

# Uloga modernih satelitskih komunikacionih mreža u obezbjeđivanju kontinuirane povezanosti tokom humanitarnih intervencija u ratom pogođenim područjima

## Studentski rad

Eldar Džanić, Hana Midžić, Mejra Berberović, Razija Merdanić, Sarah Šertović

Studenti prvog ciklusa studija

*Tehnički fakultet, Univerzitet u Bihaću*

Bihać, Bosna i Hercegovina

{edzanic1251, hmidzic1260, mberberovic1252, rmerdanic1275, ssertovic1250}.tfb@unbi.ba

**Sažetak**—U ovom radu predstavljene su tehnologije, mogućnosti i značaj satelitskih komunikacionih mreža, koje su danas postale ključan segment savremenih kritičnih komunikacija, posebno u uslovima ratnih sukoba i humanitarnih kriza, gdje je zemaljska infrastruktura preopterećena, van funkcije ili potpuno oštećena. Rad analizira tehničke karakteristike modernih satelitskih sistema, njihove arhitekture i performanse, te razmatra njihovu ulogu prilikom obezbjeđivanja konstantne komunikacije tokom humanitarnih intervencija u ratom pogođenim područjima.

**Ključne riječi**—satelitske komunikacije, krizno upravljanje, LEO/MEO/GEO arhitekture, humanitarne operacije, VSAT sistemi, space-air-ground integracija.

### I. UVOD

Savremeni humanitarni i krizni scenariji sve češće se odvijaju u uslovima u kojima je komunikaciona infrastruktura djelimično oštećena, ozbiljno degradirana ili u potpunosti uništena. Oružani sukobi, prirodne katastrofe, dugotrajna politička nestabilnost i infrastrukturni kolaps stvaraju okruženja u kojima tradicionalni zemaljski sistemi, poput mobilnih mreža, optičkih kablova, radio-linkova i napojnih sistema prestaju da ispunjavaju osnovne operativne zahtjeve [7]. U takvim okolnostima sposobnost pravovremene razmjene informacija postaje ključni preduslov za koordinaciju spasilačkih timova, upravljanje resursima, donošenje odluka i uspostavljanje minimalnog nivoa organizovanosti na terenu [3], [5].

U posljednjoj deceniji satelitske komunikacione mreže prošle su kroz temeljnu tehnološku transformaciju, obilježenu razvojem višeslojnih orbitalnih arhitekture, naprednim pristupnim protokolima i značajnim unapređenjem korisničke opreme [3]. Ove promjene dovele su do toga da satelitski segment, nekada rezervisan za specijalizovane vojne i industrijske aplikacije, postane široko primjenjiv alat u humanitarnim misijama i operacijama kriznog upravljanja. Posebno se ističu moderni LEO i MEO sistemi koji omogućavaju nisku latenciju, visoku propusnost i mobilnost terminala, čime se otvara

prostor za upotrebu servisa u realnom vremenu, uključujući medicinsku telekonsultaciju, taktičku koordinaciju i integrisane komandno-informacijske tokove. Posebna složenost komunikacije u ratom pogođenim područjima ogleda se u potrebi za brzim, pouzdanim i infrastrukturno nezavisnim rješenjima, što predstavlja izazov i sa tehničkog i sa organizacionog aspekta.

Cilj ovog rada je da prikaže ulogu modernih satelitskih komunikacionih mreža u obezbjeđivanju kontinuiteta veze tokom humanitarnih intervencija u ratom pogođenim područjima, uz analitičko razmatranje njihovih tehničkih mogućnosti, arhitektura i ograničenja. Kroz prikaz operativnih modela primjene i studija slučaja iz međunarodnih misija, rad nastoji da doprinese jasnijem razumijevanju načina na koji satelitske mreže omogućavaju organizaciju, koordinaciju i informacionu podršku humanitarnim timovima u visoko rizičnim i infrastrukturno nestabilnim uslovima.

### II. KOMUNIKACIJA U KRIZNIM I RATOM POGOĐENIM PODRUČJIMA

U situacijama ratnih sukoba, prirodnih katastrofa ili humanitarnih kriza, komunikaciona infrastruktura na tlu često bude ozbiljno kompromitovana ili potpuno uništena, što ugrožava sposobnost spasilačkih timova, humanitarnih organizacija i lokalnih vlasti da koordiniraju aktivnosti, pruže pomoć i održavaju kontakt sa pogođenim stanovništvom. U takvim okolnostima, satelitska komunikacija postaje neophodan i često jedini pouzdan kanal povezivanja. Katastrofalnim događajima poput zemljotresa, poplava ili ratnih dejstava, zemaljski komunikacioni kanali (mobilne mreže, fiksna telefonija, kablovi) često budu uništeni ili nefunkcionalni. Kod takvih događaja pouzdanost i otpornost komunikacije postaju kritični kriterij. Satelitske mreže omogućavaju globalnu pokrivenost, što znači da i daleka, izolovana ili razrušena područja mogu biti dostupna telefonskom i podatkovnom

