



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Mykolas Vosylius

**Didelės spartos mobiliojo ryšio tinklo projektas geležinkelio linijoje
Vilnius - Kaunas**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Vitas Grimaila

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
TELEKOMUNIKACIJŲ KATEDRA

**Didelės spartos mobiliojo ryšio tinklo projektas geležinkelio linijoje
Vilnius - Kaunas**

Baigiamasis magistro projektas
Telekomunikacijų sistemos (kodas 621H64002)

Vadovas

Doc. dr. Vitas Grimaila

Recenzentas

Doc. dr. Saulius Japertas

Projektą atliko

Stud. Mykolas Vosylius

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos

(Fakultetas)

Mykolas Vosylius

(Studento vardas, pavardė)

Telekomunikacijų sistemos, 621H64002

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Pavadinimas“
AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 16 m. sausio 6 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Mykolo Vosylius** baigiamasis projektas tema „Didelės spartos mobiliojo ryšio tinklo projektas geležinkelio linijoje Vilnius - Kaunas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesažiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Vosylius, M. Didelės spartos mobiliojo ryšio tinklo projektas geležinkelio linijoje Vilnius - Kaunas. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Vitas Grimaila; Kauno technologijos universitetas, elektros ir elektronikos fakultetas, Telekomunikacijų katedra.

Kaunas, 2016. 48 psl.

SANTRAUKA

Šiame magistro baigiamajame darbe projektuojamas didelės spartos mobiliojo ryšio tinklas geležinkelio linijoje Vilnius – Kaunas. Projektui įgyvendinti pasirinkta LTE technologija, duomenų pernašos tinklui naudojamas optinis geležinkelių tinklas. Pirmoje darbo dalyje aptariamas šio projekto aktualumas, analizuojama esamo GSM-R tinklo infrastruktūra, jos panaudojimo galimybės naujam tinklui. Taip pat analizuojami panašūs projektai, įdiegti geležinkelių linijose kitose šalyse.

Antroje darbo dalyje analizuojamos galimos panaudoti mobiliojo ryšio bei belaidės vartotojų prieigos technologijos, kuriomis gali būti užtikrinama aukšta tinklo sparta, taip pat aprašomi tinklo spartos didinimo būdai. Trečioje dalyje analizuojamas anksčiau aptartų technologijų suderinamumas su senesnių kartų tinklais, galimybės tinklą pritaikyti paslaugoms, kurios yra būtinos geležinkelių darbui. Taip pat sudaromas tinklo projektavimo planas.

Projektinėje darbo dalyje kuriamas LTE mobilaus ryšio technologijos tinklas, parenkama jo įranga, atliekami tinklo spartos poreikio skaičiavimai. Pasinaudojant *Cellular Expert* programine įranga įvertinama tinklo aprėptis, pasiekiami aukštynkrypčio ir žemynkrypčio ryšio sparta bei ryšio pateikiamumas įvairiais tinklo konfigūracijos atvejais. Prieigos taškų pastatymo vieta parenkama atliekant modeliavimą su *Aerohive* programine įranga. Darbas užbaigiamas atliekant ekonominius projekto vertinimus – skaičiuojami tinklo diegimo kaštai, prognozuojamos iš paslaugų pardavimo gaunamos pajamos, įvertinamas projekto atsipirkimo laikas.

Reikšminiai žodžiai : LTE, GSM-R, geležinkeliai, Cellular Expert.

Vosylius Mykolas. High Speed Mobile Network Project in Railway Line Vilnius - Kaunas. Final project of Master's degree / supervisor doc. dr. Vitas Grimaila; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Telecommunications

Kaunas, 2016. 48 psl.

SUMMARY

In this master's thesis a high speed mobile railway network in railway line Vilnius - Kaunas is being designed. For the mobile network LTE technology is being used, data transmission is being done through existing optical networks. In the first part, the project's relevancy, existing GSM-R network infrastructure and similar objects used in foreign railways are being analysed.

In the second part high speed mobile network and Wi-Fi access technologies are being evaluated, network throughput maximisation methods are reviewed. In the third part LTE network compatibility with GSM networks and options to ensure compatibility are being analysed. This part concludes with a network designing plan.

In the project part a LTE mobile network is designed, required hardware is chosen and network throughput requirements are being calculated. Using *Cellular Expert* software, network coverage, coverage probability, uplink and downlink data rates are being calculated with different network parameters and configurations. Access point location is calculated by using *Aerohive* software. The work is concluded with an economical evaluation – network installation costs, project's income and payback time are being counted.

Keywords : LTE, GSM-R, Railway, Cellular Expert.

TURINYS

| | |
|---|----|
| Įvadas | 8 |
| 1. Užduoties analizė..... | 9 |
| 1.1. Esamos situacijos analizė, poreikiai ir reikalavimai..... | 10 |
| 1.2. Geležinkelyje įdiegtų mobiliojo ryšio technologijų ir esamos infrastruktūros analizė | 11 |
| 1.3. Perdavimo tinklo analizė | 13 |
| 1.4. Darbų, susijusių su nagrinėjama tema, analizė | 13 |
| 2. Prieigos tinklo technologijų analizė | 14 |
| 2.1. Wi-Fi naujausių technologinių sprendimų analizė | 14 |
| 2.2. Didelės perdavimo spartos mobiliojo ryšio technologijų analizė..... | 16 |
| 2.2.1. WiMAX | 16 |
| 2.2.2. LTE | 16 |
| 2.3. LTE tinklo talpos didinimo būdai..... | 18 |
| 3. Techninių sprendimų bei tinklo projektavimo analizė | 18 |
| 3.1. Techninių sprendimų analizė | 18 |
| 3.2. Tinklo projektavimo etapai..... | 20 |
| 4. Mobilaus ryšio tinklo modeliavimas bei įrangos parinkimas..... | 21 |
| 4.1. Įrangos parinkimas..... | 22 |
| 4.2. Įrangos konfigūracijos sudarymas | 26 |
| 4.3. Vartotojų sukuriami srautai | 28 |
| 4.4. Galios biudžeto skaičiavimas..... | 29 |
| 4.5. Tinklo modeliavimas | 31 |
| 4.6. Radijo įrangos dislokacijos vietos geležinkelio vagonė parinkimas | 39 |
| 5. Ekonominis projekto vertinimas..... | 40 |
| 5.1. Tinklo diegimo kaštų skaičiavimas..... | 40 |
| 5.2. Projekto generuojamos pajamos | 41 |
| 5.3. Projekto atsiperkamumo įvertinimas | 43 |
| 5.4. Projekto rizikos ir kokybės valdymas | 44 |
| Išvados | 46 |
| Literatūros sąrašas | 47 |

Santrumpų sąrašas

| | |
|---------|---|
| MPEG | Judančių paveikslėlių ekspertų grupė (angl. <i>Moving Pictures Experts</i>) |
| TDM | Laikinis sutankinimas (angl. <i>Time Division Multiplexing</i>) |
| VoIP | Balsas per IP (angl. <i>Voice over IP</i>) |
| QoS | Paslaugų kokybė (angl. <i>Quality of Service</i>) |
| QPSK | Kvadratūrinė fazės poslinkio moduliacija (angl. <i>Quadrature Phase Shift Keying</i>) |
| RRT | Lietuvos Respublikos Ryšių reguliavimo tarnyba (angl. <i>Communications Regulatory Authority of the Republic of Lithuania</i>) |
| TDM | Laikinis sutankinimas (angl. <i>Time Division Multiplexing</i>) |
| WiMAX | Pasaulinė mikrobangės priegos tarpusavio sąveika (angl. <i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>) |
| SDH | Sinchroninė skaitmeninė hierarchija (angl. <i>Synchronous Digital Hierarchy</i>) |
| QAM | Kvadratūrinė amplitudinė moduliacija (angl. <i>Quadrature Amplitude Modulation</i>) |
| OFDM | Ortogonalinių dažnių sutankinimas (angl. <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>) |
| MIMO | Keletas įėjimų ir keletas išėjimų (angl. <i>Multiple Input Multiple Output</i>) |
| IPTV | Internetinio protokolo televizija (angl. <i>Internet Protocol television</i>) |
| Wi-Fi | Vietinio belaidžio tinklo standartas (angl. <i>Wireless Fidelity</i>) |
| GSM | Globalus mobiliųjų telefonų standartas (angl. <i>Global Standart for Mobile Communications</i>) |
| LTE | Ilgo evoliucionavimo mobilaus ryšio standartas (angl. <i>Long Term Evolution</i>) |
| EDGE | Praplėstas GSM duomenų perdavimas (angl. <i>Enhanced Data rates for GSM Evolution</i>) |
| UTP | Neekranuotas pintų porų kabelis (angl. <i>Unshielded Twisted Pair</i>) |
| 3G | Trečios kartos mobilusis tinklas (angl. <i>3rd Generation</i>) |
| VoWi-Fi | Balso paslaugos per Wi-Fi tinklą (angl. <i>Voice over Wi-Fi</i>) |
| IEEE | Elektros ir elektronikos inžinierių institutas (angl. <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>) |

Ivadas

Internetas jau tapo neatsiejama kiekvieno žmogaus dienos dalimi, todėl, didėjant vartotojų poreikiams, didėja ir būtinybė mobiliųjų tinklų operatoriams didinti tinklų spartas. Esami tinklai ne visada sugeba susidoroti su jiems keliamomis užduotimis – padidėjęs pralaidumo poreikis reiškia, kad tinklai turi būti modernizuojami panaudojant naujausias technologijas. Ne išimtis ir mobilus geležinkelių tinklas, kuris šiuo metu naudoja GSM-R technologiją. Jis atitinka keliamus reikalavimus, leidžia atlikti traukinių eismui būtinas operacijas, tačiau, nors ir yra įdiegtas neseniai, negali užtikrinti reikiamo pralaidumo didesnės spartos reikalaujančioms užduotims atlikti.

