

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za računalništvo in informatiko

Robert Modic

**Model podatkovnega prometa v mobilnem
omrežju na fizično omejenem področju**

DIPLOMSKO DELO
UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE STOPNJE
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

prof. dr. Miha Mraz
MENTOR

Ljubljana, 2019

© 2019, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko

Rezultati diplomskega dela so intelektualna lastnina Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavlanje ali izkoriščanje rezultatov diplomskega dela je potrebno pisno soglasje Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za računalništvo
in informatiko



Tematika naloge:

Kandidat naj v svojem delu postavi računalniški model prenosa podatkov v mobilnem omrežju na omejenem vzorčnem geografskem področju. Za potrebe modela je potrebno identificirati sestavne dele omrežja in njihove zmogljivostne karakteristike. Na osnovi modela naj kandidat opravi vzorčno analizo simulacijskih rezultatov in na osnovi slednje formira nabor zmogljivostnih karakteristik sestavnih delov omrežja, ki vodijo do zadovoljive uporabniške izkušnje uporabnikov storitve prenosa podatkov.

IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Spodaj podpisani izjavljam, da sem avtor dela, da slednje ne vsebuje materiala, ki bi ga kdorkoli predhodno že objavil ali oddal v obravnavo za pridobitev naziva na univerzi ali drugem visokošolskem zavodu, razen v primerih kjer so navedeni viri.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem delo izdelal samostojno pod mentorstvom prof. dr. Mihe Mraza,
- so elektronska oblika dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko in
- soglašam z javno objavo elektronske oblike dela v zbirki "Dela FRI".

— Robert Modic, Ljubljana, februar 2019.

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za računalništvo in informatiko

Robert Modic

Model podatkovnega prometa v mobilnem omrežju na fizično omejenem področju

POVZETEK

Zaradi strmega naraščanja količine prometa v mobilnih omrežjih si ponudniki telekomunikacijskih storitev želijo svoja že obstoječa mobilna omrežja nadgraditi tako, da bodo kos novo nastajajočim zahtevam uporabnikov. Pred fizičnim posegom v omrežje želijo ugotoviti kako se bo nadgrajeno omrežje obnašalo. Pri tem nam pomagajo modeli omrežij in simulacije. Primer postavitve modela in izvedbe simulacije mobilnega podatkovnega omrežja predstavimo v pričujočem delu. Najprej v simulacijskem ogrodju OMNeT++ postavimo model, pri čemer ga poenostavimo tako, da se osredotočimo izključno na podatkovni promet. Model podatkovnega omrežja temelji na postavitvi baznih postaj v dolini Bohinjskega jezera in na smučišču Vogel. Vrednosti vhodnih spremenljivk modela temeljijo na populaciji ljudi, ki živi v dolini in številu obiskovalcev smučišča. Izvedemo štiri simulacije, pri čemer prepustnosti aktivnih naprav pred izvedbo najprej izračunamo. Prepustnosti aktivnih naprav tekom simulacij spreminjamo glede na zaznana ozka grla in na koncu pridemo do zaključka kakšne morajo biti pasovne širine prenosnih medijev in prepustnosti baznih postaj ter aktivnih naprav jedra omrežja, da bo uporabnikom zagotovljena dovolj dobra uporabniška izkušnja.

Ključne besede: mobilni podatkovni promet, mobilna celica, model mobilnega podatkovnega omrežja, simulacija, OMNeT++

University of Ljubljana
Faculty of Computer and Information Science

Robert Modic

Modelling data transfer in mobile networks limited to physical regions

ABSTRACT

Mobile data traffic usage is on the rise and mobile network carriers wish to upgrade their networks in such a way that they will be able to keep up with rising demand. Before they do any real work on their mobile network they wish to check how any upgrades to the network would behave. This is where network models and simulations come into play. In the thesis before you we show an example of building such a model. While doing so, we focus exclusively on data traffic. The model is based on a real life example of mobile cell located in the valley of Bohinjsko jezero and ski resort Vogel. Model input values are based on valley population and ski resort visit rates. We run four simulations. Throughput on network devices and medium broadband is roughly calculated from previously mentioned input values before running the first simulation. Through the course of running all of the further simulations, we adjust appropriate model values so that we do away with found choke-points. In the end, we find out what throughputs on network devices and what medium broadband is needed so that the user experience is adequate.

Key words: mobile data traffic, mobile cell, mobile data network model, simulation, OMNeT++

ZAHVALA

Najprej bi se rad zahvalil svojemu mentorju prof. dr. Mihi Mrazu za strokovno pomoč pri izdelavi diplomske naloge, za hitre odgovore in komentarje dela ter za vse odkrite pravopisne napake. Zahvaliti se želim tudi svojim staršem, še posebej mami in očetu, ki sta me tekom študija vzpodbujala in mi stala ob strani. Zahvala gre tudi mojim prijateljem za svojevrstne in včasih tudi hudomušne pripombe tekom pisanja moje diplome. Na koncu pa se želim zahvaliti tudi tebi dragi bralec in upam, da boš v delu pred teboj našel informacijo, ki jo iščeš.

— Robert Modic, Ljubljana, februar 2019.

KAZALO

Povzetek	i
Abstract	iii
Zahvala	v
1 Uvod	1
1.1 Opis problema	2
1.2 Klasifikacija mobilnega podatkovnega prometa	3
1.3 Metodološki pristop	3
1.4 Postavitev modela in simulacije	4
1.5 Struktura naloge	4
2 Karakteristike modela	5
2.1 LTE	5
2.1.1 Bazna postaja (eNodeB)	6
2.1.2 Aktivna naprava Mobility Management Entity (MME)	6
2.1.3 Aktivna naprava Serving Gateway (S-GW)	7
2.1.4 Aktivna naprava Packet Data Node Gateway (P-GW)	7
2.2 Robni pogoji postavitve modela	8
2.3 Kosovnica modela	9
2.3.1 Omrežje	10
2.3.2 Bazna postaja	10
2.3.3 Serving Gateway	11
2.3.4 Usmerjevalnik	11
2.3.5 Packet Data Node Gateway	11

2.3.6	Internet	11
2.3.7	Povezave	12
2.3.8	Zahteva	12
2.4	Generiranje prometa	12
2.4.1	Odhodni promet	13
2.4.2	Dohodni promet	14
3	Model	17
3.1	OMNeT++	17
3.2	Opis gradnikov	18
3.2.1	Strežna enota aktivne naprave	18
3.2.2	Strežna enota bazne postaje	18
3.2.3	Usmerjanje na aktivni napravi	19
3.2.4	Usmerjanje na usmerjevalniku	19
3.2.5	Generator prometa	19
3.2.6	FIFO vrsta na aktivnih napravah	19
3.2.7	Vgrajenini enostavni modul channel	20
3.3	Celotni model	20
3.3.1	Bazna postaja	20
3.3.2	Serving gateway	21
3.3.3	Usmerjevalnik	22
3.3.4	Packet data node gateway	23
3.3.5	Povezava v zunanji svet	23
3.4	Problemi modela in poenostavitve	24
4	Analiza simulacijskih rezultatov	27
4.1	Izvajanje simulacij	28
4.2	Osnovni model	28
4.2.1	Vhodni parametri simulacije	28
4.2.2	Rezultati in analiza simulacije	30
4.3	Nadgrajen model	30
4.3.1	Vhodni parametri simulacije	31
4.3.2	Rezultati in analiza simulacije	32
4.4	Optimiziran model	32

4.4.1	Vhodni parametri simulacije	32
4.4.2	Rezultati in analiza simulacije	33
4.4.3	Dodatna optimizacija za zagotovitev kvalitetnejše strežbe	34
4.4.4	Rezultati in analiza simulacije dodatne optimizacije modela	36
4.5	Sklep	36
5	Zaključek	39
A	Priloga A	43
A.1	Rezultati simulacije osnovnega modela	43
B	Priloga B	47
B.1	Rezultati simulacije nadgrajenega modela	47
C	Priloga C	51
C.1	Rezultati simulacije optimiziranega modela	51
D	Priloga D	55
D.1	Rezultati simulacije dodatne optimizacije optimiziranega modela	55

1 Uvod

Mobilni podatkovni promet (angl. *mobile data traffic*) je že nekaj let v porastu. Strmo je začel naraščati s prihodom prvega iPhone-a leta 2007. Mobilno napravo je bilo takrat mogoče kupiti samo pri ponudniku mobilnih telekomunikacijskih storitev AT&T. Njen prihod je ponudniku znatno povečal prihodke, vendar pa je zaradi nadgradenj omrežja, ki ni zadostovalo hitro nastajajočim novim potrebam uporabnikov, še dve leti poslovalo z izgubo [1]. Trend uporabe mobilnih naprav kot primarni način brskanja po internetu in dostopa do socialnih omrežij iz leta v leto narašča. Tako je decembra leta 2009 po podatkih Ericssonove raziskave mobilni podatkovni promet prvič presegel glasovnega (merjeno na globalni ravni v terabajtih na mesec) [2]. Prav tako raziskave predvidevajo, da bo količina mobilnega podatkovnega prometa do leta 2022 glede na leto 2016 narasla za faktor 10 [3].

Ponudniki mobilnih telekomunikacijskih storitev se tako soočajo s problemom, kako svojim uporabnikom zagotoviti kakovostno storitev. S tem ciljem v mislih želijo nadgraditi svoje že obstoječe omrežje ali pa ga razširiti, tako da bi uporabnikom zagotavljali dobro uporabniško izkušnjo, sama nadgradnja pa naj bi bila za ponudnika kar se da

cenovno ugodna. Ravno zaradi slednjega je smotrno pred fizičnim posegom v mobilno omrežje postaviti model le tega, saj lahko tako za bistveno manjšo ceno opazujemo dinamiko v omrežju pod različnimi pogoji. Tako lahko opazujemo dinamiko v omrežju na dnevni, tedenski, mesečni ali letni ravni. Opazujemo lahko kako se omrežje obnaša ob pojavitvi velike količine prometa, kako se omrežje obnaša ob majhni obremenitvi, kje so ozka grla, ipd. Z analizo pridobljenih podatkov lahko določimo, kje v omrežju in kako obsežne bodo morale biti potrebne nadgradnje, da bomo našli dober kompromis med ceno nadgradnje in uporabniško izkušnjo.

1.1 Opis problema

Predpostavimo, da se na nas obrne ponudnik telekomunikacijskih storitev, ki želi, da mu svetujemo pri nadgradnji že obstoječe mobilne celice (angl. *mobile cell*). Mobilna celica se nahaja v dolini Bohinjskega jezera in sestoji iz dveh baznih postaj vzhodno in zahodno od jezera, bazne postaje na zgornji postaji nihalko smučišča Vogel in bazne postaje na vrhu smučišča Vogel v bližini razgledne točke Orlove glave. Ponudnik želi vedeti kakšne so njegove trenutne zmogljivosti na opazovanem območju in v kolikšni meri mora nadgraditi aktivne naprave znotraj mobilne celice, da bo uporabnikom tudi ob nadpovprečnem porajanju podatkovnega prometa še vedno lahko nudil dovolj kakovostno storitev.

Ponudnik telekomunikacijskih storitev naj bi uporabniku nudil čim večjo dosegljivost in odzivnost omrežja ter primerno hitrost prenosa podatkov. V mobilnih omrežjih to dosežemo z zadostno zmogljivostjo baznih postaj preko katerih se uporabniki s svojimi mobilnimi napravami vključujejo v omrežje in so tudi edina uporabniku vidna aktivna komponenta omrežja. Poleg tega mora ponudnik poskrbeti tudi za ustrezno zmogljivost žičnih in brezžičnih povezav med baznimi postajami in jedrom svojega omrežja. Ob premikanju uporabnika skozi prostor, ob preobremenitvi neke bazne postaje ali pa izpadu le te mora biti prehod (angl. *hand-over*) na drugo sosednjo bazno postajo za uporabnika karseda nemoteč.

Večine uporabnikov mobilnih storitev izvedba mobilnega omrežja ne zanima. Kakovost storitve enačijo z dostopnostjo do spletnih storitev (kot so Facebook, Youtube ipd.) in prihajalno (angl. *download*) ter odhajalno (angl. *upload*) hitrostjo prenosa podatkov. V večini primerov nezadovoljstva uporabnikov ne pride do izpada omrežja,

ampak do izpada spletne storitve, na katero ponudnik omrežja običajno nima vpliva. Do resnejših izpadov omrežja pride le ob večjih dogodkih, ko se na enem mestu zbere veliko več uporabnikov, kot je predvideno za zmogljivostne zmožnosti opazovane mobilne celice. Občasne zgostitve števila uporabnikov ne opravičujejo nadgradnje mobilne celice. Ponudniki take probleme ponavadi rešujejo s postavitvijo začasne mobilne bazne postaje kar na mestu dogodka, če je takšen dogodek vnaprej napovedljiv. Obstaja pa tudi druga rešitev, ki se je zaradi napredka tehnologije v zadnjih letih pojavila na trgu. Proizvajalci baznih postaj danes ponudnikom ne prodajajo več različno zmogljivih baznih postaj, temveč jim dajejo v najem tako imenovane licence, ki določajo koliko uporabnikov je lahko hkrati priklopljenih na eno bazno postajo. Tako ponudniki v primeru večjega dogodka le prenesejo licence iz ene bazne postaje na drugo, ki pokriva ta dogodek ali pa začasno dokupijo licence.

V pričujočem diplomskem delu obravnavamo problem analize mobilnega podatkovnega prometa znotraj ene mobilne celice. Kot primer mobilne celice vzamemo dolino Bohinjskega jezera, kjer je zaradi geografskih značilnosti meje mobilne celice lahko določiti. Pri postavitvi modela uporabimo javno dostopne podatke o lokaciji baznih postaj in živeči populaciji na omenjenem območju.

