

Dr. Novoszáth Péter*

A bolygók radarcsillagászati vizsgálata

A CSILLAGÁSZAT KEZDETEI

A bolygók és a Naprendszer kisebb égitestjeinek radarral történő kutatási célja elsődlegesen az, hogy megértsük bolygórendszerünk kialakulásának és fejlődésének történetét, ugyanakkor ez a technológia a lehetséges veszélyt jelentő földközeli aszteroidák (Near Earth Asteroids – NEA) megfigyelését is lehetővé teszi. [1] A tanulmány rövid történeti áttekintést ad a radarcsillagászatról és a terület technikai szükségleteiről. A szerző bemutatja a jelenlegi amerikai bolygóradar-rendszereket, azok spektrumhasználatát, valamint az adatok megszerzéséhez és elemzéséhez alkalmazott technikákat.

A második világháború alatt a radarok gyors fejlődése lehetővé tette, hogy az új technológia felhasználásával, a radarvisszhangok észlelésével többet tudjunk meg bolygórendszerünkről, a nagy- és kisbolygók felépítéséről. Ma már, amikor képesek vagyunk testvérbolygóinkhoz üreszköket küldeni, szinte hihetetlen, hogy az 1960-as évek elejéig – az első űrmissziók megjelenéséig és fejlett földi megfigyelő eszközök, köztük a radar kifejlesztéséig – milyen keveset is tudtunk a Naprendszerről. A radartechnikák olyan információkkal szolgálnak, amelyek más módon nem érhetők el, a radarképek például olyan információkat nyújtanak a szilárd testek alakjáról és felületi tulajdonságairól, amelyeket más földi technikákkal nem lehet megszerezni. A nagy teljesítményű földi radarokra támaszkodva, a radarcsillagászat rendkívül pontos asztrometrikus információkat képes szolgáltatni a Naprendszer objektumainak szerkezetéről, összetételéről és mozgásáról. [2]

A radartechnikák pontosabb értékekkel szolgálhatnak a bolygók közötti távolságok meghatározásához. A csillagászatban csak távolságarányok mérhetők könnyen, a tényleges hosszúságok nehezen, ezért sokáig az égitestek közötti távolságokat csak csillagászati egységben számolták. Kepler is csak a Nap–Föld távolsághoz tudta viszonyítani a bolygók távolságát. Valódi mérésre a Vénusz és a Merkúr Nap előtti elvonulásának különböző helyekről történő megfigyelése adott lehetőséget. A távolság meghatározható abból, ahogy az égitest áthaladása a Nap előtt a két különböző helyről hogyan látszik. Az 1769-es Vénusz-átvonulás megfigyelésében Hell Miksa (1720–1792) és Sajnovics János (1733–1785) is részt vett a norvégiai Vardø-szigeten.

[3] Hell Miksa és Sajnovics János a dán király felkérésére mérték meg az 1769. június 3-i Vénusz-átvonulás kontaktusainak időpontját az észak-norvégiai Vardø-szigetről. „A Vénusz Nap előtti átvonulása óriási jelentőséggel bírt, hiszen egyértelműen igazolta az ókori tudós, Szamoszi Arisztarkhosz (i. e. 310 körül – i. e. 230 körül), majd a több mint 1500 évvel később élt Kopernikusz (1473–1543), valamint Kepler (1571–1630), és végül Newton (1642–1727) állításait, illetve az egyetemes tömegvonzás törvényét. A két csillagász megfigyelése egyúttal egyértelművé tette, hogy a bolygók nem a Föld, hanem a Nap körül keringenek”. [4]

A csillagászati egység az égi mechanikában használatos hosszúságegység. Eredeti definíciója szerint a Föld–Hold rendszer tömegközéppontja Nap körüli pályájának fél nagytengelye. A Nemzetközi Csillagászati Unió (International Astronomical Union) azonban pontos kilométerértéket megadva újradefiniálta, elhagyva az eddigi mért érték hibáértékét. Jele: CsE. További elterjedt rövidítése az AU, az angol „Astronomical Unit”-nak megfelelően.

1 CsE = 149 597 870 700 m (kerekítve 150 millió km).

A Pluto 39,5 CsE-re, a Jupiter 5,2 CsE-re van a Naptól.

A Betelgeuze vagy Orionis csillag átmérője 2,56 CsE.

A Hold a Földtől 0,0026 CsE-re található. [5]

Jelenleg a bolygók radarcsillagászati vizsgálatának egyik kiemelkedően fontos feladata, hogy azonosítsa azokat az aszteroidákat, amelyek veszélyt jelenthetnek a Földre. Ezek közé tartozik többek között az Apophis nevű aszteroida, amely egy 340 méter nagyságú űrszikla. Az Apophis, az elkövetkező száz évben három alkalommal is meg fogja közelíteni a Földet. Először 2029. április 13-án vehetik szemügyre közelebből a hazai csillagászok, amikor mindössze 32 ezer kilométerre (20 ezer mérföld) lesz a Földtől. 2036-ban és 2068-ban ismét megközelíti a Földet. Az Apophist először 2004-ben sikerült észlelni. Azóta a legújabb teleszkópos megfigyelések eredményeként – amelyek az amerikai Deep Space Network Goldstone-i komplexumában Kaliforniában és a Green Bank Telescope nyugat-virginiai rádióantennáival rögzítettek – kiderült, hogy a Föld még legalább 100 évig biztosan nem fog összeütközni ezzel a különösen veszélyes, Apophis nevű aszteroidával. [6] Ugyanakkor jelenleg a fél kilométer átmérőjű Bennu számít a legveszélyesebb aszteroidának, amely

ÖSSZEFOGLALÁS: A radarcsillagászat a közeli égitestek megfigyelésének technikája, a mikrohullámok céltárgyakról történő visszaverődésének elemzése. Ezt a kutatási módszert több mint hét évtizede alkalmazzák. Míg a rádiócsillagászat passzív, a radarcsillagászat aktív tevékenységet jelent. A korszerű létesítmények, valamint az adó-vevő teljesítmények növekedése egyre jelentősebb megfigyelési lehetőségeket kínál.

