

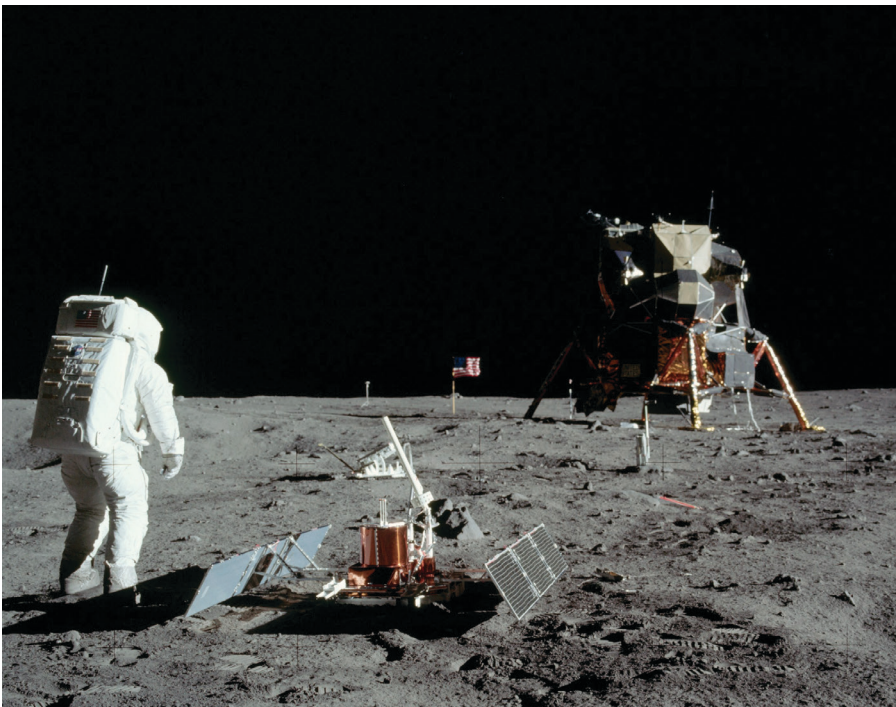
50. OBLETNICA PRISTANKA NA LUNI IN POMEN OSVAJANJA VESOLJA ZA GEODEZIJO

50TH ANNIVERSARY OF THE MOON LANDING AND THE IMPORTANCE OF CONQUERING SPACE FOR GEODESY

Sandi Berk

1 UVOD

Letos mineva petdeset let od prvega obiska človeka na edini Zemljini luni – Mesecu (v nadaljevanju kar: Luna). Ta »majhen korak za človeka, a velikanski skok za človeštvo« je bil storjen 20. julija 1969, ko sta Neil Armstrong in Edwin Aldrin v lunarnem modulu Eagle (tj. Orel) pristala poleg Malega zahodnega kraterja v Morju tišine (slika 1). Okrogla obletnica je priložnost, da se ozremo nazaj in osvežimo dogodke iz pionirskih časov osvajanja vesolja. Hkrati lahko osvetlimo pomen takratnih podvigov ter njihove učinke na tehnološki razvoj in tudi napredek geodezije.



Slika 1: Armstrongova fotografija Aldrina ob nameščnem seizmografu; nad njim je reflektor za lasersko merjenje oddaljenosti od Zemlje, desno zgoraj pa je lunarni modul Eagle (vir: NASA, 2019).

Kje se sploh prične vesolje – kako visoko je treba poleteti? Mejo med Zemljino atmosfero in vesoljskim prostorom (angl. outer space) imenujemo Kármánova ločnica in je približno sto kilometrov nad površjem Zemlje. Nad to višino za letenje ne veljajo več zakoni aerodinamike, ampak je mogoče zgolj še letenje po zakonih balistike, torej na raketni pogon. Pomembna je tudi v pravnem smislu, saj se tu konča zračni prostor držav in začne veljati mednarodno vesoljsko pravo.

Kot vemo, letijo potniška letala na višini približno deset kilometrov. Nedavni rekordni polet z jadralnim letalom je dosegel višino 23 kilometrov nad morjem, vendar s pomočjo stratosferskih zavetnih valov, ki nastajajo zaradi izredno močnih zračnih tokov med visokimi gorskimi vrhovi Andov (Ebbesen Jensen, 2019). Edino letalo, ki je prestopilo rob vesoljskega prostora, je bilo ameriško poskusno hipersonično raketno letalo North American X-15. Samo dva izmed 199 izvedenih poletov v letih 1959–1968 sta nekoliko presešla višino sto kilometrov.

Za primerjavo: tirnice (orbite) evropskih satelitov GOCE za merjenje Zemljinega težnostnega polja so na višini približno 255 kilometrov, tirnica Mednarodne vesoljske postaje (slika 5) je na višini približno 400 kilometrov, sateliti Iridium (satelitska telefonija) so na višini približno 780 kilometrov, tirnice geodetsko-geodinamičnih satelitov LAGEOS (slika 8, levo) so na višini približno 5900 kilometrov, ruski navigacijski sateliti GLONASS krožijo na višini približno 19.100 kilometrov, ameriški GPS na višini približno 20.200 kilometrov in evropski Galileo (slika 8, desno) na višini približno 23.200 kilometrov. Geostacionarni sateliti, ki krožijo okoli Zemlje na ravnini ekvatorja z obodno hitrostjo, usklajeno s hitrostjo vrtenja Zemlje, in so na nebu ves čas na istem mestu, na primer Astra 3A (satelitska televizija), sateliti EGNOS idr., so na višini približno 35.800 kilometrov nad površjem Zemlje. Povprečna oddaljenost Lune od Zemlje je 384.400 kilometrov.

