a ESA o spolupráci na vývoji systému MTG.

Návrh programu MTG byl předložen ke schválení mimořádnému 69. zasedání Rady v březnu 2010. Vzhledem k tomu, že nebylo dosaženo potřebné většiny (souhlas všech členských států),

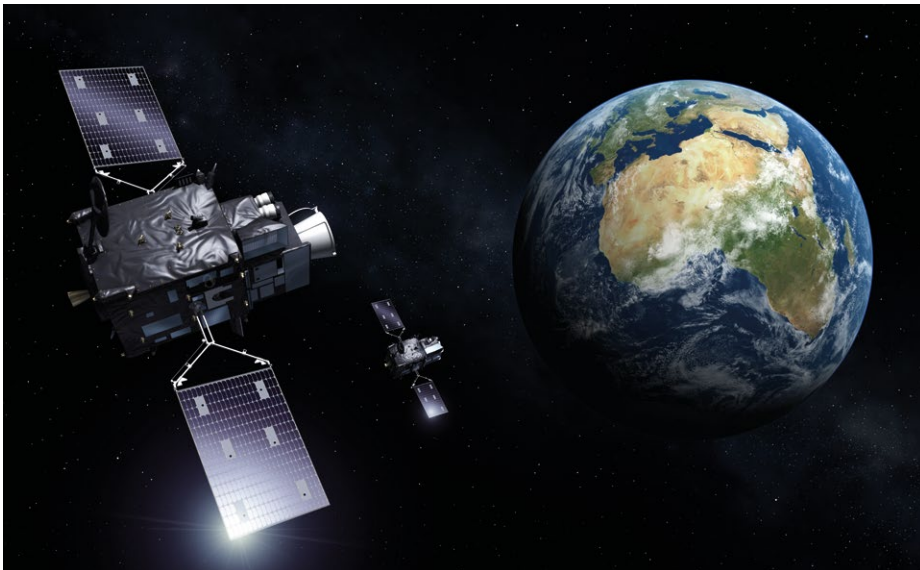
byla schválena alespoň rezoluce o budoucím programu MTG a zároveň byl prodloužen přípravný program MTG do konce roku 2011. Návrh programu MTG byl nakonec postupně schválen zbývajícími členskými státy začátkem roku 2011. Tou dobou již bylo odsouhlaseno odložení startu MTG-I1 na prosinec 2017.

Konečně, 21. 11. 2012 byla podepsána smlouva (kontrakt) mezi EUMETSATem a ESA, pokrývající vývoj a výrobu celkem čtyř družic MTG-I a dvou družic MTG-S. Následovalo období vývoje a testování jak jednotlivých přístrojů, tak samotného korpusu družice MTG-I1, doprovázené technickými problémy u všech přístrojů, což způsobilo další odklady startu MTG-I1. První z družic MTG-I nakonec odstartoval na oběžnou dráhu až 13. prosince 2022, tedy o sedm let později oproti původním plánům.

2. Základní popis a konfigurace systému MTG

Jak již bylo zmíněno výše, systém MTG je rozdělen na dvě samostatné větve, lišící se svým přístrojovým vybavením. Důvodem rozdělení je rozměr a váha jednotlivých přístrojů – pokud by všechny měly být umístěny na jediné družici, musela by tato družice být výrazně větší a těžší, čímž by enormně narostly náklady na start takovéto družice. Důvody jsou i technické – více přístrojů s krokujícími radiometry na jediné družici by znamenalo větší riziko vibrací celé družice, a tedy i potenciální ohrožení kvality měření. Posledním důvodem rozdělení bylo i rozfázování vývoje jednotlivých přístrojů pro MTG-I a MTG-S; přístroje pro MTG-I měly přednost z důvodu blížícího se konce plánované životnosti družic MSG, a tedy nutnosti jejich včasné náhrady družicemi MTG-I. **Družice MTG** – Imager („snímkovácí družice“, MTG-I) jsou osazeny dvěma přístroji pro pořizování snímků Země ve viditelném (VIS), blízkém infračerveném (NIR) až tepelném záření (IR), včetně systému pro detekci blesků. Družice **MTG – Sounder** („sondažní družice“, MTG-S) budou zaměřeny na vertikální sondáž atmosféry, zejména pro potřeby numerického modelování a monitorování chemického složení troposféry. Podrobnější informace k těmto přístrojům jsou uvedeny níže. Družice MTG budou dále osazeny systémem pro sběr a předávání dat z automatických stanic (Data Collection and Distribution Service, DCS), systémem pro příjem a re-transmisí nouzových signálů (Geostationary Orbiting Search and Rescue, GEOSAR), a přístrojem pro monitorování okolního vesmírného prostředí (Radiation Monitoring Unit, RMU). Více informací a především odkazy na další literaturu zaměřenou na tyto přístroje viz např. Holmlund et al. 2021.

Třetí generace družic *Meteosat* se zásadně liší od předchozích dvou generací svou konstrukcí. Jak první, tak druhá generace *Meteosatů* měla tvar válce, rotujícího rychlostí 100 otáček za minutu podél své osy, rovnoběžné se zemskou osou rotace. Tato rotace zajišťovala stabilizaci družice v prostoru, a zároveň byla základem mechanismu snímání Země. To sice znamenalo poměrně vysokou spolehlivost družic a jejich jednodušší konstrukci, zároveň to ale značně omezovalo možnosti umístění dalších přístrojů na tyto družice. Třetí generace přichází se zcela odlišným konceptem – družice mají tvar nepravidelného kvádra, v prostoru jsou stabilizovány gyroskopicky (systémem pěti interních setrvačníků), což umožňuje umístění více přístrojů na jedinou družici. Družice MTG vyvíjí a vyrábí francouzská firma Thales Alenia Space, která je montuje z dílčích komponent dodaných dalšími subjekty z členských států ESA. Kromě výše zmíněných přístrojů jsou družice MTG dále vybaveny standardními systémy pro komunikaci s řídicím centrem a pro přenos naměřených dat, systémem pro navigaci a orientaci družice v prostoru, pohonnými motory pro manévry



Obr. 3 Schematické zobrazení družic MTG. Zdroj ESA.