KULCSSZAVAK: asztrofizika, csillagászat, Nap és Naprendszer kutatása, radarcsillagászat, űrkutatás, űrtávközlés és navigáció, űrtechnológia, űrtévedékenység, űrtudomány

ABSTRACT: Radar astronomy is a technique of observing nearby astronomical objects by reflecting microwaves off target objects and analysing the reflections. This research method has been conducted more than seven decades. Radar astronomy differs from radio astronomy in that the latter is a passive observation and the former an active one. Radar systems have been used for a wide range of solar system studies. The increased transceiver power, and improved apparatus have increased observational opportunities.

KEY WORDS: astronomy, astrophysics, radar astronomy, solar and solar system research, space research, space telecommunications and navigation, space technology, space science

* PhD, egyetemi docens, NKE, Közpénzügyi Tanszék, az NKE Katonai Műszaki Doktori Iskolájának témakiírója. ORCID: 0000-0002-8755-6858



1. ábra. Az első magyar lokátorok hatótávolsága Magyarországon, a II. világháború végén [12]

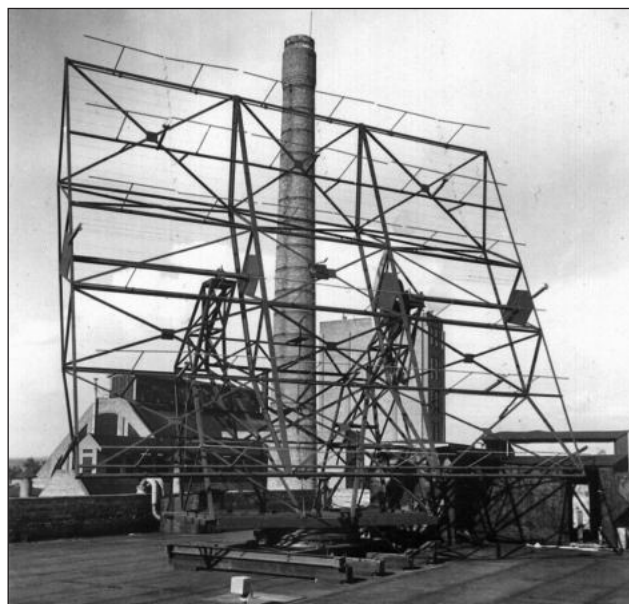
potenciális becsapódási lehetősége minden korábbi becsülésnél nagyobb a legfrissebb számítások szerint. [7]

AZ ELSŐ FÖLDÖN KÍVÜLI ÉGÍTÉSÉZLELESEK RADARRAL

Radarrendszerek segítségével 1946-ban észleltek először visszhangokat a Holdról, Magyarországon és az Amerikai Egyesült Államokban.

Az 1940-es évek intenzív magyarországi radarfejlesztései [8] saját védelmi eszközök megalkotását célozták, ugyanis Németország nem látta el megfelelő technikai információkkal és radareszközökkel a szövetséges Magyarországot és Olaszországot. Ezért Jáky József (1897–1944) vezetésével a Magyar Királyi Honvéd Haditechnikai Intézet kifejlesztette a Sas (Eagle) távolsági felderítő radart, a légvédelmi tüzérség számára a Borbála (Barbara) tűzvezető radart, az éjszakai vadászfeladatok ellátására a Turul repülőgép-fedélzeti radart és a Bagoly vadászrepülőgépek irányítására tervezett radart. (1. ábra) Ezek az eszközök, technológiai szempontból sok hasonlóságot mutattak a korabeli olaszországi radarfejlesztésekkel Folaga, Veltro és Gufo. (Szárca, Vadászkutya, Bagoly). [9] [10]

2. ábra. Bay Zoltán csoportjának Hold-radarja az Egyesült Izzó (Tungsram) épületének tetején [13]



A második világháború idején, a repülőgépek távoli felismerésére kifejlesztett radartechnika „melléktermékeként”, tulajdonképpen a háború alatt megindított katonai lokátorprogram kapcsán kezdődött el az égitestek radarral történő vizsgálata [11].

1946. február 6-a után világszerte sokan olvashatták az újságokban Bay Zoltán (1900–1992) fizikus, az Egyesült Izzólámpa és Villamossági Rt. műszaki igazgatója és laboratóriumvezetője, valamint az újpesti gyár kutatócsoportja nevét, ugyanis ekkor jelentették be, hogy sikeres kísérletet hajtottak végre, és ultrarövid rádióhullámok visszaverődését észlelték a Holdról. [13]

A kísérlet gondolata, valamint a háború utáni mostoha körülmények között elvégzett világhírű kísérlet a magyar űrtevékenység és a nemzetközi radarcsillagászat kezdetét is jelentette. A Hold-radar kísérletek jelentősége abban állt, hogy ezek voltak az első természettudományos vizsgálatok, amelyeket Földön kívüli égitesten végeztek. Az égitestekről szerzett ismeretek évezredekén keresztül kizárólag passzív megfigyeléseken alapultak, de a mikrohullámú technika lehetővé tette a távoli objektumok fizikai vizsgálatát is. [14]

