

PONESREČENA IZSTRELITEV SATELITOV GALILEO IN VESOLJSKI ODPADKI

RECENT GALILEO LAUNCH FAILURE IN THE LIGHT OF SPACE DEBRIS

Polona Pavlovčič Prešeren, Helena Harej, Miran Kuhar

UDK:
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.04
Prispelo: 3. 7. 2015
Sprejeto: 1. 9. 2015

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2015.03.473-485
PROFESSIONAL ARTICLE
Received: 3. 7. 2015
Accepted: 1. 9. 2015

IZVLEČEK

V prispevku predstavimo problematiko vse večjega onesnaževanja vesoljskega prostora z objekti, ki smo jih poslali v vesolje po letu 1957. Za delujoče objekte opišemo, kako se njihove tirnice predstavijo z dvovrstičnimi Keplerjevimi elementi elipse tira, ki jih vsak dan podajajo službe za spremljanje delujočih objektov v vesolju. Četudi je točnost določitve položaja objektov velikostnega reda kilometer ali več, so ti podatki pomembna podlaga za spremljanje dinamike aktivnih objektov v vesolju. Bolj problematični so objekti, ki se gibljejo nenadzorovano in jih imenujemo vesoljski odpadki. Predstavimo zgodovino dogodkov, povezanih z onesnaževanjem vesolja. Sklenemo s pomembnim dogodkom v letu 2014, ki je povezan z globalnimi navigacijskimi satelitskimi sistemi, in sicer z neuspešnim poskusom umestitve dveh satelitov Galileo v zeleni tirnici. Kljub spodletelemu poskusu je znanstvenikom v nadzornem centru Galileo s sodobno krmilno opremo in veliko truda uspelo tirnici satelitov popraviti, tako da ju ne uvrščamo med vesoljske odpadke, ki zaradi možnosti trka ogrožajo druge delujoče objekte.

ABSTRACT

In this paper, we present the problem of the increasing pollution of space with the objects that have been sent into space from 1957 onwards. For operating facilities, we describe the use of the two-line Keplerian elements (TLE) for the presentation of objects' orbits, provided by monitoring services on a daily basis. Although the accuracy of the object position determination is in a range of a few kilometres, the obtained data represent an important basis for monitoring of the dynamics of active structures. More problematic are the facilities of uncontrolled moving objects through space, known as "space debris". We present the history of events linked to space pollution and describe some examples of major pollution events. We conclude with the important developments in space in 2014 for the global satellite navigation system and its failure in the mission of two Galileo satellites. Despite their inability to reach the correct orbit, these satellites are not treated as space debris. The modern control equipment and the effort of control centre scientists managed to achieve the correction of the satellites' orbit and add two objects as active in the TLE catalogue.

KLJUČNE BESEDE

satelit Galileo, tirnica, vesoljski odpadki, Keplerjev element

KEY WORDS

Galileo satellite, orbit, space debris, TLE Keplerian elements

1 UVOD

Evropska vesoljska agencija ESA (angl. European Space Agency) je 22. avgusta 2014 z izstrelišča v mestecu Kourou v Francoski Gvajani z rusko nosilno raketo Sojuz-2 poskušala umestiti prva operativna satelita navigacijskega sistema Galileo, to je šesti satelit GSAT0201 z imenom Doresa in sedmi satelit GSAT0202 z imenom Milena (*poimenovana sta po otrocih iz držav Evropske unije, ki so bili izbrani na likovnem natečaju. Satelit GSAT0219, ki naj bi ga v vesolje izstrelili po letu 2016, ima ime po slovenski deklici Tari*). Izstrelitev je sicer uspela, vendar sta satelita zaradi mehanskih težav na izstrelitvenem modulu raketne zgornje stopnje Fregat pristala v napačni tirnici (ESA, URL1). Zaradi želje, da ne bi pristala med vesoljskimi odpadki, so konec decembra 2014 toliko popravili tirnico satelita GSAT0201, da lahko oddaja navigacijski signal. Letos so začeli uravnavanje tirnice satelita GSAT0202. Za zdaj kaže, da satelitov ne bodo mogli umestiti v želeni tirnici, ampak ju bodo izkoristili kot podporo pri delovanju novih satelitov Galileo.

Vsi v vesolje izstreljeni objekti tam tudi ostanejo, četudi se ne uporabljajo več. Vesoljski odpadki, znani tudi kot orbitalne razbitine, vesoljske razbitine ali vesoljske smeti, se v vesolju kopičijo vse od 4. oktobra 1957, ko je bil izstreljen ruski satelit Sputnik 1. To so deli odsluženih vesoljskih raket, raketne stopnje in nefunkcionalni sateliti oziroma njihovi deli, ki so odpadli zaradi trkov, eksplozij in erozije. Tirnice nedelujočih objektov se nenadzorovano spreminjajo in prekrivajo tirnice delujočih objektov, zaradi česar obstaja nevarnost trkov z delujočimi vesoljskimi objekti in plovili. Po ocenah je v vesolju kakih deset milijonov delcev, manjših od centimetra. Vesoljski odpadki ovirajo nadaljnje vesoljske odprave in lahko ogrozijo tudi življenje na Zemlji.

2 OPAZOVANJE VESOLJA IN KATALOGIZIRANJE VESOLJSKIH OBJEKTOV

Z opazovanjem, odkrivanjem ter nadzorom vesolja se ukvarja vse več organizacij, agencij in družb po svetu. Financerji in podporniki nacionalnih vesoljskih agencij in drugih organizacij, ki se ukvarjajo z raziskovanjem vesolja, so večinoma državotvorne strukture (ministrstva). V zadnjem času so k projektu pristopila podjetja in bogati posamezniki, ki izvajajo ali načrtujejo polete v vesolje. Različne organizacije so vzpostavile kataloge za vesoljske objekte, ki jih redno vzdržujejo. V okviru Združenih narodov obstaja register izstreljenih objektov (angl. UN Register of Objects Launched into Outer Space), ki ga upravlja urad Združenih narodov za vesoljske zadeve UNOOSA (angl. UN Office for Outer Space Affairs; Aker, 2013). Najbolj popolni so ameriški katalogi NORAD in USSPACECOM ter katalog agencije ESA, imenovan DISCOS.

