

Radijsko načrtovanje brezžičnih mobilnih omrežij v izrednih razmerah

Andrej Hrovat, Andrej Vilhar, Matjaž Depolli, Igor Ozimek, Tomaž Javornik

*Inštitut Jožef Stefan, Odsek za komunikacijske sisteme, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: andrej.hrovat@ijs.si*

Povzetek. V izrednih razmerah, kot so naravne nesreče večjih razsežnosti, je bistvenega pomena hitra in učinkovita vzpostavitev začasnega brezžičnega mobilnega omrežja, namenjenega govornim komunikacijam in prenosu podatkov. Arhitekturo začasnih mobilnih omrežij, namenjenih komunikacijam v izrednih razmerah, ki je predlagana v evropskem projektu ABSOLUTE, sestavljajo prenosne zemeljske bazne postaje in prenosne zračne bazne postaje, nameščene na posebnih zračnih plovilih, lebdečih nekaj sto metrov nad tlemi (low altitude platform LAP), ki so kombinacija balona in zmaja. Z bazno postajo, nameščeno na zračno plovilo, zagotovimo široko pokritost terena, medtem ko zemeljske postaje zagotavljajo zahtevano zmogljivost radijskega omrežja. Optimizacija parametrov opisanega celičnega omrežja pa ni preprosta zaradi interferenčnih motenj, ki jih povzroča radijska celica, nameščena na zračni ploščadi. V članku predlagamo metodo optimizacije začasnega omrežja LTE za namene komuniciranja v izrednih razmerah. Predlagana rešitev vsebuje radijsko planiranje, izvedeno z uporabo odprtokodnega orodja GRASS-RaPlAT, razvitega na Inštitutu Jožef Stefan, in optimizacijo parametrov omrežja z uporabo večkriterijskega evlucijskega algoritma. Lastnosti postavljenega začasnega mobilnega omrežja so odvisne od lokacije, višine in usmerjenosti anten in oddajnih moči baznih postaj. Cilj optimizacije je določitev optimalne arhitekture mobilnega omrežja za izredne razmere, pri kateri bo pokritost ogroženega območja maksimalna, minimalna interferenca med posameznimi celicami in čim večja zmogljivost radijskega omrežja. V prispevku bomo prikazali dva scenarija, in sicer: i) soobstoj arhitekture za komunikacije v izrednih razmerah z obstoječim komercialnim mobilnim omrežjem in ii) upravljanje topologije baznih postaj, ki je sestavljena iz zračnih (AeNB) in zemeljskih (PLMU) baznih postaj.

Ključne besede: arhitektura mobilnega omrežja, optimizacija, kriterijske funkcije, evlucijski algoritem, GRASS-RaPlAT

Radio planning of wireless mobile networks in emergency situations

In emergency situations, such as extensive natural disasters, a rapid and effective establishment of a temporary wireless mobile network for emergency communications and transmission of information is essential. The architecture of a temporary mobile network for communications in emergency situations proposed by the European project ABSOLUTE consists of portable land mobile base stations and a mobile aerial base station embedded in the Low Altitude Platform (LAP) which is a combination of a balloon and kite (helikite). The base stations installed on aircrafts provide broad terrain coverage, while the earth stations deliver the required capacity of the radio network. Due to the interference caused by the radio cells mounted on aerial platforms, optimization of the described cellular network is a challenging task. The paper proposes a method to optimize temporary LTE network for communications in emergency situations. The solution consists of radio planning carried out by the GRASS-RaPlAT open source tools developed at the "Jozef Stefan" Institute and network parameters optimization using a multi-objective evolutionary algorithm. The properties of the temporary

mobile network depend on an accurate planning of the specified locations, height, direction and transmitting power of the base station antennas. The optimization objective is to determine the optimal architecture of the mobile network for emergency situations with the maximal coverage of the affected area, lowest interference between cells and maximum network capacity. Two scenarios are analyzed, namely (i) coexistence of the architecture for communications in emergency situations with the existing commercial cellular network and (ii) topology management of the base stations consisting of aerial (AeNB) and earth (PLMU) base stations.

1 UVOD

Optimizacija mobilnih omrežij je iterativni postopek, sestavljen iz več korakov, katerega cilj je doseči maksimalno učinkovitost omrežja. Ena ključnih točk je optimizacija lokacij baznih postaj (BS), na kar vplivajo številni dejavniki. Poleg dejstva, da je število mogočih lokacij za postavitev baznih postaj pogosto omejeno zaradi pravnih razlogov, se, zlasti v izrednih razmerah, pogosto zgodi, da postavitev na določeno lokacijo ni

fizično izvedljiva (lokacija je prenevarna, nedostopna, itd.). Postavitev baznih postaj po navadi poteka v dveh korakih. V prvem koraku nameščene bazne postaje zagotavljajo pokritost območja s signalom nad določeno mejno vrednostjo. V drugem koraku pa je treba za zagotovitev ustrezne zmogljivosti omrežja na izbranih območjih izvesti zgoščevanje omrežja. Nadaljnje izboljšanje učinkovitosti sistema je mogoče doseči s prilagajanjem nastavitve baznih postaj.

Algoritmi za postavitev baznih postaj in za izboljšanje pokritja in zmogljivosti omrežja že obstajajo [1, 2]. Vendar pa problematika optimizacije sistemov LTE in LTE-Advanced z realnimi podatki o profilu terena in podatkov o zgradbah ter uporabo najnovejših orodij za načrtovanje omrežij še ni bila natančneje obdelana. Poleg tega pa je, v smislu izrednih scenarijev, popolnoma zanemarjena tudi analiza soobstoja preživele komercialne komunikacijske infrastrukture in oportunističnih baznih postaj. Zato smo razvili nov optimizacijski postopek, ki temelji na odprtokodnem RF planerskem orodju GRASS RaPlAT [3] in evolucijskem algoritmu (EA) AMS-DEMO [4].

