

Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Természettudományi Kar  
Földrajz- és Földtudományi Intézet  
Meteorológiai Tanszék

# A légkör vertikális szondázása IASI mérések alapján

SZAKDOLGOZAT



Készítette:

**Domonkos Gréta**

Földtudományi alapszak  
Meteorológus szakirány

Témavezető:

**dr. Pieczka Ildikó**

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

**Budapest, 2015**

# Tartalomjegyzék

1. Bevezetés .....	2
2. Az európai műhold-meteorológia főbb mérföldkövei .....	3
2.1 A MetOp műholdak műszerei.....	4
2.1.1 Az ATOVS műszercsomag.....	7
2.1.2 A IASI műszer .....	9
3. Inverz probléma .....	15
3.1 Validációs Becslési Modell .....	21
4. A IASI validációja – JAIVEx .....	25
5. Összefoglalás .....	34
Köszönetnyilvánítás.....	35
Irodalomjegyzék: .....	36

# 1. Bevezetés

A légkör termodinamikai paraméterei, úgymint a hőmérséklet, a nedvesség, a felhők optikai és mikrofizikai tulajdonságai, valamint a felszín jellemzői alapvető meteorológiai változók, amelyek ismeretének pontossága az időjárás előrejelzését befolyásolja. A technika fejlődésével egyre nagyobb hangsúly helyeződik az űrből érkező adatok használatára, mivel képesek rendkívül nagy felbontásban a Föld folyamatos megfigyelésére. A hazánkról készülő műholdképeket a nowcastingban, a számszerű előrejelzésekben, a levegőkémiában és a klímaváltozás kutatásában is felhasználják (*Mika et al., 2005*). Azonban a műholdak képességeinek is vannak korlátai. A fejlett műholdak validációja elengedhetetlen, hogy az ezen alapuló fejlesztések segítségével a beléjük épített algoritmusok és műszerek a legkisebb hibával szolgáltatassanak információt a Föld légköréről. A numerikus modell-előrejelzések pontossága szempontjából kiemelt jelentőségű a kezdeti feltételek megadásának egzaktsága, hiszen pontatlan kiindulási feltételekből még tökéletes modell esetén sem tudnánk jó előrejelzéseket készíteni (*Randriamampianina, 2004*).

A légkör vertikális szondázása infravörös és mikrohullámú tartományban az állandó és változó légköri összetevők molekuláris vibrációs és rotációs elnyelési, illetve kibocsátási vonalai alapján történik. A vertikális szondázók több csatornával rendelkeznek, melyeket a súlyfüggvények segítségével gondosan válogatott frekvenciacsoportokhoz igazítanak (*Gelybó, 2006*). A IASI szonda az európai poláris pályán mozgó MetOp-A és MetOp-B műholdakról végzi méréseit. A IASI egy hiperspektrális műszer, ami annyit tesz, hogy a légköri profilokat nem kvantált adatokból rekonstruálja, hanem az általa lefedett infravörös spektrum egészében végzi méréseit. A profil egy algoritmus eredménye, ami során több forrásból is hibák kerülhetnek a számításokba. Hatásuk csökkentése érdekében először a hibák felismerése, majd az értékük becslése a feladat. Dolgozatomban először a IASI és a vele szoros együttműködésben álló műholdas műszerek bemutatását végzem. Utána a szondázó műszerek esetében használt inverz módszer alapfogalmait és összefüggéseit ismertetem. A IASI használhatóságát, és pontosságát becsülő legnagyobb kampányt 2007-ben végezték, ennek eredményeit foglalom össze a 4. fejezetben. Ez átfogó képet adott az adatok validációjának lehetőségeiről és bizonyította, hogy a IASI rádiószondákéhoz hasonló pontosságú és részletességű profilok visszaadására képes. Céloom a téma részletes körülménye és a IASI képességeinek bemutatása.

## 2. Az európai műhold-meteorológia főbb mérőkövei

Az EUMETSAT<sup>1</sup> 1977-ben helyezte üzembe az első geostacionárius műholdját, a Meteosat-1-et. Európában ekkor kezdődött az időjárás és a klíma távérzékelése [1 - EUMETSAT]. A szervezet feladatai közé tartozik a műholdak megtervezése, építése, fenntartása és az operatíván működő műholdak hasznosítása az egész európai rendszerben. Jelenleg 29 tagállammal és 2 társult, avagy együttműködő állammal rendelkezik az EUMETSAT. Tagjai és az együttműködő országok teljes hozzáférést kapnak az adatokhoz tudományos és közszolgálati felhasználásra, viszont csak a teljes jogú tagok intézményei vehetnek részt a kutatásokban, és a szervezet által kiírt pályázatokban. Magyarország képviselőjében az Országos Meteorológiai Szolgálat 2008 óta teljes szavazati joggal rendelkezik, és tagja a Tanácsnak, amely a szervezet legfőbb döntéshozó testülete.

A NOAA<sup>2</sup> és az EUMETSAT 1998 óta szoros együttműködésben dolgoznak az európai Kezdeti Közös Poláris Rendszerben (IJPS<sup>3</sup>), vagyis megegyezés szerint használják a másik fél által fejlesztett szenzorokat a saját műholdjaikon, így biztosítva az adatcserét [2 - NASA]. A műholdak felépítését – ezért a MetOp<sup>4</sup> kvázipoláris pályán mozgó műholdsorozatát is – a tagok igényei szerint tervezték. A sorozat az EUMETSAT Poláris Rendszerének (EPS<sup>5</sup>) űrben működő szegmense. Emellett felszíni szegmens működtetése is szükséges, hogy a működő műholdakat „támogassák”, a visszaérkező információt fogadják, előkészítsék a különböző felhasználási igények szerint, majd továbbítsák [1 - EUMETSAT].

A MetOp-nak jelenleg két párhuzamosan működő (MetOp-A, MetOp-B) és egy előkészületi szakaszban lévő (MetOp-C) tagja van. A MetOp-A 2006-ban, a MetOp-B pedig 2012-ben kezdte meg működését, a MetOp-C pályára állítását 2017-re tervezik. Mindkét operatíván működő műhold LEO<sup>6</sup>, vagyis alacsonyabb poláris pályán mozog. Az ilyen műholdak pályája 300–800 kilométer magasan van a földfelszíntől [3 - Suntrek]. A rajtuk elhelyezett hiperspektrális szondázók az energiát nagyon magas spektrális

---

<sup>1</sup> European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites – Európai Szervezet a Meteorológiai Műholdak Hasznosítására

<sup>2</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration – Nemzeti Óceáni és Légköri Hivatal (USA)

<sup>3</sup> European Initial Joint Polar System

<sup>4</sup> Meteorological Operational satellite programme – Meteorológiai Operatív műhold program

<sup>5</sup> EUMETSAT Polar System – EUMETSAT Poláris Rendszer

<sup>6</sup> Lower Earth Orbit

felbontásban tudják érzékelni, több mint ezer spektrális sávon, ezáltal képesek rádiószondához hasonló részletes leírást adni a légkör vertikális állapotáról. Ezzel az információ többlettel szignifikáns javulás történt az európai numerikus időjárás előrejelzésben, ugyanis az előrejelző modellekben felhasznált adatok 60%-a LEO típusú műholdakról érkezik. Viszont a műholdak öregedése miatt, ez a hozzájárulás visszaeshet, mert az előkészületben lévő műholdak száma nem biztos, hogy elegendő (*Clerbaux és Cervoisier, 2013*). Emellett új korszakba lépett a Föld időjárásának, klímájának és környezetének megfigyelése is az adatok mennyiségének növekedésével.

## 2.1 A MetOp műholdak műszerei

A műholdakra szerelt műszerek egy részét az Egyesült Államok ajánlotta fel, másik része pedig új generációs európai fejlesztésű műszer. Minden műholdra szerelt műszer két csoportba sorolható, leképező és szondázó műszerek csoportjába.

Az Európában fejlesztett műszerek [4 - ESA, 2012]:

**ASCAT<sup>7</sup>**: Legfontosabb feladata a szélesség, és -irány mérése az óceánok felett, de emellett még talajnedvességet, hó tulajdonságokat is tud mérni, és földi valamint tengeri jég megfigyelésére is alkalmazzák.

**GOME-2<sup>8</sup>**: Részletes leírást képes adni a légkör összetételéről, és többek közt az ózon, a nitrogén-dioxid, a víz, az oxigén, és a bróm-oxid profiljáról.

**GRAS<sup>9</sup>**: Olyan műszer, mely a GPS<sup>10</sup> műholdak rádiójeleinek változását figyeli, és ennek segítségével képes mérni a légkör hőmérséklet- és nedvességprofilját. A GRAS naponta 500 légköri profilt szolgáltat, amiket a numerikus időjárás előrejelző modellekbe építenek be. A műszert, a mérései állandó rendelkezésre állása miatt, az éghajlatváltozás megfigyelésére is alkalmazzák.

---

<sup>7</sup> Advanced Scatterometer – Fejlett Szkateterométer

<sup>8</sup> Global Ozone Monitoring Experiment-2 – Globális Ózon Megfigyelő Kísérlet - 2

<sup>9</sup> Global Navigation Satellite System Receiver for Atmospheric Sounding – Globális Navigációs Műhold Rendszer Vevő Légköri Szondázáshoz

<sup>10</sup> Global Positioning Satellite – Globális Pozícionáló Műhold

**IASI**<sup>11</sup>: A MetOp műholdak kulcseleme. Az emisszió spektrumából származtatott hőmérséklet- és nedvességprofilal szolgálja a meteorológusokat. Vertikálisan 1 km-es felbontásban, a hőmérséklet esetében 1 Kelvines pontossággal mér.

**MHS**<sup>12</sup>: Különböző magasságokban ad információt a légkör nedvességéről, beleértve az esőt, havat, jégesőt és ónos esőt is. Emellett hőmérsékletet is mér a földfelszín által kibocsájtott mikrohullámú sugárzásból.

A három Egyesült Államoktól örökölt műszer:

**HIRS/4**<sup>13</sup>: 20 csatornán méri a Föld sugárzását az infravörös tartományban. A méréseiből az óceán felszíni hőmérsékletét, a légkör ózontartalmát, a kihullható csapadék mennyiségét, a felhőborítottságot és annak magasságát, valamint a felszín albedóját számítják.

**AMSU-A1**<sup>14</sup> és **AMSU-A2**: Mikrohullámú tartományban mér, a HIRS/4-gyel együtt a Föld hőmérsékletét, nedvességét és nyomását kapjuk meg globálisan, a felszíntől a felső sztratoszféráig, körülbelül 40 km-ig. A kapott adatokat, mert a kihullható csapadék és felszíni paraméterek számítására használják fel.

**AVHRR/3**<sup>15</sup>: Nappali és éjszakai képeket szolgáltat a felszínről hat spektrális sávban 0,58–12,5 µm közt, beleértve a víz-, hó-, jégfelszíneket és a vegetációt.

Ezekon kívül még üzemel a MetOp műholdon egy adatgyűjtő felszerelés (A-DSC<sup>16</sup>), egy egység, ami a világúrról végez vizsgálatokat (SEM-2<sup>17</sup>), és a földi mentést és keresést segítő műszerek (SARP-3<sup>18</sup>, SARR<sup>19</sup>). A telepített eszközök egymást kiegészítően működő műszerek. A MetOp műhold műszereit az 1. ábra mutatja be.

---

<sup>11</sup> Infrared Atmospheric Sounding Interferometer - Infravörös Légkör Szondázó Interferométer

<sup>12</sup> Microwave Humidity Sounder – Mikrohullámú Nedvesség Szonda

<sup>13</sup> High-resolution Infrared Radiation Sounder – Nagy felbontású Infravörös Radiáció Szonda

<sup>14</sup> Advanced Microwave Sounding Units – Fejlesztett Mikrohullámú Szondázó Egységek

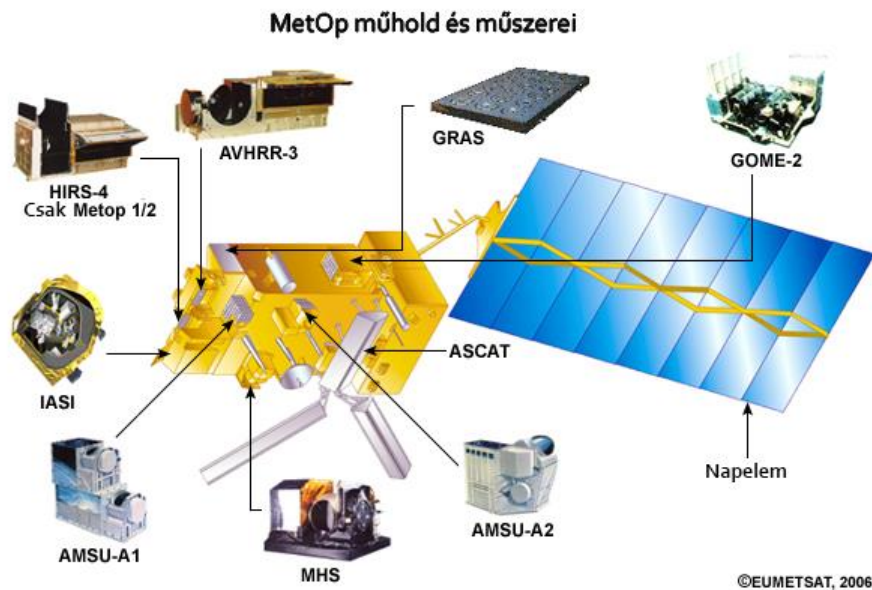
<sup>15</sup> Advanced Very High Resolution Radiometer – Továbbfejlesztett Igen Nagy Felbontású Sugárzásmérő

<sup>16</sup> Advanced Data Collection System – Fejlesztett Adatgyűjtő Rendszer

<sup>17</sup> Space Environment Monitor – Űr Környezet Megfigyelő

<sup>18</sup> Search And Rescue Processor – Kereső és Mentés Feldolgozó

<sup>19</sup> Search And Rescue Repeater – Kereső és Mentés Ismétlő



1. ábra MetOp-B műhold műszerei. Az ábrán a műszerek nem méretarányosak [1 - EUMETSAT].