USSPACECOM (angl. United States Space Command) deluje pod okriljem ameriškega ministrstva za obrambo. Organizacija je bila ustanovljena leta 1985 kot podpora oboroženim silam ZDA pri institucionalizaciji uporabe vesolja in ima sedež v bazi zračnih sil Peterson v bližini Colorada Springsa. Tu ima sedež tudi mnogo starejše združenje organizacij za vesoljsko varnost in zaščito NORAD (angl. North American Aerospace Defense Command).

Vzdrževanje kataloga sloni na omrežju senzorjev za vesoljski nadzor SSN (angl. United States Space Surveillance Network). To je omrežje elektro-optičnih in radarskih senzorjev za odkrivanje, sledenje in identifikacijo objektov, ki krožijo okoli Zemlje. Podatke beležijo v katalogu vesoljskih objektov (angl. Space Object Catalog) in podatkovni bazi agencije ESA DISCOS (angl. Database and Information System

Characterizing Objects in Space; USSSN, 2015). Približno 16.000 evidentiranih vesoljskih objektov delimo na več kategorij (Osiander in Ostdiek, 2009):

- operativni sateliti oziroma sonde: 7 %;
- odsluženi sateliti: 22 %;
- različni delci: 41 %;
- deli raket: 17 %;
- deli tekočih in odsluženih satelitskih misij: 13 %.

NORAD vse od leta 1957 vodi bazo podatkov o raketah in objektih, ki so kadarkoli dosegli tirnico. Vanjo poleg podatkov o satelitih zapisujejo tudi podatke o aerodinamičnih ščitih, ki so zagotavljali zaščito satelitom na poti do zelene tirnice. V preteklosti so hranili tudi podatke o dinamih za rakete, ki so jih izstrelili skupaj z raketami in so se od raket na neki točki ločili.

Zapis podatkov o objektih v katalogu NORAD ima enotno obliko dvovrstičnih zapisov parametrov za izračun tirnice, in sicer format (NASA)-2-LINE (angl. National Aeronautics and Space Administration; Capderou, 2005). Danes je format znan kot TLE (angl. Two Line Elements). Pravzaprav je to dvovrstični zapis Keplerjevih elementov tirnice objekta. Keplerjevi elementi elipse tira so eden od načinov za enolično določitev tirnice objekta v polju gravitacijske sile (Vallado, 2001; Bate idr., 1971).

AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA

```
1 NNNNNU NNNNNAAA NNNNN.NNNNNNNNN +.NNNNNNNNN +NNNNN-N +NNNNN-N N NNNNN
2 NNNNN NNN.NNNN NNN.NNNN NNNNNNNN NNN.NNNN NNN.NNNN NN.NNNNNNNNNNNNNNN
```

Slika 1: Osnovna oblika zapisa dvovrstičnih elementov TLE.

Na sliki 1 predstavljamo ključ za uporabo podatkov dvovrstičnih elementov, pri čemer je A črka in N številka. V vrstici 0 (naslovu) je 24 znakov namenjenih za določitev imena satelita. Sledijo numerične vrednosti parametrov v metrični enoti, ki opisujejo velikost predmeta v obliki krogle (premer), valja (premer in dolžina) oziroma kvadra (dolžina, širina in višina). V prvi in drugi vrstici je standardni format zapisa elementov tirnice (dvovrstični elementi), pri čemer vsaka vsebuje natanko 69 znakov. Na sliki 2 podajamo opis dvovrstičnih elementov na primeru satelita Galileo FM4 GSAT0104 (PRN E20).

```
[NORAD 2-Line Element Set Format] =====
1 38858U 12055B 15116.68797856 -.00000036 00000-0 00000 0 0 9994
2 38858 55.0026 213.7474 0002783 212.4254 147.5749 1.70473750 15737
=====
```

Slika 2: Primer dvovrstičnega zapisa elementov tirnice.

V preglednicah 1 in 2 predstavljamo podrobne opise posameznih elementov zapisa formata TLE. Zaradi velikega števila satelitov so dvovrstične elemente razvrstili v skupine za meteorološke, navigacijske (posebej GPS, GALILEO, GLONASS, BeiDou) in komunikacijske satelite (tudi ti se delijo v podskupine) ter satelite za daljinsko zaznavanje. Seznam je na spletni strani <http://celestrak.com>.

Preglednica 1: Prva vrstica formata zapisa TLE

Stolpec	Opis podatka	
1	številka vrstice	
03-07	38858	registracijska številka satelita
08	U	javni satelit U (angl. unclassified) ali zaupni satelit C (angl. classified)
10-11	12	mednarodna oznaka (zadnji dve števki leta izstrelitve)
12-14	05	mednarodna oznaka (zaporedna številka izstrelitve v letu)
15-17	B	mednarodna oznaka (podatki o zaporednem delu izstrelitve)*
19-20	15	mednarodna oznaka (zadnji dve števki leta izstrelitve)
21-32	116.68797856	trenutek oziroma zaporedni dan v letu z delom dneva
34-43	-0.00000036	prvi odvod po času povprečne kotne hitrosti (balistični parameter)
45-52	00000-0	drugi odvod po času povprečne kotne hitrosti, deljen s 6 (parameter, povezan s pospeševanjem)
54-61	00000 0	koeficient BSTAR za uporabo v povezavi z modelom motenj SG-4, sicer koeficient pritiska Sončevega sevanja (predpostavljena decimalna pika)
63	0	tip efemerid
65-68	999	zaporedno število nabora podatkov
69	4	kontrolna vsota (modul 10)

* *B pomeni, da je bil satelit drugi po vrsti pri tej izstrelitvi (nosilna raketa je takrat utirila tudi satelit Galileo GSAT0103 (PRN E19), ki ima oznako A.*

Preglednica 2: Druga vrstica formata zapisa TLE

Stolpec	Opis podatka	
1	številka vrstice	
03-07	38858	registracijska številka satelita
09-16	55.0026	inklinacija tirnice i [°]
18-25	213.7474	rektascenzija dviznega vozla Ω [°]
27-33	0002783	ekscentriciteta tirnice e (decimalna pika spredaj)
35-42	212.4254	argument perigeja ω [°]
44-51	147.5749	srednja anomalija M [°]
53-63	1.70473750	povprečna kotna hitrost (krožna frekvenca) n v obhodih na dan (število tirnic v enem dnevu; angl. mean motion)
64-68	1573	število obhodov od izstrelitve do obravnavanega trenutka
69	7	kontrolna vsota (modul 10)

