

Az első magyar vezetésű asztrofizikai műholdkísérlet, a GRBAAlpha első 656 napja

Ezen sorok írása közben a 2021. március 22-ikei reggeli órákban indult kisműhold, a GRBAAlpha immáron a 9728-adik keringését kezdi meg a Föld körül. Ez a műhold egy egységes, a CubeSat szabványnak megfelelő, azaz $10 \times 10 \times 11$ cm-es űreszköz. A műhold fedélzetén foglal helyet egy kis méretű detektorrendszer, melynek kapcsán a fejlesztéseket végző magyar-szlovák-japán csapatnak az volt a célja, hogy demonstrálja: már ilyen kis méretben is hatékonyan tudjuk vizsgálni az Univerzum jelenleg ismert legenergiusabb kitöréseit, a gamma-felvillanásokat [1]. A GRBAAlpha kisműhold 2020-ban épült, a detektor teljes rendszerének egyes elemeit a Konkoly-Thege Miklós Csillagászati Intézetben építettük, illetve ugyanitt történt a műhold teljes integrálása is. A start óta eltelt mintegy szűk két év során számos érdekes, a gamma-felvillanásokhoz kapcsolódó asztrofizikai jelenséget örökölt meg ez a rendszer, így azt is elmondhatjuk, hogy ez az eddig épült legkisebb, jelenleg is működő, kimondottan asztrofizikai céllal épített műhold [2].

Pál András

ELKH CSFK
Konkoly-Thege
Miklós Csillagászati
Intézet, Budapest

BEVEZETŐ

A gamma-felvillanások (*gamma-ray burst*, GRB) – az Ősrobbanás után, ha úgy vesszük – az Univerzum legenergiusabb kitörései. Tágabb értelemben ezek a jelenségek – mármint nem az Ősrobbanás maga, hanem a gamma-felvillanások – a tranziens asztrofizikai jelenségek közé tartoznak: ilyenkor valami egyszeri és megismételhetetlen esemény történik, ami ebben a kategóriában szinte „elvárhatóan” igen nagy energiafelszabadulással is jár és általában még emberi időskálával mérve is relatíve rövid ideig tart. Olyannyira, hogy jelenleg a gamma-kitöréseket magyarázó két fizikai folyamatra, a kompakt objektumok (neutroncsillagok vagy fekete lyukak) összeolvadására, valamint a nagy tömegű csillagok élete végén bekövetkező szupernóva-robbanásokra rendre néhány másodperces vagy néhány perces hosszúságot jósolnak – és ez az időskála megegyezik a megfigyelési időskálákkal. Az elmúlt években a gravitációshullám-források felfedezésével még nagyobb figyelem irányult ezekre a gamma-tartományban észlelt rövid idejű felvillanásokra, hiszen a nagy tömegű, kompakt égitestek rövid felvillanásokat kiváltó összeolvadása egyben az mérhető gravitációs hullámok fő forrása is egyben [3]. A GRBAAlpha mint technológiai demonstrációs űrküldetés egyik tudományos célkitűzése is ehhez kapcsolódik: lehetséges-e olyan, olcsó, kicsi műholdakból álló hálózatot kialakítani, amely gyorsan, minimális késleltetéssel tudja detektálni a gamma-felvillanásokat és meghatározni helyzetüket.