2 KRONOLOGIJA OSVAJANJA VESOLJA

Francoski pisatelj Jules Verne je leta 1865 objavil preroški roman *De la Terre à la Lune*; naslov slovenskega prevoda romana je *Potovanje na Luno*. Čeprav je šlo za znanstveno fantastiko, je Verne opravil tudi nekaj grobih balističnih izračunov. Med kasnejše, prave pionirje astronautike pa sodi Herman Potočnik - Noordung, slovenski inženir in častnik v takratni avstro-ogrski mornarici. Leta 1929 je v Berlinu izdal knjigo *Das Problem der Befahrung des Weltraums* s kasnejšim (1986) slovenskim prevodom *Problem vožnje po vesolju*. V knjigi je predstavil načrte za prodor v vesolje in izgradnjo vrteče se geostacionarne vesoljske postaje z umetnim težnostnim poljem.

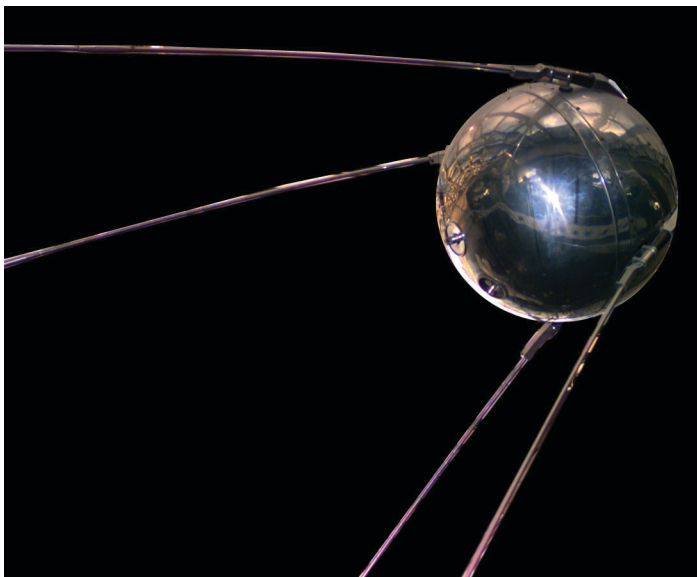
2.1 Prodor v vesoljski prostor

Čeprav so tudi Potočnikovo delo takrat nekateri ocenili za domišljijo, je Wernher von Braun, snovalec zloglasne nemške rakete Vergeltungswaffe 2 (V-2, tj. Maščevalno orožje 2), kasneje izjavil, da mu je Potočnikova knjiga služila kot učbenik (Potočnik, 1986, str. 214 – spremna beseda ur.). 20. junija 1944 je omenjena balistična raketa V-2 ob navpični izstrelitvi dosegla višino 176 kilometrov nad tlemi in postala prvo telo, ki ga je v vesolje poslal človek. Von Braun je po vojni svoje izkušnje prenesel Američanom. Z raketo V-2 so ti 20. februarja 1947 v vesolje poslali vinsko mušico; prva žival v vesolju je dosegla višino 109 kilometrov in se na Zemljo vrnila živa.

Pravi začetki osvajanja vesolja sovpadajo s koncem druge svetovne vojne in pričetkom hladne vojne med Združenimi državami Amerike (ZDA) in takratno Sovjetsko zvezo (SZ). Tako ZDA kot SZ sta se najprej lotili vesoljskih programov brez posadk. Tovrstni ameriški programi so bili Vanguard v letih 1957–1959, Pioneer (1958–1978), Explorer (od 1958), Ranger (1961–1965), Mariner (1962–1973), Lunar Orbiter (1966–1967) in Surveyor (1966–1968). Bili so predhodnica odprav s posadkami; izvajali so različne meritve, vadili so manevriranje na tirnicah okoli Zemlje in kasneje še Lune ter drugih nebesnih teles v Osončju, kartirali so površja teh teles in drugo. Sonde z odprav Surveyor (ime bi v tem primeru lahko prevedli tudi kot Lunomerec) so pristajale na Luni in pošiljale panoramske posnetke kraja pristanka (Dyer, 2009, str. 18–19). Sovjetski vesoljski program (okvirni) se je odzval s sorodnimi programi Luna v letih 1959–1976, Zond (tj. Sonda; 1964–1970) in Lunohod (1969–1979). Program Lunohod je na Luno popeljal prva daljinsko vodena raziskovalna vozila, ki so med drugim zbirala in analizirala vzorce prsti (Dyer, 2009, str. 62–63). Nekateri izmed omenjenih vesoljskih programov, na primer Pioneer, Explorer, Mariner in Zond, so se usmerili tudi proti drugim planetom in njihovim lunam, predvsem za raziskovanje drugih planetov sta bila zasnovana še ameriška programa Viking (1975) z odpravama na Mars ter Voyager (1977) z odpravama proti zunanjim planetom našega Osončja.

2.2 Prvi umetni sateliti

Pričetek prave vesoljske tekme med ZDA in SZ je zaznamoval prvi Zemljin umetni satelit Sputnik 1 (tj. Sopotnik 1 oziroma Satelit 1; slika 2), ki ga je SZ z balistično raketo SS-6 izstrelila 4. oktobra 1957. Imel je eliptično tirnico; višina satelita je nihala med 215 kilometri in 936 kilometri. Na tirnici je ostal tri mesece, njegove baterije, ki so zagotavljale radijsko povezavo, pa so se iztrošile že po treh tednih.



Slika 2: Sputnik 1, prvi Zemljin umetni satelit (vir: NASA, 2019).

Prevlada SZ je bila očitna. V novembru leta 1957 je Sputnik 2 ponesel prvo žival na tirnico okoli Zemlje – psičko Lajko (Dyer, 2009, str. 15). 13. septembra 1959 je sovjetska sonda Luna 2 padla na površje Lune in tako postala prvo telo, ki ga je nanjo poslal človek. Že v oktobru istega leta je sonda Luna 3 na Zemljo poslala prve fotografije zadnje strani Lune, ki je dotlej še ni videlo človeško oko. Luna je namreč 'gravitacijsko zaklenjena' in nam vedno kaže isto poloblo (Drake in Howe Verhovek, 2019).

