

Vrednotenje tehničnih lastnosti komunikacijskega omrežja majhnih satelitov Starlink

Žiga Andrejc, Boštjan Batagelj

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

Povzetek. Cilj vseh komunikacijskih satelitskih povezav je, da se za dobrobit človeštva zadovoljijo ogromne komunikacijske potrebe s pošiljanjem signala najboljše kakovosti z najnižjo pasovno širino in močjo ter z uporabo najpreprostejše in najprimernejše strojne opreme. Za doseganje teh ciljev se danes načrtovanje komunikacijskih satelitskih sistemov preusmerja iz geostacionarne tirnice v nižje zemeljske tirnice, kjer se signal najboljše kakovosti izvede z zmanjševanjem verjetnosti napak in zakasnitev. Pri konstelacijskem sistemu majhnih satelitov je ob zasnovi zaželeno, da se zmanjšajo zapletenost in stroški implementacije predlaganega sistema, potrebna prenosna moč, ki se pretvori v razmerje med signalom in šumom, in uporabljeni frekvenčni spekter.

V delu je ovrednoteno 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. Glavni namen prispevka je jasno prikazati tehnične lastnosti omrežja Starlink, ki jih podjetje SpaceX običajno ne razkriva podrobno v javno dostopnih predstavitev.

Ključne besede: Starlink, satelitsko omrežje, telekomunikacijsko omrežje, širokopasovni dostop, nizka zemeljska tirnica

Evaluation of the Starlink Small Satellite Communications Network Technical Specifications

In all links involving communications satellites, the aim is to send the best-quality signal with the lowest bandwidth and power using the simplest and most appropriate hardware. This is for everyone's benefit, because it is necessary to satisfy enormous demands for all types of communications. For the purpose of achieving these targets, the design of communications-satellite systems is being shifted from the geostationary orbit to lower Earth orbits, where the best-quality signal is achieved by minimizing the probability of error and latency. In a small-satellite constellation system, the design minimizes the complexity and the cost of implementing the proposed system, reduces the required transmission power, which translates into signal-to-noise ratio, and narrows the frequency spectrum being used.

The work evaluates 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 purpose 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, telecommunications network, broadband access, low Earth orbit

1 UVOD

Izgradnja in poskusi poslovne uporabe svetovnega širokopasovnega omrežja elektronskih komunikacij prek sistema umetnih satelitov so se začeli že pred več kot 10 leti. [1] Tovrstne satelitske storitve, ki so alternativa zemeljskim omrežjem iz optičnih vlaken ali brezžičnim povezavam, pa niso tuje niti slovenskemu programu za zagotavljanje širokopasovnih povezav na podeželju, v Posočju se je zgodba začela odvijati že leta 2009. [2] V nasprotju z običajnimi zemeljskimi komunikacijskimi omrežji, pri katerih internetni promet potuje po optičnih kabliah 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. Kljub trenutni razširjenosti zemeljskih fiksni in mobilni omrežij pa vzpostavitev resnično globalnega internetnega omrežja, ki bo lahko ponujalo storitve uporabnikom ne glede na lokacijo, brez satelitske tehnologije ne bo mogoča. Nov globalni internet, ki bo zagotovljen brez lokalnih telekomunikacijskih operaterjev, bo odporen proti lokalnemu cenzuriranju in omejevanju storitev, a bo na žalost vodil v globalni monopol in ogrozil nevtralnost interneta. [3]

Trenutno satelitsko internetno omrežje zagotavljajo veliki in zmogljivi sateliti, nameščeni v geostacionarni

tirnici (angl. geostationary orbit – GEO) [4], katerih slabost je relativno velika zakasnitev signala (Δt) zaradi medsebojne oddaljenosti med uporabnikom na Zemlji in satelitom. Teoretična zakasnitev v obe smeri za opazovalca, ki ima geostacionarni satelit v nadglavišču (zenitu), je podana kot

$$\Delta t_{zenit} = 2 \cdot \frac{h_{GEO}}{c_0}, \quad (1)$$

kjer je h_{GEO} višina geostacionarne tirnice nad zemeljskim ekvatorjem, ki znaša 35.786 km, in c_0 hitrost razširjanja elektromagnetnega valovanja v praznem prostoru, ki v približku znaša $3 \cdot 10^8$ m/s.

Za opazovalca, ki ima geostacionarni satelit na obzorju (horizontu), pa se teoretična zakasnitev v obe smeri izračuna kot

$$t_{horizont} = 2 \cdot \frac{\sqrt{(h_{GEO} + R_Z)^2 - R_Z^2}}{c_0}, \quad (2)$$

kjer je R_Z polmer Zemlje, ki znaša 6.378 km. Teoretična dvosmerna zakasnitev, ki se razpenja med 238 ms in 278 ms, se zaradi obdelave signala na satelitu in tudi štirikratnega potovanja razdalje med Zemljo in satelitom, ker geostacionarni sateliti nimajo medsatelitskih zvez, v praksi podaljša na 600 ms ali več. [5] Z namenom zmanjšati zakasnitve in omogočiti storitev čim večjemu številu uporabnikov 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), katerih lastnosti primerja tabela 1. Zaradi ekonomije obsega in kratke življenjske dobe se v LEO nameščajo majhni sateliti, kjer svojo vlogo v zadnjih letih utrjuje tudi Slovenija [6, 7].

