

Povezivanje LEO komunikacijskih satelita

Pristošek Petrik, Lovro

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:396527>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

LOVRO PRISTOŠEK PETRIK

POVEZIVANJE LEO KOMUNIKACIJSKIH SATELITA

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, 2021.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

**POVEZIVANJE LEO KOMUNIKACIJSKIH SATELITA
LINKAGE OF LEO COMMUNICATION SATELLITES
ZAVRŠNI RAD**

Kolegij: Elektronička navigacija

Mentor: doc. dr. sc. David Brčić

Student: Lovro Pistošek Petrik

Studijski smjer: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0035206056

Rijeka, rujan 2021.

Student: Lovro Pristošek Petrik

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0035206056

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom

Povezivanje LEO komunikacijskih satelita

izradio samostalno pod mentorstvom

doc. dr. sc. Davida Brčića

U radu sam primijenio/la metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio/la literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo/la u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao/la sam i povezao/la s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Suglasan/na sam s trajnom pohranom završnog rada u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci te Nacionalnom repozitoriju Nacionalne i sveučilišne knjižnice.

Za navedeni rad dozvoljavam sljedeće pravo i razinu pristupa mrežnog objavljivanja:

a) rad u otvorenom pristupu

b) pristup svim korisnicima sustava znanosti i visokog obrazovanja RH

c) pristup korisnicima matične ustanove

d) rad nije dostupan

Student

Pis Petrik

Lovro Pristošek Petrik

SAŽETAK

Današnji svijet povezaniji je nego ikad prije. Tome je pomogla uporaba komunikacijskih satelita. Uporaba takvih sustava vrlo je jednostavna, no za pružanje kvalitetne usluge iz niske zemaljske orbite potrebno je razmotriti više čimbenika. U ovom radu obrađeni problem usredotočen je na ostvarivanje i prosljeđivanja veza između satelita međusobno i korisnika, time objašnjavajući problematiku ostvarivanja satelitske mreže. Osvrnuvši se na uporabu u pomorstvu, povezivanjem se omogućava uporaba novih sustava te se povećava iskoristivost postojećih, kao i unaprjeđenje logističkog lanca. U radu su ukratko opisani problemi koji nastaju prilikom ostvarivanja satelitske veze te su navedena moguća rješenja. Nadalje valja napomenuti kako navedena rješenja koriste dostupne resurse i tehnologiju za vrijeme kada su predviđena; kulminirajući s najnovijim rješenjem u zadnjem segmentu. Naposljetku su navedeni primjeri postojećih mreža i mreža u izgradnji te primjer satelitskog AIS sustava koji u suradnji s komunikacijskim satelitima može značajno unaprijediti pomorstvo. Zaključno su dani primjeri moguće primjene sustava u pomorstvu, od čega se veći dio prepušta čitateljevoj mašti.

Ključne riječi: niska zemaljska orbita, komunikacijski sateliti, satelitske mreže, satelitske veze

SUMMARY

Today, the world is more connected than ever before, in part with help from communication satellites. Usage of these systems is very simple, but to provide quality service from low Earth orbit several factors need to be considered. In this paper the addressed problems are focused on establishing and forwarding links between satellites and towards users, thus explaining problems of satellite network realization. Referring to use of satellite networks in maritime affairs, possibilities for new systems are created and further more increase usability of existing ones as well as improving the logistics chain. The paper briefly describes the problems that arise when establishing satellite connection while possible solutions are listed. Furthermore, it is important to note that these solutions use available resources and technology at the time they were envisaged; culminating with newest solution in last segment. In the end examples of existing and developing networks are

listed together with an example of satellite AIS that, with assistance from communication satellites, could greatly enhance maritime affairs. In conclusion examples of possible uses of system in maritime traffic are given most of which is left to the reader's imagination.

Key words: low earth orbit, communication satellites, satellite networks, satellite links.

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| SAŽETAK..... | I |
| SUMMARY | I |
| SADRŽAJ | III |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. ORBITE | 2 |
| 2.1 GEOSTACIONARNA ORBITA | 3 |
| 2.2 SREDNJA ZEMALJSKA ORBITA | 3 |
| 2.3 NISKA ZEMALJSKA ORBITA | 3 |
| 2.4 POLARNA ORBITA I ORBITA SINKRONA SA SUNCEM..... | 4 |
| 3. FREKVENCije U SATELITSKOJ KOMUNIKACIJI..... | 5 |
| 4. POGODNOST ORBITA ZA INTERNET | 6 |
| 5. TOPOLOGIJA SUSTAVA | 9 |
| 5.1 AUTOMAT KONAČNOG STANJA | 10 |
| 6. RUKOVOĐENJE VEZOM | 12 |
| 6.1 PROSLJEĐIVANJE VEZE | 12 |
| 6.2 ISKLJUČENJE MEĐUSATELITSKE VEZE..... | 13 |
| 6.3 PRIMOPREDAJA VEZE | 14 |
| 6.4 OPTIMIZACIJA RUTE VEZA | 15 |
| 7. UPRAVLJANJE PROSLJEĐIVANJEM NA TEMELJU DOPPLEROVOG EFEKTA | 15 |
| 7.1 ALGORITAM UPRAVLJANJA | 17 |
| 7.2 PROCEDURA PROSLJEĐIVANJA VEZE..... | 17 |
| 7.3 ODREĐIVANJE POLOŽAJA | 18 |
| 8. PRIMJERI SATELITSKIH MREŽA..... | 19 |
| 8.1 IRIDIUM SUSTAV | 19 |
| 8.2. Starlink sustav (u izgradnji) | 22 |
| 9. SATELITSKI AIS (S-AIS) | 24 |
| 10. UPORABA SATELITSKIH MREŽA | 27 |
| 11. ZAKLJUČAK | 28 |
| LITERATURA..... | 29 |
| POPIS TABLICA..... | 31 |
| POPIS SLIKA | 31 |
| POPIS SKRAĆENICA | 31 |

1. UVOD

Suvremeni svijet sadrži veliku količinu informacija koja predstavlja iznimno velik izvor prihoda ukoliko se pravilno iskoriste. Razmjenom potrebnih informacija moguće je predvidjeti buduća stanja sustava koji se promatraju. U pomorstvu, komunikacija i razmjena informacija je od iznimno velike važnosti. Primopredajom informacija sakupljenih na plovilu omogućava se kvalitetnije iskorištavanje resursa potrebnih za učinkovito funkcioniranje pojedinih grana logistike, a time i cijelog sustava robne razmjene. Sakupljanjem određenih informacija o okolišu, moguće je do određene točnosti, predvidjeti razvoj i promjene istog. Praćenjem podataka o aktivnostima brodova moguće je poboljšati nadzor pojedinih područja te ostvariti kvalitetniju zaštitu okoliša i upravljanje resursima.

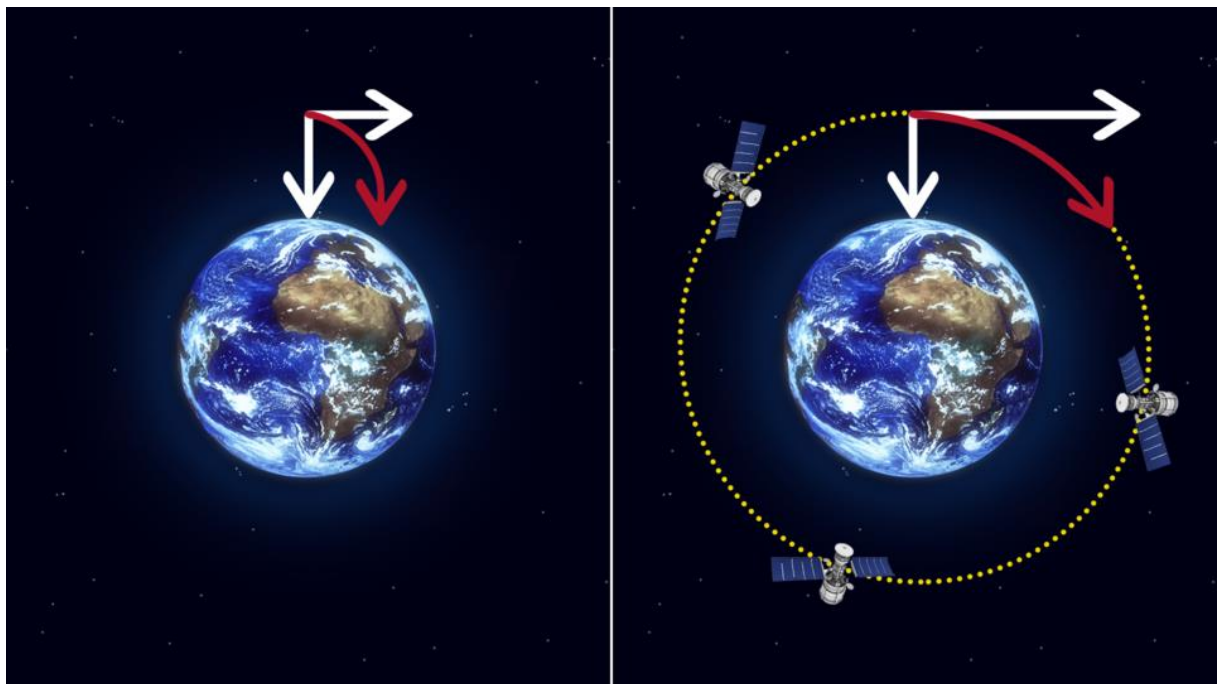
Dobivanje i prenošenje informacija se prije provodilo pomoću kopnene i obalne infrastrukture; no te informacije nisu mogle biti reprezentativne za cijeli sustav, a prijenos je bio ograničen dometom korištenih frekvencija. Nastupom satelitske tehnologije otvorena je mogućnost primitka i dijeljenja informacija iz svakog dijela svijeta. Satelitska tehnologija koristi se za mnogobrojne zadaće, većina je potrebna i koristi se u pomorstvu. Funkcije satelita uključuju: određivanje položaja korisnika i navigaciju, promatranje Zemlje s raznim instrumentima, komunikaciju i prijenos podataka, promatranje svemira te niz specifičnih uloga poput traganja i spašavanja ili nadzora prometa. Problemi s kojima se svemirska industrija susreće su mnogobrojni i kompleksni, od tehnologije potrebne za izgradnju i dostavljanja satelita u orbitu, do utjecaja na okoliš i unaprjeđenja usluga.

Pouzdanost sadašnjih i budućih usluga razmjene informacija od velike je važnosti za pomorski promet. Jedan od elemenata koji značajno utječu na pouzdanost i kvalitetu usluge jest povezanost broda i kopnene infrastrukture sa satelitskom mrežom. Ovaj rad usredotočen je na satelite u niskoj Zemaljskoj orbiti (engl. *Low Earth Orbit* - LEO), specifično komunikacijske satelite i problemom međusobnog povezivanja radi ostvarivanja pouzdane usluge. Uvod u rad odnosi se na definiranje orbite i frekvencija korištenih u satelitskim komunikacijama. Nadalje, radi karakteristika orbite, nije moguće govoriti o pojedinačnom satelitu, već o konstelaciji ili sustavu satelita. U slučaju satelitskih komunikacijskih sustava, problem obrađen u ovom radu jest povezivanje korisnika sa satelitom, međusobno povezivanje satelita te prosljeđivanje veze korisnika i veza između satelita. U daljnjoj obradi

rada, dani su primjeri satelitskih mreža te kratkom obradom AIS (engl. *Automatic Identification System* - AIS) sateliti u niskoj Zemaljskoj orbiti. Zaključno, opisana je uporaba sustava satelita i komunikacijskih satelita te kratak opis mogućih budućih uporaba. Bitno je naglasiti svrhu ovog rada, a to je približiti čitatelju problem satelitskih sustava u pogledu ostvarivanja kvalitetne veze te otvoriti vrata za nove ideje.

2. ORBITE

Orbita je putanja zakrivljena uslijed gravitacije kojom putuje objekt u svemiru oko drugog objekta. Kako bi se postigla orbita, objekt mora imati dovoljno veliku brzinu okomitu na silu gravitacije, na takav način da se tlo izmakne prije nego što objekt stigne pasti natrag, kao što je prikazano na Slici 1. [1].



Slika 1. Postizanje orbite [1]

Uslijed manjka trenja sa zrakom, u svemiru gravitacija omogućava satelitu orbitiranje oko drugog tijela. Postavljanjem satelita u određenu orbitu, omogućuje uporabu raznih tehnologija; telekomunikacije, navigacija, astronomska istraživanja te meteorološka praćenja.

Orbite se dijele prema različitim kriterijima, no ovdje će se vršiti podjela po visini orbite. Visina orbite mjeri se od razine mora.