Cilji predlagane rešitve so povečanje učinkovitosti omrežja, zmanjšanje potrebnih virov in posledično zmanjšanje stroškov obratovanja. Na podlagi profila terena, podatkov o zgradbah in z uporabo najnovejših statističnih modelov orodje izračuna izgubo poti in z maksimiranjem izbranih kriterijskih funkcij določi optimalne lokacije in parametre baznih postaj. Orodje je popolnoma generično in je ob ustrezni izbiri kriterijskih funkcij uporabno za načrtovanje kateregakoli brezžičnega mobilnega omrežja.

Razvito metodo smo testirali na območju Ljubljane. Celoten koncept optimizacije smo najprej preizkusili na komercialnem mobilnem omrežju. Pokazalo se je, da je mogoče s spreminjanjem različnih parametrov baznih postaj (oddajna moč, smer in lokacija antene) optimizirati ključne karakteristike omrežja (pokritje, interferenca in zmogljivost). V nadaljevanju smo v sistem dodali zračne bazne postaje in analizirali soobstoj obeh sistemov. Analizirali smo tudi možnost zagotavljanja komunikacij v izrednih razmerah le z začasnimi zračnimi in zemeljskimi baznimi postajami. Rezultati kažejo, da so zračne postaje, nameščene na LAP-ih, izjemno uporabne predvsem za zagotavljanje široke pokritosti omrežja v prvih fazah reševalnih operacij, z dodatnimi zemeljskimi postajami pa zagotavljamo ustrezno zmogljivost omrežja v poznejših fazah.

Preostanek prispevka ima naslednjo strukturo. Drugo poglavje vsebuje predstavitev projekta ABSOLUTE in prikaz same arhitekture omrežja za izredne razmere. V tretjem poglavju podajamo celoten postopek

optimizacije, vključno z orodjem za načrtovanje omrežij, evolucijskim algoritmom in kriterijskimi funkcijami. Opise vhodnih podatkov, računalniških zmogljivosti in računskih časov vsebuje četrto poglavje. V naslednjem poglavju analiziramo simulacijska scenarija postavitev in optimizacije omrežij v izrednih razmerah. Prispevek zaključimo s šestim poglavjem, ki vsebuje sklepne ugotovitve.

2 PROJEKT ABSOLUTE

Osnovni cilj projekta ABSOLUTE je načrtovanje in potrditev inovativne celovite omrežne arhitekture, ki zagotavlja zanesljive komunikacijske storitve in izpolnjuje naslednje zahteve [5]:

- hitra postavitev, prilagodljivost, razširljivost in rekonfigurabilnost,
- zagotavljanje širokopasovnih storitev,
- prožnost, razpoložljivost in varnost,
- integracija tehnologije LTE-A z naprednimi satelitskimi komunikacijami in obstoječimi omrežji javne varnosti ter enot za zaščito in reševanje (TETRA).

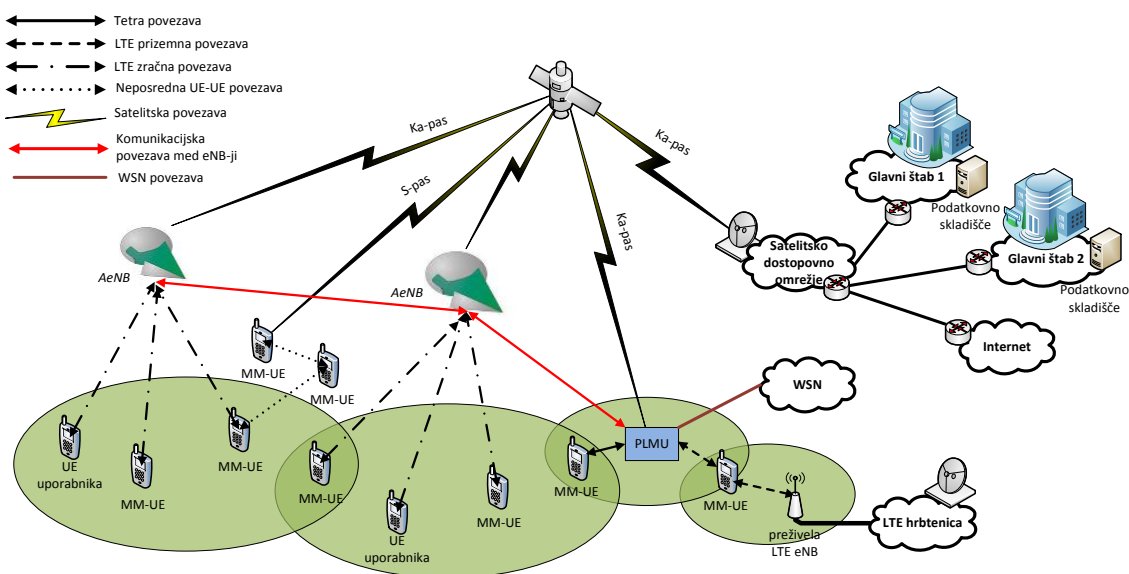
Z oportunističnim združevanjem zračnih, zemeljskih in satelitskih komunikacijskih povezav bo izboljšana razpoložljivost omrežja in omogočena hitra ter postopna vzpostavitev omrežja. Brezšivno prilagodljivo in močno razširljivo omrežno okolje vključuje tudi podporo za ustrezno stopnjo mobilnosti in energetske učinkovitosti.

