

## HOGYAN ÉPÍTSÜNK RÁDIÓTÁVCSÖVET HÁZILAG?

Misurda Orsolya<sup>1</sup>, Simon Ferenc<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Szent Margit Gimnázium, Budapest; E-mail: misurda.orsolya@gmail.com

<sup>2</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Természettudományi Kar, Budapest

E-mail: simon.ferenc@ttk.bme.hu; <sup>3</sup>HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

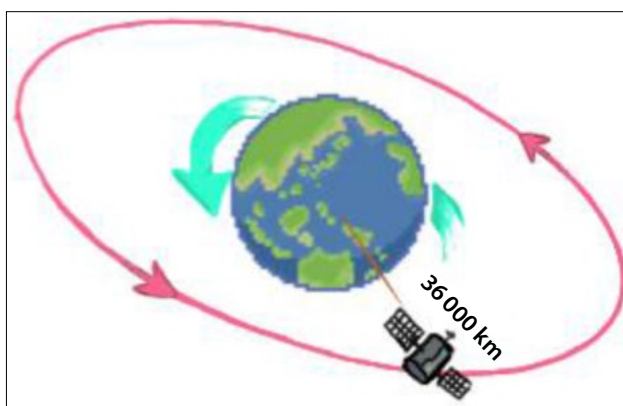
### Bevezetés

A csillagászat egyre fontosabb ága a rádiócsillagászat: ez hasznos információkat adott az Univerzum keletkezéséről (a mikrohullámú háttérsugárzás felfedezésével), egyedi rádiófrekvenciás forrásokról (pulzárokról és kvazárokról) vagy csillagok bölcsőjét jelentő ködökről. Célunk az volt, hogy alacsony költségvetésből, akár kidobott alkatrészekből létrehozzunk egy rendszert, amivel saját rádiócsillagászati méréseket végezhetünk egyszerűbb esetekben, ezzel közelebb hozva a rádiócsillagászatot az érdeklődők számára. A továbbiakban ismertetjük a rendszerünk felépítését, annak működési elvét és a jellemzéséhez használt módszereket. A rendszerünk érzékenységét geostacionáris műholdak segítségével és a környezeti zajforrások megfigyelésével határoztuk meg. Egy hosszabb, egyhetes mérésorozatban egymást követő napokon megfigyeltük a Nap áthaladását az antennánk előtt, és másodperces pontossággal megfigyeltük azt a kevésbé ismert hatást, hogy a két delelés között eltelt idő nem pontosan 24 óra.

### Elméleti háttér

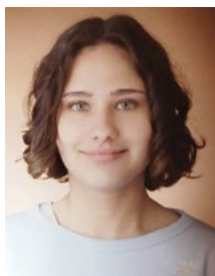
A munka során segítségünkre voltak a geostacionáris műholdak, melyek olyan pályán keringenek, ami közvetlenül az Egyenlítő fölött kör alakban helyezkedik el. A pálya így szinkronban van a Föld sziderikus periódusával, azaz a keringési idejük is 23 óra 56 perc és 4 másodperc [1]. Mozgásuk ezért olyan, hogy egy stabil ponton, mozdulatlanul állnak a Földhöz képest, kb. 36 000 km magas pályán, ahogy azt az 1. ábra mutatja. A Föld felett található geostacionáris műholdak televíziós jeleit megfigyelve vizsgálhatjuk a vevőrendszerünk érzé-

kenységét. Budapest elhelyezkedéséből adódóan (keleti hosszúság 19,2 fok) az Egyenlítő felett a keleti hosszúság 19 fok környékén lévő műholdcsoportok jeleit vehetjük legkönnyebben. Trigonometriai összefüggésekkel kiszámolható, hogy az Egyenlítő feletti műholdak Budapestről (északi szélesség 47 fok) a horizont felett 23 fokkal látszanak.



1. ábra. A Föld körül, kb. 36 000 km magasan keringő geostacionáris műhold pályájának sematikus ábrája (saját készítésű ábra)