Įprastiems mobiliojo ryšio operatoriams investuoti į tinklus, kurie padengtų geležinkelio linijas, ekonomiškai neapsimoka dėl per mažos vartotojų koncentracijos šiuose ruožuose. Dėl šio faktoriaus dažname geležinkelio ruože nėra galimybės naudotis ketvirtosios kartos mobiliojo ryšio tinklais, negana to, dažnai traukiniuose iš viso nėra mobilaus ryšio. Dėl išrankių vartotojų, kurie nori turėti galimybę komunikuoti su kitais žmonėmis, naudotis internetu bei atlikti kasdienes užduotis kelionės metu, sumažėja pervežamų keleivių srautai, kas lemia ir mažesnę pelną iš keleivių pervežimo paslaugų. Vienintelis būdas užtikrinti vartotojams kokybiško ryšio paslaugas – sukurti naujos kartos tinklą, kuris būtų pajėgus užtikrinti reikiamas spartas. Naujasis mobilaus ryšio tinklas taip pat gali padėti sumažinti bendrovės patiriamas išlaidas dėl pervežamų krovinių saugumo užtikrinimo bei padidinti keleivių ir jų bagažo saugumą.

Nors nuo GSM-R tinklo įdiegimo Lietuvoje praėjo tik 5 metai, telekomunikacijų pasaulyje įvyko daug pasikeitimų – mobiliųjų tinklų spartos dėl naujų technologijų ženkliai išaugo, naudojama įranga gerokai atpigė. Ypatingai daug pasikeitimų į mobiliųjų tinklų rinką įnešė 2009 metais aprašytos ketvirtosios kartos mobilaus ryšio technologijos LTE ir WiMAX, todėl projektuodami šį tinklą įvertinsime abi technologijas. Darbe analizuosime naujausius mobilaus ryšio tinklo įrenginių gamintojų sprendimus, naujas technologijas bei jų panaudojimo būtinybę šiam projektui įgyvendinti. Kadangi kitose šalyse jau yra įdiegtų bei naudojamų ketvirtos kartos mobilaus ryšio tinklų, juos analizuosime bei įvertinsime jų naudingumą geležinkelių sistemai.

Šiame darbe analizuosime naujo tinklo geležinkelio linijoje Vilnius – Kaunas kūrimo galimybes, panaudojant esamo GSM-R tinklo infrastruktūrą. Tinklui projektuoti bei analizuoti naudojama *Cellular Expert* programinė įranga. Mobilaus tinklo duomenų srautų perdavimui naudojamas geležinkelių optinis tinklas. Taip pat įvertinsime kaštus, reikalingus šiam projektui įgyvendinti, skaičiuosime projekto generuojamas pajamas bei atsiperkamumą. Šio darbo **tikslas** – suprojektuoti geležinkelių reikalavimus atitinkantį didelės spartos mobilaus ryšio tinklą.

1. Užduoties analizė

Geležinkeliuose telekomunikacijų tinklai yra ypač svarbūs - be jų negali būti atlikta jokia su traukinių eismu susijusi operacija, todėl be aibės laidinių ryšių čia yra įdiegta ir belaidžio ryšio sistema. Kadangi šis tinklas yra gyvybiškai svarbus vykdant kasdienines geležinkelio operacijas, jis turi veikti nuolat – net ir nedidelės trukmės ryšio pertraukimas gali lemti didelę avariją. Taigi geležinkelio tinklo vienas svarbiausių veiksnių yra saugumas – šis tinklas turi būti apsaugotas nuo atakų, taip pat visose darbo zonose turi būti užtikrinamas reikalingas signalo lygis. Jeigu ryšys tarp traukinių ir traukinių dispečerio dingsta, yra reikalaujama, kad visi traukiniai nedelsiant sustotų. Dėl tokios didelės svarbos yra reikalaujama, jog tinklas veiktų 99,985% viso laiko [2].

Nors su šiais uždaviniais esamas GSM-R tinklas susidoroja, duomenų perdavimo poreikio jis patenkinti negali dėl ypač mažos greitaveikos, kuri idealiomis sąlygomis siekia tik 236 kbit/s. Taigi, padidinus tinklo greitaveiką atsirastų galimybė atlikti daugiau ir įvairesnių matavimų bei stebėjimų, duomenis apie juos teikti mažesniais intervalais, kas padidintų eismo saugumą. Be to, atsirastų tokių galimybių kaip tiesioginis vaizdo stebėjimas IP kameromis, kas taip pat padidintų eismo, krovinių bei keleivių saugumą. Taip pat atsirastų galimybė keleiviams teikti papildomas paslaugas, tokias kaip Wi-Fi belaidės prieigos taškai ar IPTV transliacijos keleiviniuose vagonuose. Kadangi dažnai mobiliojo ryšio operatorių tinklai neaprepia geležinkelių linijų (jiems tai finansiškai neefektyvu dėl per mažos vartotojų koncentracijos), tai turėtų būti patrauklios paslaugos vartotojams, kurios galėtų padidinti pervežamų keleivių srautus. Šias paslaugas taip pat galima apmokestinti, taip būtų nors iš dalies padengiamos mobilaus ryšio tinklo aptarnavimo išlaidos.

Šiame darbe analizuojama esama GSM-R tinklo situacija geležinkelio linijoje Vilnius - Kaunas, tinklo modernizavimo galimybės panaudojant esamą infrastruktūrą, analizuojami standartai, reglamentuojantys galimus tinklo modernizavimo variantus bei aprašantys reikalavimus šiam tinklui. Prieš pradėdant projektuoti tinklą išigilinama į esamus GSM-R ryšio trūkumus ir ieškoma technologijų, kurios šių trūkumų neturėtų ir tuo pačiu metu būtų pakankamai pigios įdiegti ir eksploatuoti. Atlikus tinklo projektavimą, vertinami ekonominiai projekto faktoriai – tinklo įdiegimo ir eksploatacijos kaštai, generuojamos pajamos, projekto atsipirkimo laikas, analizuojami projekto rizikos ir kokybės valdymo scenarijai.

1.1. Esamos situacijos analizė, poreikiai ir reikalavimai

Šiuo metu Lietuvos geležinkeliai naudoja GSM-R ryšio tinklą, kurio technologija dar praėjusio tūkstantmečio pabaigoje buvo standartizuota grupės gamintojų tam, kad geležinkelius būtų galima perkelti į skaitmeninį amžių, tuo pačiu sukuriant universalų standartą geležinkelių komunikavimui. Šis standartas netrukus paplito visame pasaulyje ir šiuo metu yra labai plačiai naudojamas. GSM-R yra privatus, nekomercinis tinklas, kuris nėra prieinamas plačiajai visuomenei. Palyginus su įprastu GSM, jis turi daugiau funkcionalumo, kuris pritaikytas būtent geležinkeliams. Taip pat šiam tinklui priskiriamos šios papildomos funkcijos [1]:

- Pavojaus pranešimų perdavimas bet kuriuo metu (net ir esant užimtam radijo ryšio kanalui);
- Traukinių stabdymas radijo ryšio priemonių pagalba;
- Operatyvus duomenų perdavimas apie eismo sąlygas geležinkelio ruožuose į važiuojančio lokomotyvo kabiną;
- Traukinių diagnostikos duomenų perdavimas iš važiuojančių traukinių;
- Kitos balsinio ir duomenų perdavimo radijo ryšiu paslaugos.

Šiuo metu AB „Lietuvos geležinkeliai“ naudojamiems GSM-R ryšio tinklams ryšių reguliavimo tarnyba (RRT) yra išskyrusi du dažnių ruožus – 876-880 MHz aukštykrypčiam ir 921-925 MHz žemynkrypčiam ryšiui [6]. Šie dažniai yra standartizuoti ir naudojami geležinkelio ryšiams ne tik visoje Europoje, tačiau ir didžiojoje dalyje likusio pasaulio. Kai kuriose šalyse (ypatingai kur didelis traukinių judėjimas) naudojami papildomi kanalai, pvz. Vokietijoje šie tinklai praplėsti papildomais kanalais, kurie yra 873-876 MHz ir 918-921 MHz ruožuose [1]. Standartinė GSM-R tinklo juosta, priskirta vienos krypties ryšiui yra 4 MHz pločio. Joje maksimaliai gali tilpti 20x200 kHz kanalų.

Nors iš esmės GSM-R nuo GSM skiriasi tik naudojamais dažniais, radijo ryšio projektuotojui geležinkelio tinklas yra visiškai skirtinga užduotis. Visų pirma, projektuojant įprastus mobiliojo ryšio tinklus stengiamasi aprėpti kuo didesnę teritoriją, o projektuojant geležinkeliui pritaikytus tinklus didelės aprėpties nereikia – svarbus tik siauros, ilgos juostos, kuria eina geležinkelio linija, padengimas. Užuo naudojus dvi ilgio ir pločio dimensijas, projektuojant naudojama tik viena – ilgis. Taip pat geležinkelio tinklai nuo įprastų išsiskiria griežtais QoS reikalavimais – kokybiškas ryšys turi būti užtikrintas visada, negali būtų jokių trikdžių, nes tai gali sukelti avarines situacijas.

Kadangi geležinkelių transporto ryšys yra ypatingai svarbus, o mobiliojo ryšio operatorių naudojami dažniai yra visai greta GSM-R dažnių, stengiamasi vengti statyti bazines stotis zonose, kur galimas GSM-R ir mobiliojo ryšio operatorių naudojamų dažnių persidengimas.

GSM-R tinklo modernizaciją dėl didelės šio tinklo svarbos rekomenduojama atlikti keliais etapais [3]:

1. Alternatyvios technologijos tinklą naudoti įprastoms, o GSM-R kritinėms paslaugoms;
2. Alternatyvios technologijos tinklą naudoti visoms paslaugoms, GSM-R – rezervinis tinklas;
3. Modernizuotą tinklą naudoti viskam – įprastoms bei kritinėms paslaugoms.