1.2 Klasifikacija mobilnega podatkovnega prometa

V delu se pri gradnji modela opiramo na standard LTE. Standard uporabniku omogoča prenos podatkov z uporabo IP protokola. Med uporabo se proti uporabniku odpre več kanalov (angl. *bearer*), ki se delijo glede na vrsto prometa, ki ga uporabnik v danem trenutku uporablja. Na ta način je zagotovljen QoS (angl. *Quality of Service*) za vsako vrsto podatkovnega prometa. Tako je za VoIP (angl. *Voice over IP*) ali multimedijo (ogled videa na portalu YouTube) aktiven kanal, ki nudi ustrezen QoS, za brskanje po internetu, tekstovna sporočila (aplikacija WhatsApp) in prenos datotek (FTP) pa je aktiven kanal, ki nudi dostop po *best-effort* načinu.

1.3 Metodološki pristop

Do rešitve problema iskanja optimalne konfiguracije omrežja lahko pridemo z uporabo analitičnega ali simulacijskega pristopa. Pri analitičnem pristopu se opremo na matematične zakonitosti teorije strežbe, na podlagi katerih postavimo matematični model

opazovanega omrežja. Pri simulacijskem pristopu zgradimo model s pomočjo temu namenjene programske opreme (v našem primeru je to OMNeT++ simulator). Glavne prednosti, ki nam jih simulacijski pristop omogoča so, da tekom izvajanja več simulacij pridobimo boljše razumevanje o obnašanju modela, hitreje najdemo ključne vplivne spremenljivke in zaznamo ozka grla modeliranega omrežja. Največja slabost omenjenega pristopa je v kompleksnosti postavitve in točnosti rešitve problema. Ob tem velja omeniti, da je slednja pogojena z zmogljivostjo računalnika na katerem izvajamo simulacije, zaradi katere smo lahko primorani model poenostaviti.

1.4 Postavitev modela in simulacije

Model mobilnega podatkovnega omrežja postavimo v simulacijskem okolju OMNeT++. Posnemamo strukturo omrežja kot jo predvideva LTE standard in v modelu realiziramo aktivne naprave katerih naloga je prenos mobilnega podatkovnega prometa in povezave med njimi. Za generatorje odhodnega prometa uporabimo kar bazne postaje, medtem ko generator prihodnega prometa postavimo na modul **internet**, ki nam predstavlja povezavo v zunanji svet. Ob začetku izvajanja simulacij naletimo na težave povezane z zmogljivostjo računalnika, zaradi katerih dodatno poenostavimo model. Na koncu izvedemo štiri različne simulacije, pri čemer na začetku določimo parametre modela in zmogljivosti aktivnih naprav, ki jih nato tekom izvedbe simulacij spreminjamo, dokler ne dobimo dovolj dobre rešitve problema.

1.5 Struktura naloge

V drugem poglavju pričujočega dela predstavimo standard LTE, aktivne naprave, ki jih predvideva in njihove naloge. Poglavje nadaljujemo s predstavitvijo ključnih elementov in konceptov modela ter opišemo način generiranja mobilnega podatkovnega prometa v modelu. V tretjem poglavju predstavimo podrobno zgradbo in obnašanje prej omenjenih elementov omrežja in njihovo povezanost v celoto. Na koncu poglavja se dotaknemo še problemov, na katere smo naleteli v prvih poskusih izvajanja simulacij in opišemo načine kako smo jih rešili. V zadnjem, četrtem poglavju opišemo potek izvajanja simulacij in zaključke do katerih smo prišli.

2 Karakteristike modela

Pri gradnji modela se v pričujočem delu opiramo na strukturo omrežja, kot jo predvideva standard LTE (angl. *Long Term Evolution*). Osredotočeni smo na uporabni podatkovni del, zato v modelu ne simuliramo prijav v omrežje in prehodov med baznimi postajami (eNodeB - eNB). Slednje pomeni, da v jedru omrežja (angl. *evolved packet core* - EPC) ni implementirane aktivne naprave (angl. *mobility management entity* - MME), ki skrbi za ta del standarda.

2.1 LTE

Standard LTE, za razliko od svojih predhodnikov, temelji izključno na paketnem prenosu podatkov (angl. *packet switched*). Uporabnikom oz. njihovim napravam (angl. *user equipment* - UE) tako nudi dostop do podatkovnega omrežja (angl. *packet data network*) preko IP protokola in jim omogoča navidezno nemoteno delovanje med prehajanjem skozi mobilno omrežje. Omrežje v grobem delimo na radijski oz. E-UTRAN (angl. *Evolved - Universal Terrestrial Radio Access Network*) in neradijski del oz. SAE (angl. *System Architecture Evolution*), ki med drugim vključuje EPC (angl. *Evolved Packet Core*).

LTE in SAE skupaj tvorita EPS (angl. *Evolved Packet System*). Poleg paketnega prenosa standard omogoča tudi CS (angl. *Circuit Swiched*) način prenosa podatkov, da lahko zagotovi združljivost omrežja in starejših UE, ki ne podpirajo LTE tehnologije. V sledečih razdelkih opisane aktivne naprave in njihove glavne lastnosti so povzete po virih [4] [5].

2.1.1 Bazna postaja (eNodeB)

Radijski del omrežja (E-UTRAN) sestoji izključno iz baznih postaj imenovanih eNodeB. Sosednje bazne postaje so povezane med saboj preko X1 vmesnikov in z EPC skozi vmesnika S1-MME (z aktivno napravo MME) in S1-U (z aktivno napravo S-GW). E-UTRAN skrbi za vse funkcionalnosti, ki so povezane z brezžičnim dostopom do omrežja. Te funkcionalnosti so sledeče:

- upravljanje z viri (angl. *radio resource management*): pod to točko spadajo vse funkcionalnosti povezane z odprtimi kanali, kot so kontrola kanala, prijava v omrežje, prehajanje UE med eNodeB, dodeljevanje virov in prihajalne in odhajalne hitrosti UE;
- stiskanje IP glave: ta funkcionalnost pride v poštev, ko imamo opravka z majhnimi IP paketi, ko bi glava paketa predstavljala velik del poslanih podatkov (npr. VoIP);
- varnost: vsi podatki poslani preko brezžičnega omrežja se kriptirajo;
- lokacija: E-UTRAN hrani vse potrebne informacije o lokaciji UE;
- povezava v jedro omrežja (EPC): povezavi do S-GW in MME;

2.1.2 Aktivna naprava Mobility Management Entity (MME)

MME je aktivna naprava, ki skrbi za kontrolni del standarda in biva v jedru omrežja. Skrbi za sledenje UE, medtem ko je ta v mirovanju in določanje ustrezne S-GW in ustreznih kanalov za zagotavljanje QoS, ko preide v aktivni način. Prav tako sodeluje pri prehajanju UE skozi omrežje, ko je potrebno zamenjati jedro omrežja, na katerega je naprava priključena (angl. *intra-LTE handover*). Pomembnejše funkcionalnosti MME so sledeče:

- določitev ustrezne S-GW in P-GW;
- določitev nove MME v primeru prehoda na drugo jedro;

- določitev ustrezne aktivne naprave za starejše standarde 3G ali 2G (SGSN);
- prehod med baznimi postajami v primeru uporabe starejših standardov;
- avtentikacija in dodeljevanje začasnih identitet uporabnikov ob prijavi v omrežje;
- uveljavitev omejitev v primeru gostovanja UE;

2.1.3 Aktivna naprava Serving Gateway (S-GW)

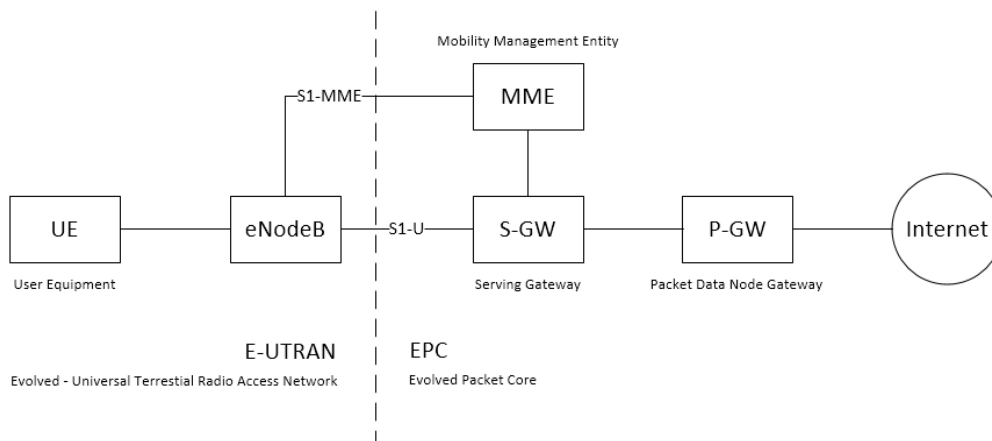
Aktivna naprava S-GW v prvi vrsti skrbi za usmerjanje in posredovanje uporabnikovih podatkovnih paketov. Skrbi tudi za prehajanje UE skozi omrežje v primeru uporabe starejših standardov. Na uporabniškem nivoju predstavlja povezavo med UE in P-GW. Tukaj velja omeniti, da sta S-GW in P-GW lahko ena in ista naprava, kar je odvisno od arhitekture omrežja ponudnika storitev. Skozi aktivno napravo poteka le podatkovni promet, saj je za kontrolna sporočila zadolžena MME. Glavne funkcionalnosti S-GW so tako sledeče:

- usmerjanje in posredovanje uporabnikovih podatkovnih paketov;
- zakonito prestrezanje;
- označevanje paketov na transportni plasti za prihodni in odhodni promet;
- medpomnjenje paketov (angl. *packet buffering*);

2.1.4 Aktivna naprava Packet Data Node Gateway (P-GW)

P-GW je aktivna naprava, ki skrbi za povezavo med UE in zunanjimi paketnimi omrežji ter predstavlja vrata v internet. V odvisnosti od arhitekture omrežja ima lahko posamezna UE vzpostavljenih več povezav z različnimi P-GW. Glavne funkcionalnosti te aktivne naprave so sledeče:

- določanje IP naslova UE;
- filtriranje prometa na uporabniškem nivoju (angl. *Deep Packet Inspection*);
- zakonito prestrezanje prometa (angl. *lawful interception*);
- označevanje paketov na transportnem nivoju;



Slika 2.1 Poenostavljena ponazoritev EPS sistema.

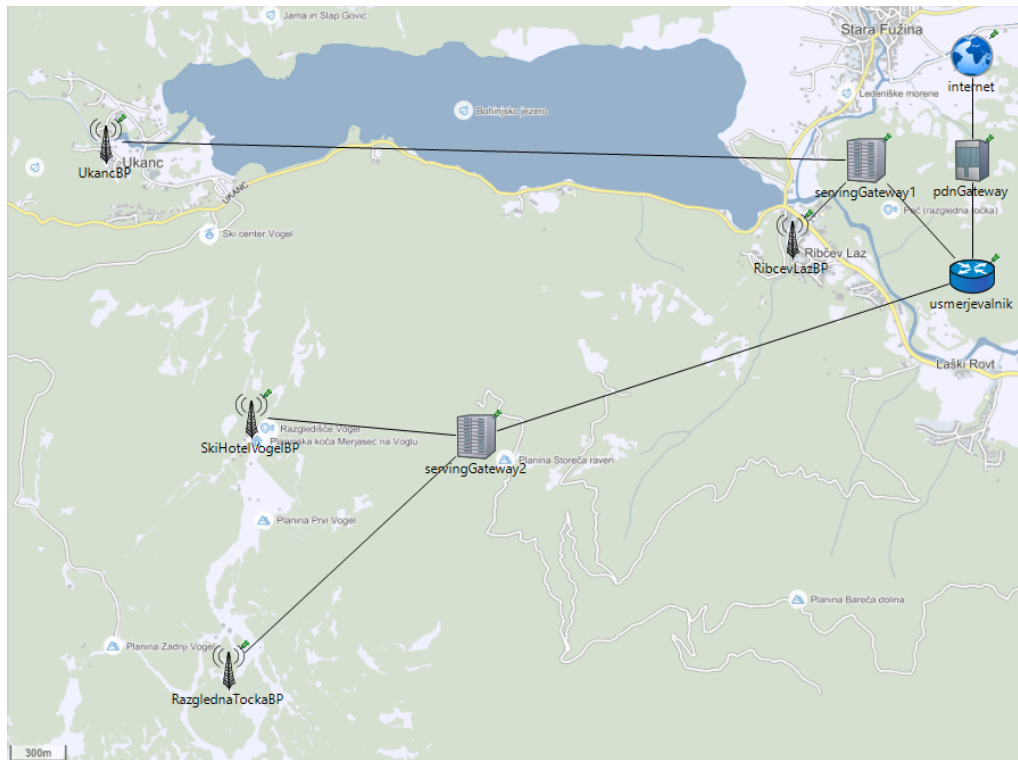
- zaračunavanje storitev in uveljavljanje omejitev povezanih z hitrostjo prenosa podatkov;

Na sliki 2.1 vidimo kako so zgoraj opisane aktivne naprave povezane med seboj.

2.2 Robni pogoji postavitve modela

Na sliki 2.2 je predstavljena prostorska shema, ki služi kot osnova našega modela. Modelirana mobilna celica je v našem primeru sestavljena iz štirih baznih postaj, ki se nahajajo v Ukancu, Ribčevem Lazu, na strehi Ski hotela Vogel in na razgledni točki Orlove glave sredi smučišča Vogel. Te bazne postaje služijo kot generatorji podatkovnega prometa znotraj mobilne celice. V modelu sta realizirani tudi dve S-GW napravi (**servicingGateway1** in **servicingGateway2**), povezani na bazne postaje in preko usmerjevalnika na P-GW (**pdnGateway**). Element modela **internet** predstavlja zunanje omrežje (povezavo v svet) in v modelu služi kot generator podatkovnega prometa iz zunanjega sveta.

Bazne postaje so na sliki 2.2 postavljene na realna mesta v prostoru, vse ostale aktivne naprave (S-GW in P-GW) pa so zaradi boljše preglednosti postavljene drugje v prostoru. Vse v realnem svetu bivajo na lokacijah baznih postaj. Standard LTE določa, da je usmerjanje na bazne postaje del nalog, ki jih opravlja S-GW, zato je to implementirano znotraj teh aktivnih naprav. Naprava P-GW pa te naloge ne opravlja, zato imamo na povezavi med njo in S-GW posebej realiziran še modul **usmerjevalnik**.