vezom. Za hitne intervencije, spasilačke i humanitarne timove, ključni su pouzdan prenos glasovne i podatkovne komunikacije, situaciono-obavještajne informacije, koordinacija i logistika, sve to često u vrlo rizičnim i nepredvidivim uslovima. Satcom (satelitska komunikacija) omogućava upravo tu fleksibilnost i dostupnost. Satelitske veze omogućavaju mapiranje šteta, praćenje terena, logistiku, koordinaciju spašavanja, evakuaciju, distribuciju pomoći i komunikaciju sa centrima, što je neophodno u vanrednim stanjima.

#### *A. Prednosti satelitske komunikacije u ratnim i kriznim uslovima*

Satelitski komunikacioni sistemi u ovakvim scenarijima nude brojne tehničke i operativne prednosti. Prva i najznačajnija odnosi se na potpunu nezavisnost od lokalne infrastrukture: satelitski linkovi ostaju funkcionalni bez obzira na stanje telekomunikacione, elektroenergetske ili saobraćajne mreže na tlu, čime se minimizira mogućnost da prekid baznih stanica ili oštećenje kablovske mreže ugrozi kontinuitet komunikacije [4]. Ova karakteristika omogućava da se komunikacioni kapaciteti održe čak i u uslovima potpunog infrastrukturnog kolapsa, što je od ključnog značaja u prvim satima nakon kriznog događaja [6]. Druga prednost odnosi se na mogućnost brze uspostave veze i globalne pokrivenosti. Zahvaljujući orbitalnim mrežama, komunikacioni sistemi se mogu aktivirati i u udaljenim, teško dostupnim ili razorenim oblastima, gdje bi izgradnja nove zemaljske infrastrukture bila dugotrajna i finansijski zahtjevna. Ova sposobnost omogućava humanitarnim i spasilačkim timovima da momentalno uspostave komunikaciju u zonama do kojih je pristup otežan ili nemoguć. Satelitske mreže posjeduju i izrazitu otpornost na prirodne nepogode i degradaciju infrastrukture na tlu. Za razliku od mobilnih mreža i optičkih kablova, koji su podložni oštećenjima usljed poplava, zemljotresa, klizišta ili rušenja objekata, satelitski sistemi ostaju operativni jer nisu fizički povezani s ranjivim komponentama na zemlji. Time predstavljaju pouzdanu alternativu u okruženjima u kojima su lokalni komunikacioni resursi onesposobljeni [7].

#### *B. Ograničenja i izazovi satelitske komunikacije u ratnim i kriznim uslovima*

Iako satelitski komunikacioni sistemi imaju ključnu ulogu u obezbjeđivanju kontinuiteta veze u kriznim i ratnim područjima, njihova primjena u praksi nije bez određenih tehničkih i organizacionih izazova. Jedno od najznačajnijih ograničenja odnosi se na troškove opreme i terminala. Prenosive komunikacione stanice, VSAT antene i napredni korisnički terminali često predstavljaju značajnu finansijsku investiciju, što može biti posebno problematično za humanitarne organizacije koje djeluju sa ograničenim budžetom i zavise od donatorskih sredstava. Iako se cijene opreme smanjuju s razvojem novih satelitskih sistema, početni trošak i dalje predstavlja barijeru široj implementaciji. Dodatni izazov proizlazi iz potrebe za tehničkom podrškom i adekvatno obučeni kadrom. Za razliku od standardnih mobilnih mreža,

rad sa satelitskim terminalima podrazumijeva pravilno usmjeravanje antene, konfiguraciju komunikacionih parametara i kontinuirano održavanje stabilnosti linka, što zahtijeva nivo stručnosti koji u kriznim zonama nije uvijek dostupan. Nedostatak obučeni operatera ili nemogućnost njihovog brzog raspoređivanja može dovesti do kašnjenja u uspostavi komunikacije ili do smanjenja kvaliteta servisa. Uz logističke izazove, prisutne su i frekvencijske i regulativne prepreke koje mogu dodatno otežati implementaciju. Satelitske komunikacije zahtijevaju koordinaciju frekvencijskih resursa, poštovanje međunarodnih propisa i usklađivanje sa lokalnim regulatornim okvirima. U ratnim zonama, posebno u područjima pod podijeljenom kontrolom ili bez funkcionalnih državnih institucija, dobijanje dozvola ili usklađivanje sa regulatornim normama može biti otežano ili čak nemoguće. Ovakvi faktori mogu ograničiti dostupnost pojedinih satelitskih servisa ili usporiti njihovo uvođenje u kritičnim fazama operacija [12].