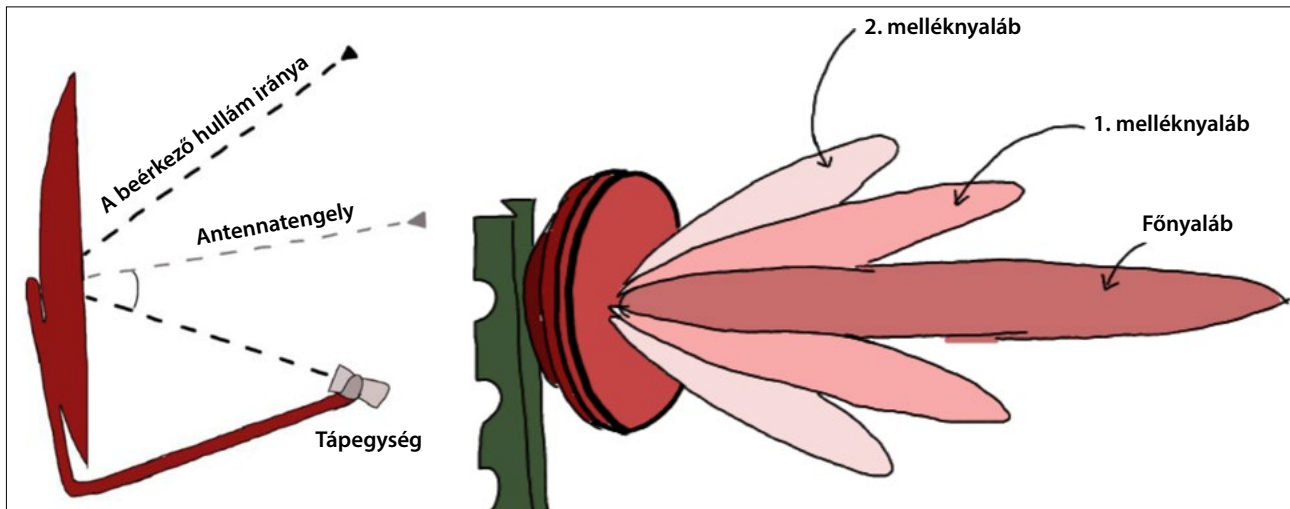
A rádiótávcsövünk egy hagyományos, műholdas parabola vevőantennából áll és egy ún. kis zajú vevőből. Ennek angol neve a *low-noise block-down converter*, a továbbiakban csak mint LNB hivatkozunk rá. Ennek lényege, hogy a különböző frekvenciatartományokból beérkező jeleket lekeveri egy adott frekvenciatartományba egy ún. lokális oszcillátor jelének segítségével. Ezt a módszert számtalan vevőrendszer használja, pl. az FM (frekvenciamodulált) rádiók is, és a neve heterodin mérési technika. Esetünkben a műholdak kb. 10–13 GHz-es tartományban sugároznak, amit az LNB lekeveri a 1–3 GHz-es tartományba. Mi konkrétan ebből csak a 10,7–



Misurda Orsolya a Szent Margit Gimnázium 12. osztályos tanulója. Fizikatanára Richlik-Horváth Katalin. A BME Középiskolai Tudományos Diákköri Konferencia keretén belül végez kutatómunkát rádiócsillagászat témában. Később is a csillagászat ezen ágával szeretne foglalkozni.



Simon Ferenc fizikus, egyetemi tanár, a BME TTK dékánhelyettese. Érdeklődési területei: a szilárdtest-spektroszkópia, a spintronika, a kvantuminformáció-elmélet és a fizika népszerűsítése. Legfontosabb eredményei: az itineráns elektronok mágnesesrezonancia-jelének felfedezése új fémekben, a spinrelaxáció egyesített elméletének kidolgozása, spinnel nyomjelzett szén nanocsövek előállítása és triplétt optikai állapotok felfedezése nanocsövekben. ERC- és Lendület-pályázat vezetője.



2. ábra. Az eltolt tengelyű parabolaantenna sematikus rajza (balra), illetve a melléknyalábok mintázata (jobbra) (saját ábra)

11,7 GHz-es tartományt figyeltük meg, amit az LNB 0,95–1,95 GHz-re kever le. Az LNB működéséhez szükséges tápfeszültséget egy hagyományos labortápegységből kapjuk, ami 13 vagy 18 V-os feszültséget ad ki attól függően, hogy az LNB-vel a vízszintes vagy a függőleges polarizációt szeretnénk-e megfigyelni.

A parabolaantenna a beérkező jeleket egy pontba fókuszálja görbült felületének köszönhetően (2. ábra). A gyakorlatban olyan antennákat használnak, melyek nem a tengelyükkel párhuzamosan fókuszálnak, hanem eltoltan. Ennek előnye, hogy az antenna majdnem függőlegesen állhat egy, a horizonthoz képest magasan levő műhold jelének vételkor is. Így egy ház falára könnyebben felszerelhető, illetve nem áll meg benne az esővíz.

Az antennák mindig rendelkeznek ún. melléknyalábokkal (angolul *sidelobes*), amelyeket egy antenna vagy más sugárforrás távolra sugárzási mintázatainak részeként érthetünk meg. Amennyiben a parabolaantennát kisugárzásra használjuk, jut energia a melléknyalábok irányába is, ami csökkenti a jó irányba kibocsátott energiát, és információkat juttat a környezetbe, melyet megszerezhetnek mások. Ha a parabolaantennát vevőként használjuk, akkor a melléknyalábok felől is veszi a környezeti zajokat. Minél nagyobb az antenna a rádióhullámhosszhoz képest, annál keskenyebb a nyalábok kiterjedése.

