

Komunikacijsko satelitsko omrežje Starlink

Žiga Andrejc, Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za sevanje in optiko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: ziga.andrejc@gmail.com

Starlink Satellite Communications Network

Abstract. This paper introduces the Starlink-satellite broadband-communications network, developed by the American company SpaceX. The main technical characteristics of this special segment of broadband-communications networking based on the constellation network of small-satellite technology are reviewed and commented on. The main motivation of the paper is to clearly show the technical characteristics of the Starlink network that SpaceX does not disclose in popular-science presentations.

Keywords: Starlink, satellite network, low Earth orbit, telecommunications network, broadband access

1 Uvod

Izgradnja in poskusi poslovne uporabe svetovnega širokopasovnega omrežja elektronskih komunikacij preko sistema umetnih satelitov so se začeli že pred več kot desetimi leti [1]. Tovrstne satelitske storitve, ki so alternativa zemeljskim omrežjem iz optičnih vlaken ali brezžičnim povezavam, pa niso tuje niti slovenskemu okolju za zagotavljanje širokopasovnih povezav na podeželju [2], kjer se je v Posočju začela zgodba odvijati že 2009 [3]. Za razliko od običajnih zemeljskih komunikacijskih omrežij, pri katerih internetni promet potuje po optičnih kablji ali krajši razdalji po zraku, satelitsko internetno omrežje prenaša informacije s pomočjo mikrovalovnega valovanja, ki potuje med satelitom v zemeljski tirnici in uporabnikom nekje na Zemlji. Ne glede na trenutno razširjenost zemeljskih fiksnih in mobilnih omrežij ter na nekatere omejitve današnjih satelitskih omrežij pa pri vzpostavitvi resnično globalnega internetnega omrežja, ki bo lahko ponujalo storitve uporabnikom ne glede na lokacijo, brez satelitske tehnologije ne bo šlo. Nov globalen internet, ki bo zagotovljen brez lokalnih telekomunikacijskih operaterjev, bo odporen na lokalno cenzuriranje in omejevanje storitev, bo pa na žalost vodil v globalni monopol in ogrozil nevtralnost interneta [4].

V članku je predstavljeno satelitsko širokopasovno komunikacijsko omrežje Starlink, ki ga razvija ameriško podjetje SpaceX. Pregledane in komentirane so glavne tehnične značilnosti tega zelo posebnega segmenta širokopasovnih komunikacijskih omrežij, osnovanih na konstelacijskem omrežju tehnologije majhnih satelitov. Glavna motivacija prispevka je jasno prikazati tehnične lastnosti omrežja Starlink, ki jih podjetje SpaceX običajno ne razkriva podrobno v javno dostopnih predstavitev.

2 Satelitska internetna omrežja

Trenutno satelitsko internetno omrežje zagotavljajo veliki in zmogljivi sateliti, ki so umeščeni v geostacionarni tirnici (angl. Geostationary orbit – GEO) na višini 35.786 km nad zemeljskim ekvatorjem in pokrivajo določeno področje na Zemlji [5]. Slabost geostacionarne tirnice je zakasnitev pri oddajanju ali sprejemanju signala zaradi oddaljenosti satelita, kot prikazuje Tabela 1. Ker geostacionarni sateliti nimajo medsatelitskih zvez, mora signal običajno prepotovati štirikratno razdaljo med Zemljo in geostacionarno tirnico [1]. Z namenom zmanjšanja zakasnitev so se že pred več kot 20 leti začele vzpostavljati satelitske konstelacije v nizki zemeljski tirnici (angl. low Earth orbit – LEO) in srednji zemeljski tirnici (angl. medium Earth orbit – MEO) z namenom zagotavljanja mobilnih in fiksnih storitev (Iridium, Globalstar, Skybridge...) ter sateliti O3b podjetja SES S.A. v MEO.