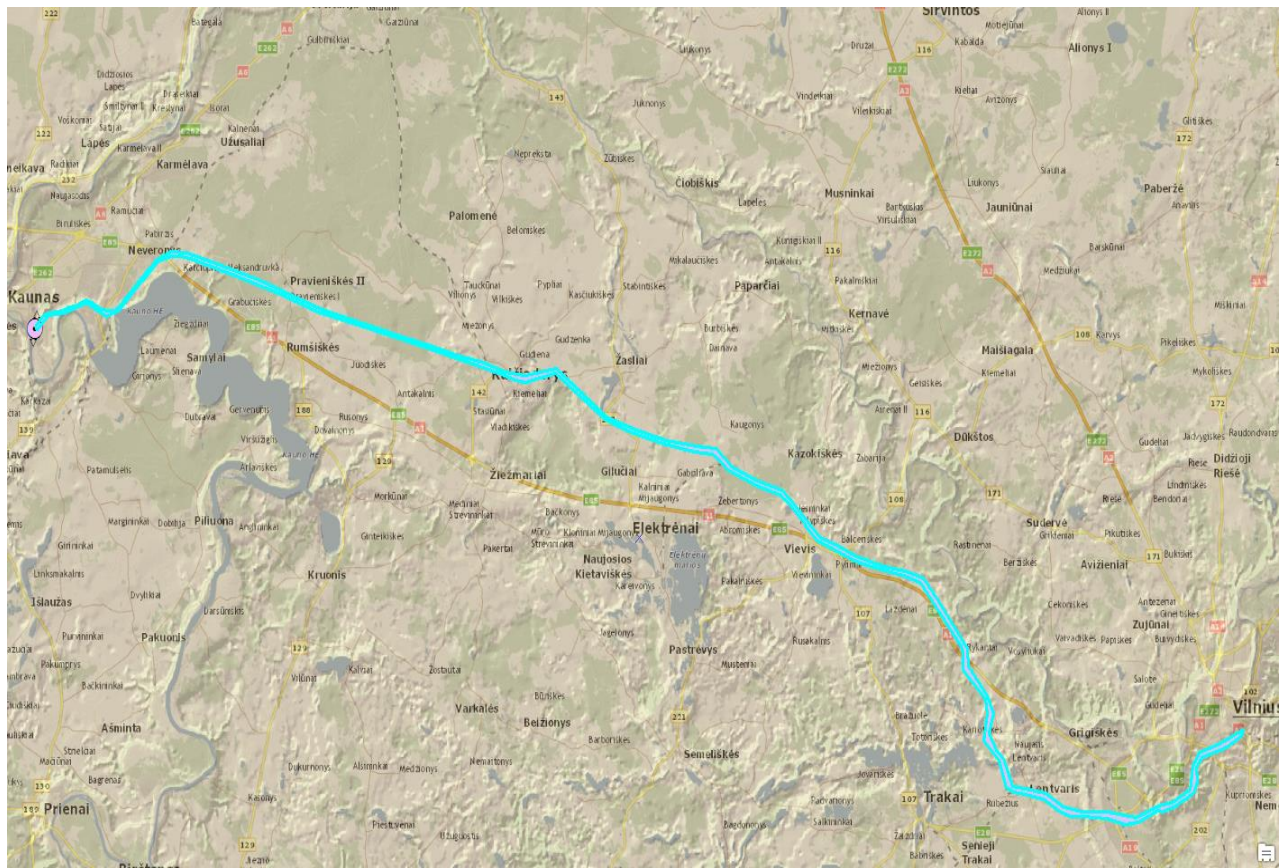
Šiame darbe analizuosime situaciją, kai alternatyvios technologijos tinklas naudojamas paslaugoms, kurioms teikti reikalingas didelis pralaidumas, o senasis GSM-R tinklas naudojamas kritinės svarbos paslaugoms, susijusioms su traukinių eismu.

1.2. Geležinkelyje įdiegtų mobiliojo ryšio technologijų ir esamos infrastruktūros analizė

GSM-R ryšio tinklai yra pagrįsti GSM standartu (2G), kuris net ir panaudojant EDGE 10 klasę gali pasiūlyti tik iki 236 kbit/s teorinę spartą [14]. Taigi, GSM-R tinklo spartos nepakanka norint teikti keleiviams duomenų perdavimo paslaugas ar norint įgyvendinti tokius projektus kaip traukinio vagonų stebėjimas vaizdo kameromis realiu laiku. Be to, kai kuriose šalyse GSM-R ryšys tampa elementu, kuris riboja traukinių eismo intensyvumą vietovėse, kuriose ypač didelė traukinių koncentracija, pavyzdžiui, didelėse traukinių stotyse. Modernesnių technologijų (tokių kaip LTE) panaudojimas suteiktų galimybę padidinti pelną teikiant papildomas paslaugas vartotojams tuo pačiu sumažinant aptarnavimo bei remonto išlaidas. Be to, tai padidintų tokį svarbų geležinkelių transporto sistemai tinklų saugumą, taip pat suteiktų naujų galimybių belaidžio ryšio panaudojimui. GSM-R įrangos gamintojai yra įsipareigoję tiekti sudedamąsias sistemos dalis tik iki 2025 metų [3], todėl vis sunkiau bus gauti reikiamos įrangos, kas gali sudaryti problemų eksploatuojant sistemas, kurių darbo pertraukimas yra netoleruotinas. Visi šie veiksniai skatina nelaukti kol bus nutrauktas tinklo įrenginių palaikymas, o pradėti kurti naujos kartos tinklą kuo anksčiau.

GSM-R yra TDMA (paremta laikiniu multipleksavimu) sistema, kur kiekvieno kadro periodas yra 4,615 ms. Kiekvienas TDMA kadrą padalintas į 8 laiko tarpus, per kurių kiekvieną yra pernešama po 148 bitus informacijos. Naudojant EGDE 10 klasę (naudojama Lietuvoje), galima pasiekti 236 kbit/s spartą [11], kuri yra nepakankama norint atlikti sudėtingesnes operacijas ar perduoti vaizdo duomenis. Taigi GSM-R ryšys šiuo atveju tinkamas balso perdavimui, paprastų matavimų stebėjimui ar signalizavimui, tačiau sudėtingesnių sistemų, kurios reikalauja didesnio pralaidumo, veikimas šiuo tinklu yra neįmanomas. Dėl to atsiranda poreikis ieškoti alternatyvų, kurios galėtų pakeisti egzistuojantį tinklą.

Analizuojama atkarpa (matoma Pav. 1.1), apima 11 stočių: Kauną, Palemoną, Pravieniškės, Kaišiadoris, Žaslius, Vievį, Lazdėnus, Lentvarį, Panerius, Vilnių ir Naująją Vilnią.



Pav. 1.1 Analizuojama geležinkelio linija Vilnius - Kaunas

Lentelė 1.1 GSM-R bokštų duomenys

| | Stotis | Bokšto koordinatės | | Aukštis virš jūros lygio, m | Bokšto aukštis, m | Pozicij a linijoje, km | Atstumas tarp bokštų, km |
|----|-----------------------|--------------------|------------|-----------------------------|-------------------|------------------------|--------------------------|
| | | Ilguma | Platuma | | | | |
| 1 | Naujoji Vilnia | 25°24'28"E | 54°41'37"N | 153 | 50 | 0 | - |
| 2 | Vilnius | 25°16'34"E | 54°40'00"N | 141 | 50 | 9,2 | 9,2 |
| 3 | Paneriai | 25°11'12"E | 54°37'59"N | 158 | 40 | 18,2 | 9 |
| 4 | Lentvaris | 25°02'52"E | 54°38'43"N | 152 | 30 | 27,0 | 8,8 |
| 5 | Lazdėnai | 24°58'19"E | 54°43'38"N | 140 | 40 | 38,6 | 11,6 |
| 6 | Vievis | 24°48'45"E | 54°46'45"N | 119 | 40 | 50,5 | 11,9 |
| 7 | Žasliai | 24°35'18"E | 54°50'11"N | 117 | 50 | 66,5 | 16 |
| 8 | Kaišiadorys | 24°26'45"E | 54°51'58"N | 81 | 50 | 75,9 | 9,4 |
| 9 | Pravieniškės | 24°13'14"E | 54°54'06"N | 69 | 50 | 92,0 | 16,1 |
| 10 | Palemonas | 24°03'56"E | 54°55'06"N | 67 | 40 | 104,9 | 12,9 |
| 11 | Kaunas | 23°55'55"E | 54°53'08"N | 35 | 30 | 115,0 | 10,1 |

Iš lentelės 1.1 matyti, jog didžiausias atstumas tarp GSM-R bokštų šioje linijoje yra 16,1 km, todėl renkantis mobiliojo ryšio technologiją būtina atsižvelgti į tai ar ji bus pajėgi užtikrinti kokybišką bei spartų ryšį tokiu atstumu. Įprastiems mobiliojo ryšio tinklams, toks atstumas tarp bokštų būtų per didelis, tačiau įgyvendinant šį projektą svarbu padengti ilgą, tačiau siaurą ruožą,

o ne apimti kuo didesnę teritoriją. Taip pat prie Kauno stoties yra geležinkelio tunelis, į kurį taip pat būtina atsižvelgti projektuojant tinklą.

1.3. Perdavimo tinklo analizė

Bazinėse stotyse sugeneruotas duomenų srautas turi būti perduodamas tinklo branduoliui, per kurį pasiekiami išoriniai tinklai. Tam reikalingas duomenų perdavimo tinklas, kuris užtikrintų reikiamų duomenų srautų perdavimą su minimaliu vėlinimu. Dažnai tam naudojamos radijo relinės sistemos, veikiančios labai aukštais dažniais, tačiau šio projekto tikslas yra maksimaliai išnaudoti esamą infrastruktūrą, taip patiriant mažiausiai išlaidų todėl šiam tikslui panaudosime geležinkelių optines linijas, kurios duomenis perduoda didele sparta bei su mažu vėlinimu.