2.1 Arhitektura

Arhitektura omrežja ABSOLUTE je predstavljena na sliki 1, ki prikazuje različne elemente omrežja in komunikacijske povezave. Ključna ideja arhitekture omrežja je v hitri konfiguraciji in vzpostavitvi širokopasovnega omrežja, kar je omogočeno z uporabo zračnega in zemeljskega segmenta. V zračnem segmentu so uporabljene zračne bazne postaje (AeNB), nameščene na posebnih zračnih plovilih (LAP – Low Altitude Platforms), v drugem segmentu pa mobilne zemeljske bazne postaje (PLMU – Portable Land Mobile Unit). Obseg izrabe obeh segmentov je odvisen tako od zahtev po pokritosti območja in razširljivosti operacije, kot tudi od gostote omrežja, ki zagotavlja namensko pasovno širino in interoperabilnost z obstoječimi sistemi.

Glavni gradniki omrežja ABSOLUTE so:

- zračna bazna postaja LTE-A (AeNB), nameščena na nizko letečo platformo (LAP), ki zagotavlja visoke prenosne hitrosti in pokritost obsežnega območja,

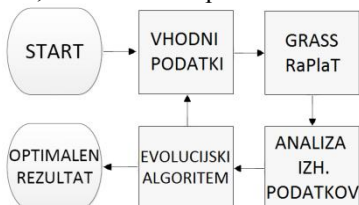


Slika 1: Arhitektura ABSOLUTE

- mobilne zemeljske postaje (PLMU), ki vsebujejo mobilne komunikacijske bazne postaje (LTE ali UMTS), bazno postajo TETRA, dostopni točki omrežja WiFi in brezžičnega senzorskega omrežja ter hrbtnično širokopasovno satelitsko povezavo v frekvenčnem pasu Ka; PLMU zagotavlja tudi interoperabilnost med različnimi komunikacijskimi sistemi,
- napredna večsistemska profesionalna naprava LTE-A (MM-UE – MultiMode-User Equipment), ki omogoča komunikacijo LTE v neposrednem načinu delovanja (LTE D2D) in neposredno storitev pošiljanja sporočil prek satelitske povezave v frekvenčnem pasu S, če se nahaja zunaj pokritja AeNB oziroma PLMU.

3 ORODJE ZA OPTIMIZACIJO MOBILNEGA OMREŽJA

Postopek optimizacije omrežja prikazuje slika 2. Razdeljen je na več korakov. Jedro orodja sestavljata del za izračun pokritosti omrežja in interference ter evolucijski del, ki išče nabor optimalnih rešitev.



Slika 2: Blok diagram optimizacijskega orodja

3.1 GRASS-RaPlaT

Načrtovanje omrežja je izvedeno z orodjem GRASS-RaPlaT [3], ki je bilo razvito kot dodatek orodju

GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) [6]. GRASS je odprtokodni geografski informacijski sistem, ki deluje z rastrskimi in vektorskimi podatki. Vsebuje metode za upravljanje podatkov, obdelavo slik, izdelavo map in prikaz. Jedrni moduli in knjižnice so napisani v programskem jeziku C. Okolje GRASS ima zelo dobro podprte vmesnike za programiranje aplikacij (API) z več sto funkcijami, dostopnimi za programiranje novih modulov. Obdelava podatkov je avtomatizirana z uporabo skriptnih jezikov.

RaPlaT je odprtokodno modularno planersko orodje v okolju GRASS, razvito na Inštitutu Jožef Stefan. Uporablja se za analizo pokritosti terena z radijskim signalom in za načrtovanje omrežij. Pri izračunih upošteva različne parametre baznih postaj (oddajna moč, nagib in smer anten, itd.). V orodju so implementirani različni modeli za izračun izgube poti v ruralnem in urbanem okolju. Postopek izračuna pokritosti območja z radijskim signalom sestavljajo izračun izgube poti za izotropni vir, izračun pokritosti za izbrani tip antene in njene namestitve ter generiranje podatkov za celotno pokritost radijskega celičnega omrežja. Posamezni koraki so med seboj povezani s skripto *r.radcov*, napisano v programskem jeziku Python.

3.2 Evolucijski algoritem

Evolucijski algoritmi (EA) so stohastični optimizacijski algoritmi, ki delujejo po principih, privzetih iz biološke evolucije [7]. Poiščejo optimalne argumente, ki jim rečemo tudi rešitve, za podano kriterijsko funkcijo, tako da začnejo iz naključne populacije rešitev, ki jih nato v iteracijah mutirajo in medsebojno križajo v čedalje boljše rešitve. Ker za vsako smiselno optimizacijo velja, da njene rešitve konvergirajo, se algoritem ustavi takrat, ko se z dodatnimi iteracijami populacija rešitev ne

izboljšuje več. Večkriterijska optimizacija išče optimalne rešitve po več kriterijih hkrati ter jih primerja po optimalnosti Pareto. Rezultat večkriterijskega EA je množica optimalnih rešitev Pareto, to je rešitev, ki pomenijo različne kompromise med optimalnostjo posameznih kriterijev in za katere velja, da nobena ni slabša od preostalih v vseh kriterijih. Konvergenca večkriterijskega EA se ugotavlja tako, da se v vsaki iteraciji izračuna hipervolumen, ki ga omejuje na eni strani fronta optimalnih rešitev Pareto in na drugi strani referenčna točka, ki je nastavljena tako, da je slabša od vseh mogočih rešitev. EA-ji omogočajo relativno preprosto paralelizacijo in AMS-DEMO je primer učinkovite vzporedne implementacije.

3.3 Optimizacijski postopek

Komunikacija med evolucijskim algoritmom AMS-DEMO in orodjem GRASS-RaPlat upravlja skripta Python. Njeno psevdokodo podaja algoritem 1.