Tabela 1: Lastnosti tirnice za satelitsko internetno omrežje

vrsta tirnice	LEO	MEO	GEO
oddaljenost	100 km– 2.000 km	2.000 km– 36.000 km	36.000 km
zakasnitev	10 ms	120 ms	260 ms
hitrost satelita	7,8–6,9 km/s	6,9–3,1 km/s	>3,1 km/s
vidljivost satelita	kratka	srednja	vedno
predaja zveze	pogosta	srednja	ni
območje pokrivanja	majhno	srednje	veliko
življenjska doba satelita	3–7 let	10–15 let	10–15 let

Poleg nizkih zakasnitev imajo sateliti v LEO tudi manjšo pokritost, kar poveča zmogljivost uporabniških povezav v območju pokrivanja, vendar jih za globalno pokritost s signalom rabimo več. Zaradi ekonomije obsega in kratke življenjske dobe se v nizko tirnico umeščajo majhni sateliti, kjer svojo vlogo v zadnjih letih odigrava tudi Slovenija [6].

Osnovni problemi, ki se pojavljajo pri gradnji širokopasovnega satelitskega internetnega omrežja v LEO [1], so:

- Komunikacijski protokoli morajo omogočati mobilnost tako mrežnih vozlišč kot terminalov.
- Vzdrževanje zvez na relacijah satelit-satelit in satelit-Zemlja ter obratno ni trivialno, ker se topologija omrežja spreminja.
- Hitra predaja zvez zaradi velikih hitrosti gibanja satelitov.
- Komunikacijski protokoli morajo imeti toleranco za relativno visoke zakasnitve in slabljenja signalov pri

komunikaciji satelitov z zemeljskimi postajami ali terminali.

- V novi arhitekturi omrežja bodo podatke procesirali in usmerjali tudi sateliti.

Izmed aktualnih projektov majhnih satelitov na LEO je medijsko najbolj odmeven Starlink. Projekt je prvič ugledal luč januarja leta 2015, ko je svetu svojo idejo predstavil direktor in lastnik podjetja Elon Musk. Ob predstavitvi je povedal, da je njihov cilj prenos večine internetnega prometa na dolgih razdaljah in okrog 10 % lokalnega internetnega prometa nekega območja. Prav tako pa je izpostavil, da imajo satelitska internetna omrežja prednost pred zemeljskimi, saj je hitrost elektromagnetnega valovanja v vakumu za približno 30 % višja kot v optičnem vlaknu in ker je potrebnih manj vozlišč, da informacija prispe na oddaljen cilj [7]. Projekt je požel mnogo odobravanja kot tudi nasprotovanja v svetovni in slovenski astronomski skupnosti profesionalnih in amaterskih astronomov [8, 9].

3 Glavne značilnosti

SpaceX bi rad s Starlinkom omogočil hiter in cenovno ugoden prenos velikih količin podatkov na odročnih lokacijah, kamor žične povezave ne sežejo. Pri tem pa pri uporabnikih ne bo potrebno nameščati fiksnih satelitskih krožnikov in podobne opreme.

V splošnem so problemi satelitskih omrežij visoke cene satelitov, izstrelitve le-teh v tirnice in dražje opreme na uporabnikovi strani. Slednjemu so se pri SpaceX-u še posebej posvetili in cena uporabniškega terminala naj ne bi presegala meje 200 ameriških dolarjev.

Starlink bo časovne zakasnitve minimiziral s tem, da bodo sateliti krožili okrog Zemlje v LEO. Glavna pomanjkljivost satelitov v LEO je majhno vidno polje. To pomeni, da lahko posamezen satelit opazuje oz. komunicira le z majhnim območjem Zemlje in to za kratek čas (na višini 550 km približno 5 minut). Zato je za stalno pokritost potrebna konstelacija večjega števila manjših satelitov, ki skupaj delujejo kot omrežje in zagotavljajo povezljivost v vsakem trenutku. Poleg majhnega vidnega polja pa prinaša LEO tudi hitro upadanje višine tirnice zaradi zračnega upora v višjih Zemljinih plasteh ozračja, zaradi česar je za ohranjanje tirnice potrebno ponovno pospeševanje ali pa izstrelitev novega nadomestnega satelita. Hitro upadanje tirnice pa ima tudi pozitivno stran, saj bodo nedelujoči sateliti sami padli proti Zemlji in izgoreli v ozračju, kar pomeni tudi manj vesoljskih smeti.