Programom vesoljskih odprav brez posadk so sledili tisti s posadkami. Precej uveljavljeno je, da člane ameriških vesoljskih odprav imenujemo astronauti, člane ruskih odprav pa kozmonauti. Ameriški programi so si sledili glede na naraščajočo številčnost posadke: program Mercury v letih 1958–1963 je predvidel odprave s po enim astronautom, program Gemini (tj. Dvojčka; 1961–1966) odprave s po dvema astronautoma, na kar namiguje tudi njegovo ime, ter program Apollo (1961–1972) odprave s po tremi astronauti (Dyer, 2019, str. 16–17). Podobno so si sledili sovjetski programi Vostok (tj. Vzhod; 1961–1963), Voshod (tj. Zora; 1964–1965) ter Sojuz (tj. Zveza; od 1967).

Z odpravo Vostok 1 je 12. aprila 1961 sovjetski kozmonaut Jurij Gagarin (slika 3, levo) postal prvi človek v vesolju. Nosilna raketa R-7 je bila prvi medcelinski balistični izstrelek, prirejen za človeško posadko. Nov šok za ZDA pa je bil prvi vesoljski sprehod, ki ga je 18. marca 1965 z vesoljskega plovila Voshod 2 izvedel Aleksej Leonov (Balažic, 2019). Dokazal je, da lahko vesoljska obleka kozmonavta zaščiti tudi zunaj plovila, kar je bil pomemben korak na poti k izkrcanju človeka na Luni. Še brez človeške posadke pa je SZ 3. februarja 1966 s sondo Luna 9 prvič uspešno (mehko) pristala na Luninem površju (Dyer, 2009, str. 18–19).



Slika 3: Levo Jurij Aleksejevič Gagarin, prvi človek v vesolju (vir: ESA, 2019), in desno Neil Armstrong, prvi sprehajalec po Luni (vir: NASA, 2019).

Nato so pobudo zopet prevzele ZDA. Pred božičem leta 1968 je odprava Apollo 8 zapustila tirnico okoli Zemlje, se utirila na tirnico okoli Lune, desetkrat obkrožila Luno in se nato zopet vrnila na Zemljo. To je prva vesoljska ladja s človeško posadko, ki je zapustila tirnico okoli Zemlje (Balažic, 2019).

2.3 Prvo izkrcanje na Luni

Končno je dozorel čas za zgodovinsko odpravo Apollo 11. S Kennedyjevega vesoljskega središča v Cape Canaveralu na Floridi je 16. julija 1969 poletela nosilna raketa Saturn V (slika 4, levo). Bila je največja raketa, kar jih je bilo kdaj narejenih; merila je kar 111 metrov. Komandno-servisni modul Columbia, ki ga je upravljal Michael Collins, se je utiril na tirnico okoli Lune na višini okoli 100 kilometrov nad njenim površjem. Z lunarnega modula Eagle, ki ga je upravljal Edwin Aldrin, pa je ta 20. julija na Zemljo sporočil znameniti stavek »Orel je pristal«. Poveljnik odprave Neil Armstrong (slika 3, desno) je bil prvi človek, ki se je sprehodil po Luni. Z Aldrinom sta med postankom namestila nekaj raziskovalnih instrumentov (slika 1) in nabrala za približno 20 kilogramov vzorcev kamnin. Po nekajurnem postanku sta uspešno poletela nazaj na tirnico okoli Lune. Eagle se je združil s Columbio, s katero so nato vsi trije astronauti odleteli nazaj proti Zemlji. Komandni modul je 24. julija padel v Tihi ocean (slika 4, desno), kjer je vse tri astronaute pobral helikopter z letalonosilke Hornet. V naslednjih treh letih se je v okviru programa Apollo po Luninem površju sprehodilo še deset ljudi, po letu 1972 pa nihče več (Dyer, 2009; Balažic, 2019; Drake in Howe Verhovek, 2019; Moskowitza in sod., 2019; Zidar, 2019).

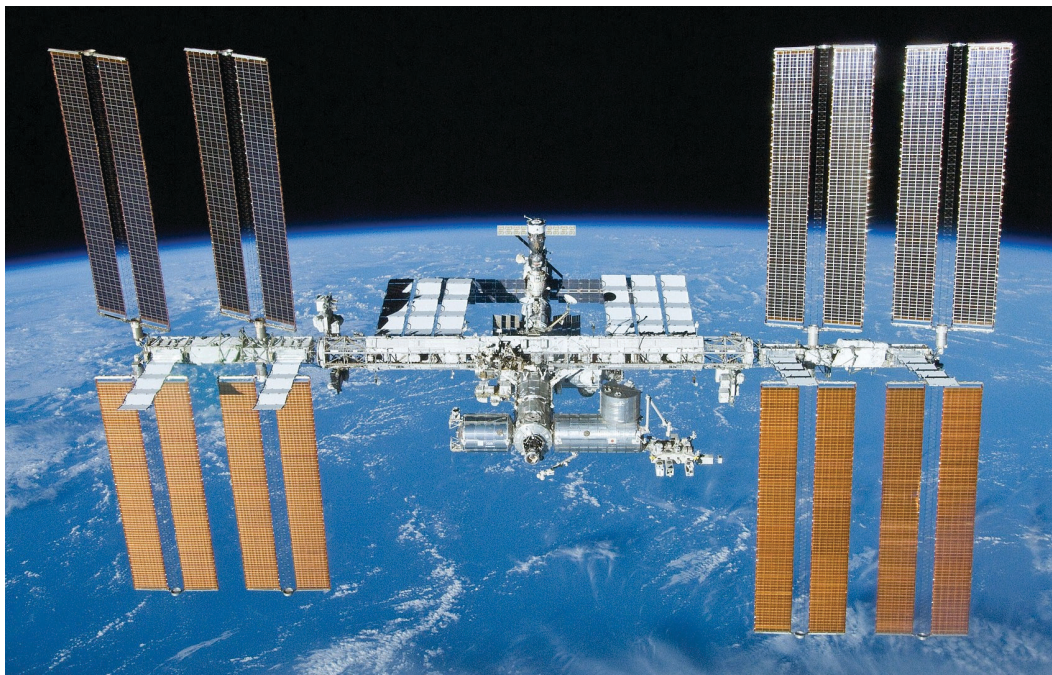


Slika 4: Pričetek in zaključek odprave Apollo 11: levo izstrelitev nosilne rakete Saturn V in desno komandni modul v Tihi oceanu po vrnitvi z Lune (vir: NASA, 2019).