Kiekvienas GSM-R ryšio bokštas optine linija yra sujungtas į bendrą geležinkelio optinį tinklą. Nuo kiekvieno bokšto iki ryšių aparatinės atvesta po 12 skaidulų optinių kabelių, kurių didžioji dalis yra nepanaudotos, todėl, esant poreikiui, jas galima panaudoti padidėjusiems tinklo srautams paskirstyti. Magistralinis tinklas duomenis perduoda SDH (angl. Synchronous Digital Hierarchy) transportiniu protokolu. Geležinkeliuose magistraliniam optiniam tinklui naudojami *Lucent Wavestar AM1 plus* multiplekseriai, galintys duomenis perduoti STM-4 standartu, kuris užtikrina fiksuotą 622,08 Mb/s spartą. Stotyse sukuriamas duomenų srautas dažniausiai neviršija 100 Mb/s, todėl galima teigti, kad kiekvienoje stotyje neišnaudoto srauto resursas yra apie 0,5 Gb/s. Magistralinis tinklas yra žiedo topologijos, todėl vienoje vietoje nutrūkus linijai ar sugedus tinklo įrangai vienoje stotyje, visas tinklas veikti nenustoja, neveikia tik ta tinklo dalis, kurioje atsirado gedimas (transportinis srautas įrenginius pasiekia kita žiedo puse).

1.4. Darbų, susijusių su nagrinėjama tema, analizė

Kitose šalyse jau yra geležinkelio sistemų, kurios visoms operacijoms atlikti naudoja ne GSM-R, o naujos kartos tinklą. Mobiliojo ryšio tinklo įrangos gamintojas Huawei 2014 metais įdiegė LTE sistemą viename Kinijos geležinkelio ruože, kurio ilgis 594 km. Šiame ruože pastatytos 34 bazinės stotys, naudojamas 1,8 GHz dažnis bei TDD laikinis multipleksavimas. Šis tinklas specialiai buvo pritaikytas geležinkeliams bei papildytas specialiomis funkcijomis – grupiniai skambučiai per LTE, kelių lokomotyvų sinchronizacija, duomenų perdavimas, realaus laiko vaizdo stebėjimas judančiuose traukiniuose ir t.t.. Šios papildomos funkcijos buvo realizuotos įdiegiant IMS sistemą. LTE tinklo įdiegimas padėjo padidinti šiuo ruožu pervežamos anglies kiekį nuo 200 mln. tonų iki 350 mln. tonų [3]. Tai yra geras pavyzdys kaip LTE tinklas gali pakeisti GSM-R, tačiau šiuo atveju GSM-R tinklo modernizacijai pasiryžta dėl per didelio balso skambučių kiekio – tinklas negalėjo atlaikyti esamų apkrovų. Analizuojamoje geležinkelio

linijoje Lietuvoje tinklas atlaiko esamas apkrovas, modernizacijos priežastis yra išaugęs duomenų perdavimo spartos poreikis.

Šio baigiamąjo darbo **uždaviniai** yra:

- Išanalizuoti esamą GSM-R tinklą bei jo infrastruktūrą;
- Apskaičiuoti reikiamą naujo mobilaus tinklo pralaidumą;
- Naudojant programinę įrangą, suprojektuoti didelės spartos duomenų perdavimo tinklą; geležinkelio linijoje Kaunas - Vilnius
- Atlikti projekto ekonominį vertinimą.

2. Prieigos tinklo technologijų analizė

Šioje dalyje analizuojamos modernios mobiliojo ryšio technologijos, naudojamos šio projekto įgyvendinimui. Atliekama Wi-Fi technologijų, naudojamų belaidei prieigai traukiniuose užtikrinti, aptariami didelę spartą galintys pasiekti mobiliojo ryšio standartai, kurių panaudojimas galimas geležinkelio linijose.

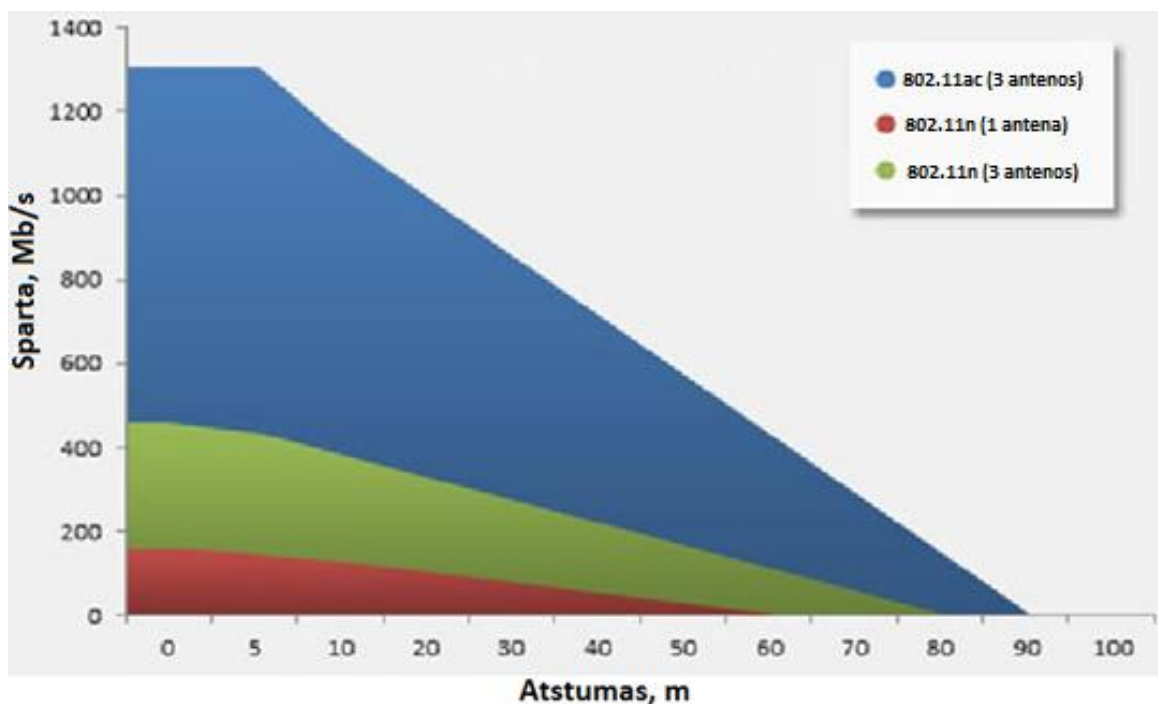
2.1. Wi-Fi naujausių technologinių sprendimų analizė

Kadangi projekte numatytas Wi-Fi prieigos taškų įrengimas traukinių keleiviniuose vagonuose, šiame skyriuje apžvelgsime populiariausius bei naujausius šios technologijos standartus. Šiuo metu populiariausias yra 802.11n standartas, kuris baigia pakeisti prieš tai buvusį 802.11g standartą. Nors įrenginių, kurie nepalaiko 802.11n standarto rinkoje lieka vis mažiau, tačiau teikiant paslaugas būtina atsižvelgti į tai, jog ne visi klientai gali būti atsinaujinę savo įrenginius. Abiejų šių standartų įrenginiai veikia 2,4 GHz dažniu (naujesnysis standartas turi galimybę veikti ir 5GHz dažniu), tačiau 802.11n standarto įrenginiuose galimas MIMO (angl. *Multiple Input- Multiple Output*) technologijos panaudojimas. MIMO technologijos esmė yra imtuvui pateikti kelias skirtingas to paties signalo versijas tam, jog būtų galima atskirti įvairių klūčių poveikį signalui. Nors dažniausiai MIMO yra tapatinama su kelių antenų, išdėstytų skirtingose vietose panaudojimu (dėl tokios sistemos didelio efektyvumo šitas variantas yra populiariausias), galimas ir dažninis bei laikinis signalo atskyrimas. Ši technologija bei didesnės signalo galios panaudojimas nulemia tai, jog 802.11n standartas teoriškai gali pasiekti po 150 Mb/s spartą su kiekviena antena (esant 3 antenų konfigūracijai maksimali teorinė sparta siekia 450 Mb/s), lyginant su 54 Mb/s 802.11g standarte.

Naujausias 802.11 šeimos standartas yra 802.11ac, kuris kaip ir 802.11n palaiko ir 2,4 GHz, ir 5GHz dažnius, tačiau skiriasi tuo, jog gali veikti jais abiem vienu metu. Naujasis standartas

įgalina 80 MHz pločio kanalų panaudojimą, vietoj prieš tai buvusių 40 MHz, be to, kanalai gali būti apjungti taip sudarant 160 MHz pločio kanalą [5]. 802.11n standarto įranga leido maksimaliai panaudoti 4 kanalus po 40 MHz, o naujasis 802.11ac standartas suteikia galimybę apjungti 8 kanalus po 160 MHz, taigi iš viso galima panaudoti net 16 kartų platesnį dažnių ruožą, kas leidžia ženkliai padidinti pralaidumą. Nėgana to, vietoj 64 QAM moduliacijos, naudojama 256 QAM, kas leidžia padidinti spektrinį efektyvumą. Visi šie atnaujinimai leidžia pasiekti maksimalią teorinę beveik 7 Gb/s spartą, tačiau realybėje tokių skaičių pasiekti nepavyks, dažniausiai fiksuojama iki 1.5 Gb/s sparta. 802.11ac taip pat standartizuoja naują technologiją – radijo signalo fokusavimą (angl. *beamforming*), kuris gali būti atliekamas dviem būdais – fiziškai nukreipiant siųstuvo anteną į įrenginį arba moduluojant signalų amplitudę bei fazę taip, kad jie destruktiviai trukdytų vienas kitam, paliekant siaurą radijo signalo liniją, kuri nukreipta į įrenginį. Signalo fokusavimas leidžia sumažinti energijos sąnaudas bei padidinti bendrą pralaidumą.