Fig. 3. Schematic representation of MTG satellites. Source ESA.



Obr. 4 Fotografie družice MTG-I1 při její přípravě na start. Zdroj ESA.

Fig. 4. Photo of MTG-I1 satellite during its preparation for launch. Source ESA.



Obr. 5 Start družice MTG-I1 13. prosince 2022 pomocí nosiče Ariane 5 z evropského kosmodromu Kourou ve Francouzské Gyaně. Zdroj ESA a ArianeSpace.

Fig. 5. Launch of MTG-I1 satellite on 13 December 2022 with Ariane 5 Launcher from Europe's Kourou spaceport in French Guiana. Source ESA and ArianeSpace.

vání na oběžné dráze, solárními panely a bateriemi atd. Startovní váha družice je přibližně 3,8 tuny, z čehož cca 2 tuny činí palivo. Plánovaná životnost jednotlivých družic je 8,5 roku, přičemž reálná doba provozu bývá zpravidla výrazně delší. Celková doba, po kterou by systém družic MTG měl být provozován, je minimálně 20 let. Vzhled družic MTG je znázorněn na obr. 3 a 4.

Družice MTG-I1 byla vynesena na oběžnou dráhu 13. prosince 2022 pomocí evropského nosiče Ariane 5 z evropského kosmodromu Kourou ve Francouzské Gyaně, obr. 5. Jednalo se zároveň o jeden z posledních startů rakety Ariane 5, která bude nahrazena nosičem nové generace, raketou Ariane 6, jejíž první, testovací start je v současnosti plánován na konec letošního roku (2023).

Systém družic MTG bude kompletním (plně operativním) až po vypuštění prvních dvou družic MTG-I a první družice MTG-S. Jedna z družic MTG-I, umístěná nad nultým poledníkem, bude snímat přístrojem FCI celý zemský disk každých 10 minut; druhá družice MTG-I, umístěná na poloze 9,5° v. d., bude snímat nejsevernější čtvrtinu zemského disku s krokem 2,5 minuty (podrobnosti níže). Družice MTG-S budou umístěny mezi nimi.

Starty družic MTG-S1 a MTG-I2 by se měly uskutečnit (v tomto pořadí) mezi koncem roku 2024 až 2026, přičemž jejich start je zatím plánován pomocí nosičů Ariane 64 (verze Ariane 6 se čtyřmi přidavnými motory). Vzhledem ke zpoždění a vývoji tohoto nosiče však panují jisté obavy o reálnost těchto termínů, a i s ohledem na životnost dosluhujících Meteosatů 10 a 11 se začíná diskutovat možnost využití komerčního nosiče společnosti SpaceX. Rovněž je diskutováno pořadí startů těchto dvou družic, je možné že nakonec bude jako další v pořadí startovat družice MTG-I2.

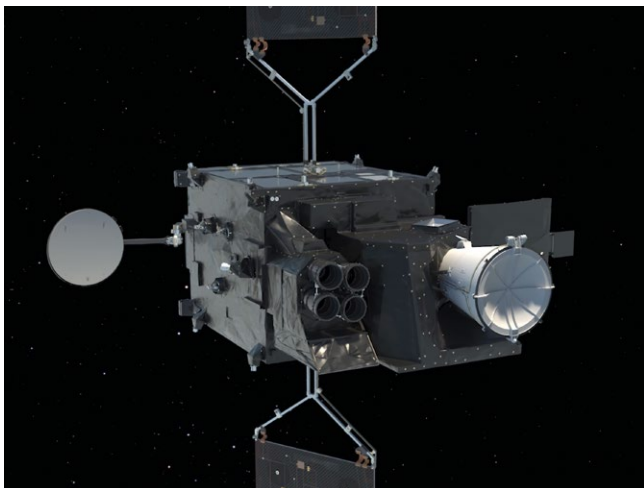
Následovat budou ještě družice MTG-S2, MTG-I3 a MTG-I4, jejichž termíny startů zatím nebyly upřesněny. Třetí generace Meteosatů by měla sloužit do poloviny až konce 40. let, kdy bude postupně nahrazena generací čtvrtou.

3. MTG – Imager (MTG-I)

Jak již název této větve družic MTG napovídá, jejím hlavním zaměřením je pořizování snímků Země – jednak celého zemského disku 16 kanálovým multispektrálním radiometrem **Flexible Combined Imager**, FCI, jednak přístrojem pro optickou detekci blesků **Lightning Imager**, LI. Na obr. 6 (pohled na přední část družice, mířící trvale k zemskému disku) je vidět rozmístění obou přístrojů: LI je umístěn v tomto pohledu vlevo, FCI vpravo. Z obou přístrojů vystupují do prostoru pouze kuželovité (sluneční) clony, omezující nežádoucí parazitní záření pocházející z oblastí mimo záběr přístrojů. Přístroj FCI má tuto clonu pouze jednu, LI celkem čtyři. Detaily obou přístrojů viz níže.

3.1 Flexible Combined Imager (FCI, flexibilní kombinovaný snímkovací radiometr)

Většina radiometrů soudobých meteorologických geostacionárních družic nepořizuje snímek Země najednou, velkoplošnými snímači – jaké se např. používají v digitálních fotoaparátech, ale postupným skenováním zemského disku po obrazových řádcích, resp. skupinách řádků, které jsou při sní-

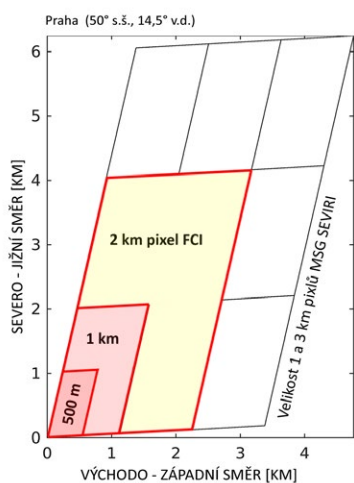


Obr. 6 Pohled na přední část družic MTG-I. Zdroj ESA.