Program Apollo je bil leta 1972 opuščen, med drugim zaradi visokih stroškov in prevelikih tveganj; skupaj je dotlej na odpravah v vesolje umrlo 14 astronautov in kozmonavtov (Balažic, 2019). Samo za vzletni motor lunarnega modula Apolla 11 je bila glede na predhodne preizkuse verjetnost, da bo deloval, zgolj 50-odstotna (Golia, 2017). »Houston, imamo težavo,« je nadzornemu središču na Zemlji javil tudi pilot komandnega modula Apolla 13 po eksploziji zaradi napake v električni napeljavi; posadka se je s te odprave vrnila živa bolj ali manj po čudežu (Golia, 2019).

2.4 Prve stalno obljudene vesoljske postaje in vesoljski taksiji

Sovjetski program Saljut (tj. Pozdrav) v letih 1971–1986 ter ameriški program Skylab (tj. Nebesni laboratorij) v letih 1973–1979 sta bila prva programa stalnih vesoljskih postaj s človeško posadko, krožečih na tirnicah okoli Zemlje. Z uspešno izstrelitvijo in utirjenjem prve vesoljske postaje Saljut 1 je 19. aprila 1971 SZ dobila obliž na rano zaradi izgubljene bitke za prvi pristanek na Luni.



Slika 5: Mednarodna vesoljska postaja (vir: NASA, 2019).

Leta 1986 je SZ utirila vesoljsko postajo Mir, ki je ostala na tirnici vse do leta 2001. ZDA pa so se s programom Space Shuttle v letih 1972–2011 bolj osredotočile na vesoljska plovila za večkratno uporabo. V tem času so zgradili pet raketoplanov, ki so v vesolje ponesli do osem astronautov hkrati, in sicer so to bili Columbia z odpravami v letih 1981–2003, Challenger (1983–1986), Discovery (1984–2011), Atlantis (1985–2011) in Endeavour (1992–2011). Skupaj je bilo s temi raketoplani izvedenih kar 135 odprav s 355 potniki in člani posadk (Drake in Howe Verhovek, 2019). Žal sta se dve odpravi končali tragično. Raketoplan Challenger je 28. januarja 1986 eksplodiral 73 sekund po vzletu, raketoplan Columbia pa 2. februarja 2003 ob vstopu v atmosfero, torej ko se je že vračal na Zemljo; obakrat je bilo na krovu po sedem članov posadke.

Leta 1998 je bila utirjena Mednarodna vesoljska postaja (slika 5), ki kroži okoli Zemlje s periodo poldruga ure; v ugodnih vremenskih razmerah jo je mogoče videti s prostim očesom. Gre za skupni program petih vesoljskih agencij National Aeronautics and Space Administration – NASA (ZDA), Roskozmos (Rusija), Japan Aerospace Exploration Agency – JAXA (Japonska), Canadian Space Agency – CSA (Kanada) ter European Space Agency – ESA, ki povezuje 22 evropskih držav; Slovenija je pridružena članica Evropske vesoljske agencije od leta 2010. Vesoljske postaje služijo kot vesoljski laboratoriji za znanstvene raziskave,

astronomski observatoriji in izhodiščne postaje za predvidene prihodnje odprave na Luno, Mars in druga nebesna telesa. Lastne vesoljske postaje ima v okviru programa Tiangong (tj. Nebeška palača) še Kitajska.

2.5 Prodor v medzvezdni prostor

Med nadaljnjimi mejniki pri raziskovanju vesolja velja omeniti prvi mehki pristanek na Veneri, ki je 15. decembra 1970 uspel sovjetskemu brezpilotnemu vesoljskemu plovilu Venera 7; to je prvi uspešen pristanek na drugem planetu. Slabo leto kasneje, 2. decembra 1971, je sovjetski robotski vesoljski sondi Mars 3 uspel še prvi mehki pristanek na Marsu. 14. januarja 2005 je evropska sonda Huygens, poimenošana po nizozemskem astronomu, ki je leta 1655 odkril Titan, mehko pristala na tej Saturnovi luni.

Sonda Voyager 1 je 25. avgusta 2012 (gre za izračunani najverjetnejši datum) zapustila Osončje in tako postala prvo telo, ki ga je človek poslal v medzvezdni prostor (angl. interstellar space). Predvidoma čez približno 40.000 let bo potovala mimo bližnje zvezde Gliese 445 v ozvezdju Žirafe (Moskowitz, 2013). Ta zvezda je sicer precej manjša od Sonca in ni vidna s prostim očesom.

3 UČINKI OSVAJANJA VESOLJA NA TEHNOLOŠKI RAZVOJ

Če je bilo v času vesoljske tekme med ZDA in SZ osvajanje vesolja povsem v domeni javnega sektorja, se je do danes tehnica izrazito nagnila na stran zasebnega sektorja; v zasebnih rokah je skoraj 80 odstotkov vesoljskega gospodarstva. Najpomembnejše panoge so satelitska televizija (32 %), zemeljske postaje in oprema za spremljanje in nadzor vesoljskih odprav, satelitskih sistemov in vesoljskih postaj (28 %), storitve za navigacijo, določanje položaja in točnega časa (27 %), satelitska komunikacija (7,5 %), izdelava satelitov (2,2 %), satelitski radio (1,8 %) ter storitve, povezane z opazovanjem Zemlje (1,1 %).