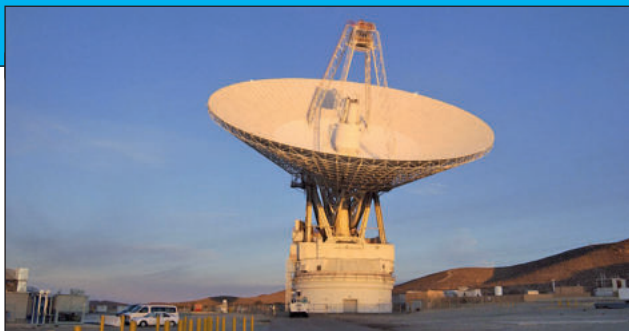
A JELENLEGI RADARCSILLAGÁSZATI RENDSZEREK LÉTREJÖTTE

A legközelebbi bolygósomszédunkról, a Vénuszról érkező visszhangok felderítéséhez azonban a radar érzékenysége nem felelt meg a feladatnak. Ezt az 1950-es évek végén sikerült elérni, amelynek eredményeként 1961-ben a bolygót a Földhöz közeli periódusa során öt különböző radarrendszer segítségével az Egyesült Államokban, Nagy-Britanniában és a Szovjetunióban vizsgálták. A megfigyelés során a Vénusz tengely körüli retrográd forgását is sikerült meghatározni. [15] Az 1960-as évek közepére már három darab új, sokkal erősebb radarrendszer állt rendelkezésre: a 305 méter átmérőjű Puerto Ricó-i Nemzeti Tudományos Alapítvány (National Science Foundation – NSF) Arecibo rádiólokátora, a massachusettsi 37 méteres Haystack antenna, és a NASA 64 méteres Deep Space antennája a kaliforniai Goldstone-ban (3. és 4. ábra).

Korábban a Krímben található orosz, 70 méteres Jevpatorija távcső volt az említett két amerikai rendszertől függetlenül működő, egyetlen bolygóradar-rendszer. Az eszköz azonban, a közelmúlt harci cselekményei miatt befejezte tudományos tevékenységét. A távcső korlátozott érzékenysége ugyanakkor csak a földközeli aszteroidák ritka megfigyelését tette lehetővé. Később az Amerikai

3. ábra. Az Arecibo Observatórium 305 méter átmérőjű, (sérült) antennatányérja, fölötté a kábelekre erősített, mozgatható vevőegységgel (2020. november) [16]





4. ábra. A 70 méter magas NASA Goldstone DSS-14 antenna [18]

Egyesült Államokban, és az Arecibo és a Goldstone rendszerek további korszerűsítésére is készültek tervek, elsősorban a földközeli aszteroidák pályájának meghatározására és összetételének jellemzésére. [1]

Az Arecibo Obszervatóriumban (Arecibo Planetary Radar) 2020 végén, egy szerkezeti tartókábel hibája miatt a fő teleszkóp összeomlott (a sérülés a 3. ábrán is jól látható). Ezért jelenleg csak a Goldstone Solar System működik. [17]

A Puerto Ricó-i Arecibo rádiótávcső közelmúltbeli elvesztése (2020. december 1-én az Arecibo rádióteleszkóp 900 tonnás szerkezete lezuhant) nagy veszteséget jelent a Naprendszer égitesteit vizsgáló radarasillagászok számára. A 305 méter átmérőjű (de nem mozgatható) arecibói antennánál működött ugyanis a világ legnagyobb teljesítményű, 1 MW-os bolygókutató radarja, amellyel például a Föld közelében elrepülő kisbolygókról tudtak részletes képeket készíteni, adott esetben kis holdjaikat felfedezni. [13]

RADAREGYENLET

A radar olyan berendezés, amely az általa kisugárzott rádióhullámok (3 MHz–110 GHz frekvencia, 100 m–2,7 mm hullámhossz) visszaverődésének érzékelése alapján különféle tárgyak helyét képes megállapítani. Leginkább a repülésben, hajózásban, a haditechnikában, a meteorológiában, de

számos más területen, így például az űrszillagászatban is alkalmazzák. Az adó- és a vevőegységet – többnyire, de nem mindig – egy berendezésbe építik. A vevőantennára visszaérkező teljesítményt (P_r) a radaregyenlet adja meg:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2},$$

ahol P_t = a kisugárzott teljesítmény;

G_t = az adóantenna nyeresége;

A_r = a vevőantenna effektív apertúrája (felülete);

σ = a cél radarkeresztmetszete (szórási együtthatója);

F = a terjedési tényező;

R_t = az adó és a cél távolsága;

R_r = a vevő és a cél távolsága. [19]

Abban az esetben, ha az adó és a vevő (közös) ugyanott található, $R_t = R_r$ helyettesíthető egymással, akkor az eredmény az alábbi lesz:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 R^4}$$

Ez azt mutatja, hogy a visszaérkező jel a távolság negyedik hatványával csökken, ami azt jelenti, hogy a visszavert teljesítmény távoli tárgyak (célok) esetében nagyon-nagyon alacsony értékű lesz.

A fenti egyenlet $F = 1$ egyszerűsítése vákuumra vonatkozik, ahol nincs interferencia. A terjedési tényező szolgál magyarázatként a többutas terjedésre, az árnyékolásra, és függ a környezet minden egyes részletétől. A valóságban a Pathvesztéseket (pathloss) hatásokat is figyelembe kell venni.