Tabela 1: Lastnosti tirnic 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

Izzivov, ki se pojavljajo pri gradnji širokopasovnega satelitskega internetnega omrežja v LEO, je več. [1] Vzdrževanje zvez na relacijah satelit–satelit in satelit–Zemlja ter obratno ni trivialno, ker se topologija omrežja spreminja. Komunikacijski protokoli morajo omogočati mobilnost tako mrežnih vozlišč na satelitih kot terminalov na Zemlji in imeti toleranco za spreminjajoče in visoke zakasnitve ter slabljenja signalov pri komunikaciji. V novi arhitekturi omrežja podatke procesirajo in usmerjajo tudi sateliti, ki morajo

biti zaradi velikih hitrosti gibanja sposobni hitre predaje zvez.

Med aktualnimi projekti majhnih satelitov v LEO je medijsko najbolj odmeven Starlink podjetja SpaceX. Projekt je prvič ugledal luč januarja leta 2015, ko je svetu svojo idejo predstavil direktor in lastnik podjetja Elon Musk. [8] Ob predstavitvi je povedal, da je njihov cilj prenos večine internetnega prometa na dolgih razdaljah in okrog 10 % lokalnega internetnega prometa nekega območja. Starlink je zasnoval, da omogoči hiter in cenovno ugoden prenos velikih količin podatkov na odročnih območjih, kamor žične povezave ne sežejo. Prav tako je izpostavil, da imajo satelitska internetna omrežja prednost pred zemeljskimi, saj je hitrost elektromagnetnega valovanja za približno 30 % višja v vakuumu kot v optičnem vlaknu in je potrebnih manj vozlišč, da informacija prispe na oddaljen cilj. SpaceX se pri vzpostavitvi omrežja majhnih satelitov sooča z izzivi visokih cen satelitov, izstrelitve predmetov v tirnice in opreme na uporabnikovi strani, kar se odraža tudi v spreminjanju dokumentacije, ki jo vlaga na ameriško Zvezno komisijo za komunikacije (angl. Federal Communications Commission – FCC). [9]

Pričujoč prispevek v nadaljevanju vrednoti tehnične lastnosti satelitskega širokopasovnega komunikacijskega omrežja Starlink podjetja SpaceX, kjer so v naslednjem poglavju pregledane in komentirane glavne tehnične značilnosti omrežja majhnih satelitov Starlink. Nato pa sta jasno prikazana vesoljski segment z medsatelitskimi zvezami in zemeljski segment z uporabniškim terminalom. V zaključku so povzete lastnosti sistema in ugotovitve prvih testnih uporabnikov.

2 GLAVNE ZNAČILNOSTI STARLINKA

2.1 Pokritost in zakasnitve

Pri omrežju majhnih satelitov Starlink se časovne zakasnitve minimizira s tem, da se satelite namešča v LEO, kjer pa je glavna pomanjkljivost majhno vidno polje. Posamezen satelit opazuje oziroma omogoča komunikacijo le na majhnem geografskem območju na Zemlji, kot je prikazano na sliki 1. V fazi nepopolne konstelacije bo uporabnik lahko komuniciral s satelitom samo pri elevacijah, ki bodo večje od 25°. [10]

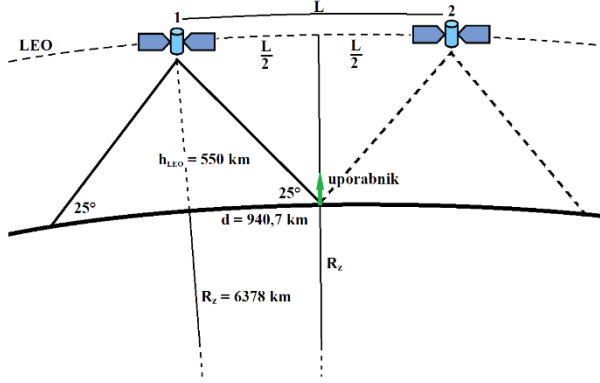
Če privzamemo, da je ekscentričnost tirnice satelita Starlink enaka nič, kar pomeni, da potuje po krožnici, se hitrost potovanja izračuna po izrazu

$$v_{SAT} = \sqrt{\frac{\mu}{R_Z + h_{LEO}}}, \quad (3)$$

kjer je h_{LEO} višina tirnice, μ pa težnostna konstanta Zemlje, ki znaša $3,986005 \cdot 10^{14}$ m³/s². Satelit Starlink, ki je na višini 550 km nad Zemljinim površjem [10], se giblje s hitrostjo 7,585 km/s. Če zanemarimo hitrost, ki jo ima uporabnik zaradi vrtenja Zemlje in znaša največ na ekvatorju, kjer je 0,47 km/s, lahko izračunamo čas, ko satelit omogoča uporabniku signal

$$t_{zveze} = \frac{L}{v_{SAT}}, \quad (4)$$

kjer je L razdalja, ki jo prepotuje satelit, medtem ko omogoča zvezo med uporabnikom in satelitom.



Slika 1 Premik satelita, medtem ko je viden uporabniku.