A műholdas adatok a feldolgozottság szintjei alapján a következők lehetnek (Burai, 2012):

- 0. szint: teljesen nyers, a műholdról kapott sugárzási adatok, csak az adatátvitelből és a működésből származó hibák vannak bennük kijavítva
- 1A. szint: az adatok feldolgozásának köztes szakasza, amely csak a kalibráláshoz és georeferáláshoz<sup>20</sup> szükséges plusz adatokat tartalmazza
- 1B. szint: már kalibrált és georeferált radianciák, nem minden műszernek van ilyen szintű adata
- 1C. szint: műszerekre vonatkozó fényességi hőmérsékletek<sup>21</sup>, georeferációs és kalibrációs adatok
- 1D. szint: egységes műszerrácsra interpolált, műszerekre vonatkozó fényességi hőmérséklet, navigációs, kalibrációs és felhőzet információ
- 2. szint: származtatott geofizikai változók, ugyanazon felbontással és helyen, mint az 1. szintű adatok
- 3. szint: előfeldolgozott adatok, valamilyen szabványos rácsszerkezetben
- 4. szint: valamely földi referenciaparaméter elemzéséből származtatott modell használatával számított távérzékelt adat

<sup>20</sup>földrajzi azonosítás

<sup>21</sup>A szenzor által érzékelt sugárzásmennyiséghez tartozó fekete test hőmérséklete [5 - GES DISC].

### 2.1.1 Az ATOVS műszer-csomag

Az ATOVS<sup>22</sup> egy szondázó műszer-csomag, amit először a NOAA-KLM<sup>23</sup> műholdsorozatra szereltek fel. Eredetileg az AMSU-A, AMSU-B mikrohullámú sugárzásmérő szondák alkották, kiegészítve a HIRS/3 infravörös sávban mérő szondával. A későbbi műholdsorozatokon már nem az AMSU-B szondázó, hanem az MHS kifejezetten nedvességmérő szonda lett felszerelve, és az infravörös szondázó (HIRS/4) fejlettebb verzióját alkalmazták. A HIRS/4 alapfelszerelése volt a MetOp-B műholdnak, de a MetOp-C-re már nem fog felkerülni, mert feladatait a IASI veszi át [4 - ESA, 2012]. A szondázó rendszer teljes globális lefedettséggel rendelkezik, a IASI, az AMSU-A és az MHS szinkronizált működésének köszönhetően. Bár az AVHRR/3 formálisan nem része az ATOVS csomagnak, ez a leképező rendszer szintén alapvető felszerelése a MetOp műholdnak, így segítve az ATOVS 1b szintű adatok feldolgozását, és a IASI IIS<sup>24</sup> infravörös sugárzásmérőjének működését. Az IIS adatait csak az AVHRR/3 adatokkal szinkronizálva használják. -

Az AMSU-A és a IASI optikai tengelyei ugyanazon pozícióra vannak orientálva szkennelés közben. Az AMSU-A tizenöt mikrohullámú csatornán pásztázza a légkört. Legrészletesebben a légkör víztartalmát vizsgálja, bármilyen halmazállapotában, emellett globálisan a légkör hőmérsékletét is megadja. A csatornák hőmérsékletmérései az oxigén elnyelési sávjában készülnek 50 GHz-en.

Az MHS öt mikrohullámú csatornán végez állandó méréseket az AMSU-A csatornáinak kiegészítőjeként. Feladata az AMSU-A méréseiből nedvességprofilok, felhőben található folyékony vízrész, és csapadék számítása. Érzékeny a nagyobb cseppekre az esőfelhőkben, ezért képes az esőcseppek méret szerinti osztályozására.

A HIRS/4 szonda 20 csatornán mér. Ebből 7 a rövid hullámhosszú infravörös, 12 a nagyobb hullámhosszú infravörös, és egy a látható tartományban van. A látható csatorna hőmérséklet és nedvesség méréseket végez felhőmentes illetve felhős időben is.

Az AVHRR/3 többfunkciós leképező műszer hat csatornán mér. Három csatornája a látható és a közeli infravörös, és három a termikus infravörös sávban működik. Így képet

---

<sup>22</sup> Advanced TIROS (Television and Infrared Observational Satellite) Operational Vertical Sounder – Fejlesztett TIROS (Televíziós és Infravörös Megfigyelő Műhold) Operatív Vertikális Szondázó

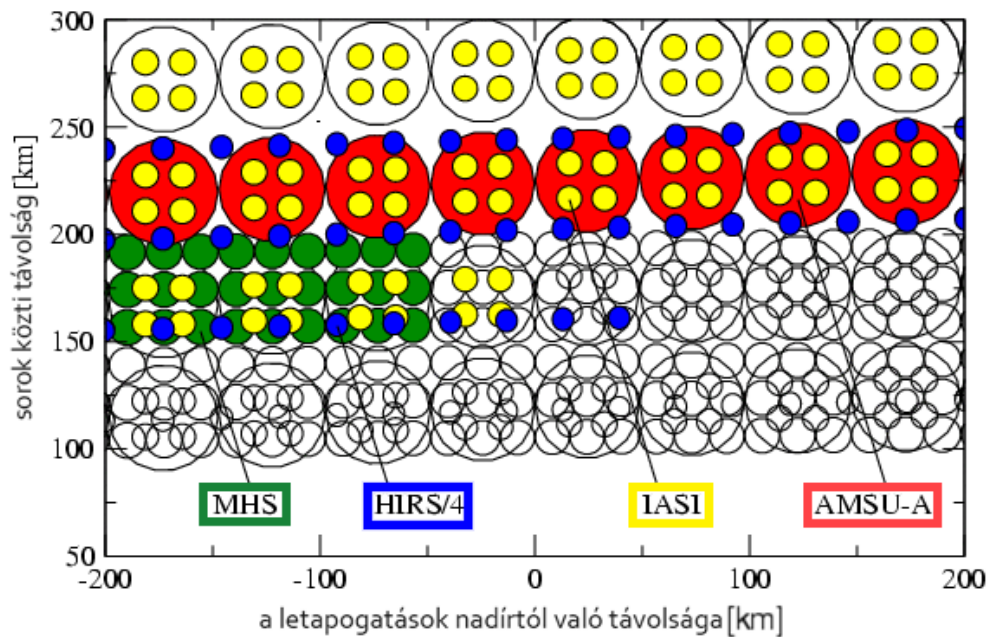
<sup>23</sup> NOAA – KLM – NOAA 15, 16 és 17-es számú műholdjai

<sup>24</sup> Integrated Imaging Subsystem – Integrált Leképező Alrendszer



ad a globális felhőborítottságról, tengerfelszín-hőmérsékletről, a jég-, hó-, és vegetációtakaró jellemzőiről. Az ATOVS műszereinek működéséről és adatainak értékeléséről *Gelybó, 2006* diplomamunkában olvashatunk.

Mindegyik műszer egymással valamilyen szintű átfedésben mér nyugat-kelet irányba kör alakú nyomokban, melyek a műhold haladása miatt nem teljesen egyenes vonalban vannak. Ez a 2. ábrán is észrevehető. Egyedül az AVHRR/3 mér kelet felől nyugat felé és a képe négyzet alakúnak tekinthető a magas felbontás miatt (*ATOVS, 2009*).



2. ábra Az ATOVS szondák, valamint a IASI hasznos látómezőinek együttes ábrázolása. A sor részleteken látható, hogy a műhold haladása miatt nem teljesen egy vonalban készülnek, hanem a sorok vége előrébb csúszik (IASI, 2012a).

## 2.1.2 A IASI műszer

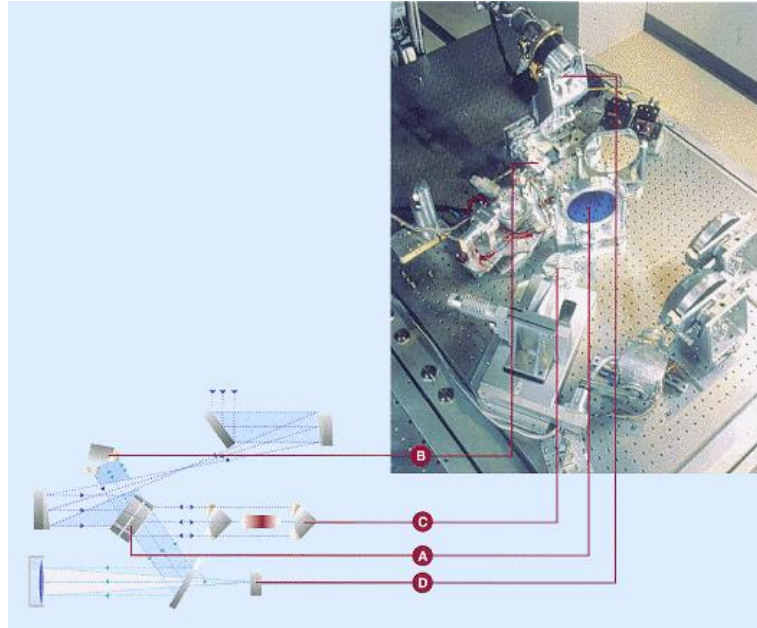
Az EUMETSAT Francia Űrkutatási Hivatallal (CNES<sup>25</sup>) való együttműködése vezetett a IASI fejlesztéséhez. A IASI egy kulcs innováció az egész MetOp programban, a legnagyobb és legnehezebb műszer a műholdon, a maga 236 kilogrammjával és 1,7 köbméterével. A légkör nyers radianciáját az infravörös tartományban méri, melyből rendkívül pontos profilok készíthetők. A IASI tervezői azt várták, hogy ez a műszer fogja kikövezni az utat az új generációs űrbeli optikai műszereknek (*Chalon et al., 2001*). A tervezés és a fejlesztés fázisa 1998-ban kezdődött. Ezt a fejlesztési időszakot, mint fő szerződő fél, az Alcatel Űr Vállalat vezette. A IASI program a CNES és az EUMETSAT együttműködésében készült, a teljes technikai felszerelésért a CNES vállalta a felelősséget az ún. in-orbit vagyis pályán végzett működésének végéig, így ők fejlesztették a szoftvereket és a működéshez szükséges technikai rendszert. Az EUMETSAT felelőssége a működtetés, archiválás és az adatok megosztása a felhasználók felé. Az együttműködési megegyezéshez később csatlakozott a Svéd Űrügynökség<sup>26</sup> is, akik a programhoz szükséges tőke biztosításában nyújtottak segítséget. A szonda tervezésénél a legfőbb szempontok a következők voltak: részletes spektrális felbontás kis radiometrikus hibával, valamint a mérés hosszú távú megbízhatósága és felhasználhatósága.

A IASI egy Fourier-transzformációs infravörös spektrométerből és egy infravörös leképezőből (IIS) áll (*IASI, 2012a*). Az optikai spektroszkópiai konfiguráció egy Michelson interferométeren alapul, ami a beeső fényt két sugárnyalábra bontja. Ez a nyalábokra bontó rész a 3. ábrán az A-val jelölt műszer. Az egyik nyaláb konstans hosszú úton halad tovább (B), mert álló tükörről verődik vissza, a másik egy mozgó tükörrre esik, és változó hosszú úton megy tovább (C). A különbség a két út között az úgynevezett optikai úthosszak különbsége, amit a megtett úthossz és a hullámhossz befolyásol. A mért jel a fény intenzitása. Amikor újra találkozik a két nyaláb a detektoron (D), energiájuk az útkülönbség szerint változik. Maximum értéket vesz fel, amikor az útkülönbség egész számú többszöröse a hullámhossznak (vagyis a két nyaláb egy fázisban van), és nulla, amikor az útkülönbség páratlan számú többszöröse a fél hullámhossznak (vagyis a fázisuk épp ellentétes). Az interferogramon rajzolódik ki a fényintenzitás.

---

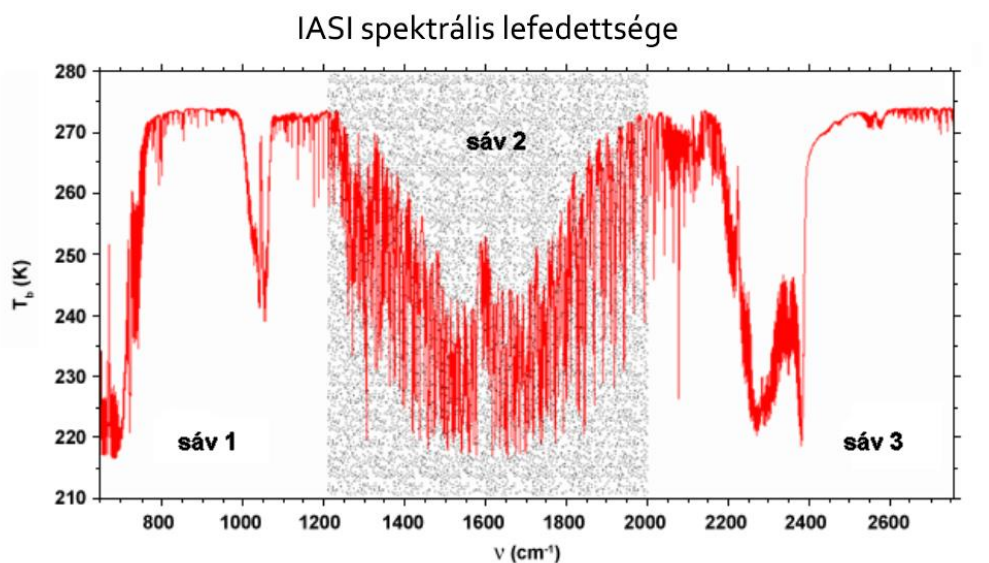
<sup>25</sup> Centre National des Etudes Spatiales

<sup>26</sup> Swedish Space Agency



3. ábra Michelson interferométer felépítése és működési elve (Chalon et al., 2001)

A mért jelből egy fedélzeti digitális feldolgozó alrendszer előállítja a spektrumot. A spektrum, vagyis a detektorra eső fényintenzitás a frekvencia függvényében, a jel Fourier-transzformáltja (Kamarás, 2006). Az infravörös leképező rendszer (IIS) hangolja össze a IASI szondázásait az AVHRR leképezővel, és részleges felhőborítottság esetén finom felbontású analizisét adja különböző felhőtulajdonságoknak (Chalon et al., 2001). A spektrométer 3,62  $\mu\text{m}$  és 15,5  $\mu\text{m}$  ( $645\text{--}2760\text{ cm}^{-1}$ ) között mér közelítőleg a távoli infravörös hullámhossz-tartományig három spektrális tartományban (4. ábra). Ezen belül 8461 mintát vesz a légkörből, melyek spektrális felbontása  $0,5\text{ cm}^{-1}$  (IASI, 2012a).