Algorithm 1 Python script

```

1: initialization
2: connecting to GRASS environment
3: starting r.radcov module
4: csv1 ← coverage processed data output
5: csv2 ← SINR processed data output
6: csv3 ← quality processed data output
7: csv4 ← maximum occupancy ( $N_{max}$ ) per cell output
8:  $N_{ref}$  ← allowed cell occupancy output
9:  $i, m$  ← No. of raster points below the threshold
10:  $j, n, y$  ← No. of all raster points
11: loop
12:   if  $N_{max} < N_{ref}$  then
13:     for all (csv1) do
14:       if csv1 > -95 dBm then
15:          $i \leftarrow i + 1$ 
16:          $j \leftarrow j + 1$ 
17:       for all (csv2) do
18:         if csv2 > 6 dB then
19:            $m \leftarrow m + 1$ 
20:            $n \leftarrow n + 1$ 
21:         for all (csv3) do
22:            $x \leftarrow x + csv3$ 
23:            $y \leftarrow y + 1$ 
24: [coverage, SINR, quality] ← [ $i/j, m/n, x/y$ ]
25: output calculated data into .txt file

```

EA iterativno izvaja prilagajanje vhodnih podatkov in oceni obdelane rezultate imenovane rešitve. Omrežni parametri, ki so ocenjeni v predhodni iteraciji, se posredujejo v GRASS-RaPlat in obdelajo z modulom *r.radcov*. Ta izvede izračun izgube poti z izboljšanim modelom Okumura-Hata [3], ki z upoštevanjem profila terena, podatkov o rabi tal in senčenju zagotavlja realistične rezultate za mestna, primestna in podeželska območja. Za izračun najmočnejšega signala in nivoja vseh drugih motilnih signalov za vsako točko rastra upošteva še oddajno moč in sevalni diagram antene. V nadaljevanju se obdelani vhodni podatki analizirajo glede na izbrane kriterijske funkcije in pošljejo v EA, kjer se izvaja vrednotenje. Na podlagi najboljših predhodnih rezultatov EA izračuna nove vhodne

podatke in začne novo iteracijo. Cilj opisanega iterativnega optimizacijskega postopka je maksimiranje vseh kriterijskih funkcij.

3.4 Kriterijske funkcije

Za optimizacijo mobilnega omrežja smo izbrali tri kriterijske funkcije: i) pokritost, ii) SINR in iii) kvaliteto. Dodatno smo določili še pogojno funkcijo, imenovano iv) zasedenost, ki ji morajo zadostiti vsi elementi iz množice rešitev.

- **Pokritost** je delež točk na zemljevidu, pri katerih je sprejeta moč signala večja od zahtevane mejne vrednosti -95 dBm. Izbrana vrednost pomeni mejni nivo sprejetega signala, ki še omogoča povezave brez izpadov.
- **SINR** je delež točk, pri katerih je razmerje moči koristnega sprejetega signala in skupne interference večje od 6 dB pri predvideni polni obremenitvi sistema. Uporablja se za identifikacijo kritičnih robnih delov celic, kjer so zaradi manjšega pretoka uporabnikom na voljo okrnjene storitve. S povečevanjem vrednosti SINR je za preprečevanje interference potrebno manj koordinacije znotraj celice in med celicami, posledično pa se poveča tudi zmogljivost sistema.
- Kriterijska funkcija **kvaliteta** je povprečje vrednosti kvalitet v vseh točkah izbranega območja. Pri tem se za posamezno točko kvaliteto določi kot razmerje teoretične spektralne učinkovitosti, izračunane s pomočjo SISO (Single Input - Single Output) Shannon-ove formule za zmogljivost, in fiktivne vrednosti števila uporabnikov, ki je za posamezno točko na zemljevidu določeno glede na tip terena. Za referenco se uporablja kvaliteta izračunana za originalno postavitev omrežja in nastavitve anten.
- **Zasedenost** pomeni skupno število uporabnikov v posameznem sektorju. Uporabljamo jo z namenom, da pri optimizaciji ne bi prekoračili normalnih obremenitev v smislu prenosnih zmogljivosti, ki jih najdemo pri radijskih celicah v realnih omrežjih. Zasedenost je izračunana s seštevanjem uporabnikov, pri čemer se upoštevajo točke, kjer najmočnejši sprejeti signal pripada isti celici. Referenčna vrednost je dobljena z izračunom zasedenosti najbolj zasedene celice pri originalni postavitvi anten. Ta vrednost je določena kot maksimalna dopustna vrednost zasedenosti katerekoli celice pri optimizaciji.

4 VHODNI PODATKI

Orodje za optimizacijo zahteva več različnih vhodnih podatkov. Ključni modul za radijsko planiranje, *r.radcov*, prebere začetno konfiguracijsko datoteko

omrežja in zemljevide okolja v rastrski obliki. Rastrski zemljevid je podatkovna plast, ki je sestavljena iz mrežastega polja celic. Vsebuje končno število stolpcev in vrstic s podatkovno točko v vsaki celici. Poleg konfiguracijske datoteke omrežja v obliki CSV (Comma-Separated Values) potrebuje orodje dva rastrska zemljevida: digitalni model višin (DEM – Digital Elevation Model) in zemljevid s podatki o rabi tal (Clutter data map) z ločljivostjo 25 m x 25 m.

DEM je rastrski zemljevid, ki vsebuje koordinate terena v koordinatnem sistemu Gauss-Krüger in podatke o višini posamezne rastrske točke. Zemljevid rabe tal pa vsebuje vrednosti izgube poti signala za vsako točko rastra, ki je odvisna od tipa in rabe terena. Tipične vrednosti slabljenja so bile pridobljene z meritvami in se dodelijo glede na tip terena na izbranem območju. Konfiguracijska datoteka določenega omrežja vsebuje lokacije, oddajne moči, fizične vertikalne nagibe in višine anten ter njihove sevalne diagrame. Poleg opisanih vhodnih datotek je za izračun interference v eni rastrski točki v orodju za optimizacijo mogoče določiti še oddajno frekvenco, model izgube poti, število procesorjev za večprocesno obdelavo in število upoštevanih signalov iz različnih oddajnikov. Za optimizacijo lokacij baznih postaj se dodatno upoštevajo tudi lokacije stavb, ki se v simulacijsko okolje uvozijo kot rastrski zemljevid.