Večino današnjega razvoja vesoljske tehnike poganja tekmovanje med nekaj supermilijarderji, kot sta Jeff Bezos in Elon Musk. Poleg nekaterih družb, ki so zgolj razširile svojo dejavnost na področje vesoljskih tehnologij (npr. Boeing), kot gobe po dežju rastejo nove zasebne družbe: ameriške Blue Origin, ustanovljena leta 2000, SpaceX (2002), Rocket Lab (2006), Virgin Galactic (2010), Moon Express (2010), pa tudi izraelska SpaceIL (2011), indijska TeamIndus (2011) in druge. Te družbe se ukvarjajo z razvojem in izdelavo satelitov in vesoljskih plovil, izstreljevanjem umetnih satelitov na tirnice okoli Zemlje in Lune, vesoljskim turizmom, snovanjem odprav na Luno in Mars, kjer nameravajo vzpostaviti tudi stalne postojanke, katerih cilji niso zgolj znanstvene narave; nekateri že svarijo, da gre za priprave na kolonizacijo vesolja (Drake in Howe Verhovek, 2019; Kluger, 2019; Moskowitz in sod., 2019).

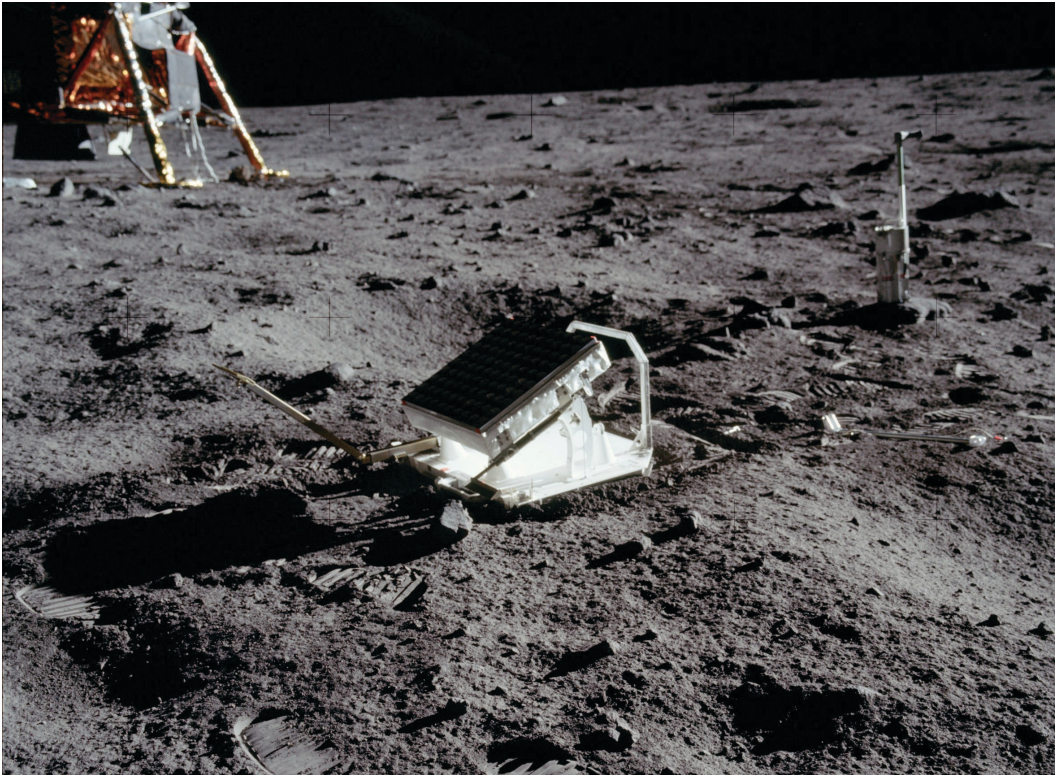
Posledica pospešenega razvoja vesoljskega gospodarstva v zadnjih letih je tudi vse večje število satelitov, ki na različnih višinah krožijo okoli Zemlje. Vse več je predvsem malih (nano)satelitov, ki krožijo na nizkih tirnicah. Veliko število takšnih satelitov bo potrebnih na primer za zagotovitev hitrega in zmogljivega satelitskega interneta; geostacionarni sateliti namreč zaradi velike oddaljenosti povzročajo prevelike zakasnitve signala. Podjetje OneWeb, ki gradi sistem kakšnih šeststotih satelitov na tirnicah na višini okoli 1200 kilometrov nad površjem Zemlje, napoveduje, da bo njihov satelitski internet deloval že letos. Podobne sisteme pa gradi še nekaj konkurentov, med njimi tudi Facebook (Huš, 2019).

Ocenjujejo, da danes okoli Zemlje kroži že približno 5000 satelitov, od tega približno 2000 delujočih, in približno 34.000 kosov vesoljskih smeti, večjih od desetih centimetrov, ki so posledica neuspešnih utiranj

satelitov, vesoljskih nesreč, pa tudi prvih trkov satelitov. Zato postaja vse pomembnejša dejavnost tudi vesoljska ekologija. Velik pomen dobiva katalogiziranje vesoljskih objektov, mednarodno usklajevanje pri njihovem utirjanju in njihova nadzorovana upokojitev (Pavlovčič Prešeren in sod., 2015; Huš, 2019).