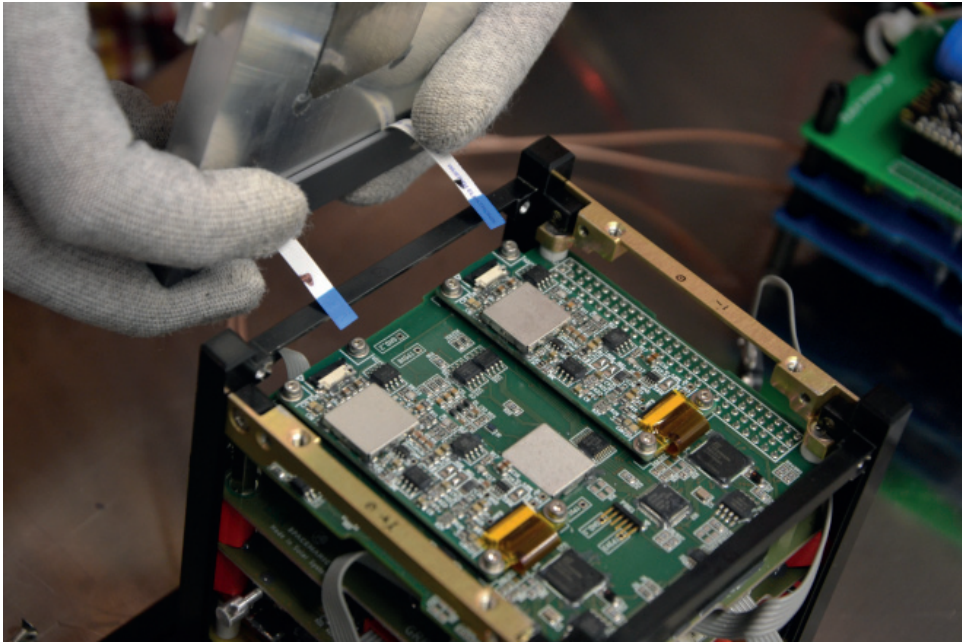
A kapcsolódó jelenségek fizikája, azaz a pár másodperces vagy maximum néhány perces időskála miatt a minimális késleltetés is fontos, hogy más hullámhosszakon (ultraibolya, optikai, infravörös vagy rádiótartományban) minél hamarabb el tudják kezdeni a kutatók a párhuzamos megfigyeléseket. A helyzetmeghatározás meg önmagában is egy érdekes probléma, hiszen a gamma-sugárzás nem igazán fókuszálható: így egy klasszikus, kamerás-leképezős rendszerrel ellentétben a helyzet meghatározásához más technikákra is szükségünk lehet. Ez utóbbira ad számos megvalósítási ötletet a *Cubesats Applied for MEasuring and Localising Transients* (CAMELOT) kezdeményezés [4], így a GRBAAlpha tekinthető ezen műholdhálózat egyedi demonstrációjának is [5].

A DEKEKTORRÓL

A GRBAAlpha műhold hasznos terhe maga a gamma-detektor. Noha ez még egy ilyen kis méretű műholdon is viszonylag kis helyet foglal el, ennek ellenére a detektor lelke, a cézium-jodid kristály jó nagy tömeget ad neki – valamint a cézium-jodid kristályhoz csatlakozó fotonszámlók ólomburkolata is szó szerint egy nehezítő körülmény. A detektor működési elve a szcintilláció jelenségén alapszik: nagy energiájú részecskék, valamint a nagy energiájú részecskékhez sok szempontból hasonlóan viselkedő gamma-fotonok bizonyos anyagokkal kölcsönhatva rövid idejű látható fényimpulzust bocsátanak ki, azaz szcintillálnak. A cézium-jodid különösen érzékeny a gamma-fotonokra, ráadásul ennek a rövid idejű fényimpulzusnak a teljes leadott energiája egyenesen arányos a beérkező gamma-foton energiájával. A „konverziós ráta” olyan nagy, hogy egy 50 kiloelektronvolt (keV) energiájú gamma-foton hatására több mint kétezer szcintillációs foton keletkezik: azaz ezeket már viszonylag könnyű „összeszámlálni”, és a számolás során kapott értéket lejegyezni, hogy „az ekkor és ekkor beérkezett gamma-foton energiája ennyi meg ennyi volt”. A detektor következő eleme – amely közvetlenül a mi esetünkben $7,5 \times 7,5 \times 0,5$ centiméteres cézium-jodid kristályhoz kapcsolódik – az ezt a fotonszámlálást elvégző szenzorrendszer és az azt vezérlő elektronika. Ebből már kettő is kapcsolódik a kristályhoz, hiszen míg a szcintillátor maga az egy teljesen passzív anyagdarab (hiszen a legrosszabb, ami történhet vele az az, hogy eltörik, de persze ha már túlvészelte a raktétás felbocsátást, akkor ez nem valószínű), addig az elektronikai alkatrészek már könnyebben meghibásodhatnak. Az üreszközök üzembiztos működéshez elengedhetetlen a duplikált (vagy még inkább sokszorozott) elektronika, hogy így biztosítsuk a küldetés meg a kísérlet sikerét.