Prikazani scenariji temeljijo na obstoječi konfiguraciji komercialnega radijskega omrežja na območju Ljubljane v velikosti 122.6 km² z originalnimi nastavitvami smeri in nagibov anten. Na vsaki bazni postaji je bila oddajna moč posamezne antene nastavljena na 46 dBm, mehanski vertikalni nagib anten se je spreminjal od -20° do 10°, smer anten pa je bila nastavljena na tipične vrednosti 30°, 150° oziroma 270°.

Za učinkovito izkoriščanje možnosti paralelizacije evolucijskih algoritmov deluje AMS-DEMO na skupini tridesetih računalnikov. Vsak od njih ima vgrajen procesor Intel Xeon 5220 in 6 GB delovnega pomnilnika. Na vsakem računalniku se hkrati izvaja le ena simulacija. Celotni simulacijski čas razdelimo na procesni čas za radijsko planiranje, čas za ocenjevanje rešitev in čas za iskanje optimalnih rešitev z AMS-DEMO. Procesni čas je odvisen od števila anten, velikosti analiziranega območja, ločljivosti rastrskih podatkov in izbranega modela izgube poti. Celoten čas optimizacije je močno odvisen tudi od razpoložljive računalniške moči in števila iteracij, ki so potrebne, da optimizirano omrežje doseže zelene zmogljivosti.

5 REZULTATI POSTAVITVE IN OPTIMIZACIJE OMREŽJA V IZREDNIH RAZMERAH

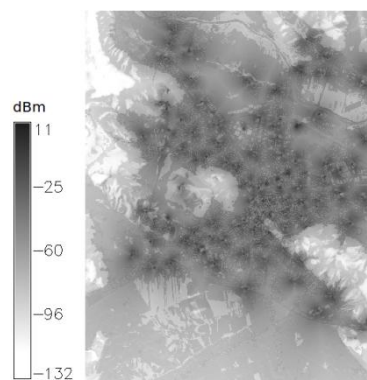
V nadaljevanju bomo predstavili dva simulacijska scenarija, ki opisujeta postavitev in optimizacijo omrežja za izredne razmere. V prvem scenariju predvidevamo popolno okvaro obstoječega omrežja in

zgraditev začasnega omrežja, ki ga v nadaljevanju dograjujemo s postopnim vključevanjem komercialnih baznih postaj. V drugem scenariju predvidevamo, da obstoječih omrežij ni mogoče obnoviti in je treba vzpostaviti popolnoma samozadostno komunikacijsko omrežje. V obeh scenarijih smo upoštevali zahteve po maksimalni pokritosti prizadetega področja, minimalni interferenci med posameznimi celicami in čim večji zmogljivosti povezav.

5.1 Postopna gradnja omrežja

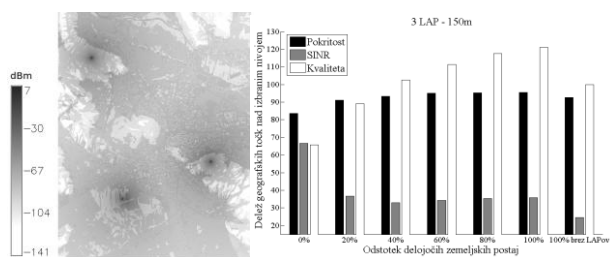
V tem scenariju predvidevamo hudo nesrečo, ki povzroči popolno okvaro obstoječega mobilnega omrežja. Komunikacije se postopoma znova vzpostavijo, najprej z nekaj nizko letečimi platformami (LAP), ki imajo nameščene bazne postaje (AeNB) in so razporejene nad prizadetim območjem. V naslednjem koraku sledi ponovno vključevanje obstoječih komercialnih baznih postaj. V testnem primeru se bazne postaje vključijo v omrežje v petih korakih. V vsakem koraku se vključi 20 odstotkov naključno izbranih baznih postaj. Preizkusili smo primere s tremi oziroma šestimi LAP-i, ki so bili nameščeni na isti višini. Obe testni konfiguraciji smo preizkusili na treh različnih višinah: 150 m, 200 m in 300 m. Skupna analiza je zajemala šest podscenarijev, ki so analizirani v nadaljevanju. Oddajno moč zračne bazne postaje AeNB smo nastavili na 48 dBm, oddajne moči zemeljskih baznih postaj pa so bile nastavljene na 46 dBm.

Pokritost originalnega omrežja komercialnega mobilnega operaterja na območju Ljubljane prikazuje slika 3. V tem primeru je vrednost kriterijskih funkcij »pokritost« in »SINR« 92.4 oziroma 25 odstotkov.

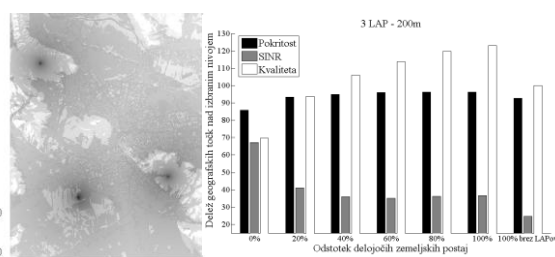


Slika 3: Originalna namestitev baznih postaj mobilnega operaterja v Ljubljani

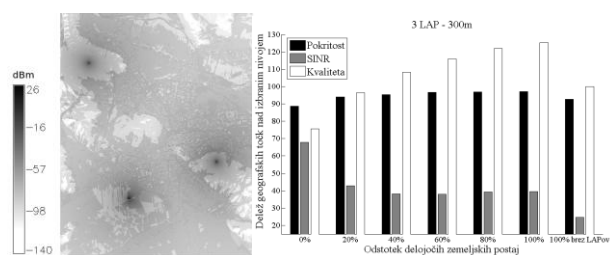
V nadaljevanju so podani rezultati za opisane konfiguracije postopnega vzpostavljanja komunikacijskega omrežja v izrednih razmerah. Slike 4, 5, in 6 predstavljajo rezultate s tremi vzpostavljenimi LAP-i, slike 7, 8 in 9 pa rezultate s šestimi vzpostavljenimi LAP-i. Položaji LAP-ov so optimizirani s predhodno opisanim optimizacijskim orodjem.