#### *C. Ograničenja zemaljske komunikacione infrastrukture*

Zemaljska komunikaciona infrastruktura u ratnim i kriznim uslovima pokazuje visok stepen ranjivosti jer se oslanja na fizičke komponente kao što su bazne stanice, optičke vodove i elektroenergetske mreže, koje su među prvim tačkama pogođenim oružanim dejstvima, sabotazama ili prirodnim katastrofama [8]. Čak i parcijalna oštećenja ovih elemenata mogu izazvati prekid mobilne i fiksne komunikacije na širokom području, što je potvrđeno u više međunarodnih misija za odgovor na katastrofe. Pored fizičkih oštećenja, zemaljske mreže često trpe preopterećenje usljed naglog porasta saobraćaja, nedostatka rezervnih kapaciteta i degradacije signala, pri čemu dolazi do potpunog preopterećenja servisa u ključnim fazama kriznog upravljanja. U okruženjima bez redundantnih komunikacionih puteva i funkcionalnih mehanizama za oporavak, infrastruktura ostaje trajno degradirana, što značajno ograničava mogućnost koordinacije i pravovremenog djelovanja terenskih timova. Iako zemaljski komunikacioni sistemi u normalnim uslovima omogućavaju visok kapacitet i nisku latenciju, njihova zavisnost od fizičke infrastrukture čini ih izrazito ranjivim u ratnim i kriznim situacijama. Nasuprot tome, satelitske mreže ne zavise od lokalnih komunikacionih resursa, ali njihova primjena podrazumijeva veće troškove i složeniju organizaciju, što zahtijeva pažljivo planiranje u humanitarnim operacijama [9].

### III. SAVREMENE ARHITEKTURE I TEHNOLOŠKI MODELI SATELITSKIH KOMUNIKACIJA ZA KRIZNO UPRAVLJANJE

Savremene satelitske komunikacione mreže predstavljaju infrastrukturni temelj naprednih kriznih i humanitarnih sistema, jer omogućavaju stabilnu, geografski nezavisnu i visoko otpornu povezanost u okruženjima u kojima je zemaljska infrastruktura kompromitovana, potpuno uništena ili logistički nedostupna. Razvoj satelitskih tehnologija tokom posljednje decenije obilježen je prelaskom sa monolitnih geostacionarnih sistema na složene višeslojne arhitekture koje obuhvataju LEO, MEO i GEO orbitalne platforme. Ova transformacija

omogućila je postizanje kombinovanih performansi niske latencije, visokog kapaciteta i globalne dostupnosti što predstavlja ključne parametre za operacije u ratnim i kriznim područjima. U tehničkoj osnovi savremenih mreža nalazi se koncept višeslojne i redundantne orbitalne komunikacije, gdje se različiti orbitalni segmenti kombinuju kako bi se izgradila robusna infrastruktura koja može nastaviti sa radom i u uslovima potpunog kolapsa lokalnih resursa. Za razliku od zemaljskih mreža, čija je funkcionalnost ograničena fizičkom strukturom, fiksnim prijenosnim putevima i visokom ranjivošću infrastrukture, satelitski sistemi eliminišu kritične tačke prekida („single point of failure“) i obezbjeđuju autonomnu komunikaciju bez potrebe za lokalnom mrežnom podrškom [1].

#### A. Orbitalni slojevi satelitskih komunikacija i njihova uloga u kriznim operacijama

**LEO** – Niska orbita kao backbone za nisku latenciju i dinamične operacije LEO sistemi (500–2000 km visine) trenutno su tehnološki najintenzivnije razvijan segment satelitskih mreža. Njihove ključne karakteristike uključuju:

- Latenciju usporedivu sa 4G/5G mobilnim sistemima,
- Vrlo visok kapacitet zahvaljujući velikom broju satelita,
- Optčke međusatelitske veze (ISL) koje omogućavaju rutiranje bez zemaljskih gateway čvorova,
- Otpornost u scenarijima gdje su zemaljski segmenti potpuno uništeni [3].

LEO mreže su idealne za operacije koje zahtijevaju rad u realnom vremenu, uključujući:

- medicinske telekonsultacije,
- koordinaciju spasilačkih timova,
- taktičku komunikaciju,
- prenos video-nadzora i situacionih podataka [11].

Njihova sposobnost brze aktivacije, mobilnosti i neovisnosti o lokalnim resursima čini ih najefikasnijim rješenjem u prvim satima nakon kriznog događaja [7].