A fotonszámláló elektronika már a jel erősítése, szűrése és digitalizálása után közvetlenül az adatgyűjtő számítógéphez kapcsolódik. Ez a „számítógép” egy aránylag kis kapacitású és mai modern szemmel nézve is meglehetősen kis teljesítményű vezérlő: mindösszesen 128 kilobyte-nyi programmemóriával és 16+16 kilobyte-nyi adatmemóriával rendelkezik, valamint 2 + 64 megabyte-nyi háttértár csatlakozik hozzá. Mind a két fotonszámláló csatornához egy-egy ilyen adatgyűjtő számítógép kapcsolódik (1. ábra). A műhold üzemeltetésénél a rutinszerű mérésekhez csak az egyiket használjuk, hiszen a másik nem adna hozzá több információt. Néha persze érdemes váltogatnunk vagy legalább ellenőriznünk a másik (éppen nem használatban levő) elektronikai egységet is, hogy minden rendben van-e azzal is.

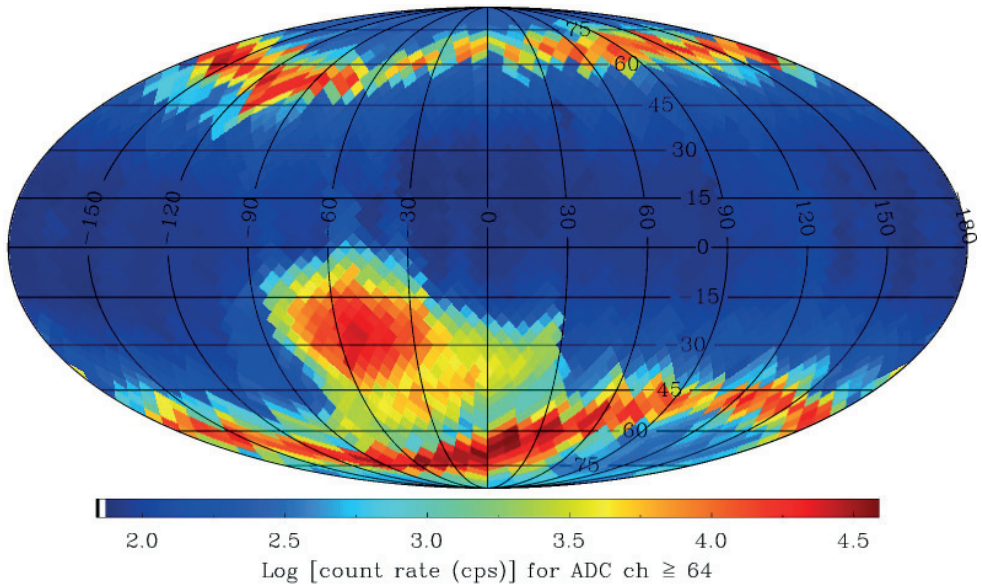
Na de hogyan is zajlik le egy ilyen rendszerrel az adatgyűjtés, mi is az, amit mérünk egészen pontosan? Egy képet szolgáltatató megfigyelésnél, mint például amikor egy látható tartományban