2.1 GEOSTACIONARNA ORBITA

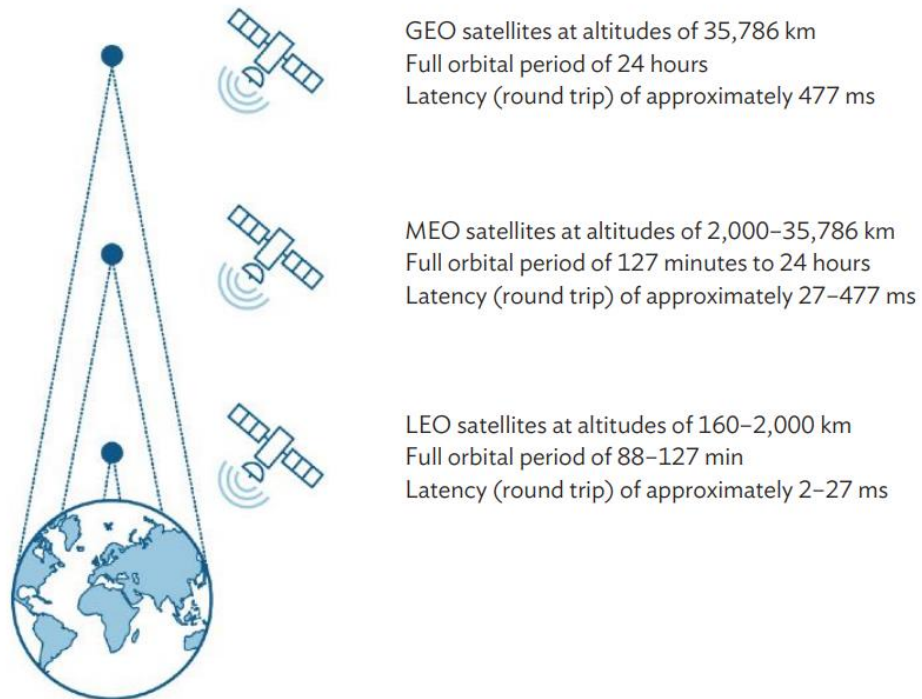
Geostacionarna orbita (engl. *Geostationary Earth Orbit* - GEO) nalazi se iznad ekvatora, prati rotaciju Zemlje na visini 35 786 km te ima period od 23 sata, 56 minuta i 4 sekunde; jedan dan. Ovo svojstvo čini satelite u toj orbiti „stacionarnim“ iznad određene točke na Zemlji. Sateliti u toj orbiti imaju velik otisak te je potrebno minimalno 3 satelita kako bi se prekrila gotovo cijela Zemlja. GEO se primarno koristi za meteorološke i telekomunikacijske satelite upravo zbog svog velikog otiska.

2.2 SREDNJA ZEMALJSKA ORBITA

Srednja Zemaljska orbita (engl. *Medium Earth Orbit* - MEO) sadrži velik broj različitih orbita koje se nalaze između niske Zemaljske orbite (LEO) i geostacionarne orbite, od 1000 do 35 786 km visine. Ove orbite koriste razni sateliti s različitim funkcijama i primjenama. Primjerice, satelitski navigacijski sustav Galileo smješten je u MEO orbiti te se koristi u navigacijske svrhe.

2.3 NISKA ZEMALJSKA ORBITA

Niska Zemaljska orbita (engl. *Low Earth Orbit* - LEO) nalazi se blizu Zemlje, od 160 do 1000 km iznad Zemljine površine. U usporedbi s geostacionarnom orbitom, niske Zemaljske orbite imaju više slobode u inklinaciji, tj. orbite ne trebaju biti u ravnini s ekvatorom. Period satelita u LEO orbitama izrazito je manji od perioda GEO satelita. Potrebno je oko 90 minuta za ophodnju Zemlje. Otisak satelita u niskim orbitama značajno je manji od otiska geostacionarnih satelita uslijed manje visine te su time manje pogodne za telekomunikacije.



Slika 2. Podjela orbita po visini [15, p. 10]

Na Slici 2. prikazana je podjela orbita po visini od LEO do GEO orbite, uz pridružene orbitalne periode i očekivana kašnjenja signal u oba smjera (engl. *round-trip latency*).

2.4 POLARNA ORBITA I ORBITA SINKRONA SA SUNCEM

Sateliti u polarnoj orbiti kreću se oko Zemlje u smjeru sjever-jug te prolaze preko ili blizu polova. Ovakve orbite se nalaze u niskoj Zemaljskoj orbiti te se koriste za motrenje Zemlje.

Orbite sinkrone sa Suncem (engl. *Sun Synchronous Orbit - SSO*) su posebna vrsta polarne orbite koje su sinkronizirane sa Suncem. To omogućava promatranje položaja na Zemlji s konstantnim osvjetljenjem, tj. olakšava uspoređivanje promatranog područja kroz vrijeme.

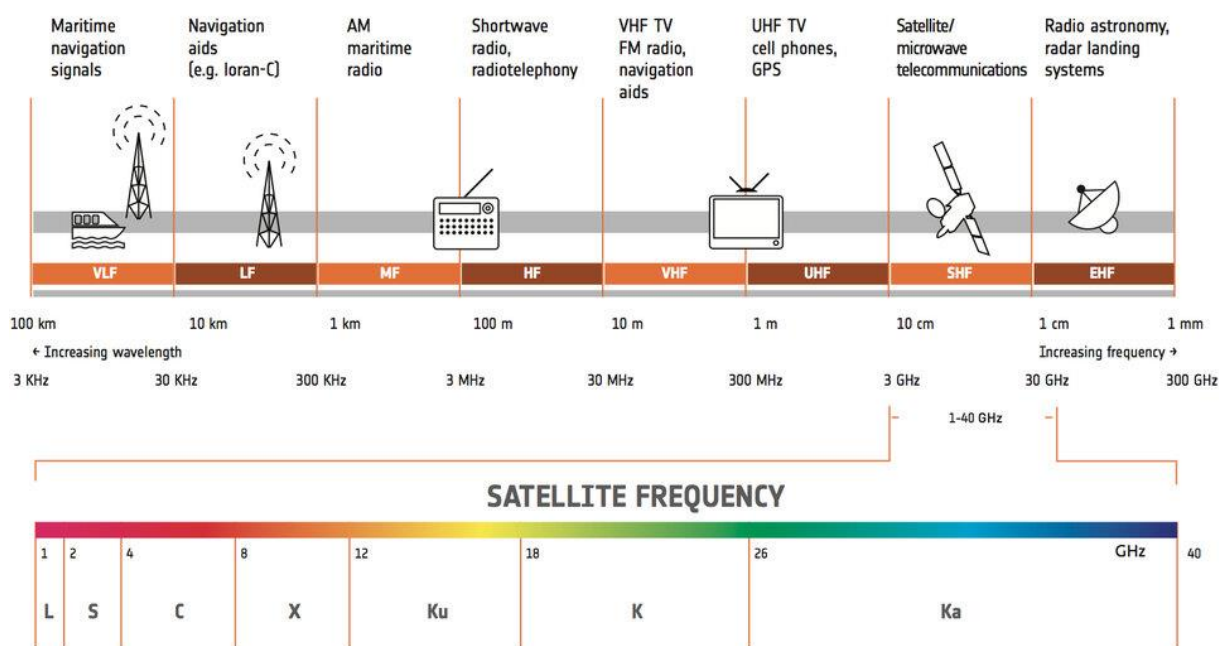
Ostale orbite uključuju transferne orbite, geosinkrone transferne orbite te *Lagrange* točke. *Lagrange* točke se pretežito koriste u slučajevima kada blizina Zemlji nije poželjna, primjerice za vrijeme promatranja dubokog svemira ili zvijezda

Pogodnost pojedine orbite za satelit ovisi o namjeni satelita i svojstvima orbite. Gledajući komunikacijske satelite, odabir pogodne orbite može značiti razliku između kvalitetne usluge i neupotrebljivog proizvoda.

3. FREKVENCIJE U SATELITSKOJ KOMUNIKACIJI

Elektromagnetski valovi korišteni u satelitskim sustavima trebaju posjedovati dovoljno energije kako bi mogli probiti kroz gornje slojeve atmosfere. Energija vala ovisi o frekvenciji; veća frekvencija, više energije koju val posjeduje. Veće frekvencije omogućavaju veću širinu pojasa, tj. moguće je više informacija prenijeti u valu s višom frekvencijom [2]. Više frekvencije su također osjetljivije na degradaciju signala uslijed meteoroloških prilika (kiša, snijeg i led). Uslijed sve većeg korištenja satelita, povećava se zagušenje unutar nižeg frekvencijskog pojasa. Iz tog se razloga razvijaju nove tehnologije koje će omogućiti korištenje viših frekvencija [2].

Frekvencije se dijele u pojaseve. Satelitski sustavi koriste sljedeće pojaseve: L, S, C, X, Ku i Ka. Na Slici 3. prikazani su frekvencijski pojasevi unutar elektromagnetskog spektra koji se koriste u satelitskim komunikacijama.



Slika 3. Frekvencijski pojasevi korišteni u satelitskim sustavima [2]

L-pojas nalazi se između 1 i 2 GHz te se koristi kao signal nosioc za globalni sustav za navođenje položaja - GNSS (engl. *Global Navigation Satellite System* - GNSS) i mobilne usluge (IRIDIUM, Inmarsat).

S-pojas, između 2 i 4 GHz , osim za pomorski radar koristi se za komunikacijske i meteorološke satelite.

Frekvencijski pojas između 4 i 8 GHz, C-pojas, koristi se za komunikacije i prijenos TV signala; često se koristi u tropskim područjima radi manjeg zagušenja uslijed kiše.

X-pojas, od 8 do 12 GHz, također se koristi u svrhu radara, koristi se u vojne svrhe, meteorološko motrenje, kontrolu leta te policijske brzinomjere.

Ku-pojas, 12-18 GHz, primarno se koristi za satelitske komunikacije te direktan prijenos pomoću satelita; zbog visoke frekvencije, osjetljiviji je na meteorološka zagušenja (kiša, snijeg) od C-pojasa.

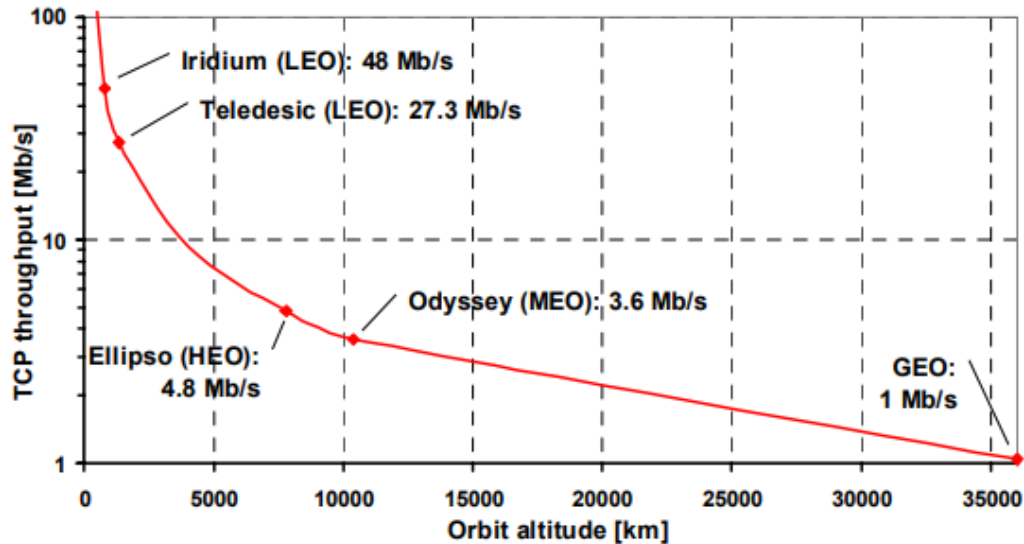
Ka-pojas, od 26 do 40 GHz, koristi se za satelitske komunikacije te u vojne svrhe za blisko dometni radar u svrhu ciljanja.

Unutar frekvencijskog spektra korištenog za satelitske komunikacije, više frekvencije se koriste za prijenos podataka između satelita. Na taj način se može prenijeti više podataka u kraćem vremenu (veća širina pojasa) [14]. Manjak plinova u višim dijelovima atmosfere (u područjima orbita satelita), omogućava minimalnu degradaciju signala, čak i pri višim frekvencijama.

4. POGODNOST ORBITA ZA INTERNET

Sateliti se mogu podijeliti prema visini njihove orbite. Što je viša orbita, satelitu treba više vremena za ophodnju Zemlje (orbitalni period), otisak je veći, no vrijeme prijenosa se povećava dok mrežna propusnost pada. Ako se satelit nalazi u geostacionarnoj orbiti, tada će satelit biti konstantno iznad jedne točke na Zemlji, tj. period je jedan dan. U nižim orbitama period pada, dok brzina prijenosa raste. Na Slici 4. prikazan je graf maksimalne propusnosti između dva terminala na Zemlji s obzirom na visinu orbite satelita [3, p. 1140]. Na Slici 4. uvjeti su: beskonačna propusnost prema satelitu, terminali se nalaze u dometu istog satelita i blizu nadira satelita; limitirajući čimbenik je maksimalni TCP (engl. *Transport Control*

Protocol - TCP) posmični prozor od 64 kB (obratiti pozornost na logaritamsku skalu vertikalne osi).