Kljub imenu format TLE pravzaprav sestavljajo tri vrstice podatkov. Vsebina prve, ki se označuje kot vrstica 0, vsebuje neuradno ime satelita. Temu sledijo podatki, ki opisujejo velikost satelita in jih ne uporabljamo pri računanju tirnice ter opredelitvi objekta na tirnici. Zanimivo je, da format NASA-2-LINE ne vsebuje velike polosi ellipse a , saj imajo objekti na tirnicah z enako polosjo enake obhodne čase, ne glede na njihovo ekscentričnost (tretji Keplerjev zakon). Namesto tega podajajo anomalijo frekvence

tirnice, to je število obhodov v enem dnevu, štetih od perigeja do naslednjega perigeja. Razlog za to je dejstvo, da je ob upoštevanju zunanjih vplivov na gibanje satelitov povezava med veliko polosjo elipse tira in frekvenco tirnice veliko bolj zapletena od preprostega tretjega Keplerjevega zakona v problemu dveh teles (Vidmar, 1996).

Postopek računanja ostalih Keplerjevih elementov je nazorno prikazan v Capderou (2005, str. 254–258). Za izračun lahko uporabimo tudi program Ixion istega avtorja, ki ga dobimo na spletni strani: <http://climserv.ipsl.polytechnique.fr/ixion.html>, kjer lahko pridobimo tudi pomembne podatke o satelitih ali sondah. Položaj objektov na tirnici lahko z dvovrstičnimi elementi določimo bolj natančno, če v izračun vključimo poenostavljene modele zunanjih vplivov na gibanje satelitov (Vallado in Crawford, 2008). Pri teh se dodatno upoštevajo vplivi zaradi neenakomerne razporeditve gostote Zemljinih mas, atmosferskega pritiska, Sončevega sevanja in gravitacijskih vplivov drugih nebesnih teles.

3 VESOLJSKI ODPADKI

Vesoljske odpadke delimo glede na velikost, ki so jo sposobni zaznati instrumenti za opazovanje objektov v vesolju. Med velike odpadke uvrščamo neuporabne objekte s premerom 10 centimetrov ter maso enega kilograma ali več. Med manjše štejemo objekte, manjše od 10 centimetrov, čeprav naj bi imeli majhni objekti velikost enega centimetra ali manj. Velja poudariti, da zaradi omejitev instrumentov za sledenje ne moremo strogo opredeliti ločnice med velikimi in majhnimi odpadki. Trenutno sledijo približno 22.000 delcem, ki so večji od petih centimetrov, in 300.000 delcem, ki so manjši od enega centimetra in so na višinah do 2.000 kilometrov (NASA, 2015). Vesoljske odprave se morajo odpadkom izogniti, zato je njihovo načrtovanje čedalje bolj zahtevno. Za zdaj se vesoljska plovila lahko izogibajo velikim odpadkom samo tako, da spreminjajo smer leta. Ocenjujejo, da se je v vesolju nakopičilo več kot 5.500 ton razbitin, ki so posledica več kot 50-letnega nekontroliranega in nepremišljenega pošiljanja objektov v vesolje. Takšno ravnanje z vesoljskim prostorom je neodgovorno, saj se kopičenje odpadkov vsako leto poveča za 5 %. V vesolju smo skoraj že dosegli kritično gostoto objektov in ti se kopičijo hitreje, kot jih lahko odstranijo naravne sile. Znano je, da nekateri objekti v atmosferi zgorijo, vendar se pri veliki količini odpadkov na to ne moremo zanašati. Med morebitnimi trki lahko iz uničenih delov vesoljskih plovil nastanejo novi odpadki, s čimer se še poveča tveganje za nadaljnje trke. Obstaja možnost pojava Kesslerjevega sindroma, ko gostota objektov doseže kritično vrednost in povzroči verižno reakcijo trkov med objekti (Osiander in Ostdiek, 2009).

Pri spremljanju vesoljskih odpadkov so ugotovili, da je večina njihove mase zbrana v težkih odpadkih (en kilogram ali več), čeprav so majhni odpadki številčnejši (Kessler, 1991). Veliki odpadki pomenijo nevarnost za uničenje kateregakoli velikega vesoljskega plovila. Študije so pokazale, da lahko objekti z maso enega kilograma ali več in s hitrostjo 10 km/s povzročijo uničenje tisoč kilogramov težkega vesoljskega plovila. Vesoljske odpadke in njihov vpliv lahko razvrstimo v tri kategorije, in sicer (Kessler, 1991):

- v prvo spadajo odpadki z dovolj nizko gostoto, da je njihov vpliv v vesoljskem okolju manj problematičen;
- v drugi so odpadki s tako imenovano kritično gostoto. To so razbitine, ki povzročajo dodatne trke in prispevajo k večanju števila odpadkov;

- v tretjo pa se uvrščajo odpadki z gostoto, ki je večja od kritične, pri čemer je stopnja možnosti za pojav novih delcev večja, kot je gostota že obstoječih objektov na tem območju.

Znanih je kar nekaj primerov uničenja aktivnih objektov v vesolju zaradi trkov z drugimi delci. Telekomunikacijski satelit ESA Olympus-1 je 11. avgusta 1993 zadel meteor. Francoski mikrosatelit Cerise so 24. julija 1996 v sončno sinhroni nizki Zemljini orbiti zadeli delci raketnega ojačevalca (pospeševalca rakete, ki nosi satelite v vesolje) rakete Ariane-1 H-10, ki je eksplodirala v novembru 1986. V letu 2006, in sicer 29. marca, je ruski komunikacijski satelit Express-AM11 trčil v neznan predmet. Dva nepoškodovana umetna satelita v Zemljini orbiti sta naključno trčila 19. februarja 2009, in sicer sta se na višini 789 kilometrov nad Tajmirskim polotokom v severni Rusiji (Sibirija) s hitrostjo 11,7 km/s (približno 42.120 km/h) zadela aktivni ameriški satelit Iridium 33 in ruski satelit Cosmos 2251, ki od leta 1995 ni več služil svojemu namenu.