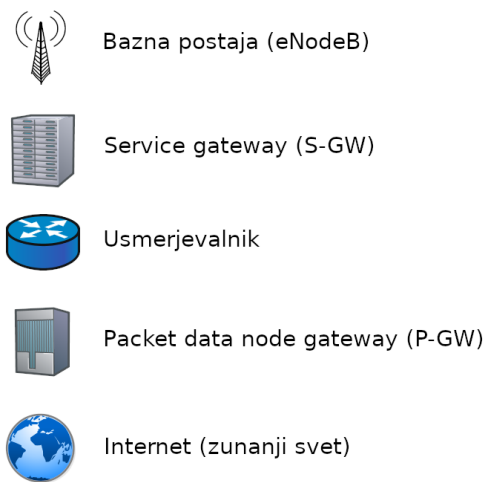


Slika 2.2 Vzorčna mobilna celica.

Število uporabnikov za generiranje prometa za bazni postaji, ki se nahajata v dolini Bohinjskega jezera, pridobimo iz SURS [6]. Za bazni postaji na smučišču Vogel jih izračunamo iz števila obiskovalcev v letu 2016 [7]. Potrebno prihajalno hitrost za posameznega uporabnika pridobimo iz poročila OpenSignal za September 2018 [8]. Razmerje med prihajalno in odhajalno hitrostjo določimo glede na LTE standard, ki predvideva, da sta le ti po vrsti v razmerju tri proti ena.

2.3 Kosovnica modela

Na sliki 2.2 se nahaja večje število različnih aktivnih naprav in povezav med njimi. Ob začetku simulacije lahko vsaki nastavimo določene parametre, ki vplivajo na potek in končni rezultat simulacije. V nadaljevanju so opisani sestavljeni moduli, ki so zgrajeni iz enostavnih modulov, katerih podrobnejši opis najdemo v poglavju 3 pričujočega dela.



Slika 2.3 Elementi modela omrežja.

2.3.1 Omrežje

Omrežje je v modelu sestavljen modul, ki vsebuje vse ostale sestavljene in enostavne module. Nastavljamo mu parametre, ki so skupni oziroma se uporabljajo v več različnih modulih modela. Ti parametri so sledeči:

- **razmerjeDownload** in **razmerjeUpload**: gre za parametra, ki predstavljata razmerje med količino prihodnega in odhodnega podatkovnega prometa; generatorji locirani na baznih postajah parametra uporabijo za izračun povprečnega časa med porajanjem *zahtev*, medtem ko jih generator na modulu **internet** uporablja za generacijo ustreznega števila *zahtev*, ki predstavljajo odgovor;
- **velikostZahteve**: predstavlja velikost ene *zahteve* v Byte-ih;

Poleg zgoraj omenjenih parametrov znotraj tega modula nastavljamo tudi pasovne širine povezav med posameznimi aktivnimi napravami. Več o tem povemo v razdelku [2.3.7](#).

2.3.2 Bazna postaja

Prvi simbol na sliki [2.3](#) nam predstavlja bazno postajo (eNodeB), ki v modelu služi kot generator odhodnega, s strani uporabnikov ustvarjenega prometa in kot ponor dohodnega

prometa. Ob sami inicializaciji ali pa v konfiguracijski datoteki temu modulu nastavimo naslednje parametre:

- `uporabnikDataRate`: predstavlja pasovno širino (privzeto v Mbps) dohodnega prometa, ki je namenjena posameznemu uporabniku;
- `pricakovanoSteviloUporabnikov`: predstavlja pričakovano število uporabnikov, ki so naenkrat priključeni na bazno postajo;

2.3.3 Serving Gateway

Drugi simbol na sliki 2.3 nam predstavlja aktivno napravo Service Gateway. Njena naloga v našem modelu sta usmerjanje prometa na ustrezna vrata in medpomnenje *zahtev*. Ob inicializaciji simulacije si del namenjen usmerjanju podatkovnega prometa ustvari usmerjevalno tabelo. Podamo mu lahko naslednje parametre:

- `delaySGW`: predstavlja čas, ki ga aktivna naprava potrebuje za strežbo ene *zahteve* v velikostnem razredu mikrosekund;
- `velikostVrste`: predstavlja velikost medpomnilnika v številu *zahtev*;

2.3.4 Usmerjevalnik

Tretji simbol na sliki 2.3 predstavlja simbol za usmerjevalnik. V modelu služi za usmerjanje med napravami S-GW in P-GW. Implementiran je ločeno, ker naprave P-GW ne skrbijo za usmerjanje prometa, potrebujemo pa usmerjanje od modula **internet** proti baznim postajam. Ob inicializaciji simulacije modul zgradi usmerjevalno tabelo.

2.3.5 Packet Data Node Gateway

Četrty simbol na sliki 2.3 predstavlja simbol za aktivno napravo "Packet data node gateway". V realnem omrežju ta aktivna naprava služi za opremljanje paketov s podatki, primernimi za IP omrežje (tj. internet), v modelu pa le kot zakasnitev paketa. Nastavimo ji parameter `delayPDN`, ki predstavlja čas obdelave ene *zahteve* v velikostnem razredu mikrosekund.

2.3.6 Internet

Peti simbol na sliki 2.3 predstavlja povezavo v zunanji svet in v modelu služi kot generator prometa iz zunanjega sveta. Z razliko od baznih postaj ta le odgovarja na prispele *zahteve* glede na razmerje določeno ob inicializaciji simulacije.

2.3.7 Povezave

Predhodno opisani moduli so v modelu med seboj povezani. V realnem svetu so te povezave lahko žične ali pa brezžične. Nastavljamo jim lahko dve vrsti parametrov in sicer pasovno širino (angl. *DataRate*) in zakasnitev oziroma latenco (angl. *delay*). Imena parametrov so sledeča:

- pasovna širina:
 - RazglednaTockaDataRate;
 - RibcevLazDataRate;
 - SkiHotelDataRate;
 - UkancDataRate;
- zakasnitev oziroma latenca:
 - RazglednaTockaDelay;
 - RibcevLazDelay;
 - SkiHotelDelay;
 - UkancDelay;

2.3.8 Zahteva

Zahteva nam v modelu predstavlja eno nerazčljljivo entiteto, ki potuje skozi omrežje. V realnem omrežju bi to bil IP paket. *Zahteve*, ki se porajajo na baznih postajah, potujejo skozi omrežje proti modulu **internet**, *zahteve* iz modula **internet** pa v obratni smeri proti baznim postajam. Posamezni *zahtevi* določamo njeno velikost in naslov ponora. V modelu ne razlikujemo med vrstami prometa in vse *zahteve* imajo isto velikost.

2.4 Generiranje prometa

Promet se generira na petih mestih v modelu in sicer na štirih baznih postajah (modul opisan v razdelku 2.3.2) in na modulu imenovanem **internet** (opisan v razdelku 2.3.6). Promet generiran na baznih postajah je odvisen od podanih parametrov ob inicializaciji simulacije, promet na modulu **internet** pa se generira glede na število prispelih *zahtev* in določeno razmerje. Promet generiran na baznih postajah v nadaljevanju imenujemo za odhodni promet, promet z modula **internet** pa za dohodni promet.

Količina generiranega prometa je odvisna od parametrov, ki jih določimo ob inicializaciji simulacije. Le ti so sledeči:

- velikostZahteve;
- uporabnikDataRate na posameznih baznih postajah;
- pricakovanoSteviloUporabnikov na posameznih baznih postajah;

2.4.1 Odhodni promet

Odhodni promet v modelu je generiran nedeterministično na baznih postajah in ima za ponor modul **internet**. Za nedeterminističen izračun medprihodnih časov uporabimo OMNeT++ funkcijo *exponential(t)*, ki kot argument dobi prej izračunan povprečni medprihodni čas *zahtev* (t). Funkcija vrača naključne vrednosti, ki so eksponentno porazdeljene.

Prva *zahteva* se na vseh baznih postajah pojavi ob času 0, čas porajanja novih pa se potem izračuna s pomočjo prej omenjene funkcije. Tako se ob pojavitvi nove *zahteve* vedno izračuna čas pojavitve naslednje nove *zahteve*.

Iz parametrov podanih ob inicializaciji simulacije izračunamo povprečni medprihodni čas *zahtev* po izrazu

$$t = \frac{1}{xy}, \quad (2.1)$$

pri čemer nam spremenljivke predstavljajo po vrsti

- t : izračunani pričakovani medprihodni čas *zahtev*,
- x : število uporabnikov (podano ob inicializaciji simulacije),
- y : število *zahtev*, ki jih uporabnik ustvari v eni sekundi.

Število *zahtev*, ki jih posamezen uporabnik ustvari v sekundi izračunamo po formuli

$$x = \frac{\text{uporabnikDataRate}}{\text{velikostZahteve}}, \quad (2.2)$$

pri čemer sta obe spremenljivki kvocienta podani kot parametra ob inicializaciji simulacije.

Pojavitev *zahtev* nam predstavlja dogodke, ki sledijo diskretni Poisson-ovi porazdelitvi (angl. *Poisson distribution*). Ti dogodki so porazdeljeni po omenjeni porazdelitvi

in neodvisno drug od drugega. Pri generiranju *zahtev* uporabljamo zvezno eksponentno porazdelitev (angl. *Exponential distribution*), ki nam pove kako so porazdeljeni medprihodni časi prej omenjenih dogodkov porajanja *zahtev*. Verjetnost, da se bo naslednja *zahteva* pojavila v času z , lahko izračunamo iz funkcije gostote verjetnosti eksponentne porazdelitve:

$$f(z; \lambda) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda z} & ; z \geq 0 \\ 0 & ; z < 0. \end{cases} \quad (2.3)$$

Pri tem je parameter lambda podan z izrazom:

$$\lambda = \frac{1}{t}. \quad (2.4)$$

V izseku kode 2.4 je predstavljeno generiranje odhodnega prometa. V ogrodju OMNet++ se vse vrsti okoli dogodkov, zato je tudi generiranje prometa realizirano s tem v mislih. V omenjenem izseku vidimo funkcijo *handleMessage*, ki se proži vedno, ko modul dobi novo sporočilo. Ogrodje ima rezervirano posebno vrsto sporočila, ki ga posamezen modul lahko izkoristi za pošiljanje samemu sebi in na tak način določa dogodke, ki naj se zgodijo v prihodnosti. Ob prihodu sporočila enostavni modul **generator** najprej preveri ali gre za tako sporočilo (vrstica 2). V primeru, da je odgovor pritrdilen, ustvari novo *Zahtevo* (vrstice 4 - 9) in jo odpošlje proti modulu **internet** (vrstica 10).

Nato iz generatorja naključnih števil (vrstica 12) pridobi čas, v katerem naj se pojavi nova *zahteva* in samemu sebi pošlje sporočilo (vrstica 14), ki bo dostavljeno čez predhodno omenjeno količino časa.

2.4.2 Dohodni promet

Dohodni promet se v modelu generira na modulu **internet** in ima za ponor bazne postaje. Promet za vsako prejeto *zahtevo* z naslovom bazne postaje ustvari neko število novih *zahtev* proti tej bazni postaji. To število *zahtev* je določeno z razmerjem med količino dohodnega in odhodnega prometa, definiranim ob inicializaciji simulacije (spremenljivki `razmerjeDownload` in `razmerjeUpload`). Število je zaokroženo navzgor.

```
1 void Generator::handleMessage(cMessage *msg){
2     if(msg -> isSelfMessage()){                /* zaznamo dogodek za
3                                                  generacijo nove zahteve */
4         Zahteva *msg = new Zahteva();
5         msg->setDestinationId(0);              /* nastavimo ponor zahteve
6                                                  na internet */
7
8         msg->setSenderId(naslov);              // nastavimo naslov izvora
9         msg->setByteLength(velikostZahteve); // nastavimo velikost zahteve
10        send(msg, "port$o");                  // odpošljemo zahtevo
11
12        simtime_t next = exponential(t, 0); // pridobimo čas naslednje zahteve
13
14        scheduleAt(simTime() + next, self); /* nastavimo dogodek za
15                                                  generacijo naslednje zahteve */
16    }
17 }
```

Koda 2.4 Izsek kode, ki skrbi za generiranje odhodnega prometa.

3 Model

V pričujočem poglavju opišemo elemente modela mobilnega podatkovnega omrežja. Na začetku se dotaknemo ogrodja OMNeT++, v katerem smo realizirali model, razložimo koncept omenjenega ogrodja in njegovo delitev na enostavne in sestavljene module. Sledi opis modulov, ki sestavljajo naš model, na koncu pa še opišemo težave, ki so se pojavile med testiranjem delovanja modela in način njihove rešitve.

3.1 OMNeT++

OMNeT++ je objektno usmerjeno modularno diskretno simulacijsko ogrodje. Z njim lahko simuliramo, katerikoli sistem, ki temelji na izmenjevanju sporočil med posameznimi entitetami [9], kot so na primer protokoli, programi, žična in brezžična omrežja, ipd. Model realiziran v okolju OMNeT++ je sestavljen iz sestavljenih in enostavnih modulov.

Enostavni moduli so programirani v jeziku C++ in so sestavne komponente sestavljenih modulov. Enostavni moduli so znotraj sestavljenih modulov povezani med seboj preko vrat (angl. *gates*) in skrbijo za pošiljanje sporočil (v našem modelu jih imenujemo *zahteva*) na ustrezna vrata ob ustreznem času, za spreminjanje vrednosti sporočil in za

zajem statistike. Povedano drugače, določajo način obnašanja modela. Enostavni moduli, ki smo jih realizirali in uporabili pri sestavi našega modela so opisani v razdelku [3.2](#).