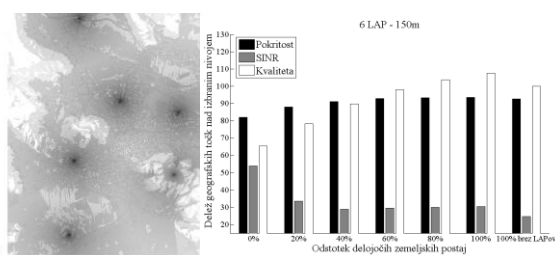
Slika 4: Trije LAP-i na 150 m



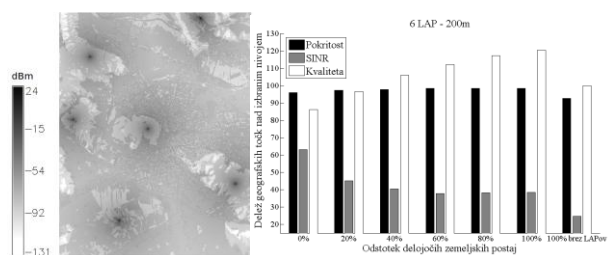
Slika 5: Trije LAP-i na 200 m



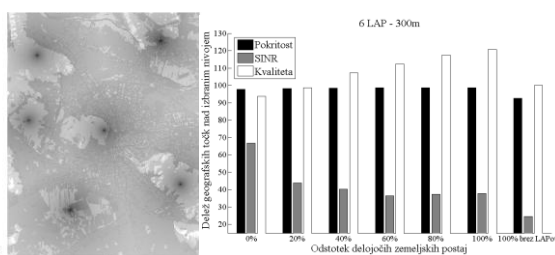
Slika 6: Trije LAP-i na 300 m



Slika 7: Šest LAP-ov na 150 m



Slika 8: Šest LAP-ov na 200 m



Slika 9: Šest LAP-ov na 300 m

Pri analizi smo upoštevali vse kriterijske funkcije. Medtem ko sta »pokritost« in »SINR« v absolutnem razmerju z največjo mogočo vrednostjo 100 odstotkov, »kakovost« vsebuje relativno informacijo o kakovosti omrežja v smislu dosegljivih prenosnih bitnih hitrosti glede na izbrano referenčno omrežje. Zato lahko vrednost kakovosti preseže 100 odstotkov. V analizi smo za referenco izbrali originalno omrežje mobilnega operaterja brez dodatnih LAP-ov, kar je v histogramih prikazano v skrajno desni rubriki.

Simulacijski rezultati kažejo, da je mogoče z AeNB-ji relativno hitro pokriti razmeroma veliko območje in tako začasno učinkovito nadomestiti komercialno omrežje. Delež pokritosti območja z radijskim signalom je odvisen od števila nameščenih LAP-ov in njihove višine nad tlemi. Z uporabo treh LAP-ov je z radijskim signalom mogoče pokriti od 80 do 90 odstotkov območja, s šestimi LAP-i pa je mogoče doseči več kot 90-odstotno pokritost. Poleg tega je vrednost SINR veliko večja tedaj, ko so nameščeni le LAP-i (približno 60 %). S postopnim ponovnim vzpostavljanjem zemeljskih postaj se SINR poslabšuje in pade na vrednosti okoli 30 odstotkov. To kaže, da je vključevanje zemeljskega omrežja nepotrebno oziroma celo nezaželeno, saj bistveno ne izboljša geografske

pokritosti in povečuje interferenco. Pridobljene koristi se skrivajo v zadnjem kriteriju, »kvaliteti«, ki pomeni merilo zmogljivosti pasovne širine, ki jo zagotavlja omrežje. Omrežje LAP-ov zagotavlja bistveno manjšo zmogljivost kot originalno omrežje mobilnega operaterja. S postopnim vključevanjem zemeljskih postaj je izboljšanje »kvalitete« in posledično zmogljivosti omrežja razvidno v vseh šestih primerih. Ko so vse zemeljske postaje znova vključene v omrežje, »kvaliteta« celotnega omrežja skupaj z AeNB doseže vrednost 120 odstotkov.

Število LAP-ov in njihova višina pomembno vplivata na vse tri kriterijske funkcije, zlasti v prvi fazi vzpostavitve omrežja. Z večanjem števila LAP-ov in njihove višine se zmogljivost omrežja izboljšuje. To potrjujejo tudi simulacije, saj omrežje s šestimi LAP-i na višini 300 m zagotavlja najboljše zmogljivosti omrežja.

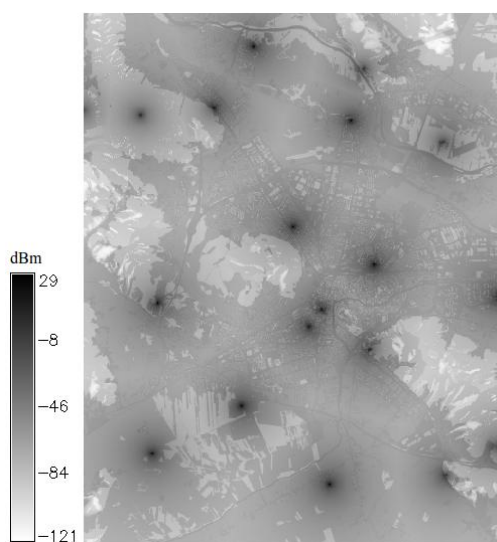
5.2 Vzpostavitev samozadostnega omrežja za izredne razmere