Slika 4. Maksimalni TCP protok protoka u funkciji visine orbite [3]

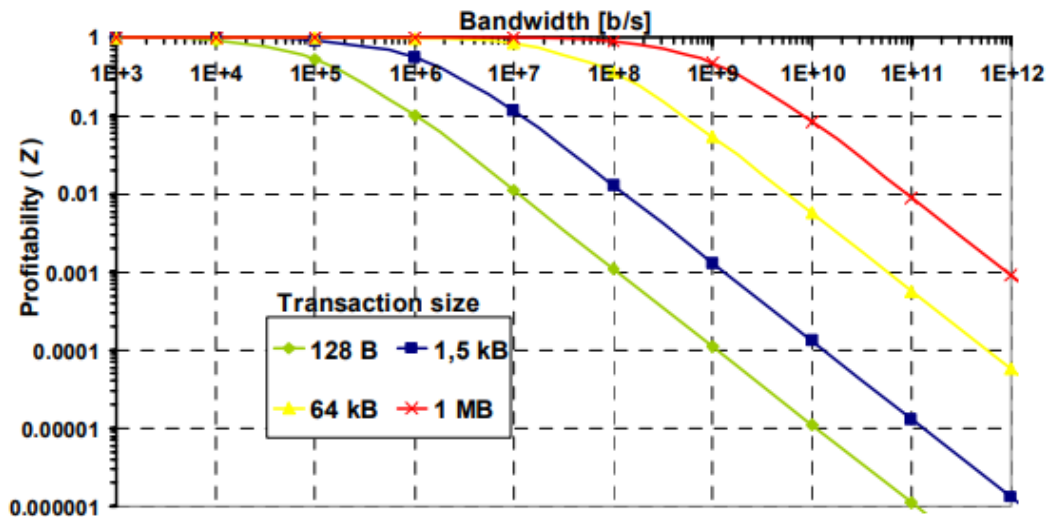
Iz priloženog se može zaključiti da su sateliti u nižim orbitama (LEO) povoljniji za satelitske mreže zbog manjih kašnjenja uslijed propagacije i povećane propusnosti. Isto tako je vidljivo da postoji granica nakon koje nema poboljšanja za krajnjeg TCP korisnika [3, p. 1140]. Ovi podaci se zasnivaju na pretpostavljenim parametrima: terminali se nalaze u blizini istog satelita koji se nalazi u nadiru, čekanje za mrežu (engl. *queuing delay*) se pretpostavlja da je 0 pošto sustav nije opterećen te čekanje za procesiranje je nula. Ovo je istinito za većinu geostacionarnih satelita. Kod ovakvog sustava, čekanje T se može izračunati:

$$T = \frac{2h}{c} + \frac{p}{C} \quad (1)$$

C je mrežna propusnost (kapacitet) pružana korisniku; p je količina podataka poslana tijekom prijenosa (engl. *transaction size*), c je brzina svjetlosti, h je visina orbite satelita.

Zorniji prikaz može se postići ako se uspoređi relativno smanjenje trajanja prijenosa s relativnim povećanjem mrežne propusnosti. Taj omjer nazvan je profitabilnost i označava se kao Z :

$$Z = \frac{-\Delta T/T}{\Delta C/C} = \frac{-\frac{dT}{dC}/T}{1/C} = \dots = \frac{pc}{2hC + pc} \quad (2)$$

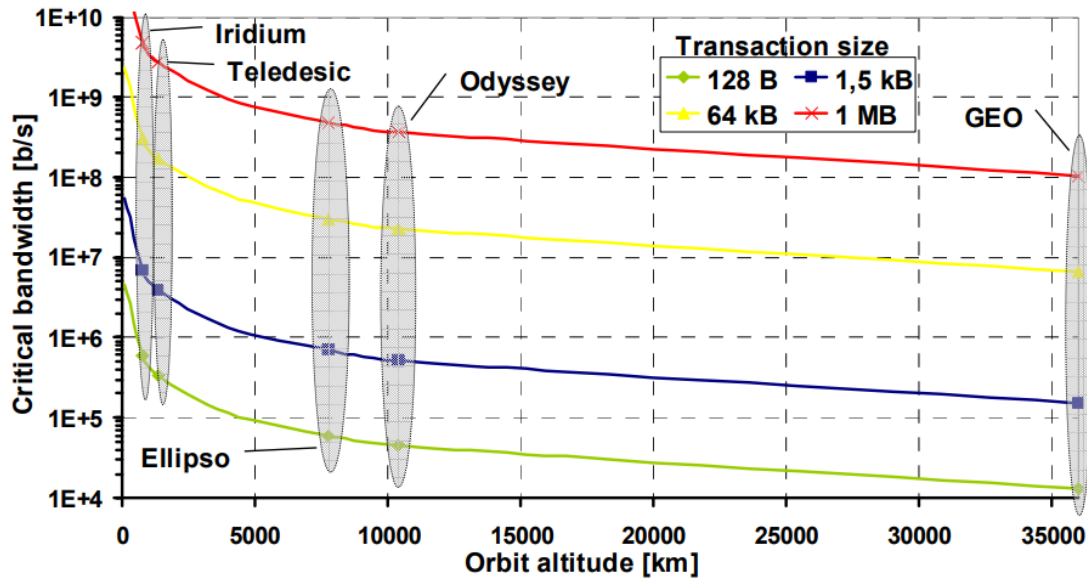


Slika 5. Profitabilnost Z u funkciji širine pojasa [3]

Iz Slike 5. može se vidjeti da povećanjem količine podataka poslana tijekom prijenosa p , raste profitabilnost sustava; tj. moguće je ostvariti manje vrijeme čekanja sa značajno većom mrežnom propusnošću korištenjem većeg prijenosnog paketa.

Nadalje, može se odrediti graničnu mrežnu propusnost (označenu sa C^*), nakon koje više nema smisla povećavati propusnost zbog zanemarivog utjecaja na korisnika [3, p. 1142]. Za to je potrebno odrediti minimalnu vrijednost profitabilnosti Z (označenu sa Z^*). Ta vrijednost se određuje s više čimbenika, no pogotovo s cijenom povećanja mrežne propusnosti.

$$C^* = \frac{pc}{2h} \left(\frac{1}{Z^*} - 1 \right) \quad (3)$$



Slika 6. Granična mrežna propusnost u funkciji visine orbite [3]

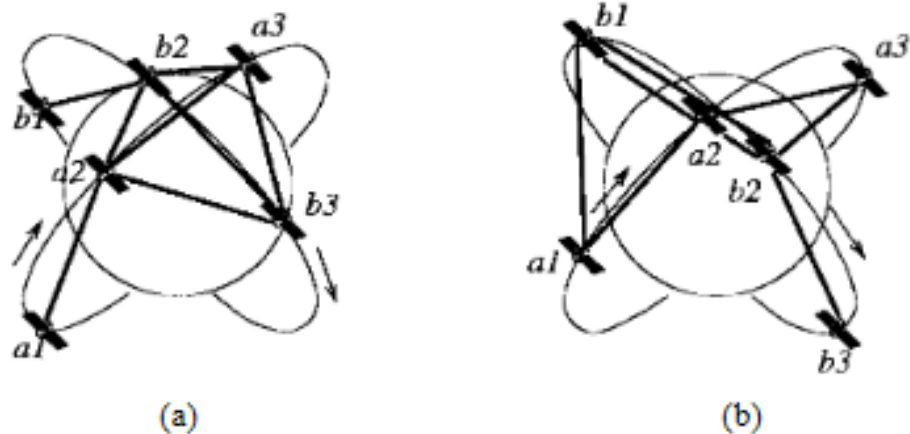
Povećanje mrežne propusnost iznad granične vrijednosti bi koštalo više nego što bi krajnjem korisniku koristilo [3, p. 1142].

Slika 6. uspoređuje mrežne propusnosti LEO sustava (do 5 Gb/s) i GEO sustava (do 1 Mb/s). Može se zaključiti da su širokopojasne usluge (engl. *broadband services*) bolje ako su pružene pomoću LEO sustava nego GEO sustava [3, p 1142].

U slučaju kada je potrebna dvosmjerna komunikacija između korisnika i satelita mogu postojati dodatni zahtjevi koji će sniziti graničnu vrijednost propusnosti. Isto se ne primjenjuje na jednosmjernu predaju podataka (engl. *non-transactional*) (npr. televizijski prijenos).

5. TOPOLOGIJA SUSTAVA

Jedan od glavnih problema LEO satelitskih sustava je njihova dinamika topologije, tj. sateliti nisu uvijek vidljivi jedan drugom i nisu uvijek iznad jedne točke na Zemlji. Stoga je potrebno uspostavljati i uklanjati veze između satelita ovisno o međusobnoj vidljivosti. To dovodi do konstantne promjene satelita kojom se ostvaruje veza između dva korisnika (engl. *link assignment problem*).

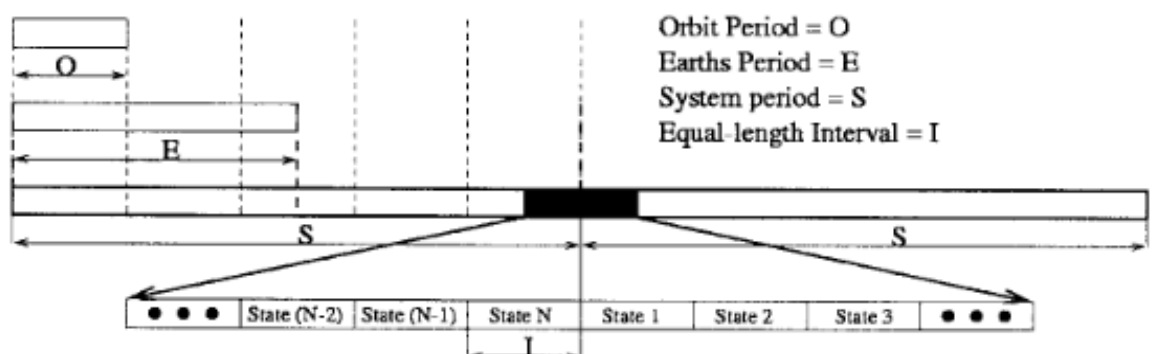


Slika 7. Primjer promjene relativne vidljivosti [4]

Na slici 7. prikazani su položaji dva satelita ($a1$ i $b1$) koji nisu međusobno vidljivi (slika (a)), dok u jednom trenutku to postaju krećući se po svojim orbitalnim putanjama (slika (b)) [4, p. 1038].

5.1 AUTOMAT KONAČNOG STANJA

Jedno od rješenja problema promjene topologije je promatranje LEO mreže kao automata konačnog stanja (engl. *Finite State Automaton* - FSA). FSA se zasniva na činjenici da su LEO satelitske mreže periodične [4, p. 1037.]. U tom modelu, svako od FSA stanja odgovara intervalu jednake duljine (engl. *equal-length interval*) (I) unutar perioda LEO mreže (S), koji su najmanji zajednički višekratnik perioda orbite (O) i perioda Zemlje ($E = 24$ sata). Na Slici 8. prikazan je model stanja FSA, tj. prikazan je interval jednake duljine.



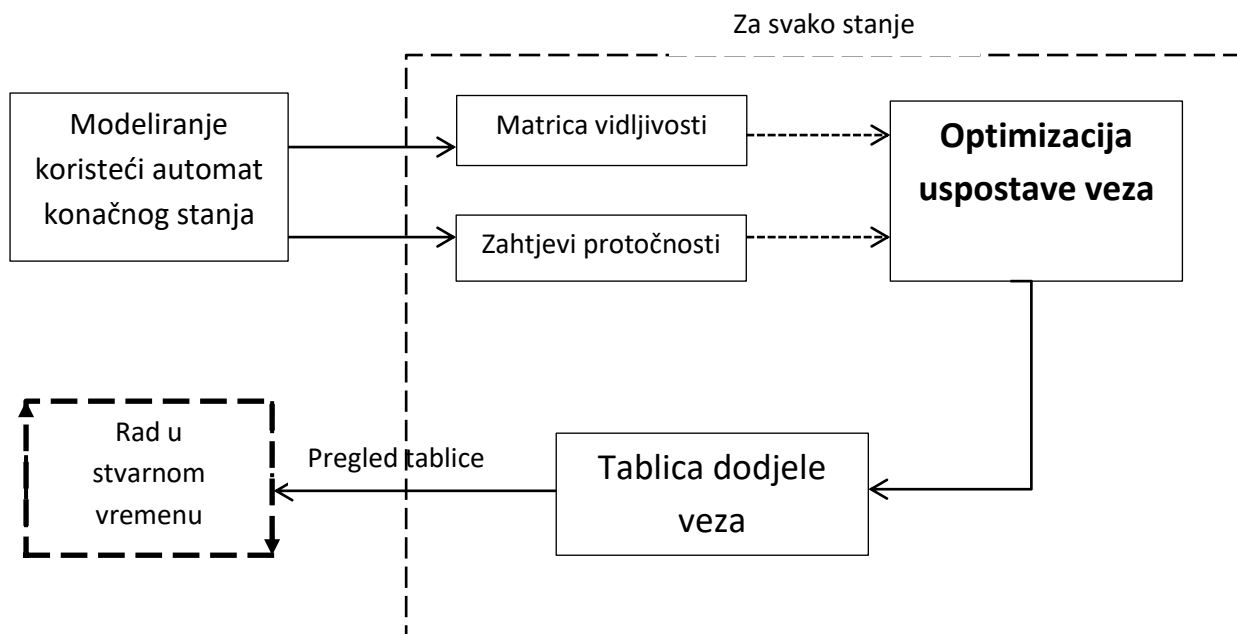
Slika 8. Modeliranje automata konačnog stanja [4]