Sestavljeni moduli so zgrajeni iz prej omenjenih enostavnih modulov ali pa kar iz drugih sestavljenih modulov. Komponente sestavljenih modulov so med seboj povezane preko vrat. Sam model mobilnega podatkovnega omrežja, ki ga opisujemo v pričujočem delu je tako sestavljen modul, ki ima za svoje gradnike druge sestavljene module, ti pa so sestavljeni iz enostavnih modulov. Ogrodje OMNeT++ nam omogoča, da realizirane enostavne in sestavljene module uporabimo večkrat. Na primer aktivni napravi **servin-gGateway** in **pdnGateway**, ki sta sestavljena modula, obe uporabljata enostavni modul **vrsta**. Na ta način nam ni potrebno realizirati istih funkcionalnosti za različne komponente modela. Koncepti in naloge sestavljenih modulov, ki jih realiziramo in uporabimo v modelu mobilnega podatkovnega omrežja, so opisani v podpoglavju [2.3](#), njihova zgradba pa je opisana v podpoglavju [3.3](#).

3.2 Opis gradnikov

3.2.1 Strežna enota aktivne naprave

Enostavni modul **ANstreznik** je strežna enota znotraj aktivnih naprav, ki sestavljajo jedro omrežja v modelu (**servin-gGateway** in **pdnGateway**). Njegova glavna naloga je obdelava *zahtev*, kar v našem modelu pomeni, da prispelo *zahtevo* odpošlje nazaj v omrežje z vnaprej določeno zakasnitvijo nastavljeno pred začetkom izvajanja simulacije (spremenljivki *delaySGW* in *delayPDN*). Njegovo obnašanje je določeno tudi z vrsto sestavljenega modula, katerega del je.

3.2.2 Strežna enota bazne postaje

Enostavni modul **streznikBP** je strežna enota znotraj baznih postaj eNodeB. Deluje podobno kot prej opisani enostavni modul **ANstreznik** z razliko, da je zakasnitev pošiljanja *zahteve* pogojena z obremenjenostjo komunikacijskega kanala iz bazne postaje proti jedru omrežja. Na opisanem modulu zajemamo statistiko povprečnega bivanja *zahtev* v aktivni napravi.

3.2.3 Usmerjanje na aktivni napravi

Enostavni modul **ANusmerjanje** je namenjen usmerjanju *zahtev* na aktivni napravi **serv-ingGateway**. Modul skrbi za pošiljanje *zahtev* na ustrezna vrata znotraj omenjenega sestavljenega modula **serv-ingGateway** in za sprejemanje in odpremo *zahtev* izven aktivne naprave. Ker je modul vstopna in izstopna točka omenjene aktivne naprave na njem zajemamo statistiko strežnega časa *zahtev* na napravi. Ob inicializaciji simulacije si modul zgradi usmerjevalno tabelo, s pomočjo katere nato odpošilja *zahteve* na ustrezna vrata, ki vodijo izven sestavljenega modula, katerega del je.

3.2.4 Usmerjanje na usmerjevalniku

Enostavni modul **usmerjanje** je edini gradnik sestavljenega modula **usmerjevalnik**, ki skrbi za povezavo med aktivnima napravama **serv-ingGateway** in aktivno napravo **pdn-Gateway**. Ob inicializaciji simulacije si zgradi usmerjevalno tabelo, s pomočjo katere nato tekom simulacije usmerja prihajajoče *zahteve* proti ustrezni aktivni napravi.

3.2.5 Generator prometa

Enostavni modul **generator** je zadolžen za generiranje *zahtev*. *Zahtevam* določi izvor, ponor in njihovo velikost v Byte-ih. Postopek generiranja *zahtev* je opisan v razdelku 2.4. Enostavni modul **generator** zajema časovno statistiko poti *zahteve* skozi omrežje. Ta je bila dodana ob gradnji optimiziranega modela, o čemer več povemo v razdelku 4.4.3. Posledično **generator** *zahtevam* nastavi tudi čas rojstva, ki predstavlja parameter potreben za zajem omenjene statistike. Njegovo obnašanje je določeno s tipom sestavljenega modula, katerega del je.

3.2.6 FIFO vrsta na aktivnih napravah

Enostavni modul **vrsta** je implementiran na vseh aktivnih napravah modela. Njegova naloga je, da hrani *zahteve*, ki čakajo na obdelavo. Na njem merimo večje število statistik, kot so povprečna in največja dolžina čakalne vrste ter prejeta in izgubljeno število *zahtev*. Modul **vrsta** deluje po principu FIFO (angl. *First In First Out*) in ne dela razlike med prispelimi *zahtevami*. V primeru polnosti vrste zavrže vse nadaljnje prispеле *zahteve*, dokler se prostor v njej ne sprost. Modul **vrsta** sprejema *zahteve* in vseskozi čaka na signal strežne enote modula, znotraj katerega je implementiran, da je ta pripravljen na

obdelavo naslednje *zahteve*. Ko ta signal pride, pošlje naslednjo *zahtevo*, ki je takrat na vrsti v obdelavo.

3.2.7 Vgrajenini enostavni modul channel

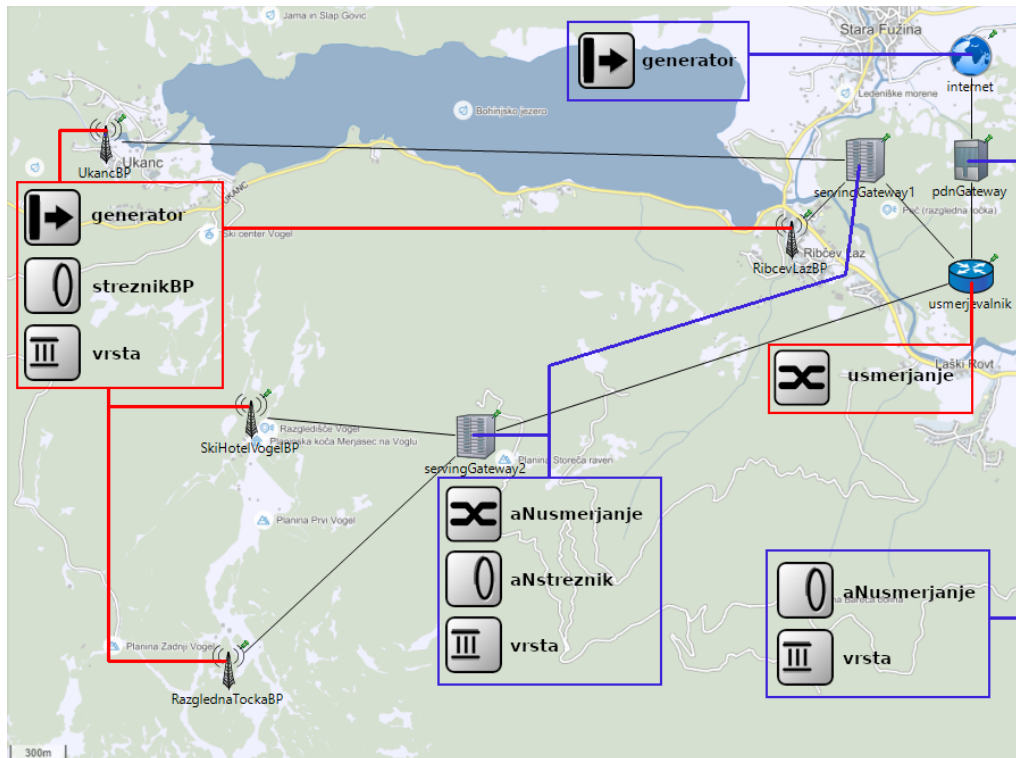
Pri realizaciji modela mobilnega podatkovnega omrežja uporabimo OMNeT++-ov vgrajen enostavni modul **channel** tipa DatarateChannel. V modelu nam predstavlja prenosni medij med baznimi postajami in jedrom omrežja. Modulu lahko določimo pasovno širino, zakasnitev zaradi razdalje in verjetnost napak. Modulu v našem modelu določimo le pasovno širino. Zaradi kratkih razdalj med aktivnimi napravami znotraj modela, mu zakasnitve zaradi razdalje ne nastavimo, oziroma je le ta nastavljena na 0. Prav tako je na 0 nastavljena verjetnost napak, saj v modelu opazujemo le količino prometa. *Zahteve* niso oštevilčene in v primeru izgube le teh ne pošljamo ponovno. Na modulu merimo statistiko izkoriščenosti kanala (angl. *utilization*), ki nam pove kolikšen procent časa tekom simulacije je bil posamezen kanal aktiven.

3.3 Celotni model

Na sliki 3.1 vidimo model mobilnega podatkovnega omrežja z vsemi njegovimi elementi. Model je sestavljen iz sestavljenih modulov, ki so konceptualno opisani v razdelku 2.3, pri čemer je vsak od njih sestavljen iz enostavnih modulov opisanih v razdelku 3.2. Na omenjeni sliki 3.1 vidimo tudi iz katerih enostavnih modulov so sestavljeni moduli zgrajeni. Kako so enostavni moduli znotraj sestavljenih povezanih med sabo in kako delujejo kot celota, lahko preberemo v nadaljevanju tega poglavja. Na tem mestu velja omeniti tudi to, da nam pojma sestavljen modul in aktivna naprava pomenita eno in isto stvar.

3.3.1 Bazna postaja

Na sliki 3.2 je ponazorjena zgradba sestavljenega modula **BaznaPostaja**. Sestavljen modul je zgrajen iz treh enostavnih modulov: **generator**, **streznikBP** in **vrsta**. Modul **generator** znotraj sestavljenega modula **BaznaPostaja** je zadolžen za nedeterministično generiranje *zahtev*, ki je opisano v razdelku 2.4.1. Generirane *zahteve* nato potujejo proti enostavnemu modulu **streznikBP**, ki jih nato pošlje proti modulu **vrsta**. Modul **streznikBP** čaka, da se kanal, ki vodi izven omrežja sprosti, nakar vzame *zahtevo* iz modula **vrsta** in jo odpošlje proti jedru omrežja. *Zahteve*, ki pridejo iz jedra omrežja,

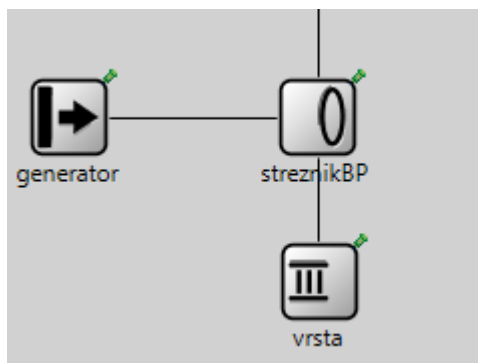


Slika 3.1 Prikaz zgradbe modulov modela.

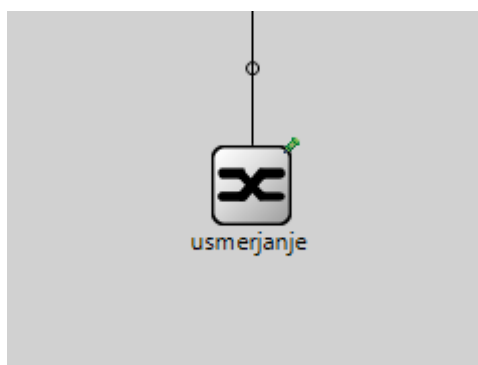
modul **streznikBP** pravtako pošlje v modul **vrsta**, kjer počakajo na obdelavo. Ko pridejo na vrsto, jih modul **streznikBP** odpošlje proti modulu **generator**, kjer zaključijo svojo pot.

3.3.2 Serving gateway

Na sliki 3.3 je ponazorjena zgradba sestavljenega modula **servingGateway**, ki je zgrajen iz treh enostavnih modulov: **aNstreznik**, **aNusmerjanje** in **vrsta**. *Zahteva*, ki pride v modul najprej naleti na enostavni modul **aNusmerjanje**, ki jo nato pošlje proti modulu **vrsta**. Enostavni modul **aNusmerjanje**, skrbi za pravilno delovanje sestavljenega modula **servingGateway**. Če so *zahteve* v modulu **vrsta** in je strežna enota **aNstreznik** nezasedena, vzame *zahtevo* iz modula **vrsta** in jo pošlje v obdelavo. Enostavni modul **aNstreznik** nato *zahtevo* obdela, kar v resnici pomeni, da jo odpošlje nazaj proti modulu **aNusmerjanje** z zakasnitvijo, ki jo določimo ob inicializaciji simulacije (spremenljivka `delaySGW`). Ko se *zahteva* obdela do konca in je kanal proti njenemu ponoru prost, jo



Slika 3.2 Gradniki modula BaznaPostaja.

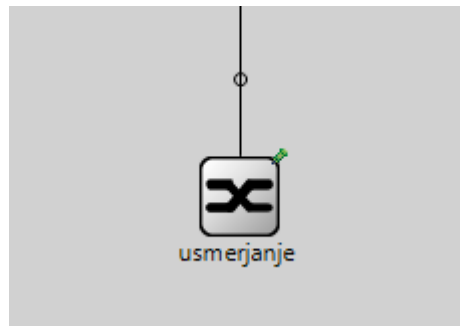


Slika 3.3 Gradniki modula servingGateway.

enostavni modul **aNusmerjanje** odpošlje iz aktivne naprave **servingGateway**.

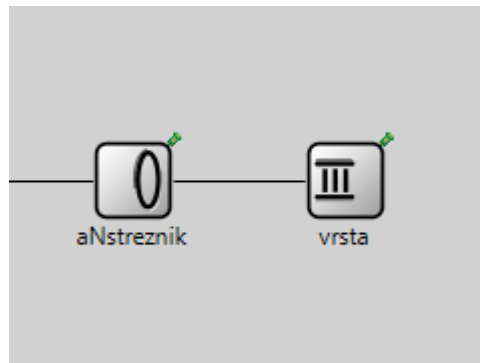
3.3.3 Usmerjevalnik

Na sliki 3.4 je ponazorjena zgradba sestavljenega modula **usmerjevalnik**. Modul je zgrajen iz enega enostavnega modula in v modelu mobilnega podatkovnega omrežja služi kot povezava med sestavljenima moduloma **servingGateway** in sestavljenim modulom **pdnGateway**. Skrbi za pravilno usmerjanje *zahtev* v jedru omrežja. *Zahteve*, ki pridejo v sestavljen modul **usmerjevalnik** skozi vrata proti sestavljenima moduloma **servingGateway**, usmeri na vrata proti sestavljenemu modulu **pdnGateway**, *zahteve*, ki se pojavijo na vratih proti sestavljenemu modulu **pdnGateway**, pa usmeri na ustrezna vrata proti enemu izmed dveh sestavljenih modulov **servingGateway**.