**MEO** – Srednja orbita kao kompromis kapaciteta i regionalne stabilnosti MEO sistemi (5000–20 000 km), na primjer O3b mPOWER, popunjavaju tehnološki prostor između LEO mobilnosti i GEO stabilnosti. Njihove prednosti uključuju:

- široke pokrivne zone,
- srednju latenciju (70–150 ms),
- visok propusni kapacitet zbog upotrebe naprednog beam-forminga i adaptivne modulacije,
- preciznu integraciju sa navigacionim sistemima.

MEO sistemi se najčešće koriste u:

- dugotrajnim regionalnim humanitarnim misijama,
- operacijama u udaljenim bazama,
- komunikaciji sa zračnim platformama (HALE, aerostati),
- povezivanju kampova i logističkih centara.

Njihova široka stabilna pokrivenost čini ih pogodnim za srednje velike operativne zone gdje je prioritet balans između kapaciteta i prostorne konzistentnosti [7].

**GEO** – Geostacionarni segment kao stub kontinuiteta i broadcast komunikacije GEO sistemi (35 786 km visine)

tradicionalno predstavljaju najstabilniji sloj globalne satelitske infrastrukture. Njihove ključne karakteristike su:

- stalna pokrivenost velikih geografskih cjelina,
- minimalni zahtjevi prema terminalnoj opremi,
- visoka pouzdanost i jednostavnost implementacije,
- idealnost za broadcast, centralizovano informisanje i upravljanje.

Iako GEO sistemi imaju veću latenciju (500+ ms), ona nije presudna u sljedećim humanitarnim scenarijima:

- distribuiranje informacija širokom krugu korisnika
- rad komandnih centara,
- sporije taktičke i logističke komunikacije,
- satelitske IoT aplikacije.

Međutim, uprkos brojnim prednostima, višeslojni satelitski sistemi zahtijevaju složenu koordinaciju između različitih orbitalnih segmenata i operatera, što može predstavljati izazov u dinamičnim kriznim okruženjima. Njihova funkcija je posebno važna u dugotrajnim operacijama gdje stabilnost linka ima prednost nad brzinom razmjene poruka [3].

#### B. Sinergija orbitalnih slojeva

Kombinovanje LEO, MEO i GEO sistema kreira:

- robustnu, redundantnu mrežu,
- optimalnu raspodjelu latencije, kapaciteta i pokrivenosti,
- otpornost na poremećaje u elektromagnetnom spektru,
- fleksibilnost rekonfiguracije u realnom vremenu.

Ovakav višeslojni pristup čini savremene satelitske komunikacione mreže jednim od najpouzdanijih sistema za krizno upravljanje. Kombinacija LEO–MEO–GEO arhitektura pruža jedinstvenu operativnu prednost: komunikacija ostaje dostupna čak i u okruženjima potpunog infrastrukturnog kolapsa, pri čemu se postiže optimalna ravnoteža brzine, stabilnosti i pokrivenosti.

article graphix caption

TABELA I. OSNOVNE KARAKTERISTIKE LEO, MEO I GEO SISTEMA

	LEO	MEO	GEO
Visina	500–2000 km	5000–20000 km	35786 km
Latencija	20–50 ms	70–150 ms	500+ ms
Pokrivenost	Mala	Srednja	Vrlo velika
Br. satelita	100+	10–20	3–4
Primjena	Taktičke	Regionalni linkovi	Broadcast
Prednost	Niska latencija	Balans performansi	Stabilnost
Ograničenje	Kompleksnost	Manja dostupnost	Velika latencija

Prikazane vrijednosti predstavljaju tipične operativne opsege zasnovane na dostupnoj literaturi i iskustvima iz primjene savremenih satelitskih sistema u kriznim situacijama. Tabela predstavlja uporedni prikaz ključnih tehničkih parametara satelitskih sistema niske (LEO), srednje (MEO) i geostacionarne orbite (GEO), sa fokusom na njihove operativne performanse u kontekstu kriznog upravljanja i humanitarnih misija. U poređenju su prikazane osnovne razlike u orbitalnoj visini, latenciji, pokrivenosti, kapacitetu i tipičnim scenarijima primjene, što omogućava jasnije razumijevanje prednosti i

ograničenja svakog orbitalnog sloja. Ovakva komparativna analiza pruža osnovu za dizajn višeslojnih satelitskih arhitektura koje kombinuju LEO brzinu, MEO regionalnu efikasnost i GEO stabilnost, čime se obezbjeđuje optimalna komunikaciona podrška u okruženjima sa narušenom ili nepostojećom zemaljskom infrastrukturom. Razumijevanje pojedinačnih orbitalnih slojeva omogućava jasnije sagledavanje načina na koji se oni kombinuju u savremenim integrisanim arhitekturama za krizno upravljanje.