Zaradi prednosti izrabe atmosferskega tlaka za vesoljske odprave s človeško posadko najpogosteje uporabljajo tirnice na višini 400 kilometrov ali manj. Trki z drugimi delci so na tej višini manj verjetni. Vedeti je treba, da tu delci preidejo v atmosfero, kjer zgorijo. Kritična višina se lahko spremeni zaradi vesoljskega vremena, ki zviša atmosfero. Rahel atmosferski pritisk, Lunin vpliv na spremembo gibanja po tirnici in pritisk Sončevega sevanja lahko postopoma prinesejo odpadke v nižjo Zemljino orbito, kjer razpadejo. Višje, kjer ima atmosferski tlak manjši vpliv, je nižanje tirnice daljše in lahko preteče več tisočletij, preden objekt doseže atmosfero. Ker se višje tirnice za umestitev objektov uporabljajo manj, naj bi bila verjetnost trkov manjša in posledično naj bi število odpadkov naraščalo počasneje. Zanimivo je, da se številke približujejo kritičnemu pragu mnogo hitreje, kot bi pričakovali.

Vprašanje vesoljskih odpadkov je posebej problematično v dragoceni geostacionarni orbiti, kjer so sateliti pogosto v skupinah nad primarno točko na Zemlji in si delijo isto orbitalno pot. Tako je tudi motnja tirnice na tem območju zelo pomembna, saj povzroča dolžinski premik vesoljskega plovila in premike plovil v ravnini tirnice. Vesoljska plovila na tej višini morajo neprenehoma spreminjati smer gibanja, da se izogonejo trkom. Aktivne satelite obdržijo v predvideni tirnici z motorji. Če se ti pokvarijo, postanejo sateliti potencialne tarče trkov. Znan je primer komunikacijskega satelita Telstar 401, ki so ga izstrelili leta 1993 in ga je uničila magnetna nevihta v letu 1997.

Združeni narodi spodbujajo države, da vpišejo načrtovane vesoljske izstrelitve v register. Ob tem sicer niso postavili izrecne zahteve po posodobitvi informacij v registru, kar bi drugim udeležencem omogočilo boljšo oceno tveganja za trke z vesoljskimi odpadki (Akers, 2012). Register izstreljenih objektov ZN tako ne vsebuje niti navigacijskih satelitov GPS, GLONASS, Beidou in Galileo (Akers, 2012). Povečano število vesoljskih nesreč zaradi trkov z vesoljskimi odpadki je dalo zagon različnim pobudam za spremembo mednarodnega vesoljskega prava, dela mednarodnega javnega prava, ki ureja dejavnosti v vesolju (Grosse, 2013). To so pravila, načela in standardi petih mednarodnih pogodb, izdanih pod okriljem Organizacije združenih narodov (Štarkel, 2010). Primarni cilj regulacije dejavnosti v vesolju je razumski in odgovoren pristop k raziskovanju in rabi vesolja. Vesoljsko pravo pokriva najrazličnejša področja vesoljskega udejstvovanja, kot so vojaške aktivnosti v vesolju, ohranitev naravnega okolja na Zemlji, odškodninska odgovornost za škodo, ki jo povzročijo vesoljski objekti, varovanje nacionalnih interesov, reševanje astronomov, mednarodno sodelovanje in izmenjava informacij o morebitnih nevarnostih iz vesolja.

3.1 Druge vrste odpadkov

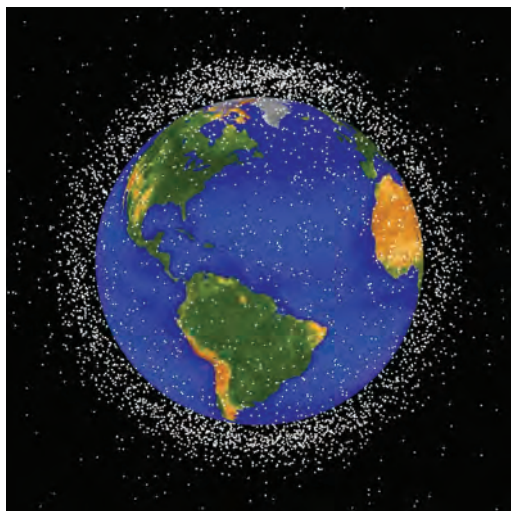
Med druge vrste odpadkov uvrščamo nedelujoča vesoljska plovila, izgubljeno opremo, raketne stopnje in ojačevalce, dodatne diname, polnilce, baterije, motorje v večstopenjskih raketah in odpadke, ki so nastali med hladno vojno in med preskušanjem protisatelitskega orožja. Združene države Amerike so leta 1958 v vesolje izstrelile satelit Vanguard I, ki je bil četrti umetni Zemljin satelit in je prvi deloval na sončno energijo. Čeprav so povezavo z njim izgubili že leta 1964, še vedno ostaja v srednji Zemljini orbiti kot najstarejši satelit, ki ga je izdelal in v vesolje poslal človek (Space debris, 2014).

Med vesoljskimi odpadki najdemo tudi izgubljeno rokavico Edwarda Whita, prvega ameriškega astronava, ki je hodil po vesolju (Edward Higgins White, 2015), kamero Michaela Collinsa, ki jo je izgubil blizu vesoljskega plovila Gemini 10, vrečo smeti, ki jo je odvrzel ruski kozmonavt iz vesoljske postaje, in izvijač ter zobno kremo neznanega lastnika. Znano je, da je ameriška astronautka s slovenskimi koreninami Sunita Williams med sprehodom po vesolju iz vesoljske rakete STS 120 izgubila kamero in klešče. Heidemarie Stefanyshyn - Piper je med sprehodom po vesolju na eni od odprav izgubila kovček velikosti škatle za orodje (Harej, 2014).