Slika 3.4 Gradniki modula **usmerjevalnik**.

3.3.4 Packet data node gateway

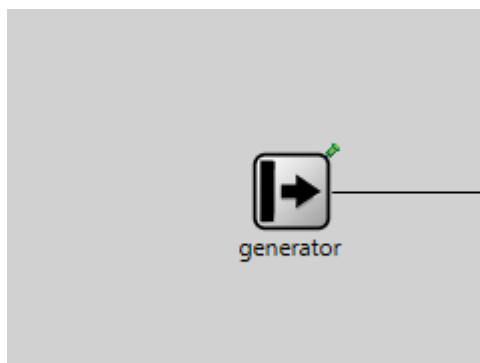


Slika 3.5 Gradniki modula **pdnGateway**.

Na sliki 3.5 je ponazorjen sestavljen modul **pdnGateway**, ki je sestavljen iz dveh enostavnih modulov: **aNstreznik** in **vrsta**. *Zahteve*, ki se pojavijo na vhodu, najprej naletijo na enostavni modul **aNstreznik**, ki jih pošlje proti modulu **vrsta**, kjer čakajo na obdelavo. Enostavni modul **aNstreznik** vseskozi sprejema *zahteve* in jih pošilja v modul **vrsta**, iz njega pa jih jemlje, obdeluje in odpošilja naprej proti omrežju na interval časa določen s spremenljivko `delayPDN`.

3.3.5 Povezava v zunanji svet

Na sliki 3.6 je predstavljen sestavljen modul **internet**, ki v modelu služi kot povezava v zunanji svet. Sestavljen je iz enega enostavnega modula **generator**, ki se v tem sestavljenem modulu obnaša drugače kot na baznih postajah. Modul **generator** v tem primeru



Slika 3.6 Gradniki povezave v zunanji svet internet.

sprejema *zahteve*, ki pridejo iz smeri baznih postaj in odgovarja nanje glede na razmerje, ki ga določimo ob inicializaciji simulacije. Generiranje *zahtev* na sestavljenem modulu **internet** je opisano v razdelku 2.4.2.

3.4 Problemi modela in poenostavitve

Po postavitvi modela in prvem poskusu izvajanja simulacij smo naleteli na vrsto problemov. Prvi in največji problem, ki se je pojavil, je bila velikost statističnih datotek na trdem disku računalnika, na katerem smo izvajali simulacijo. Preden smo zaradi slednjega bili primorani simulacijo predčasno prekiniti, so te datoteke zasedle približno 600 GB prostora. Problem so predstavljale vektorske datoteke, ki so hranile meritve za vsako *zahtevo*, ki se je pojavila v modelu tekom simulacije. Rešitev problema je bil izklop zajema vektorske statistike, s čimer smo izgubili vpogled v obnašanje modela skozi čas izvajanja simulacije.

Naslednji problem, ki se je pojavil, je bil povezan s prelivom (angl. *overflow*) števcem. Do njega je prihajalo zaradi prevelikega števila *zahtev*, ki so se pojavile tekom simulacije. V rezultatih simulacij smo dobivali negativne vrednosti povprečij, vzrok za kar so bili negativni števci *zahtev*, ki so kvarili sprotni izračun povprečij zajemanih statistik. Primer tega so negativna povprečja strežnih časov ter negativno število prispelih in izgubljenih *zahtev*. Opisani problem smo rešili s povečanjem velikosti *zahteve* za faktor 1.000, z 1.500 B na približno 1,5 MB. V modelu smo zaradi omenjene modifikacije primerno podaljšali strežne čase na aktivnih napravah in zmanjšali dolžine čakalnih vrst. Komunikacijskih kanalov ni bilo potrebno modificirati, ker delujejo glede na določeno velikost *zahteve*.

Na tem mestu velja omeniti tudi to, da z opisano rešitvijo zelo verjetno vplivamo na nedeterminizem porajanja *zahtev*. Z opisanimi rešitvami smo skrajšali čas potreben za izvedbo simulacije in sicer z enega dneva na dobrih pet minut.

4 Analiza simulacijskih rezultatov

Postavili smo tri modele. Najprej smo glede na pričakovano število uporabnikov in hitrosti prenosa, ki jim jo želimo nuditi zasnovali osnovni model. S preprostimi linearnimi izračuni smo določili kapacitete prenosnih medijev od baznih postaj proti jedru omrežja in prepustnosti treh aktivnih naprav v samem jedru omrežja. Po končani simulaciji osnovnega modela smo analizirali rezultate. Zaznana ozka grla osnovnega modela smo poskušali odpraviti v nadgrajenem modelu in nato izvedli simulacijo, po kateri smo zaznali nova ozka grla, ki smo jih nato odpravili v optimiziranem modelu mobilnega podatkovnega omrežja in ga nato še dodatno nadgradili za zagotavljanje boljše uporabniške izkušnje.

Vrednosti meritev predstavljene v sledečem poglavju so zaradi lažje berljivosti zaokrožene na prvi dve neničelni decimalki. Nezaokrožene vrednosti meritev in meritve ne aktivnih napravah na katerih nismo zaznali problemov, najdemo v prilogah pričujočega dela.

4.1 Izvajanje simulacij

Simulacije smo izvajali na prenosnem računalniku z operacijskim sistemom Windows 10. V tabeli 4.1 so predstavljene podrobnosti o njegovih zmogljivostih.

CPE	Intel Core i5-3230M @2.60GHz 2.60GHz
RAM	8 GB DDR3 SDRAM
OS	64-bit Windows 10

Tabela 4.1 Zmogljivosti računalnika, na katerem smo izvajali simulacije.

V simulaciji združujemo porajajoče *zahteve* v "burste" po 1000. Posledično tudi zmanjšamo dolžine čakalnih vrst in primerno prilagodimo čase strežb na aktivnih napravah. Velikost ene *zahteve* v modelu je tako približno 1,5 MB namesto 1.500 B. Dolžine čakalnih vrst so tisočkrat krajše, strežni časi *zahtev* na aktivnih napravah pa so tisočkrat daljši kot bi bili sicer. Kapacitete prenosnih medijev ostanejo enake, saj delujejo glede na velikost, ki jo določimo *zahtevam*. Na ta način skrajšamo čas potreben za izvedbo simulacije in rešimo problem preliva števecv prometa. Za ta korak se odločimo, ker smo v preteklih testnih simulacijah opazili, da prihaja do preliva števecv, kar nam posledično pokvari zajete podatke, kot so časi bivanja *zahtev* na napravah in povprečno število *zahtev* v čakalnih vrstah.

4.2 Osnovni model

Pred izvedbo prve simulacije naredimo nekaj preprostih izračunov in nastavimo kapacitete povezav in prepustnost aktivnih naprav glede na pričakovano število uporabnikov v omrežju in prihajalne hitrosti podatkovnega prometa, ki jim jo želimo nuditi.

4.2.1 Vhodni parametri simulacije

Vhodni parametri simulacije so predstavljeni v tabeli vrednosti spremenljivk modela 4.2. Njihove vrednosti so povzete po različnih virih, ki so navedeni v sami tabeli, ali pa so izračunane glede na prej omenjene vire (označene z *). Spremenljivki `razmerjeUpload` in `razmerjeDownload` sta nastavljeni glede na razmerje med prihajalno in odhajalno hitrostjo, ki jo predvideva standard LTE.

sim-time-limit (čas izvajanja simulacije)	3600 s
velikostZahteve	1.500.000 B
UkancBP.pricakovanoSteviloUporabnikov	41 [6]
SkiHotelVogelBP.pricakovanoSteviloUporabnikov	582 [7]
RibcevLazBP.pricakovanoSteviloUporabnikov	731 [6]
RazglednaTockaBP.pricakovanoSteviloUporabnikov	194 [7]
RazglednaTockaBP.uporabnikDataRate	23 Mbps [8]
RibcevLazBP.uporabnikDataRate	23 Mbps [8]
SkiHotelVogelBP.uporabnikDataRate	23 Mbps [8]
UkancBP.uporabnikDataRate	23 Mbps [8]
razmerjeDownload	3
razmerjeUpload	1
RazglednaTockaDataRate	5 Gbps *
RibcevLazDataRate	17 Gbps *
SkiHotelDataRate	14 Gbps *
UkancDataRate	1 Gbps *
delayPDN	0,00028 s *
delaySGW	0,00062 s *
vrsta.velikostVrste	3000 *

Tabela 4.2 Vhodni parametri simulacije.

Prepustnosti nastavljene na aktivnih napravah znotraj omrežja merjene v milijonih paketov na sekundo (Mpps) so sledeče:

- **servingGateway1**: 1,6 Mpps;
- **servingGateway2**: 1,6 Mpps;
- **pdnGateway**: 3,6 Mpps;

4.2.2 Rezultati in analiza simulacije

Celotno poročilo simulacije se nahaja v prilogi A.1, na tem mestu pa se osredotočimo na zaznani ozki grli na aktivnih napravah **servingGateway1** in **servingGateway2**, katerih rezultati so predstavljeni v tabelah 4.3 in 4.4. Opazimo, da na omenjenih aktivnih napravah prihaja do izgube *zahtev* in sicer 10,5% podatkovnega prometa na **servingGateway1** in 10,7% podatkovnega prometa na **servingGateway2**. Opazimo tudi, da je povprečni čas strežbe *zahtev* na obeh omenjenih aktivnih napravah visok in sicer zaokroženo na prvo decimalno 1,8 s. Prav tako sta vrsti skozi celotno simulacijo skoraj povsem polni.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.servingGateway1.aNusmerjanje	streznCas:max	1,86 s
Network.servingGateway1.aNusmerjanje	streznCas:mean	1,85 s
Network.servingGateway1.aNusmerjanje	streznCas:min	0,00062 s
Network.servingGateway1.aNusmerjanje	streznCas:count	5.806.443
Network.servingGateway1.port\$o[1].channel	utilization:last	0,84
Network.servingGateway1.port\$o[2].channel	utilization:last	0,80
Network.servingGateway1.vrsta	dolzinaVrste:max	3.000
Network.servingGateway1.vrsta	dolzinaVrste:mean	2980,89
Network.servingGateway1.vrsta	prejeteZahteve:count	6.487.606
Network.servingGateway1.vrsta	izgubljeneZahteve:count	678.163

Tabela 4.3 Rezultati simulacije osnovnega modela na aktivni napravi servingGateway1.

4.3 Nadgrajen model

V nadaljevanju poskušamo odpraviti ozka grla, ki smo jih zaznali v prvi simulaciji in opisali v razdelku 4.2.2. Osredotočimo se na vhodne parametre, ki vplivajo na problematični

Modul	Meritev	Vrednost
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:max	1,86 s
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:mean	1,85 s
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:min	0,00062 s
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:count	5.806.445
Network.servingGateway2.port\$0[1].channel	utilization:last	0,75
Network.servingGateway2.port\$0[2].channel	utilization:last	0,81
Network.servingGateway2.vrsta	dolzinaVrste:max	3.000
Network.servingGateway2.vrsta	dolzinaVrste:mean	2981,67
Network.servingGateway2.vrsta	prejeteZahteve:count	6.505.849
Network.servingGateway2.vrsta	izgubljeneZahteve:count	696.420

Tabela 4.4 Rezultati simulacije osnovnega modela na aktivni napravi servingGateway2.

del omrežja.

4.3.1 Vhodni parametri simulacije

Vhodni parametri v drugi simulaciji so enaki parametrom, ki jih uporabimo za izvajanje prve simulacije (Tabela 4.2) z izjemo parametra `delaySGW`, ki ga nastavimo na 0,00055 s. Nova vrednost parametra `delaySGW` je rezultat kvocienta `sim-time-limit` (3600 s) in meritve `prejeteZahteve:count` izmerjene na modulu **Network.servingGateway2.vrsta** iz tabele 4.4. Parameter `delaySGW` je tako preprosto izračunana vrednost na podlagi meritev predhodne simulacije in nam predstavlja čas, ki naj bi ga imeli na voljo za obdelavo ene *zahteve* na aktivni napravi. Za ta korak se odločimo, da povečamo prepustnost aktivnih naprav **servingGateway1** in **servingGateway2** in zmanjšamo količino izgubljenega prometa. Zadnje bi lahko dosegli tudi s povečanjem vrste, vendar se za to ne odločimo, ker je bil v predhodni simulaciji izmerjen previsok povprečen čas potreben za strežbo posamezne *zahteve* in taka rešitev ne bi pripomogla k izboljšanju stanja. Slednjo ugotovitev nam podprejo tudi meritve (predstavljene v tabelah 4.3 in 4.4) `utilization:last` na modulih ***.channel**, pri katerih zaznamo najvišjo izkoriščenost komunikacijskega kanala 84%. Povedano drugače, najbolj obremenjen komunikacijski kanal je bil aktiven 84% časa izvajanja simulacije in povečanje kapacitet komunikacijskih kanalov ne bi odpravilo zaznanih ozkih grl.