4 POMEN OSVAJANJA VESOLJA ZA GEODEZIJO

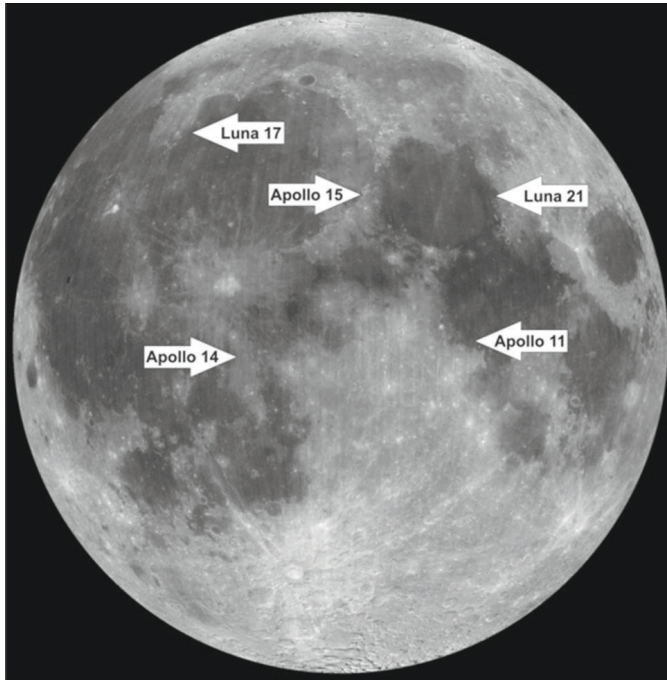
Že ob prvem postanku na Luni sta Armstrong in Aldrin na njenem površju med drugim namestila seizmograf (slika 1) za merjenje moči in gostote lunarnih potresov (angl. moonquakes) in optično zrcalo/reflektor za lasersko merjenje oddaljenosti od Zemlje (slika 6). Takšni reflektorji (angl. laser ranging retro-reflectors) so bili kasneje nameščeni še na odpravah Apollo 14 in 15 ter sovjetskih brezpilotnih odpravah Luna 17 in 21 (slika 7); obe sovjetski odpravi sta imeli reflektorje nameščene na že omenjenih vozilih programa Lunohod.



Slika 6: Reflektor na Luni za lasersko merjenje razdalj Zemlja–Luna, postavljen ob prvem pristanku človeka na Luni (vir: NASA, 2019).

Lasersko merjenje razdalj do Lune (angl. Lunar Laser Ranging – LLR) je doseglo že milimetrsko natančnost. Postalo je ena ključnih geodetskih tehnik za raziskave v planetarni fiziki, potrjevanje Einsteinove splošne teorije relativnosti, določanje natančnih tirnic Lune, proučevanje zgradbe in dogajanja v notranjosti Lune, določanje parametrov orientacije Zemlje in vzpostavljanje referenčnih koordinatnih sistemov na Zemlji (Murphy, 2013). Po petdesetih letih merjenj razdalj do Lune je bilo med drugim ugotovljeno, da se njena povprečna oddaljenost od Zemlje povečuje za 3,8 centimetra na leto (Penry, 2019).

Lasersko merjenje razdalj do Lune je skupaj z laserskim merjenjem razdalj do (umetnih) satelitov (angl. Satellite Laser Ranging – SLR), doplerskim in radijskim določanjem tirnic satelitov (angl. Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite – DORIS) ter seveda sistemi globalne satelitske navigacije (angl. Global Navigation Satellite System – GNSS) postalo temelj sodobne satelitske geodezije. Pri GNSS so oddajniki na satelitih in sprejemniki na Zemlji, pri DORIS pa je ravno nasprotno. Skupaj s še drugimi sodobnimi vesoljskimi tehnikami, kot je dolgobazna interferometrija (angl. Very Long Baseline Interferometry – VLBI), so te merilne tehnike v temeljih spremenile geodezijo kot znanost.

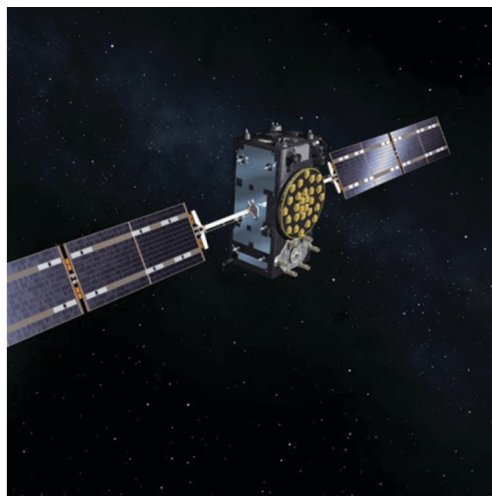
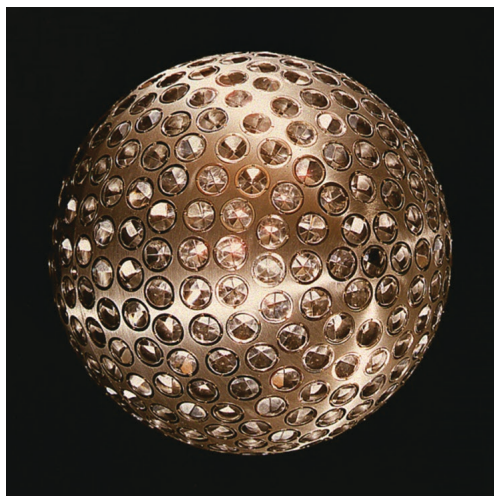


Slika 7: Lokacije reflektorjev za lasersko merjenje razdalj do Lune na krajih pristankov ameriških odprav Apollo 11, 14 in 15 ter ruskih odprav Luna 17 in 21 (vir: IIRS, 2019).

Satelitski sistemi za merilne tehnike SLR so že v uvodu omenjeni ameriški Laser Geodynamics Satellites – LAGEOS 1 (slika 8, levo), izstreljen leta 1976, in njegov dvojnik LAGEOS 2 (1992), japonski Experimental Geodetic Payload – EGP (1986), ruska Etalon 1 in Etalon 2 (oba 1989), ruski Ball Lens In The Space – BLITS (2009), italijanski Laser Relativity Satellite – LARES (2012) in drugi. Tudi novejši GNSS-sateliti so že opremljeni z reflektorji za lasersko merjenje njihove oddaljenosti. Tehnike SLR so pomembne za določanje globalnih geodetskih parametrov, določanje tirnic satelitov, potrjevanje fizikalnih teorij ter seveda pri vzpostavljanju mednarodnih terestričnih referenčnih sestavov (angl. International Terrestrial Reference Frame – ITRF). K vzpostavitvi ITRF2014 so prispevali zgolj sateliti LAGEOS 1 in 2 ter Etalon 1 in 2, vendar pa bi bilo glede na rezultate nedavne študije primerno vključiti tudi SLR-opazovanja proti GNSS-satelitom (Sošnica in sod., 2019).