A mérési eredmények megértéséhez bemutatjuk az ún. zajhőmérséklet fogalmát. Ez meghatározza azt a zajteljesítmény-szintet, amelyet a saját eszközeink, berendezésünk bocsátanak ki. A termikus hőmérséklethez hasonlóan ezt is Kelvinben fejezzük ki. Az ún. Johnson–Nyquist-zaj [2] az elektromos vezetőben lévő töltéshordozók (általában az elektronok) termikus mozgása által generált elektronikus zaj. A zajt mindig úgy jellemezzük, mint az egységnyi frekvenciára eső teljesítményt, ami azt jelenti, hogy egy időegység alatt egy egységnyi sávszélességen mennyi zajenergiát fogunk be. A mérés technikában ez az egység dBm/Hz-ben van kifejezve.

A dBm az ún. decibel-milliwatt egysége. Ez egy logaritmikus skálát jelöl, aminek 0-ja az 1 mW, és 10 dB-s

változás egy 10-es teljesítményszorzót jelent. A  $P$  teljesítmény dBm-ben vett erősségre való átszámításának képlete:

$$x[\text{dBm}] = 10 \cdot \log_{10} P / (1 \text{ mW}).$$

Eszerint például 1 nW teljesítményhez  $-60$  dBm tartozik.

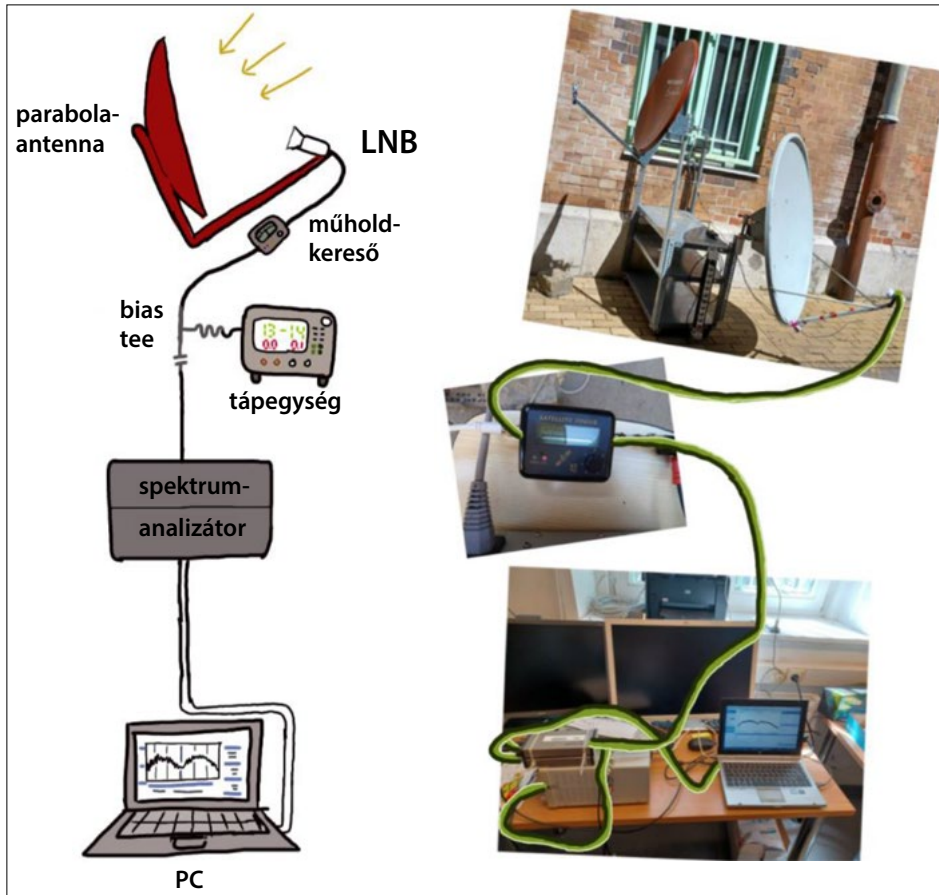
A Johnson–Nyquist-formula szerint egy  $T$  hőmérsékletű ellenállás spektrális zajteljesítmény-sűrűsége  $4 \text{ kB } T$  (ez az 1 Hertz sávszélességre eső zajteljesítmény). Behelyettesítve  $T = 290 \text{ K}$ -t és a kB Boltzmann-állandót (értéke  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ),  $4,00 \cdot 10^{-21} \text{ J}\cdot\text{Hz}$ -t kapunk. Ezt dBm-re átirhatjuk (átváltjuk mW-ba, majd vesszük a 10-es alapú logaritmusát és 10-zel szorozzuk), így  $-174$  dBm-et kapunk.