Nove določene prepustnosti aktivnih naprav so sledeče:

- **servngGateway1**: 1,8 Mpps;
- **servngGateway2**: 1,8 Mpps;
- **pdnGateway**: 3,6 Mpps;

4.3.2 Rezultati in analiza simulacije

Celotno poročilo naše druge simulacije lahko najdemo v prilogi B.1. Iz njega lahko vidimo, da smo s povečanjem prepustnosti aktivnih naprav **servngGateway1** in **servngGateway2** rešili problem ozkih grl na teh dveh mestih. Pojavi pa se nam novo ozko grlo in sicer na aktivni napravi **pdnGateway** (Tabela 4.5), kjer zabeležimo 5,9% izgubo podatkovnega prometa.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:max	0,84 s
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:mean	0,83 s
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:min	0,00014 s
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:count	12.857.121
Network.pdnGateway.vrsta	dolzinaVrste:max	3.000
Network.pdnGateway.vrsta	dolzinaVrste:mean	2962,39
Network.pdnGateway.vrsta	prejeteZahteve:count	13.664.099
Network.pdnGateway.vrsta	izgubljeneZahteve:count	804.048

Tabela 4.5 Rezultati simulacije nadgrajenega modela na aktivni napravi pdnGateway.

4.4 Optimiziran model

Ker v prejšnji simulaciji 4.3 še vedno beležimo dokaj visoko izgubo podatkovnega prometa, se odločimo za še en nov poskus. Tokrat povečamo prepustnost na vseh treh aktivnih napravah **pdnGateway**, **servngGateway1** in **servngGateway2**.

4.4.1 Vhodni parametri simulacije

Pri izračunu novih prepustnosti si pomagamo z izmerjenim parametrom **prejeteZahteve** na aktivni napravi **pdnGateway**. Za aktivni napravi **servngGateway1** in **servngGateway2**

izračunano prepustnost prepolovimo, saj smo v prejšnjih simulacijah opazili, da se preko vsake od njih preteči približno polovica prometa. Vhodni parametri nove simulacije tako ostanejo enaki kot so bili predstavljeni v tabeli 4.2, z izjemo parametrov `delayPDN`, ki je sedaj nastavljen na 0,00026 s in `delaySGW`, ki je sedaj nastavljen na 0,00052 s. Parameter `delayPDN` izračunamo kot kvocient med časom izvajanja simulacije (spremenljivka `sim-time-limit`) in meritvijo `prejeteZahteve:count` na modulu `Network.pdnGateway.vrsta` iz tabele 4.5. Parameter `delaySGW` nastavimo kot dvokratnik predhodno dobljene vrednosti parametra `delayPDN`. Prepustnosti na omenjenih aktivnih napravah so določene na sledeč način:

- **servicingGateway1**: 1,9 Mpps;
- **servicingGateway2**: 1,9 Mpps;
- **pdnGateway**: 3,8 Mpps;

4.4.2 Rezultati in analiza simulacije

Celotno poročilo tretje simulacije lahko najdemo v prilogi C.1. To simulacijo lahko označimo za uspešno, saj v omrežju zaznamo majhne izgube prometa. V tabelah 4.6 in 4.7 so predstavljeni rezultati simulacije na aktivnih napravah **pdnGateway** in **servicingGateway2**, na katerih zaznamo izgube podatkovnega prometa. Le te so po vrsti 0,75% in 0,13%.

Opazimo, da se *zahteve* na **pdnGateway** v povprečju strežejo 0,7 s, na **servicingGateway2** pa 1,3 s. Skupno sta na tej poti za strežbo tako potrebni 2 sekundi v eno smer, kar poenostavljeno pomeni, da so za strežbo neke storitve samo s strani našega modela omrežja pri uporabniku potrebne 4 sekunde. Pri tem ne upoštevamo časa, ki ga storitev potrebuje za sam odgovor. Ker so naše *zahteve* velike približno 1,5 MB, kar je v bližini povprečja velikosti pristajalne strani [10] (angl. *landing site*), na tem mestu uporabimo Googlovo statistiko [11] (angl. *probability to bounce*), ki pravi, da delež uporabnikov, ki se jim spletna stran nalaga več kot tri sekunde, to zapusti v 53% primerov, stran, ki se nalaga do 5 sekund pa verjetnost zapustitve poveča za 90%. Ta problem naslovimo v sledečem razdelku 4.4.3.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:max	0,78 s
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:mean	0,72 s
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:min	0,000083 s
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:count	13.845.617
Network.pdnGateway.vrsta	dolzinaVrste:max	3.000
Network.pdnGateway.vrsta	dolzinaVrste:mean	2781,16
Network.pdnGateway.vrsta	prejeteZahteve:count	13.953.168
Network.pdnGateway.vrsta	izgubljeneZahteve:count	104.698

Tabela 4.6 Rezultati simulacije optimiziranega modela na aktivni napravi pdnGateway.

4.4.3 Dodatna optimizacija za zagotovitev kvalitetnejše strežbe

Ker uporabnikom želimo nuditi kar se da dobro uporabniško izkušnjo, se odločimo za dodatno optimizacijo modela. Do sedaj nam je uspelo rešiti problem velike izgube mobilnega podatkovnega prometa, vendar je čas potreben za dostavo do baznih postaj **SkiHotelVogelBP** in **RazglednaTockaBP** predolg. Problem zaznamo v jedru omrežja in sicer na aktivnih napravah **pdnGateway** in **servicingGateway2**, ki sta na poti med prej omenjenima baznima postajama in zunanjim svetom (**internet**). Opazimo, da je zasedenost podatkovnega kanala med aktivno napravo **servicingGateway2** in bazno postajo **SkiHotelVogelBP** 99%, zato se poleg povečanja prepustnosti na aktivni napravi odločimo tudi za povečanje pasovne širine omenjenega kanala. Podobno opazimo tudi na aktivni napravi **servicingGateway1**, na kateri sicer nismo zabeležili izgub podatkovnega prometa, vendar je zasedenost podatkovnih kanalov proti baznim postajam **UkancBP** in **RibčevLazBP** prav tako visoka (Tabela C.2), zato se odločimo za njuno razširitev.

Spremenjene vrednosti vhodnih spremenljivk modela so predstavljene v tabeli 4.8. Pri izračunu prepustnosti aktivne naprave **servicingGateway2** si pomagamo z meritvijo spremenljivk **prejeteZahteve** iz tabele 4.7. Enako naredimo tudi za prepustnost aktivne naprave **pdnGateway**, pri čemer uporabimo meritev spremenljivke **prejeteZahteve** iz tabele 4.6. Pri izračunu novih kapacitet komunikacijskih kanalov si pomagamo z meritvami spremenljivke **prejeteZahteve** na baznih postajah **SkiHotelVogelBP** (Tabela C.6), **RibčevLazBP** (Tabela C.5) in **UkancBP** (Tabela C.7). Prepustnosti aktivnih naprav določimo na sledeč način:

Modul	Meritev	Vrednost
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:max	1,56 s
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:mean	1,29 s
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:min	0,00052 s
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:count	6.922.760
Network.servingGateway2.port\$0[1].channel	utilization:last	0,92
Network.servingGateway2.port\$0[2].channel	utilization:last	0,99
Network.servingGateway2.vrsta	dolzinaVrste:max	3.000
Network.servingGateway2.vrsta	dolzinaVrste:mean	2496,43
Network.servingGateway2.vrsta	prejeteZahteve:count	6.935.114
Network.servingGateway2.vrsta	izgubljeneZahteve:count	9608

Tabela 4.7 Rezultati simulacije optimiziranega modela na aktivni napravi servingGateway2.

SkiHotelDataRate	16 Gbps
RibcevLazDataRate	20 Gbps
UkancDataRate	1,2 Gbps
delayPDN	0,00025 s
servingGateway1.delaySGW	0,00052 s
servingGateway2.delaySGW	0,0005 s

Tabela 4.8 Spremenjeni vhodni parametri simulacije.

- **servingGateway1**: 1,9 Mpps;
- **servingGateway2**: 2 Mpps;
- **pdnGateway**: 3,9 Mpps;

Za boljši vpogled in natančnejše merjenje časa, ki ga *zahteve* potrebujejo za krog skozi modelirano mobilno podatkovno omrežje (angl. *Round Trip Time*), se odločimo za nadgradnjo modela. Na enostavnem modulu **generator** implementiramo novo statistiko rtt s katero merimo omenjeno količino.

4.4.4 Rezultati in analiza simulacije dodatne optimizacije modela

Celotno poročilo po vrsti četrte simulacije lahko najdemo v prilogi D.1. Po analizi rezultatov simulacije opazimo, da v modelu še vedno beležimo izgube *zahtev*, vendar so te zanemarljive. Pojavijo se na aktivni napravi **servicingGateway1** in sicer 0,3% (Tabela D.4). Na tem mestu se osredotočimo na glavni problem iz poglavja 4.4.3. Na baznih postajah smo izmerili čas potreben, da *zahteve* naredijo krog skozi omrežje. Ta čas je merjen od rojstva *zahteve* na bazni postaji do povezave v zunanji svet (**internet**) in nazaj. Celotna zajeta statistika omenjene meritve je predstavljena v tabeli D.2, na tem mestu pa se osredotočimo na izmerjena povprečja te meritve.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.SkiHotelVogelBP.generator	rtt:mean	0,077 s
Network.UkancBP.generator	rtt:mean	2,97 s
Network.RazglednaTockaBP.generator	rtt:mean	0,14 s
Network.RibcevLazBP.generator	rtt:mean	2,86 s

Tabela 4.9 Povprečja meritev RTT *zahtev* na baznih postajah.

Glede na povprečja RTT (angl. "round trip time") izmerjena na baznih postajah lahko dodatno optimizacijo označimo za uspešno, saj vrednosti meritev ne presegajo treh sekund. Pri tem se opremo na Googlovo statistiko [11], ki pravi, da je v tem primeru povečanje verjetnosti, da uporabnik zapusti spletno stran 32%. Povedano drugače, zaradi zakasnitve *zahtev* v našem modelu mobilnega omrežja se bo verjetnost, da uporabnik predčasno prekine nalaganje neke spletne strani povečala za 32%. Slednje je glede na 90% povečanje verjetnosti iz razdelka 4.4.2 dober napredek, statistike za krajši čas pa ne poznamo.

4.5 Sklep

Z zadnjo nadgradnjo in analizo modela mobilnega podatkovnega omrežja zaključimo s simulacijami. Za zagotavljanje kvalitetne storitve in dobre uporabniške izkušnje potrebujemo aktivne naprave v jedru omrežja s sledečimi prepustnostmi:

- **servicingGateway1**: 1,9 Mpps;
- **servicingGateway2**: 2 Mpps;

- **pdnGateway:** 3,9 Mpps;

Pasovne širine komunikacijskih kanalov, ki povezujejo bazne postaje z jedrom omrežja, morajo biti sledeče:

- **SkiHotelDataRate:** 16 Gbps;
- **RibcevLazDataRate:** 20 Gbps;
- **UkancDataRate:** 1,2 Gbps;
- **RazglednaTockaDataRate:** 5 Gbps;

Nazadnje navedemo še prepustnosti baznih postaj, ki se jih do tega trenutka nismo dotaknili, saj na njih nismo beležili izgub *zahtev*. Se pa spodobi, da jih v sklepu navedemo in so sledeče:

- **SkiHotelVogelBP:** 1,5 Mpps;
- **UkancBP:** 0,1 Mpps;
- **RazglednaTockaBP:** 0,5 Mpps;
- **RibcevLazBP:** 1,8 Mpps;

5 Zaključek

Mobilni podatkovni promet je v porastu. Leta 2009 je prvič po količini prehitel glasovnega in od takrat naprej promet mobilnih podatkov strmo narašča. Ponudniki mobilnih telekomunikacijskih storitev želijo nadgraditi svoja že obstoječa mobilna omrežja tako, da bodo uporabniki imeli dobro uporabniško izkušnjo, sama rešitev pa bo za ponudnika kar se da cenovno ugodna. Pred nadgradnjo zato želijo najprej preveriti, kako se bo nadgrajeno mobilno omrežje obnašalo. Slednje dosežemo s postavitvijo modela mobilnega omrežja, primer katerega smo predstavili v pričujočem delu. V delu modeliramo mobilno celico na turističnem področju Bohinjskega jezera, za katero se odločimo, ker ji je zaradi naravnih ovir možno lahko določiti meje.

Pri postavitvi modela smo se osredotočili izključno na mobilni podatkovni promet in v modelu realizirali le tiste naprave, katerih neposredna naloga je prenos le tega. Model tako sestoji iz baznih postaj in aktivnih naprav jedra omrežja "serving gateway" in "packet data node gateway". V modelu nismo realizirali mobilnosti uporabniških naprav in aktivne naprave "mobility management entity", katere glavna naloga je preklapljanje uporabniških naprav med baznimi postajami. Mobilni podatkovni promet generiramo

nedeterministično z uporabo eksponentne porazdelitve na baznih postajah. Ta nato preko omrežja potuje proti modulu **internet**, ki nam predstavlja povezavo v zunanji svet in na vsako prejeto *zahtevo* odgovarja nazaj proti ustrezni bazni postaji glede na vhodno spremenljivko razmerja med dohodnim in odhodnim prometom.

V delu smo izvedli štiri simulacije, pri čemer smo vhodne parametre za generacijo prometa določili na podlagi povprečnih prihajalnih hitrosti LTE omrežja v Sloveniji, števila prebivalstva v dolini Bohinjskega jezera in števila obiskovalcev smučišča Vogel. Na podlagi teh podatkov smo nato izvedli preprosti izračun prepustnosti aktivnih naprav v modelu mobilnega omrežja. Model smo nato tekom naslednjih dveh simulacij nadgrajevali tako, da smo izgubo *zahtev* zmanjšali na sprejemljivo raven. V zadnji simulaciji modela smo poskrbeli še za boljšo uporabniško izkušnjo in model nadgradili do te mere, da *zahteve* dovolj hitro potujejo skozi omrežje. V sklepu smo nato navedli kakšne morajo biti prepustnosti baznih postaj in aktivnih naprav jedra omrežja ter kakšno pasovno širino morajo imeti povezave med baznimi postajami in jedrom omrežja, da bo uporabniška izkušnja čim boljša.