Satelitski sistemi z vgrajenimi sprejemniki DORIS so francoski Satellite Pour l'Observation de la Terre – SPOT 1–7, izstreljeni v letih 1986 do 2014, ameriško-francoski TOPEX/Poseidon (1992) in sateliti Jason 1–3 (2001, 2008, 2016), evropski CryoSat 2 (2010) in drugi; vsi ti sistemi so sicer primarno namenjeni različnim tehnikam opazovanja Zemlje. K vzpostavitvi ITRF2014 so prispevali vsi sateliti, ki imajo vgrajene DORIS-sprejemnike (Altamimi in sod., 2016).

Najbolj poznani tudi širši javnosti pa so sistemi globalne satelitske navigacije – GNSS. Prvi je bil ameriški Global Positioning System – GPS, ki so ga v okviru programa NAVSTAR GPS pričeli vzpostavljati že leta 1978, polno konstelacijo pa je dosegel leta 1993. Trenutno ima 31 delujočih satelitov. Sledil mu je sovjetski GLObal'naja NAVigacionnaja Sputnikovaja Sistema – GLONASS s prvimi sateliti leta 1982, trenutno pa jih deluje 24. Kitajski BeiDou Navigation Satellite System – BDS, za katerega je v rabi tudi prevedeno ime Kompas, so pričeli vzpostavljati leta 2000, trenutno pa ima 33 satelitov. Evropski Galileo, ki je poimenovan po italijanskem astronomu Galileu Galileiju, je dobil prvi testni satelit leta 2005, sistem pa je operativen od leta 2016; trenutna konstelacija ima 22 delujočih satelitov (slika 8, desno). Pri vzpostavitvi ITRF2014 so bila uporabljena samo opazovanja z GPS- in GLONASS-satelitov (Altamimi in sod., 2016).



Slika 8: Levo satelit LAGEOS 1 (vir: NASA) in desno satelit iz serije Galileo FOC (vir: ESA).

Poleg sistemov globalne poznamo tudi sisteme regionalne satelitske navigacije (angl. Regional Navigation Satellite System – RNSS). Najbolj znana sta indijski NAVigation with Indian Constellation – NAVIC s sedmimi geostacionarnimi sateliti ter japonski Quasi-Zenith Satellite System – QZSS z enim geostacionarnim in tremi sateliti z geosinhronimi tirnicami; za slednje velja, da se satelit vsakih 24 ur vrne na isto mesto na nebu, kjer sicer opisuje pot v obliki osmice.

Med satelitskimi sistemi za izboljšanje absolutnega določanja položaja z GNSS (angl. Satellite-Based Augmentation System – SBAS) je v Evropi na voljo European Geostationary Navigation Overlay Service – EGNOS s tremi geostacionarnimi sateliti, ki trenutno zagotavlja podmetrsko točnost s 95-odstotnim zaupanjem. Podobni sistemi so še WAAS za območje ZDA, MSAS za Japonsko in CAGAN za Indijo.



Slika 9: Geodetski observatorij Wettzell: laserski teleskop (kupola levo) za merjenje razdalj do Lune in umetnih satelitov (LLR/SLR), radijski teleskop (zgoraj desno) za dolgobazno interferometrijo (VLBI) ter (v ospredju) GNSS-antena (vir: Schlüter in sod., 2007).

Najpomembnejši del infrastrukture današnje vesoljske geodezije (angl. space geodesy) na Zemlji so geodetski observatoriji, ki na isti lokaciji združujejo zgoraj omenjene komplementarne geodetske merilne tehnike in tvorijo tako imenovane kolokacijske VLBI-, LLR/SLR-, DORIS- in GNSS-točke. Nam najbližji takšen geodetski observatorij je Wettzell v Nemčiji (slika 9; Schlüter in sod., 2007), podobni pa so še v Materi (Italija), Greenbeltu (ZDA), Šanghaju (Kitajska), Hartebeesthoeku (Južna Afrika), Concepciónu (Čile) in Yarragadeeju (Avstralija).

Sistemi za določanje položaja z navezavo na zemeljske GNSS-postaje (angl. Ground-Based Augmentation System – GBAS) so vzpostavljeni v obliki javnih in zasebnih državnih in regionalnih omrežij stalno delujočih referenčnih GNSS-postaj (angl. Continuously Operating Reference Stations – CORS), ki z ustreznim GNSS-sprejemnikom (roverjem) na delovišču zagotavljajo določitev položaja z nekajcentimetrsko točnostjo v realnem času. V Sloveniji je takšno državno omrežje SIGNAL (iz SlovenIja-Geodezija -NAvigacija-Lokacija), ki je operativno od leta 2007, pa tudi nekatera zasebna omrežja.

5 SKLEP

Pol stoletja je minilo od dogodka, ki je nekakšen simbol človekovega pustolovskega in raziskovalnega duha. Sprožil je nesluteno znanstveno in tehnološko revolucijo. Vesoljske tehnologije danes uporabljamo pri najbolj vsakdanjih opravilih, od spremljanja satelitskih TV-programov do izogibanja prometnim zamaškom s pomočjo avtomobilske navigacije ali pametnega telefona in ne nazadnje pri določanju meje s sosedovo parcelo.