## A házilagos rádiótávcső felépítése

A házi készítésű rádiótávcsövünk összeállítását a 3. ábrán mutatjuk. A rádiótávcsőről készült fényképeket is a 3. ábra mutatja. Az eszköz jelenleg a BME Természettudományi Karán egy labor előtt található. Az ábrán látható, ahogyan a kültéri parabolaantenna kábelen keresztül kapcsolódik a műholdkeresőhöz, majd pedig a spektrumanalizátorhoz, amit egy számítógép irányít.

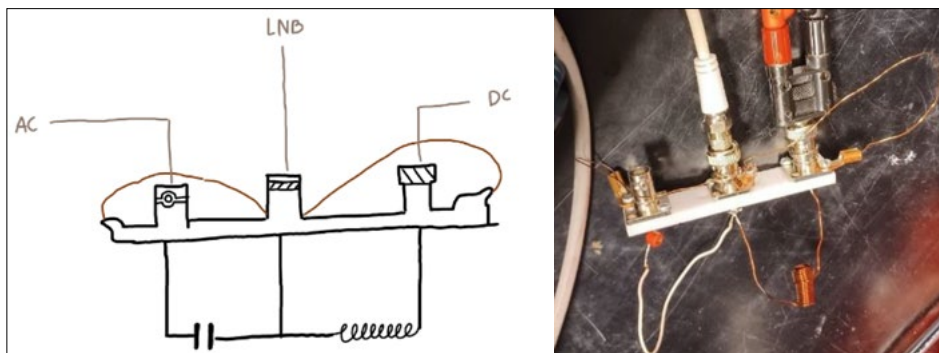
Az eltolt tengelyű parabolaantenna úgy fókuszálja a jeleket a vevőegységre, hogy azokat egy ún. műholdkereső (ang. *satellite finder*) segítségével pontosan be tudjuk állítani. Ezt az eszközt használják parabolaantennák kiépítésekor arra, hogy azokat optimális irányba (a lehető legnagyobb jelre) állítsák be. Ez egy hangot is kiadó kis eszköz, ami rendelkezik egy analóg kijelzővel is, és a tápfeszültségét ugyanonnan nyeri, mint az LNB; az LNB-hez csatlakozó kábelre köthető.

Az LNB az energiát az egyenáramú tápegységből kapja, viszont a visszajövő jel már váltakozó áramú és a GHz-es tartományban van. Ebből kifolyólag fontos, hogy az antenna felé egyidejűleg egyenáramú (DC) és váltakozóáramú (AC) jelek mozogjanak, miközben a tápegy-



3. ábra. Bal oldal: A háziilagos rádiótávcső blokkvázlata (saját ábra). Jobb oldal: Fényképek az egyes komponekról és sematikus az összekötésükről az LNB-től a műholdkeresőn keresztül az ablakon át a benti feldolgozórézsig haladva

ség DC jelet ad ki, és a spektrumanalizátor felé csak az AC jelnek szabad eljutnia. Az AC és DC jeleket szétválasztó eszközt lecsereeltük egy saját építésű darabra. A fejlesztés oka, hogy így egy drágább gyári eszközt minimális költséggel, saját magunk tekercselte drót és egy kondenzátor segítségével helyettesíteni tudunk. Az eredeti 19 pF-os kondenzátor és az 500  $\mu$ H-s tekercs helyett a saját építésű AC-DC leválasztóban egy 20 pF-os kondenzátor és egy 1,5  $\mu$ H-s tekercs kapott helyet. A tapasztalatunk szerint ez is megfelelően szétválasztotta a kétfajta jelet. Az elkészült eszközt a 4. ábrán mutatjuk.



4. ábra. Balra: A DC és AC jelek szétválasztására szolgáló eszköz sematikus rajza. Jobbra: az elkészült eszköz fotója