V tem scenariju predvidevamo, da zmogljivosti obstoječih omrežij operaterjev ni mogoče obnoviti in je treba vzpostaviti samozadostno komunikacijsko omrežje

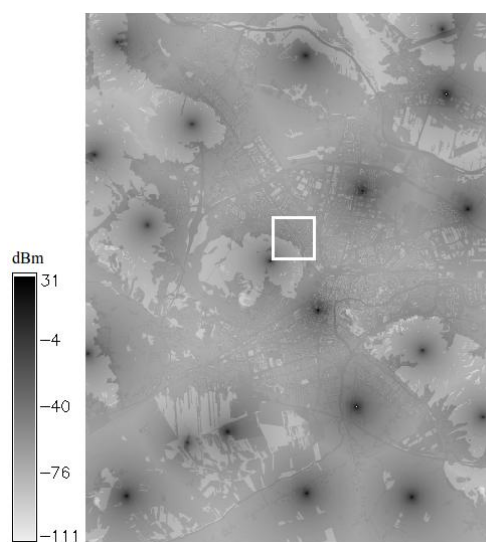
za izredne razmere. V testnem scenariju število uporabljenih zračnih (AeNB) in zemeljskih baznih (PLMU) postaj ni omejeno. Njihovo število algoritem določi sam, in sicer tako, da predhodno izbrane kriterijske funkcije maksimira, število vseh uporabljenih postaj pa minimizira. V simulaciji obravnavamo isto območje Ljubljane kot v predhodnem scenariju, ki smo mu dodali manjše, popolnoma nedostopno območje. V tem območju kvadratne oblike ni mogoče postaviti nobene bazne postaje, vendar je kljub temu treba reševalnim ekipam na tem območju zagotoviti komunikacijo. Analizirali smo tri različne velikosti, in sicer $1 \times 1 \text{ km}^2$, $2 \times 2 \text{ km}^2$ in $3 \times 3 \text{ km}^2$. Dobljeni rezultati so bili optimizirani za doseg najboljše mogoče pokritosti in vrednosti SINR. V povprečju je bilo z radijskim

signalom pokritih okoli 98 odstotkov točk, zadovoljivo visok SINR pa je bil zagotovljen v nekaj manj kot 60 odstotkih točk.

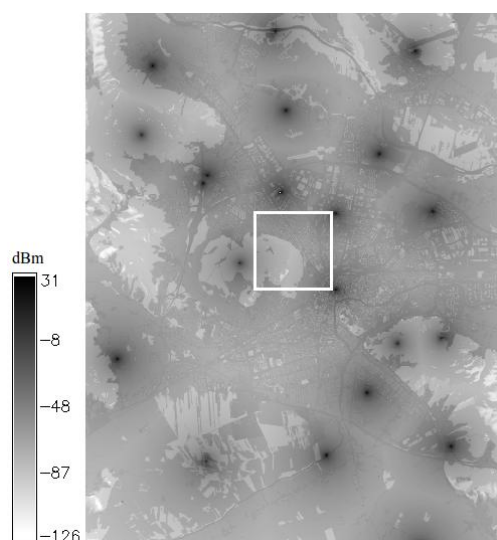
Rezultate prikazujejo slike 10, 11, 12 in 13. Število baznih postaj narašča z velikostjo nedostopnega območja, kar je pričakovani rezultat. Manj pričakovano je razmerje med številom uporabljenih AeNB-jev in PLMU-jev. Razvidno je, da so AeNB-ji veliko bolj zaželena izbira, saj zagotavljajo večjo pokritost. Celotno območje Ljubljane je mogoče pokriti z 19 - 20 LAP-i in do tremi PLMU-ji. Zmogljivost takega sistema zadostuje komunikacijskim potrebam osebja za posredovanje v izrednih razmerah (first responders). Za nadaljnje izboljšanje »kvalitete« pa bi bilo treba, podobno kot v prvem scenariju, vključiti dodatne zemeljske postaje.



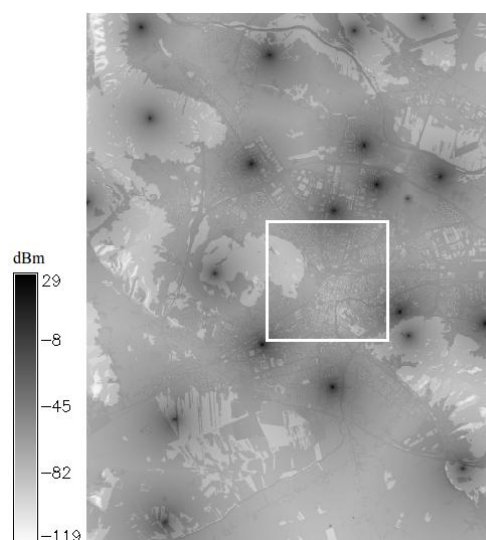
Slika 10: Brez nedostopnih območij – 19 LAP-ov, 1 PLMU, 97.9-odstotna pokritost, SINR 58.3 odstotka



Slika 11: Nedostopno območje veliko $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ – 20 LAP-ov, 0 PLMU-jev, 99.9-odstotna pokritost, SINR 58.5 odstotka



Slika 12: Nedostopno območje, veliko $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ – 19 LAP-ov, 2 PLMU-ja, 98.5-odstotna pokritost, SINR 57.6 odstotka



Slika 13: Nedostopno območje, veliko $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ – 19 LAP-ov, 3 PLMU-ji, 98.8-odstotna pokritost, SINR 55.4 odstotka

6 SKLEP

V prispevku smo predstavili orodje za optimizacijo brezžičnih omrežij, ki temelji na orodju za radijsko planiranje GRASS-RaPlAT in evolucijskem algoritmu AMS-DEMO. Bistvena prednost orodja je v uporabi realnih geografskih podatkov o okolju, kar povečuje praktično vrednost rezultatov.