U ovakvom pristupu, dva satelita se smatraju „u vidljivom stanju“ ako su vidljivi jedan drugome za vrijeme cijelog „stanja“ tj. za vrijeme intervala jednake duljine. U slučaju kada je

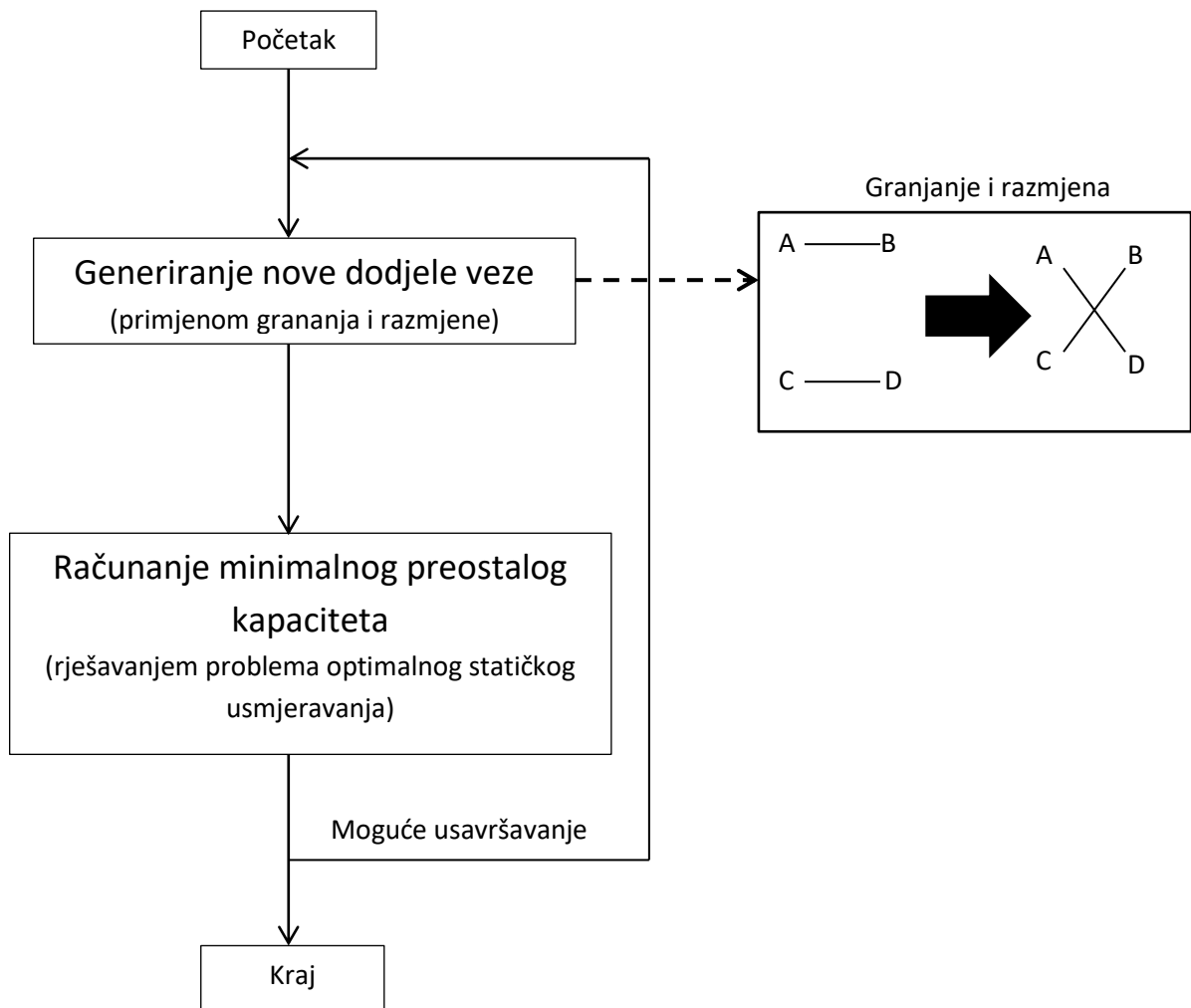
satelit djelomično vidljiv (nije vidljiv za vrijeme cijelog intervala), tada se uzima da je satelit „nevidljiv“. Podaci o međusatelitskoj vidljivosti se mogu kodirati unutar matrice vidljivosti (engl. *visibility matrix*) gdje su elementi i i j vidljivost između i -tog i j -tog satelita. Matrica vidljivosti se dobiva iz položaja unutar orbite za svaki satelit za svako stanje. Ovo omogućava rješavanje problema ostvarivanja veze u LEO sustavima svođenjem problema na set problema u fiksnoj topologiji [4, p. 1037].

Shema dodjeljivanja veze pomoću FSA modela funkcionira na principu izračuna matrice vidljivosti i zahtjeva protočnosti (engl. *traffic requirements*) za svako stanje. Produkt je tablica dodjele veze (engl. *link assignment table*) koja daje parove satelita koji se trebaju povezati za vrijeme svakog stanja. Ova tablica se računa prije početka uspostavljanja veze te se sprema u svaki satelit. Za vrijeme uspostavljene veze, međusatelitske veze uspostavljaju se i uklanjaju po pred izračunatoj tablici dodjele veze.

Optimizacija dodjele veza (engl. *link assignment optimization*) služi za minimiziranje opterećenosti najopterećenije međusatelitske veze. Optimizacija je motivirana primjedbom da dodjeljivanje međusatelitskih veza ne smije imati kritičnih točaka koje će ograničiti performase sustava. Ovaj problem se rješava iterativnom metodom do aproksimacije, jer nije moguće u razumnom vremenu dobiti točan rezultat [4, p. 1038].



**Slika 9. Shema uspostavljanja veza na bazi automata konačnog stanja
Izradio student na temelju [4]**



Slika 10. Dijagram iterativne optimizacije

Izradio student na temelju [4]

Na Slici 10. prikazana je shema optimizacije rute, dok je na Slici 9. prikazana shema uspostavljanja veze putem FSA uz optimizaciju rute.

6. RUKOVOĐENJE VEZOM

6.1 PROSLJEĐIVANJE VEZE

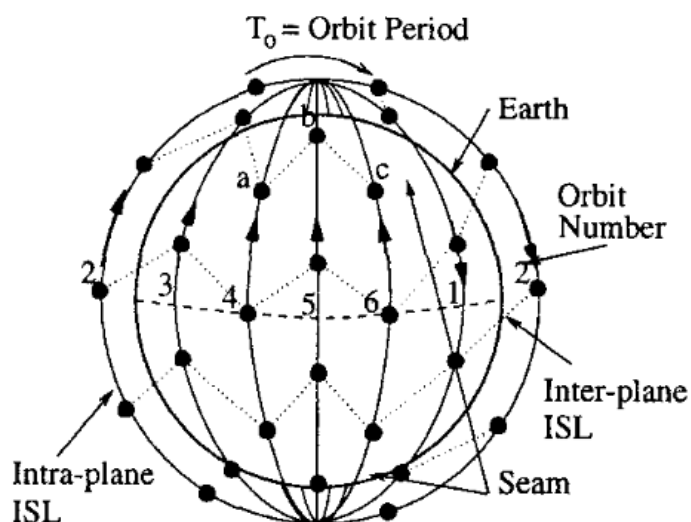
Zahtjev na sustav radi održavanja komunikacija i usluga u stvarnom vremenu koji je uzrokovan karakteristikama medija i karakteristikama samog sustava (npr. asinkronizirana rotacija Zemlje i LEO satelita); potrebno je mijenjati korisnike između satelita. Glavni cilj uspješne procedure prosljeđivanja veze je minimizacija ili potpuno uklanjanje mogućnosti prisilnog isključenja. Menadžmenti za prosljeđivanja veze uglavnom se temelje na redovima

čekanja (engl. *queuing*) ili procjene broja prosljeđivanja veza. Većina predloženih tehnika ne valjaju bilo zbog prevelikog rezerviranja resursa ili prekasnog rezerviranja resursa. Zbog mogućnosti manjka resursa i ovisno o mehanizmu primopredaje veze, postoji mogućnost prisilnog prekida poziva u tijeku (isključenje primopredaje veze (engl. *Up-Down Link - UDL*)). Što je veća frekvencija prosljeđivanja veze, to je teže neprekidno opsluživati korisnike. Ovaj problem pogoršan je recikliranjem frekvencija, tj. dijeljenje satelitskog otiska u ćelije. Prosljeđivanje veze između ćelija dodaje složenosti sustavu. Prosljeđivanje veze (engl. *handover*) može biti uzrok smanjenja kvalitete korisniku, npr. prisilni prekid veze, čekanje. S druge strane, prosljeđivanje veze smanjuje performanse sustava uslijed lošeg korištenja resursa.

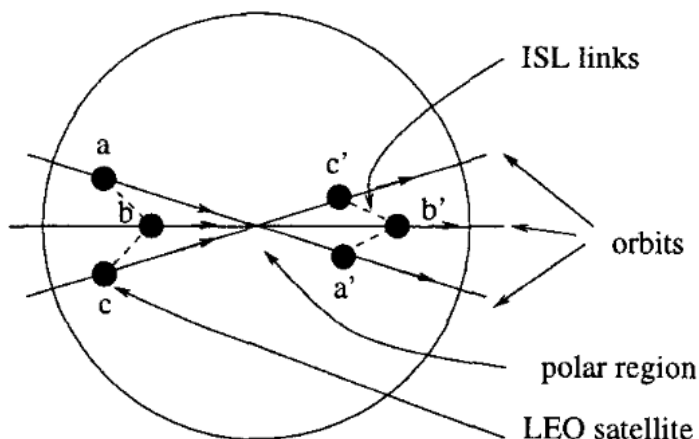
6.2 ISKLJUČENJE MEĐUSATELITSKE VEZE

Sateliti u kontrarotirajućim orbitama održavaju međusatelitske veze između 60° sjeverno i južno, tzv. šav (engl. *seam*). Sateliti koji prolaze sjevernije ili južnije, prolaze kroz šav, privremeno isključuju veze prema satelitima u susjednim ravninama¹. Drugo isključenje veza događa se pri promjeni topologije za vrijeme prolaska preko polova. Na Slici 11. i Slici 12. prikazan je prolaz satelita preko polova zahtijevajući isključivanje i ponovno uspostavljanje veze. Sateliti *a*, *b* i *c* prilaze polu; prilikom prilaza, lijevi susjed satelitu *b* je satelit *a*, a s desne strane se nalazi satelit *c*. Nakon prelaska pola, susjedni sateliti satelita *b* zamjene položaja; novi položaji su označene sa *a'*, *b'* i *c'* [5, p. 90]. Za vrijeme prelaska pola, tj. promjene topologije, međusatelitske veze se isključuju te se ponovno uspostavljaju nakon zamjene mjesta susjednih satelita.

¹ veza između satelita (engl. *Inter Satellite Link - ISL*) u susjednim ravninama (engl. *inter-plane*)



Slika 11. LEO satelitska mreža [5]



Slika 12. Tlocrt LEO satelita u polarnom području [5]

Svako isključenje međusatelitskih veza rezultira preusmjeravanjem (engl. *re-routing*) svih veza koje su prolazile tim međusatelitskim vezama.

6.3 PRIMOPREDAJA VEZE

Područje koje pokriva jedan satelit (otisak) se pretpostavlja heksagonom na Zemljinoj površini, na kojoj je satelit vidljiv pod kutem većim ili jednakim minimalnom kutu elevacije [5, p. 90]. Kretanjem satelita, postoji potreba za prebacivanjem početne veze sa satelitom. Veza se prebacuje sa satelita koji više neće sadržavati korisnika, na satelit koji sadrži korisnika. Taj događaj se naziva primopredaja veze (engl. *connection handover*). Tijekom primopredaje veze, potrebno je ažurirati rutu veze.

6.4 OPTIMIZACIJA RUTE VEZA

Potreba za optimizacijom rute veze proizlazi iz dinamičnosti mreže, ograničenosti FSA algoritma te potrebom za smanjenjem preusmjerenja veze. FSA algoritam koristi se za optimalno dodjeljivanje veza kako bi se maksimalno iskoristile ograničene međusatelitske veze. Ovakav pristup ostvarivanju veza ne uzima u obzir smanjivanje preusmjerenja, već samo obrasce protočnosti (engl. *traffic pattern*). Naprotiv, problem FSA je potreba za preusmjerenjem većeg broja veza za vrijeme promjene stanja (engl. *state change*).