#### IV. NAPREDNE INTEGRISANE ARHITEKTURE SATELITSKIH KOMUNIKACIONIH SISTEMA

##### A. Integrisani „space-air-ground“ komunikacioni modeli

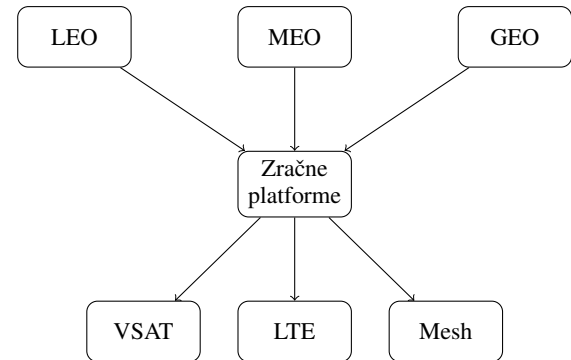
Koncept integrisanih space-air-ground arhitektura predstavlja savremeni pristup projektovanju komunikacionih sistema namijenjenih operacijama u kriznim i ratnim područjima. Ovaj koncept predstavlja složenu komunikacionu infrastrukturu koja integriše orbitalne, zračne i zemaljske komponente u jedinstven operativni sistem. Model kombinuje resurse orbitalnog, zračnog i zemaljskog segmenta s ciljem osiguravanja stabilne povezanosti i u uslovima potpunog infrastrukturnog kolapsa [11]. Satelitski sloj (LEO/MEO/GEO) funkcioniše kao primarni backhaul i obezbjeđuje globalnu dostupnost, dok zračne platforme poput HALE letjelica, aerostata i dronova sa pristupnim čvorištima proširuju lokalnu pokrivenost u područjima gdje topografija ili razaranja onemogućavaju direktni pristup satelitu. Zemaljski segment čine privremene taktičke mikro-ćelije, mobilni LTE sistemi i mesh mreže, koje omogućavaju distribuciju satelitskog signala do krajnjih korisnika [9]. Prednost ovakvog modela ogleda se u njegovoj visokoj adaptivnosti i mogućnosti rekonfiguracije u realnom vremenu, što je potvrđeno i u međunarodnim humanitarnim misijama. Kombinacija orbitalnih slojeva sa fleksibilnim pristupnim mrežama omogućila je uspostavu komunikacije u područjima u kojima je zemaljska infrastruktura bila potpuno uništena, čime je značajno skraćeno vrijeme potrebno za formiranje komandnih struktura i koordinaciju timova na terenu.

##### B. Terminalni sistemi i lokalna obrada podataka

Terminalni sistemi predstavljaju ključnu tačku dodira između satelitske mreže i korisnika na terenu, te direktno utiču na stabilnost komunikacije u humanitarnim i kriznim operacijama. Savremeni VSAT sistemi i kompaktne korisničke antene projektovani su za brzu instalaciju i rad bez složenog podešavanja, što omogućava njihovu upotrebu i u uslovima ograničenog tehničkog kadra. Uz njih, sve značajniju ulogu imaju digitalno upravljane fazne antene koje omogućavaju stabilno praćenje LEO satelita i održavanje veze na mobilnim platformama poput vozila i komandnih jedinica. Paralelno s razvojem terminalne opreme raste važnost lokalne (edge) obrade podataka. Obrada informacija na samom terminalu uključujući filtriranje saobraćaja, predobradu slika i lokalno keširanje podataka smanjuje opterećenje satelitskog kanala i omogućava brže donošenje odluka u operacijama koje zahtijevaju rad u realnom vremenu [4]. Na taj način SATCOM

sistemi prelaze iz rezervne komunikacione opcije u centralni operativni alat za koordinaciju timova i upravljanje misijama u nestabilnim okruženjima [5].

article tikz



SLIKA 1. MODEL INTEGRISANE SPACE-AIR-GROUND SATELITSKE ARHITEKTURE

U ovakvom modelu komunikacija se ostvaruje tako što se signal od krajnjih korisnika najprije distribuira putem lokalnih zemaljskih mreža ili zračnih platformi, nakon čega se putem satelitskog segmenta prosljeđuje ka centralnim komandnim ili informacionim centrima.