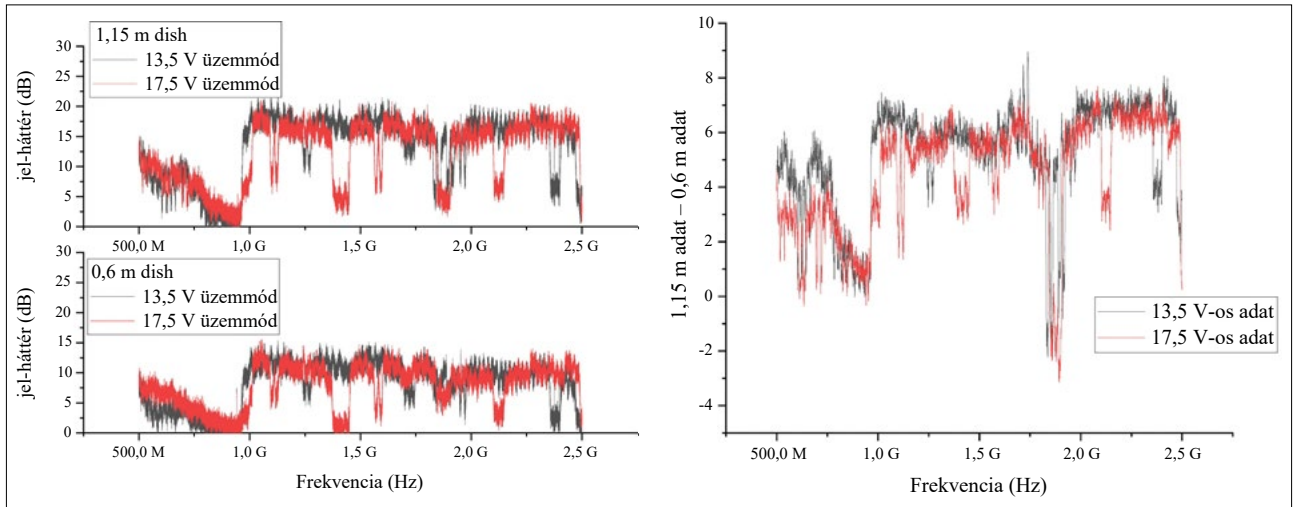
Aránylag sokfelé találunk kidobott parabolaantennát, vagy esetleg vehetünk olcsón egy használt parabolaantennát LNB-vel. Ez esetben az egyetlen új eszköz, amire költenünk kell a saját rádióeszközökhöz, egy műholdkereső. Erre ritkábban lehetünk rá, mert ezt általában csak műholdakat szerelő szakemberek használják. Ennek ára kb. 3000 Ft. A műholdkereső alpból hangot ad ki (aminek erőssége és magassága arányos a vett jel nagyságával) és egy analóg kijelzőn mutatja a vett jel nagyságát. Azonban a műholdkeresőt szétbontva rá tudunk forrasztani az analóg kijelző meghajtásával párhuzamosan egy csatlakozót, aminek a jelét már egy hagyományos kézi multiméter feszültség üzemmódjában is mérhetünk. Ez az átalakítás lehetőséget ad a rendszerünkkel mért jelek egyszerű detektálására, azonban a továbbiakban egy ún. spektrumanalizátorral

mért eredményeket mutatunk be, mert így közvetlenül az LNB kimenetén dBm/Hz egységekben mérhetünk.

## A rendszer érzékenységének vizsgálata geostacionárius műholdak segítségével

Geostacionárius műholdak segítségével teszteltük rendszerünk érzékenységét. Két-két mérést végeztünk egy 60 cm és egy 115 cm átmérőjű antennával, mind a 13,5 V, mind a 17,5 V-os tápfeszültséget használva (5. ábra). Mindkét esetben spektrumanalizátort használtunk a

mérésre, és megmértük a spektrumanalizátoron látott zajszintet, amikor nincs összekötve az LNB-vel. Majd az LNB-vel mért jeleket ezzel a háttérrel hasonlítottuk össze, és így kaptuk meg a rendszerrel mért jel/zaj viszonyt, amit az 5. ábrán mutatunk. Jól látszik, hogy 1 GHz alatt csak zajt kapunk, azonban az 1 GHz–2,5 GHz-es tartományban mutatott jelszint a



5. ábra. Bal oldal: a két parabolaantennával kapott eredmények a 13,5 V (vízszintes polarizáció) és 17,5 V-os tápfeszültség (függőleges polarizáció) mellett. Jobb oldal: a két antennával látott jelszintek különbsége. A vízszintes tengely mérnöki egységeket használ (M = Mega, G = Giga)

műhold által kibocsátott televízióadásnak felel meg. Ebben látunk kb. 40 MHz széles ablakokat, mindegyik egy konkrét csatornának felel meg. Adott frekvenciáknál a jel-zaj arány nullává válik, ezeken a frekvenciákon nincs kisugárzott jel.

Aránylag nehéz a várt abszolút jel-zaj arányt kiszámolni, azonban a két antenna közötti különbséget az eredményeink jól visszaadják: azt várjuk, hogy a kétszer nagyobb átmérőjű antenna négyszer nagyobb teljesítményt vesz, ami kb. 6 dB-lel nagyobb jel-zaj arányt jelent, mint a kisebbben. Az 5. ábra jobb oldalán mutatott eredmény szerint ez teljesül is.