Ovaj algoritam, u biti, pokušava koristiti međusatelitske veze koje neće biti isključene za vrijeme trajanja poziva. Pošto se ne može predvidjeti trajanje poziva, niti položaj korisnika, koristi se funkciju gustoće vjerojatnosti (engl. *probability distribution function* - PDF) vremenskog trajanja koje poziv koristi u uspostavljenoj ruti veza. Izrađena funkcija se upotrebljava za odabir rute veza koja neće doživjeti prebacivanje veze (engl. *link handover*) za vrijeme trajanja poziva.

7. UPRAVLJANJE PROSLJEĐIVANJEM NA TEMELJU DOPPLEROVOG EFEKTA

Sustav menadžmenta prosljeđivanja veza na temelju Dopplerovog efekta (engl. *Doppler-Based Handover Management* - DBHM).

Rješenja za upravljanje primopredajom veza sežu od reda čekanja primopredaje veze (engl. *queuing handover*), rezervacije resursa prije početka primopredaje veze te garantirana primopredaja (engl. *guaranteed handover service*). Svaka od metoda ima određene prednosti (smanjenje korištenih resursa, manje vjerojatnosti blokiranja poziva, manja šansa prisilnog prekida veze, smanjenje čekanja), ujedno dodaju poteškoće (povećanje čekanja i prisilnih prekida veze, loše iskorištavanje resursa).

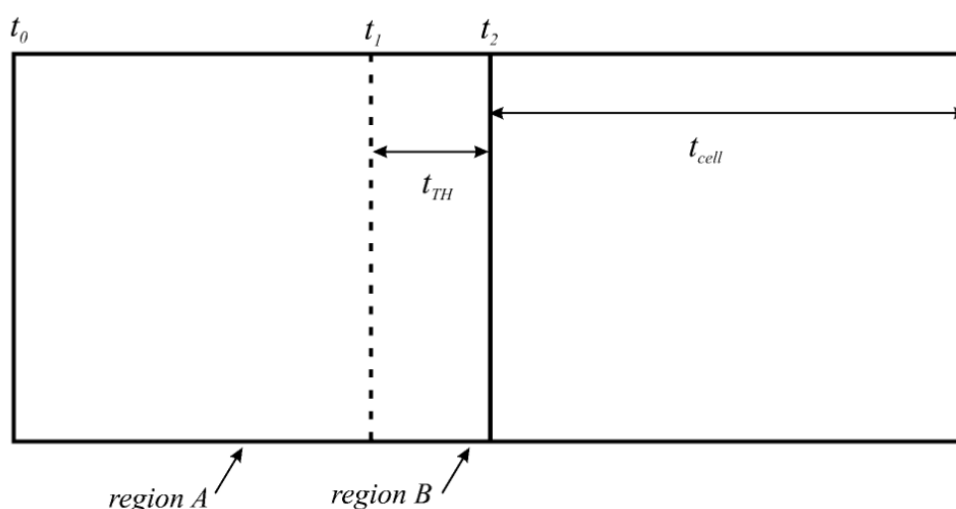
Shema određivanja prioriteta primopredaje veze zasnovana na Dopplerovom efektu (engl. *Dynamic Doppler-Based Handover Prioritization scheme* - DDBHP) je metoda za upravljanje primopredaje veza [6]. Ova shema napravljen je za sustave u kojima su ćelije fiksirane za satelite. Za cilj ima pružanje različite razine kvalitete usluga (vezano za prisilan prekid veze) i u isto vrijeme kvalitetno iskorištavanje resursa. Algoritam ujedno garantira prosljeđivanje veze.

Predložena tehnika upravljanja primopredaje veze koristi Dopplerov efekt za određivanje položaja mobilne stanice te na temelju te informacije rezervira potrebne resurse na vrijeme. Dopplerov efekt je promjena u frekvenciji vala u odnosu na promatrača koji se kreće u odnosu na izvor vala. Korištenjem determinističkog pristupa, DDHP predviđa opterećenje prosljeđenih veza. Time se maksimizira iskorištenje kanala i efikasnost pojasne širine. Daljnja primjena ovog sustava upravljanja je donošenje rješenja za prosljeđivanje veze kada su početna ćelija i krajnja ćelija u različitim otiscima (nalaze se pod različitim satelitima) te donošenje rješenja kada se krajnji satelit nalazi u različitoj orbitalnoj ravnini.

Korištenjem Dopplerovog efekta, poznat je točan broj veza za prosljeđivanje i točno vrijeme prosljeđivanja, time omogućavajući pravovremeno rezerviranje potrebnih resursa.

7.1 ALGORITAM UPRAVLJANJA

DDBHP definiira vremenski interval prije prosljeđivanja veze, zvan vremenski prag t_{TH} – (engl.– *time threshold*). Zahtjev za prosljeđivanje veze će biti poslan u trenutku t_1 umjesto na kraju ćelije u t_2 . Sustav mora rezervirati resurse i ostvariti uspješno prosljeđivanje veze unutar vremenskog praga (vremenski prag je područje nezavisno od područja preklapanja ćelija) [6, p. 832]. Na Slici 13. prikazana su dva područja, A i B te je definiran vremenski prag t_{TH} pri prelasku iz područja A u B.



Slika 13. Definiranje vremenskog praga u DDBHP metodi [6]

Kako bi bilo moguće upotrijebiti ovakvu proceduru, potrebno je poznavanje položaja mobilne stanice. Unutar ovog sustava, položaj se dobiva procedurom praćenja pomoću Dopplerovog efekta. Kriteriji uključivanja novog poziva u mrežu ovise o položaju mobilne stanice. Ako se mobilna stanica nalazi unutar područja A, zahtijevat će se slobodan kanal samo u trenutnoj ćeliji. U ostalim slučajevima zahtjeva se slobodan kanal u trenutnoj i sljedećoj ćeliji.

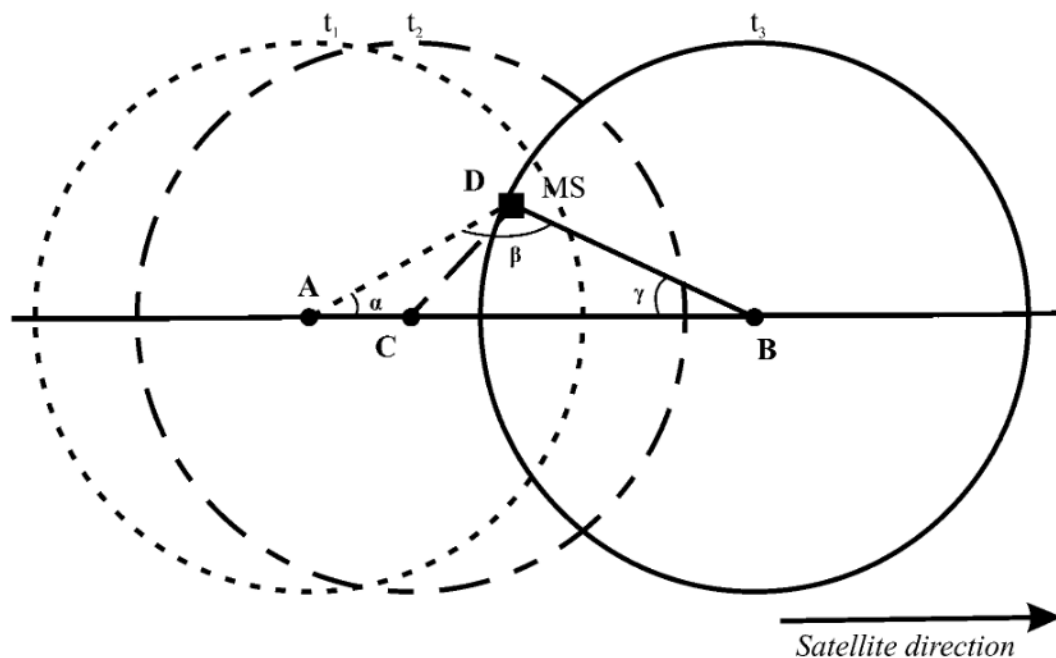
7.2 PROCEDURA PROSLJEĐIVANJA VEZE

Za mobilne stanice unutar mreže, mehanizam procedure praćenja određuje vrijeme kada će mobilna stanica doseći vremenski prag t_{TH} . U to vrijeme šalje se zahtjev prema odgovarajućem satelitu. U slučaju slobodnih resursa, zahtjev je zadovoljen (rezervira se kanal); u suprotnom poziv je stavljen u red čekanja za vrijeme t_{TH} . Ako nema potrebnih resursa do isteka vremena t_{TH} , veza se prisilno prekida. U slučaju prekida poziva prije prosljeđivanja veze uz kanal u službi, rezervirani kanal ili zahtjev u redu čekanja se također čiste.

Pravilnim određenjem vremenskog praga omogućava sustavu upravljanja različite razine vjerojatnosti prisilnog prekida veze ili potpuno uklanjanje iste. Stvarna vrijednost vjerojatnosti prisilnog prekida veze ovisi o prometu, vremenskom pragu i parametrima ćelija. U najboljem slučaju dolazi do eliminacije vjerojatnosti prisilnog prekida veze, dok se u isto vrijeme resurse efikasno iskorištavaju budući da u najgorem slučaju korisnik koristi dva kanala samo za vrijeme t_{TH} .

7.3 ODREĐIVANJE POLOŽAJA

Sustav određivanja položaja mobilne stanice oslanja se na procjeni Dopplerovog pomaka od svake mobilne stanice do satelita. Procedura određivanja položaja dio je kompenzacijske tehnike korištene za uspostavljanje veze između mobilne stanice i satelita [6, p. 832]. Položaj se određuje na strani satelita, time dobivajući potrebne informacije na potrebnoj lokaciji (satelitu). Ovakvim pristupom se također smanjuje troškove u svezi distribucije, što nije slučaj kod korištenja GNSS sustava za određivanje položaja mobilne stanice.



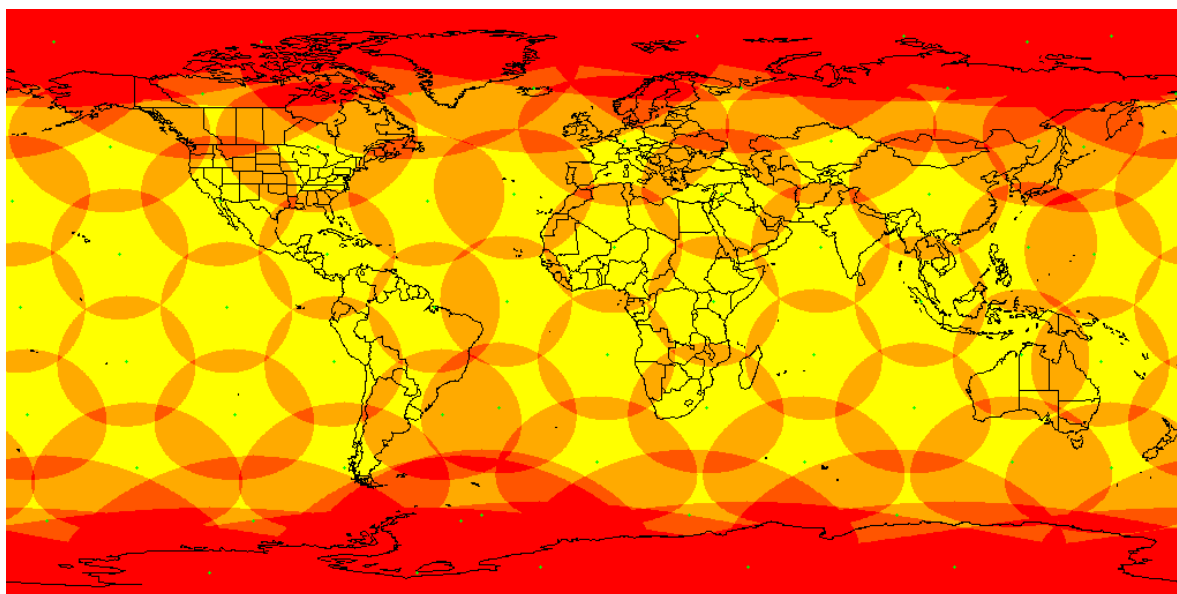
Slika 14. Određivanje položaja u DDBHP metodi [6]

Na Slici 14. prikazano je određivanje položaja koje se sastoji od dvije faze. U prvoj fazi satelit određuje kut elevacije u bilo kojem trenutku koristeći jedno mjerenje Dopplerovog pomaka. Druga faza izračunava azimutni kut između smjera kretanja satelita i mobilne stanice mjerenjem Dopplerovog pomaka u dva različita trenutka.