##### C. Operativna iskustva i praktični izazovi

Međunarodna iskustva pokazuju da višeslojne satelitske arhitekture mogu obezbijediti stabilnu komunikaciju i u najtežim uslovima, no njihova implementacija prati niz praktičnih izazova. U inicijalnoj fazi odgovora na krizu presudni su mobilnost i brzina postavljanja opreme moderni terminali omogućavaju uspostavu veze u svega nekoliko minuta, što je ključno za formiranje prvih komandnih čvorišta [8]. Međutim, terenske misije često se suočavaju s ograničenjem energetske izvora, logističkim poteškoćama i degradacijom signala u elektromagnetno zagušenim okruženjima, što može uticati na kvalitet veze. Drugi važan izazov odnosi se na operaterske kompetencije. Iako su moderni terminali pojednostavljeni, pravilno pozicioniranje antene i praćenje parametara linka i dalje zahtijevaju minimalni nivo obuke. U nedostatku obučenog osoblja mogu se javiti prekidi u komunikaciji u ključnim fazama misije. Uprkos tome, operativna praksa potvrđuje da satelitske mreže ostaju najpouzdaniji kanal komunikacije u sredinama gdje su svi drugi sistemi neupotrebljivi.

#### V. PRIMJERI MODELA SATELITSKE KOMUNIKACIJE U PRAKSI (STUDIJE SLUČAJA)

U ovom dijelu daju se konkretni primjeri primjene satelitskih sistema u kriznim scenarijima. Tehničke karakteristike po slojevima (LEO, MEO, GEO) opisane su u Sekciji III i sažete u Tabeli I. Primjena savremenih satelitskih komunikacionih sistema u humanitarnim i kriznim misijama najjasnije se razumije kroz situacije u kojima je zemaljska infrastruktura bila teško oštećena, degradirana ili potpuno uništena. U takvim okolnostima satelitske mreže ostaju jedini tehnološki resurs

sposoban da obezbijedi neprekidnu povezanost i operativnu koordinaciju. Sljedeći primjeri zasnivaju se na iskustvima međunarodnih organizacija i tehnoloških agencija.

#### *A. Primjena LEO sistema u savremenim visokorizičnim okruženjima*

Tokom posljednjih godina LEO sistemi, posebno komercijalni sistem Starlink kompanije SpaceX, postale su ključan komunikacioni resur u područjima zahvaćenim oružanim sukobima i dugotrajnim infrastrukturnim poremećajima. Primjeri upotrebe LEO satelitskih sistema zabilježeni su tokom oružanih sukoba u istočnoj Evropi nakon 2022. godine, gdje su mobilni satelitski terminali korišteni za obezbjeđivanje komunikacije u uslovima potpunog prekida zemaljske infrastrukture. Uništenje elektroenergetske mreže, prekid optičkih linija i nestanak mobilnih baznih stanica dovode do kolapsa lokalnih komunikacija. LEO sistemi omogućavaju stabilan prenos taktičkih, medicinskih i situacionih podataka u realnom vremenu, uspostavljanje privremenih komandnih čvorišta i integraciju terenskih timova preko mobilnih terminala. Prema dostupnim podacima iz 2022. godine, u roku od nekoliko dana nakon početka sukoba isporučeni su prvi terminali, dok je instalacija pojedinačnog terminala trajala približno 15–20 minuta. Do sredine 2022. godine u upotrebi je bilo više od 13 000 terminala, dok je do septembra iste godine broj primljenih terminala premašio 20 000. Značajan dio terminala korišten je u zdravstvenim ustanovama, gdje je instalirano više stotina stanica za potrebe bolnica i hitne medicinske pomoći. U tehničkom smislu, izmjerena latencija (ping) sistema Starlink u urbanim područjima iznosila je približno 30–50 ms, što odgovara tipičnim LEO vrijednostima prikazanim u Tabeli I. Brzine prenosa podataka u testovima su dosezale 136–200 Mbps pri preuzimanju sadržaja. Niska latencija i relativno visoka propusnost omogućile su aplikacije u realnom vremenu, uključujući taktičku koordinaciju, telemedicinu i upravljanje bespilotnim sistemima. Optičke međusatelitske veze smanjuju zavisnost od zemaljskih gateway čvorova i omogućavaju rad čak i u uslovima snažnog elektromagnetnog ometanja. Niska latencija LEO sistema omogućila je razmjenu podataka u realnom vremenu, što je imalo direktan uticaj na efikasnost medicinske i logističke koordinacije [9].