©EUMETSAT, 2006

4. ábra IASI spektrális felbontása, és a három sáv, ahol végzi a méréseit [1 - EUMETSAT].

A mérések 10 fő csatornájának részletes adatait az 1. táblázat mutatja be. A műszer hullámszám szempontjából úgy van kalibrálva, hogy a közép hullámszám minden csatornán  $2 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$  pontossággal vagy annál pontosabban mérjen. A 10,5  $\mu\text{m}$  és 12,5  $\mu\text{m}$  közötti légköri ablakban a IASI az IIS-szel együtt mérve széles sávon nagy térbeli felbontással vizsgálja a látómezőt.

1. táblázat: A IASI 10 mérési sávja, azok használati céljai és radiometrikus érzékenységek értékei.  
Forrás: Chalon et al., 2001

	Spektrális régió ( $\text{cm}^{-1}$ )	Abszorpciós sáv	IASI felhasználása	Radiometrikus érzékenység (K)
R1	650-770	CO <sub>2</sub>	Hőmérsékletprofil	0,20
R2	790-980	Légköri ablak	Felszín és felhő tulajdonságok	0,24
R3	1000-1070	O <sub>3</sub>	Ózon szondázása	0,20
R4	1080-1150	Légköri ablak	Felszín és felhő tulajdonságok	0,24
R5	1210-1650	H <sub>2</sub> O	Nedvességprofil CH <sub>4</sub> és N <sub>2</sub> O összege a légoszlopban	0,20
R6	2100-2150	CO	CO összege a légoszlopban	0,36
R7	2150-2250	N <sub>2</sub> O és CO <sub>2</sub>	Hőmérsékletprofil légoszlop N <sub>2</sub> O tartalma	0,36
R8	2350-2420	CO <sub>2</sub>	Hőmérséklet profil	0,36
R9	2420-2700	Légköri ablak	Felszín és felhő tulajdonságok	0,36
R10	2700-2760	CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub> összege a légoszlopban	1,53

Az 1. táblázatban látható az egyes spektrális sávok radiometrikus érzékenysége. Az itt számításba vett hibák az alapvető működésből eredő hibák (detektorok, elektromágneses hullám erősítők, digitalizálás, feldolgozás) és a zajnak tekinthető hibák (például hullámszám kalibráció miatti hiba). A radiometrikus érzékenység azzal a hőmérséklet eltéréssel jellemezhető, amit a műszer érzékelni tud két szomszédos pixel között [6 – FÖMI]. Ennek értékelése a radiancia szempontjából magában foglalja a Planck függvény hőmérsékleti deriváltjával történő szorzást, ezért a hullámszámon és a hőmérsékleten alapul. Az egyszerűség kedvéért ez a hőmérséklet a csatornától függetlenül van meghatározva, a referencia hőmérséklet pedig egységesen 280 K.

A radiometrikus kalibrációnak több feltétele van. Az első, hogy megfeleljen a IASI által mért ekvivalens hőmérséklet abszolút pontosságának, így a teljes kalibrációs hibának. Az ekvivalens hőmérsékletet legalább 1 K pontossággal kell mérni 200 K-tól 300 K-ig. A második fontos szempont a kalibráció reprodukálhatósága. A kalibráció reprodukálása nem idézhet elő 0,3 K-nél nagyobb hibát a 200–300 K között lévő ekvivalens hőmérsékletekben. A harmadik aspektus a hibatagok vizsgálata, amelynek különböző a viselkedése a különböző spektrális sávokban, a detektorok pixel mátrixaiban vagy a letapogató tükör különböző szögű állásaiban. A sávok, pixelek vagy a letapogató tükör különböző pozíciói között ugyanazon ekvivalens hőmérsékletű céltartományra nem adódhat 0,2 K-nél nagyobb különbség. A harmadik pont korlátozza a nem modellezett eltérő hatásokat, vagy a modellezés után fennmaradt hibákat, úgymint tükör fényvisszaverése. A IASI-nak képesnek kell lennie az ekvivalens hőmérsékletet 4–315 K tartományban mérni (*Chalon et al., 2001*).

A IASI a letapogatást „léptetett” módon<sup>27</sup> végzi. A látómező középpontjára (nadírra) szimmetrikusan az egész pályáját  $\pm 48^{\circ}20'$  hatótávolságon vizsgálja. A műhold letapogató nyalábja haladási irányához képest balról jobbra halad. A léptetett pásztázású sorban 30 mérést végez, melyek középpontjai egymáshoz képest  $3,3^{\circ}$ -ra helyezkednek el. Ezekhez adódik még két kalibrációs pont, az egyik pont az űr felé (hideg kalibráció), a másik a műszerben elhelyezett, ismert hőmérsékletű fekete testen kalibrál (meleg kalibráció). Kalibrációval együtt egy letapogatást a kezdőponttól a következő sor kezdőpontjáig 8 másodperc alatt olvas le. Egy sor hossza nagyjából 2400 km. A szkennerek stabil pályatartását egy, a mező mozgását kompenzáló integrált eszköz biztosítja (*IASI, 2012a; 2012b*). A Hasznos Látómező, az úgynevezett EFOV<sup>28</sup>, a használható látómező az adott szkennelési pontban. Minden EFOV-ot egy 2x2-es mátrix alkotja, amelynek pixeljei az IFOV<sup>29</sup>-ok, a Pillanatnyi Látómezők. Az IFOV 12 kilométeres átmérőjű kör a nadírban, átlagosan 819 km-es magasságból. Az EFOV mátrix középpontja a megfigyelt pontban van. A műszer egy interferogramot 151 ezredmásodperc alatt készít el, de egy szkennelésre 8/37 másodpercet szán, hogy az AMSU-val szinkronban maradjon. A sorok szélén romlik a mérés minősége, és az IFOV-ok átmérője akár 39 kilométerre is nőhet (*IASI, 2012a*). Ezt szemlélteti az 5. ábra, amin az is látszik, hogy a IASI az AMSU leképező rendszerrel közös középponton mér. Az IIS egy 64×64 pixeles mátrixban

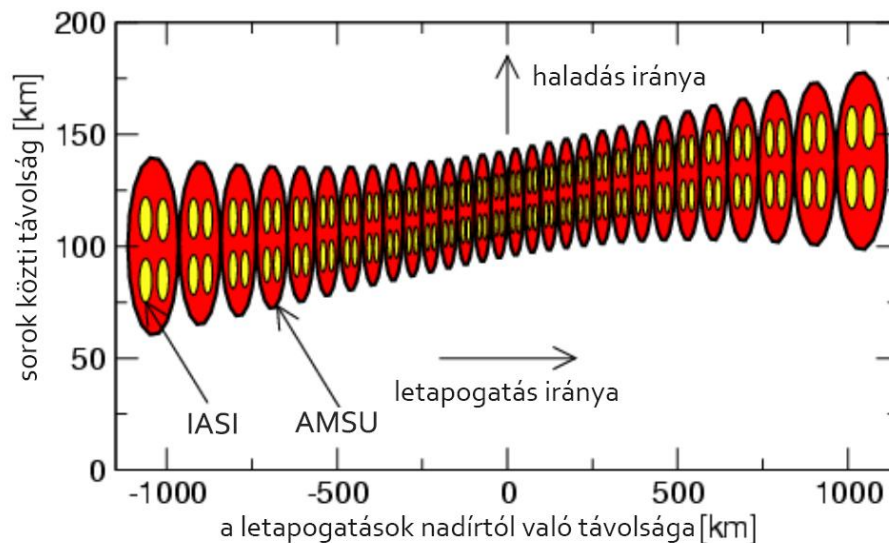
---

<sup>27</sup> step and stare – „lép és figyel”

<sup>28</sup> Effective Field Of View

<sup>29</sup> Instantaneous Fields Of View

analizál egy négyzet alakú mezőt, aminek minden oldala  $3,3^\circ$  a szondázó optikai tengelyén fókuszálva. Ezek a pixelek ugyanazt a területet fedik le, mint a IASI egy hasznos látómezője (EFOV).



5. ábra: A IASI és az AMSU egy letapogatott sávjának egy sora. A sárga körök a IASI IFOV-jait, míg a piros körök az AMSU méréseit jelölik (IASI, 2012a).

A IASI különböző szintű adatai:

1A. szint: tartalmaz dekódoló információt, spektrális kalibrációt, radiometrikus utókalibrálást, IASI/AVHRR/3 produktumot, helyszínt és dátumot

1B. szint: újraválogatott spektrumú adatok, egyenlő távolságú rácsra interpolálva

1C. szint: tartalmazza az AVHRR radiancia szinteket IASI pixeleken analizálva és apodizációs függvényt<sup>30</sup> alkalmazva (IASI, 2012a).

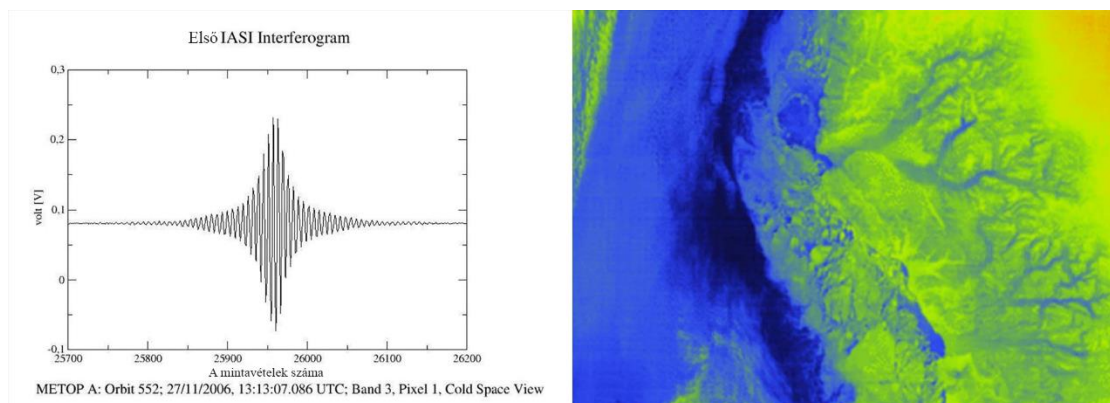
2. szint: már a következő kész adatokat adja (IASI, 2012b):

- Hőmérsékleti profilok
- Légoszlopban mért ózon összegek (három rétegre)
- Felszíni hőmérséklet
- Felszín emissziója
- Részleges felhő borítottság
- Felhőtető hőmérséklet
- Felhőtető nyomás
- Felhő fázis
- Légoszlop N<sub>2</sub>O tartalma
- Légoszlop CO tartalma
- Légoszlop CH<sub>4</sub> tartalma
- Légoszlop CO<sub>2</sub> tartalma
- Hiba kovarianciamátrix
- Feldolgozási és minőségi „zászlók”

<sup>30</sup> A negatív értékek kiszűrésére, spektrumok kiszélesedésére és a mellékmaximumok illetve – minimumok csökkentésére vagy eltüntetésére használt függvény (Kamarás, 2006).



A IASI legfőbb célja, hogy radianciából kinyert hőmérsékleti és nedvességi vertikális profilokat szolgáltatson precízen, nagy térbeli és spektrális felbontással. Ezek mellett arra is tervezték, hogy a légkört alaposabban megismerjük, és a levegőkémia, éghajlat és szennyezések közötti kölcsönhatásokat részletesebben megértsük. Felhőmentes esetben a földfelszín emisszióját, valamint a tengerfelszín hőmérsékletét is megadja [7 - ESA, 2006]. A IASI első elérhető adatai 2006. november 27-én készültek, a MetOp-A fedélzetéről. Az első interferogram, és az első integrált infravörös felvétel látható a 6. ábrán, Grönlandról. A MetOp-A műholdat Norvégiából állították pályára.



6. ábra: A IASI által készített első interferogram, és első integrált infravörös kép [4 - ESA, 2012].

A műhold méréseiből a későbbi profilok inverz módszer alkalmazásával készülnek, a mért nyers radianciából kiindulva. Az adatok előállításának alapja a sugárzásátviteli egyenlet invertálása. Ez a feladat nem egyértelmű, ezért a javítására szolgál a fizikai iterációs módszer, amit a IASI is alkalmaz. Ez a kezdő adatokból iterációval számolja vissza a végső profilt. Az eredmény nagyon érzékeny a radiancia kis megváltozására is. A IASI első visszaszármaztatott adatai vagy önállóan generáltak, vagy az ATOVS mért adataival kombinálva készülnek. Az első visszakeresés megalapozza a későbbi végső adatokat, vagy ez lehet az első becslése a későbbi iteratív visszakeresésnek. Ha az első becslés profilja vagy felszíni paraméterei egy meghatározott hibavizsgálaton keresztül mennek, akkor folytatódik feldolgozásuk egy gyors sugárzásátviteli modell alkalmazásával, ami kiszámítja a fényességi hőmérséklet spektrumokat és a súlyfüggvényeket. A hibavizsgálaton fennakadó adatokat előzetes klimatológiai ismert adatokkal pótolják. Egy korábban meghatározott kritériumot el kell érnie az adatok pontosságának, eddig a pontig folyamatos iterációval újraszámolják a fényességi hőmérsékletet és súlyfüggvényeket. Ezután az adatok minőségellenőrzésen mennek át. A 2. szintű adatok egy minőségjelző „zászlót” kapnak, az alapján, hogy mennyire felelnek meg a végső felhasználó, vagyis az EUMETSAT igényeinek (IASI, 2012b).