Projektuojant Wi-Fi tinklą svarbu atsižvelgti į aprėptį – žinodami koku atstumu gali veikti vienas prieigos taškas, galime preliminariai nustatyti kiek tokių prieigos taškų reikės traukinio vagonuose.



Pav. 2.1 Fiksuojamos tinklo spartos priklausomybė nuo atstumo, standarto bei antenų skaičiaus

Iš Pav. 2.1 pateiktos diagramos matome, jog naudojant 802.11ac standarto įrenginį bei 3 antenų konfigūraciją maksimali aprėptis siekia 90 metrų – 10 metrų daugiau nei naudojant 802.11n įrenginį su trimis antenomis bei 35 metrais daugiau nei naudojant 802.11n įrenginį su viena antena. Taip pat naujesnysis standartais pasiekia ženkliai didesnes spartas esant tam pačiam atstumui nuo prieigos taško.

2.2. Didelės perdavimo spartos mobiliojo ryšio technologijų analizė

Naujasis geležinkelių mobilaus ryšio tinklas turi patenkinti GSM-R tinklui keltus reikalavimus bei suteikti papildomo paskatinimo atsinaujinimui, t.y. turi pasiūlyti ženkliai didesnę spartą, lyginant su dabartiniu tinklu, pigesnę eksploataciją ar kitus veiksnius, kurie pateisintų šį didelės vertės projektą. Pagrindiniai konkurentai ketvirtosios kartos tinkluose yra WiMAX ir LTE technologijos, todėl šiame skyriuje jas ir apžvelgsime.

2.2.1. WiMAX

WiMAX yra IP protokolu paremta technologija, kurios standartą aprašė IEEE organizacija. Nors WiMAX kaip ryšio technologija buvo aprašyta dar 2004 m., tačiau senieji standartai buvo skirti fiksuotai prieigai. Tik 2009 m. aprašytas 802.16m standartas [8] leido praplėsti šios technologijos mobilumą – atsirado galimybė vartotojams teikti ne tik fiksuotą, bet ir judrią plačiajuosčio tinklo prieigą. WiMAX tinkle galimi 5, 10, 20, bei 40 MHz pločio kanalai. Fizinis lygmuo realizuotas OFDM ir OFDMA technologijomis, leidžiančiomis pasiekti didelį spektro panaudojimo efektyvumą, efektyviai kovoti su įprastais radijo perdavimo aplinkos reiškiniais – interferencija bei signalo nykimu. Dar labiau spektro išnaudojimo efektyvumas didinamas naudojant MIMO antenas. Aukščiausio efektyvumo 4x4 MIMO antenų konfigūracija leidžia pasiekti beveik keturis kartus didesnes spartas naudojant tokio paties pločio kanalą. Tačiau nors maksimali teorinė aukštnykrypčio ryšio sparta siekia 1 Gb/s, šis skaičius galioja tik fiksuotai prieigai. Esant aukštam mobilumui šios technologijos siūlomos spartos ženkliai mažėja: esant 4x4 MIMO konfigūracijai, panaudojant 20 MHz kanalą, maksimali teorinė aukštnykrypčio ryšio sparta siekia 219 Mb/s, žemynkrypčio – 140 Mb/s. Nors teoriškai šios technologijos galimybės yra gana didelės, tačiau technologijos nepopuliarumas tarp įrangos gamintojų bei mobiliojo ryšio operatorių sudaro daug trukdžių tinklą diegiant bei eksploatuojant.

2.2.2. LTE

Didžioji dauguma užsienio šalyse modernizuotų geležinkelių tinklų naudoja LTE standartą. Tarptautinė geležinkelių sąjunga (UIC) taip pat rekomenduoja geležinkelių mobiliam tinklui pasirinkti LTE [1]. Vienu metu konkurencija tarp WiMAX ir LTE buvo ypatingai didelė, tačiau klausimai dėl WiMAX ateities evoliucionavimo bei mažas komercinis naudojimas išskyrė aiškų lyderį - LTE. Be to LTE priklauso 3GPP šeimai, kas užtikrina sklandų perėjimą prie ateities technologijų (LTE-A, 5G ir t.t.). LTE yra ketvirtos kartos (4G) mobiliojo ryšio standartas, kuris iššifruojamas kaip ilgo evoliucionavimo. Nuo prieš tai buvusių mobiliojo ryšio standartų jis pagrinde išsiskiria tuo, jog yra pilnai paremtas IP protokolu – vietoj grandinių komutacijos čia vykdoma paketų komutacija.

LTE tinkle galimi 1,4, 3, 5, 10, 15 bei 20 MHz pločio kanalai. Panaudojus 20 MHz pločio kanalą bei 4x4 antenų konfigūraciją maksimali žemynkrypčio ryšio sparta siekia 299,6 Mb/s bei 75,4 Mb/s aukštynkrypčio, o tai yra daugiau nei 1000 kartų didesnė sparta lyginant su dabartiniu GSM-R tinklu, kuris gali pasiūlyti tik 236 kb/s. Taip pat LTE tinklai atsparūs dideliems greičiams – priklausomai nuo naudojamų dažnių mobilus ryšys gali būti užtikrinamas esant nuo 350 km/h iki 500 km/h greičiams (šiuo metu maksimalus traukinių greitis Lietuvoje siekia 70 km/h senosiomis vėžėmis ir 120 km/h naujosiomis vėžėmis).

Žvelgiant iš vartotojo pusės, pagrindinis LTE privalumas lyginant su prieš tai buvusiomis mobiliojo ryšio kartomis yra ženkliai išaugusi duomenų perdavimo sparta, kas leidžia naudotis realaus laiko bei kitomis didelės spartos reikalaujančiomis aplikacijomis. Tinklo operatoriai taip pat suinteresuoti naudoti šią technologiją dėl ženkliai sumažėjusio tinklo kompleksiskumo (dėl visoms paslaugoms naudojamo IP protokolo), kas sumažina tinklo priežiūros bei išlaikymo kaštus. Tačiau turbūt didžiausias LTE privalumas yra efektyviai išnaudojami dažniai, tai yra didesnis pralaidumas išgaunamas panaudojant tokį patį dažnių ruožą.

Dėl didelio LTE tinklo populiarumo bei mobiliųjų tinklų operatorių palaikymo, LTE įranga yra ženkliai pigesnė, lyginant su GSM-R tinklo įranga, kuri buvo projektuota specialiai geležinkelių tinklams ir kitose srityse nėra naudojama. Toks siauras pritaikymas lėmė, kad GSM-R tinklo įranga yra ženkliai brangesnė, todėl ir išlaikymo kaštai yra didesni, lyginant su LTE tinklu.

3GPP suskirstė LTE vartotojų įrangą į kategorijas, kas leidžia bazinėms stotims efektyviau su ja komunikuoti. Bazinės stotys, žinodamos vartotojo įrangos galimybes gali efektyviau išnaudoti turimus resursus. Iš viso šiuo metu yra 5 LTE kategorijos, aukštesnės nei penkta kategorijos priskiriamos LTE-A standartui. LTE vartotojo įrangos kategorijos pateiktos lentelėje.

Lentelė 2.1 LTE kategorijos

| Kategorija | Aukštynkrypčio ryšio sparta, Mb/s | Žemynkrypčio ryšio sparta, Mb/s | MIMO palaikymas | Aukščiausia galima moduliacija DL | Aukščiausia galima moduliacija UL |
|--------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 kategorija | 10 | 5 | - | 64QAM | 16QAM |
| 2 kategorija | 50 | 25 | 2x2 | 64QAM | 16QAM |
| 3 kategorija | 100 | 50 | 2x2 | 64QAM | 16QAM |
| 4 kategorija | 150 | 50 | 2x2 | 64QAM | 16QAM |
| 5 kategorija | 300 | 75 | 4x4 | 64QAM | 64QAM |

2.3. LTE tinklo talpos didinimo būdai

Lengviausias būdas padidinti tinklo talpą yra padidinti naudojamų dažnių ruožą, tačiau ne visada tai yra įmanoma dėl ribotų dažnių resursų. Šiuo metu Lietuvos geležinkeliai turi leidimą naudoti dvi dažnių juostas po 4 MHz, tačiau net ir panaudojant moderniausias technologijas bei metodus, iš tokios siauros dažnių juostos didelių spartų neišgausime. Todėl, norint įgyvendinti šį projektą, visų pirma reikia siekti, jog būtų įmanoma panaudoti platesnį dažnių ruožą.

Kadangi dažniai yra labai ribotas išteklius, juos reikia išnaudoti kuo efektyviau. Vienas iš būdų yra aukštesnio lygio moduliacijos panaudojimas. Aukščiausio lygio moduliacija, galima LTE tinkle yra 64 QAM [13]. Panaudojant šią moduliaciją, vienu simboliu perduodama 6 bitų informacija, kai tuo tarpu panaudojus QPSK moduliaciją vienu simboliu perduodami tik 2 bitai. Taigi matome, kad vien tik aukštesnės moduliacijos panaudojimas gali tris kartus padidinti tinklo pralaidumą.

Kuo aukštesnė moduliacija naudojama, tuo ji mažiau atspari trikdžiams – aukštesnei moduliacijai naudoti būtina turėti ir aukštesnį signalo lygį. Vienas iš būdų aukštesniam signalo lygiui užtikrinti yra MIMO technologijos panaudojimas, įdiegiant dvi ar daugiau antenų, kurios leidžia priimti kelis skirtingus duomenų srautus vienu metu. Šis metodas leidžia užtikrinti aukštesnį signalo lygį, kas leidžia panaudoti aukštesnio lygio moduliaciją bei padidina celės aprėptį. Taigi, nedidinant naudojamų dažnių ruožo padidėja pralaidumas bei celės aprėptis. Dar didesnis MIMO technologijos privalumas yra išaugusi duomenų perdavimo sparta dėl panaudojamų kelių skirtingų signalo kelių. 2x2 antenų konfigūracija tinklo spartą padidina maždaug 1,9 karto, 4x4 antenų konfigūracija tinklo spartą padidina net 3,8 karto. Taigi, panaudojus 4x4 MIMO bei 64 QAM, teorinė sparta panaudojus tą patį dažnių ruožą, lyginant su konfigūracija be MIMO ir su QPSK moduliacija, yra apytiksliai 11,4 karto didesnė.