8. PRIMJERI SATELITSKIH MREŽA

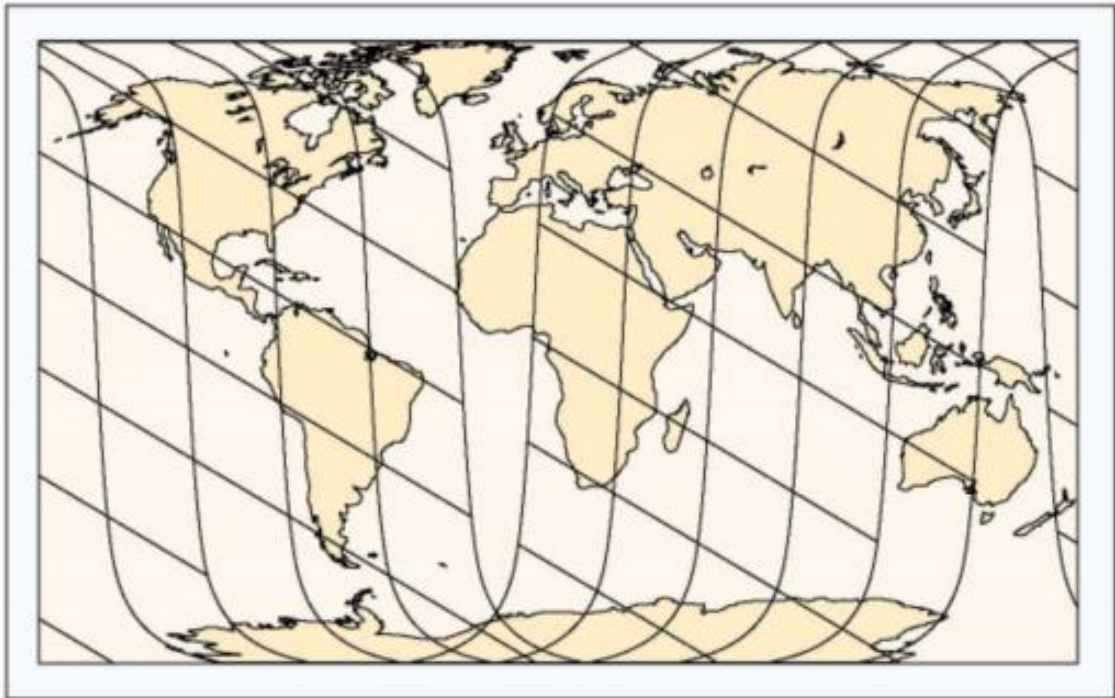
8.1 IRIDIUM SUSTAV

Za primjer LEO sustava uzet je IRIDIUM sustav. Trenutačni IRIDIUM sustav se sastoji od 66 aktivna satelita u 6 orbita, inklinacija iznosi 86.4° , visina orbite je 780 km što tvori otisak radiusa 2209 km [7, p. 3]. Očekivani životni vijek satelita je 5 godina. Dobrobiti mreže u LEO uspoređujući s GEO mreže su manja snaga za prijenos podataka, manje čekanje uslijed kraćeg puta prijenosa informacije te pokrivenost polarnih područja. Pokrivenost IRIDIUM satelitskog sustava prikazana je na Slici 15.



Slika 15. Pokrivenost IRIDIUM satelitske mreže
[Wikipedia: Iridium satellite constellation]

Sateliti su opremljeni tehnologijom za prijenos podataka između satelita, time tvoreći mrežu koja omogućuje korištenje resursa u otisku mreže (sve što je pokriveno IRIDIUM satelitima može prenijeti/primiti informacije iz bilo kojeg dijela mreže). Svaki IRIDIUM satelit održava do 4 ISL veze između satelita u istoj orbitalnoj ravnini (engl. intra-plane) i satelita u susjednim orbitalnim ravninama (engl. inter-plane). Veze između satelita u istoj ravnini su cijelo vrijeme održane, dok se veze sa satelitima u susjednim ravninama dinamički mijenja (veze se uspostavljaju i uklanjaju kako sateliti prolaze po svojim orbitalnim putanjama). Sateliti u orbitama 1 i 6 održavaju samo 3 ISL veze pošto imaju suprotan smjer vrtnje zbog čega dolazi do brze promjene kuta između satelita. Slika 16. prikazuje međusatelitske veze IRIDIUM satelitskog sustava. Na slici se također primjećuje šav orbita 1 i 6.



Slika 16. Prikaz IRIDIUM među-satelitskih veza [7]

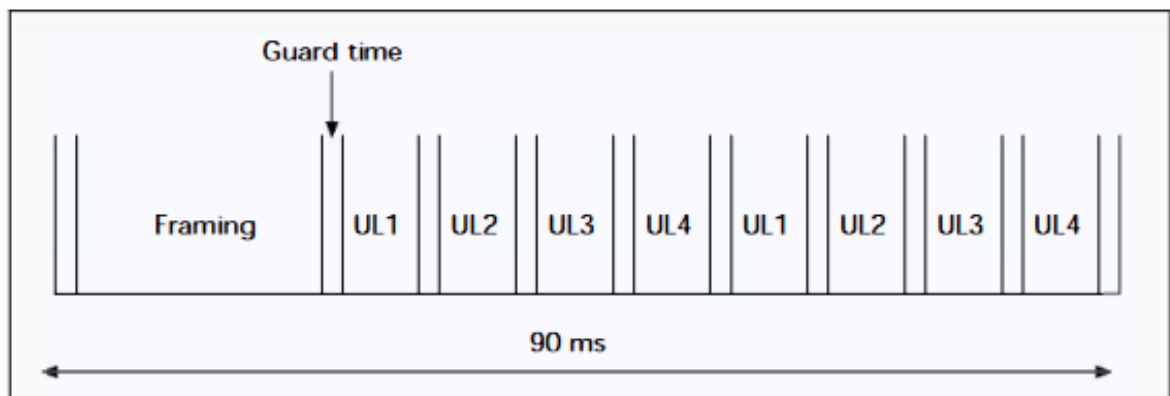
Prednost ISL veza je u tome što je potrebno manje kopnenih pristupnih točaka (engl. *gateway*) pošto se preusmjeravanje poziva odvija pomoću ISL veza. Time se smanjuju troškovi mreže jer se smanjuje broj usluga potrebnih za uspostavljanje veze².

Jedan od problema koji dijele svi LEO satelitski sustavi, pa tako i IRIDIUM, je dinamičnost sustava. U biti, cijeli se sustav sastoji od dvije ravnine koje se pomiču relativno jedna drugoj. To su ravnina zemlje (gdje se nalaze korisnici) i ravnine satelita (pružatelja veze). Ovaj problem se može dokučiti primjerom mobilne stanice koja prolazi iz područja jednog telefonskog tornja (engl. *cellular base station*) u područje drugog tornja; mobilna stanica (mobilni telefon) će se spojiti na toranj s jačim signalom te kako se korisnik kreće, tako će se i veza između mobilne stanice i tornja prebacivati s tornja na toranj. Slično je i kod satelitske mreže, veza između satelita i korisnika predaje se sa satelita koji izlazi iz korisnikovog područja na satelit koji dolazi u korisnikovo područje (engl. *link handover*). Zbog velike brzine satelita praktično možemo zanemariti korisnikovu brzinu, ako pretpostavimo da se korisnik nalazi na jednom mjestu.

Prijenos podataka unutar sustava IRIDIUM vrši se pomoću vremenski raspodijeljenog višestrukog pristupa (engl. *Time Division Multiple Access – TDMA*) i frekvencijski raspodjeljenog višestrukog pristupa (engl. *Frequency Division Multiple Access - FDMA*).

² Nema potrebe za korištenjem kopnenih pružatelja komunikacijskih usluga

TDMA i FDMA su metode pristupa komunikacijskim kanalima, i obje služe omogućavanju pristupa više korisnika istom kanalu. TDMA metoda dijeli pristup komunikacijskom kanalu u vremenske okvire unutar kojih je daljnja podjela na vremenske isječke te se svakom korisniku dodjeljuje jedan isječak. Korisniku je omogućen prijenos podataka unutar alociranog vremenskog isječka u pojedinom vremenskom okviru. FDMA metoda dijeli komunikacijski kanal u nekoliko podkanala, na ne-preklapajućim frekvencijama. Svakom korisniku je alociran jedan podkanal. Kombiniranjem TDMA i FDMA metoda dobiva se značajno veći kapacitet korisnika. TDMA okvir sastoji se od 4 duplex kanala s brzinom prijenosa podataka od 50 kb/s. Svaki od TDMA okvira traje 90 ms te se svaki duplex kanal sastoji od 4 *uplink* i 4 *downlink* vremenska okvira [7, p. 5], kako je prikazano na slici 17.



Slika 17 Struktura TDMA okvira [7]

IRIDIUM koristi frekvencije u L-pojasu (od 1616 MHz do 1626,5 MHz) za *uplink* i *downlink*, što daje sustavu širinu pojasa od 10,5 MHz. FDMA dijeli raspoloživu širinu pojasa u 240 kanala po 41,67 kHz svaki i ostavlja 500 kHz za zaštitne zone između kanala. IRIDIUM koristi višestruke točkaste zrake (engl. *multiple spot beam*) koji dijeli otisak satelita na više manjih ćelija. Svaki satelit posjeduje 3 antene s faznim antenskim nizom (engl. *phased array antennas*) sa 16 točkastih zraka svaka, što omogućuje 48 točkastih zraka po satelitu. Svaka od zraka dobiva određeni dio frekvencijskog spektra (frekvencijski kanal) i time tvori ćeliju. Frekvencijski kanali se mogu reciklirati davanjem bliskih frekvencijskih pojaseva ćelijama koje su dovoljno udaljene kako ne bi došlo do interferencije. Nadalje, svaka ćelija sadrži 4 TDMA kanala na 20 frekvencija, to omogućuje 80 mogućih istovremenih korisnika. Svaki IRIDIUM satelit ima 48 ćelija, pomnoženo sa 66 satelita iznosi 3168 ćelija. Neke ćelije će se preklapati (pogotovo u blizini polova), što dovodi do 2150 mogućih ćelija koje će biti aktivne (ostale se isključuju radi smanjenja potrošnje energije). Kapacitet IRIDIUM mreže može se izračunati na sljedeći način: 80 istovremenih korisnika u

svakoj od 2150 ćelija, što daje ukupan mogući broj od 172 000 istovremenih korisnika [7, p. 6].

8.2. Starlink sustav (u izgradnji)

Starlink je konstelacija satelita u niskoj Zemljinoj orbiti koja će pružati satelitski pristup internetu, građena od kompanije Space Exploration Technologies Corp. (SpaceX). Konstelacija će se sastojati od tisuća malih satelita. Budući da je konstelacija još u izgradnji, nije poznato koliko će točno satelita pružati internetski pristup te u kojim će se točno orbitama nalaziti. U listopadu 2019. godine Američka federalna komunikacijska komisija (engl. *Federal Communications Commission* - FCC) je, u ime SpaceX, podnijela zahtjev Međunarodnoj telekomunikacijskoj uniji (engl. *International Telecommunication Union* - ITU) za uređivanje frekvencijskog pojasa za dodatnih 30 000 Starlink satelita dopunjavajući prijašnje odobrenih 12 000 Starlink satelita [8].

SpaceX je podnio prijavu u travnju 2020. godine za povećanje broja satelita u prvoj fazi izgradnje konstelacije. Trenutačna arhitektura je predložena u Tablici 1.

Tablica 1 Prijedlog Starlink arhitekture

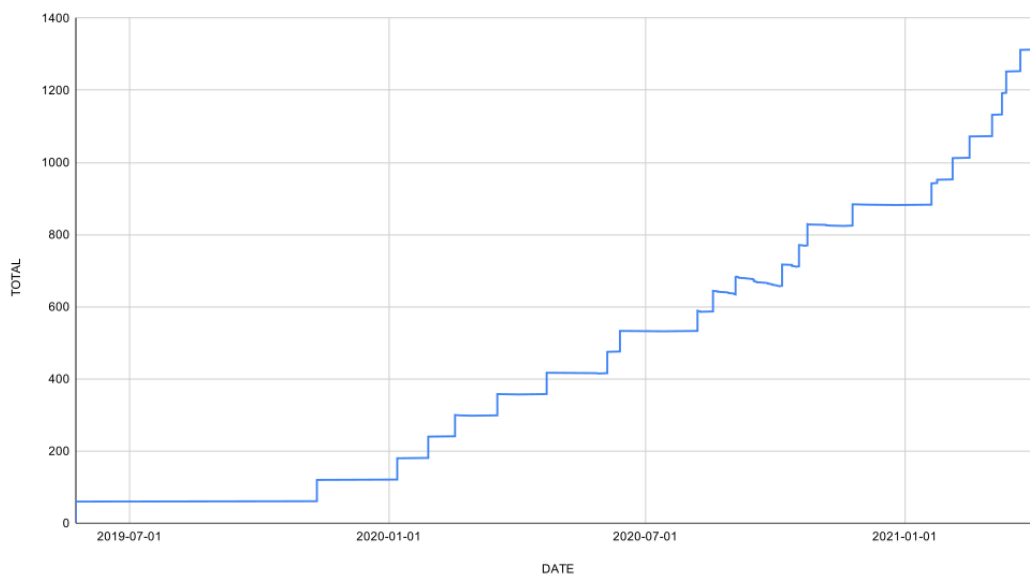
| Broj ljuske | Broj satelita | Visina [km] | Inklinacija [°] |
|-------------|---------------|-------------|-----------------|
| Prva | 1440 | 550 | 53.0 |
| Druga | 1440 | 540 | 53.2 |
| Treća | 720 | 570 | 70.0 |
| Četvrta | 336 | 560 | 97.6 |
| Peta | 172 | 560 | 97.6 |

Izvor: Izradio student na temelju [8]

Dodatno, SpaceX planira lansirati dodatnih 7 500 satelita u orbitu na visini 345 km.