### 3. Inverz probléma

Egy in-situ mérés esetében a mért mennyiség a számunkra érdekes információnak egy összetett függvénye (Rodgers, 2000). Egy inverz probléma felmerülésekor az első számú feladat, a keresett paraméter legjobb reprezentációjának megtalálása. Elkészítéséhez fel kell használni az adott méréseket, és az úgynevezett *a priori*, előre tudott, vagy másik klimatológiai adatbázisból ismert adatsort. Ezzel együtt nemcsak az inverz probléma megoldása a feladat, hanem a mérések által leírt információ megértése és leírása, valamint a valós értékek és a visszaérkező profil kapcsolatának vizsgálata. A működés pontosításához elengedhetetlen az egész mérési rendszer hibavizsgálata, a megfigyelő rendszer optimalizálása, és az eredmények validálása. Ha az inverz probléma alulhatározott, akkor nincs egyértelmű megoldása, hanem a lehetséges megoldásokból nekünk kell kiválasztani a legmegfelelőbbet az adott feladathoz. Először meg kell vizsgálni, hogy az adott eljárás milyen viszonyban van az eredeti állapot paramétereivel. A visszakeresési módszer hibavizsgálat, vagy a változói jellemzése nélkül nem lehetséges.

A feladat a sugárzási egyenlet invertálása:

$$R_v = (I_o)_v \tau_v(z_o) + \int_{z_o}^{\infty} B_v(T(z)) \frac{d\tau_v(z)}{dz} dz \quad (1)$$

ahol  $(I_o)_v$  az emisszió a földfelszínről ( $z_o$  magasságból),  $\tau_v(z)$  a légkör transzmittanciája  $z$  magasságtól a műholdig,  $T(z)$  a vertikális hőmérsékleti profil,  $B_v(T(z))$  a Planck függvény, ami a frekvenciától és a hőmérséklettől is függ,  $z$  mindenhol a magasságot jelöli (Gelybó, 2006). A Planck függvény ismeretlen, Planck törvénye az abszolút fekete test hőmérsékleti sugárzása radianciájának spektrumát definiálja (Ács, 2012). Ha megtaláljuk, integrálásával meghatározhatjuk a hőmérsékletet. Egy mérési sorozat készítésekor  $R_i$ ,  $i=1, \dots, m$  mérés készül. Egymáshoz közeli hullámszámokon mérve a Planck függvény frekvenciafüggése leegyszerűsíthető egy reprezentatív hullámszámmal való számolásra. A transzmittancia deriváltja felírható a  $K_i(z) = \frac{d\tau_v(z)}{dz_i}$  súlyfüggvénnyel, ami már csak  $z$  és  $i$  függő. Így az egyenlet új alakja

$$R_i = (I_o)_i \tau_i(z_o) + \int_{z_o}^{\infty} B_i(T(z)) K_i(z) dz \quad (2)$$

Így a radiancia a Planck-függvény  $K_i(z)$  súlyfüggvénnyel súlyozott átlaga. Ennek az egyenletnek a megoldása is ugyanúgy nehézkes, mert az egyenlet alulhatározott, tekintve,



hogy csak véges számú mérést végez a műhold, míg a keresett mennyiség, például hőmérsékleti profil egy folytonos függvény. Különböző módszerekkel ezeket a folytonos függvényeket kívánt pontosságú diszkrét értékeket tartalmazó közelítő függvényekkel lehet írni (Rodgers, 2000).

Az állapotvektor,  $x$  tartalmazza a légkör eredeti állapotát leíró ismeretleneket,  $n$  elemmel. A mérések vizsgálatához egy  $m$  elemű  $y$  vektorba csoportosítva vizsgáljuk kapott méréseinket, amit mért vektornak nevezünk. Ennek a vektornak kell tartalmaznia az összes mért mennyiséget, amik függvényei az  $x$  állapotvektornak. A mérési folyamat fizikai leírását egy előrehaladó modell tartalmazza. A mérések véges pontosságúak, ezért az elvégzése során fellépő mérési zajt  $\epsilon$  jelöli.

Minden állapotvektornak van egy  $y_l$  ideális mérési vektora, amit a mérés fizikája határoz meg. Ez leírható egy  $y_l = f(x)$  előrehaladó függvénnyel. A mért vektor és az állapotvektor kapcsolatát  $y = F(x) + \epsilon$  írja le, ami az előrehaladó modell. Ez a modell foglalja magába a műszer működését, azt, hogy egy adott mérést milyen módon végez el. Mivel a tényleges folyamat leírása túl bonyolult, ezért ez csak közelítése mindannak, amit magába kellene foglalnia. Lineáris problémaként tekintjük, mert az információ tanulmányozása a mérésből így a legegyszerűbb. Az előrehaladó modellt egy  $x_0$  referencia pont körül kell linearizálni.

$$y - F(x_0) = \frac{\partial F(x)}{\partial x}(x - x_0) + \epsilon = K(x - x_0) + \epsilon \quad (3)$$

$K$  súlyfüggvény egy  $m \times n$  mátrix, amelynek elemei a  $K_{ij} = \frac{\partial F_i(x)}{\partial x_j}$  deriváltak. A súlyfüggvény-mátrix egyedi formát vesz fel minden mérésnél, és azt mutatja meg, hogy az adott mérés során a légkör egyes szintjei milyen súllyal vesznek részt az adott radiancia kibocsátásában. Olyan magasságban veszi fel maximumát, ahol a légköri elnyelés kisebb mértékű (Gelybó, 2006). Ezáltal meg lehet mondani, hogy milyen magasról származik egy mérés.

Az állapotvektoroknak, és a mérési vektoroknak megfelelő külön vektorterében gondolkodunk. Az állapottér  $n$  dimenziós, míg a mérési tér  $m$  dimenziós. Minden hely a térben egy pont, vagy egy vektor, ami az  $x_0$  referencia pontból a mérési pontba mutat. A mérési tér kiindulása  $F(x_0)$ . Az inverz probléma ezzel a terminológiával felírva azt jelenti, hogy meg kell találni a megfelelő inverz leképezést a mérési térből, hogy megtaláljuk a megfelelő állapotot. Maga a mérés is megfeleltethető az állapottérből a

mérési térbe való leképezésnek.  $K$  súlyfüggvény reprezentálja az előre való leképezést, mint mérést, az  $\epsilon$  hiba nélkül.  $K$  minden sora,  $k_i$  vektor az állapot térben, de nem egy állapotot reprezentál. Összefügg az  $y_i$ -dik méréssel úgy, hogy a mérési tér  $i$ -dik koordinátájú értéke egy adott  $x$  és  $k_i$  vektor összege, melyhez még hozzá kell adni az  $\epsilon$  hibát. Minden  $m$  sor egy koordinátához csatolható a mérési térben, így biztosítva a leképezést az állapot térből a mérési térbe. A leképezés folyamata pontatlan, aminek a mértékét a mérési hibastatisztika határozza meg a későbbiekben.

A tapasztalati hiba elemzését valószínűségi sűrűségfüggvénnyel (pdf<sup>31</sup>) végezzük, és a valószínűség becsléséhez Bayes közelítést használunk. A mért paramétert egy  $\bar{y}$  átlaggal és  $\sigma^2$  szórásnégyzettel rendelkező  $P(y)$  valószínűségi sűrűségfüggvény jellemzi. Ekkor  $\bar{y} = \int y P(y) dy$  és  $\sigma^2 = \int (y - \bar{y})^2 P(y) dy$ . A  $P(y)$  annak a valószínűségét írja le, hogy a tényleges  $y$  érték az  $(y, y + dy)$  intervallumban megtalálható  $P(y)$ -t általában Gauss eloszlással jellemzik. A mért mennyiség egy vektor, melynek különböző elemei korrelálhatnak egymással. Ezeket a korrelációkat gyűjti össze  $S_y$ , az  $y$  kovarianciamátrixában. Általánosan leírva a kovarianciamátrix  $S_{ij} = E\{(y_i - \bar{y}_i)(y_j - \bar{y}_j)\} \neq 0$ . A mátrix főátlójának elemei az egyes  $y_i$  elemek átlagtól vett eltérései. A kovarianciamátrix mindig szimmetrikus és pozitív definit mátrix. A nem főátlóbeli elemek a gyakorlatban nem nulla értéket vesznek fel, és ez növeli a korrelációt a vektorok különböző elemei közt. Ilyen értékekkel nem könnyű a vektorok összehasonlítása, ezért ezek eltüntetése szükséges, amit a súlyfüggvény transzformálásával érhetünk el. Egységvektoros felírása  $S_y = LAL^T$ , ahol  $L$  a sajátvektorok mátrixa.

A Bayes közelítés célja a mérés valószínűségi sűrűségfüggvényének összekapcsolása az eredeti állapot valószínűségi sűrűségfüggvényével (Rodgers, 2000). Ez a leggyakrabban használt módszer a zajjal terhelt inverz problémák esetén. Ha  $x$  valamilyen légköri állapotjelző, például hőmérsékleti profil, és  $y_m$  vektor tartalmazza a méréseket, például a IASI szonda radiancia méréseit, a Bayes közelítéssel meg tudjuk találni az adott  $y_m$  mérésekhez az  $x$  legvalószínűbb értékét úgy, hogy maximalizáljuk a feltételes valószínűséget (Gelybó, 2006). Az  $\epsilon$  hiba jelenléte okozza azt, hogy ha a leképezést megfordítjuk és az előrehaladó leképezést tekintjük, vagyis az állapot tér egy pontjából a mérési térben keressük a megoldást, akkor sem egy konkrét pontba jutunk, hanem egy tartományba, amit  $\epsilon$  valószínűségi sűrűségfüggvénye határoz meg. Ez még

---

<sup>31</sup> probability density function

üres térben is fennáll. Ha van előzetes klimatológiai ismeretünk vagy modelleredményünk, amihez szintén tartozik egy valószínűségi sűrűségfüggvény, akkor ezzel szűkíteni tudjuk a tartományt. Ez általában az *a priori* adatsor, ami a keresett eredmény gyenge becslését adja meg. Ezzel az információval közelebb kerülünk a keresett mennyiséghez, ugyanakkor ezt az előfeltételezést folyamatosan frissíteni is kell, hogy mindig a lehető legjobb eredményhez jussunk. A Bayes módszerben ennek az ismeretnek a felhasználását is beépítették. A valószínűségi sűrűségfüggvény egy skalár értékű függvény. A  $P(x|y)$  feltételes valószínűségi sűrűségfüggvény jelentése:  $P(x|y)dx$  annak a valószínűsége, hogy  $x$  az  $(x, x + dx)$  intervallumban van, amikor  $y$  értéke ismert. Ez a mennyiség a kérdés az inverz problémák esetén.

$$P(x|y) = \frac{P(y|x)P(x)}{P(y)} \quad (4)$$

A (4) egyenlet bal oldala az *a posteriori* vagyis utólagos valószínűségi sűrűségfüggvény. Ez az *a priori* ismeretek,  $P(x)$  valószínűségi sűrűségfüggvény, méréssel frissített alakja. A  $P(y|x)$  az  $y$ -ről ad információt, ha az állapot ténylegesen  $x$  értéket venne fel. Ennek leírásához az előrehaladó modellre és a mérési hibára van szükség. A nevezőben pedig a  $P(y)$  áll, ami a mérés előzetes valószínűségi sűrűségfüggvénye. Ezekből a fogalmakból áll össze a közelítés.

A visszakeresési módszer leírásához a felhasznált mennyiségek jellemzése szükséges (Rodgers, 2000). A távérzékelt mérésekben a mért  $y$  mennyiséget, az  $x$  alapállapot függő  $f$  függvény írja le. Más változtató paraméterek is befolyásolják az eredményt, amiket  $b$ -vel jelölünk. Ezekhez hozzáadódik még egy  $\epsilon$  tapasztalati hibtag. Ezeket egy egyenletben összegezve kapjuk:

$$y = f(x, b) + \epsilon \quad (5)$$

ahol  $f$  előrehaladó függvény foglalja magába, és írja le a mérési folyamat fizikáját, mint például a sugárzásátviteli elméletet, vagy a mérőműszer működésének mechanikáját. A  $b$  vektor összegzi azokat a paramétereket, amik befolyásolhatják a mérést, de valamilyen pontossággal ismertek. A visszakapott adatokban nem fognak szerepelni, mert a teljes mérés pontosságába számítódnak majd bele, az előrehaladó függvény paramétereiként. Ilyen például a színeképvonalak erőssége. Az  $\epsilon$  az érzékelő zaja, amit a későbbiekben mérési zajnak nevezünk majd.