3. Techninių sprendimų bei tinklo projektavimo analizė

Šiame skyriuje analizuojami techniniai sprendimai, leidžiantys LTE tinklą suderinti su ankstesnių kartų tinklais bei jį pritaikyti geležinkelių poreikiams, sudaromas tinklo projektavimo algoritmas.

3.1. Techninių sprendimų analizė

Nepaisant daugelio privalumų, LTE tinklas, lyginant su GSM-R turi ir savų trūkumų. LTE standarte trūksta specifinių, tik geležinkelių tinklams reikalingų funkcijų [3]. Be to, kadangi LTE yra paketų komutaciją paremta technologija, atliekant balso skambučius iškyla problemų, kai skambinama į 2G arba 3G tinklą, kur naudojami grandinių komutacijos principai, nes senesnieji

tinklai negali apdoroti paketais perduotos informacijos [4]. Taip pat iškiltų problemų ir atvirkštiniu atveju, kai iš senojo GSM-R tinklo skambinama į LTE. Šią problemą galima išspręsti trimis būdais:

1. VoLTE (angl. Voice over LTE) yra paremtas IMS (angl. IP Multimedia Subsystem). Naudojant šią sistemą balsas perduodamas paketais kartu su kitais duomenimis, taigi dingsta poreikis palikti veikiančią grandinių komutavimo sistemą (GSM-R).
2. CSFB (angl. Circuit Switching Fallback). Šiuo atveju LTE tinklu perduodami tik duomenys, o balso skambučiams naudojamas senasis grandinių komutacija paremtas tinklas.
3. SVLTE (angl. Simultaneous Voice over LTE). Tinklui nereikalingi jokie ypatingi pakeitimai, duomenų perdavimas ir balso skambučiai vykdomi lygiagrečiai abiem tinklais – senuoju ir naujuoju. Specialiai tam pritaikytas turi būti vartotojo įrenginys, kuris galėtų prisijungti prie abiejų tinklų vienu metu.

VoLTE reikalinga pakankamai brangi IMS sistema, tačiau išaugusią kainą atperka didelis sistemos funkcionalumas, kuris išspręstų visas su LTE standartu susijusias problemas su kuriomis gali susidurti geležinkeliai.

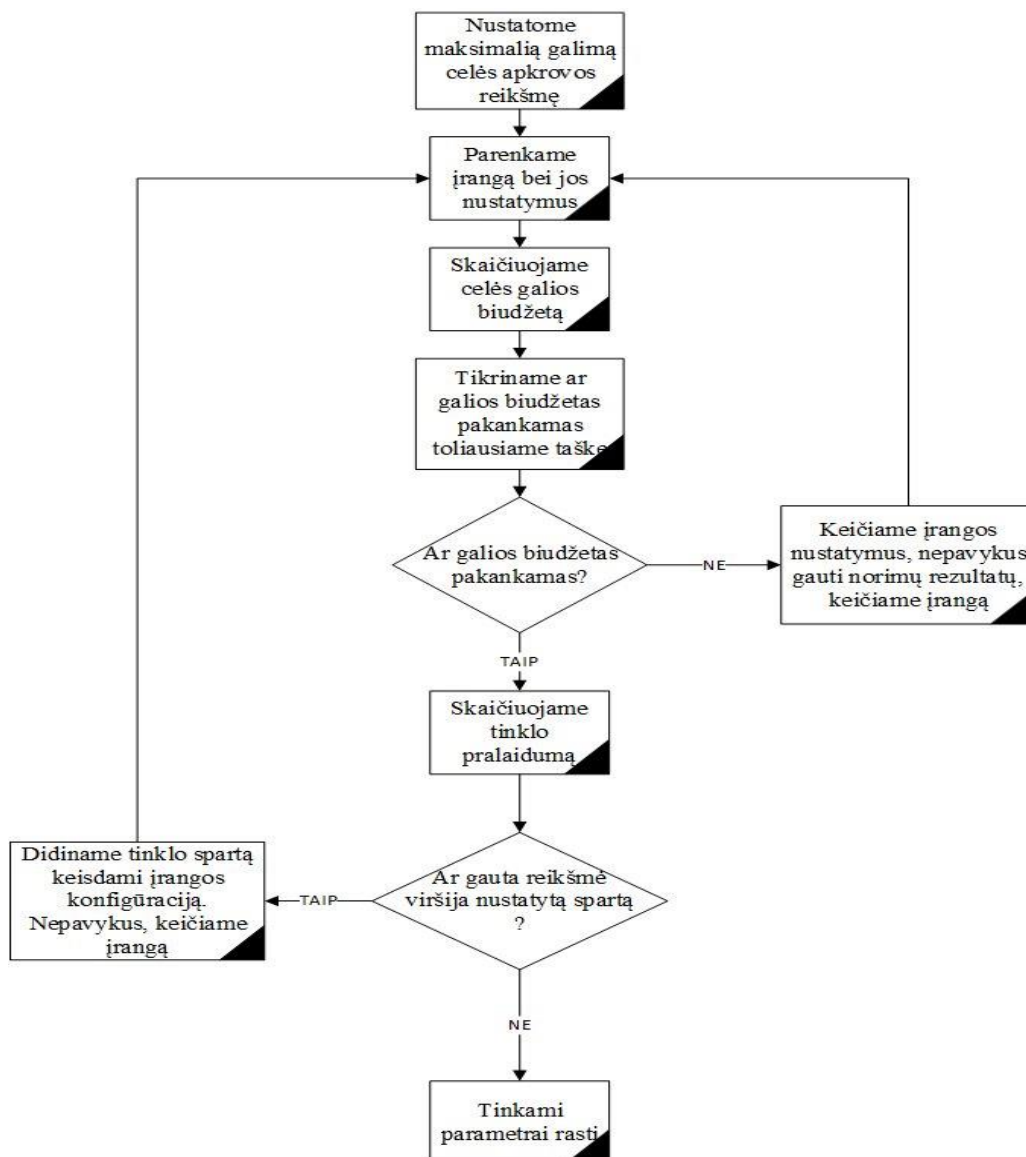
Kadangi GSM-R tinklas yra neseniai įdiegtas, naudojama įranga gali tarnauti dar daug metų, ekonomiškai neefektyvu būtų jį išjungti. GSM-R tinklas yra kruopščiai suprojektuotas tarnauti būtent geležinkelių reikmėms, palaiko visas būtinas papildomas funkcijas, susijusias su traukinių eismu. Vienintelis GSM-R tinklo minusas yra mažas duomenų pralaidumas, todėl efektyviausias variantas būtų šį tinklą ir toliau naudoti svarbiausioms operacijoms atlikti, o naująjį tinklą panaudoti tik toms paslaugoms, kurioms reikalinga didelė greitis, kurios senasis tinklas pasiūlyti negali. CSFB variantas yra pigiausiai įgyvendinamas sprendimas, nors ir turintis minusą, kuris gali turėti įtakos tinkamam mobilaus tinklo veikimui - perjungiant iš naujojo tinklo į senąjį tam, kad būtų perduotas balso skambutis, sugaištamas laikas (atsiranda vėlinimas perjungimo metu). Kadangi geležinkeliuose ryšiai turi veikti su mažiausiu įmanomu vėlinimu, toks variantas yra netinkamas.

Šiam projektui naudotume SVLTE sistemą, kurios panaudojimo atveju šio vėlinimo išvengiama. Abu tinklai išlieka veikiantys, duomenys perduodami LTE tinklu, balso skambučiai bei papildomos funkcijos, susijusios su traukinių eismu, atliekamos senuoju GSM-R tinklu. Šiai sistemai yra skirti specialūs mobilūs įrenginiai, kurie vienu metu gali veikti abiejuose tinkluose. Dėl tokio papildomo funkcionalumo išauga vartotojo įrenginių kainos bei sumažėja baterijos iškrovimo laikas, tačiau panaudojant šią sistemą nebūtina keisti esamų GSM-R tinklo mobiliųjų terminalų, kuriems nėra poreikio perduoti duomenis (reikalingi tik balso skambučiai ar su

traukinių eismu susijusios funkcijos).

3.2. Tinklo projektavimo etapai

Kadangi šis projektas nėra tipinis, tinklo aprėptis bei talpa įvertinama kitokiais metodais nei standartiniu atveju. Projektuojant pirmiausia reikia įvertinti tai, jog naujasis tinklas kuriamas ant esamo GSM-R tinklo infrastruktūros, todėl pasirinktas celių skaičius priklauso ne tik nuo vartotojų skaičiaus ar reikiamos spartos, bet ir nuo esamų bokštų kiekio bei jų pozicijos linijoje. Visų pirma būtina nustatyti vartotojų įrenginių sukuriama duomenų srautą. Toliau veiksmus vykdome pagal Pav. 3.1 pateiktą algoritimą.