1. ábra: A GRBAAlpha integrálásának egyik utolsó mozzanata: a cézium-jodid kristályt is tartalmazó detektorblokk csatlakoztatása az adatgyűjtő elektronika analóg áramköréhez. (A szerző felvétele)

dolgozó távcsőre szerelünk egy kamerát, viszonylag egyértelmű hogy a „mérés” maga nem más, mint „képek készítése”. Azonban egy fotonyszámláló rendszer esetén, amely ráadásul még nem is egy leképező kamera, a helyzet már korántsem ennyire egyértelmű. Az alapfogalom, amellyel a GRBAAlpha detektora (meg általában egy hasonló elveken működő részecskefizikai detektor) operál, az az „energiaspektrum”. Egy energiaspektrum felvétele esetén a cél az, hogy megszámoljuk, egy adott adatgyűjtési idő alatt melyik energiatartományból hány foton csapódott be a detektorunkba. A működtetést – és az így termelt adatok mennyiségét – ebben az esetben az fogja meghatározni, hogy milyen hosszú is ez az adatgyűjtési idő és hogy mennyire pontosan is vagyunk kíváncsiak a bejövő részecskék (vagyis itt fotonok) energiáira. A GRBAAlpha esetén az energiasáv, amelyre egy cézium-jodid kristály érzékeny, az néhányszor 10 keV és kb. 900 keV közötti. Ezt az energiatartományt a fentiekben is említett digitális adatgyűjtő 256 csatoronára osztja fel, ahol ráadásul a cézium-jodid jó szcintillációs tulajdonságai miatt a mért gamma-foton-energia egyenesen arányos is lesz a digitális csatorna sorszámaival. Ténylegesen mind a 256 csatornát egyszerre azonban csak kalibrációs célra használjuk, ezzel lehet vizsgálni a detektor hosszú távú viselkedését, például az űrbéli kozmikus sugárzás, napszél meg hasonló részecskebehatások által kiváltott igen lassú, de fokozatos károsodást is.

Egyszerű szabály, hogy az asztrofizikai jelenségek vizsgálatánál az adatgyűjtési ciklus legyen határozottan rövidebb, mint maga a jelenség lefolyásának időskálája. Egy neutroncsillagok összeütközése által kiváltott gyors gamma-felvillanás néhány másodperces hosszúságú. Így ha



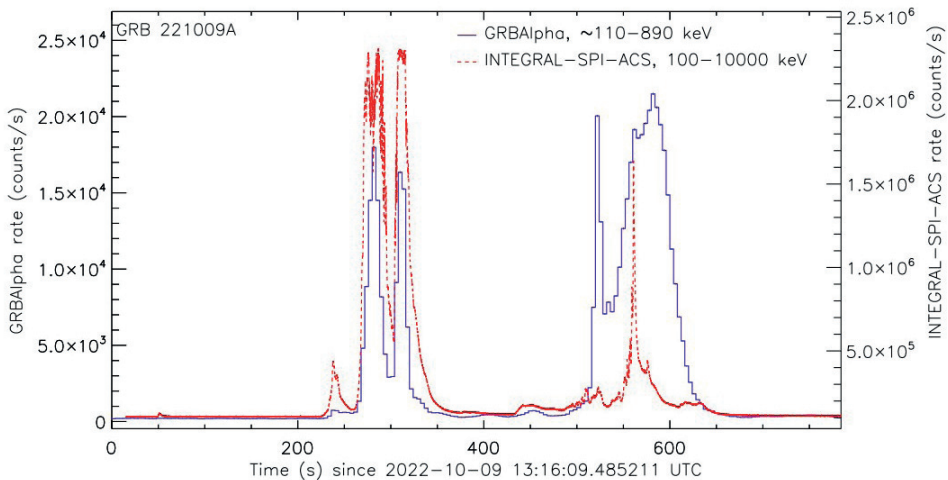
2. ábra: A detektorrendszer által mért sugárzási háttér. Jól kirajzolódnak a poláris övek, valamint a dél-atlanti anomália is. (A szerző ábrája)