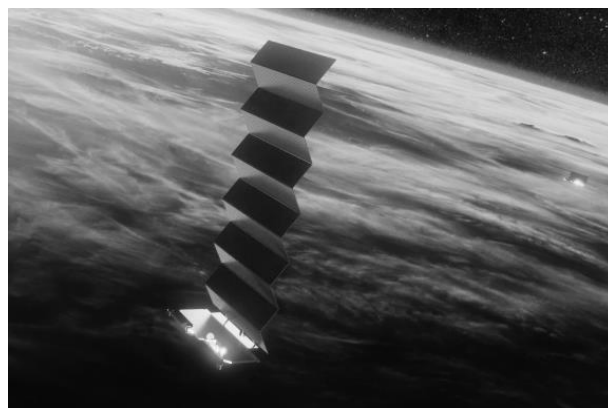
Internetni promet, ki poteka prek današnjih satelitskih omrežij v geostacionarnih tirnicah, ima minimalne teoretične zakasnitve med satelitom in uporabniškim terminalom vsaj 477 ms. V praksi so številke malo višje, in sicer okrog 600 ms ali več [10]. Nižje tirnice Starlinkovih satelitov prinašajo bolj praktične nižje zakasnitve od 25 ms do 35 ms, kar je

primerljivo z že obstoječimi kabelskimi optičnimi omrežji. Sistem bo uporabljal protokol 'vsak z vsakim' (angl. peer-to-peer – P2P), ki bo preprostejši od IPv6, vključeval pa bo tudi šifriranje na celotni poti – od konca do konca (angl. end-to-end).

Leta 2017 so dobili od Zvezne komisije za komunikacije (angl. Federal Communications Commission – FCC) dovoljenje za izstrelitev 12.000 satelitov, za katere je načrtovano, da bodo krožili okrog Zemlje na treh različnih višinah. Prvih 1.600 satelitov bo v tirnicah na višini 550 kilometrov, naslednjih 2.800 satelitov bo delovalo v K_u (12–18 GHz) in K_a (26,5–40 GHz) frekvenčnem pasu na višini 1.150 kilometrov, ostalih 7.600 satelitov pa bo uporabljalo V frekvenčni pas (40–70 GHz) in bodo krožili okrog Zemlje na višini 340 kilometrov (angl. Very low earth orbit – VLEO [11]). Oktobra 2019 pa je SpaceX že podal nov zahtevek za 30.000 novih satelitov, ki naj bi krožili okrog Zemlje na višinah od 328 do 580 kilometrov. S prvimi 12.000 sateliti v LEO bodo pokrivali ves svet med geografskimi širinami 70° severno in 70° južno. Konstelacija takšnih razsežnosti pa skrbi astronome, saj verjamejo, da bi tolikšno število svetlih predmetov motilo opazovanje vesolja. SpaceX je v odgovor na Starlink 2 (misija) satelite nanesel eksperimentalni premaz, ki naj bi zmanjšal bleščanje.

4 Vesoljski segment

Vsak Starlink satelit tehta 227 kilogramov in je po oceni velikosti 3,5 m x 1,5 m (slika 1). Prvih 1584 satelitov bo krožilo okrog Zemlje v 72 tirnicah (v vsaki 22 satelitov), razmaknjenih na različnih višinah in položajih, da bi se izognili trkom. Sateliti bodo enakomerno razporejeni po tirnicah, tako da bodo imeli vedno na vidiku sosednje satelite v svoji tirnici in prav tako satelite v sosednji tirnici.