Iz podobnih krožnih izsekov na sliki 1 sledi

$$t_{zveze} = \frac{2}{v_{SAT}} \cdot \frac{(R_Z + h_{LEO}) \cdot d}{R_Z}, \quad (5)$$

kjer je d polmer geografskega območja, ki ga satelit pokriva, in znaša 940,7 km [10]. V primeru minimalne elevacije 25° , bo satelit, medtem ko bo uporabniku omogočal storitev, naredil 20043,6 km, za kar bo potreboval 4,49 minute. Ko bo konstelacija komunikacijskega omrežja majhnih satelitov Starlink popolna, bo minimalna elevacija 40° , satelit pa bo pokrival geografsko območje s polmerom 573,5 km in bo po enačbi (5) uporabniku na razpolago zgolj 2,74 minute.

Ker imajo sateliti v LEO manjšo geografsko območje pokrivanja, se jih za globalno pokritost potrebuje več. Za nemoten sprejem se morajo pokrivna območja prekrivati in antena na uporabniški strani mora preklopiti na sosednji satelit po vsaj 4,49 minute oziroma 2,74 minute. Krajši časi, povezave s satelitom, zahtevajo hitro odzivnost pri uporabniški anteni.

Od geostacionarnih nižje Starlinkove tirnice, prinašajo nižje zakasnitve pri potovanju signala. Podobno, kot se pri geostacionarnemu satelitu po enačbi (1) izračuna teoretično zakasnitev v obe smeri za opazovalca, ki ima satelit v zenitu, je mogoče izračunati minimalno teoretično dvosmerno zakasnitev tudi za satelit Starlink.

$$\Delta t_{zenit} = 2 \cdot \frac{h_{LEO}}{c_0}. \quad (6)$$

Glede na elevacijski kot (El), pod katerim se vidi satelit, je mogoče s pomočjo kosinusnega izreka izračunati maksimalno dvosmerno zakasnitev

$$\Delta t_{El} = 2 \cdot \frac{\sqrt{(R_Z + h_{LEO})^2 + R_Z^2 - R_Z(R_Z + h_{LEO})\cos\alpha}}{c_0}, \quad (7)$$

kjer je središčni kot α podan z izrazom

$$\alpha = \arccos\left(\frac{R_Z}{R_Z + h_{LEO}} \cos(El)\right) - El. \quad (8)$$

Teoretično najnižja zakasnitev v obe smeri za satelit Starlink na višini 550 km v zenitu znaša 3,6 ms. Glede na elevacijski kot 40° ali 25° pa je dvosmerna zakasnitev maksimalno 5,4 ms oziroma 7,5 ms.

Glede na hitrejšo razširjanje elektromagnetnega signala po daljši poti prek satelitskega omrežja in počasnejše razširjanje po krajšem optičnem omrežju je mogoče določiti mejo, od katere pride signal na cilj hitreje prek satelitskega omrežja kot prek neposrednega optičnega vlakna. Če obravnavamo zgolj hitrosti elektromagnetnega valovanja in v izračunu ne upoštevamo časa procesiranja ter usmerjanja signala med različnimi vozlišči, zakasnitev po posamezni komunikacijski poti ovrednotimo kot razliko zakasnitev. Uporaba optičnega vlakna z najkrajšo razdaljo (r) med točkama A in B da zakasnitev

$$t_{AB, vlakno} = \frac{nr}{c_0}, \quad (9)$$

kjer je n lomni količnik vlakna (v približku 1,5). Uporaba satelita Starlink na višini h_{LEO} v zenitu in najkrajše medsatelitske povezave (L) med točkama A in B da

$$t_{AB, satelit} = \frac{2}{c_0} \left(\frac{(R_Z + h_{LEO})r}{R_Z} + h_{LEO} \right). \quad (10)$$

Po združitvi enačbe (9) in enačbe (10) dobimo iskano mejno razdaljo, pri kateri je potovanje signala prek satelitske zveze enako potovanju signala prek optičnega vlakna.

$$r = \frac{2h}{n - 1 - \frac{h}{R_Z}} \quad (8)$$

Iz izračunov vidimo, da bo komunikacija na razdalje, večje od 2.658,5 km, potekala hitreje prek satelitov v LEO na višini 550 km kot prek neposrednega optičnega vlakna. Ob upoštevanju, da satelita nista vedno v zenitu, se ta mejna razdalja nekoliko podaljša. [11] Vendar tudi optično vlakno ne poteka vedno po najkrajši razdalji in prek optične povezave signal prepotuje več vozlišč kot prek satelitskega omrežja. V korist omrežju Starlink govori tudi to, da sistem uporablja protokol P2P (angl. peer-to-peer), ki naj bi bil preprostejši od IPv6, vendar pa vključuje tudi »end-to-end« šifriranje.