Az  $\hat{x}$  a mérésen végzett  $R$  visszakeresési módszer eredménye. Tehát  $\hat{x} = R(y, \hat{b}, x_a, c)$  írható fel, ahol a kalap becsült mennyiséget jelez. A  $\hat{b}$  az előrehaladó függvény paramétereinek legjobb becslését jelzi, így különböző  $b$ -től, ami ismert volt. Az  $x_a$  és a  $c$  olyan változó vektorok, amik a már felírt függvényben nem jelennek meg, de befolyásolják a visszakeresés eredményét. Az  $x_a$  az *a priori* vektor, ami független a méréstől, számunkra az eredeti  $x$  állapotról szolgáltat plusz információt. A  $c$  is ilyen jellegű vektor, a visszakeresési módszer paramétereit foglalja magába, ilyen lehet például a konvergencia kritérium. Az  $\hat{x}$  keresésénél a Bayes közelítést használjuk, de eredményül nem az  $\hat{x}$ -ot kapjuk, hanem a  $P(x|y)$  valószínűségi sűrűségfüggvényt  $\hat{x}$  várható értékkel és  $\hat{S}$  kovarianciamátrixszal.

Az előző két egyenletet összevetve kapjuk meg az átviteli egyenletet:

$$\hat{x} = R(f(x, b) + \epsilon, \hat{b}, x_a, c) \quad (6)$$

Ez az egyenlet foglalja magába az egész megfigyelő rendszer működésének leírását, a műszer működésével és a visszakeresési módszerrel együtt. Ezért az összetevőinek megismerése elsősorú feltétel a későbbi karakterizációhoz és hibavizsgálathoz. A karakterizációval ismerjük meg a visszakapott adatok érzékenységet az eredeti állapotra, a  $\frac{\partial \hat{x}}{\partial x}$  deriváltak mátrixával kifejezve. A hibavizsgálat az összes előforduló hiba hatását vizsgálja a visszakapott adatokon. Az előrehaladó függvény sok nehézség forrása lehet. A vele leírni kívánt fizikai folyamatok túl bonyolultak az egyértelmű, explicit leíráshoz, például ha a szórási és a molekulák elnyelési sávjait is figyelembe akarjuk venni, vagy a már belefoglalt részletezett fizikai folyamat bizonytalan, például a felhők pontos felismerését próbáljuk modellezni. Mindkét esetben az  $F(x, b) \cong f(x, b, b')$  előrehaladó modell használt. Itt részletesebben van kifejtve a  $b$  vektor és az előrehaladó függvény paramétere. A  $b'$  szintén az előrehaladó függvény paramétere, de csak azok, amik az előrehaladó modell szerkezetébe nincsenek beépítve. A modell linearizálása szükséges a részletesebb megismeréséhez. A (6) behelyettesítve a modellt  $F(x, b)$ , és az ezzel keletkezett hibát ( $\Delta f$ ), ezt kapjuk:

$$\hat{x} = R[(F(x, b) + \Delta f(x, b, b') + \epsilon, \hat{b}, x_a, c) \quad (7)$$

A modellt  $x = x_a$  és  $b = \hat{b}$  értékek körül linearizáljuk:

$$\hat{x} = R[F(x_a, \hat{b}) + K_x(x - x_a) + K_b(b - \hat{b}) + \Delta f(x, b, b') + \epsilon, \hat{b}, x_a, c] \quad (8)$$

Ezzel új tagok kerülnek az eredeti állapot becslésének egyenletébe. Ilyen a  $K_x$ , ami a modell érzékenységet mutatja meg a  $\frac{\partial F}{\partial x}$  súlyfüggvényekre. A  $K_b$  pedig a modellparaméterekre való érzékenységet írja le. Az egész kapott egyenletet linearizálva  $y$ -nal:

$$\hat{x} = R[F(x_a, \hat{b}), \hat{b}, x_a, c] + G_y[K_x(x - x_a) + K_b(b - \hat{b}) + \Delta f(x, b, b') + \epsilon] \quad (9)$$

kifejezéshez jutunk, ahol  $G_y = \frac{\partial R}{\partial y}$  a visszakeresés érzékenysége a méréshez képest, ami ekvivalens a mérési hibával való kapcsolatához. Ezt átrendezve kapjuk a következő kifejezést:

$$x - x_a = (R[F(x_a, \hat{b}), \hat{b}, x_a, c] - x_a) + (A(x - x_a)) + (G_y \epsilon_y) \quad (10)$$

Itt  $A = G_y K_x = \frac{\partial \hat{x}}{\partial x}$ , ami az eredmény érzékenysége az eredeti állapot függvényében, és egy négyzetes átlagoló mátrix. Az egyenlet jobb oldalán három tag összeadása szerepel. Az első tag a torzulás, mely egy szimulált hibamentes mérés során fellép. A második a simítási tag, ami azt mutatja meg, hogyan simítja ki a profilt a megfigyelő rendszer. A harmadik pedig a visszaérkezett hiba. A harmadikban szereplő  $\epsilon_y$  írja le a teljes mérési hibát:

$$\epsilon_y = K_b(b - \hat{b}) + \Delta f(x, b, b') + \epsilon. \quad (11)$$

A különböző hiba fogalmak bemutatását a (10) és (11)-es egyenletek további rendezésével kapott egyenletből tesszük:

$$\hat{x} - x = (A - I_n)(x - x_a) + G_y K_b(b - \hat{b}) + G_y \Delta f(x, b, b') + G_y \epsilon \quad (12)$$

Az összeadás első tagja a simítás során keletkező hibatag, de ez csak becslés, mert az eredeti állapot ismeretlen. Az  $x_a$  és  $S_a$  segítségével számított statisztikai jellemzőit használjuk fel. Az átlaga és kovarianciamátrixa a kérdés. A kovarianciamátrixának alakja:  $S_s = (A - I_n)S_\epsilon(A - I_n)^T$ . A hiba elemzéshez az  $S_\epsilon$  kovariancia feltétlen szükséges. Az előrehaladó modell paramétereinek hibája az egyenlet második tagja. Ennek értékelése egyértelműen elvégezhető, ha a paraméterek becslése megfelelő, és ha a modell lineáris. Ekkor a számítás torzítatlan. A harmadik tag az előrehaladó modell hibája, és átírható  $G_y \Delta f = G_y [f(x, b, b') - F(x, b)]$  alakba. Ennek az értékelését nehezíti, hogy  $x$  és  $b$

értékekkel kell végezni. Ha az  $f$  függvény nem részletes, és nincs pontosan illeszkedő modell akkor nehéz a számítása. Ezen okokból kifolyólag ez a hiba általában szisztematikus. Az utolsó tag a legkönnyebben értékelhető, mert  $\epsilon$ -nak ismert a kovarianciamátrixa, és minden mérési csatornán egymástól függetlenül más.

### 3.1 Validációs Becslési Modell

Az előzőekben ismertetett alapfogalmak felhasználásával Pougatchev egy lineáris statisztikai módszert, a Validációs Becslési Modellt<sup>32</sup> (VAM) dolgozott ki a validációhoz (Pougatchev, 2008). A VAM rádiószondás méréseket használ fel, és a IASI visszakeresések becslését adja a IASI átlagoló magmátrixok és a referencia rádiószondás adathalmazok statisztikai jellemzőinek felhasználásával (Pougatchev et al., 2009). A validálás egy olyan tevékenység, ami becsli a szonda hibáját már a működés során. Az adatok felhasználhatóságának érdekében a műhold adatok validálása elengedhetetlen, hogy az eredeti állapottal való kapcsolatuk ismert legyen, statisztikailag becsült hibával (Rodgers, 2000 és Eyre, 1997). A pályára állítás előtt is végeznek hiba analizálást a műholdakon, de ezek az eredmények eltérhetnek a pályán mozgás során. A validáció egyik módja lehet a műholdas adatoknak egy független adathalmazból készített becsléssel történő összehasonlítása. Az űrből érkező mérések a légköri és felszíni paraméterek egy függvényét adják. Ennek ideális validációja egy közvetlen összehasonlítás lenne, olyan validáló adatokkal, amiknek ugyanolyanok a jellemzői, és a hibáik elhanyagolhatóan kicsik. Ez nem lehetséges, mert a rendszereknek különböznek a jellemzőik. A hibáik nem elhanyagolhatóak és egymáshoz közel eső, de kicsit eltérő helyeken és időben végzik a méréseiket. Ezeket az adathalmazokat korreláló méréseknek nevezzük (Pougatchev et al., 2009), mert összehasonlításuk így is jól használható validációra. A gyakorlati alkalmazás során megjelent egy új hiba, ami az előzőekben ismertetett hibafogalmak között még nem szerepelt (Rodgers, 2000). A térben nem egyenletes dinamikus légkör okozza az állapot nem-egybeeső hibát<sup>33</sup> (Pougatchev, 2008). Az eddigiekben bevezetett fogalmakat, a VAM során használt fogalmakkal újra definiálom, és tömören bemutatom a modell által felhasznált legfontosabb formulákat.

---

<sup>32</sup> Validation Assessment Model

<sup>33</sup> State non-coincidence error

Azt mondjuk, hogy a IASI a méréseit egy  $\mathbf{X}_v$  alapállapotú adat együttesről készíti, aminek átlaga  $\bar{\mathbf{x}}_v$ , és kovarianciája  $\mathbf{S}_v$ . A IASI-tól kapott profil  $\hat{\mathbf{x}}$  lineáris közelítéssel kapcsolódik az  $\mathbf{x}_v$  vektorhoz:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_a + \mathbf{A}(\mathbf{x}_v - \mathbf{x}_a) + \varepsilon \quad (13)$$

Itt  $\mathbf{x}_a$  az *a priori* profil, és egyben a linearizációs pont is,  $\mathbf{A}$  az átlagoló magmátrix,  $\varepsilon$  pedig az a hiba, amit meg szeretnénk határozni a validálás során. Máshogy definiálva, a visszakeresési folyamat hibája az alapállapot és a visszakapott profil közti különbségként is felírható:

$$\varepsilon_{tot} = \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_v = (\mathbf{I} - \mathbf{A})(\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_v) + \varepsilon_n + \varepsilon_{un} \quad (14)$$

Az első tag a simításból eredő hibát ( $\varepsilon_{sm}$ ) írja le, a második a visszakeresés zajból adódó hibáját, a harmadik pedig a nem modellezett hibát. A pályára állítás előtti algoritmus karakterizációjából ismerjük az  $\mathbf{A}$  várható átlagoló mátrixokat. Az  $\mathbf{S}_v$  kovarianciák ismeretében, a várható teljes hiba kovarianciája is felírható:

$$\mathbf{S}_{tot_e} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})\mathbf{S}_v(\mathbf{I} - \mathbf{A})^T + \mathbf{S}_n = \mathbf{S}_{sm} + \mathbf{S}_n \quad (15)$$

A feladat  $\mathbf{S}_n$  kovarianciamátrix megtalálása, ami alapján már ismertté válik a visszakeresés hibája.

A rádiószondás mérések  $\mathbf{x}_s$  mért profiljait egy  $\mathbf{X}_c$  mátrix tartalmazza. Ezek kapcsolódnak az alapállapot  $\mathbf{x}_c$  vektorához:

$$\mathbf{x}_s = \mathbf{x}_c + \varepsilon_c \quad (16)$$

Az indexekben megjelenő  $c$ , a korreláló adathalmazt jelöli, melynek átlaga  $\bar{\mathbf{x}}_c$  vektor, kovarianciamátrixa  $\mathbf{S}_c$ , és  $\mathbf{S}_{\varepsilon c}$  az  $\varepsilon_c$  zaj kovarianciamátrixa.

*Pougatchev, 2008* alapján felírható a következő összefüggés:

$$(\mathbf{x}_v - \bar{\mathbf{x}}_v) = \mathbf{B}_x(\mathbf{x}_c - \bar{\mathbf{x}}_c) + \xi \quad (17)$$

Az itt szereplő  $\mathbf{B}_x$  egy korreláló mátrix,  $\xi$  pedig egy véletlen hiba, ami az idő- és térbeli nem egybevághóságból adódik a műhold és a rádiószonda mérések közt. A  $\xi$  hiba átlaga nulla, de kovarianciamátrixa  $\mathbf{S}_\xi$ . A műhold által mért és az eredeti állapot közti legjobb lineáris becslését eltérését a  $\mathbf{B}_x(\mathbf{x}_c - \bar{\mathbf{x}}_c)$  tag írja le. Ennek a becslésnek a hibája

$\xi$ , és ezt egy várható értéként kell értelmezni. Gyakorlatban a validáció során a különbség felírása ilyen alakú:

$$\delta = \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{AB}\mathbf{x}_s \quad (18)$$

Ha nem lép fel a nem-modellezett hiba, akkor a különbség kovarianciája:

$$\mathbf{S}_\delta = \mathbf{AS}_\xi\mathbf{A}^T + \mathbf{S}_n + (\mathbf{AB})\mathbf{S}_{\varepsilon c}(\mathbf{AB})^T \quad (19)$$

Az első tag jelzi a nem-egybeeső hibát, a második a visszakeresés zaja, a harmadik tagban pedig a rádiószonda hiba hozzájárulása jelenik meg. A hibabecslés validálásához először az  $\tilde{\mathbf{S}}_\delta$  minta kovariancia, majd az  $\tilde{\mathbf{S}}_n$  számítása a feladat.

$$\tilde{\mathbf{S}}_n = \tilde{\mathbf{S}}_\delta - \mathbf{AS}_\xi\mathbf{A}^T - (\mathbf{AB})\mathbf{S}_{\varepsilon c}(\mathbf{AB})^T \quad (20)$$

A (20) egyenlet magába foglalja a visszakeresési hibát és a lehetséges nem-modellezett hibát is. Az első tag a korreláló mérésekből számolható, a többi tag a IASI szonda jellemzőiből és a rádiószonda ismert hibájából származtatott, az átlagoló mátrixok ( $\mathbf{A}$ ), valamint a hiba kovariancia ( $\mathbf{S}_{\varepsilon c}$ ) felhasználásával. A korreláló adathalmazok statisztikai analíziséből származó eredmények – a  $\mathbf{B}$  korreláló mátrix, és a nem-egybeeső hiba kovariancia,  $\mathbf{S}_\xi$  – kapjuk meg a keresett kovarianciamátrixot.