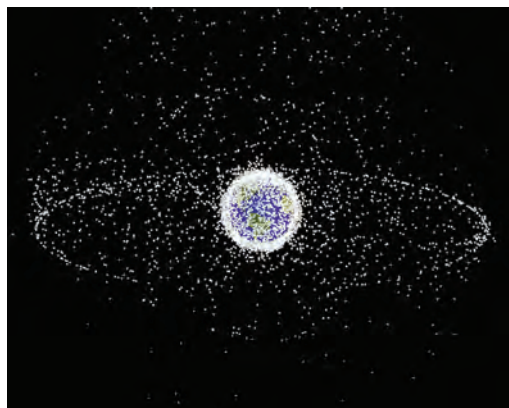
Tudi raketne stopnje obravnavamo kot vesoljske odpadke. Nizke raketne stopnje, kot so trdni raketni motorji na vesoljski raketi, odpadejo, preden dosežejo tirnico. Nato zgorijo in torej ne prispevajo k skupni masi odpadkov v orbiti. Višjestopenjski motorji oziroma rakete, kot je na primer dvostopenjska raketa na trdo gorivo, ki so jo razvili Američani za prenos tovora iz nižje v višjo Zemljino orbito, začnejo in končajo produktivno dobo v orbiti. Znanih je več eksplozij raketnih stopenj, ki so povzročile velike oblake odpadkov in prispevale k povečanju števila objektov v vesolju. Tako je 11. marca 2000 v vesolju eksplodirala kitajska visokostopenjska raketa Long March 4's CBERS-1/SACI-1. Podobno je 19. februarja 2007 na ruski raketi Briz-M eksplodirala stopnja motorja nad severno Avstralijo. Motor so izstrelili 28. februarja 2006 in je nosil komunikacijski satelit Arabsat-4A. To eksplozijo je posnelo več astronomov, vendar zaradi velikosti oblaka odpadkov ni bilo mogoče oceniti njihove količine. Od 21. februarja 2007 je bilo identificiranih več kot tisoč delcev. Tretja eksplozija raketne stopnje se je zgodila 14. februarja 2007. Zabeležil jo je ameriški sistem za sledenje vesoljskim objektom in jo tudi evidentiral v katalogu vesoljskih objektov. Vse od leta 1993 je bilo največ zabeleženih razpadov v letu 2006, in sicer kar osem.

Eden od največjih virov odpadkov v preteklosti je bilo testiranje protisatelitskega orožja, ki so ga v 60. in 70. letih prejšnjega stoletja izvajale Združene države Amerike in nekdanja Sovjetska zveza. Med države, ki so kadarkoli izvedle protisatelitske teste, spada tudi Kitajska. Ocenjujejo, da je z razpadom kitajske protisatelitske rakete nastalo 2.300 kosov odpadkov s premerom več centimetrov, čez 35.000 kosov v velikosti enega centimetra ali več in en milijon kosov v velikosti enega milimetra. Test so izvedli na višini med 850 in 882 kilometri, kjer je največ umetnih satelitov, tamkajšnji atmosferski tlak pa je tako nizek, da se odpadki verjetno ne bodo vrnili na Zemljo (Sethu in Sing, 2014).

Sedanje stanje v prostoru nizko letečih satelitov do višine 2000 kilometrov (tirnice LEO; angl. Low Earth Orbit) in geostacionarnih tirnic kažeta sliki 3 in 4, ki smo ju pridobili na spletišču ameriške vesoljske agencije NASA: <http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/>.



Slika 3: Stanje v prostoru nizkih zemeljskih tirnic (pridobljeno 10. 4. 2015).



Slika 4: Stanje v prostoru geostacionarnih tirnic (pridobljeno 10. 4. 2015).

3.2 Kako se je vse začelo?

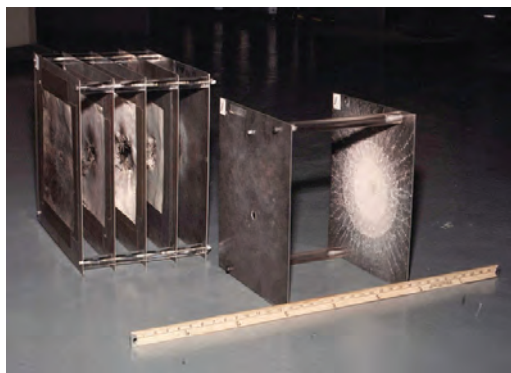
Najprej so opazovali meteoroidne, mikrometeoroidne in asteroidne, ki s trki povzročajo škodo na vesoljskih plovilih. Tuja literatura loči med meteoroidi in mikrometeoroidi (to so vesoljski delci z maso, manjšo od enega grama), mi oboje poimenujemo kar meteoroid (Triglav, 2000). Znanstveniki različnih strok so opazovali delce v vesolju ali zbirali različne magnetne delce, ki so padli na Zemljo. Vse so povezovali z vesoljskim prahom, ki je padel na Zemljo. Količine meteorskega toka so primerjali na podlagi ocen s teleskopskimi meritvami in ocen, pridobljenih z neposrednimi meritvami na Zemlji. Tako so ugotovili, da visok tok lahko pomeni zelo resno tveganje za vesoljske odprave v višjih tirnicah, kot na primer odprava Apollo. Da bi ugotovili, ali so bila neposredna merjenja točna, so izvedli dodatne študije. Ena izmed njih je bil satelitski program Pegasus, ki je pokazal, da je stopnja meteoroidov, ki gredo skozi atmosfero, podobna stopnji, ki so jo pridobili z optičnim merjenjem, in znaša od 10.000 do 20.000 ton na leto (Pegasus, 2015).

Satelitski program Pegasus so sestavljali trije ameriški sateliti, ki so jih februarja 1965 poslali v vesolje z raketo Saturn I 16. Glavni namen je bil pridobiti podatke o frekvenci vpliva mikrometeoroidov na vesoljska plovila. Sateliti Pegasus so bili prepoznavni po parih kril, ki so merila 29 metrov v dolžino, 4,3 metra v širino in so bila sestavljena iz nizov 104 plošč. Te so bile opremljene s senzorji za zaznavanje lukenj, ki jih povzročijo mikrometeoroidi v visokih orbitah. Sateliti Pegasus so bili do takrat najvišje poslani umetni sateliti v vesolje in so delovali v podporo programu Apollo, ki je od leta 1970 na Luno pošiljal odprave s človeškimi posadkami. Senzorji satelitov Pegasus so uspešno merili gostoto, velikost, smer in prodornost vplivov mikrometeoroidov, ko so ti zadevali vanje, in podali oceno stopnje uničenja, ki ga lahko povzročijo mikrometeoroidi (Brook idr., 1979).