A várt jel-zaj arány abszolút értékének becsléséhez tekintsünk realiztikus adatokkal egy számolást! Tekintsünk egy kommunikációs műholdat, amely 100 Watt teljesítményt sugároz egy 10 magyarországnyi területre, ami körülbelül 1 millió km<sup>2</sup>, azaz 10<sup>12</sup> m<sup>2</sup>! A példánkban vegyük azt, hogy a kisugárzott teljesítmény egy 1 GHz-es tartományban oszlik el egyenletesen, így az 1 Hertz sáv szélességen és 1 m<sup>2</sup> vevőfelületen vett teljesítmény 10<sup>-19</sup> W, azaz az egységnyi felületre és sáv szélességre vonatkozó teljesítménysűrűség: 10<sup>-19</sup> W/(Hz·m<sup>2</sup>). A fentiek szerint tehát 1 m<sup>2</sup> felületen dBm egységekben ekkora teljesítménysűrűséget kapunk: -160 dBm/Hz. A fentiekben kiszámoltuk, hogy a hőmérsékleti zajszint a Johnson-Nyquist-formulából -174 dBm/Hz, ezért azt várjuk, hogy az 1 m<sup>2</sup> felületű antennával a zajszinthez képest 14 dB-lel erősebb jelet kapunk. Az 5. ábra alapján az 1,15 m átmérőjű antennával (felülete 1,03 m<sup>2</sup>) kb. 16 dB-s jel-zaj arányt kapunk, ami jó egyezésben van a fenti számolással – ez csak a becsült kibocsátott teljesítményen és a vevőfelületen alapult.

## A rendszer zajhőmérsékletének meghatározása a környezeten végzett mérésekkel

Minden vevőrendszer rendelkezik saját zajjal, ami hozzáadódik a környezeti zajokhoz. Ezeket a zajokat is zaj

hőmérséklettel jellemezzük, hasonlóan a termikus zaj hőmérsékletéhez. Jelölje a rendszer zajhőmérsékletét  $T_{rendszer}$  és a mért objektumét (pl. a tiszta ég vagy egy meleg házfal)  $T_{objektum}$ ! Ilyenkor a mért eredő zajhőmérséklet a két zajhőmérséklet összegeként áll elő, azaz:

$$T_{eredő} = T_{rendszer} + T_{objektum}$$

A felhőtlen ég zajhőmérsékletére elfogadott a 20 K-es érték a 10 GHz-es tartományban [3]. Egy napsütötte fal hőmérséklete kb. 300 K-es volt. Így két mérést elvégezve kapunk egy aránypárt a megfigyelt zajszintekre, amit  $r$ -rel jelölünk:

$$r = (T_{rendszer} + 300 \text{ K}) / (T_{rendszer} + 20 \text{ K}).$$

Ha ezt átrendezzük a rendszer zajhőmérsékletére, akkor kapjuk:

$$T_{rendszer} = (20 \text{ K} \cdot r - 300 \text{ K}) / (1 - r).$$

Ezt a mérést elvégeztük a tiszta eget és a benapozott házfalat megfigyelve, és jól mérhető különbséget találtunk a mért zajszintekben. A fenti egyenlet szerint kiértékelve az adatokat azt kaptuk, hogy a rendszerünk zajhőmérséklete  $200 \pm 30 \text{ K}$ , ami jó egyezésben van egy hasonló antennarendszer szokásos zajhőmérsékletével [2].

## A Napon végzett tényleges rádiócsillagászati mérések

A mérőrendszerünk érzékenységét és paramétereit megismerve felhasználhatjuk tényleges rádiócsillagászati mérésekre. A Föld környezetében a legerősebb rádiójelforrás a Nap, ezért a méréseket rajta kezdjük. A mérésekhez a vevőrendszerünk lekevert kimenőjelét 1,25 GHz-en vizsgáltuk 9,75 GHz-es lekeverés után. Ez azt jelenti, hogy az LNB-vel valójában a 11 GHz-es frekvencián beérkező sugárzást figyeljük meg. A Nap látható átmérője

körülbelül 0,5 fok az égen, a 60 cm átmérőjű antenna látószöge pedig 3 fok, ezért a teljes látószögből a Nap az 1/36-odát tölti ki. Meghatározható az is, hogy a Nap az égen 1 óra alatt hány fokot tesz meg (látszólagosan), vagy fordítva, hogy 1 fokot mennyi idő alatt halad. A Nap a 360 fokot 24 óra alatt teszi meg, vagyis két delelés között 24 óra telik el, ezért 1 óra alatt 15 fokot tesz meg, azaz 1 fokot 4 perc alatt. Ebből az következik, hogy a parabola-antenna 3 fokos látószögén a Napkorong (középpontja) kb. 12 perc alatt halad át.