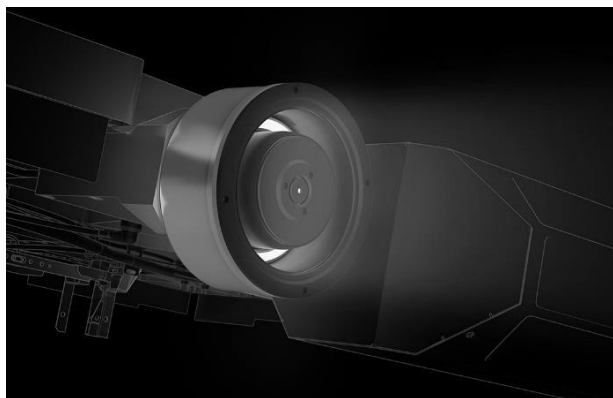


Slika 1: Vsak satelit bo velikosti 3,5 m x 1,5 m in bo tehtal 227 kg, opremljen bo z ionskim potisnikom, enim sončnim panelom in štirimi laserskimi komunikacijskimi terminali. (Vir: spacex.com)

Internetni promet in usmerjanje bo potekalo preko satelitov in ne preko vozlišč na Zemljinem površju. Posamezna zemeljska postaja se bo povezala s

satelitom, ki je v njenem vidnem polju, in ko se bo ta satelit premaknil izven dosega, bo to povezavo predal na naslednji satelit po svoji tirnici. Nato se bo signal preusmeril skozi niz medsatelitskih povezav, dokler ne bo dosegel satelita, ki je v vidnem polju ciljne zemeljske postaje.

Sateliti so rezultat masovne proizvodnje, kar pomeni veliko nižjo ceno na posamezno enoto kot pri ostalih podobnih satelitih. Za ohranjanje tirnic, pridobivanje višine in posledično tudi za izhod iz tirnice se uporabljajo pogonski motorji HET (angl. Hall effect thruster) s plinom kripton, ki so vrsta ionskih potisnikov, v katerih je pogonsko gorivo pospešeno s pomočjo električnega polja (slika 2). HET potisniki s plinom kripton ponavadi kažejo bistveno večjo erozijo pretočnega kanala v primerjavi s podobnim električnim pogonskim sistemom, ki deluje s ksenonom, vendar z nižjimi stroški pogonskega goriva.



Slika 2: Ionski potisniki, ki služijo za dosego končne tirnice in ohranjanje le-te. (Vir: spacex.com)

4.1 Medsatelitske zveze

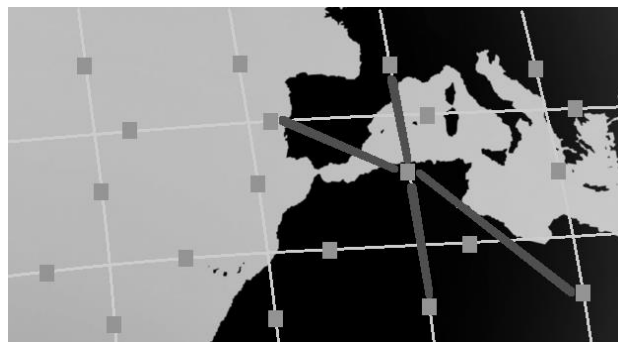
Sateliti bodo med seboj komunicirali s pomočjo optičnih laserskih zvez (čeprav do sedaj izstreljeni sateliti niso opremljeni z laserskimi zvezami, temveč z radiofrekvenčnimi (RF) zvezami), podatke pa bodo na Zemljo pošiljali v frekvenčnih pasovih Ka, Ku in V, odvisno od višine tirnice, v kateri bodo. Povezava do Zemlje bo radijska, saj je bolj zanesljiva kot laserska. Radijski signali za razliko od infrardečih mnogokrat bolje prodirajo skozi oblačnost in področja padavin. Za podjetja, ki se bodo vseeno odločila za laserske povezave do Zemlje, je organizacija za standarde Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) priporočila uporabo 1550 nm za promet navzdol (angl. downlink) in 1030–1080 nm za promet navzgor (angl. uplink), tako da so valovne dolžine ločene.