Frekvencije korištene na visinama između 540 i 570 km su u Ku i Ka pojasu, dok će predloženih 7 500 satelita na visini od 345 km operirati u V pojasu (pojas frekvencija iznad Ka pojasa, od 40 do 75 GHz).

Starlink satellites in orbit since May 2019 (target=1440)

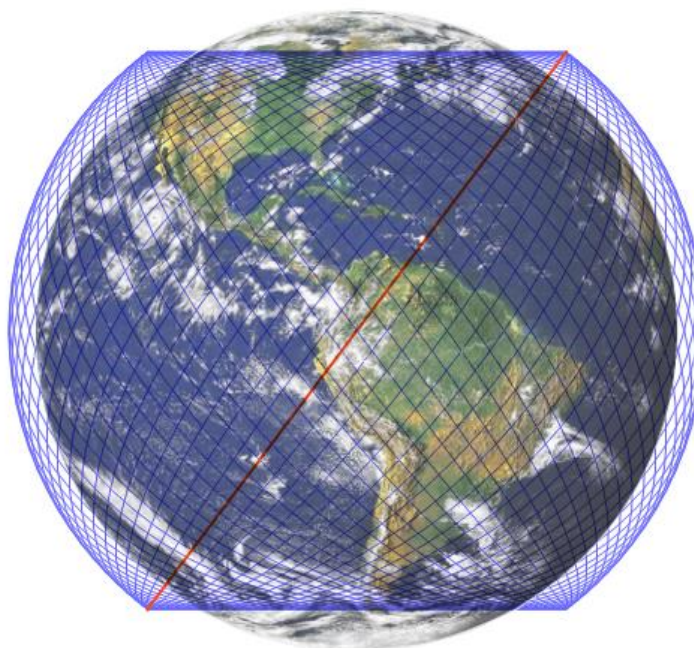


Slika 18. Broj Starlink satelita u orbiti (od svibnja 2019.)

[8]

Starlink Initial Phase

1,584 satellites into 72 orbital planes
of 22 satellites each



Slika 19. Arhitektura prve ljuske Starlink satelitske mreže

[8]

Na Slici 18. prikazan je porast broja Starlink satelita u LEO zaključno sa srpnjem 2019. godine, dok je na Slici 19. prikazan izgled prve ljuske Starlink mreže.

9. SATELITSKI AIS (S-AIS)

Automatski Identifikacijski Sustav (AIS) je obvezni kratkodometni sustav razmjene podataka putem vrlo visokih frekvencija (VHF). Sustav je obavezan prema zahtjevima SOLAS Konvencije. Domet AIS signala je 20-30 nautičkih milja u vidnom polju primo-predajnika.

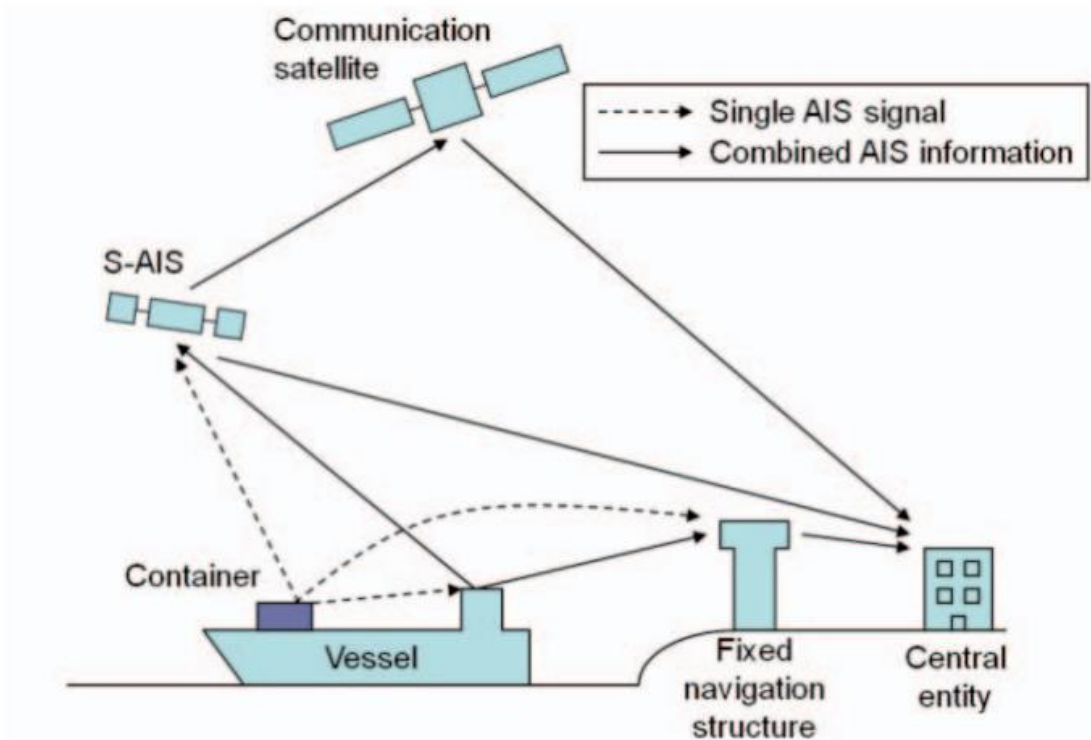
Napredak u mikro i nano satelitskoj tehnologiji omogućava detekciju AIS signala u niskoj Zemaljskoj orbiti. Područje otkrivanja AIS signala u LEO puno je veće, time povećavajući problem sudara poruka u područjima veće koncentracije prometa.

Daljnji problemi vezani su uz prirodu orbite (pokrivenost područja, period satelita), kao i uz tehničke probleme brzine procesiranja i brzine prenošenja podataka. Usprkos problemima, dobiti ovakvog sustava uključuju poboljšani nadzor plovila, prometa i područja te unaprjeđenje opskrbnih lanaca i ekonomiju plovila.

Otkrivanje i kvaliteta praćenja ovise o metodi i algoritmima otkrivanja, orbitalni period satelita, kašnjenje u procesiranju i brzini prenošenja podataka.

Za otkrivanje signala koriste se sljedeće metode: procesiranje na satelitu (engl. *On Board Processing* - OBP), obrada sudara spektra (engl. *Spectrum Decollision Processing* - SDP) i obrada sudara spektra na satelitu (engl. *Spectrum Decollision Processing on Board* - SDPOB). OBP metoda može se koristiti u područjima male gustoće, pošto vjerojatnost otkrivanja pada kada se gustoća približi 1000 brodova. SDP metoda prima sirove podatke spektra koji se šalju kopnenoj stanici na obradu. SDP ima bolji prosjek otkrivanja u prvom prolazu od OBP metode. SDPOB obrađuje primljene AIS podatke na satelitu.

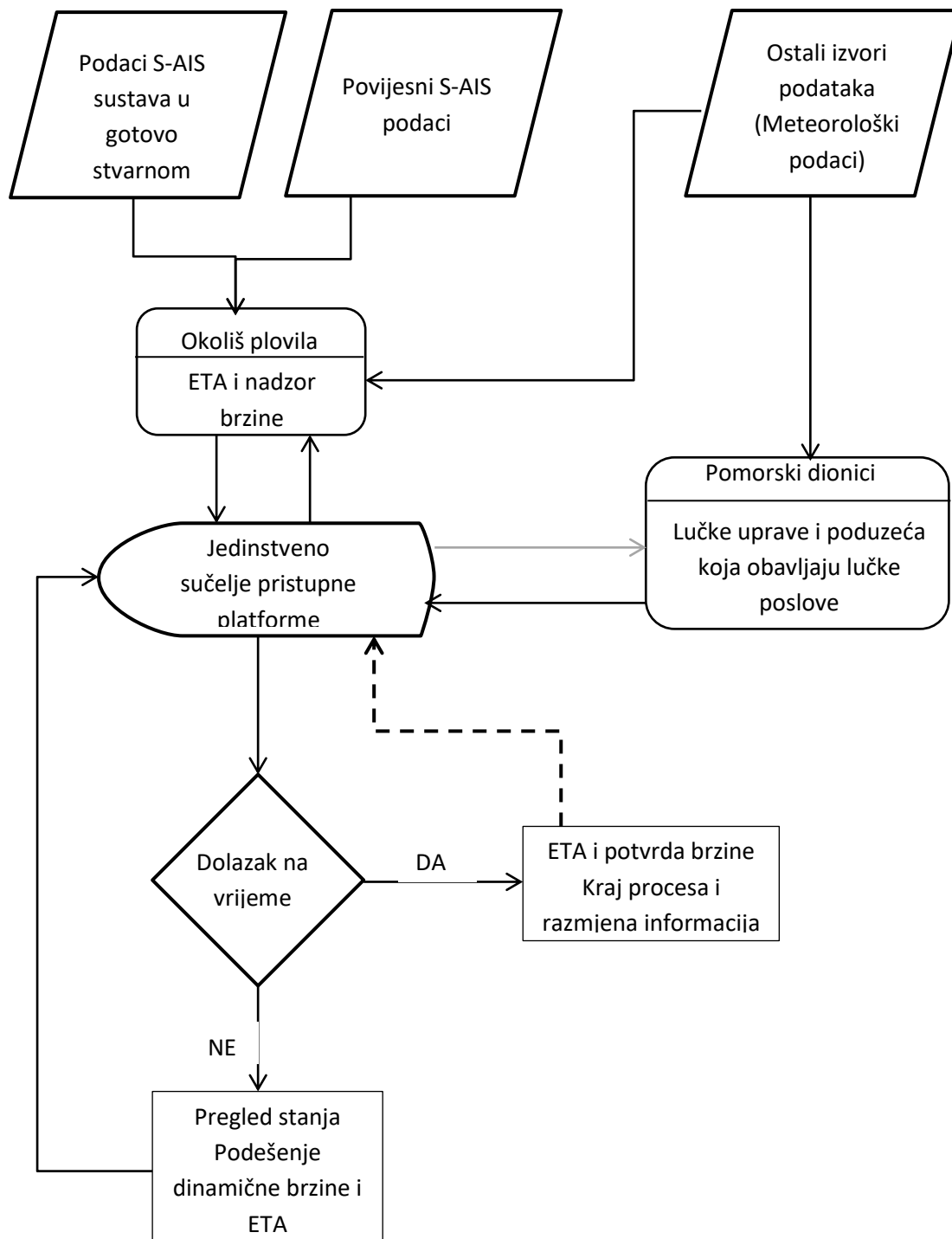
Dodatno, prijedlozi za unaprjeđenje otkrivanja AIS signala uključuju dvije nove AIS frekvencije i dodatnu AIS poruku. Na *ITU World Radio Conference* 2012. godine, predloženi su novi kanali 75 (156.775 MHz) i 76 (156.825 MHz) za prijenos AIS poruka na satelite te je predložena Poruka 27 (Message 27) [9, p. 213]. Na konferenciji 2015. godine, predložene frekvencije su usvojene. Poruka 27 šalje se naizmjenično na namijenjenim dugo-dometnim kanalima svake 3 minute. Poruka se vremenski obilježi u trenutku primitka na satelit s istim shemama samo-organizacije kao i uređaji s kojih su poslani (klasa A i B) time smanjujući mogućnost sudara poruka. Poboljšanje otkrivanja pomoću Poruke 27 potvrđeno je AIS prijammnicima na satelitima NorSat-1 i NorSat-2.



Slika 20. Tok AIS podataka pomoću AIS satelita [9]

Korištenjem trenutnih i povijesnih AIS podataka može koristiti u: predviđanju kašnjenja, planiranju organizacije terminala, menadžmentu i optimizaciji flota i napredak u poslovnim analizama, nadzoru ribarskih aktivnosti i zaštićenih područja, određivanju gustoće prometa, dobivanje informacija o navigacijskim opasnostima.

Na Slici 20. prikazan je put AIS podataka od izvora (broda) do međukorisnika i krajnjih korisnika podataka.



Slika 21. Uporaba podataka za koordinaciju aktivnosti
Izradio student na temelju [9]

Na Slici 21. prikazana je shema uporabe AIS podataka u svrsi unaprijeđenja koordinacije lučkih aktivnosti i pouzdanije procjene vremena dolaska.

10. UPORABA SATELITSKIH MREŽA

Satelitski sustavi u pomorstvu primarno se koriste u svrhu uzbunjivanja traganja i spašavanja te komunikacije u područjima A1, A2 i A3. Zasebni sateliti prate meteorološke promjene te oceanografska mjerenja i zagađenje okoliša. Takvi sateliti se obično kombiniraju zajedno te su nazvani sateliti za promatranje Zemlje. Većina korištenih sustava nalaze se u geostacionarnoj orbiti radi jednostavnog održavanja otiska nad zadanim područjem. Uzimajući u obzir ulogu i cilj satelita za traganje i spašavanje, mana geostacionarne orbite satelita izražena je nemogućnošću određivanja položaja pozivatelja bez priloženih GPS koordinata. Ususret tom, mana LEO orbite pokazuje se u malom otisku pojedinog satelita te smanjenoj vjerojatnosti prihvaćanja poziva uzbunjivanja. Sateliti namijenjeni meteorološkim i oceanografskim mjerenjima te nadzoru onečišćenja nalaze se u geostacionarnoj, niskoj polarnoj orbiti ili orbiti sinkronoj Suncu; omogućavajući praćenje jednog dijela konstantno, cijele Zemlje asinkrono te promatranje dijela Zemlje s istim osvjetljenjem.