A (15) egyenletből kapjuk meg a várható hiba becslését, a (20) egyenlet pedig ennek validációja. Térbeli és időbeli nem-egybeeső hibák kovarianciamátrixai, és a korreláló mátrixok is szükséges információk a validáció elvégzéséhez. Az időbeli nem-egybeeső hibák, és a kapcsolódó korreláló mátrixok a rádiószonda profilokból származtathatók (*Pougatchev, 2008*). A térbeli hiba és a visszakeresés zaja a IASI adatokból következtethető ki.

Ezt a módszert alkalmazták a 2007 nyarán Lindenbergben elvégzett 92 mérési napos IASI validációs kampány adataira. A hőmérsékleti profilokra a becsült és a várt teljes visszaérkező hibák közti standard hiba 900 mb alatt 2 K alatt marad. Ezt az eltérést okozhatják nem detektált felhők és köd, vagy a felszín radiatív tulajdonságainak pontatlan modellezése. Ennél szignifikánsan kisebb az eltérés a magasabb rétegekben. Ez jelzi, hogy a IASI adatok nagyon pontos információtartalommal, és sűrű felbontással rendelkeznek. A becsült és várt hibák közti kis különbség biztosítja, hogy az átlagoló mátrixok ( $\mathbf{A}$ ) kellőképp jellemzik a visszakeresett eredményt, ezért fel lehet használni őket további asszimilációra. A IASI és a rádiószondák közti hiba is a felszín közelében a



legnagyobb, 2 K, de feljebb  $\pm 0,6$  K-re csökken. Hasonlóan a hőmérsékleti profilhoz, a nedvességi profil is a felszín közelében mutatja a nagyobb eltérést a becsült és várt hibák standard hibájában. 700 mb alatt 10% is lehet, de e felett szintén csökken. Ez azt sejteti, hogy a hőmérséklet- és a nedvességprofilok hibáinak forrása azonos. A relatív nedvességi profilok 800 mb felett rendelkeznek biztosan felhasználható információ tartalommal. A rádiószondás felszállásoktól való különbsége  $\pm 10\%$ -on belül ingadozik.

Ezek az eredmények is alátámasztják, hogy a VAM eredményesen alkalmazható a hibabecslések számításához. A korreláló adathalmaz statisztikai jellemzői segítségével kiszámítható a nem-egybeeső hiba is, és az átlagoló mátrixokkal a spektrális felbontás összeegyeztetése is lehetséges.

## 4. A IASI validációja – JAIVEx

Egy új műhold kalibrációjához és validációjához létfontosságúak az in-situ mérési adatok, azok közül is kiemelt jelentőségűek a repülőgépes mérési expedíciók, melyekkel, a műholdakéval jól egyező mérési adatszerkezet kapható. A mérőeszközöknek nagyon pontosnak kell lennie, hogy megbízható és jól összehasonlítható adatokat kapjunk (*Smith et al., 2008*). A JAIVEx<sup>34</sup>, vagyis Egyesült Légi IASI Validációs Kísérlet, 2007 áprilisában és májusában zajlott az Egyesült Államokban, Oklahoma állam és a Mexikói-öböl felett. Ez a legpontosabb és legátfogóbb kísérleti kampány, a IASI értékelésével kapcsolatban (*Pougatchev et al., 2009*). A kísérlet európai közreműködéssel készült. A validációs kalibrációs kampány fő céljai:

- a műhold szenzorok radiometrikus és spektrális kalibrációja
- különböző pályán mozgó műholdszensorok mérésének összehasonlítása
- a geofizikai változók kinyeréséhez használt sugárzásátviteli modellek validációja
- felkészülés a pontos in-situ és jól kalibrált földi, légi és űrbeli adathalmazok fogadására.

A kampány a MetOp és az NPOESS<sup>35</sup> műholdsorozatok támogatására indult. A felhasznált két repülőgép az amerikai NASA WB-57, és a brit FAAM BAe-146-301 voltak. A WB-57 repülőgép két fő szenzora a NPOESS számára fejlesztett NAST-I<sup>36</sup> és S-HIS<sup>37</sup> spektrométerek. A NAST-I térbeli szondázásokat végez, és a spektrális felbontása valamint a lefedettsége nagyon hasonló a IASI-éhoz, a repülési magasságig 2 km-es horizontális felbontással. Az S-HIS hasonló adottságokkal rendelkezik, mint a másik szonda, és mint a IASI, de a spektrális felbontása csak feleakkora.

A mérés egyik célpontja Oklahoma államban egy in-situ és földbázisú légkör távérzékelő szenzorokkal felszerelt létesítmény<sup>38</sup>, ami tökéletes a meteorológiai produktumok validációjához. A másik célpont, a Mexikói-öböl, viszonylag egyöntetű felszíne miatt, a spektrális radiancia mérések validációjához megfelelő. Az egyik fontos cél a MetOp-A operatíván működő műhold, és a NASA A-Train<sup>39</sup>, 6 műholdból álló

---

<sup>34</sup> Joint Airborne IASI Validation Experiment

<sup>35</sup> National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System – Nemzeti Poláris pályán keringő Operatív Környezeti Műhold Rendszer

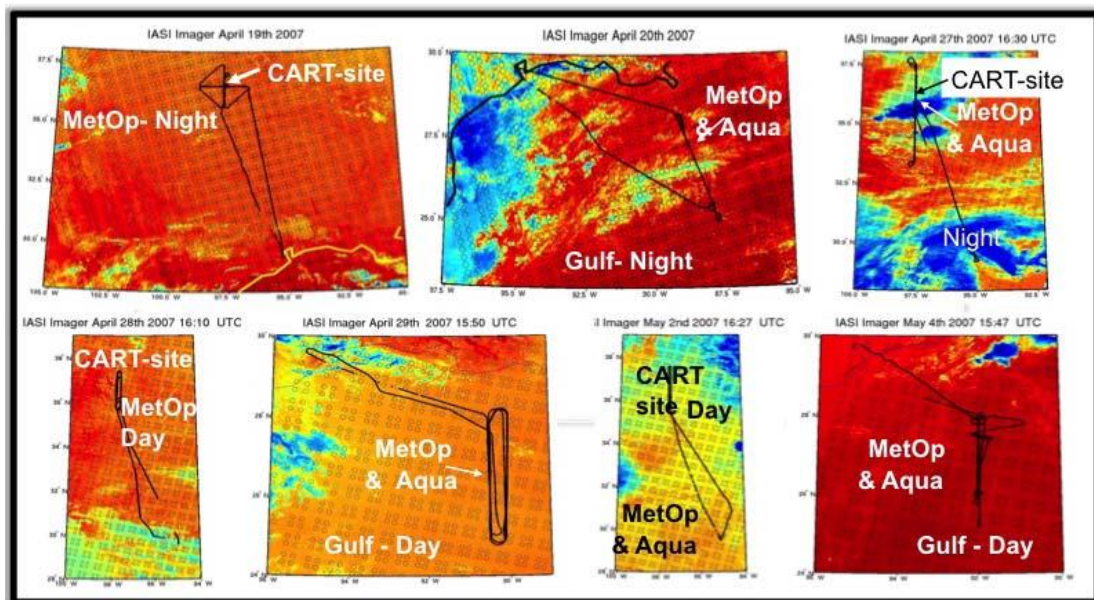
<sup>36</sup> NPOESS Airborne Sounding Testbed-Interferometer – NPOESS Levegőből Szondázó Próba Interferométer

<sup>37</sup> Scanning High resolution Interferometer Sounder – Szkennelő Igen Nagy Felbontású Interferométer Szonda

<sup>38</sup> US Department of Energy Southern Great Plains Atmospheric Radiation Measurement facility in North Central Oklahoma

<sup>39</sup> Afternoon Train – Délutáni Szerelvény

műholdsorozat Aqua műhold mérőképességének összehasonlítása. Bár a MetOp-A és az Aqua áthaladása közt 4 óra különbség van, a repülő olyan hosszú ideig repült, hogy mindkét méréssel egy időben legyen adat. A repülőgép szenzorai relatív kalibrációs referenciaként szolgáltak a két műholdrendszer tér- és időbeli mérések különbségeinek számításba vételéhez, a spektrális radiancia mérések és az azokból származó produktumok esetében. Ez különösen hasznos volt a különbségek jellemzéséhez az Aqua műhold AIRS szenzora és a MetOp-A műhold IASI szenzora közt. Négy repülést hajtottak végre az oklahomai helyszín felett, két nappalit és két éjszakai, és három felszállást a Mexikói-öböl felett, két nappalit és egy éjjelit. A repülések útvonalait a 7. ábra szemlélteti, a műholdak mérési rácsaira rajzolva.

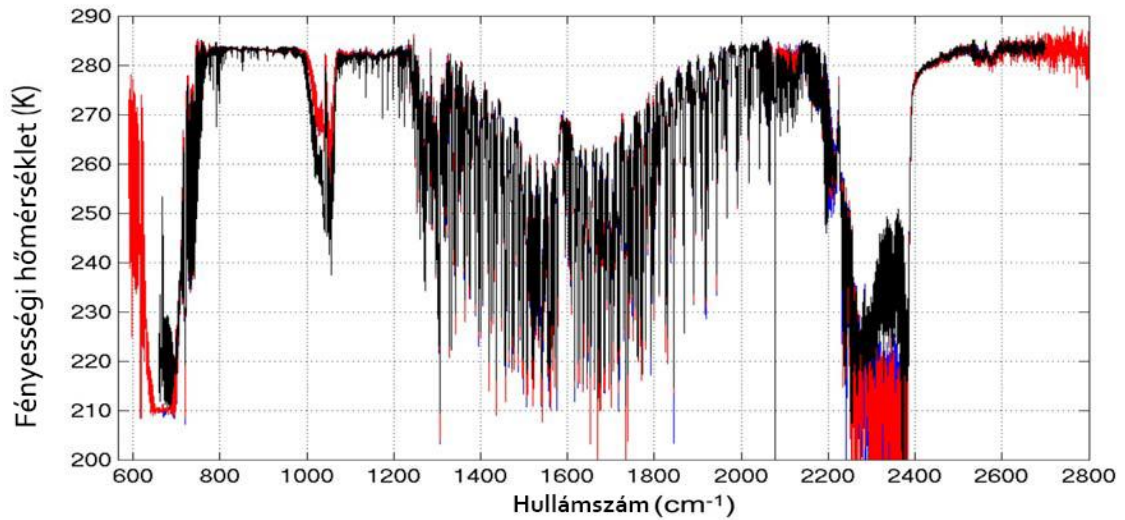


7. ábra: A WB-57 repülőgép útvonalai, a JAIVEx kampány alatt (Smith et al., 2008).

A szenzorok spektrális kalibrációjánál a IASI és a repülőgép szondáinak méréseit vetették össze. Az Oklahoma feletti 2007. április 19-i méréseket használták fel a 8. ábra készítéséhez, amin a IASI, a NAST-I és S-HIS mérései vannak összevetve az egész spektrumon. A IASI és a NAST-I is  $0,25 \text{ cm}^{-1}$  felbontásban mér, míg az S-HIS kisebb felbontással,  $0,5 \text{ cm}^{-1}$ -ben tapogatja a légkört, ezért a két nagyobb felbontású műszer méréseit redukálták  $0,5 \text{ cm}^{-1}$ -esre az összehasonlításhoz. Mint az ábrán is látszik, kis különbség van a IASI és a repülőgépes mérések közt. Szignifikáns eltérés azokban a régiókban van, ahol jelentősebb a légkör radiancia hozzájárulása a repülőgép feletti légrétegekben. Ez a hozzájárulás kiszámítható egy LBLRTM<sup>40</sup> modell eredményeinek

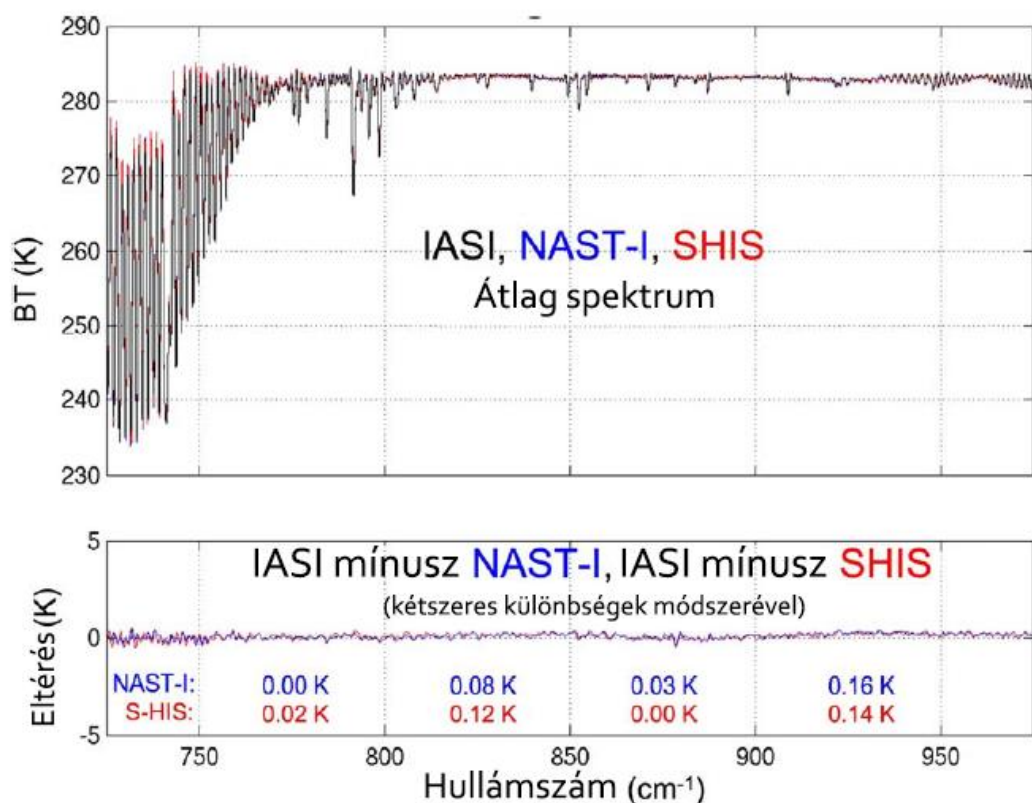
<sup>40</sup> Line By Line Radiative Transfer Model – Sorról Sorra Sugárzás Átviteli Modell

felhasználásával. Ehhez a műhold áthaladása előtt egy órával és a műhold áthaladásakor felengednek egy rádiószondát. Az egy órával előtte történő felszállás azért szükséges, mert ez a szonda a műhold áthaladásának idejére már a felsőbb légrétegekbe ér, így teljes képet kapunk e két szonda felengedésével. A felső légköri járulék befolyását az adatokon úgy csökkentik, hogy mind a műhold méréséből, mind a rádiószondák méréseiből kivonják a modellezett eredményt. Ez az úgynevezett kétszeres különbségképzés.