Optična komunikacija med sateliti bo uporabljala laserje in je v večini razvita na podlagi dosedanjih zemeljskih optičnih sistemov. Laserji oddajajo infrardečo svetlobo, ki je prav tako elektromagnetno valovanje kot radijski valovi, le da ima kar nekaj prednosti. Ker je frekvenca infrardeče svetlobe veliko višja (od 300 GHz do 470 THz), je na razpolago več pasovne širine, kar pomeni, da lahko teoretično

prenesemo mnogokrat več informacij kot z radijski valovi (dosežena rekordna hitrost z milimetrskimi valovi je 40 Gbit/s, z lasersko povezavo pa 13160 Gbit/s). Prav tako infrardeči signali niso tako regulirani kot radijski. Razlog za neregulacijo svetlobe ni v tem, da je novejša tehnologija, ampak v mehanizmu širjenja radijskega valovanja. Radijski signal, poslan z nizkozemeljske tirnice, lahko pokrije več tisoč kvadratnih kilometrov področja na Zemlji in če več ljudi uporablja isti frekvenčni kanal, pride do prekrivanja oz. motenj. Po drugi strani pa veliko bolj usmerjen laserski žarek, poslan na primer z Lune, pokrije le okrog 20 km², zaradi tega in velikega razpona frekvenc zelo težko pride do motenj. Prav tako se za lasersko komunikacijo porabi veliko manj energije (radijski oddajnik na Luni bi porabil več kot 50 x več energije kot infrardeči oddajnik). V vesolju je doseg laserske komunikacije več deset tisoč kilometrov, zato je primerna za medsatelitske povezave. Zelo usmerjen žarek predstavlja inženirske izzive, kot je »ciljanje« z žarkom in sprejemanje le-tega, saj že najmanjše vibracije pomenijo na razdalji več deset tisoč kilometrov odstopanje (par metrov). Pri laserski komunikaciji je bistven kompromis med usmerjenostjo in močjo – manjše je odstopanje snopa, večja bo sprejemna moč, a večje zahteve po usmerjenosti.

Prvo lasersko komunikacijo so uspeli izvesti Japonci leta 1995 [12], od takrat so povezave vedno hitrejša (danes že tudi do 10 Gbit/s), tehnologijo pa razvija in uporablja vedno več podjetij. Laserske komunikacije so uporabili v projektu European Data Relay System leta 2014 med sateliti v LEO in GEO, LeoSat za satelite v LEO, prav tako pa tudi BridgeComm in Cloud Constellation.

SpaceX je za tehnologijo svojih medsatelitskih linkov namenil veliko sredstev in ker se je ostala konkurenca tudi odločila za uporabo laserske komunikacije, nočejo razkriti podrobnosti. So pa v vlogi za FCC navedli, da bodo njihovi laserji oddajali elektromagnetno valovanje s frekvenco 10.000 GHz, kar pomeni infrardečo svetlobo. Vsak satelit bo opremljen s štirimi laserskimi komunikacijskimi terminali: eden spredaj, eden zadaj in po eden na vsakem boku (slika 3). Terminala spredaj in zadaj se povezujeja s sateliti v isti tirnici, zato ostajata ves čas enako usmerjena, terminala na bokih pa se morata premikati in slediti satelitom v drugih tirnicah, saj se relativno drug na drugega ves čas premikajo.