Fig. 6. Front part of the MTG-I satellites. Source ESA.

mání zaznamenávány po jednotlivých pixlech. Proto se těmto typům přístrojů říká skenující radiometry. Výjimkou z tohoto principu jsou například přístroje pro detekci bleskové aktivity, např. níže popsaný Lightning Imager (LI), kdy je velká část zemského disku sledována a snímána velkoplošnými senzory kontinuálně, najednou.

Skenující radiometry geostacionárních družic tedy musí mít možnost měnit směr pohledu ve dvou osách, od východu na západ a od severu k jihu (či opačně). U Meteosatů první a druhé generace byl, resp. je pohyb snímání od východu k západu zajištěn rotací celé družice, pohyb od jihu k severu pak postupně měněným náklonem jediného velkého rovinného zrcadla, umístěného před dalekohledem radiometru. Naproti tomu u družic MTG-I, které jsou vůči Zemi orientovány trvale stejnou svou stranou, nahrazuje rotaci družice druhé rovinné zrcadlo, postupně rovněž měnící svůj náklon. V případě přístroje FCI je Země snímána od východu k západu a od jihu k severu, viz animace metod snímání dostupné na www.eumetsat.int/mtg-flexible-combined-imager-fci. Přístroj FCI družic MTG je přímým nástupcem radiometru SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) družic MSG (Setvák 2004).



Obr. 7 Schematické znázornění velikosti pixlů SEVIRI a FCI pro oblast ČR. Černými čarami je znázorněno rozlišení (velikost pixlů přístroje promítnutých do ekvidistantní 1 km sítě) 1 a 3 km kanálů SEVIRI MSG, červeně totéž pro přístroj FCI družic MTG. Sklon (šikmost) pixlů závisí na poloze (zeměpisné délce) družice nad rovníkem. Zde počítáno pro polohu družice na nultém poledníku.

Fig. 7. Schematic representation of SEVIRI and FCI pixel sizes for the Czech Republic. Black lines represent resolution (size of the

instrument pixels projected onto equidistant 1 km grid) of 1 and 3 km SEVIRI MSG channels, red lines show the same for the FCI instrument of MTG satellites. The slope (inclination) of the pixels depends on the position (longitude) of the satellite above the equator. The position of the satellite above the zero meridian has been used.

Přístroj FCI má dva základní režimy snímání: Full Disc Scanning Service (FDSS) – snímání celého zemského disku s krokem 10 minut, a Rapid Scanning Service (RSS) – snímání nejsevernější části zemského disku (přibližně ¼ disku) s krokem 2,5 minuty. Pro FDSS je možné se setkat i s alternativním zkráceným označením FDS (Full Disc Service), FSS (Full Scan Service) či FES (Full Earth Scanning Service), a to i ve formálních dokumentech. Přístroje FCI lze používat v jednom nebo druhém režimu, nikoliv však současně. Z tohoto důvodu pro zajištění obou služeb (FDSS a RSS) je zapotřebí dvou družic. Právě z důvodu dvou možných režimů snímání a různého rozlišení je přístroj pojmenovaný jako flexibilní a kombinovaný.

Přístroj FCI snímá v 16 spektrálních kanálech, rozepsaných v tab. 1. Označení kanálu, resp. jeho název kombinuje písmeny vlastnost daného kanálu (spektrální pásmo, ve kterém se nachází), číselně pak je vyznačena střední vlnová délka kanálu. Rovnou dodejme, že označení kanálů VIS 0.8 a VIS 0.9 není fyzikálně správné, jedná se již o blízké infračervené záření, správně by tedy měly být označeny jako NIR 0.8 a NIR 0.9, a podobně IR 3.8 se rovněž ještě nalézá v NIR pásmu. Nicméně takto byly jednotlivé kanály označeny již v zadávací dokumentaci družice a nebylo možné dodatečně označení změnit. Každopádně kanály od VIS 0.4 do IR 3.8 pracují ve spektrální oblasti odraženého slunečního záření, a od IR 3.8 do IR 13.3 v tepelném IR pásmu. Kanál IR 3.8 tak v denních hodinách pracuje jak s odraženým slunečním zářením, tak s tepelným vyzařováním. V případě silných požárů se tepelná složka může uplatnit i v kanálech NIR 1.6 a NIR 2.2.