V modelu je trenutno ves podatkovni promet enakovreden, vendar je v realnosti slika drugačna. LTE standard predvideva QoS za različne tipe prometa, zato bi bila prva izboljšava modela povezana s tem. Za izvedbo navedene izboljšave bi morali implementirati prioriteto vrsto ali pa vrsto, ki bi delovala po principu Round-robin. Ta bi nato zamenjala vse enostavne module **vrsta** v modelu. Podatkovni strukturi *zahteva* bi morali dodati argument, ki bi določal tip prometa. Naslednja izboljšava, ki bi jo lahko izvedli, je v načinu izvedbe simulacij. Namesto, da že na začetku določimo pasovne širine prenosnim medijem in prepustnosti aktivnim napravam, bi najprej pognali simulacijo brez omejitev. Nato bi na podlagi dobljenih rezultatov določili pasovne širine prenosnim medijem in prepustnosti aktivnim napravam, pognali simulacijo in na podlagi te nadaljevali z optimizacijo modela, če bi bila ta potrebna. Kot zadnjo in tudi najbolj zahtevno nadgradnjo omenimo še vpeljavo mobilnosti uporabnikovih naprav. Za izvedbo te bi generatorje prometa predstavili iz baznih postaj na nove entitete, ki bi se smiselno premikale skozi omrežje. V sklopu zadnje nadgradnje bi v model vpeljali tudi trenutno manjkajočo aktivno napravo "mobility management entity", ustrezne povezave in kontrolni tip prometa.

LITERATURA

- [1] Wired, Bad connection: Inside the iPhone network meltdown, <https://www.wired.com/2010/07/ff-att-fail/>, [Online; Dostopano: 2018-06-19].
- [2] Računalniške novice, Mobilni podatkovni promet presegel glasovnega, <https://www.racunalniske-novice.com/novice/mobilna-telefonija/ericsson/mobilni-podatkovni-promet-presegel-glasovnega.html>, [Online; Dostopano: 2018-06-19].
- [3] Ericsson, Future mobile data usage and traffic growth, <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/future-mobile-data-usage-and-traffic-growth>, [Online; Dostopano: 2018-06-11].
- [4] J. T. Penttinen, The LTE-Advanced Deployment Handbook: The Planning Guidelines for the Fourth Generation Networks, John Wiley & Sons, 2016.
- [5] S. Sesia, M. Baker, I. Toufik, LTE - The UMTS long term evolution: From theory to practice, John Wiley & Sons, 2011.
- [6] SURS, Popis prebivalstva, gospodinjstev in stanovanj 2002, <https://www.stat.si/popis2002/si/rezultati/rezultati,ed.asp?ter = NASsifra = 004>, [Online; Dostopano : 2018 – 11 – 18].
- [7] RTV SLO, Čez poletje ga ni - Vogel z izjemno poletno sezono, <https://www.rtvsllo.si/tureavanture/novice/cez-poletje-ga-ni-vogel-z-izjemno-poletno-sezono/402509>, [Online; Dostopano: 2018-11-18].
- [8] OpenSignal, Inc., The state of mobile video (september 2018), <https://opensignal.com/reports/2018/09/state-of-lte>, [Online; Dostopano: 2018-11-18].
- [9] OMNeT++ simulation manual, OMNeT++ version 5.3, <https://www.omnetpp.org/doc/omnetpp/manual/>, [Online; Dostopano: 2018-06-11].

- [10] Machmetrics, machmetrics.com, Average page load times for 2018 – how does yours compare? february 25, 2018, <https://www.machmetrics.com/speed-blog/average-page-load-times-websites-2018/>, [Online; Dostopano: 2019-01-13].
- [11] Google, thinkwithgoogle.com, Find out how you stack up to new industry benchmarks for mobile page speed, <https://think.storage.googleapis.com/docs/mobile-page-speed-new-industry-benchmarks.pdf>, [Online; Dostopano: 2018-12-16].

A Priloga A

A.1 Rezultati simulacije osnovnega modela

Modul	Meritev	Vednost
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:max	0,1624 s
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:mean	0,030128841253619
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:min	0,00002 s
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:count	12.744.875
Network.pdnGateway.vrsta	dolzinaVrste:max	580
Network.pdnGateway.vrsta	dolzinaVrste:mean	107,69454787975
Network.pdnGateway.vrsta	prejeteZahteve:count	12.744.950
Network.pdnGateway.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela A.1 Rezultati simulacije osnovnega modela na aktivni napravi **pdnGateway**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.servingGateway1.aNusmerjanje	strezniCas:max	1,86062 s
Network.servingGateway1.aNusmerjanje	strezniCas:mean	1,8484797938063 s
Network.servingGateway1.aNusmerjanje	strezniCas:min	0,00062 s
Network.servingGateway1.aNusmerjanje	strezniCas:count	5806443
Network.servingGateway1.port\$0[1].channel	utilization:last	0,84175596736672
Network.servingGateway1.port\$0[2].channel	utilization:last	0,80084721978289
Network.servingGateway1.vrsta	dolzinaVrste:max	3.000
Network.servingGateway1.vrsta	dolzinaVrste:mean	2.980,8902447274
Network.servingGateway1.vrsta	prejeteZahteve:count	6.487.606
Network.servingGateway1.vrsta	izgubljeneZahteve:count	678.163

Tabela A.2 Rezultati simulacije osnovnega modela na aktivni napravi **servicingGateway1**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:max	1,86062 s
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:mean	1,8489659351291 s
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:min	0,00062 s
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:count	5.806.445
Network.servingGateway2.port\$0[1].channel	utilization:last	0,75322076429398
Network.servingGateway2.port\$0[2].channel	utilization:last	0,80972291416217
Network.servingGateway2.vrsta	dolzinaVrste:max	3.000
Network.servingGateway2.vrsta	dolzinaVrste:mean	2.981,6660265579
Network.servingGateway2.vrsta	prejeteZahteve:count	6.505.849
Network.servingGateway2.vrsta	izgubljeneZahteve:count	696.420

Tabela A.3 Rezultati simulacije osnovnega modela na aktivni napravi **servicingGateway2**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.RazglednaTockaBP.streznikBP	streznCas:max	0,013339496433 s
Network.RazglednaTockaBP.streznikBP	streznCas:mean	0,00036568214680478 s
Network.RazglednaTockaBP.streznikBP	streznCas:min	0,0 s
Network.RazglednaTockaBP.streznikBP	streznCas:count	1.479.834
Network.RazglednaTockaBP.port\$o.channel	utilization:last	0,23333778528589
Network.RazglednaTockaBP.vrsta	dolzinaVrste:max	10
Network.RazglednaTockaBP.vrsta	dolzinaVrste:mean	1,0877855218896
Network.RazglednaTockaBP.vrsta	prejeteZahteve:count	1.479.834
Network.RazglednaTockaBP.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela A.4 Rezultati simulacije osnovnega modela na bazni postaji **RazglednaTockaBP**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.RibcevLazBP.streznikBP	streznCas:max	0,004947941654 s
Network.RibcevLazBP.streznikBP	streznCas:mean	0,00012337989475477 s
Network.RibcevLazBP.streznikBP	streznCas:min	0,0 s
Network.RibcevLazBP.streznikBP	streznCas:count	5.613.481
Network.RibcevLazBP.port\$o.channel	utilization:last	0,2589270641848
Network.RibcevLazBP.vrsta	dolzinaVrste:max	11
Network.RibcevLazBP.vrsta	dolzinaVrste:mean	1,1103853384379
Network.RibcevLazBP.vrsta	prejeteZahteve:count	5.613.481
Network.RibcevLazBP.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela A.5 Rezultati simulacije osnovnega modela na bazni postaji **RibcevLazBP**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.SkiHotelVogelBP.streznikBP	streznCas:max	0,005866204579 s
Network.SkiHotelVogelBP.streznikBP	streznCas:mean	0,00014348989906782 s
Network.SkiHotelVogelBP.streznikBP	streznCas:min	0,0 s
Network.SkiHotelVogelBP.streznikBP	streznCas:count	4.453.672
Network.SkiHotelVogelBP.port\$o.channel	utilization:last	0,25067613173523
Network.SkiHotelVogelBP.vrsta	dolzinaVrste:max	9
Network.SkiHotelVogelBP.vrsta	dolzinaVrste:mean	1,1032094415574
Network.SkiHotelVogelBP.vrsta	prejeteZahteve:count	4.453.672
Network.SkiHotelVogelBP.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela A.6 Rezultati simulacije osnovnega modela na bazni postaji **SkiHotelVogelBP**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.UkancBP.streznikBP	streznCas:max	0,062143896606 s
Network.UkancBP.streznikBP	streznCas:mean	0,0019676723201344 s
Network.UkancBP.streznikBP	streznCas:min	0,0 s
Network.UkancBP.streznikBP	streznCas:count	314.453
Network.UkancBP.port\$o.channel	utilization:last	0,24733576627294
Network.UkancBP.vrsta	dolzinaVrste:max	8
Network.UkancBP.vrsta	dolzinaVrste:mean	1,1003647603934
Network.UkancBP.vrsta	prejeteZahteve:count	314.453
Network.UkancBP.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela A.7 Rezultati simulacije osnovnega modela na bazni postaji **UkancBP**.

B Priloga B

B.1 Rezultati simulacije nadgrajenega modela

Modul	Meritev	Vrednost
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:max	0,84 s
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:mean	0,82944099397785 s
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:min	0,000139801559 s
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:count	12.857.121
Network.pdnGateway.vrsta	dolzinaVrste:max	3.000
Network.pdnGateway.vrsta	dolzinaVrste:mean	2962,3900747361
Network.pdnGateway.vrsta	prejeteZahteve:count	13.664.099
Network.pdnGateway.vrsta	izgubljeneZahteve:count	804.048

Tabela B.1 Rezultati simulacije nadgrajenega modela na aktivni napravi **pdnGateway**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.servingGateway1.aNusmerjanje	strezniCas:max	0,244035571582 s
Network.servingGateway1.aNusmerjanje	strezniCas:mean	0,034057074693237 s
Network.servingGateway1.aNusmerjanje	strezniCas:min	0,00055 s
Network.servingGateway1.aNusmerjanje	strezniCas:count	6.449.393
Network.servingGateway1.port\$0[1].channel	utilization:last	0,93842744566704
Network.servingGateway1.port\$0[2].channel	utilization:last	0,89561197677431
Network.servingGateway1.vrsta	dolzinaVrste:max	443
Network.servingGateway1.vrsta	dolzinaVrste:mean	61,41681766211
Network.servingGateway1.vrsta	prejeteZahteve:count	6.449.422
Network.servingGateway1.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela B.2 Rezultati simulacije nadgrajenega modela na aktivni napravi **servicingGateway1**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:max	0,45651 s
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:mean	0,058785812879693 s
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:min	0,00055 s
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:count	6.488.561
Network.servingGateway2.port\$0[1].channel	utilization:last	0,84657592216157
Network.servingGateway2.port\$0[2].channel	utilization:last	0,90853799083048
Network.servingGateway2.vrsta	dolzinaVrste:max	830
Network.servingGateway2.vrsta	dolzinaVrste:mean	106.37720300809
Network.servingGateway2.vrsta	prejeteZahteve:count	6.488.628
Network.servingGateway2.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela B.3 Rezultati simulacije nadgrajenega modela na aktivni napravi **servicingGateway2**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.RazglednaTockaBP.streznikBP	streznCas:max	0,013261280663 s
Network.RazglednaTockaBP.streznikBP	streznCas:mean	0,00036553009679927 s
Network.RazglednaTockaBP.streznikBP	streznCas:min	0,0 s
Network.RazglednaTockaBP.streznikBP	streznCas:count	1.619.867
Network.RazglednaTockaBP.port\$o.channel	utilization:last	0,23333778528589
Network.RazglednaTockaBP.vrsta	dolzinaVrste:max	9
Network.RazglednaTockaBP.vrsta	dolzinaVrste:mean	1,0900086241648
Network.RazglednaTockaBP.vrsta	prejeteZahteve:count	1.619.867
Network.RazglednaTockaBP.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela B.4 Rezultati simulacije nadgrajenega modela na bazni postaji **RazglednaTockaBP**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.RibcevLazBP.streznikBP	streznCas:max	0,0045099048 s
Network.RibcevLazBP.streznikBP	streznCas:mean	1,233183678276 s
Network.RibcevLazBP.streznikBP	streznCas:min	0,0 s
Network.RibcevLazBP.streznikBP	streznCas:count	6.106.505
Network.RibcevLazBP.port\$o.channel	utilization:last	0,2589270641848
Network.RibcevLazBP.vrsta	dolzinaVrste:max	11
Network.RibcevLazBP.vrsta	dolzinaVrste:mean	1,1148478548695
Network.RibcevLazBP.vrsta	prejeteZahteve:count	6.106.505
Network.RibcevLazBP.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela B.5 Rezultati simulacije nadgrajenega modela na bazni postaji **RibcevLazBP**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.SkiHotelVogelBP.streznikBP	streznCas:max	0,00520211731 s
Network.SkiHotelVogelBP.streznikBP	streznCas:mean	0,00014335982273055 s
Network.SkiHotelVogelBP.streznikBP	streznCas:min	0,0 s
Network.SkiHotelVogelBP.streznikBP	streznCas:count	4.868.695
Network.SkiHotelVogelBP.port\$o.channel	utilization:last	0,25067613173523
Network.SkiHotelVogelBP.vrsta	dolzinaVrste:max	10
Network.SkiHotelVogelBP.vrsta	dolzinaVrste:mean	1,106184922243
Network.SkiHotelVogelBP.vrsta	prejeteZahteve:count	4.868.695
Network.SkiHotelVogelBP.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela B.6 Rezultati simulacije nadgrajenega modela na bazni postaji **SkiHotelVogelBP**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.UkancBP.streznikBP	streznCas:max	0,054933633405 s
Network.UkancBP.streznikBP	streznCas:mean	0,0019730960044508 s
Network.UkancBP.streznikBP	streznCas:min	0,0 s
Network.UkancBP.streznikBP	streznCas:count	342.883
Network.UkancBP.port\$o.channel	utilization:last	0,24733576627294
Network.UkancBP.vrsta	dolzinaVrste:max	8
Network.UkancBP.vrsta	dolzinaVrste:mean	1,1035134433611
Network.UkancBP.vrsta	prejeteZahteve:count	342.883
Network.UkancBP.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela B.7 Rezultati simulacije nadgrajenega modela na bazni postaji **UkancBP**.