Slika 3: Konstelacija Starlink satelitov s štirimi laserskimi terminali na vsakem satelitu

Paul Cornwell iz podjetja Mynaric pravi, da bi lahko 7–15 kg težak laserski terminal prenašal informacije s hitrostjo 10 Gbit/s na 4500 km dolgi medsatelitski povezavi [13]. Mynaric je nemško podjetje za lasersko komunikacijo, ki razvija in izdeluje laserske izdelke, ki omogočajo hitre brezžične prenose podatkov na dolge razdalje. Njihovi trenutni izdelki podpirajo 10 Gbit/s hitrosti, v prihodnosti pa obljublajo večterabitne povezave. Na svoji spletni strani imajo zapisano, da bodo od leta 2020 naprej pripravljene na masovno produkcijo svojih laserskih terminalov, kar lahko med drugim pomeni, da s svojimi produkti ciljajo na podjetja z večjimi konstelacijami, kot je SpaceX.

5 Zemeljski segment

Nedvomna prednost geostacionarne tirnice je v dokaj preprosti izdelavi sprejemnih zemeljskih postaj, saj je satelit vedno nad isto točko Zemlje in je zemeljska antena usmerjena vedno v isto točko na nebu.

Ker se sateliti Starlink gibljejo zelo hitro v svojih tirnicah, je sledilna oprema za antene zelo draga (ne glede na to, ali je sledenje izvedeno pri zemeljski opremi ali pa sateliti usmerjajo svoje sevalne snope v določene točke ob vsakem preletu).

Uporabniški terminali za omrežje Starlink se za razliko od drugih podobnih ponudnikov (Iridium, Globalstar, Thuraya in Inmarsat) ne bodo direktno povezovali na satelitsko omrežje, ampak se bodo povezali z bazno postajo v velikosti satelitskega krožnika s premerom 0,48 m. Bazna postaja Starlink bo opremljena z več antenami, ki bodo s pomočjo faznih sukalnikov sledile satelitom. [14] Bazne postaje so lahko nameščene kjerkoli, le pod pogojem, da imajo odprt pogled na nebo.

Za prenos podatkov sateliti uporabljajo mikrovalovne frekvence, ki jih glede na valovno dolžino razdelimo v več frekvenčnih pasov. Pri satelitskem internetu se uporabljajo pasovi L (1–2 GHz), Ku (12–18 GHz), K (18–27 GHz), Ka (27–40 GHz) in V (40–75 GHz). Načeloma višja frekvenca omogoča možnost uporabe širših frekvenčnih kanalov in s tem prenos več informacij, a prinaša tudi svoje težave, kot je neposredna vidljivost (angl. line of sight – LOS), kar pa pri satelitskih komunikacijah ni problem. Zaradi večjega slabljenja skozi ozračje se dandanes večinoma uporablja pas Ka, v prihodnosti pa lahko pričakujemo uporabo pasu V. Glede na dokumentacijo, ki jo je Starlink oddal na FCC, bodo zemeljski terminali imeli antene na 11,83 GHz z dobitkom 33,2 dBi in 14,25 GHz z dobitkom 36,6 dBi. [14] Zemeljski oddajniki bodo imeli oddajno moč manjšo od 4,06 W in adaptivno modulacijo od BPSK do 64QAM [14], kar bo omogočalo prilagodljivost komunikacijskega kanala glede na vremenske razmere.

6 Zaključek

Vloga Starlinka je zapolnjevati telekomunikacijsko praznino, ki vlada v manj razvitih delih sveta, in vzpostaviti konkurenco v predelih, kjer je trenutno mogoč dostop preko enega samega operaterja. Vzdrževanje zvez na relacijah satelit–Zemlja in satelit–satelit ni trivialno, ker se topologija omrežja spreminja. Zahtevana je hitra predaja zvez zaradi velikih hitrosti gibanja satelitov. Protokoli morajo imeti toleranco za relativno visoke zakasnitve in slabljenja signalov pri komunikaciji satelitov z zemeljskimi postajami ali terminali. Poleg satelitov pa so pomembni še zemeljski sprejemniki in oddajniki ter uporabniški terminali.