2.2 Razpored satelitov

Leta 2017 je podjetje SpaceX od FCC dobilo dovoljenje za izstrelitev 12.000 satelitov, za katere je načrtovano, da bodo krožili okrog Zemlje v različnih tirnicah, kot je to prikazano v tabeli 2. Prvih 4.400 satelitov bo v tirnicah na višinah okoli 550 km in bodo delovali v frekvenčnih pasovih K_u (12–18 GHz) in K_a (26,5–40 GHz). [12] Preostalih 7.600 satelitov bo uporabljalo frekvenčni pas V (40–70 GHz) in bodo krožili okrog Zemlje na višinah okoli 340 km (angl. very low Earth orbit – VLEO). [13] 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 km. S prvimi 12.000 sateliti v LEO bodo pokrivali ves svet med geografskimi širinami 70°

severno in 70° južno. Konstelacija takšnih razsežnosti pa skrbi profesionalne in amaterske astronome doma in po svetu, saj so prepričani, da bo število svetlih predmetov motilo opazovanje vesolja. [14, 15] Podjetje SpaceX je v odgovor na očitke astronomov na satelite naneslo temen premaz za zmanjšanje bleščanja, vendar je ta povzročal pregrevanje komponent, zato so našli novo rešitev v senčnikih. [16]

Tabela 2: Najnovejši razpored satelitov Starlink.

Parameter	prva faza (1.584 satelitov)	finalna faza (2.824 satelitov)			
	število tirnic	72	72	36	6
število satelitov v tirnici	22	22	20	58	43
višina [km]	550	540	570	560	560
naklon tirnice [°]	53	53,2	70	97,6	97,6

Tabela 3: Razpored satelitov VLEO-konstelacije.

število satelitov na določeni višini	2.547	2.478	2.493
višina [km]	345,6	340,8	335,9
naklon tirnice [°]	53	48	42

Poleg majhnega vidnega polja prinaša nizka zemeljska tirnica tudi hitro upadanje višine zaradi upora z višjimi plastmi ozračja, zaradi česar je za ohranjanje tirnice potrebno ponovno pospeševanje ali pa izstrelitev novega nadomestnega satelita. Hitro upadanje tirnice ima tudi pozitivno stran, saj bodo nedelujoči sateliti sami padli proti Zemlji in izgoreli v ozračju, kar pa pomeni manj vesoljskih smeti.

Glede na to, da je SpaceX leta 2017 dobil dovoljenje za skupno število 11.927 satelitov Starlink in da je njihova predvidena življenjska doba 6 let, bo na Zemljo vsako leto padlo 1.987 satelitov, kar je v povprečju 5,4 satelita na dan. Čeprav je bilo tveganje za človeške žrtve zaradi satelitov Starlink 1 : 18.200 (vsake 6 let en ranjen ali ubit Zemljan) [17], kar je nad zahtevami Evropske vesoljske agencije (ESA) in Ameriške nacionalne zrakoplovne in vesoljske uprave (NASA), je FCC marca 2019 s podjetjem SpaceX dosegla dogovor o preoblikovanju satelitov tako, da v celoti zgorijo v ozračju. [18]

3 VESOLJSKI SEGMENT

Celoten vesoljski segment sestavlja tisoče majhnih satelitov, vsak tehta po 227 kilogramov in je po oceni velikosti 3,11 m x 1,49 m, ko je sončni panel zložen. [19] Prvih 1.584 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 okoli vsakega obroča, tako da bodo imeli vedno na vidiku sosednje satelite v svoji tirnici in prav tako satelite v sosednji tirnici.

Internetni promet in usmerjanje poteka prek satelitov, in ne prek vozlišč na Zemljinem površju. Posamezna zemeljska postaja se poveže s satelitom, ki je v njenem vidnem polju, in ko se ta satelit premakne zunaj dosega,

ta povezavo preda na naslednji satelit po svoji tirnici. Nato se signal preusmeri skozi niz medsatelitskih povezav, dokler ne doseže satelita, ki je v vidnem polju ciljne zemeljske postaje.

Sateliti so rezultat masovne proizvodnje, kar pomeni veliko nižjo ceno na posamezno enoto, kot jo imajo drugi podobni proizvodi. Za ohranjanje tirnice, pridobivanje višine in ne nazadnje tudi izhod iz tirnice se uporablja pogon na Hallov pojav (angl. Hall effect thruster – HET) s plinom kripton, ki je vrsta ionskih potisnikov, v katerih je pogonsko gorivo pospešeno s pomočjo električnega polja. Potisniki HET s plinom kripton imajo bistveno večjo erozijo pretočnega kanala v primerjavi s podobnim električnim pogonskim sistemom, ki deluje s ksenonom, vendar z nižjimi stroški pogonskega goriva. [20]

3.1 Medsatelitske zveze

Sateliti Starlink med seboj komunicirajo s pomočjo optičnih laserskih linkov, podatke na Zemljo pa pošiljajo v frekvenčnih pasovih Ka, Ku in V, odvisno od višine tirnice, v kateri so. Povezava do Zemlje je radijska, saj je bolj zanesljiva kot laserska. Radijski signali v nasprotju z infrardečimi mnogokrat bolje prodirajo skozi oblačnost in padavine. Za podjetja, ki se bodo vseeno odločila za laserske linke do Zemlje, pa je Posvetovalna komisija za vesoljske podatkovne sisteme (angl. Consultative Committee for Space Data Systems – CCSDS) standardizirala uporabo 1.550 nm za promet navzdol in 1.030–1.080 nm za promet navzgor, tako da so valovne dolžine ločene. [21]