Prodor človeka v vesolje je prinesel korenite spremembe v geodezijo kot znanost. Že ob prvem pristanku na Luni so bili nanjo nameščeni tudi geodetski instrumenti za merjenje njene oddaljenosti od Zemlje in s tem njene tirnice, pa tudi njene oblike in velikosti, njenega težnostnega polja in magnetizma; geodezija

je dobila sestrsko vedo – selenodezijo (Selena je grška boginja Lune). Vzpostavitev globalnih referenčnih koordinatnih sistemov in na njih temelječih realizacij državnih koordinatnih sistemov danes temelji na vesoljski geodeziji, a tudi zemljemerstva, na primer v zemljiškem katastru, si ne moremo več predstavljati brez satelitskih tehnologij.

Žal se v jubilejnem letu ni izšlo z načrtovano utiritvijo prvih slovenskih nanosatelitov (Senica, 2019). V uteho pa imamo prvi satelit s slovenskim imenom. Satelit Galileo FOC FM19 (kot na sliki 8, desno), ki je bil izstreljen 25. julija 2018, nosi ime Tara – po zmagovalki likovnega natečaja Galileo v Sloveniji (Zajc, 2018).

Literatura in viri:

- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Modeling Nonlinear Station Motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121 (8), 6109–6131. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>
- Balažič, M. (2019). 50 let od prvega pristanka človeka na Luni. *Spika*, 27 (7–8), 302–306.
- Drake, N., Howe Verhovek, S. (2019). Na Luno in naprej (reportaža). *National Geographic (slovenska izdaja)*, 14 (7), 24–73.
- Dyer, A. (2009). Misija na Luno (prevod dela: Mission to the Moon). Ljubljana: Tehniška založba Slovenije.
- Ebbesen Jensen, A. (2019). Z jadrlnim padalom do roba vesolja. *Science Illustrated (slovenska izdaja)*, 25. september 2019, 119, 62–65.
- ESA (2019). Images. European Space Agency, https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/, pridobljeno 20. 11. 2019.
- Golia, N. N. (2017). Trenutek zmagoslavja se je dobesedno zataknil. *Radar*, december 2017, 471, 20–33.
- Golia, N. N. (2019). Na pragu katastrofe. *Radar*, oktober 2019, 493, 32–47.
- Huš, M. (2019). Vse debelejša odeja satelitov. *Monitor (spletna izdaja)*, 26. februar 2019, <https://www.monitor.si/clanek/vse-debelejsa-odeja-satelitov/189749/>, pridobljeno 20. 11. 2019.
- ILRS (2019). Lunar Laser Ranging – LLR. International Laser Ranging Service, <https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/science/scienceContributions/lunar.html>, pridobljeno 20. 11. 2019.
- Kluger, J. (2019). Inside the New Race to the Moon. *Time*, 29. julij 2019, 194 (4), 16–28.
- Moskowitz, C. (2013). Voyager 1 Finally Leaves Solar System – for Real This Time. *Scientific American (spletna izdaja)*, 12. september 2013, <https://www.scientificamerican.com/article/voyager-1-leaves-solar-system/>, pridobljeno 20. 11. 2019.
- Moskowitz, C., Bell, E., Mann, A., Reset, S., Lock, S. J., Stewart, S. T., Jawin, E. (2019). 50th Anniversary of Apollo 11 (Special Report). *Scientific American*, julij 2019, 321 (1), 48–75.
- Murphy, T. W. (2013). Lunar Laser Ranging: The Millimeter Challenge. *Reports on Progress in Physics*, 76 (7), 076901, 21 str. DOI: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/76/7/076901>
- NASA (2019). Apollo 11 Image Library, National Aeronautics and Space Administration, <https://history.nasa.gov/alsj/a11/images11.html>, pridobljeno 20. 11. 2019.
- Pavlovčič Prešeren, P., Harej, H., Kuhar, M. (2015). Ponesrečena izstrelitev satelitov Galileo in vesoljski odpadki. *Geodetski vestnik*, 59 (3), 473–485. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2015.03.473-485>
- Penry, J. (2019). Shoot the Moon. *The American Surveyor*, 16 (4), 6 str., https://archive.amerisurv.com/PDF/TheAmericanSurveyor_Penry-ShootTheMoon_April2019.pdf, pridobljeno 20. 11. 2019.
- Potočnik, H., Sitar, S. (ur.) (1986). Problem vožnje po vesolju (prevod dela: Das Problem der Befahrung des Weltraums). Ljubljana: Slovenska matica.
- Schlüter, W., Brandl, N., Dassing, R., Hase, H., Klügel, T., Kilger, R., Lauber, P., Neidhardt, A., Plötz, C., Riepl, S., Schreiber, U. (2007). Fundamentalstation Wettzell – ein geodätisches Observatorium. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 132 (3), 158–167.
- Senica, S. (2019). Slovenski sateliti letos se ne bodo leteli. Delo (spletna izdaja), 24. september 2019, <https://www.delo.si/novice/znanotech/slovenski-sateliti-letos-se-ne-bodo-leteli-231051.html>, pridobljeno 20. 11. 2019.
- Sošnica, K., Bury, G., Zajdel, R., Strugarek, D., Drożdżewski, M., Kazmierski, K. (2019). Estimating Global Geodetic Parameters Using SLR Observations to Galileo, GLONASS, BeiDou, GPS, and QZSS. *Earth, Planets and Space*, 71 (20), 11 str. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1000-3>
- Zajc, S. (2018). Izstrelili Ariane 5 s slovenskim navigacijskim satelitom Galileo. *Vesolje.net*, <https://vesolje.net/navtika/novice/2018/07/25072018.htm>, pridobljeno 20. 11. 2019.
- Zidar, P. (2019). 50 let od pristanka na Luni. *Življenje in tehnika*, 70 (7–8), 14–15.

Sandi Berk, univ. dipl. inž. geod.
 Geodetska uprava Republike Slovenije
 Zemljemerska ulica 12, SI-1000 Ljubljana
 e-naslov: sandi.berk@gov.si