az energiaspekturmot mondjuk 10 másodperces időegységben vennénk fel, akkor nem tudnánk eldönteni, hogy az ezt kiváltó neutroncsillag-összeolvadás az adatgyűjtési idő elején, közepén vagy végén történt-e. Itt jön be a kompromisszumos üzemeltetés: ha minden másodpercben mind a 256 csatornába becsapódó fotonok darabszámát rögzítenénk, akkor a műholdon levő tárhely igen hamar, lényegében pár óra alatt betelne, plusz ehhez hasonlatosan – ahogy később látni fogjuk majd – az adatok lehozása sem lenne feltétlen egyszerű. A gyakorlatban tehát csökkentjük az energiacsatornák számát: csökkenteni mindig könnyű, hiszen csak össze kell adnunk az egymáshoz közeliakat és egy számként letárolnunk. Jelenleg a rutinszerű mérések négy energiacsatornán történnek: 70–110, 110–370, 370–630 és 630–890 keV tartományokban, egy másodperces adatgyűjtési ciklus mellett. Ezzel a sebességgel a műholdas adatgyűjtő jelenleg is aktív „gyors és biztonságos”, 2 MB méretű tárhelye 3–4 nap alatt telik meg, ha mindent rögzítünk. Ez az adatgyűjtési séma kényelmes és gyors lehetőséget biztosít, hogy a napi két jó kommunikációs ablakban mindent, ami számunkra érdekes lehet, le tudjunk hozni. Ez a két kommunikációs ablak elegendő arra, hogy mintegy átlagosan fél nap késéssel értesüljünk a legújabb gamma-felvillanásokról.

Nincs mérési hiba meg mérési zaj nélkül, és nincs ezzel másképp a GRBAlpha műhold sem. A mérési zaj elsősorban onnan ered, hogy nem csak a gamma-felvillanások, hanem számos más fizikai jelenség is okoz jelet a detektorban, azaz növeli a számlálókat az egyes energiacsatornában. Ezek a jelek adnak egy egyfajta természetes háttérrel: ha ez a háttér épp kicsi, akkor a gamma-felvillanások könnyen detektálhatóak, ha nagy, akkor nehezen vagy egyáltalán nem – azaz a jel elvesz a zajban, pont úgy, ahogy a nappali égen sem láthatunk szabad szemmel az égen a Napon kívül más csillagot. Az égi háttér egy része galaktikus eredetű, szórt röntgen- és gamma-sugárzás, ez mindenhol jelen van, és

átkolagosan másodpercenként mintegy százás nagyságrendben okoz jelet a detektorunkban. A másik típusú zajforrás már helyhez kötött, így a műhold épp aktuális pálya menti helyzetétől függ: ezek a poláris övek, valamint a dél-atlanti anomália. Itt a detektoraink által mért háttér a normális háttér több százszorosa is lehet (ld. 2. ábra), és lényegében ellehetetleníti a gamma-felvillanások jó hatásfokú detektálását és mérését. Egy napszinkron pályán keringő műhold esetében, mint a GRBAIpha, az idejének nagyjából kicsit kevesebb mint a felét tölti ezekben a régiókban. Ezekben a sugárzási övekben a háttér erőssége függ a Nap aktivitásától is, a szerkezete pedig kicsit, de folyamatosan változik. A GRBAIpha segítségével ezeket a régiókat is tanulmányozhatjuk.