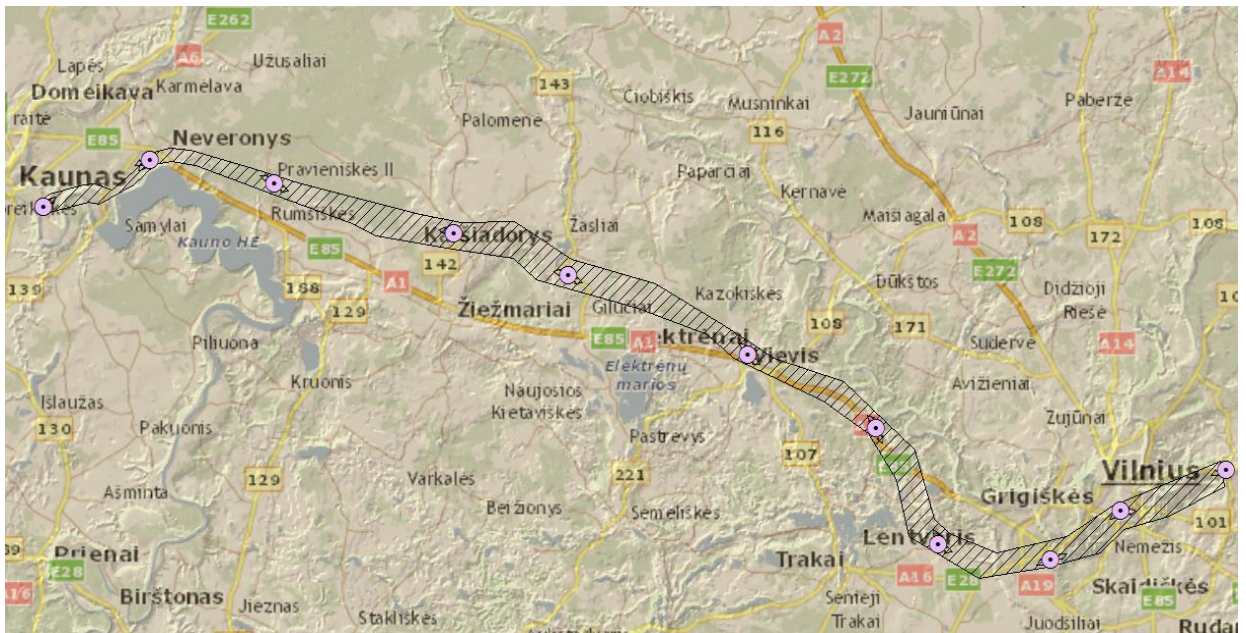
Pav. 3.1 Tinklo projektavimo algoritmas

Iš pateikto algoritmo matyti, kad projektuojant tinklą svarbiausia yra parinkti tinkamą įrangą bei jos konfigūraciją. Nepavykus išgauti reikiamos spartos, atsirastų poreikis statyti

papildomus bokštus, tačiau tai labai padidintų tinklo diegimo kaštus, dėl to svarbu visais įmanomais būdais stengtis pasiekti reikiamą spartą bei galios biudžetą. Gavę mažesnę nei nustatyta celės apkrovos reikšmę, galime sakyti, jog radome reikiamą įrangą bei tinkamai parinkome jos konfigūraciją.

4. Mobilaus ryšio tinklo modeliavimas bei įrangos parinkimas

Ši didelės spartos belaidžio ryšio tinklą projektuojame pasinaudodami *Cellular Expert* programinės įrangos plėtiniu, kuris yra sukurtas ant *ArcGIS* programinės įrangos pagrindo. Ši programinė įranga skirta tinklo planavimui, optimizavimui bei efektyviai duomenų analizei. Kadangi naudojamos tikslios tinklo dalių koordinatės bei naudojami trimačiai žemėlapiai, kurie leidžia įvertinti reljefą bei galimas signalo kliūtis, gaunamas didelis modeliavimo tikslumas. Visi šie veiksniai leidžia projektuotojui geriau įvertinti situaciją bei parinkti tinkamą įrangą ir jos nustatymus. Būtiną tinklu padengti teritoriją nustatome taip, kad tinklas apimtų visą geležinkelio liniją Vilnius-Kaunas bei aplink bėgius esančią teritoriją, kurioje gali būti vykdomi geležinkelio darbuotojų darbai (esant poreikiui perduoti duomenis, darbuotojai galės pasinaudoti didelės spartos tinklu). Būtina tinklo padengimo teritorija bei esamų bokštų vietos pavaizduoti Pav. 4.1.

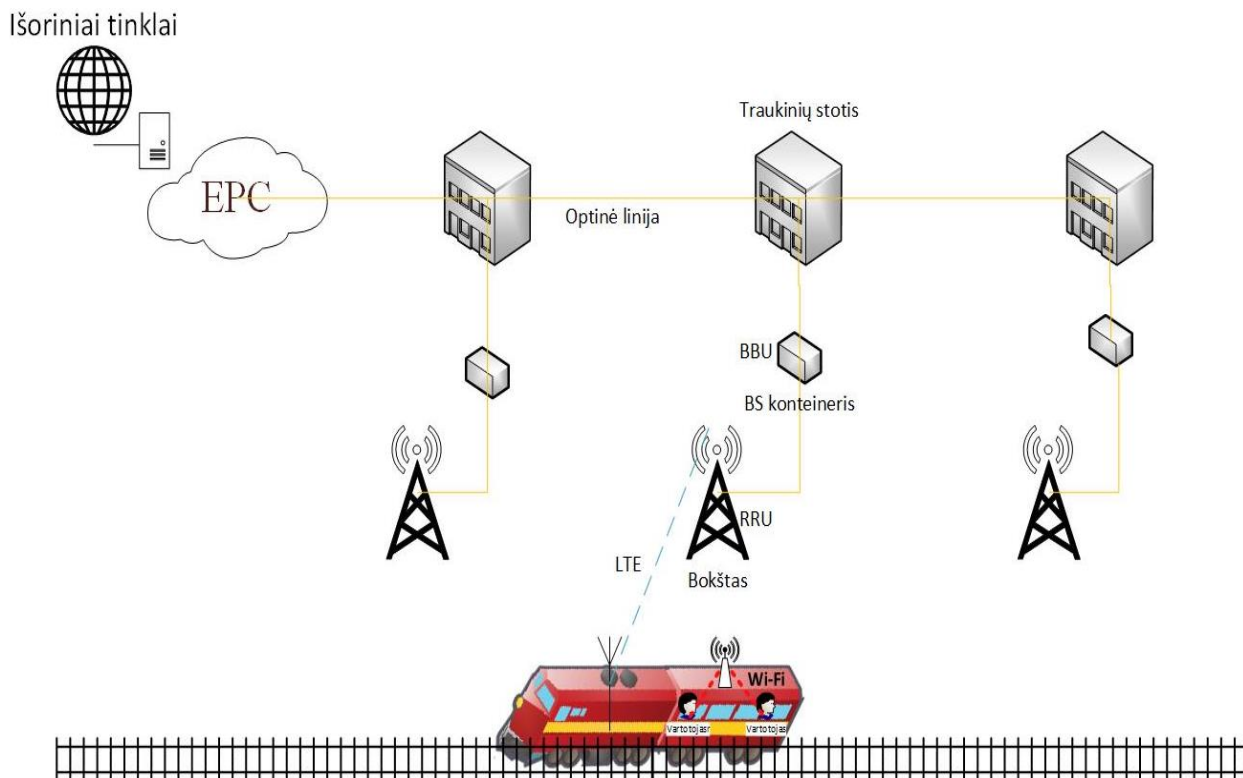


Pav. 4.1 Būtina padengti teritorija bei esami telekomunikacijų bokštai

Cellular Expert programine įranga modeliuosime LTE tinklą, t.y. tinklo dalį nuo telekomunikacijų bokštų iki traukinyje esančios priėmimo įrangos. Kadangi traukiniuose bus montuojami Wi-Fi prieigos taškai, vien tik LTE tinklo vertinimo neužtenka, būtina atsižvelgti ar prieigos taškai bus pajėgūs užtikrinti kokybišką ryšį traukinio vagonė bei numatyti kiek tokių įrenginių būtina sumontuoti, kad būtų pasiekti norimi rezultatai. Wi-Fi tinklą modeliuosime naudodami *Aerohive* programinę įrangą.

4.1. Įrangos parinkimas

Kaip jau matėme iš Pav. 3.1 pateikto tinklo projektavimo algoritmo, svarbiausia yra parinkti tinkamą įrangą. Įranga turi būti patikima, atitinkanti nustatytus reikalavimus, nebrangi bei turi būti parenkama tokia, kad esant poreikiui tinklą atnaujinti ar praplėsti, ji būtų tinkama naudoti. Projektuojamo tinklo struktūra pateikta Pav. 4.2.



Pav. 4.2 Projektuojamo tinklo struktūra

Tinklo branduolio dalis bus diegiama Kaune esančios ryšinės patalpose. Čia bus pastatyta EPC dalis, kuri yra atsakinga už tokias funkcijas kaip sklandus ir greitas mobiliųjų įrenginių perjungimas tarp bokštų, esant judėjimui (angl. *handover*), bei vartotojų įrenginių duomenų saugojimas. Taip pat šiose patalpose montuojama NMS sistema, kuri leidžia stebėti tinklo veiklą. LTE tinklo įranga prie branduolio prijungiama panaudojant esančias optines linijas.

3GPP aštuntame leidime nurodyta EPC struktūra [7] turi šias dalis:

- HSS (angl. Home Subscriber Server) – duomenų bazė, kuri saugoja su vartotojais susijusią informaciją (vartotojų autentifikacija, prieigos autentifikacija bei mobilumo valdymas).
- MME (angl. Mobility Management Entity) – sistema, atsakinga už valdymo lygmenį. Ji apdoroja signalizavimo duomenis, kurie reikalingi mobilumui bei saugumui užtikrinti.
- PDN GW (angl. Packet Data Network Gateway) ir SGW (angl. Serving Gateway) – sietuvai, perduodantys duomenis tarp vartotojo įrangos ir išorinio tinklo. PDN GW yra taškas tarp EPC ir išorinių IP tinklų, SGW sietuvas yra tarp mobilaus tinklo ir EPC. Šie

sietuvai abu kartu perduoda duomenis tarp vartotojo įrangos ir išorinio tinklo. Jie taip pat atlieka tokias funkcijas, kaip IP adresų paskirstymas tinkle.