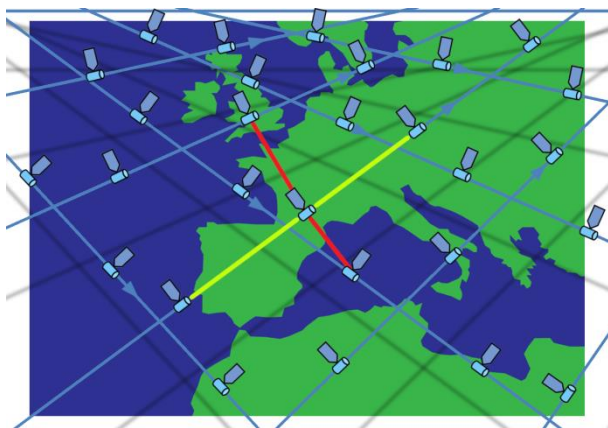
Optična komunikacija med sateliti bo uporabljala laserje in je v večini razvita na podlagi zemeljskih optičnih sistemov. Laserji oddajajo infrardečo svetlobo, ki je prav tako elektromagnetno valovanje kot radijski valovi, le da imajo kar nekaj prednosti. Ker je frekvenca infrardeče svetlobe veliko višja (od 300 GHz do 470 THz), je na razpolago več pasovne širine, kar pa pomeni, da lahko teoretično prenesemo mnogokrat več informacij kot z radijskimi valovi (dosežena rekordna hitrost z milimetrskimi valovi je 40 Gbit/s, z lasersko povezavo pa 13.160 Gbit/s). [22] Prav tako infrardeči signali niso tako regulirani kot radijski. Razlog za to ni dejstvo, da je to novejša tehnologija, ampak širjenje radijskega valovanja. Radijski signal, poslan z nizkozemeljske tirnice, lahko pokrije več tisoč kvadratnih kilometrov veliko območje na Zemlji, in če več ljudi uporablja enak kanal, pride do prekrivanja oziroma motenj. Po drugi strani pa veliko bolj usmerjen laserski žarek, poslan z Lune, pokrije le okrog 20 kvadratnih km, zaradi tega in velikega razpona frekvenc pa zelo težko pride do motenj. Prav tako za lasersko komunikacijo porabimo veliko manj energije (radijski oddajnik na Luni bi porabil več kot 50 x več energije kot infrardeči oddajnik). V vesolju je doseg laserske komunikacije v redu več deset tisoč kilometrov, zato je primerna za medsatelitske povezave. Zelo usmerjen žarek pa prinaša inženirske izzive, kot je »ciljanje« z žarkom in njegovo sprejemanje, saj že najmanjše

vibracije na razdalji več deset tisoč kilometrov pomenijo nekajmetrsko odstopanje. Pri laserski komunikaciji je bistven kompromis med usmerjenostjo in močjo; manjše je odstopanje snopa, večja bo sprejemna moč, a večje bodo tudi zahteve po usmerjenosti.

Prvo lasersko komunikacijo je uspelo izvesti Japoncem leta 1995 [23], od takrat so povezave vedno hitrejšje (danes že tudi do 10 Gbit/s), tehnologijo pa razvija in uporablja vedno več podjetij. Laserske komunikacije so uporabili pri 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.

3.2 SpaceX-ovi »vesoljski laserji«

SpaceX je za tehnologijo svojih medsatelitskih linkov namenil veliko sredstev, in ker se je konkurenca prav tako odločila za uporabo laserske komunikacije, nočejo razkriti podrobnosti. V vlogi za FCC pa so navedli, da bodo njihovi laserji oddajali elektromagnetno valovanje s frekvenco nad 10.000 GHz, kar pomeni infrardečo svetlobo. Vsak satelit bo opremljen s 4 laserskimi komunikacijskimi terminali, eden bo spredaj, eden zadaj in po eden na vsakem boku (slika 2). Terminala spredaj in zadaj se povezujeta 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 2: Konstelacija satelitov Starlink s 4 laserskimi terminali na vsakem satelitu.

Pri prenosu v živo 11. misije Starlink 3. septembra 2020 so javno naznanili, da so 2 satelita poskusno že opremili s svojimi laserskimi terminali, imenovanimi space lasers, in uspešno med njimi prenesli več sto GB-podatkov. [24] Z današnjo tehnologijo je s pomočjo 7–15 kg težkega laserskega terminala mogoče prenašati informacije s hitrostjo 10 Gbit/s na 4.500 km dolgi medsatelitski povezavi. [25] Trenutni izdelki nemškega podjetja Mynaric podpirajo 10 Gbit/s, v prihodnosti pa obljublajo večterabitne povezave. Na svoji spletni

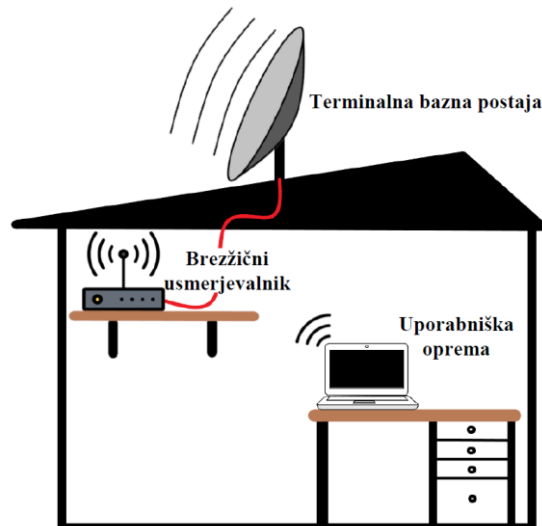
strani imajo zapisano, da bodo od leta 2020 pripravljene na masovno produkcijo svojih laserskih terminalov. Kar lahko med drugim pomeni, da s svojimi produkti merijo na podjetja z večjimi konstelacijami, kot je SpaceX.