#### *B. Humanitarne misije nakon velikih zemljotresa: GEO i prenosivi VSAT sistemi*

Katastrofe u različitim dijelovima svijeta pokazale su da su klasični HTS (High Throughput Satellite) GEO sistemi korišteni od strane međunarodnih organizacija (npr. Intelsat, Eutelsat, Inmarsat) najpouzdaniji resur u prvim satima nakon zemljotresa. Nakon velikih zemljotresa u Aziji i Karibima tokom prethodne decenije, prenosivi VSAT sistemi bazirani na GEO satelitima korišteni su kao primarni komunikacioni resur za koordinaciju spasilačkih i humanitarnih timova. Primjeri iz prakse pokazuju da su tokom zemljotresa na Haitiju (2010) i u Nepalju (2015) VSAT sistemi korišteni za uspostavljanje internet veze i koordinaciju međunarodnih spasilačkih timova. Paralelno s tim, satelitske snimke visoke rezolucije korištene

su za procjenu štete, planiranje evakuacije i optimizaciju raspodjele resursa. Organizacije poput UNOSAT-a i drugih međunarodnih tijela redovno koriste satelitske podatke za brzu procjenu stanja na terenu. Razaranja objekata, prekidi napajanja i gubitak telekomunikacijskih čvorišta često rezultiraju potpunim prekidom mobilne i fiksne komunikacije. VSAT centri koje koriste međunarodne organizacije omogućavaju formiranje komandno-informacijskih struktura, koordinaciju timova i razmjenu satelitskih snimaka neophodnih za procjenu štete. Upotreba prenosivih VSAT sistema omogućila je formiranje privremenih komandnih centara već u prvim satima nakon katastrofe [7].

#### *C. Dugotrajne humanitarne operacije u područjima sa degradiranom infrastrukturom*

U regionima pogođenim dugotrajnom nestabilnošću, satelitske mreže često potpuno zamjenjuju zemaljske komunikacione sisteme. U dugotrajnim humanitarnim misijama u subsaharskoj Africi i regionima Bliskog istoka, satelitske mreže su u brojnim slučajevima preuzele ulogu primarne komunikacione infrastrukture zbog hronične degradacije zemaljskih sistema. Kombinacija GEO broadcast kanala, LEO terminala, LTE mikro-ćelija i mesh mreža omogućava stabilno funkcionisanje kampova i mobilnih timova [12]. Ovakvi modeli posebno su značajni u državama sa slabim regulatornim okvirom ili nefunkcionalnom infrastrukturom. U takvim uslovima satelitske mreže postaju primarni, a ne rezervni komunikacioni sistem [8].

#### *D. Poplave i hidrološke katastrofe: integracija MEO sistema i zračnih platformi*

Kod velikih poplava veći dijelovi teritorije postaju izolovani od komunikacione infrastrukture. Tokom velikih poplava u centralnoj i jugoistočnoj Evropi u periodu nakon 2010. godine, integrisani modeli koji kombinuju MEO satelitski backhaul i zračne platforme korišteni su za uspostavljanje privremene komunikacione mreže u izolovanim područjima. Hibridne arhitekture zasnovane na MEO backhau, dronovima sa pristupnim čvorištima, prenosivim VSAT sistemima i mesh mrežama omogućavaju uspostavljanje funkcionalnog komunikacionog sistema. MEO sistemi poput O3b mPOWER obezbjeđuju tipičnu latenciju od približno 70–150 ms, uz visok kapacitet po beam-u. MEO segment pruža visok kapacitet za prenos satelitskih snimaka i kartografskih podataka, dok zračne platforme proširuju lokalnu pokrivenost i omogućavaju pristup izoliranim zajednicama [6].

Analiza navedenih slučajeva pokazuje jasnu korelaciju između orbitalnog sloja i tipa operacije. LEO sistemi dominiraju u inicijalnoj fazi kriznog odgovora zbog niske latencije i brze instalacije, dok GEO i MEO sistemi preuzimaju stabilizacijsku ulogu u srednjoročnim i dugoročnim operacijama. Ovakva raspodjela funkcija potvrđuje opravdanost višeslojne orbitalne arhitekture opisane u Sekciji III.

## VI. ZAKLJUČAK

Satelitske komunikacione mreže pokazale su se kao jedan od najpouzdanijih i tehnološki najzrelijih resursa za obezb-

jeđivanje povezanosti u uslovima u kojima zemaljska infrastruktura ne može da ispuni ni minimalne operativne zahtjeve. Analiza savremenih orbitalnih platformi, integrisanih komunikacionih arhitektura i terenskih iskustava jasno ukazuje da satelitski segment ima ključnu, a u mnogim scenarijima i presudnu ulogu u stvaranju stabilnog komunikacionog okvira tokom humanitarnih misija i intervencija u ratom pogođanim područjima.

Višeslojni orbitalni pristup, koji kombinuje prednosti LEO, MEO i GEO sistema, omogućava istovremeno postizanje niske latencije, široke pokrivenosti i visoke propusnosti, čime se značajno unapređuje operativna sposobnost timova na terenu. Posebno se ističe značaj LEO sistema u aplikacijama u realnom vremenu, dok GEO i MEO platforme obezbjeđuju stabilnost, regionalnu pokrivenost i kapacitet neophodan za komandne centre, razmjenu satelitskih snimaka i dugotrajne humanitarne operacije. Integracija satelitskog, zračnog i zemaljskog segmenta dodatno širi mogućnosti primjene u kompleksnim topografskim i taktičkim uslovima, dok moderni terminalni sistemi, mobilne bazne stanice i lokalna obrada podataka doprinose većoj autonomiji, efikasnosti i otpornosti komunikacionih veza.