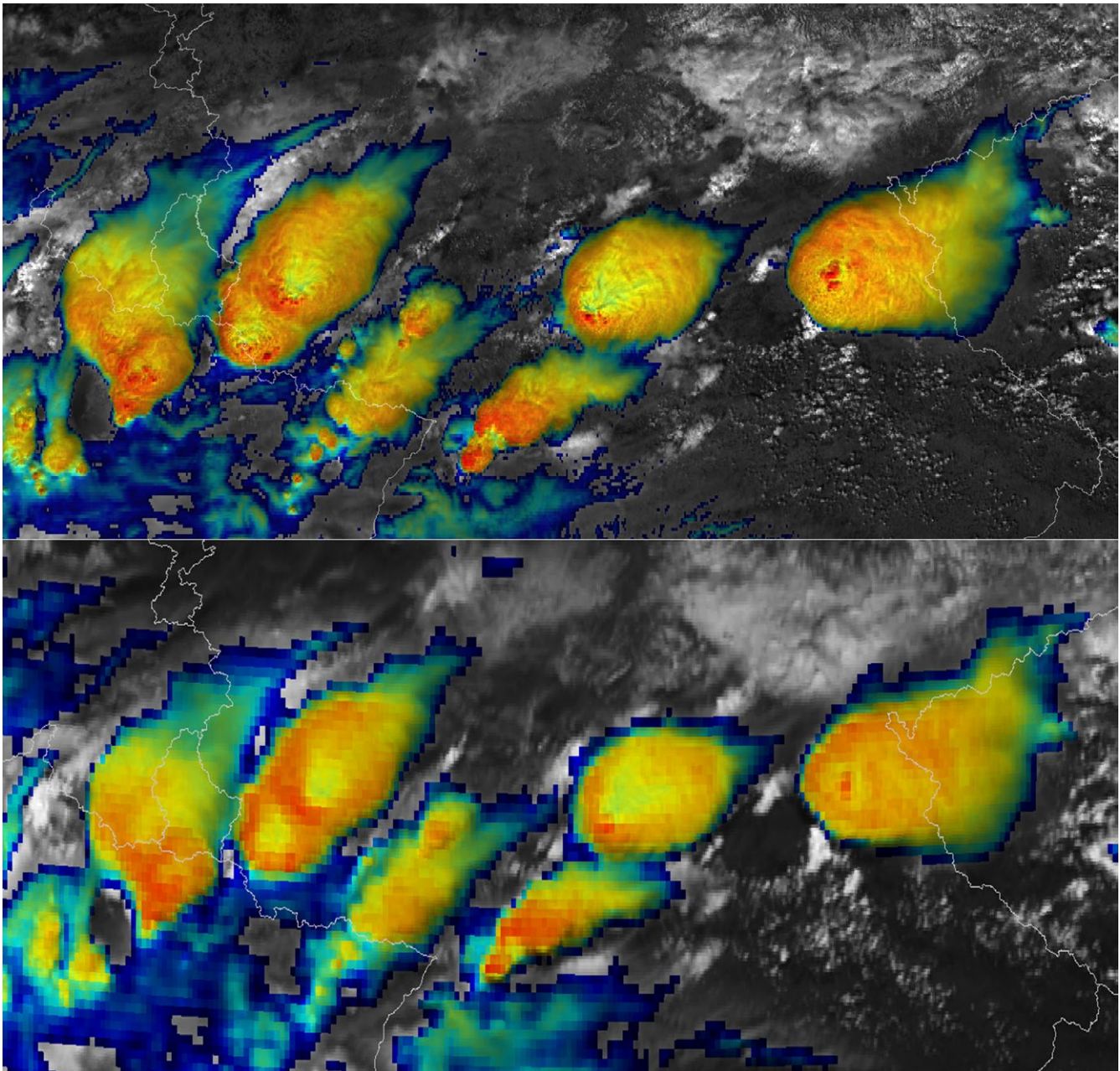
V posledním sloupci tabulky je uvedeno geometrické rozlišení FCI pro nadir družice (oblast na zemském povrchu, kterou družice snímá kolmo k povrchu). Pro oblast střední Evropy, kterou družice snímá již šikmo, je rozlišení deformované ve směru pohledu, pro ČR přibližně na dvojnásobek. Družice snímá část kanálů, ve VIS a NIR oblastí, s rozlišením 1 km v nadiru, ve zbývajících kanálech v rozlišení 2 km. Ve čtyřech kanálech bude družice snímat s dvakrát lepším rozlišením, 0,5 a 1,0 km, tato data však budou distribuována v reálném čase pouze v režimu RSS.

Vylepšené rozlišení přístroje FCI oproti SEVIRI by mělo mít pozitivní dopady pro detekci jak jevů menšího měřítko – např. úrodních mlh, přesnější detekci a lokalizaci požárů, tak přede-

Tab. 1 Spektrální kanály přístroje FCI.

Table 1. FCI spectral bands.

Označení kanálu (v nadiru družice)	Střední vlnová délka	Rozlišení
VIS 0.4	0,444 μm	1 km
VIS 0.5	0,510 μm	1 km
VIS 0.6	0,640 μm	1 km FDS / 0,5 km RSS
VIS 0.8	0,865 μm	1 km
VIS 0.9	0,914 μm	1 km
NIR 1.3	1,380 μm	1 km
NIR 1.6	1,610 μm	1 km
NIR 2.2	2,250 μm	1 km FDS / 0,5 km RSS
IR 3.8	3,800 μm	2 km FDS / 1,0 km RSS
WV 6.3	6,300 μm	2 km
WV 7.3	7,350 μm	2 km
IR 8.7	8,700 μm	2 km
IR 9.7 (O_3)	9,660 μm	2 km
IR 10.5	10,50 μm	2 km FDS / 1,0 km RSS
IR 12.3	12,30 μm	2 km
IR 13.3 (CO_2)	13,30 μm	2 km



Obr. 8 Porovnání rozlišení přístroje FCI (MTG) a snímku SEVIRI (MSG). Simulace FCI (horní snímek) je vygenerována z dat VIIRS družice S-NPP (11. 6. 2018, 11:38 UTC) pro rozlišení 0,5 × 1,0 km pro snímek ve viditelném oboru a 1 × 2 km pro barevně zvýrazněný tepelný snímek. Spodní snímek je reálným snímek z přístroje SEVIRI družice Meteosat-10 (MSG-3) z téhož termínu, data RSS.
 Fig. 8. Comparison of resolution of the FCI instrument (MTG) and the SEVIRI image (MSG). The FCI simulation (top image) was generated from VIIRS data of the S-NPP satellite (11 June 2018, 11:38 UTC) for a resolution of 0.5 × 1.0 km for the visible band and 1 × 2 km for the colour highlighted thermal image. The bottom image is a real image from SEVIRI instrument of the Meteosat-10 (MSG-3) satellite, from the same date and time, RSS data.

vším pro exaktnější monitorování detailů vlastností konvektivních bouří pro potřeby nowcastingu. Na obr. 8 je simulace očekávaného rozlišení přístroje FCI, vygenerovaná z dat přístroje VIIRS polární družice NPP (Setvák 2022), v porovnání se snímkem ze stejného času z přístroje SEVIRI družice MSG. Je zřejmé, že simulovaný snímek FCI zobrazuje horní hranici oblačnosti bouří výrazně detailněji než reálný snímek z přístroje SEVIRI. Je však otázkou, jak dalece se reálné snímky z FCI budou blížit těmto simulacím, zda se v nich nebudou projevovat některé artefakty dané odlišným mechanismem snímání a zpracování.