A mérésünket a 60 cm-es antennával elvégezve azt találtuk, hogy a háttér zajához képest a Nap az áthaladásakor 5 dB jeltöbbletet hoz, emellett az áthaladásának idejére kb. 13 percet kaptunk (400 s), ennyi idő alatt változott a jel nagysága legalább 2,5 dB-t, így ez a jelalak ún. félértékszélessége. Tudjuk, hogy a rendszerünk háttérzajának hőmérséklete kb. 200 K, és az 5 dB-s növekmény 3,16-szeres mért zajhőmérsékletet jelent. Tudva, hogy a Nap csak a látómező 1/36-odát tölti ki, és tudva azt, hogy a hőmérséklet alapvetően energiasűrűség, ami a felületi átlagolást érvényessé teszi,  $T_{\text{Nap}} = 200 \text{ K} \cdot 3,16 \cdot 36 = 22\,800 \text{ K}$  adódik a Nap felszíni hőmérsékletére.

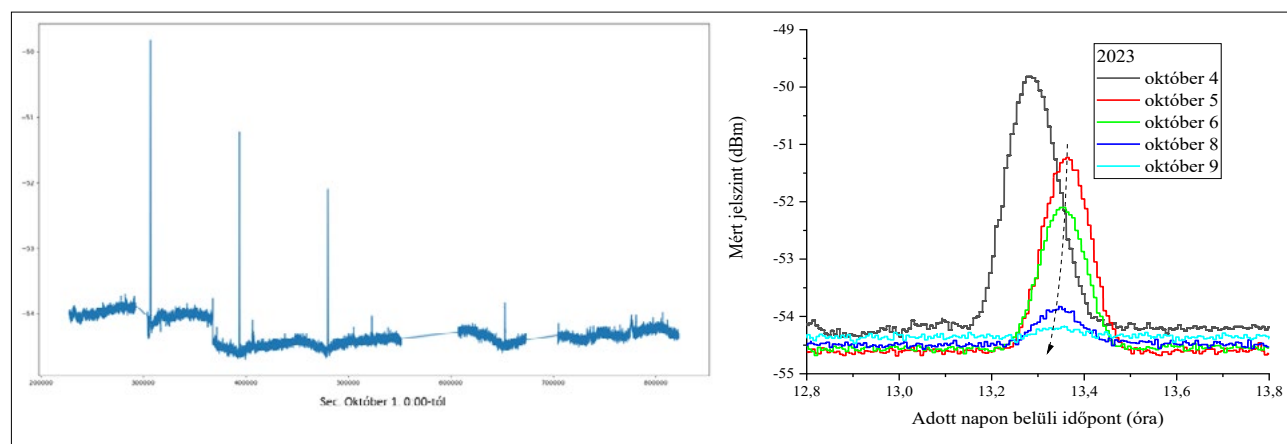
Közismert, hogy 5800 K a Nap felszíni hőmérséklete a látható tartomány alapján mérve [4]. Azonban a felszíntől picit távolabb elhelyezkedő koronartartomány töltött részecskék intenzív kisugárzása dominálja a rádiófrekvenciás és mikrohullámú tartományban. A sugárzás kibocsátásához rendelhető hőmérséklet jelentősen eltér a látható fényt adó fotoszféra hőmérsékletétől. Így tehát teljesen elfogadható a kapott, a látható tartományban megfigyelnél melegebb érték [5]. A jelenség háttere jelenleg nem teljes körűen ismert, és több vetélkedő leírás is létezik erre. Abban mindegyik elmélet egyetért, hogy a korona a termikus egyensúlyban lévő fotoszféránál jelentősen melegebb lehet, és ez az extra hőmérséklet nagyban függ a naptevékenységi ciklus állapotától.

A következő eredmény egy egyhetes sorozatot mutat be a 115 cm átmérőjű antennával a 6. ábrán. Itt nem

tudtuk az antennát annyira pontosan a Napra célozni: egy adott napon közel optimálisan beállítottuk, azonban napról napra változik a Nap megfigyelt magassága, ezért időben is változik a jelek maximumértéke. A méréshez a spektrumanalizátorral mértünk időfüggő módon, azonban így 300 ms-onként teszünk el jeleket, emiatt az egy hét során közel 2 millió adatpont keletkezik. Ennyi adatot már nem tudunk egyetlen adatkezelő programmal sem megjeleníteni és formázni, ezért először egy python kód segítségével csináltunk egy 10 pontos csúszóátlatgot, illetve az egyes napokon belül mért és időbélyeggel el látott adatokat egymásra is tudtuk rakni, amit a 6. ábra jobb oldala mutat.