8. ábra: A IASI (fekete), a NAST-I (kék) és a S-HIS (piros) mérései 2007. április 19-én, körülbelül 18 km-es magasságig (Smith et al., 2008).

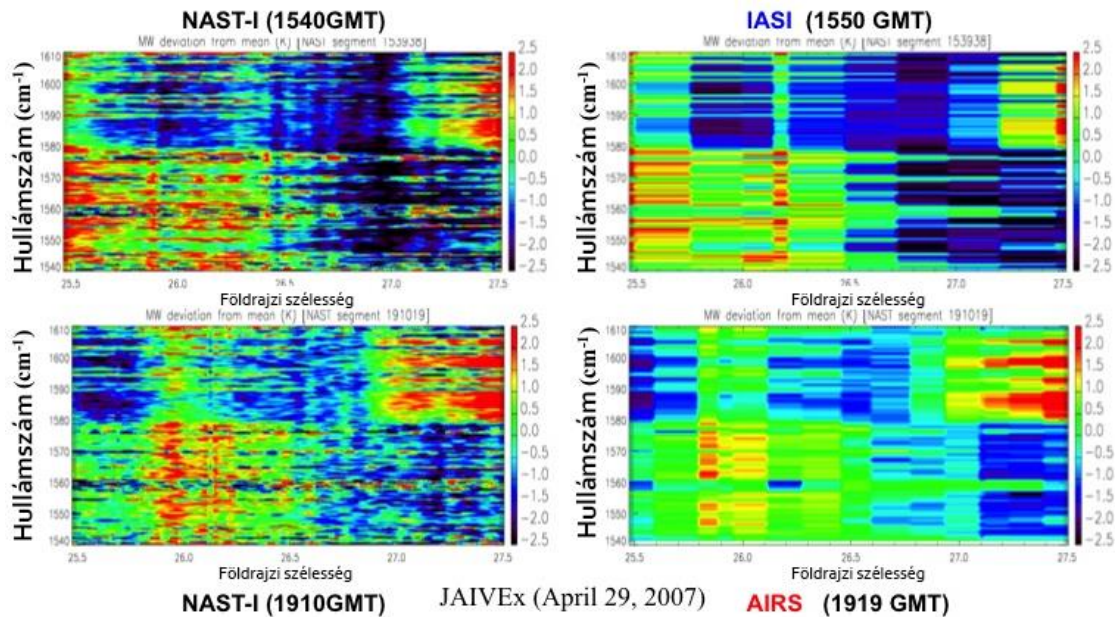
A hosszú hullámhosszú tartományon végzett radiancia mérésekre a validáció szintén kis különbségeket mutat a IASI és a repülő műszerek mérései közt, mint a 9. ábra mutatja. A kétszeres különbségeket kiátlagolták  $50 \text{ cm}^{-1}$  széles intervallumokban, így csökkentve a mérési zaj hatását. A IASI mérések abszolút pontossága nagyon jó, mert a NAST-I és S-HIS műszerekhez képest, a csökkentett spektrális felbontáson számított értékei  $0,2 \text{ K}$ -es eltérésen belül vannak. Ezt mutatja be a 9. ábra alsó diagramja.



9. ábra: IASI és a WB-57 szondáinak 725–975  $\text{cm}^{-1}$  közti, hosszú hullámhosszú régióban, a 8. ábra megfelelő intervallumának kinagyítása. Az alsó diagram a kétszeres különbség képzés eredményeit mutatja be a IASI és a NAST-I, valamint a IASI és a SHIS közt 50  $\text{cm}^{-1}$  intervallumok felett. A különbségek adódhatnak a repülőgépek feletti hozzájárulások nem megfelelő modell számításaiból is (Smith et al., 2008).

A JAIVEx kísérlet arra is szolgált, hogy az Aqua AIRS és a MetOp IASI szondázó műszereket kereszt-validálják egymással a repülőgépen telepített felszerelés segítségével. A kereszt-validáció máskülönben bonyolult a már említett négy órás különbség miatt. Ezt úgy küszöbölték ki, hogy ahelyett hogy közvetlenül a két műhold méréseit vetették volna össze egymással ugyanazon időben, a repülést úgy időzítették, hogy mindkét műhold áthaladási idejében mérjen, és az útvonalat szinkronizálták a műholdak pályájával. A vízgőz fényességi hőmérsékletének spektrumán végezték az összehasonlítást, 1540–1610  $\text{cm}^{-1}$  közti tartományon. A 10. ábra felső két képe a NAST-I és IASI szenzorok összehasonlítása. Látszik rajta, hogy a IASI jó pontossággal képes a légköri vízgőzt érzékelni, a különbségek nagyrészt a felbontás különbségeiből származnak. Az alsó ábrák szintén a NAST-I, és ebben az esetben az AIRS szondát hasonlítják össze négy órával később. Itt szintén csak a felbontás különbségeiből adódó eltérést láthatunk.

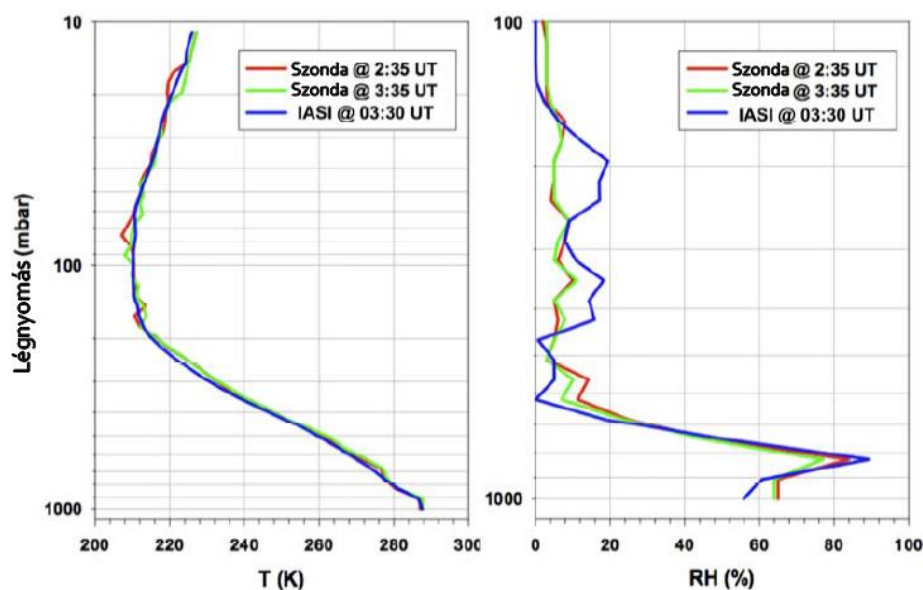




10. ábra: IASI és AIRS szenzorok vízgőz fényességi hőmérsékletének spektrumán ( $1540\text{-}1610\text{ cm}^{-1}$ ) végzett mérései, összevetve a NAST-I szenzor méréseivel; É  $25,5\text{-}27,5$  szélességi fokok közt a Ny  $90$  hosszúsági fokon (Smith et al.,2008).

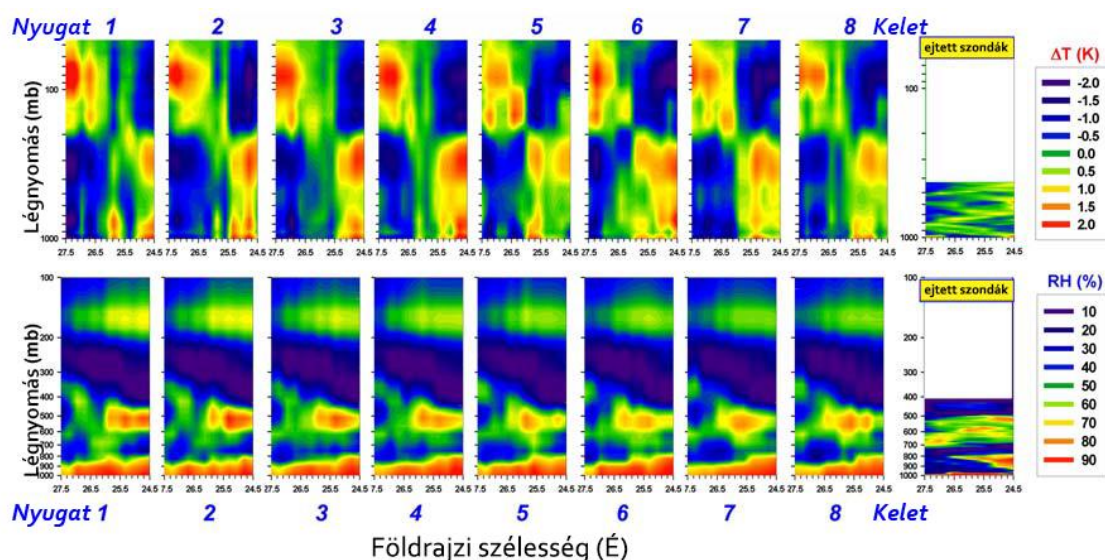
Nemcsak a nyers radiancia mérések, hanem az LBLRTM számításainak pontossága is fontos szerepet játszik a produktumok pontosságában, ezért a műholdak mérései alapján validálták a modellt is. A JAIVEx adathalmaz alkalmas a radianciából számított profil-számítási módszerek és az eredmények felbontásának és pontosságának validációjára. A műholdas mérések és a modell számításai közti különbség elfogadható, mert minden esetben  $0,5\text{ K}$ -en belül marad. A legrövidebb és a leghosszabb hullámhosszon nagy eltérések fordulnak elő, mert a IASI ezen tartományokon belül nagy zajjal mér. Az eredményekkel biztonságosan lehet dolgozni, a IASI mérések további felhasználása megbízható, így a nyers mérésekből készített geofizikai produktumok is.

A JAIVEx adathalmaz alkalmas a műhold visszakeresési technikáinak ellenőrzésére is. A 11. ábra a IASI és két rádiószonda fényességi hőmérsékletéből számított hőmérséklet és relatív nedvesség profilját mutatja a légkörnek. A két szonda felengedése itt is szükséges a teljes profil pontosabb ismeretéhez. A kapott eredmény megerősítette a kutatókat abban, hogy a IASI nagyon részletes vertikális felbontás visszaadására is alkalmas, mind a hőmérséklet, mind a nedvességi profilok szempontjából.



11. ábra: IASI mérés összehasonlítása 2007. április 19-dikei két rádiószonda felszállással (Smith et al., 2008).

Egy másik esettanulmány, a 12. ábrán, azt mutatja, hogy mezoskálájú térszerkezet visszaadására is képes a IASI ultraspektrális felbontásban. A Mexikói-öböl felett a IASI által mért 96 darab IFOV radiancia spektrumát vizsgálták, és vetették össze repülőről ejtett szondák méréseivel. A kísérletet úgy időzítették, hogy egy órán belül történjenek a mérések, a IASI áthaladása legyen az idő középpontjában. A szondákat a IASI útvonalán ejtették le a repülőről. Az ejtett szondák méréseit kiátlagolták, és úgy végezték az összehasonlítást a IASI látómezőivel. Bár a IASI mérései 100 mb-tól kezdődnek, a szondák használhatók validációra a 400 mb alatti légkörben. A 12. ábrán balról jobbra nyugat felől kelet felé halad a IASI, nyolc egyenként 12 IFOV-ból készült átlagolt mérései, míg a jobb oldalon az ejtett szondák eredményei rajzolódnak ki. A felső sorban a hőmérséklet profilok átlagtól vett eltérései, míg az alsóban a nedvességi profilok eredményei vannak ábrázolva az adott nyomási szintre. Az ejtett szondák részletesebb felbontásban adják vissza a paramétereket, amint ezt vártuk is. A nedvességi profil szempontjából az eredmények nagyon hasonlóak, elég pontosnak vehető a IASI eredménye. A hőmérsékleti profilban megfigyelhető, hogy a IASI mérésekben több a térbeli szerkezeti összefüggés, mint az ejtett szondák független méréseiből készített profil. Ez a légköri hőmérséklet változékonysága miatt van.



12. ábra: 8 darab szomszédos észak-déli irányú mérés, egyenként mindegyik 12 IASI hasznos látómező átlagolásából készült. Az első sorban a vertikális hőmérsékleti profilok átlagtól vett eltérése, míg a második sorban a relatív nedvesség profilok rajzolódnak ki. Balról jobbra haladva a metszetek nyugatról kelet felé vannak elrendezve. A sorok utolsó ábrái, az ejtett szondák 400 mb alatti átlagtól vett eltéréseit mutatják be (Smith et al., 2008).