A BOLYGÓRADAR-RENDSZEREK FŐBB JELLEMZŐI

Egy bolygóradar-rendszer érzékenysége arányos az átlagos adóteljesítménnyel és az adó- és vevőantennák effektív területével, amelyek azonosak a monosztatikus rend-

1. táblázat. Az amerikai bolygóradar-rendszerek 2020-ban (Az [1] alapján a szerző szerkesztése)

Adás helye	Frekvencia (GHz)	Sávszélesség (MHz)	Teljesítmény (MW)	Fogadás helye
Arecibo, Puerto Rico	2,380	20	1,0 (CW)	Arecibo, Puerto Rico GBT*, Green Bank, Nyugat-Virginia VLA**, Socorro, Új-Mexikó LRO***
	0,430	0,6	2,5 (pulzált)	Arecibo, Puerto Rico GBT*, Green Bank, Nyugat-Virginia
Goldstone, Kalifornia DSS-14	8,560	50	0,5 (CW)	Goldstone, Kalifornia GBT*, Green Bank, Nyugat-Virginia Arecibo, Puerto Rico VLA*, Socorro, Új-Mexikó 10 VLBA sites****
Goldstone, Kalifornia DSS-13	7,190	80	0,08 (CW)	Goldstone, Kalifornia GBT*, Green Bank, Nyugat-Virginia Arecibo, Puerto Rico

* Az amerikai nyugat-virginiai Green Bankban található Robert C. Byrd Green Bank teleszkóp (GBT) a világ legnagyobb, minden irányban irányítható rádióteleszkópja.

** Very Large Array – a világ legnagyobb rádióteleszkópja, amely 27 edényantennából áll.

*** Lunar Reconnaissance Orbiter – A NASA Lunar Reconnaissance Orbiter berendezések segítségével pásztázza a Holdat, és a leg-részletesebb adatokat gyűjtötte össze a Hold felszínéről.

**** A VLBA – Very Long Baseline Array egy tíz megfigyelőállomásból álló hálózat az Egyesült Államokban. Minden állomás egy 25 méteres rádióantenna-edényből és egy vezérlőépületből áll. A VLBA-állomások korlátozott rádióinterferencia-területeken találhatók, és széles körben elterjedtek az Egyesült Államokban: 1. St. Croix – U.S. Virgin Islands; 2. Hancock – New Hampshire; 3. North Liberty – Iowa; 4. Fort Davis – Texas; 5. Los Alamos – Új-Mexikó; 6. Pie Town – Új-Mexikó; 7. Kitt Peak – Arizona; 8. Owens Valley – Kalifornia; 9. Brewster – Washington; 10. Mauna Kea – Hawaii. A közeli aszteroida-megfigyelések bisztatikus műveletet igényelnek. A Goldstone DSS-14 NTIA hozzárendelése 8,50–8,70 GHz. A Goldstone DSS-13 NTIA hozzárendelése 7.150 és 7.230 GHz között van. CW – continuous wave (folyamatos hullám).

szereknél, de eltérőek lehetnek a bistatikus rendszerek esetében, és fordítottan arányosak a működési hullámhosszal. Az érzékenység függ a rendszer hőmérsékletétől, amely jellemzi a vevőt, a Föld légkörét, és végső soron a galaxisunk és a kozmikus mikrohullámú háttérzaj kibocsátását. Ezért a Naprendszer égitestjeinek Földtől mért nagy távolsága miatt a méréshez nagy adóteljesítmény, nagy adó/fogadó gyűjtőterületek és nagyon alacsony rendszerhőmérséklet szükséges. Az 1. táblázat azoknak a 2020-ban üzemelő amerikai bolygóradaroknak és antennáknak a legfőbb jellemzőit mutatja be, amelyeket bistatikus megfigyeléseik során alkalmaztak. A bistatikus radar olyan radarrendszer, amely egy adót és vevőt tartalmaz, és amelyeket a várható céltávolsághoz arányos távolság választ el egymástól. Ezzel ellentétben egy radart, amelyben az adó és a vevő együtt található, monostatikus radarnak nevezzük. [20]

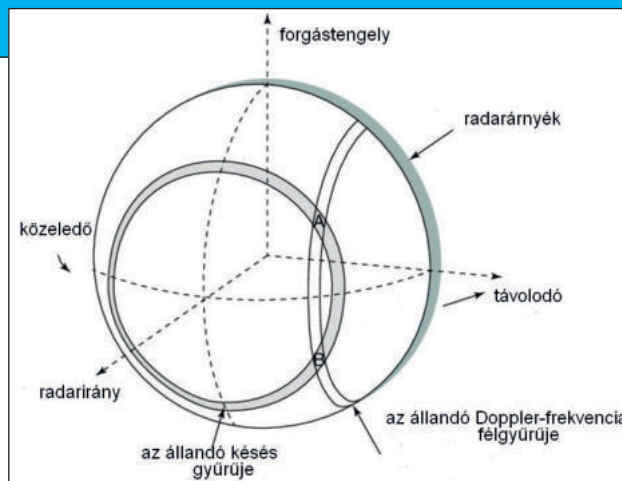
A passzív radarmegfigyelés nagy előnye, hogy képes szabályozni az átvitt hullámforma tulajdonságait, és a kapott visszhangban méri ezeknek a tulajdonságoknak a változását. Ezek a jellemzők a következők:

- az átvitt hullámforma időbeli eredete;
- frekvencia vagy hullámhossz;
- a tényleges izotróp sugárzott teljesítmény (Effective Isotropic Radiated Power – EIRP), és
- a polarizációs állapot.