C Priloga C

C.1 Rezultati simulacije optimiziranega modela

Modul	Meritev	Vrednost
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:max	0,78 s
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:mean	0,72308266275579 s
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:min	0,00008306037 s
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:count	13.845.617
Network.pdnGateway.vrsta	dolzinaVrste:max	3.000
Network.pdnGateway.vrsta	dolzinaVrste:mean	2.781,1628758267
Network.pdnGateway.vrsta	prejeteZahteve:count	13.953.168
Network.pdnGateway.vrsta	izgubljeneZahteve:count	104.698

Tabela C.1 Rezultati simulacije optimiziranega modela na aktivni napravi **pdnGateway**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.servingGateway1.aNusmerjanje	strezniCas:max	0,81744 s
Network.servingGateway1.aNusmerjanje	strezniCas:mean	0,27182428666032 s
Network.servingGateway1.aNusmerjanje	strezniCas:min	0,00052 s
Network.servingGateway1.aNusmerjanje	strezniCas:count	6.917.927
Network.servingGateway1.port\$0[1].channel	utilization:last	0,99997651581253
Network.servingGateway1.port\$0[2].channel	utilization:last	0,97886833765391
Network.servingGateway1.vrsta	dolzinaVrste:max	1.571
Network.servingGateway1.vrsta	dolzinaVrste:mean	522,06427553774
Network.servingGateway1.vrsta	prejeteZahteve:count	6.918.573
Network.servingGateway1.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela C.2 Rezultati simulacije optimiziranega modela na aktivni napravi **servicingGateway1**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:max	1,560519306301 s
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:mean	1,2983425821908 s
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:min	0,00052 s
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:count	6.922.760
Network.servingGateway2.port\$0[1].channel	utilization:last	0,91836291933262
Network.servingGateway2.port\$0[2].channel	utilization:last	0,98681587963331
Network.servingGateway2.vrsta	dolzinaVrste:max	3.000
Network.servingGateway2.vrsta	dolzinaVrste:mean	2.496,4323288436
Network.servingGateway2.vrsta	prejeteZahteve:count	6.935.114
Network.servingGateway2.vrsta	izgubljeneZahteve:count	9.608

Tabela C.3 Rezultati simulacije optimiziranega modela na aktivni napravi **servicingGateway2**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.RazglednaTockaBP.streznikBP	streznCas:max	0,013726872221 s
Network.RazglednaTockaBP.streznikBP	streznCas:mean	0,0003653937025667
Network.RazglednaTockaBP.streznikBP	streznCas:min	0,0 s
Network.RazglednaTockaBP.streznikBP	streznCas:count	1.727.547
Network.RazglednaTockaBP.port\$o.channel	utilization:last	0,23333778528589
Network.RazglednaTockaBP.vrsta	dolzinaVrste:max	9
Network.RazglednaTockaBP.vrsta	dolzinaVrste:mean	1,0911934668058
Network.RazglednaTockaBP.vrsta	prejeteZahteve:count	1.727.547
Network.RazglednaTockaBP.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela C.4 Rezultati simulacije optimiziranega modela na bazni postaji **RazglednaTockaBP**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.RibcevLazBP.streznikBP	streznCas:max	0,004880029779 s
Network.RibcevLazBP.streznikBP	streznCas:mean	0,00012338956826164 s
Network.RibcevLazBP.streznikBP	streznCas:min	0,0 s
Network.RibcevLazBP.streznikBP	streznCas:count	6.420.403
Network.RibcevLazBP.port\$o.channel	utilization:last	0,2589270641848
Network.RibcevLazBP.vrsta	dolzinaVrste:max	11
Network.RibcevLazBP.vrsta	dolzinaVrste:mean	1,1173046302545
Network.RibcevLazBP.vrsta	prejeteZahteve:count	6.420.403
Network.RibcevLazBP.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela C.5 Rezultati simulacije optimiziranega modela na bazni postaji **RibcevLazBP**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.SkiHotelVogelBP.streznikBP	streznCas:max	0,005441594998 s
Network.SkiHotelVogelBP.streznikBP	streznCas:mean	0,00014332958930546 s
Network.SkiHotelVogelBP.streznikBP	streznCas:min	0,0 s
Network.SkiHotelVogelBP.streznikBP	streznCas:count	5.197.462
Network.SkiHotelVogelBP.port\$o.channel	utilization:last	0,25067613173523
Network.SkiHotelVogelBP.vrsta	dolzinaVrste:max	10
Network.SkiHotelVogelBP.vrsta	dolzinaVrste:mean	1,1085039197978
Network.SkiHotelVogelBP.vrsta	prejeteZahteve:count	5.197.462
Network.SkiHotelVogelBP.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela C.6 Rezultati simulacije optimiziranega modela na bazni postaji **SkiHotelVogelBP**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.UkancBP.streznikBP	streznCas:max	0,062075979391 s
Network.UkancBP.streznikBP	streznCas:mean	0,001969270188965 s
Network.UkancBP.streznikBP	streznCas:min	0,0 s
Network.UkancBP.streznikBP	streznCas:count	367.859
Network.UkancBP.port\$o.channel	utilization:last	0,24733576627294
Network.UkancBP.vrsta	dolzinaVrste:max	9
Network.UkancBP.vrsta	dolzinaVrste:mean	1,1049831593083
Network.UkancBP.vrsta	prejeteZahteve:count	367.859
Network.UkancBP.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela C.7 Rezultati simulacije optimiziranega modela na bazni postaji **UkancBP**.

D Priloga D

D.1 Rezultati simulacije dodatne optimizacije optimiziranega modela

Modul	Meritev	Vrednost
Network.internet.generator	casVomrezju:max	1,628149966388 s
Network.internet.generator	casVomrezju:min	0,001131326103 s
Network.internet.generator	casVomrezju:mean	0,72925637421397 s
Network.internet.generator	casVomrezju:count	2.792.315

Tabela D.1 Rezultati simulacije dodatne optimizacije modela na modulu **internet**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.SkiHotelVogelBP.generator	rtt:max	0,534435823002 s
Network.SkiHotelVogelBP.generator	rtt:mean	0,077497251612716 s
Network.SkiHotelVogelBP.generator	rtt:min	0,002750252792 s
Network.SkiHotelVogelBP.generator	rtt:count	4.211.344
Network.UkancBP.generator	rtt:max	4,036336722338 s
Network.UkancBP.generator	rtt:mean	2,9743492794048 s
Network.UkancBP.generator	rtt:min	0,022376010136 s
Network.UkancBP.generator	rtt:count	294.354
Network.RazglednaTockaBP.generator	rtt:max	1,044767594124 s
Network.RazglednaTockaBP.generator	rtt:mean	0,13972583583528 s
Network.RazglednaTockaBP.generator	rtt:min	0,006070486439 s
Network.RazglednaTockaBP.generator	rtt:count	1.400.007
Network.RibcevLazBP.generator	rtt:max	3,230141385923 s
Network.RibcevLazBP.generator	rtt:mean	2,8550402831815 s
Network.RibcevLazBP.generator	rtt:min	0,002501326103 s
Network.RibcevLazBP.generator	rtt:count	5.238.888

Tabela D.2 Meritve RTT zahtev na baznih postajah.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:max	0,09025 s
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:mean	0,010585942172448 s
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:min	0,00000003941 s
Network.pdnGateway.aNstreznik	strezniCas:count	13.961.575
Network.pdnGateway.vrsta	dolzinaVrste:max	361
Network.pdnGateway.vrsta	dolzinaVrste:mean	42,410026304339
Network.pdnGateway.vrsta	prejeteZahteve:count	13.961.575
Network.pdnGateway.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela D.3 Rezultati simulacije dodatne optimizacije modela na aktivni napravi **pdnGateway**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.servingGateway1.aNusmerjanje	strezniCas:max	1,56052 s
Network.servingGateway1.aNusmerjanje	strezniCas:mean	1,4164707650734 s
Network.servingGateway1.aNusmerjanje	strezniCas:min	0,00052 s
Network.servingGateway1.aNusmerjanje	strezniCas:count	6.922.719
Network.servingGateway1.port\$o[1].channel	utilization:last	0,87314807080874
Network.servingGateway1.port\$o[2].channel	utilization:last	0,81765556864835
Network.servingGateway1.vrsta	dolzinaVrste:max	3.000
Network.servingGateway1.vrsta	dolzinaVrste:mean	2723,5616399568
Network.servingGateway1.vrsta	prejeteZahteve:count	6.952.626
Network.servingGateway1.vrsta	izgubljeneZahteve:count	27.029

Tabela D.4 Rezultati simulacije dodatne optimizacije modela na aktivni napravi **servicingGateway1**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:max	0,2615 s
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:mean	0,026072941976401 s
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:min	0,0005 s
Network.servingGateway2.aNusmerjanje	strezniCas:count	7.014.200
Network.servingGateway2.port\$o[1].channel	utilization:last	0,93333844345901
Network.servingGateway2.port\$o[2].channel	utilization:last	0,8773639170476
Network.servingGateway2.vrsta	dolzinaVrste:max	522
Network.servingGateway2.vrsta	dolzinaVrste:mean	51,529190214137
Network.servingGateway2.vrsta	prejeteZahteve:count	7.014.200
Network.servingGateway2.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela D.5 Rezultati simulacije dodatne optimizacije modela na aktivni napravi **servicingGateway2**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.RazglednaTockaBP.generator	casVomrezjus:max	0,79125 s
Network.RazglednaTockaBP.generator	casVomrezjus:mean	0,1009583526154 s
Network.RazglednaTockaBP.generator	casVomrezjus:min	0,00315 s
Network.RazglednaTockaBP.generator	casVomrezjus:count	1.400.007
Network.RazglednaTockaBP.streznikBP	streznCas:max	0,013103307406 s
Network.RazglednaTockaBP.streznikBP	streznCas:mean	0,0003655176171771 s
Network.RazglednaTockaBP.streznikBP	streznCas:min	0,0 s
Network.RazglednaTockaBP.streznikBP	streznCas:count	1.750.011
Network.RazglednaTockaBP.port\$o.channel	utilization:last	0,23333778528589
Network.RazglednaTockaBP.vrsta	dolzinaVrste:max	9
Network.RazglednaTockaBP.vrsta	dolzinaVrste:mean	1,0918959937966
Network.RazglednaTockaBP.vrsta	prejeteZahteve:count	1.750.011
Network.RazglednaTockaBP.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela D.6 Rezultati simulacije dodatne optimizacije modela na bazni postaji **RazglednaTockaBP**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.RibcevLazBP.generator	casVomrezjus:max	1,635183282897 s
Network.RibcevLazBP.generator	casVomrezjus:mean	1,4283037344641 s
Network.RibcevLazBP.generator	casVomrezjus:min	0.00137 s
Network.RibcevLazBP.generator	casVomrezjus:count	5.238.888
Network.RibcevLazBP.streznikBP	streznCas:max	0,003472929097 s
Network.RibcevLazBP.streznikBP	streznCas:mean	0,000084757799753036 s
Network.RibcevLazBP.streznikBP	streznCas:min	0,0 s
Network.RibcevLazBP.streznikBP	streznCas:count	6.559.414
Network.RibcevLazBP.port\$o.channel	utilization:last	0,22008801100665
Network.RibcevLazBP.vrsta	dolzinaVrste:max	10
Network.RibcevLazBP.vrsta	dolzinaVrste:mean	1,0783742267221
Network.RibcevLazBP.vrsta	prejeteZahteve:count	6.559.414
Network.RibcevLazBP.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0,0

Tabela D.7 Rezultati simulacije dodatne optimizacije modela na bazni postaji **RibcevLazBP**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.SkiHotelVogelBP.generator	casVomrezjus:max	0,29575 s
Network.SkiHotelVogelBP.generator	casVomrezjus:mean	0,040654433466258 s
Network.SkiHotelVogelBP.generator	casVomrezjus:min	0,0015 s
Network.SkiHotelVogelBP.generator	casVomrezjus:count	4.211.344
Network.SkiHotelVogelBP.streznikBP	streznCas:max	0,00496715841 s
Network.SkiHotelVogelBP.streznikBP	streznCas:mean	0,00010530954629014 s
Network.SkiHotelVogelBP.streznikBP	streznCas:min	0,0 s
Network.SkiHotelVogelBP.streznikBP	streznCas:count	5.264.180
Network.SkiHotelVogelBP.port\$o.channel	utilization:last	0,21934162184175
Network.SkiHotelVogelBP.vrsta	dolzinaVrste:max	9
Network.SkiHotelVogelBP.vrsta	dolzinaVrste:mean	1,0787550957604
Network.SkiHotelVogelBP.vrsta	prejeteZahteve:count	5.264.180
Network.SkiHotelVogelBP.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela D.8 Rezultati simulacije dodatne optimizacije modela na bazni postaji **SkiHotelVogelBP**.

Modul	Meritev	Vrednost
Network.UkancBP.generator	casVomrezjus:max	2,52166 s
Network.UkancBP.generator	casVomrezjus:mean	1,5356093116548 s
Network.UkancBP.generator	casVomrezjus:min	0,01102 s
Network.UkancBP.generator	casVomrezjus:count	294.354
Network.UkancBP.streznikBP	streznCas:max	0,043297589594 s
Network.UkancBP.streznikBP	streznCas:mean	0,0012981058952393 s
Network.UkancBP.streznikBP	streznCas:min	0,0 s
Network.UkancBP.streznikBP	streznCas:count	368.554
Network.UkancBP.port\$o.channel	utilization:last	0,20611325306953
Network.UkancBP.vrsta	dolzinaVrste:max	7
Network.UkancBP.vrsta	dolzinaVrste:mean	1,0688989944486
Network.UkancBP.vrsta	prejeteZahteve:count	368.554
Network.UkancBP.vrsta	izgubljeneZahteve:count	0

Tabela D.9 Rezultati simulacije dodatne optimizacije modela na bazni postaji **UkancBP**.