Oproti svému předchůdci, přístroji SEVIRI družic MSG, má FCI navíc následující kanály:

- VIS 0.4 a VIS 0.5 – společně s kanálem VIS 0.6 umožní tvorbu RGB snímků v pravých barvách a lepší detekci aerosolů
- VIS 0.9 – detekce celkového sloupce vodní páry v troposféře (precipitable water)
- NIR 1.3 – detekce velmi řídkých cirů, některých aerosolů a prachu, přízemní pole vlhkosti

Kanála IR 3.8 je oproti svému předchůdci na přístroji SEVIRI (IR 3.9) mírně posunut do kratší vlnové délky, mimo oblast absorpce vodní páry a CO₂ v pásmu nad 4 μm. Ostatní kanály zůstávají stejné nebo téměř stejné jako na SEVIRI, tedy včetně svých vlastností.

Data z přístroje FCI jsou označována dle úrovně zpracování následně:

- Level 0 – surová data naměřená přístrojem FCI, bez jakéhokoliv dalšího zpracování
- Level 1a – základní technické zpracování surových dat po jejich příjmu řídicím centrem EUMETSATu
- Level 1b – předchozí data doplněná o geografické a kalibrační údaje
- Level 1c – předchozí data převedená do pravoúhlé obrazové matice, určená k distribuci koncovým uživatelům
- Level 2 – zpracované odvozené meteorologické (a jiné) produkty, určené k distribuci koncovým uživatelům

Data z přístroje FCI budou koncovým uživatelům distribuována v reálném čase systémem EUMETCast (EUMETSAT Multicast Distribution System). Jedná se o distribuční systém družicových dat, který je využíván také pro distribuci dat Meteosatů druhé generace. Detailněji je systém EUMETCast popsán v práci Setváka (2004). Pochopitelně od zahájení využívání tohoto typu přenosu došlo k několika vylepšením jako je např. změna standardu na DVB-S2, která umožňuje vyšší propustnost dat. Výrazně vyšší očekávaný objem dat z Meteosatů třetí generace bude ale i tak pro systém EUMETCast výzvou. I to je jedním z důvodů proč EUMETSAT hledá další způsoby distribuce dat. Kromě systému EUMETCast realizovaného pomocí komerčních telekomunikačních družic (přesněji by tedy mělo být užíváno označení EUMETCast Satellite) je již v současné době provozován i přenos pomocí internetu, označovaný jako EUMETCast Terrestrial. I zde se jedná o distribuci v reálném čase, ovšem stále ještě je tato služba považována za demonstrační a hlavním typem přenosu zůstává EUMETCast Satellite. Dále se rozvíjejí i služby pro distribuci dat archivních, kde pomocí tzv. EUMETSAT Data Store (data.eumetsat.int) se výrazně zpřehledňují a rozšiřují možnosti stahování těchto dat.

3.2 Lightning Imager (LI, přístroj pro optickou detekci blesků)

Přístroj LI bude prvním svého druhu na družicích Meteosat. Na geostacionární dráze doplní další podobné přístroje pro optickou detekci blesků – Geostationary Lightning Mapper (GLM) na amerických družicích GOES (Goodman et al. 2013) a Lightning Mapping Imager (LMI) na čínských FY-4 (Yang et al. 2017). Všechny tyto přístroje staví na zkušenostech z nízké oběžné dráhy Země, kde historie optické detekce blesků sahá do roku 1995 (Boccippio et al. 2000). V současnosti jsou data z nízké oběžné dráhy dostupná díky přístroji LIS (Lightning Imaging Sensor), který je umístěn na Mezinárodní vesmírné stanici (ISS, NASA 2017). Data LIS a podobných přístrojů jsou zásadní pro pochopení globální klimatologie blesků; díky možnosti kontinuálního snímání na geostacionární dráze se ale hlavním cílem mise LI (a také GLM a LMI) stává monitoro-

Tab. 2 Seznam produktů LI.

Table 2. List of LI products.

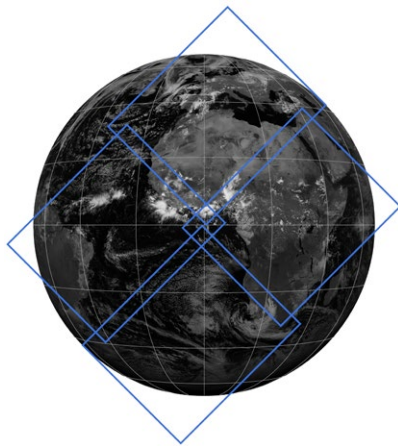
	Název	Rozlišení	Časový krok akumulace	Popis
Prvotní produkty	Dílčí detekce (events)	LI pixel	10 s	optické pulzy způsobené bleskovou aktivitou (na úrovni jednotlivých pixelů)
	Skupinové detekce (groups)	LI pixel	10 s	kolekce sousedních pixelů dílčí detekce, které se vyskytly ve stejném čase
	Blesky (flashes)	LI pixel	10 s	kolekce skupin vzdálených prostorově do 16,5 km a časově do 330 ms
Akumulované produkty	AFA (accumulated flash area)	FCI IR pixel	30 s	počet blesků v jednotlivých pixlech
	AF (accumulated flashes)	FCI IR pixel	30 s	akumulace podílu dílčích detekcí na jejich celkovém počtu v blesku v jednotlivých pixlech
	AFR (accumulated flash radiance)	FCI IR pixel	30 s	akumulovaná hodnota energie detekovaná v jednotlivých pixlech

vání bleskové aktivity pro potřeby numerické předpovědi počasí a hlavně nowcastingu konvektivních bouří.