Az időbeli eredet lehetővé teszi a céltest távolságának precíz mérését, míg az echo (visszhang) frekvenciája az átvitt frekvenciához viszonyítva, a Doppler-eltolódás lehetővé teszi a céltest radiális sebességének meghatározását. Ennek következtében lehetségessé vált a Vénusz radar-asztrometriai méréseinek további finomítása, a csillagászati egység nagyságának pontosabb meghatározása. Az eszközök ma már elsősorban a potenciálisan veszélyes földközeli aszteroidák pontos pályájának meghatározására szolgálnak.

A Doppler, vagy más néven impulzus-Doppler rádiólokátorok a Doppler-effektus segítségével különböző tárgyak radarhoz viszonyított sebességét tudják meghatározni. Ha egy céltárgy a jól visszaverő háttérhez nagyon közel halad, akkor hagyományosan, a megtett utak különbségén alapuló módszerrel nem lehet felderíteni. A mozdulatlan háttérhez képest mozgó tárgyról visszaverődő elektromágneses sugárzás frekvenciája a Doppler-effektus miatt megváltozik, így az erre alkalmas lokátor képes a tárgy észlelésére. [21] A csillagászatban a Doppler-effektus felhasználásakor kihasználják, hogy a csillagok elektromágneses spektruma nem folytonos, hanem abszorpció (elnyelési) vonalakat tartalmaz, amelyek frekvenciája jól ismert, az atombeli elektrópályák energiájával van kapcsolatban. Ha az égitest mozog, akkor az elnyelési vonala eltolódik, távolodó égitest esetén a frekvencia csökken (a hullámhossz nő), közeledő égitest esetén a frekvencia nő (a hullámhossz csökken). A kék fény frekvenciája nagyobb, mint a vörösé, ezért a távolodó égitest vörös irányba tolódik, a közeledő kék irányba. A jelenséget vöröseltolódásnak, illetve kékeltolódásnak nevezik. [22]

Ha a visszaverő test forog, akkor forgása a visszaverődő jel kiszélesedését okozza; a jel szélessége és alakja információt nyújt a test forgási állapotáról és felületi formáiról. Tekintettel a céltesttől való távolságára és méretére, a visszhang ereje, a Doppler-jelenség által kiszélesített visszhang alakjával (Doppler-kiszélesedés) kombinálva betekintést enged a felületi anyag elektromos tulajdonságaiba, hőmérsékletébe. A visszhang teljesítményének mérése az időkézés és a Doppler-eltolódás függvényében a Földhöz legközelebbi pontjához viszonyítva a céltesten képet ad a



5. ábra. Radarkép-geometria egy gömb alakú célhoz.

Az állandó késleltetésű vonalak koncentrikusak a Földhöz legközelebbi ponttal – a gömb Földhöz legközelebb eső pontjának helyével –, és az állandó Doppler-eltolódás vonalai két helyen metszik ezeket a koncentrikus késleltetési köröket. A radarvisszhang teljesítményének mérése az időkézés és a Doppler-eltolódás függvényében a Földhöz legközelebbi részhez képest képet ad a késleltetési időből és a Doppler-eltolási koordinátákból. Ha a szokásos módon a radartávcső szögfelbontása nagyobb, mint a célobjektum szögátmérője, akkor a diagram két helyén, A és B ugyanaz a késés és Doppler-eltolás [24]

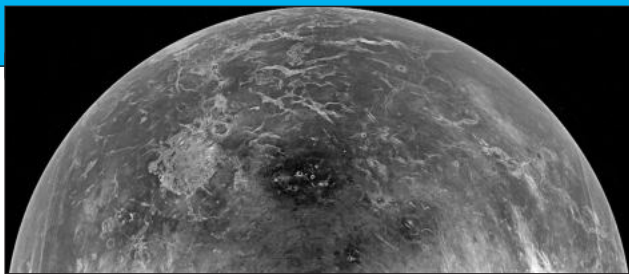
visszhang teljesítményéről. Az impulzusradarokban a vivőfrekvenciát négyszögimpulzusok periodikus sorozatával amplitúdó-modulálják. Ebből egy „fésűszerű” vonalas spektrum adódik, amelyben a vonalak egymástól mérhető távolságát az impulzusismétlődési frekvencia (PRF) határozza meg. Ha a céltárgy mozog, akkor a reflektált jel spektruma a Doppler-hatás következtében, a céltárgy sebességétől függő mértékben, és előjellel eltolódik. [23]

Normális esetben az átvitt jel körkörösén polarizálódik, és a körkörös polarizáció mindkét értékét veszi, lehetővé téve a kapott visszhang polarizációs Stokes-paramétereinek kiszámítását. A Stokes-paraméterek olyan értékek, amelyek leírják az elektromágneses sugárzás polarizációs állapotát. Az értékeket George Gabriel Stokes 1852-ben határozta meg [25] [26], mint matematikailag kényelmes alternatívát az inkoherens vagy részben polarizált sugárzás általánosabb leírása szempontjából annak teljes intenzitása (I), (frakcionált) polarizáció szöge (p) alapján, valamint meghatározta a polarizációs ellipszis alakparamétereit. Az optikai rendszer hatása a fény polarizációjára meghatározható a bemenő fény Stokes-vektorának elkészítésével és Mueller-számítás alkalmazásával, hogy megkapjuk a rendszert elhagyó fény Stokes-vektorát. [27]

Mérsékelt vagy nagy beesési szög esetén a felületre történő átviteli együtthatók a beesési síkkal párhuzamos és merőleges lineáris polarizációkhoz eltérnek, így egy lineárisan polarizált komponens jelenléte a radar visszhangjában a felszín alatti szóródást jelzi, és becsléshez használható a felületi anyag dielektromos állandója.