3.3 Zaščita pred vesoljskim odpadki in delci iz vesolja

Po ugotovitvah misije Pegasus so ameriški znanstveniki poskušali poiskati rešitev, s katero bi zavarovali satelite, ki se bodo v prihodnje znašli v stiku z meteoroidi in njihovimi delci (mikrometeoroidi). Vesoljska plovila so v vesolju izpostavljena trkom vesoljskih objektov (mikrometeoroidov) v velikosti zrna prahu, zato je bila rešitev, ki jo je predlagal Fred Whipple, zelo dobrodošla. V letu 1974 je predstavil učinkovit način, kako se izogniti trkom z meteoroidi ali zmanjšati njihov vpliv (Whipple, 1947), njegov meteorski odbijač ali Whipplov ščit se še vedno uporablja za zaščito vesoljskih plovil. Whipplov ščit je narejen iz relativno tankega in s tem tudi lahkega zunanega odbijača, ki je nekoliko oddaljen od stene samega vesoljskega plovila. S tem se pomembno izboljša zaščita in zmanjša masa samega plovila, kar je zelo pomembno pri vesoljskih poletih. Obstaja več oblik Whipplovega ščita, ki se uporabljajo na različnih vesoljskih plovilih in postajah, odvisno od vrste vesoljskega plovila ter stopnje zaščite, ki jo želimo doseči. Lahko je lahko narejen v obliki tanke aluminijaste folije, ali v obliki plošč (slika 5).

Ščit sicer uspešno varuje plovila pred številnimi prašnimi delci in manjšimi odpadki, ne zavaruje pa jih pred trki z velikimi kosi odpadkov.



Slika 5: Večplastni in dvoplastni Whipplov ščit (vir: <http://wordpress.mrreid.org/2013/01/28/whipple-shielding/>, pridobljeno 20. 4. 2015).

Danes so v uporabi tudi drugi materiali. Raziskave so pokazale, da je ščit iz keramičnih vlaken pogosto boljše zaščita pred veliko hitrostjo delcev (~7 km/h) kot aluminijast ščit. V zadnjem času so začeli uporabljati tudi najnovejše umetne materiale, na primer kevlar (Whipple Shield, 2015).

3.4 Odstranjevanje vesoljskih odpadkov

Zaradi povečane količine odpadkov so se v zadnjih letih pojavile zamisli, da bi vesolje očistili. V preteklosti so že predlagali vrsto rešitev. Vesoljske agencije so si za strateški cilj v prihodnosti postavile razvoj inovativnih tehnologij za odstranitev vesoljskih odpadkov. Najprej je treba odstraniti najbolj kritične velike objekte, nato nedelujoče in večje kose razpadlih satelitov ter postopoma, z razvojem tehnologije, še vse druge manjše delce. Študija agencij NASA in ESA je pokazala, da bi lahko z nadzorovanim in načrtovanim delom odstranili do deset velikih odpadkov na leto (Harej, 2014). Različni predlogi za odstranjevanje vesoljskih odpadkov so še v povojih. Najbolj učinkoviti metodi za zmanjšanje števila predmetov v vesolju sta še vedno zmanjšanje ustvarjanja novih vesoljskih odpadkov in odgovorna raba

vesolja. Objekti, ki jih bodo v prihodnje poslali v vesolje, pa bi morali že imeti načrt za odstranitev iz vesolja po koncu življenjske dobe.

Najzanesljivejši način čiščenja vesolja je, da se objekti vrnejo v Zemljino atmosfero, kjer zgorejo. Večja težava so objekti v višjih orbitah, ki ne bodo kmalu ali sploh nikoli prišli v atmosfero. Ena od možnosti za odstranjevanje odpadkov so roboti, ki bi nedelujoče satelite oskrbovali z gorivom, da bi se ti lahko odstranili iz orbite oziroma vesolja. Druga od predlaganih rešitev je namestitev dodatnih elektrodinamičnih vrvic na vesoljska plovila. Te bi se na koncu njihove življenjske dobe razvile in bi počasi spustile vesoljsko plovilo iz prvotne orbite do atmosfere ali do posebej vzpostavljene orbite z odpadki (angl. graveyard orbit). Namesto vrvic so predlagali tudi jadra (Dugan, 2013). Zelo dobro preučena rešitev je uporaba daljinsko vodenih vozil, ki bi se srečevala z nedelujočimi objekti in jih vračala v prvotno tirnico, če bi jim bilo mogoče podaljšati življenjsko dobo, ali pa jih usmerila v tirnico z odpadki. V ta namen naj bi se uporabljalo vozilo SIS (angl. Space Infrastructure Servicing), ki oskrbuje z gorivom telekomunikacijske satelite v geosinhroni orbiti oziroma deluje kot servisno plovilo. Izstrelitev prvega vozila so predvidevali v letu 2015, vendar so projekt odložili v prihodnost (Harej 2014). Vesoljske odpadke bi lahko odstranjevali tudi z laserji na Zemlji, ki bi izkoriščali prednosti svetlobne moči za uničenje delcev. Podobno delujejo sistemi, kjer laserje zamenjajo z žarki ionov (Harej, 2014). V švicarskem vesoljskem centru EPFL so predstavili projekt CleanSpace One, ki temelji na uporabi nanosatelitov. Ti se bodo prelepili na odpadek in ga usmerili proti atmosferi, kjer bosta zgorela odpadek in nanosatelit. Prvo izstrelitev načrtujejo v letu 2018 (Harej, 2014).