Jak je patrné z obr. 6, přístroj LI se skládá ze čtyř samostatných detektorů, kamer, které dohromady vidí asi 84 % zemského disku pozorovatelného z geostacionární dráhy (obr. 9). Snímky s rozlišením 4,5 km v nadiru získává z celého zorného pole jednou (tzn. bez postupného skenovacího mechanismu) s frekvencí 1 kHz, a to pouze v jednom úzkém spektrálním kanále se střední vlnovou délkou 777,4 nm. Tato vlnová délka je spektrální čarou (tripletem) atomárního kyslíku, emitovanou při bleskových výbojích (EUMETSAT 2020). Používá se na všech obdobných přístrojích z důvodu vysokého kontrastu světelného záblesku blesku oproti ostatnímu záření v atmosféře (přirozenému pozadí), což výrazně zvyšuje efektivitu a spolehlivost optické detekce blesků.

Každý snímek se zpracovává na družici v reálném čase pro detekci optických pulsů, které se definují jako náhlé zvýšení energie detekované přístrojem LI v jednotlivých pixlech obrazu v porovnání s pozadovým snímekem. Detekované optické pulzy jsou kombinací skutečných záblesků a falešného signálu nebo šumu, způsobeného např. mikrovibracemi přístroje nebo vysokoenergetickými částicemi dopadajícími na detektory LI, případně záblesky bolidů (Jenniskens 2018). Šum zpočátku převažuje a je ho potřeba odfiltrovat. První filtrace probíhá již na družici, a to kvůli snížení celkového množství dat, která mají být vysílána k dalšímu zpracování do řídicího centra EUMETSATu, kde jsou poté uložena ve formátu Level 0. Následnou filtrací a doplněním o geografické a kalibrační údaje vznikají Level 1b data – dílčí detekce na úrovni jednotlivých pixelů (v angličtině označované jako events, EUMETSAT 2020).

Koncovým uživatelům budou data dílčí detekce dostupná na úrovni Level 2, která jsou vybraná k dalšímu zpracování – slučování do skupin (groups) a jednotlivých blesků (flashes), viz obr. 10, a k tvorbě akumulovaných produktů převedených do referenční 2 km sítě odpovídající FCI. Kompletní seznam dostupných produktů z přístroje LI (všechna Level 2 data) včetně jejich popisu je k dispozici v tab. 2; Level 2 dílčí detekce budou pouze archivovány, ostatní produkty budou distribuovány v téměř reálném čase systémem EUMETCast (plánovaná latence



Obr. 9 Zorné pole přístroje LI. Podklad tvoří kanál VIS 0.8 družice MSG, který je aktuálně nejbližší spektrálnímu kanálu využívanému přístrojem LI.

Fig. 9. Field of view of the LI instrument. The VIS 0.8 channel of the MSG satellite is displayed in the background, being the closest to the spectral channel used by the LI instrument.

distribuce dat je 30 s). Nastavení parametrů jednotlivých produktů se může v budoucnu upřesňovat. Obr. 10 schematicky znázorňuje tvorbu skupin a blesků z dat dílčí detekce.

Přes horší rozlišení dat v porovnání s pozemními sítěmi je výhodou optické detekce z družic především možnost kontinuálního snímání bleskové aktivity nad oceány, kde se přirozeně nachází méně pozemních čidel pro detekci bleskových výbojů. Svou podstatou jsou data optické detekce blesků z družic velice odlišná od pozemní detekce a odrážejí spíše celkovou bleskovou aktivitu bez rozlišení toho, jestli se jedná o blesk uvnitř oblaku, mezi oblaky nebo mezi oblakem a zemí. Proto bude důležité jejich vzájemné srovnání včetně účinnosti detekce přístrojů. Na rozdíl od pozemní detekce, která není závislá na denní době, je spolehlivost družicové detekce blesků vyšší v nočních hodinách díky většímu kontrastu mezi pozadovým signálem a optickými pulzy. To potvrzují i data z přístroje GLM, který vykazuje průměrnou účinnost detekce kolem 70 %, v noci však kolem 90 % (Zhang, Cummins 2020).

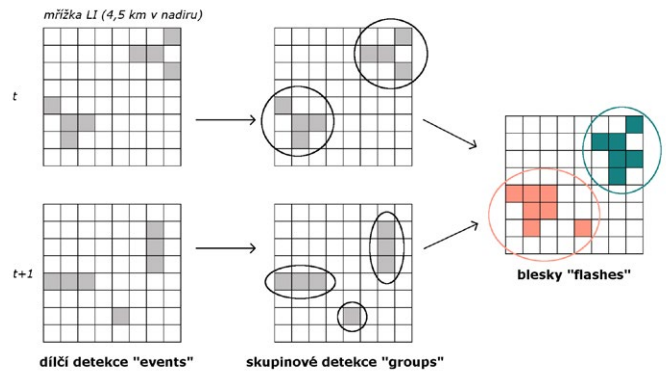
Od přístroje LI nelze očekávat detekci jevů typu TLE (Transient Luminous Events), krátkodobých světelných záblesků nad vrcholy konvektivních bouří ve stratosféře až mezofosféře (ČMeS 2017). Ty jsou svým jasnem výrazně slabší než „klasické“ blesky, jsou viditelné pouze proti tmavé obloze a nikoliv proti bleskem nasvícené kovančině bouří.