A BOLYGÓRADAR-CSILLAGÁSZAT JELENTŐSÉGE

Az 1960-as években a radarcillagászat döntően hozzájárult a Naprendszer megismeréséhez és az alapvető fizikához, ezek közé tartozott a csillagászati egységgel kapcsolatos ismereteink jelentős bővülése. Többek között ez tette lehetővé korai bolygóközi űrszondák pontos navigálását. Felfedezték a Vénusz lassú retrográd rotációját és a Merkúr nagyon meglepő, 59,6 napos forgási periódusát. Elkészítették az első, alacsony felbontású képeket a Vénusz felhőtakarója alatti felszínéről. Lehetővé vált az aszteroidák



6. ábra. a Vénusz nagy felbontású képe. A Vénusz 2012-ben összegyűjtött radaradatainak vetülete. A feltűnő felületi jellemzők – például hegyek és hegygerincek – könnyen láthatók. A közelmúltban, a National Science Foundation (NSF) Green Bank Teleszkópja (GBT) és az NSF Arecibo Obszervatóriumának erős radaradójának rendkívül érzékeny fogadóképességeinek egyesítésével a csillagászok figyelemre méltóan részletes képeket tudtak készíteni e bolygó felszínéről anélkül, hogy valaha elhagyták volna a Földet [29]

felfedezése, a NEA Icarus első radarcsillagászati megfigyelése. A radarcsillagászat segítségével támogatták az Apollo-küldetéseket a Hold felszínének képalkotásával és a Hold felszínének egyéb vizsgálatával. Irwin I. Shapiro a klasszikus teszteken túl egy olyan tesztet javasolt az általános relativitáselmélet ellenőrzése érdekében, amelyet a Naprendszeren belül lehet elvégezni, ha pontosan mérjük, mennyit késnek a radarjelek abban az esetben, ha oda-vissza útkon egy, a téridő szerkezetét deformáló, nagy tömeg (a Nap) közvetlen közelében haladnak el (Shapiro-késleltetés). [28]

Annak idején az Arecibo radarrendszerének korszerűsítése elsősorban a Vénusz felületének nagy felbontású képalkotása érdekében történt. A Vénusz felszínéről készült első térképek körülbelül 15 km-es felbontással fedték le a bolygó felszínének 40%-át. Lehetővé tette az első nagyszabású pillantást legközelebbi bolygósomszédunk felszínére, és az első jelzést arra, hogy a Vénusz felszíne nagyon fiatal, mintegy 700 millió éves, a Marshoz, a Merkúrhoz és a Holdhoz képest, amelyek már több milliárd évesek. A Jupiter holdjairól az 1970-es években derült ki, hogy az Europa, a Ganymedes és Callisto alacsony hőmérsékletű, vizes jégfelületeinek szokatlan rádióhullám-szórásai tulajdonságai vannak. Ezeken a felületeken a radarjelek visszatükrözödtek a jég belső szétszóródása miatt, amelynek rádióhullámhosszon nagyon alacsony vesztesége van, és a körkörös polarizáció értéke is megfordul. Az 1990-es évek elején ezek a tulajdonságok vezettek a jéglerakódások felfedezéséhez a Merkúr pólusain, és folyamatos vitákat indukáltak arról, hogy léteznek-e hasonló sokhullámú hosszúságú lerakódások a Hold pólusain elhelyezkedő becsapódási kráterek állandóan árnyékolt részein. Ebben az időszakban a Szaturnusz gyűrűinek első radarfelderítése is egyértelműen megmutatta, hogy a gyűrűk centiméteres és nagyobb méretű részecskékből álltak, és nem milliméternyi méretűek.

Az 1990-es évek közepéig mintegy 50 földközeli aszteroidát (NEA), majdnem 40, a fő kisbolygóövbe tartozó aszteroidát és több üstököst is vizsgáltak az Arecibo és a Goldstone radarrendszerek. Ezek a tanulmányok az előképei a jelenlegi, Földről történő földközeli aszteroidát megfigyelő bolygóradar-programnak.

A Goldstone bolygóradar-rendszer növekményes javulását 1988-ban a NASA Goldstone antennájának 64 méterről 70 méterre történő kiterjesztésével érték el. A következő évtizedben az adóteljesítmény kis mértékű növekedése következett be, az X-sávú klystronok javulása miatt. Az 1990-es évek közepén az Arecibo 305 méteres antennaoptikájának jelentős módosítása, és egy 2,3 GHz-es 1,0 MW-os adó telepítése, a célponttól függően tízszeresére hűszorozta növelte a bolygóradar-rendszer érzékenységét. Ezzel az Arecibo radarrendszer érzékenysége körülbelül hússzor akkora, mint a Goldstone rendszere. Az

Arecibo távcső irányíthatósága azonban korlátozott volt, így csak az ég mintegy 33%-át volt képes megfigyelni (2° déli és 38° északi deklinációk között), ahol a deklináció az égi egyenlítőtől északra vagy délre mért szögtávolság.

A Goldstone antenna az égbolt bármely pontjára irányítható, így az északi égi pólus, és a kb. 40° (déli) deklinációk között végezhető megfigyelések. Ennek következtében a két radarrendszer jól kiegészíti egymást, különös tekintettel a földközeli aszteroidák megfigyelésében.