4 IZSTRELITEV OPERATIVNIH SATELITOV SISTEMA GALILEO

ESA je do leta 2012 izstrelila in umestila v tirnico štiri satelite navigacijskega sistema Galileo. Po načrtih naj bi bilo do konca leta 2014 v orbiti že osem satelitov, vendar je ponesrečena umestitev dveh satelitov 22. avgusta 2014 nekoliko spremenila nadaljnji časovni načrt. Peti satelit GSAT0201 in šesti satelit GSAT0202 sta zaradi strojnih težav raketne stopnje Fregat nosilne rakete Sojuz-2 končala v popolnoma drugačnih tirnicah (preglednica 3). Poročilo agencije ESA iz oktobra 2014 navaja napačno delovanje izstrelitvenih modulov zaradi zmrzovanja hidrazina, anorganske kemijske spojine za raketno gorivo (Spacenews.com, 2014).

Preglednica 3: Osnovni Keplerjevi elementi pravilne in nepravilne tirnice napačno umeščenih satelitov.

Keplerjev element	načrtovan	napačen
velika polos a	29.900 km	26.200 km
ekscentriciteta e	≈ 0	0,23053
naklon i	55°	47°

Zaradi zelo ekscentrične tirnice sta bila satelita pri kroženju okoli Zemlje pri prvem prehodu čez perigej na višini 13.700 kilometrov izpostavljena sevanju iz nevarnega območja Van Allenovih sevalnih pasov. V območju Van Allenovih pasov, ki so na notranjem delu Zemljine magnetosfere, je ionizirajoče sevanje zelo močno, saj se tu delci sončnega vetra »ujamejo« v zemeljskem magnetnem polju. Sevanje lahko

močno vpliva na delovanje sončnih celic satelitov, v najslabšem primeru lahko celo uniči polprevodniške elemente celic (Batagelj, 2013).

V novembru 2014 so strokovnjaki iz nadzornega centra Galileo v Oberpfaffenhofnu v Nemčiji izvedli enajst nadzorovanih umestitev (manevrov) in končno jim je satelit GSAT0201 uspelo umestiti v novo tirnico (ESA, URL 3). Višino perigeja so povišali na 17.230 kilometrov in ekscentriciteto zmanjšali na 0,15619. Tako so omogočili boljšo orientacijo glavne antene, da je stalno obrnjena proti Zemlji. Z aktivnim oddajanjem signala so začeli testno spremljati satelit v evropskih kontrolnih postajah. Prvi navigacijski testi s signalom satelita GSAT0201 so pokazali precej dobre rezultate (ESA, URL 4). Pri tem so sporočili, da imajo komercialni sprejemniki GNSS lahko težave s sprejemom signala z navedenega satelita. Vzrok je v tirnici, ki ni usklajena s podatki iz navigacijskega sporočila, zaradi česar se podaljša čas iskanja satelita.

Marca letos so podoben postopek izvedli tudi za satelit GSAT0202 (ESA, URL 5). Izkazalo se je, da ponesrečena umestitev satelitov ni zavrla procesa nadaljnjih izstrelitev satelitov Galileo. Tako so 27. marca 2015 uspešno izstrelili satelita GSAT0203 z imenom Adam in GSAT0204 z imenom Anastasia. Tudi tokrat je ESA uporabila rusko nosilno raketo Sojuz (ESA, URL 6). Pričakujemo, da bosta kmalu popolnoma operativna.

5 SKLEP

Čeprav se je umestitev satelitov Galileo (GSAT0202 z imenom Doresa in GSAT0202 z imenom Milena) nepričakovano ponesrečila, nista končala med vesoljskimi odpadki. Krmilna oprema sodobne vesoljske tehnologije in znanje strokovnjakov nadzornega centra Galileo sta omogočila popravek njunih tirnic. Izstrelitve v zgodovini vesoljske tehnologije so bile večinoma uspešne, vendar so sateliti, sonde in druga vesoljska oprema po opravljeni nalogi ostali ujeti v zanko Zemljine gravitacijske sile in napredna vesoljska oprema je postala del vesoljskih odpadkov. Ker se količina odpadkov vse bolj povečuje, se pojavljajo pritiski znanstvenikov za očiščenje vesoljskega prostora. Predlagane rešitve se še preskušajo in niso bile še izvedene v praksi. Na temo vesoljskih odpadkov je potekalo že več srečanj znanstvenikov. Pri tem velja omeniti 6. evropsko konferenco o vesoljskih odpadkih, ki je potekala 25. aprila 2013. Takrat je nastala pobuda z imenom Čisto vesolje, ki vključuje raziskave in razvoj novih tehnologij za odstranjevanje vesoljskih odpadkov in ublažitev težave kopičenja objektov v vesolju. Nacionalne vesoljske agencije in ESA so opredelile razvoj aktivnih tehnologij za odstranjevanje objektov iz vesolja za svoj strateški cilj (ESA, URL 1).

Kljub vsem prototipom za odstranjevanje vesoljskih odpadkov je še vedno ena od najučinkovitejših rešitev za zmanjšanje vesoljskih odpadkov zmerna in odgovorna raba vesoljskega prostora ter težnja k trajnostno naravnemu varovanju vesoljskega okolja. Tu se velja vprašati, kam vodi človekov razvoj, ki je v zadnjem stoletju za zagotavljanje čim bolj udobnega življenja onesnažil ne samo planet, ampak je posegel tudi višje, v vesolje. Zato v razmislek podpori k pomembnosti dragih projektov v zvezi z ohranjanjem okolja in vesolja končujemo z besedami Roberta Baden Powella, ustanovitelja skavtskega gibanja: »*Try and leave this world a little better than you found it*« oziroma »*Poskusimo pustiti svet za seboj malo boljši, kot smo ga dobili*«.