4. MTG – Sounder (MTG-S)

Druhá větev družic MTG, zaměřená na vertikální sondáž atmosféry z oběžné dráhy Země, je vybavena dvěma přístroji:

- **Infrared Sounder (IRS)** je hyperspektrální Michelsonův krokující interferometr (fungující metodou „stop and stare“)³, snímající v cca 900 kanálech v pásmu 4,44–6,25 μm (označovaném MWIR, Middle Wavelength Infrared, střední infračervené záření) a cca 800 kanálech v pásmu 8,26–14,70 μm (označovaném LWIR, Long Wavelength Infrared, dlouhovlnné infračervené záření). Geometrické rozlišení IRS bude 4 x 4 km v nadiru, resp. 4 x 8 km pro oblast střední Evropy.

³ Jedná se o metodu snímání, kdy přístroj postupně krokujícím mechanismem (náklonem dvou rovinných zrcadel) mění oblast snímání senzorem o velikosti 160x160 pixelů, přičemž nad každou oblastí se na krátkou dobu (cca 10 s) zastaví, v každém z pixelů provede měření interferogramu (Level 0 data), která jsou po kompresi odeslána do řídicího centra k dalšímu zpracování. Rozlišení dílčích pixelů bude pro oblast střední Evropy přibližně 5x8 km.



Obr. 10 Schéma zpracování prvotních produktů LI v čase t a t+1.

Fig. 10. Schematic of primary LI products processing in time t and t+1.

Obdobné přístroje jsou provozovány již řadu let na některých z polárních družic (AIRS na družici Aqua, IASI na družicích Metop, CrIS na družicích S-NPP a JPSS), a na čínských geostacionárních družicích série FY-4. Měřeními (resp. odvozenými) daty budou vertikální profily teploty a vlhkosti troposféry a stratosféry a nepřímé odhady celkového množství troposférického ozónu a oxidu uhelnatého. Pro oblast snímánu družicemi Meteosat se bude jednat o vůbec první takový přístroj. Zemský disk bude rozdělen na 4 oblasti, přičemž z nejsevernější z nich, pokrývající oblast celé Evropy, severní Afriky a severovýchodního Atlantiku, budou data snímána každých 30, resp. 60 minut (zatím nebylo definitivně stanoveno). Ze zbývajících tří jižnějších oblastí budou data k dispozici jednou za 3 až 6 hodin. Podobně jako z ostatních hyperspektrálních sondážních přístrojů budou tato data určena především pro potřeby numerického modelování atmosféry (NWP). Data z IRS nenahradí klasická aerologická (balónová) měření, jejich účelem je doplnění, zahuštění aerologických sondáží – jak prostorové, tak časové.

- **Ultraviolet Visible Near-infrared Sounder (UVN)**, označovaný též jako Sentinel-4 programu Copernicus, je hyperspektrální spektrometr snímající oblast Evropy a severní Afriky, v pásmech 0,305–0,500 μm (UV, VIS) a 0,750–0,775 μm (NIR), s horizontálním rozlišením cca 8 km pro oblast jižní až střední Evropy. Data by měla být k dispozici každou hodinu. Hlavními produkty, odvozenými z dat přístroje, bude celkové množství O_3 , NO_2 , SO_2 , HCHO (formaldehyd) a CHOCHO (glyoxal) v troposféře.

Podrobněji se na družici MTG-S a její přístroje zaměříme až v budoucím samostatném článku, po uskutečnění startu družice MTG-S1.

5. Přípravy na MTG

Vzhledem k tomu, že nástup družic MTG bude představovat jak nové kanály a přístroje, tak obrovský nárůst objemu distribuovaných dat, EUMETSAT se rozhodl začít s přípravou svých koncových uživatelů s několikaletým předstihem. Již v roce 2017 přišel s aktivitou nazvanou MTG-UP! (MTG User Preparedness), do jejíž pracovní skupiny přizval zástupce ze všech členských států. Podobná pracovní skupina byla následně zřízena i pro program nové generace evropských družic na polární dráze EPS-SG (EUMETSAT Polar System – Second Generation), obě skupiny se pak scházely jak fyzicky, tak zejména online. Cílem těchto aktivit je připravit uživatele na nová data – jak z hlediska jejich efektivního využití (interpretace nových spektrálních

kanálů FCI a z nich odvozených produktů, využití dat ze systému detekce blesků LI), tak z technického hlediska (příjem, zpracování a distribuce dat a produktů). EUMETSAT mj. připravil syntetická data FCI a LI, ve formátech v jakých budou v budoucnosti distribuována, aby měli uživatelé možnost vyvinout a vyzkoušet si předem software pro jejich zpracování. Plánována je rovněž testovací distribuce těchto dat, pro vyzkoušení hardwaru pro jejich příjem a zpracování.

Další oblastí příprav bylo rovněž seznamování se s novými spektrálními kanály FCI prostřednictvím již dostupných obdobných kanálů na přístrojích z jiných družic, především z přístroje VIIRS družic NPP a NOAA-20, či z přístrojů z geostacionárních družic GOES (USA) a Himawari (Japonsko). Do těchto příprav bylo, resp. je aktivně zapojeno i družicové oddělení ČHMÚ, a to včetně plánované účasti na testování prvních dat FCI v rámci zprovoznování družice MTG-I1 (satellite commissioning). První data z FCI by měla být k dispozici pro vybranou skupinu uživatelů v průběhu června letošního roku.