A JAIVEx kalibrációs és validációs kampány nagyon sikeresnek tekinthető. A mérés során felhasznált műholdas, felszíni, repülőgépes és in-situ mérések mind szükségesek egy validációs kampány sikerességéhez. A hét mérési napból csak kettő eredményeit bemutatva is látszik, hogyan lehet az adatokat eredményesen felhasználni, összevetni egymással, hogy az összehasonlítások is sikeresen alkalmazhatóak legyenek a továbbiakban. A fenti példák bemutatják, hogy a IASI mérései az elvárt 0,5 K-es abszolút radiometrikus hibahatáron belül maradnak. A kísérlet során készült JAIVEx adathalmazt tovább tanulmányozták, és a IASI valamint az AIRS adatok további validálásához is használták.

Készült 2009-ben egy tanulmány Zhou vezetésével, amiben a visszakeresési technikákat vizsgálták részletesen (Zhou et al., 2009). A MetOp műhold IASI műszerében egy fizikai, és geofizikai paramétereket előállító rendszer lett fejlesztve, ami a felhős és derült időben mért radianciák további számolásaira képes. A szonda adatok felhasználásával fejlesztették az infravörös tartományban, hogy egyszerre képes legyen a felszín, légkör és felhő paraméterek meghatározására. Az inverz módszert iterációval tovább finomították. A tanulmány írásakor, ez volt a legfejlettebb visszakeresési módszer. A validáció a IASI, az AIRS és a JAIVEx adatok felhasználásával történt. Az első eredmény azt mutatta, hogy ezen infravörös tartományban mérő szondák rendkívül finom felbontásban képesek visszaadni a légkör vertikális mezőit, és mindkét szonda hasonló



pontosságra képes. A két műhold mérései közti 3 és fél órás áthaladási különbséget a JAIVEx adathalmaz felhasználásával küszöbölték ki. Az algoritmusok fejlesztése folyamatos, mégis az ekkor kapott eredményekből már levonhatóak voltak fontos következtetések. Szinte egybevágó légköri és felszíni szerkezetet mutattak a szondák mérései. A vízfelszín paramétereinél is az elvárt pontosságot hozták. A különbségek szórása a hőmérsékleti profiloknál 1 K alatt maradt, a relatív nedvesség esetében pedig 10% alatt, de csak a felszíni határréteg felett. A felszíni határrétegben a relatív nedvesség szórása nagyobb, 10–20% közti. Ezen hibák ellenére is hatalmas sikernek tekintették az expedíciót, mert először készült a légkör horizontális paramétereinek, pár kilométeres felbontású ennyire pontos leképezése műholdas műszerek segítségével.

A pályára állítás utáni validáció létfontosságú a műholdas mérési rendszerek minőségének javításához (*Larar et al., 2010*). Elengedhetetlen, hogy felülvizsgálják a rendszer összes tagját, úgymint a szenzorokat, algoritmusokat, és az előállított produktumokat. Ezt bizonyos időközönként meg kell ismételni, hogy hosszú távú folyamatos megfigyelés legyen megvalósítható, a kutatások és hasznos alkalmazás érdekében. Az FTS<sup>41</sup>, vagyis Fourier Transzformáló Spektrométerek, repülőgépre szerelve, független, könnyen nyomon követhető méréseket képesek biztosítani a validációhoz. Mérésük ugyanolyan 1. szintű paramétereket eredményez, mint a műholdas adatok tekintve, hogy megfelelő időzítéssel térben és időben is egybevágóak a megfelelő szondákkal. A JAIVEx során felhasznált NAST-I is ilyen spektrométer. Karbantartását és felépítését a NASA Langley Kutató Központ<sup>42</sup> végezte. Ugyanazon műszerek összehasonlításait végezték, mint *Zhou et al., 2009*. A hangsúlyt a kereszt-validációra helyezték a IASI és AIRS közt. Az AIRS már validált és használt adatai fontos referenciák az új IASI eszköz validálásához. A két szonda adatainak pontossága nagyon fontos, mert együtt biztosítani tudják a mérések időbeli folytonosságát. A légi mérések felhasználása az FTS típusú műszerekkel, mint a NAST-I, a spektrális sávon maradás becslésében is létfontosságú szerepet játszanak. A méréseik alapján a műholdakkal direkt összehasonlítható átlagokat kapunk, egybevágó időbeli és térbeli felbontással. Ha csak szimulációkkal végeznénk az összehasonlítást, akkor az előrehaladó modell paraméterek, mint például a felszíntulajdonságok bizonytalansága felerősítenék a radiancia értékeket. Így az összehasonlításuk eredménye is romlik. A JAIVEx-hez hasonló adathalmazok

---

<sup>41</sup> Fourier Transform Spectrometer – Fourier Transzformáló Spektrométer

<sup>42</sup> NASA Langley Research Center

felhasználása nélkül, a műholdas adatok validációja korlátozva lenne az úgy nevezett intra, vagyis ugyanazon műholdra szerelt másik műszerrel végzett validálásra, vagy az inter, vagyis a műholdak közötti validációra. Az inter-validáció legnagyobb hibáját az időbeli eltérés okozza. A légkör állapota kis időn belül is nagyot változik, ezért ez gátolja a közvetlen összehasonlítás lehetőségét. Az intra-validáció esetén, a műszerek korlátozva lennének egy másik, kisebb felbontású műszer eredményeire, amivel nagy hibák adódnának, de a helybeli különbség hibái kiesnének. A IASI, az AIRS és a NAST-I szenzor hőmérsékletmérései spektrális sávonként átlagolva nem térnek el egymástól sehol 0,1 K-nél nagyobb mértékben. A tanulmány megmutatta, hogy a IASI és az AIRS esetében is változott a radiometrikus érzékenységük eredetileg meghatározott értéke néhány tized kelvinnel. A kereszt-validáció során kimutatták, hogy a IASI és az AIRS mérései különböznek a hosszú hullámhosszon, de kevesebb, mint 0,05 K-nel. A kutatók a munkát tovább folytatták, több mérési nap adatainak felhasználásával, és tervezték más expedíciók eredményeinek feldolgozását a műholdas adatok további validációjához.

## 5. Összefoglalás

Hat évvel az első IASI működésének megkezdése után kimutatták, hogy a legnagyobb önálló befolyással az időjárás-előrejelzésre, a kezdeti feltételek pontosítása által, a IASI van, és kivételesek a képességei a légkör változásainak megfigyelésében is (*Clerbaux és Cervoisiér, 2013*). Dolgozatomban bemutattam a IASI szondát, és az adatok feldolgozásához alkalmazott módszereket és tanulmányokat.

A mérések során megjelenő hibák azonosítása a validáció fontos része. A Validációs Becslési Modell megalkotásával, az addig ismert hibákhoz adódott egy új fogalom, az állapot nem-egybeeső hiba. Ez a modell alapozza meg a korreláló mérések felhasználhatóságát validációs célokra. Pougatchev tanulmánya azt az eredményt adta, hogy a rádiószondás adatok és a VAM használatával nagyon pontosan meg lehet becsülni az akkor legfejlettebbnek vélt légköri szonda, vagyis a IASI visszakeresési hibáját. Annak ellenére, hogy különbözők a rendszerek karakterisztikái, és a nem-egybeeső hiba jelenléte is fenn áll, a hőmérséklet rádiószondáktól számított eltérése  $\pm 0,5$  K között ingadozik a felszín közelében, a relatív nedvesség eltérése pedig  $\pm 10\%$ -on belül marad. A várt hiba és a becsült értékek közti hiba 300–800 mb közt a legalacsonyabb a hőmérsékleti profilra, ott 0,6 K körül mozog. A tropopauzától a felszínig ez a hiba 2 K-ig növekszik. A relatív nedvességi profilra a standard hiba is 10% alatt marad.

A JAIVEx validációs kísérlet során a IASI átfogó vizsgálatát végezték el. Az eredmények és későbbi tanulmányok is mind azt igazolják, hogy a IASI rendkívüli jelentőséggel bíró műholdas szonda, mert részletessége és mérései pontossága további felhasználását biztosítja. Mindazonáltal működéséhez is, és a mérések folytonosságához is elengedhetetlenek a kisegítő műszerek, mint az amerikai fejlesztésű ATOVS műszercsomag elemei.

Mivel a műholdak tervezése és tényleges pályára állítása közti időintervallum nagy, ezért felmerült, hogy a 2020–2030-as évtizedekre a műholdak öregedése miatt a lehetőségeink a légkör monitorozására csökkenni fognak. Ez különösen igaz a poláris pályán mozgó infravörös szondákra, amik már a műholdas mérések kezdete óta működnek. A MetOp-C pályára állításával a IASI működése még legalább 20 évig biztosított lesz, további fejlesztése pedig lehetőséget ad a troposzféra mélyebb részleteinek megismerésére.

## Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt szeretném megköszönni témavezetőmnek, Pieczka Ildikónak a rengeteg segítséget és támogatást, amit nyújtott munkám megkezdése óta. Az Ő odafigyelése nélkül nem készült volna el ez a dolgozat.

Köszönettel tartozom Sente Andrásnak, aki az ábrák magyarításában nyújtott hatalmas segítséget.

Hálával tartozom családomnak és páromnak, különösen Édesanyámnak, aki támogatásával, türelmével és biztatásával segítette munkámat.

## Irodalomjegyzék:

- Ács F., 2012: Légköri sugárzástan, Légkörfizika órai jegyzet, 220p
- ATOVS, 2009: ATOVS Level 2 Product Guide, Ref.: EUM/OPS-EPS/MAN/04/0031, Issue: v2, Date: 22 Jul 2009
- Burai P., 2012: Alkalmazott távérzékelés, Károly Róbert Főiskola, letöltés helye: [http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0010\\_02\\_Alkalmazott\\_taverzekeles/4151/index.html](http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0010_02_Alkalmazott_taverzekeles/4151/index.html)
- Chalon G., Cayla F., Diebel D., 2001: IASI: An Advanced Sounder for Operational Meteorology, *Proceedings of the 52nd Congress of IAF, Toulouse France*, 9p
- Clerbaux, C., Crevoisier, C., 2013: New Directions: Infrared remote sensing of the troposphere from satellite: Less, but better, *Atmospheric Environment*, 72, June, pp 24-26.
- Eyre J. R., 1997: Variational assimilation of remotely-sensed observations of the atmosphere, *Journal of Meteorological Society of Japan*, 75(1B), 8p
- Gelybó Gy., 2006: A légkör vertikális szondázása a NOAA műholdak ATOVS mérései alapján, Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, Témavezető: dr. Bartholy Judit, Kern Anikó, 85p
- IASI, 2012a: IASI Level 1 Product Guide, Ref.: EUM/OPS-EPS/MAN/04/0032, Issue: v3J, Date: 23 July 2012
- IASI, 2012b: IASI Level 2 Product Guide, Ref.: EUM/OPS-EPS/MAN/04/0033, Issue: v2G, Date: 19 July 2012
- Kamarás K., 2006: Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia, MTA Szilárdtestfizikai Kutató Intézet, 6p
- Larar A. M., Smith W. L., Zhou D. K., Liu X., Revercomb H., Taylor J. P., Newman S.M., Schlüssel P., 2010: IASI spectral radiance validation inter-comparisons: case study assessment from the JAIVEx field campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(2), 411-430, 20p
- Mika J., Diószeghy M., Ferenczi Z., Randriamampianina R., 2005: Meteorológiai műholdak a légkörkutatásban és az előrejelzésben. In: *Természet-, Műszaki- és Gazdaságtudományok alkalmazása 4. Nemzetközi Konferencia Berzsenyi Dániel Főiskola, Szombathely, 2005.május 28. CD-ROM*, 9p
- Pougatchev N., 2008: Validation of atmospheric sounders by correlative measurements, *Applied Optics*, 47, 4739-4748, 9p

- Pougatchev N., August T., Calbet X., Hultberg T., Oduleye O., Schlüssel P., Stiller B., Germain K. St., Bingham G., 2009: IASI temperature and water vapor retrievals—error assessment and validation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(17), 6453-6458, 6p
- Randriamampianina R., 2004 : Műholdak a korszerű időjárás-előrejelzésben, *Technika, műszaki szemle*, 47/11–12, pp. 29–35
- Rodgers C. D., 2000: *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., London, UK, 229p
- Smith W., Larar A., Taylor J., Revercomb H., Kireev S., Zhou D., Liu X., Tobin D., Newman S., Schluessel P., Clough A., Mango S., St Germain K., 2008: Joint Airborne IASI Validation Experiment (JAIVEx) - An Overview, *Proceedings of the ITSCXVI Angra dos Reis, Brazil*, pp 7-13.
- Zhou D. K., Smith W. L., Larar A. M., Liu X., Taylor J. P., Schlüssel P., Strow L.L., Mango S. A., 2009: All weather IASI single field-of-view retrievals: case study—validation with JAIVEx data, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(6), 2241-2255, 15p

#### Internetes hivatkozások:

[1 - EUMETSAT]

<http://www.eumetsat.int/website/home/AboutUs/WhoWeAre/index.html>

[2 - NASA] <http://www.nasa.gov/topics/earth/features/metop-b.html>

[3 - Suntutrek] <http://www.suntutrek.org/solar-spacecraft/satellites-rockets/what-satellites-do/leo-satellites.shtml>

[4 - ESA, 2012]

[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/The\\_Living\\_Planet\\_Programme/Meteorological\\_missions/MetOp/Overview1](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/The_Living_Planet_Programme/Meteorological_missions/MetOp/Overview1)

[5 - GES DISC] [http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/data-holdings/PIP/brightness\\_temperature.shtml](http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/data-holdings/PIP/brightness_temperature.shtml)

[6 - FÖMI] [http://www.fomi.hu/taverzekeles\\_aktatoanyag/](http://www.fomi.hu/taverzekeles_aktatoanyag/)

[7 - ESA, 2006]

[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/The\\_Living\\_Planet\\_Programme/Meteorological\\_missions/MetOp/About\\_IASI](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/The_Living_Planet_Programme/Meteorological_missions/MetOp/About_IASI)