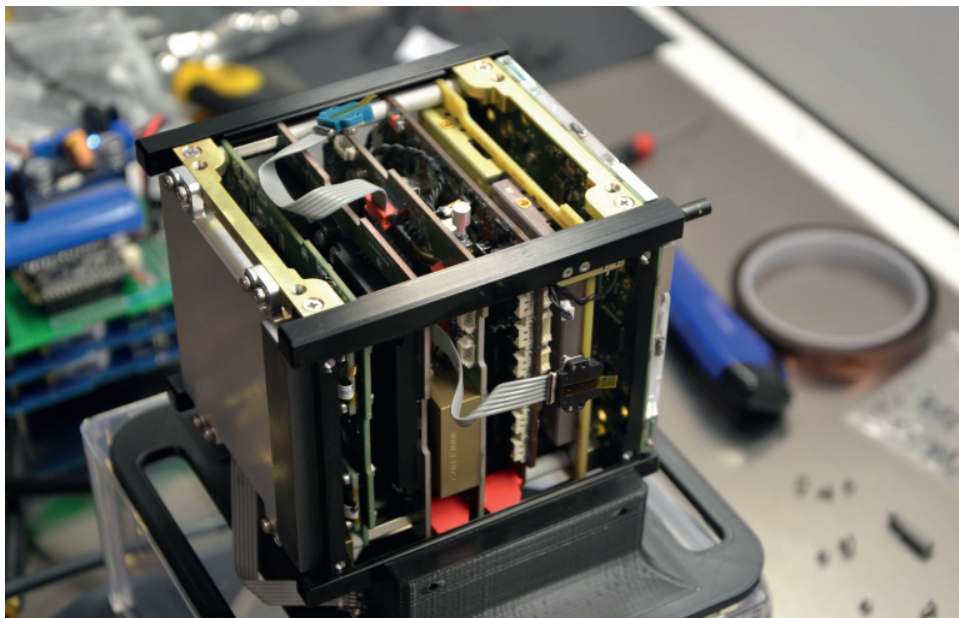
Mint azt a bevezetőben is említettük, a GRBAIpha már több tucatnyi gamma-felvillanást észlelt. Ezek között találhatunk hosszabbakat is, rövidebbeket is. Ezen felvillanások mellett mértünk még jó néhány napkitöréshez kapcsolódó eseményt, amelyek jelalakja első ránézésre még hasonlíthat is a GRB-kéhez. Ezen mérések között itt most egy tavaly őszi, 2022. október 9-én mért GRB221009A eseményt mutatunk be (4. ábra). Ez a gamma-felvillanás volt az elmúlt hónapok egyik legenergiusabb kitörése, és mint ilyen, nagyon nagy nemzetközi érdeklődést váltott ki a tudományos közösségekben: a GRB Coordinates Network (GCN) elektronikus közleményeiben közel 120 bejegyzés, cikk, mérés, gyors adatelemzés található róla! A GRBAIpha ezek közül pont azért kiemelkedő, mert az a legkisebb detektorral rendelkező műszer: az energikus kitörés szinte mindegyik nagyműholdas rendszer detektorát telítésbe vitte, azonban a GRBAIpha kisebb mérete miatt igen pontos becslést tud adni a jel nagyságára, így magára az eseményre is [6]. Az adatok precíz feldolgozása jelenleg is folyamatban van, 2023 első felében publikáljuk az ehhez kapcsolódó eredményeinket.



3. ábra: A GRB221009A jelű gamma-felvillanás fénygörbéje. Az esemény az elmúlt évek egyik legenergiusabb kitörése volt és számos más műhold is rögzítette (mint pl. az ábrán is látható jelet is kimérő INTEGRAL). A GRBAIpha megfigyelése azért is kiemelkedő, mert pont a detektor relatíve kis mérete miatt ez volt az egyetlen műszer, amely nem ment telítésbe: így a legpontosabb méréseket a tudományos közösség felé épp mi szolgáltatjuk. (Az ábra forrása: a GRBAIpha csapata, GCN Circular No. 32685 [6])