Závěr

Údaje z družic MTG a jejich přístrojů budou z hlediska množství a kvality poskytovaných dat oproti předchozí, druhé generaci Meteosatů (MSG) obrovským skokem vpřed. Zatímco přístroj FCI znamená spíše vývojový, kvalitativní i kvantitativní skok vpřed, novou generaci obdobných dosavadních přístrojů, na které navazuje (především SEVIRI družic MSG), zbývající tři přístroje MTG – LI, IRS a UVN/Sentinel-4 budou pro oblast Evropy zcela revolučními, zejména z hlediska svého umístění na geostacionární platformě, umožňující kontinuální sledování měřených prvků či charakteristik atmosféry. Všechny tyto přístroje budou významným přínosem nejen ke zpřesnění meteorologických předpovědí a krátkodobých výstrah, ale i ke zkvalitnění monitorování klimatu a jeho dlouhodobých změn, včasné detekci a monitorování požárů, monitorování znečištění ovzduší, a v řadě dalších aplikací. Data z IRS jsou patrně největší neznámou z hlediska jejich budoucího přínosu pro numerické modelování počasí pro oblast Evropy, Afriky a přilehlých oceánů – obdobné přístroje jsou sice již umístěny na polárních družicích na nízkých dráhách, jediný obdobný přístroj na geostacionární dráze je ale zatím pouze na čínských družicích FY-4. Data z IRS tak mají velký potenciál přispět k výraznému zkvalitnění výstupů NWP, zejména pro evropské meteorologické služby. Data z přístrojů družic MTG současně budou velkou technologickou výzvou z hlediska příjmu velkého objemu dat, jejich zpracování, distribuce a využití. Pokud půjde vše dle plánů a nevyskytnou se žádné neočekávané komplikace, prvních operativních dat FCI a LI bychom se měli dočkat koncem letošního roku, v prosinci 2023.

Internetové zdroje:

www.eumetsat.int/meteosat-second-generation
www.eumetsat.int/meteosat-third-generation
www.eumetsat.int/mtg-resources
pics.eumetsat.int/viewer/index.html
www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Meteorological_missions/meteosat_third_generation
www.esa.int/ESA_Multimedia/Missions/MTG/
www.eoportal.org/satellite-missions/meteosat-third-generation
www.arianespace.com/
www.arianespace.com/vehicle/ariane-5/
www.arianespace.com/vehicle/ariane-6/

www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Europe_s_Spaceport/Europe_s_Spaceport2
en.wikipedia.org/wiki/Guiana_Space_Centre
www.thalesaleniaspace.com
www.eumetsat.int/mtg-flexible-combined-imager-fci
www.eumetsat.int/mtg-lightning-imager
www.eumetsat.int/mtg-infrared-sounder
www.eumetsat.int/sentinel-4

Literatura:

- BOCCIPPIO, D. J., KOSHAK, W., BLAKESLEE, R., DRISCOLL, K., MACH, D. et al., 2000. The Optical Transient Detector (OTD): Instrument characteristics and cross-sensor validation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, roč. 17, s. 441–458. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017<0441:TOTDOI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<0441:TOTDOI>2.0.CO;2).
- ČMeS (Česká meteorologická společnost), 2017. Elektronický meteorologický slovník (eMS) [online]. [cit. 4. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <http://slovník.cmes.cz>.
- EUMEDS, 2023. EUMETSAT Electronic Distribution System, <https://eumeds.eumetsat.int/> (dostupné pouze pro autorizované uživatele).
- EUMETSAT, 2020. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for L2 processing of the MTG Lightning Imager data [online]. [cit. 30. 1. 2023]. Dostupné z WWW: <https://www.eumetsat.int/media/45075>.
- GOODMAN, S. J., BLAKESLEE, R. J., KOSHAK, W. J., MACH, D., BAILEY, J. et al., 2013. The GOES R Geostationary Lightning Mapper (GLM). *Atmospheric Research*, roč. 125–126, s. 34–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.01.006>.
- HOLMLUND, K., GRANDELL, J., SCHMETZ, J., STUHLMANN, R., BOJKOV, B. et al., 2021. Meteosat Third Generation (MTG): Continuation and Innovation of Observations from Geostationary Orbit. *Bulletin of the American Meteorological Society*, roč. 102, č. 5, s. E990-E1015. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0304.1>.
- JENNISKENS, P., ALBERS, J., TILLIER, C. E., EDGINGTON, S. F., LONGENBAUGH, R. S. et al., 2018. Detection of meteoroid impacts by the Geostationary Lightning Mapper on the GOES-16 satellite. *Meteoritics and Planetary Science*, roč. 53, s. 2445–2469. DOI: <https://doi.org/10.1111/maps.13137>.
- NASA, 2017. Lightning Imaging Sensor (LIS) [online]. [cit. 18. 1. 2023]. Dostupné z WWW: https://ghrc.nsstc.nasa.gov/lightning/overview_lis_instrument.html.
- SCHMETZ, J., PILI, P., TJEMKES, S., JUST, D., KERKMANN, J. et al., 2002. An introduction to Meteosat Second Generation (MSG). *Bulletin of the American Meteorological Society*, roč. 83, s. 977–992. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-83-7-Schmetz-2>.
- SETVÁK, M., HAMPL, P., HLAVATÝ, K., KYJOVSKÝ, Š., 1996. Systém příjmu, zpracování, distribuce a archivace dat z meteorologických družic v ČHMÚ. *Meteorologické zprávy*, roč. 49, s. 174–181. ISSN 0026-1173.
- SETVÁK, M., 2004. MSG – Meteosat druhé generace. *Meteorologické zprávy*, roč. 57, s. 15–20. ISSN 0026-1173.
- SETVÁK, M., 2022. Meteorologické polární družice série JPSS. *Meteorologické zprávy*, roč. 75, s. 186–189. ISSN 0026-1173.
- YANG, J., ZHANG, Z., WEI, C., LU, F., GUO, Q., 2017. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4. *Bulletin of the American Meteorological Society*, roč. 98, s. 1637–1658. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0065.1>.
- ZHANG, D., CUMMINS, K. L., 2020. Time Evolution of Satellite-Based Optical Properties in Lightning Flashes, and its Impact on GLM Flash Detection. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, roč. 125. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019JD032024>.

Lektoři (Reviewers):

RNDr. Petr Pešice, Ph.D., prof. RNDr. Jan Bednář, CSc.