4 ZEMELJSKI SEGMENT

Podobno kot ni trivialno vzdrževanje zvez na relacijah satelit–satelit, ker se topologija omrežja Starlink spreminja, je zapletena tudi povezava Zemlja–satelit–Zemlja, saj mora biti predaja zvez hitra zaradi velikih hitrosti gibanja satelitov. V primerjavi z geostacionarno tirnico, kjer je prednost v preprosti izdelavi in nameščanju sprejemnih zemeljskih postaj, saj je satelit vedno nad isto točko Zemlje, morajo pri komunikaciji zemeljskih postaj in terminalov s premikajočimi se sateliti na nižjih tirnicah protokoli upoštevati toleranco za relativno visoke zakasnitve in slabljenja signalov.

Ker se sateliti v LEO gibljejo zelo hitro, je sledilna oprema svojevrsten inženirski izziv ne glede na to, ali je sledenje izvedeno pri zemeljski opremi ali sateliti usmerjajo svoje sevalne snope v določene točke ob vsakem preletu.

Pri sistemu Starlink se uporabniške naprave v nasprotju z drugimi podobnimi ponudniki (Iridium, Globalstar, Thuraya in Inmarsat) ne povezujejo neposredno na satelit, ampak se povezujejo z brezžičnim usmerjevalnikom, ki je povezan s terminalno bazno postajo v velikosti satelitskega krožnika s premerom 0,48 m, kot to prikazuje slika 3.



Slika 3: Skica prikazuje uporabnikov prenosni računalnik, povezan na internet prek brezžičnega usmerjevalnika in terminalne bazne postaje Starlink.

4.1 Povezava s sateliti Starlink

Najtežja naloga bazne postaje Starlink je sledenje satelitom. Za lažjo izvedbo je to izvedeno z mehanskim vrtenjem snopa na grobo in elektronskim vrtenjem na fino, ki je izvedeno z več antenami, ki s pomočjo faznih sukalknikov sledijo satelitu. [26] Mehansko vrtenje je izvedeno po azimutu in elevaciji ter je uvedeno z

namenom zmanjševanja elementov antenske skupine. Terminalne bazne postaje so lahko nameščene kjerkoli, imajo odprt pogled na nebo. Pri nameščanju se sledi zelo enostavnim navodilom: vključi v električno, usmeri v nebo. [27]

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), vendar pri satelitskih komunikacijah to ni težava. Zaradi večjega slabljenja skozi ozračje se danes 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. [26] Zemeljski oddajniki bodo imeli oddajno moč manjšo od 4,06 W in adaptivno modulacijo od BPSK do 64QAM [26], kar bo omogočalo prilagodljivost komunikacijskega kanala glede na vremenske razmere.

Antena zemeljske bazne postaje bo komunicirala s tistimi sateliti, ki so vidni pod minimalnim elevacijskim kotom. V zgodnji fazi konstelacije bo ta kot okrog 25°, ko bo v zraku več satelitov in jih bo dovolj v vidnem polju uporabnika, pa se bo povečal na 40°. [28] Tako bodo sateliti usmerjeni na manjše območje in bodo svoje zmogljivosti razdelili med manj uporabnikov.

4.2 Omrežni prehodi

Da bo omrežje majhnih satelitov Starlink povezano v obstoječe internetno omrežje, so potrebni omrežni prehodi, na katere se bodo sateliti povezovali, ko bodo prenašali podatke. Tudi v tem primeru je uporabljena antenska skupina (angl. phased array), ki ustvari točko usmerjenega snopa iz niza manjših nepremičnih anten. Ena antenska skupina lahko uporabi na stotine ali tisoče antenskih elementov z medsebojno povezanostjo, ki jo ponuja zapletena mreža za oblikovanje snopa (angl. beamforming). Z elektronsko spremembo relativne faze signala, ki ga odda vsak antenski element, (konstruktivna in destruktivna) kombinacija vseh teh majhnih signalov ustvari večji usmerjeni snop v vnaprej določeni želeni smeri. Ker je ta postopek popolnoma elektronski, se lahko nastalo smer snopa popolnoma nadzira in usmerja. Tako je mogoče spremljati gibanje kateregakoli satelita na nebu ne glede na to, kako ali kam se premika, brez potrebe po mehansko premikajočih se delih. [29]

Do avgusta 2020 je SpaceX-ovo sestrsko podjetje SpaceX Services na FCC zaprosilo za dovoljenje 43 prehodnih postaj, razporejenih po celotnih Združenih državah Amerike, Kanadi in Avstraliji. [30] Prav tako so zaprosili za dovoljenje uporabe 10 baznih postaj Starlink na pomorskih plovilih [31], kar nakazuje, da

bodo svoje storitve v bližnji prihodnosti začeli ponujati tudi v navtiki.