A MŰHOLD: A TELJES RENDSZER ÉS ÜZEMELTETÉSE

Persze konkrét tudományos-detektoros dolgok mellett a műhold többi komponensének kell gondolkodnia a napelemeken keresztüli biztonságos tápellátásról, valamint a rádiós kommunikációról is (4. ábra). A műholdon a Cubesat Space Protocol (CSP) elnevezésű elektornikai-szoftveres alrendszer gondoskodik a hatékony és valamelyik komponens esetleges meghibásodása esetén könnyen átkonfigurálható belső adatforgalom biztosításáról. A műhold egyes darabjai, azaz a rádió adó-vevők, a tápegységek, egy önálló független fedélzeti számítógép és egy GPS vevő a detektorelektronikához hasonlóan ezen a CSP vezérlőbuszon keresztül csatlakozik össze, ahol maga a „vezérlőbusz” is több, egymástól független módon megvalósított csatornából áll össze. A gyakorlati vezérlésben pedig a rádiós kapcsolat nem más, mint a vezérlőbusz egyik önálló eleme. Ez lehetőséget ad arra, hogy az adatgyűjtő elektronika is teljes értékűen bele tudjon szólni a műhold üzemeltetésébe, önállóan tudjon indítani adatletöltéseket vagy lekérdezze a műhold állapotát (pl. GPS-en keresztül a pontos időt vagy a szenzorokon keresztül a műhold egyes alrendszerének hőmérsékletét).



4. ábra: A GRBAAlpha a napelemcellák nélkül, megmutatva a műhold egyes elektronikai moduljait. Ezek balról jobbra haladva: cézium-jodid detektor, adatgyűjtő és adatfeldolgozó egység, fedélzeti számítógép + GPS vevő, szenzorblokk, tápegység, rádiómodulok és antenna. (A szerző felvétele)

A rádiós összeköttetés biztosításához a GRBAAlpha – megannyi kisműholdas, egyetemi-kutatóintézeti projekthez hasonlóan – a rádióamatőr frekvenciasávban üzemel. Mint minden más, természetesen a rádióamatőr sáv is rendelkezik számos előnnyel és hátránnyal egyaránt, mint azt a gyakorlatban mi is megtapasztaltuk, megtapasztaljuk. A rádióamatőr sávban való üzemelés ahhoz kötött elsősorban, hogy az adott műholdas projekt oktatási-önképzési célokat szolgáljon, valamint elősegítse a rádiós

közösséget is. Ennek megfelelően az adatokat nem titkosíthatjuk, mindenki számára elérhetőeknek kell lenniük. Ez azonban nem csak egy konkrét feltétel, hanem egy határozott nagy előny is, hiszen az adatok letöltéséhez (így a tudományos „output” növeléséhez) mindenki hozzá tud járulni, és nem csak Közép-Európából (ahol a dedikált üzemeltetést és az adási, illetve vételi hálózatot építettük ki, ld. 5. ábra). Számos más amatőrállomás felől is kaphatunk adatokat, gyakorlatilag a Föld minden pontjáról. Ugyanakkor a rádióamatőr sáv egyik hátránya az, hogy ezekben meg az ezekhez közeli tartományokban sugároznak a „kütyük” is (garázkapunyítók, távirányítós kisautók, walkie-talkie-k, stb.), így a rádiós háttérzaj eléggé nagy lehet bizonyos esetekben. Tapasztaljuk is ezt a gyakorlatban: nappal nehezebb az interakció, mint éjszaka, illetve a Kelet-Európa feletti áthaladások általában sikeresebbek, mint a Nyugat-Európa felettié. Összességében, ezen könnyítések meg nehezítések eredményeképp egy nap alatt megabyte-nyi nagyságrendben tudunk lehozni adatokat a műholdról.



5. ábra: A GRBAAlpha fő vevőállomása, amelyen keresztül a legtöbb adatletöltés is zajlik, a Csillagászati Intézet Piskéstetői Observatóriumának területén található. A rádiócsendes környezet hatékony üzemeltetést biztosít. (A szerző felvétele)