Poskuse smo izvedli na območju Ljubljane, velikem 122,6 km². V analizah smo upoštevali tudi podatke o omrežju mobilnega operaterja, ki ima na tem območju postavljenih 325 baznih postaj na frekvenci 900 MHz.

Analizirali smo dva različna scenarija: i) soobstoj arhitekture za komunikacije v izrednih razmerah z obstoječim komercialnim mobilnim omrežjem in ii) upravljanje topologije baznih postaj, ki je sestavljena iz zračnih (AeNB) in zemeljskih (PLMU) baznih postaj.

Rezultati so potrdili, da so AeNB-ji izjemno učinkoviti za hitro zagotovitev radijske pokritosti razmeroma velikih območij (šest LAP-ov je dovolj za celo območje Ljubljane). S primerno medsebojno oddaljenostjo AeNB-jev je mogoče zagotoviti tudi dovolj nizko interferenco. Bistvena pomanjkljivost, ki jo kažejo simulacijski rezultati, je v omejeni zmogljivosti omrežja, ki jo je mogoče povečati le z vključitvijo znatnega števila manjših zemeljskih celic (bazne postaje obstoječih komercialnih omrežij ali dodatni PLMU-ji). Torej so AeNB-ji primerni predvsem za zagotavljanje komunikacij omejenemu številu uporabnikom v izrednih razmerah. Za zagotavljanje komunikacijskih zmogljivosti v primeru začasnih dogodkov z veliko gostoto uporabnikov pa sami AeNB-ji niso dovolj.

LITERATURA

- [1] N. Weicker, G. Szabo, K. Weicker, and P. Widmayer, "Evolutionary multiobjective optimization for base station transmitter placement with frequency assignment", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 7, pp. 189–203, 2003.
- [2] G. E. Athanasiadou, D. Zoubouti and G. V. Tsoulos, "Automatic location of base-stations for optimum coverage and capacity planning of LTE systems", in *Proc. 8th European Conf. Ant. and Prop. (EuCAP)*, 2014, pp. 2077–2081.
- [3] I. Ozimek et al., "GRASS-RaPlAT - an open-source tool for radio coverage calculations", *IEEE Joint Workshop on Wireless Commun., France section*, Paris, March 2011.
- [4] M. Depolli, R. Trobec, and B. Filipič, "Asynchronous master-slave parallelization of differential evolution for multiobjective optimization", *Evolutionary Computation*, pp. 261–291, May 2013.
- [5] Projekt ABSOLUTE internetna stran: <http://www.absolute-project.eu/>.
- [6] GRASS GIS internetna stran, <http://grass.osgeo.org>.
- [7] G. Jones: *Genetic and Evolutionary Algorithms*, Encyclopedia of Computational Chemistry, John Wiley & Sons, Ltd., 2002.

Andrej Hrovat je na Odseku za komunikacijske sisteme Inštituta Jožef Stefan zaposlen od leta 2004, v zadnjem obdobju na mestu znanstvenega sodelavca. Poleg tega je tudi asistent na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana. Diplomiral in magistriral je leta 2004 oziroma 2008 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Leta 2011 je doktoriral na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana. Sodeluje pri različnih mednarodnih in domačih raziskovalnih in aplikativnih projektih, povezanih s profesionalnimi mobilnimi komunikacijskimi sistemi, 2/3G, tehnologijami WiFi in WiMAX, satelitskimi in senzorskimi omrežji.

Andrej Vilhar je na Odseku za komunikacijske sisteme Inštituta Jožef Stefan zaposlen od leta 2004, opravlja pa tudi delo asistenta na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana. Diplomiral in doktoriral je leta 2004 oziroma 2009 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Tema njegove doktorske disertacije je bila optimizacija postopkov za hierarhično upravljanje mobilnosti v internetu. Po doktoratu se je usmeril na področje razširjanja radijskih valov. Eno leto je kot podoktorski sodelavec delal na francoski raziskovalni instituciji ONERA. Sodeluje na različnih mednarodnih in domačih raziskovalnih in aplikativnih projektih, povezanih s profesionalnimi mobilnimi komunikacijskimi sistemi in z razširjanjem visokofrekvenčnih satelitskih signalov.

Matjaž Depolli je na Odseku za komunikacijske sisteme Inštituta Jožef Stefan zaposlen od leta 2005. Diplomiral je leta 2005 na Fakulteti za računalništvo in informatiko v Ljubljani, doktoriral pa leta 2010 na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana. Sodeluje pri različnih mednarodnih in domačih raziskovalnih in aplikativnih projektih, povezanih z računalniško optimizacijo, numeričnimi simulacijami in vzporednimi algoritmi.

Igor Ozimek je zaposlen kot znanstveni sodelavec na Odseku za komunikacijske sisteme Inštituta Jožef Stefan. Diplomiral, magistriral in doktoriral je leta 1980, 1988 oziroma 1993 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Kot gostujoči znanstvenik je šest mesecev deloval na univerzi Westminster v Londonu. Sodeluje pri različnih mednarodnih in domačih raziskovalnih in aplikativnih projektih, povezanih z radijskimi komunikacijskimi sistemi in z razširjanjem radijskih signalov.

Tomaž Javornik je zaposlen kot znanstveni svetnik na Odseku za komunikacijske sisteme Inštituta Jožef Stefan, opravlja pa tudi delo docenta na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana. Diplomiral, magistriral in doktoriral je leta 1987, 1990 oziroma 1993 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Kot gostujoči znanstvenik je šest mesecev deloval na univerzi Westminster v Londonu. Raziskovalno se ukvarja predvsem z razširjanjem radijskih signalov, modeliranjem kanalov v zemeljskih in satelitskih komunikacijskih sistemih, adaptivnim kodiranjem in modulacijami, prilagodljivimi antenskimi sistemi MIMO in brezžično optiko.