Literatura in viri:

- Akers, A. (2012). The infinity and beyond: orbital space debris and how to clean it up. *University of La Verne Law Review*, 33, 285–317. http://www.lacba.org/Files/Main%20Folder/Sections/International%20Law/InternationalLawNewsletter/files/Akers_Final.pdf, pridobljeno: 24. 8. 2015.
- Bate, R. R., Mueller, D. D., White, J. E. (1971). *Fundamentals of Astrodynamics*. New York, Dover Publications.
- Batagelj, B. (2013). Satelitske komunikacije: študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 119 str. http://antena.fe.uni-lj.si/studij/skn_vs_gradivo/satelitske_komunikacije%20_Batagelj.pdf, pridobljeno: 26. 8. 2015.
- Brook, C. G., Grimwood, J. M., Swenson, L. S. (1979). *Chariots for Apollo: A History of Manned Lunar Spacecraft*. NASA special publication 4205. <http://history.nasa.gov/SP-4205/contents.html>, pridobljeno: 26. 8. 2015.
- Capderou, M. (2005). *Satellites, orbits and missions*. Pariz, Springer–Verlag.
- Committee for the Assessment of NASA's Orbital Debris Programs (2011). *Limiting Future Collision Risk to Spacecraft: An Assessment of NASA's Meteoroid and Orbital Debris Programs*. Washington D. C., National Academies Press. <http://www.nap.edu/catalog/13244/limiting-future-collision-risk-to-spacecraft-an-assessment-of-nasas>, pridobljeno: 20. 8. 2015.
- Dugan, B. (2013). 5 Bold Proposals For Cleaning Up Space Junk. <http://mentalfloss.com/article/48606/5-bold-proposals-cleaning-space-junk>, pridobljeno: 26. 8. 2015.
- Edward Higgins White (b. l.). https://en.wikipedia.org/wiki/Edward_Higgins_White, pridobljeno: 21. 8. 2015.
- ESA, URL 1. <http://www.congrexprojects.com/2013-events/13a09/introduction>, pridobljeno: 20. 3. 2014.
- ESA, URL 2. http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/Launching_Galileo/Soyuz_Galileo_launch_injection_anomaly, pridobljeno: 21. 9. 2014.
- ESA, URL 3. http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo_satellite_recovered_and_transmitting_navigation_signals, pridobljeno: 12. 12. 2014.
- ESA, URL 4. http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Salvaged_Galileo_performs_its_first_navigation_fix, pridobljeno: 9. 1. 2015.
- ESA, URL 5. http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/Launching_Galileo/Sixth_Galileo_satellite_reaches_corrected_orbit, pridobljeno: 20. 3. 2015.
- ESA, URL 6. http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/Launching_Galileo/Galileo_satellites_well_on_way_to_working_orbit, pridobljeno: 28. 4. 2015.
- Grosse, C. (2013). Space debris and space traffic management: two contemporary issues of sustainable space security. Seminarska naloga. Dunaj, Pravna fakulteta. http://intl.w.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/int_beziehungen/Internetpubl/Grosse_2013_Space_debris.pdf, pridobljeno: 20. 8. 2015.
- Harej, H. (2014). Vloga satelitske geodezije pri spremljanju in evidentiranju vesoljskih odpadkov. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 124 str.
- Kessler, D. J. (1991). Collisional cascading: the limits of population growth in low Earth orbit. *Advances in Space Research*, 11(12), 63–66. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0273-1177\(91\)90543-s](http://dx.doi.org/10.1016/0273-1177(91)90543-s)
- NASA: Orbital Debris (b.l.) <http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov>, pridobljeno: 6. 3. 2015.
- Osiander, R., Ostdiek, P. (2009). *Introduction to space debris*. V: A. G. Darrin, B. L. O'Leary (ur.), *Handbook of Space Engineering, Archaeology, and Heritage* (str. 363–379). Boca Raton, CRC Press. <http://www.slideshare.net/IngesAerospace/chapter-18-introduction-to-space-debris>, pridobljeno: 20. 4. 2015.
- Pegasus (b. l.) in *Encyclopedia Astronautica* <http://www.astronautix.com/craft/pegasus.htm>, pridobljeno: 25. 8. 2015.
- Sethu, S., Singh, M. (2014). Stuck in Space: The Growing Problem of Space Debris Pollution. *UKLSA Legal Issues Journal*, 2(1). <http://www.uklsa.co.uk/wp-content/uploads/2014/06/UKLSR-Volume-2-Issue-1-Article-6.pdf>, pridobljeno: 20. 8. 2015.
- Štarkel, K. (2010). Pravo in vesolje. Pamfil. <http://pamfil.si/prispevek/pravo-in-vesolje>, pridobljeno: 24. 8. 2015.
- Triglav, M. (2000). *Meteorji*. Ljubljana, Založba DMFAS.
- Vallado, D. A. (2001). *Fundamentals of astrodynamics and applications*. 2. izdaja. El Segundo, Microcosm Press.
- Vallado, D., Crawford, P. (2008). SGP4 Orbit Determination. Simpozij: 2008 AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference. <http://www.centerforspace.com>, pridobljeno: 10. 4. 2015.
- Whipple, F. L. (1947). Meteorites and space travel. *Astronomical Journal*, 52(1161), 131. DOI: <http://dx.doi.org/10.1086/106009>
- SpaceneWS.com (b. l.). <http://spaceneWS.com/42270lingering-doubts-drove-europe-to-sideline-galileo-launches-until-next-year>, pridobljeno: 30. 10. 2014.
- Space Debris (b.l.). http://en.wikipedia.org/wiki/Space_debris, pridobljeno: 20. 4. 2015.
- UNOOSA (b. l.). United Nations Register of Objects Launched into Outer Space. <http://www.unoosa.org/oosa/spaceobjectregister/resources/index.html>, pridobljeno 21. 8. 2015.
- USSTRATCOM (b.l.). http://www.stratcom.mil/factsheets/11/Space_Control_and_Space_Surveillance, pridobljeno: 23. 4. 2015.
- USSSN (b. l.). http://en.wikipedia.org/wiki/United_States_Space_Surveillance_Network, pridobljeno: 24. 5. 2015.
- Whipple Shield (b. l.). http://en.wikipedia.org/wiki/Whipple_shield, pridobljeno: 23. 4. 2015.

Polona Pavlovčič Prešeren, Helena Harej, Miran Kuhar (2015). Ponesrečena izstrelitev satelitov Galileo in vesoljski odpadki. Geodetski vestnik, 59 (3): 473-485.
DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2015.03.473-485

doc. dr. Polona Pavlovčič Prešeren, univ. dipl. inž. geod.
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: polona.pavlovcic-preseren@fgg.uni-lj.si

doc. dr. Miran Kuhar, univ. dipl. inž. geod.
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: miran.kuhar@fgg.uni-lj.si

Helena Harej, univ. dipl. inž. geod.
e-naslov: helena.harej@msa.si