JÖVŐBELI FEJLESZTÉSEK ÉS ÖSSZEFOGLALÁS

Mondhatnánk azt, hogy a GRBAAlpha az kész, fent van az űrben és működik – így az üzemeltetésen és a tudományos adatok begyűjtésén kívül már nincs is más dolgunk, akár kényelmesen hátradőlhetnénk és élvezhetnénk munkánk gyümölcsét. Ez is egy lehetőség, persze, azonban az adatgyűjtő egyes

komponenseinek tervezésénél egy fontos szempont volt, hogy ezeket a rendszereket, ha hardveresen-elektronikusan nem is, de szoftveresen tudjuk azért fejleszteni a későbbiekben is. A kialakításnak és rendszertervezésnek köszönhetően megfelelő rádiós parancsokkal, illetve adatfeltöltéssel frissíthetjük a szoftvereket, így újabb és újabb funkciókat adhatunk a rendszerünkhöz: jelenleg a kis adatgyűjtő rendszer programmemóriájának teljes kapacitását mintegy 30%-osan használjuk csak ki, azaz bőven van még hely mindenféle izgalmas kísérlet számára.

A munka tehát nemhogy nem áll meg, de a valódi mérési tapasztalatainkból, a több tucat detektált gamma-felvillanásból, a részecskesugárzási háttér tulajdonságainak a jó megismeréséből kiindulva tovább tudjuk optimalizálni és finomhangolni a rendszert. Technikaibb oldalról megközelítve, a céljaink között szerepel, hogy hatékonyabb (ún. változó kódhosszú) adatfolyam-kódolást kihasználva a tudományos mérések tárolási sűrűségét megnöveljük, valamint a fedélzeti tárolók közül nem csak a gyors és biztonságos, 2 MB méretű tárhelyet használjuk ki, hanem a beépített 64 MB méretű, flash alapú tárhelyet is. A tudományosabb problémakörhöz kapcsolódó fejlesztések között szerepel az is, hogy a gamma-felvillanásokat ne csak utólag kikeresve, hanem automatikusan detektálva, úgynevezett trigger eljárással is rögzítsük, valamint az, hogy az adatgyűjtést (legyen az akár folyamatos, vagy triggerelt) ideiglenesen szüneteltessük, amíg a műhold benne van a szószban, azaz a korábbiakban említett sugárzási övezetekben. Kommunikációs oldalról megközelítve is van lehetőség fejlesztéshez, köszönhetően a rádióamatőr sávban dolgozó üzemnek és a nagy méretű földi műholdas vevőhálózatoknak. Ezen hálózathoz csatlakozó műholdvevő állomások felett is indíthatunk letöltéseket, amelyeket interneten keresztül „összekanalazva” megsokszorozhatjuk a lehozott tudomány mennyiségét is.

Természetesen mindezeket a fejlesztéseket, legyenek azok akár technikaibb, tudományosabb vagy kommunikációsabb jellegűek, úgy érdemes végezni, hogy visszamenőleg is tudjuk a már bevált sémákkal üzemeltetni a műholdat – hiszen azt azért ne javítsuk meg, ami működik. Mert hogy a GRBAAlpha továbbra is jó egészségnek örvend, minden alrendszere szépen működik, így remélhetőleg még sok-sok évig tud számottevően hozzájárulni a gamma-felvillanások asztrofizikájának megismeréséhez.

Irodalomjegyzék

- [1] Pál A. et al. (2020): GRBAAlpha: a 1U CubeSat mission for validating timing-based gamma-ray burst localization. *Proc. SPIE*, 11444, 114444V
- [2] Řípa J. et al. (2022): Early results from GRBAAlpha and VZLUSAT-2. *Proc. SPIE*, 12181, 121811K
- [3] Abbott B.P. et al. (2017): GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. *Phys. Rev. Lett.*, 119, 161101
- [4] Werner N. et al. (2018): CAMELOT: Cubesats Applied for MEasuring and LOcalising Transients mission overview. *Proc. SPIE*, 10699, 106992P
- [5] Mészáros L. et al. (2022): Towards the CAMELOT fleet of GRB detecting nano-satellites: the design concept of the 3U members based on the GRBAAlpha and VZLUSAT-2 heritage. *Proc. SPIE*, 12181, 121811L
- [6] Řípa J. et al. (2022): GRB 221009A: Detection by GRBAAlpha. *GCN Circular* 32685