ÖSSZEGZÉS

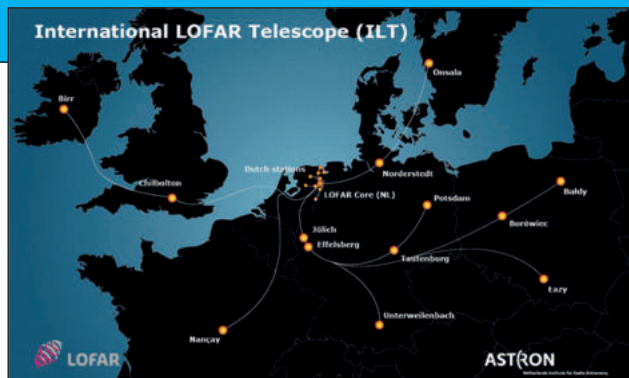
Az aktív távérzékelés a bolygóradar-csillagászatot keresztül továbbra is jelentősen hozzájárul a Naprendszer megértéséhez, a bolygóközi űrszondák küldetéseinek tervezéséhez, és különösen a földközeli aszteroidák nyomon követéséhez, jellemzéséhez, amelyek akár veszélyt is jelenthetnek az emberiségre.

A rádiófrekvenciás interferencia a mai napig nem jelentett jelentős akadályt a bolygóradar-csillagászati megfigyelésekben. Mivel a sáv szélesség-igény növekszik a NEA-k nagy térbeli felbontású képalkotása miatt, a rádiófrekvenciás interferencia (RFI – radio frequency interference) jelentős problémát okozhat a jövőben. A kis NEA-k nagy térbeli felbontású képalkotásának megkönnyítése érdekében 60–120 MHz sáv szélességű frekvencia hozzárendelésére van szükség. A NASA JPL Goldstone radar kijelölése jelenleg 200 MHz, 8,6 GHz-es középponttal. A hullámhossz széles tartományában az összes Földről történő bolygóradar-megfigyelés optimális frekvenciáját az érzékenység maximalizálásának igénye és kisebb mértékben az átviteli sáv szélesség maximalizálása jelenti. Kivételt képeznek a Vénusz megfigyelései, ahol a légkör 3 GHz-nél jóval magasabb frekvenciákon, nagy abszorpciós képességgel rendelkezik, és a Hold, ahol a hosszú hullámhossz lehetővé teszi a felszínre történő behatolást, és az érzékenység általában nem kérdés. Mivel a megfigyeléshez nagyon nagy antennák szükségesek, az optimális frekvenciát az a maximális frekvencia szabja meg, amelyen az antenna hatékonyan képes működni, ha rendelkezésre állnak olyan klystronok (speciális lineáris sugarú vákuumcsövek), amelyek képesek 250 kW és 500 kW közötti teljesítmény biztosítására.

Magyarország jelentős eredményekkel rendelkezik az élvonalbeli rádióelektronikai eszközök gyártása, fejlesztése, valamint a számítástechnikai hálózatépítés és elméleti számítástechnikai kutatások területein. A világűr a magyar K+F+I tevékenységek számára folyamatosan megnyílik. A lehetőségek kihasználása és kiterjesztése jelentős mértékben rajtunk múlik. Napjainkban olyan új rádiócsillagászatokkal kapcsolatos rendszerek kerültek telepítésre Észak- és Nyugat-Európában, mint például a LOFAR (Low Frequency ARray). Ezekhez akár két új állomás is kapcsolódhatna Magyarországon, amennyiben a készülő hazai űrstratégia és az Európai Űrgyűzőség (ESA) felkarolná és támogatná az ezekkel kapcsolatos magyar elképzeléseket és projekteket.

Az alacsony frekvenciás rádiótartományban érzékeny LOFAR rádiótávcső-hálózat központja Hollandia északi részén működik, de a teleszkópok a kontinens több országában is megtalálhatók. A jelenleg 51 állomásból álló hálózat észak-déli irányban Svédországtól Franciaországig, kelet-nyugati irányban Lengyelországtól Írorszáig terjed. Üzemeltetője a Holland Rádiócsillagászati Intézet (Netherlands Institute for Radio Astronomy, ASTRON). [30]

Zárásként álljon itt egy örömteli hír: a Nemzetközi Asztronautikai Szövetség (IAF) nem rég arról értesítette a Ma-



7. ábra. A nemzetközi LOFAR állomáshálózat [30]

gyar Asztronautikai társaságot, hogy a 2024-ben soron következő Nemzetközi Asztronautikai Kongresszus (International Astronautical Congress, IAC) rendezési jogának elnyerésére vonatkozó pályázata továbbjutott a második fordulóba. [31]

HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] *A Strategy for Active Remote Sensing Amid Increased Demand for Radio Spectrum*. Washington, D.C.: National Academies Press, 2015. <https://doi.org/10.17226/21729>;
- [2] Steven J. Ostro, "Radar Observations of Earth" *Approaching Asteroids Engineering & Science* No 2. (1997) https://echo.jpl.nasa.gov/asteroids/ostro_1997_es.pdf;
- [3] „A csillagász és a nyelvész északi expedíciója: Hell Miksa és Sajnovics János” <https://www.svabhegyicsillagvizsgalo.hu/blog-post/a-csillagasz-es-a-nyelvész-eszaki-expedicioja-hell-miksa-es-sajnovics-janos/> (Letöltve: 2021.6.20.);
- [4] Szabó József, „Magyarország és az űrkutatás.” *Hadmérnök*, 12. évfolyam, 3. sz., (2017. szeptember): pp. 295–305;
- [5] „Csillagászati egység” *Wikipédia* https://hu.wikipedia.org/wiki/Csillagászati_egység (Letöltve: 2021.6.20.);
- [6] NASA Analysis, „Earth Is Safe From Asteroid Apophis for 100-Plus Years.” NASA, 2021. 3. 26. <https://www.nasa.gov/feature/jpl/nasa-analysis-earth-is-safe-from-asteroid-apophis-for-100-plus-years>;
- [7] Farnocchia, Davide, Steven R. Chesley, Yu Takahashi, Benjamin Rozitis, David Vokrouhlický, Brian P. Rush, Nickolaos Mastrodemos, és mtsai. „Ephemeris and Hazard Assessment for Near-Earth Asteroid (101955) Bennu Based on OSIRIS-REx Data”. *Icarus* 369 (2021. november): 114594. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114594>;
- [8] Balajti István, Hajdú Ferenc, „Surprising Findings from the Hungarian Radar Developments in the Era of the Second World War.” *Radio Science Bulletin*, No. 358, (2016): pp. 82–108;
- [9] Gaspard Galati, Piet van Genderen, „Introduction to the Special Section on Some Less-Well-Known Contributions to the Development of Radar: From its Early Conception Until Just After the Second World War.” *Radio Science Bulletin*, No. 358, (2016): pp 12–17.;
- [10] Hajdú Ferenc, Sárhidai Gyula, *A Magyar Királyi Honvéd Haditechnikai Intézetől a HM Technológiai Hivatalig* Budapest: HM Technológiai Hivatal, 2005. p. 67.;
- [11] Bencze Géza et al, *A Tunguska Rt. története 1896–1996*. Aschner Lipót Alapítvány 2004. <https://mek.oszk.hu/08700/08736/08736.pdf> (Letöltve: 2021.9.13.);
- [12] BME OMIKK Tudomány és technikatörténeti archívuma – Bay Zoltán gyűjtemény;

- [13] Frey Sándor, „Holdradar ma és 75 éve.” *Csillagászat*. hu, 2021.2.6.;
- [14] Novoszát Péter, „75 éve végezte Bay Zoltán Hold radar kísérletét – a magyar űrtevékenység kezdetei és jelene.” (kézirat, várható megjelenés: *Repüléstudományi Közlemények* 2021.;
- [15] Andrew J. Butrica, *To See the Unseen: A History of Planetary Radar Astronomy - A Comprehensive History of Radar Observations of Venus, Mars, Comets, Asteroids, the Magellan Mission, Arecibo Observatory (NASA SP-4218)*. Progressive Management, 2012. <https://history.nasa.gov/SP-4218> (Letöltve: 2021.9.13.);
- [16] Forrás: https://www.nsf.gov/news/mmg/media/images/2020-11-07_12-42-16.jpg;
- [17] „Giant Arecibo radio telescope collapses in Puerto Rico.” *The Guardian*, 2020.12.1. <https://www.theguardian.com/world/2020/dec/01/arecibo-radio-telescope-collapses-puerto-rico>;
- [18] Forrás: Goldstone Deep Space Communications <https://www.gdsc.nasa.gov/index.php/antennas/> (Letöltve: 2021.6.21.);
- [19] Paulik Lotti, „A Rádiólokáció alapjai.” *Repüléstudományi Közlemények* 2007. április 20. http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2007_cikkek/paulik_lotti.pdf (Letöltve: 2021.6.24.);
- [20] Bunkóczi Sándor, Papp Tamás, „Bisztatikus passzív rádiólokáció.” <https://adoc.pub/bisztatikus-passziv-radiolokacio.html> (Letöltve: 2021.6.4.);
- [21] „Doppler effektus” *Világlexikon* http://www.vilaglex.hu/Lexikon/Html/DopEff_.htm (Letöltve: 2021.6.24.);
- [22] Timothy Ferris, *A világmindenség: Mai kozmológiai elméletek*. Budapest: Typotex Kiadó, 2006. 45. old.;
- [23] Tóth Ferenc, „A radartechnika alapjai 5. rész – Hatótávolság: néhány további kérdés.” *Magyar Elektronika* 2016. június 6. <https://www.magyar-elektronika.hu/34-tartalom/tartalom/1581-a-radartechnika-alapjai-5-resz-hatotavolsag-nehany-tovabbi-kerdes> (Letöltve: 2021.6.24.);
- [24] A. Vardy (ed.), *Codes, Curves and Signals: Common Threads in Communications*. Boston, MA: Springer US, 1998. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5121-8>;
- [25] Stokes, G. G. (1852). „On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources.” *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 9, 399.;
- [26] S. Chandrasekhar, *Radiative Transfer*. New York: Dover Publications, 1960, 25. o.;
- [27] „Stokes parameters” *Wikipedia* https://en.wikipedia.org/wiki/Stokes_parameters#cite_note-1 (Letöltve: 2021.6.24.);
- [28] Shapiro, Irwin I. „Fourth Test of General Relativity”. *Physical Review Letters* 13, sz. 26 (1964. december 28.): 789–91. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.789>;
- [29] Forrás: B. Campbell, Smithsonian és munkatársai, NRAO/AUI/NSF, Arecibo https://mk0astronynow9oh6g.kinstacdn.com/wp-content/uploads/2015/03/Radar_Venus_NRAO_940x400.jpg (Letöltve: 2021.6.24.);
- [30] Frey Sándor, „Rádiócsillagászat és műholdas navigáció.” *Úrvilág - Űrkutatási hírportál*. 2018.5.24. http://www.urvilag.hu/navigacio_es_terkepeszet/20180524_radiocsillagaszat_es_muholdas_navigacio;
- [31] A MANT pályázatunk weboldala: <https://iac2024budapestbid.mant.hu> (Letöltve: 2021.9.13.).