5 SKLEP IN REZULTATI PRVIH TESTOV

Vloga Starlika je zapolnjevati telekomunikacijsko praznino, ki vlada v manj razvitih delih sveta, in vzpostaviti konkurenco v predelih, kjer je trenutno mogoč dostop prek enega samega operaterja. Zaradi sorazmerno majhnega časa razpoložljivosti posameznega satelita je za stalno pokritost potrebna konstelacija večjega števila manjših satelitov, ki skupaj delujejo kot omrežje in zagotavljajo povezanost v vsakem trenutku.

Od geostacionarnih nižje Starlinkove tirnice prinašajo glede na geostacionarne tirnico toliko nižje zakasnitve, da so primerljive z že obstoječimi kabelskimi in optičnimi omrežji.

Nekateri uporabniki so že dobili priložnost in postali zgodnji uporabnik sistema Starlink v okviru projekta Starlink Beta, s katerim bo podjetje SpaceX pridobilo informacije o delovanju omrežja in ga s tem imelo možnost optimizirati. Z namenom bo beta izkušnja nepopolna. Njihov cilj je vključiti povratne informacije različnih uporabnikov in s tem zagotoviti boljši širokopasovni satelitski internetni sistem.

Beta preizkušanje je bilo sprva namenjeno uslužbencem SpaceX-a in njihovim družinam. Proti koncu oktobra 2020 pa se je začelo javno beta preizkušanje, imenovano »Better Than Nothing Beta«, na katerega se uporabniki lahko prijavijo prek spletne strani, vendar sta trenutni območji preizkušanja le severni del ZDA in južni del Kanade. Javno beta preizkušanje pa ni brezplačno, posameznik mora plačati mesečno naročnino 99 USD in ceno 499 USD za vso strojno opremo, ki vključuje terminalno bazno postajo s satelitsko anteno, brezžični usmerjevalnik, napajalnik in vse povezave med njimi. [32]

V e-poštnem sporočilu, ki ga pošljejo beta kandidatom, obljublajo hitrosti od 50 Mbit/s do 150 Mbit/s ter zakasnitve od 20 ms do 40 ms. [33] Dejanski rezultati, ki jih preizkuševalci trenutno dosegajo, so zakasnitve od 15 ms do 256 ms (povprečje 38 ms) in internetne hitrosti navzdol od 15 Mbit/s do 205 Mbit/s (povprečje 98 Mbit/s). [34] Takšne rezultate dosegajo s trenutno nameščenimi 960 sateliti (december 2020) od predvidenih 4.400 za prvo fazo. Z večjim številom satelitov v tirnicah in zemeljskih postaj ter izboljšano programsko opremo pa je pričakovati doseganje obljubljenih boljših rezultatov.

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] Neva Blazetič, "Internet prek satelita", *Primorske novice*, 22. April 2009, št. 93, str. 6, 2009.