7 Literatura

- [1] Hubert Fröhlich, Boštjan Batagelj “Širokopasovni mobilni dostop preko satelitskih komunikacij”, *Triindvajseta delavnica o telekomunikacijah VITEL: Širokopasovna mobilna omrežja*, 23 in 24. november 2009, Brdo pri Kranju, Slovenija, str. 40–43, 2009.
- [2] “Satelitski internet, kjerkoli in povsod”, Novatel d.o.o., dostopano 20. 7. 2020, dostopno na: <https://satelitski-internet.si/>
- [3] Neva Blazetič “Internet prek satelita”, *Primorske novice*, 22. April 2009, št. 93, str. 6, 2009.
- [4] Boštjan Batagelj “5G ni nič revolucionarnega, zarota proti človeštvu pa prav tako ne”, *Monitor*, let. 30, št. 3, str. 28–31, 2020.
- [5] Matjaž Vidmar “Tirnice umetnih satelitov”, 2. poglavje v *Uporaba vesoljskih tehnologij*, urednik Drago Matko, Radovljica: Didakta, 1996.
- [6] Tomaž Rodič, Drago Matko, Krištof Oštir, Boštjan Batagelj, Marko Peljhan, Tomaž Zwitter, Barbara Malič, Tomaž Šuštar “Small satellites technologies from newcomers perspective - Slovenian case Space.si”, *Proceedings of the 4S Symposium. Small Satellites Systems and Services Symposium*, Madeira, Portugal, 31 May - 4 June 2010, Centre National d'Études Spatiales: = CNES, str. 1–11, 2010.
- [7] Elon Musk “SpaceX Seattle 2015”, dostopano 20. 7. 2020, dostopno na: <https://youtu.be/AHeZHyOnsm4> (3 min–4 min)
- [8] “Sateliti Starlink BODO uničili pogled na zvezdno nebo!”, e-Spika, 3. 12. 2019, dostopano 20. 7. 2020, dostopno na: <http://astronomska-revija-spika.si/bodo-sateliti-starlink-unicili-pogled-na-zvezdno-nebo/>
- [9] Tomaž Zwitter, “Bomo gledali le še satelite in ne zvezd?”, Večer, 1. 2. 2020, dostopano 20. 7. 2020, dostopno na: <https://www.vecer.com/10123755>
- [10] Jon Brodnik, “Satellite Internet faster than advertised, but latency still awful”, *Arstechnica*, dostopano 20. 7. 2020, dostopno na: <https://arstechnica.com/information-technology/2013/02/satellite-internet-faster-than-advertised-but-latency-still-awful>
- [11] Jeff Foust “SpaceX's space-Internet woes: Despite technical glitches, the company plans to launch the first of nearly 12,000 satellites in 2019”, in *IEEE Spectrum*, vol. 56, no. 1, pp. 50–51, Jan. 2019, doi: 10.1109/MSPEC.2019.8594798.
- [12] Kenichi Araki, Yoshinori Arimoto, Motokazu Shikatani, Masahiro Toyoda, Morio Toyoshima, Tetsuo Takahashi, Seiji Kanda, Koichi Shiratama, “Performance evaluation of laser communication equipment onboard the ETS-VI satellite,” *Proc. SPIE 2699, Free-Space Laser Communication Technologies VIII*, (22 April 1996); <https://doi.org/10.1117/12.238434>
- [13] Jeff Hecht, “Laser Links will link small satellites to Earth and each other”, *Laser Focus World*, marec 2020, dostopano 20. 7. 2020, dostopno na: <https://www.laserfocusworld.com/lasersources/article/14104017>
- [14] “Application for Earth station authorizations”, dostopano 11. 7. 2020, dostopno na: <https://fcc.report/IBFS/SES-LIC-20190211-00151/1619048.pdf>