Usredotočujući se na komunikacijske satelite i satelite Svjetskog pomorskog sustava za pogibelj i sigurnost (engl. *Global Maritime Distress and Safety System - GMDSS*), sustave dijelimo na geostacionarne i LEO satelitske sustave. GMDSS je komunikacijski sustav za komunikacije brod-kopno putem satelita i digitalnog selektivnog pozivanja, propisan je od Međunarodne pomorske organizacije (engl. *International Maritime Organisation - IMO*) unutar SOLAS Konvencije. Prije svega valja spomenuti satelite unutar geostacionarne orbite, Cospas-Sarsat, Thuraya i Inmarsat. Cospas-Sarsat se koristi isključivo u svrhu traganja i spašavanja. Inmarsat je privatna telekomunikacijska kompanija koja nudi usluge satelitske telekomunikacije te je odobreni pružatelj GMDSS usluga. Thuraya je regionalni satelitski sustav koji omogućava usluge telekomunikacije, no nije odobren za GMDSS usluge. Unutar LEO, odobreni pružatelj GMDSS usluga je Iridium sustav koji ujedno pruža usluge satelitske komunikacije. Nadalje unutar LEO je Orbcomm satelitski sustav koji pruža komunikacijske usluge, ali nije odobreni pružatelj GMDSS usluga.

Mogući budući sustavi unutar LEO orbite koji su u izgradnji, testiranju ili konceptualnoj fazi uključuju: Starlink, OneWeb i Amazon Web Services. U trenutku pisanja rada, OneWeb sateliti pripremaju se za početak pružanja usluga, Amazon Web Servicesu je odobren zahtjev za konstelaciju od 3236 satelita te Starlink s 1635 operativnih satelita [10, 11, 12].

Gledajući u budućnost, važnost satelitskih sustava najvjerojatnije će postajati sve bitnija. Od praćenja meteoroloških pojava i praćenja onečišćenja, do komunikacije, traganja i spašavanja i sveopćeg nadzora; u svakom segmentu postoji sve veća potražnja za točnijim, bržim i pouzdanijim podacima te prijenosima istih. Uz navedene uloge satelitskih sustava, međusobnim povezivanjem i dijeljenjem informacija postavljaju se temelji za buduće tehnologije i sustave. Primjerice razvoj eNavigacije, kao dio integriranog mosta, nadzor sustava na brodu i poboljšanje učinkovitosti logističkog lanca kao i integracija komunikacija s obalnim mrežama [13]. Učinkovitost i pouzdanost budućih sustava i usluga nedvojbeno će ovisiti, između ostalog, i o učinkovitosti povezivanja korisnika i satelitske mreže čija je problematika ukratko opisana u ovom radu.

11. ZAKLJUČAK

Razmjena podataka igra veliku ulogu u današnjim industrijama. U pomorstvu pogotovo, pravovremenim dobivanjem i dijeljenjem informacija postiže se veća razina sigurnosti i učinkovitosti industrije. Infrastruktura potrebna za dobivanje i dijeljenje podataka s područja ne pokrivenih obalnom infrastrukturom se sve većim dijelom nalaze u svemiru. Funkcije i smještaj satelita primarno ovise o namjeni. U ovom radu je fokus naglašen na komunikacijske satelite smještene u niskoj Zemaljskoj orbiti, specifično na problem povezivanja i prenošenja veze stvorene između satelita i korisnika radi ostvarivanja kvalitetnog i brzog prijenosa informacija. Približen je utjecaj visine orbite i korištenih frekvencija na performanse prenošenja podataka.

Ustanovljeno je kako u pogledu brzine i količine podataka LEO ima značajnu prednost nad ostalim orbitama, no sa stanovišta potrebne količine satelita jest u značajnom gubitku. Zbog visine orbite, ostale karakteristike, kao što su period i otisak satelita, potrebne za što jednostavnije obnašanje komunikacijskih usluga otežavaju uspostavu satelitskih sustava. U radu je objašnjen problem te su dana moguća rješenja vezana uz brzu promjenu rutu veze između dva korisnika na Zemlji, kroz prijelaz korisnika između satelita, promjenu rute veze između satelita te optimizaciju rute. Uz pojašnjenje problema, dana su neka od rješenja vezana za dani problem. U dijelu „Upravljanje prosljeđivanjem na temelju Dopplerovog efekta“, predloženo je jedinstveno rješenje za velik broj poteškoća u ostvarivanju kvalitetne veze između dva korisnika. Završno su predočene karakteristike IRIDIUM sustava te

trenutačno poznati podaci o Starlink mega-konstelaciji i prijedlog satelitskog AIS sustava specifično za primjenu u pomorstvu.

Valja istaknuti kako ovaj rad obrađuje sitan dio satelitske industrije te da je kompleksnost opisanih problema svedena na što jednostavniju razinu. Obrazloženjem uporabe sustava dani su primjeri ostalih mreža. Predložene moguće uporabe izražene su površno s ciljem otvaranja uma novim i zanimljivim idejama; nebo više nije granica.

LITERATURA

[1] ‘Types of Orbits’, 2020., ESA
online:https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits
(18.6.2021.)

[2] ‘Satellite frequency bands’, ESA,
online:https://www.esa.int/Applications/Telecommunications_Integrated_Applications/Satellite_frequency_bands (20.6.2021.)

[3] Jurski J., Wozniak J. 2007. ‘Profits and costs of broadband links in satellite networks’, *IEEE, The International Conference on “Computer as a Tool”*, listopad 9-12,
online:<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4400591> , (15.4.2021.)

[4] Seong Chang H., Wan Kim B., Gun Lee C., Lyu Min S., Choi Y., Suk Yang H., Nyun Kim D., Sang Kim C. 1998., ‘FSA-based link assignment and routing in low-earth orbit satellite network’, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 47 No. 3, kolovoz,
online:<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/704858/> (27.4.2021.)

[5] Uzunalioglu H., 1998., ‘Probabilistic routing protocol for low Earth orbit satellite networks’, *IEEE*, online:<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/682592> , (29.4.2021.)

[6] Papapetrou E., Pavlidou F. N. 2005. ‘Analytic study of Doppler-based handover management in LEO satellite system’, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 41 No. 3, srpanj, online:<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1541433> , (6.5.2021.)

[7] Pratt S. R., Raines R. A., Fossa C. E., Temple M. A. 1999. ‘An operational and performance overview of the IRIDIUM low earth orbit satellite system’, *IEEE Communications*

Surveys, drugi kvartal, online:<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5340513/> , (19.4.2021.)

[8] 'Starlink', 2021., online:https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink#Maritime_terminals (30.4.2021.)

[9] Šakan D., Rudan I., Žuškin S., Brčić D. 2018. 'Near Real-time S-AIS: Recent Developments and Implementation Possibilities for Global Maritime Stakeholders', *Scientific Journal of Maritime Research*, 32, online:https://www.researchgate.net/publication/329816757_Near_Real-time_S-AIS_Recent_Developments_and_Implementation_Possibilities_for_Global_Maritime_Stakeholders , (17.6.2021.)

[10] Gohd C., 2021., 'SpaceX paused Starlink launches to give its internet satellites lasers' online:<https://www.space.com/spacex-starlink-internet-satellites-lasers-launch> (7.9.2021.)

[11] 'OneWeb is „on top of the world“ after its latest launch', 2021., online:<https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2021/07/oneweb-is-on-top-of-the-world-after-its-latest-launch.html> (7.9.2021.)

[12] 'Amazon receives FCC approval for Project Kuiper satellite constellation', 2020., online:<https://www.aboutamazon.com/news/company-news/amazon-receives-fcc-approval-for-project-kuiper-satellite-constellation> (7.9.2021.)

[13] Jennings A., 2016, 'Modern Maritime Communications', *World Radiocommunication Seminar*, online:https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/md/15/wrs16/sp/R15-WRS16-SP-0026!!PDF-E.pdf , (1.6.2021.)

[14] 'Frequency bands and transmission directions for data relay satellite networks/systems', 2017., Online:https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sa/R-REC-SA.1019-1-201707-I!!PDF-E.pdf (11.9.2021)

[15] Garrity J., Husar A., 2021., 'Digital connectivity and low earth orbit satellite constellations', *ADB Sustainable Development Working Paper Series*, online:<https://www.adb.org/sites/default/files/publication/696521/sdwp-076-digital-connectivity-low-earth-orbit-satellite.pdf> (15.9.2021.)

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1 Prijedlog Starlink arhitekture | 22 |
|---|----|

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Postizanje orbite [1] | 2 |
| Slika 2. Podjela orbita po visini [15, p. 10]..... | 4 |
| Slika 3. Frekvencijski pojasevi korišteni u satelitskim sustavima [2]..... | 5 |
| Slika 4. Maksimalni TCP protok protoka u funkciji visine orbite [3]..... | 7 |
| Slika 5. Profitabilnost Z u funkciji širine pojasa [3] | 8 |
| Slika 6. Granična mrežna propusnost u funkciji visine orbite [3]..... | 9 |
| Slika 7. Primjer promjene relativne vidljivosti [4]..... | 10 |
| Slika 8. Modeliranje automata konačnog stanja [4]..... | 10 |
| Slika 9. Shema uspostavljanja veza na bazi automata konačnog stanja Izradio student na temelju [4] | 11 |
| Slika 10. Dijagram iterativne optimizacije | 12 |
| Slika 11. LEO satelitska mreža [5] | 14 |
| Slika 12. Tlocrt LEO satelita u polarnom području [5] | 14 |
| Slika 13. Definiranje vremenskog praga u DDBHP metodi [6]..... | 17 |
| Slika 14. Određivanje položaja u DDBHP metodi [6]..... | 18 |
| Slika 15. Pokrivenost IRIDIUM satelitske mreže [Wikipedia: Iridium satellite constellation]..... | 19 |
| Slika 16. Prikaz IRIDIUM među-satelitskih veza [7]..... | 20 |
| Slika 17. Struktura TDMA okvira [7]..... | 21 |
| Slika 18. Broj Starlink satelita u orbiti (od svibnja 2019.) [8]..... | 23 |
| Slika 19. Arhitektura prve ljske Starlink satelitske mreže [8] | 23 |
| Slika 20. Tok AIS podataka pomoću AIS satelita [9]..... | 25 |
| Slika 21. Uporaba podataka za koordinaciju aktivnosti Izradio student na temelju [9]..... | 26 |

POPIS SKRAĆENICA

| Kratica | Engleski naziv | Hrvatski naziv |
|----------------|--|---|
| AIS | <i>Automatic Identification System</i> | Sustav za automatsku identifikaciju |
| LEO | <i>Low Earth Orbit</i> | Niska Zemaljska orbita |
| MEO | <i>Medium Earth Orbit</i> | Srednja Zemaljska orbita |
| GEO | <i>Geostationary Orbit</i> | Geostacionarna orbita |
| SSO | <i>Sun Synchronous Orbit</i> | Orbita sinkrona sa Suncem |
| TCP | <i>Transport Control Protocol</i> | Protokol kontrole prijenosa |
| FSA | <i>Finite State Automaton</i> | Automat konačnog stanja |
| UDL | <i>UP-Down Link</i> | Primopredajna veza |
| ISL | <i>Inter-Satellite Link</i> | Međusatelitska veza |
| PDF | <i>Probability Distribution Function</i> | Funkcija gustoće vjerojatnosti |
| DDBHP | <i>Dynamic Doppler-Based Handover Prioritization</i> | Shema određivanja prioriteta zasnovana na Dopplerovom |

| | <i>scheme</i> | efektu |
|-------|---|--|
| TDMA | <i>Time Division Multiple Access</i> | Vremenski raspodijeljen višestruki pristup |
| FDMA | <i>Frequency Division Multiple Access</i> | Frekvencijski raspodijeljen višestruki pristup |
| FCC | <i>Federal Communication Commission</i> | Federalna komunikacijska komisija |
| ITU | <i>International Telecommunication Union</i> | Međunarodna telekomunikacijska unija |
| OBP | <i>On Board Processing</i> | Procesiranje na satelitu |
| SDP | <i>Spectrum Decollision Processing</i> | Obrada sudara spektra |
| SPOB | <i>Spectrum Decollision Processing On Board</i> | Obrada sudara spektra na satelitu |
| GMDSS | <i>Global Maritime Distress and Safety System</i> | Svjetski pomorski sustav pogibelji i sigurnosti |
| GNSS | <i>Global Navigation Satellite System</i> | Globalni navigacijski satelitski sustav |
| SOLAS | <i>International Convention for the Safety of Life at Sea</i> | Međunarodna konvencija o zaštiti ljudskih života na moru |
| IMO | <i>International Maritime Organization</i> | Međunarodna pomorska organizacija |