- [3] Boštjan Batagelj, "5G ni nič revolucionarnega, zarota proti človeštvu pa prav tako ne", *Monitor*, let. 30, št. 3, str. 28–31, 2020.
- [4] Matjaž Vidmar, "Tirnice umetnih satelitov", 2. poglavje v *Uporaba vesoljskih tehnologij*, urednik Drago Matko, Radovljica: Didakta, 1996.
- [5] Jon Brodtkin, "Satellite Internet faster than advertised, but latency still awful", dosegljivo: <https://arstechnica.com/information-technology/2013/02/satellite-internet-faster-than-advertised-but-latency-still-awful/#p3n>, dostopano: 29. 12. 2020.
- [6] Tomaž Rodič, et al., "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] Leon Pavlovič, "Slovenija gre v vesolje: zahtevnost tehnologije na krovu satelita", *Elektrotehniški vestnik* 83(3): 81–86, 2016.
- [8] Elon Musk, "SpaceX Seattle 2015", dosegljivo: <https://youtu.be/AHeZHyOnsm4>, dostopano: 29. 12. 2020.
- [9] Dosegljivo: <https://fcc.report/company/Space-Exploration-Holdings-LLC>, dostopano: 29. 12. 2020.
- [10] "SpaceX non-geostationary satellite system attachment a technical information to supplement schedule S", dosegljivo: dostopno: <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20181108-00083/1569860>, dostopano: 29. 12. 2020.
- [11] Mark Handley, "Delay is Not an Option: Low Latency Routing in Space", *HotNets '18: Proceedings of the 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks* November 2018 Pages 85–91, <https://doi.org/10.1145/3286062.3286075>
- [12] "Modification on a Satellite Space Stations filing – SPACEX NON-GEOSTATIONARY SATELLITE SYSTEM", dostopano 14. 8. 2020, dostopno na: <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20200417-00037/2274316>, dostopano: 29. 12. 2020.
- [13] "Application to Launch and Operate on a Satellite Space Stations filing – SPACEX V-BAND NON-GEOSTATIONARY SATELLITE SYSTEM", dostopano 14. 8. 2020, dostopno na: <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20170301-00027/1190019>
- [14] "Sateliti Starlink BODO uničili pogled na zvezdno nebo!", e-Spika, 3. 12. 2019, dosegljivo: <http://astronomska-revija-spika.si/bodo-sateliti-starlink-unicili-pogled-na-zvezdno-nebo/> dostopano 31. 12. 2020.
- [15] Tomaž Zwitter, "Bomo gledali le še satelite in ne zvezd?", *Večer*, 1. 2. 2020, dosegljivo: <https://www.vecer.com/10123755> dostopano: 31. 12. 2020.
- [16] "Astronomy discussion with national academy of sciences", 28. april 2020, dosegljivo: <https://www.spacex.com/updates/starlink-update-04-28-2020/index.html> dostopano: 31. 12. 2020.
- [17] Mark Harris, "Here Are the Odds That One of SpaceX's Internet Satellites Will Hit Someone", *IEEE Spectrum*, 17. 12. 2018, dosegljivo: <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/aerospace/satellites/the-odds-that-one-of-spacexs-internet-satellites-will-hit-someone>, dostopano: 31. 12. 2020.
- [18] Mark Harris, "SpaceX Claims to Have Redesigned Its Starlink Satellites to Eliminate Casualty Risks", *IEEE Spectrum*, 21. 3. 2019, dosegljivo: <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/aerospace/satellites/spacex-claims-to-have-redesigned-its-starlink-satellites-to-eliminate-casualty-risks>, dostopano: 31. 12. 2020.
- [19] Žiga Andrejc, "Komunikacijsko omrežje majhnih satelitov Starlink", diplomsko delo, Ljubljana, 2020.
- [20] K. Holste, et al., "Ion thrusters for electric propulsion: Scientific issues developing a niche technology into a game changer", *Review of Scientific Instruments*, vol. 91, no. 6, 2020, <https://doi.org/10.1063/5.0010134>.
- [21] B. L. Edwards et al., "An Update on the CCSDS Optical Communications Working Group Interoperability Standards," 2019 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), Portland, OR, USA, 2019, pp. 1-9, doi: 10.1109/ICSOS45490.2019.8978979.
- [22] "Mynaric lasers komunikacije", dostopano 30. 12. 2020, dostopno na: <https://mynaric.com/technology/high-speed/>
- [23] Kenichi Araki, et al., "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>
- [24] SpaceX "Starlink mission", dostopano 10. 12. 2020, dostopno na: https://youtu.be/_j4xR7LMCGY?t=598
- [25] 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/lasers-sources/article/14104017>
- [26] "Application for Earth station authorizations", dostopano 29. 7. 2020, dostopno na: <https://fcc.report/IBFS/SES-LIC-20190211-00151/1619048.pdf>
- [27] "Tweet Elon Muska", dostopano 31. 7. 2020, dostopno na: <https://twitter.com/elonmusk/status/1214548764054216704>
- [28] "License on a Satellite Earth Station filing – APPLICATION FOR BLANKET LICENSED EARTH STATIONS", dostopano 31. 7. 2020, dostopno na: <https://fcc.report/IBFS/SES-LIC-20190211-00151/1616678>
- [29] R. Mayo and S. Harmer, "A cost-effective modular phased array", 2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Waltham, MA, 2013, pp. 93-96, doi: 10.1109/ARRAY.2013.6731807.
- [30] "Zemljevid 39 prehodnih postaj in povezave do njihovih FCC vlog", dostopano 31. 7. 2020, dostopno na: https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1H1x8jZs8vfjy60TvKgbYs_grargieVw&ll=37.48936754079531%2C-95.94832939102747&z=5
- [31] "Experimental Description and Antenna Information", dostopano 17. 11. 2020, dostopno na: <https://fcc.report/ELS/Space-Exploration-Holdings-LLC/0773-EX-CN-2020/259301>
- [32] Brett Batie "Starlink Unboxing + Speed Test + Full Installation", dostopano 15.12.2020, dostopno na: https://youtu.be/h0ltx_TUOKA?t=12
- [33] Posnetek zaslona Starlink e-poštnega sporočila, dostopano 12. 12. 2020, dostopno na: <https://i.imgur.com/rIqHpBY.jpg>
- [34] Zbirka testov internetnih hitrosti različnih uporabnikov, dostopno na: https://www.reddit.com/r/Starlink/comments/i9w09n/list_of_confirmed_starlink_speed_tests/ dostopano 31. 12. 2020.

ZAHVALA

Delo je bilo opravljeno v okviru raziskovalnega programa Informacijsko komunikacijske tehnologije za kakovostno življenje – ICT4QoL (št. P2-0246), ki ga je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

Žiga Andrejc je študent podiplomskega magistrskega študijskega programa 2. stopnje Elektrotehnika na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo satelitske informacijsko-komunikacijske tehnologije.

Boštjan Batagelj je leta 2003 na Univerzi v Ljubljani doktoriral s področja optičnih tehnologij. Od leta 1997 je zaposlen na Fakulteti za elektrotehniko, Katedra za informacijsko komunikacijske tehnologije v Laboratoriju za sevanje in optiko. Kot izredni profesor predava in vodi laboratorijske vaje pri nekaterih telekomunikacijskih predmetih na smeri informacijsko-komunikacijskih tehnologij. Je avtor 300 objavljenih člankov in sodeluje pri domačih in mednarodnih raziskovalnih projektih s področja optičnih in radijskih komunikacij. Njegovo raziskovalno delo je povezano z optičnimi tehnologijami, radijskimi komunikacijami ter mikrovalovno fotoniko v raznovrstnih telekomunikacijskih omrežjih, vključno s satelitskimi komunikacijskimi sistemi.