Praktična iskustva iz međunarodnih misija potvrđuju da satelitska komunikacija nije samo dopunski ili privremeni resurs, već strateška infrastruktura bez koje je savremeno krizno upravljanje teško zamislivo. Njena sposobnost brzog raspoređivanja, rada nezavisno od lokalne infrastrukture i integracije sa drugim tehnološkim segmentima direktno utiče na brzinu reakcije, koordinaciju timova i ukupnu efikasnost humanitarnih intervencija. Uprkos tehničkim, regulatornim i logističkim izazovima, satelitski sistemi ostaju jedini medij koji može obezbijediti kontinuiranu i globalno dostupnu povezanost u uslovima potpunog infrastrukturnog kolapsa.

Na osnovu analiziranih tehnologija i prikazanih primjera iz prakse može se zaključiti da savremene satelitske komunikacione mreže predstavljaju temelj kriznog upravljanja u uslovima ratnih sukoba i infrastrukturnog kolapsa. Posebno se izdvaja uloga LEO sistema u inicijalnoj fazi kriznog odgovora, gdje niska latencija i brza instalacija terminala omogućavaju uspostavu komunikacije u realnom vremenu, dok MEO i GEO sistemi obezbjeđuju stabilnost, regionalnu pokrivenost i kapacitet neophodan za dugotrajne humanitarne operacije i rad komandnih centara. Integracija orbitalnih slojeva u okviru space-air-ground arhitekture pokazuje se kao optimalan model budućih humanitarnih intervencija, jer omogućava kombinaciju brzine, pouzdanosti i globalne dostupnosti. Dalji razvoj interoperabilnih standarda, višeslojnih konstelacija i naprednih terminalnih rješenja dodatno će učvrstiti poziciju satelitskog segmenta kao centralnog stuba pouzdane komunikacije u kriznim i ratom pogođanim područjima.

#### LITERATURA

- [1] G. Maral and M. Bousquet, *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology*, 6th ed., Hoboken, NJ: Wiley, 2020.
- [2] P. Angeletti and L. Piergentili, *Satellite Communications Systems Engineering*, Cham, Switzerland: Springer, 2022.

- [3] Y. Su, C. Jiang, and Z. Han, "LEO Satellite Communications: Trends and Challenges," *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 2, pp. 40–47, Apr. 2019.
- [4] E. Yaacoub and M.-S. Alouini, "A Key 6G Challenge and Opportunity—Connecting the Unconnected: Satellites in Humanitarian Communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 1, pp. 34–39, Jan. 2021.
- [5] X. Zhang, L. Wang, K. Wang, and V. C. M. Leung, "Space-Air-Ground Integrated Network for Future Wireless Systems: A Survey," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 76133–76145, 2019.
- [6] S. Plasencia and J. Vergara, "The Role of Satellite Communications in Humanitarian Operations," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 7, pp. 20–26, Jul. 2020.
- [7] European Space Agency (ESA), *SATCOM for Disaster Management Report*, Paris: ESA Communications, 2021.
- [8] SES S.A., *O3b mPOWER System Technical Overview*, Luxembourg, SES Technical Report, 2022. [Online]. Available: <https://www.ses.com/>
- [9] SpaceX, *Starlink System Overview*, 2023. [Online]. Available: <https://www.starlink.com/>
- [10] S. Ettinger, *Communications for Disaster Management*, Hershey, PA: IGI Global, 2020.
- [11] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, and M. Zorzi, "Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, Mar. 2020.
- [12] O. Kotheli et al., "Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 23, no. 1, pp. 70–109, 2021.

#### ABSTRACT

This paper analyzes key aspects of satellite communication networks used in humanitarian and crisis operations, with emphasis on LEO/MEO/GEO architectures, integrated space-air-ground models, terminal systems, and operational challenges in environments affected by war and infrastructure collapse. Special attention is given to the importance of continuity of communication, coordination of rescue teams, and the resilience of satellite systems in conditions where terrestrial networks are unavailable or destroyed.

#### THE ROLE OF MODERN SATELLITE COMMUNICATION NETWORKS IN ENSURING CONTINUOUS CONNECTIVITY DURING HUMANITARIAN INTERVENTIONS IN WAR-AFFECTED AREAS

Eldar Džanić  
 Hana Midžić  
 Mejra Berberović  
 Razija Merdanić  
 Sarah Šertović