Ebben a mérésben utólag több problémát is megfigyeltünk: bizonyos időközönként az egy hét során nem kaptunk eltárolt adatokat (üres mérési eredmények), ennek okát nem sikerült feltárnunk. Emellett a különböző napok adatait egymásra téve azt találtuk, hogy a legtöbb napon mért adatok jól egymásra esnek, kivéve a legelsőt (október 4). Utólag ezt az anomáliát is sikerült megértenünk, mivel a meteorológiai adatok alapján az első napon erős szél fújt, ami a fal mellett elhelyezkedő antennát vélhetően egy irányba elfordította. Október 7-éről nincsenek adataink, mert éppen akkor a rendszerünk sajnos nem rögzített adatokat. További mérésekre nem volt módunk, mert a labor előtt álló fa kitakarta az év további időszakában a Napot a rádióantenna elől.

A továbbiakban arra az időpontra, amikor az antennánk legérzékenyebb pontja előtt éppen áthalad a Nap, mint delelésre fogunk hivatkozni, bár ez nem azonos a mi földrajzi szélességünkön vett delelés időpontjával. Ez megfelel a görbék csúcspontjának. Megfigyeltük, hogy a delelés időpontja folyamatosan előrébb mozog. Ennek az oka a delelések között eltelt időben keresendő [4, 6]. Oka kettős: van egy bonyolultabb geometriai ok, ami a Föld forgástengelyének dőlésszögével függ össze, a másik, ezzel összemérhető hatás a Föld pálya menti mozgásával függ össze. Ez utóbbit ismertetjük. Korábban említettük,



6. ábra. Bal oldal: az egyhetes kísérletben mért adatok (egy python-grafikon képernyőképe) másodperc egységekben október 1., 0:00 órától mérve (közép-európai idő szerint). A látható nagy csúcsok a Nap áthaladását jelzik. Függetlenül a mért jel nagyságot adjuk meg dBm egységekben. Jobb oldal: az egyes napokon végzett mérések egymásra helyezve. Az ábrán látható „lépések” a berendezés digitalizálásából erednek. A szaggatott nyíl mutatja a delelések egymásra esését

hogy az ún. sziderikus nap hossza kb. 4 perccel rövidebb, mint a Nap két delelése között eltelt idő. A sziderikus nap ideje állandó (ezredmásodperces nagyságrendben a föld-rengések, a többi bolygó és a Hold befolyásolja), viszont a Föld pályájának bejárása során a két delelés között eltelt idő állandóan változik. Ha a Föld a pályáján megállna, akkor a Nap két delelése között mindig pontosan a sziderikus nappal azonos idő telne el, azonban a mozgás miatt van, hogy a delelések között kb. 4 perccel hosszabb idő telik el, mint a sziderikus nap. Kepler második törvénye értelmében januárban, amikor a Föld napközeli pályán jár, a pályáján gyorsabban mozog, ezért a két delelés között eltelt idő nagyobb, mint júniusban. Lényegében a 24 órás időtartam két delelés között csak egy átlag, ehhez képest januárban hosszabb egy „szoláris nap” (amit két delelés között mérhetünk), ősszel és tavasszal rövidebb. A két időpont között pedig a delelések közti idők folyamatosan mozognak; a részletesebb eredmények szerint [6] két delelés között októberben az átlagos 24 órához képest kb. 13 szekundummal rövidebb időt kapunk. A mi adatainkból a 6. ábrán mutatott módon (a szaggatott nyíl jelzi; az egyes mérésekre Gauss-görbét illesztettünk) azt kaptuk, hogy 5 nap alatt a delelés időpontja 68 szekundumot, azaz naponként átlagosan 13,6 szekundumot ment előrébb, ami igen jó egyezésben van a várt 13 szekundummal.

## Köszönetnyilvánítás:

A cikk szerzői köszönetet mondanak a Czigány Tibor rektor által kezdeményezett BME Középiskolás TDK programnak. A cikk elkészültét a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatta a K137852, K142179, TKP2021-EGA-02, és TKP2021-NVA-02, és V4-Japán programok (2019-2.1.7-ERA-NET-2021-00028) által, valamint a Kulturális és Innovációs Minisztérium a Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium projekt (2022-2.1.1-NL-2022-00004) keretében.

## Irodalom

1. [https://en.wikipedia.org/wiki/Sidereal\\_time](https://en.wikipedia.org/wiki/Sidereal_time)
2. Fukushima E., Roeder S. B. W.: Experimental Pulse NMR: A Nuts and Bolts Approach, ISBN 978-0201627268, CRC Press, 1993.
3. Iida T., Wakana H.: Communications Satellite Systems. In: Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Ed.), szerkesztő: Meyers R. A., Academic Press, 2001.
4. Dályá G.: Bevezetés a csillagászatba – Az atommagoktól a galaxis-szuperhalmazokig. (2021) Felelős kiadó: Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Felelős szerkesztő: Kiss László főigazgató, ISBN 978-963-8361-58-5
5. <https://physicsopenlab.org/wp-content/uploads/2020/11/sun-RadioSpectrum.png>
6. <https://explainingscience.org/2015/08/24/september-18-the-shortest-day/>