Taigi, projektuojamam LTE tinklui reikalinga ši įranga:

1. Huawei ECNS600 EPC serveris (Pav. 4.3), apimantis visus aukščiau paminėtus tinklo įrenginius. Jis yra kompaktiškos daugiamodulinės konstrukcijos, tačiau gali aptarnauti iki 1500 bazinių stočių bei 40 Gb/s duomenų srauto. Maksimalus galimas vartotojų skaičius – 200 tūkst. .



Pav. 4.3 Huawei EPC ECNS600 [18]

Lentelė 4.1 Huawei EPC ECNS600 pagrindiniai parametrai

| | |
|---|--------------------|
| Maksimalus vartotojų skaičius | 200,000 |
| Maksimalus nešlių skaičius | 600,000 |
| Maksimalus bazinių stočių skaičius | 1,500 |
| Pralaidumas | 40 Gbits/s |
| Maitinimo įtampa | -40V DC to -57V DC |
| Sistemos pateikiamumas | ≥ 99.999% |
| Vidutinis laikas tarp gedimų (MTBF) | ≥ 300,000 h |
| Vidutinis gedimo pašalinimo laikas (MTTR) | ≤ 60 min. |

Iš lentelėje 4.1 pateiktų duomenų matome, jog šis EPC serveris atitinka svarbiausius įrangai keliamus reikalavimus – sistemos pateikiamumas viršija nustatytą minimalų, vidutinis laikas tarp gedimų yra didelis, o gedimų šalinimas trunka trumpai dėl visos sistemos modulinės struktūros (visa įranga sudaryta iš atskirų plokščių, kurios gali būti keičiamos neišjungus įrangos bei nėra poreikio įrangą perkrauti modulį pakeitus). Dėl didelio maksimalaus vartotojų skaičiaus bei dėl didelio bazinio stočių skaičiaus palaikymo, ši tinklo branduolio dalis bus tinkama net ir atsiradus poreikiui įdiegti LTE tinklą visose Lietuvoje esančiose geležinkelio linijose.

2. Tinklo valdymo sistema NMS M2000. Ši sistema leidžia stebėti tokius tinklo elementus kaip EPC serveris ir bazinės stotys. NMS leidžia atlikti šiuos veiksmus:
 - Tinklo veiklos stebėjimas;

- Tinklo konfigūravimas;
- Klaidų stebėjimas;
- Saugumo valdymas ir t.t..

M2000 sistema veikia serverio, kurio parametrai yra 2 CPU IBM x3650 M4, 32 GB RAM atminties bei 8 duomenų kaupikliai po 320 GB, pagrindu. Šios sistemos vidutinis laikas tarp gedimų yra 114509 h, vidutinis metinis sistemos gedimų laikas 0,5 h, sistemos pateikiamumas siekia 99,9999, todėl ši tinklo valdymo ir priežiūros sistema yra labai patikima. Viena tokia sistema gali stebėti iki 100 tinklo elementų.



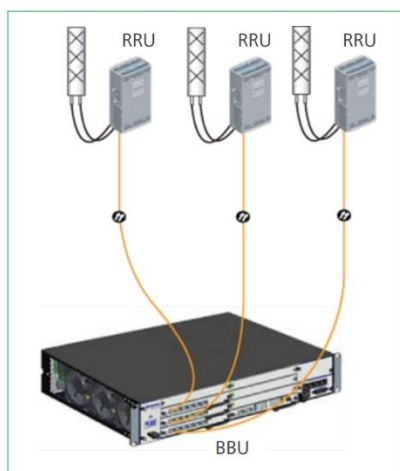
Pav. 4.4 M2000 tinklo valdymo sistema [18]

3. Bazinė stotis Huawei DBS3900, kurią sudaro BBU ir RRU dalys, tarpusavyje sujungtos optiniu kabeliu per CPRI jungtį (Pav. 4.6). Ši bazinė stotis palaiko 800 MHz dažnį esant dažniam multipleksavimui bei 400 MHz/1.4 GHz/1.8 GHz/2.3 GHz esant laikiniam multipleksavimui. Kanalų pločiai:

esant 400 MHz – 3, 5, 10, 20 MHz,

esant 1,4 GHz – 10, 20 MHz,

esant 800 MHz/ 1,8 GHz, 2,3 GHz – 5, 10, 20 MHz.



Pav. 4.5 Bazinės stoties Huawei DBS3900 sudedamosios dalys

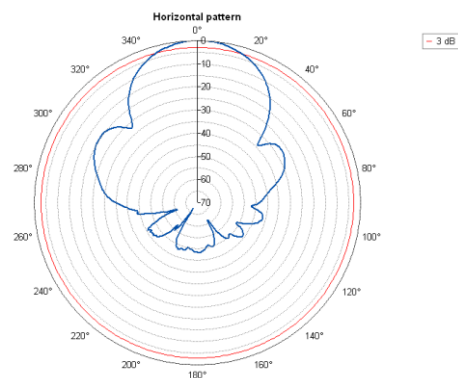
4. Antena Andrew LBX-3319DS (Pav. 4.6), turinti keturias jungtis. Ši antena pasižymi

ypatingai dideliu stiprinimu, kuris yra 21,3 dBi esant 760 – 960 MHz , spindulio plotis – 34 laipsniai.



Pav. 4.6 Bazinės stoties antena [17]

Šios antenos sklaidimo diagrama pateikta Pav. 4.7



Pav. 4.7 Antenos sklaidimo diagrama [17]

5. Ryšiui tunelyje užtikrinti panaudosime Selecom Digirep LTE tinklo kartotuvą (Pav. 4.8), kuris gali veikti 800, 900, 1800, 2100 bei 2600 MHz dažniais. Šis kartotuvas gali skleisti iki 36 dBm žemynkrypčio ryšio bei iki 20 dBm aukštnkrypčio ryšio stiprumo signalą.



Pav. 4.8 Selecom [19]

Traukiniuose bus montuojama ši įranga:

1. GEMTEK tinklo sietuvas, kuris užtikrina LTE 6 kategorijos spartas
2. GEMTEK maršrutizatorius, veikiantis 802.11b/g/n/ac standartais bei turintis dvi siuntimo/priėmimo antenas ir galintis veikti 2x2 MIMO sujungimu.
3. Hubbert Sencity Rail antena, galinti veikti nuo 689 MHz iki 6 GHz dažnių ruože. Ši antena yra 6 dBi stiprinimo dažnių ruože nuo 690 MHz iki 960 MHz bei turi du siųstuvus ir du imtuvus, taigi kiekvienam traukinyje bus reikalingos 2 tokios antenos.

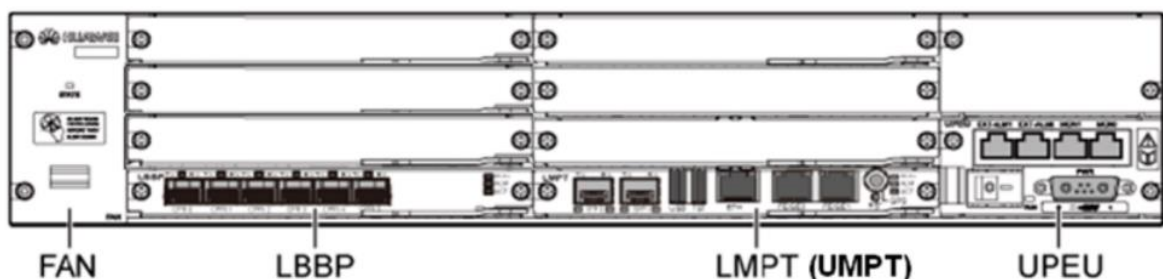


Pav. 4.9 Sencity Rail antena [15]

4.2. Įrangos konfigūracijos sudarymas

Tinklo įrangos BBU ir RRU dalys yra sudaromos iš atskirų, būtent tam tinklui reikalingų modulių, todėl šios konfigūracijos sudarymas yra ypatingai svarbus projektuojant tinklą.

BBU (Pav. 4.10) turi 8 vietas moduliams (neskaičiuojant maitinimo bei aušinimo elementų), tačiau 2 iš jų standartiškai yra užimtos pagrindiniam LTE apdorojimo ir perdavimo elementui LMPT (angl. LTE Main Processing and Transmission unit), pavaizduotam Pav. 4.13 bei LTE srautų apdorojimo elementui LBBP (angl. LTE Baseband Processing Unit), kuris yra pavaizduotas Pav. 4.11.

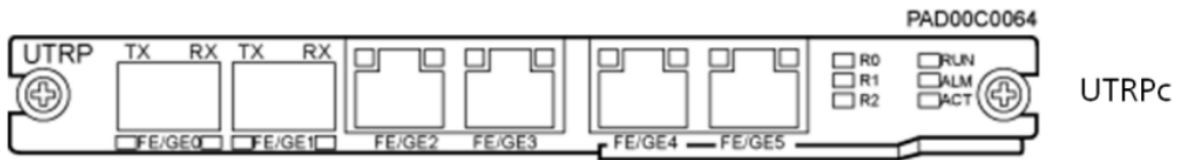


Pav. 4.10 Huawei bazinės stoties BBU dalis [16]



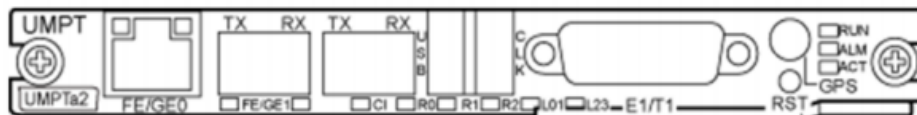
Pav. 4.11 LTE srautų apdorojimo elementas [16]

Šis LBBPd2 modulis turi 6 CPRI jungtis, per kurias galima pajungti iki 6 RRU. Šis modulis apdoroja aukštynkrypčio bei žemynkrypčio ryšio srautus.



Pav. 4.12 UTRPc modulis [16]

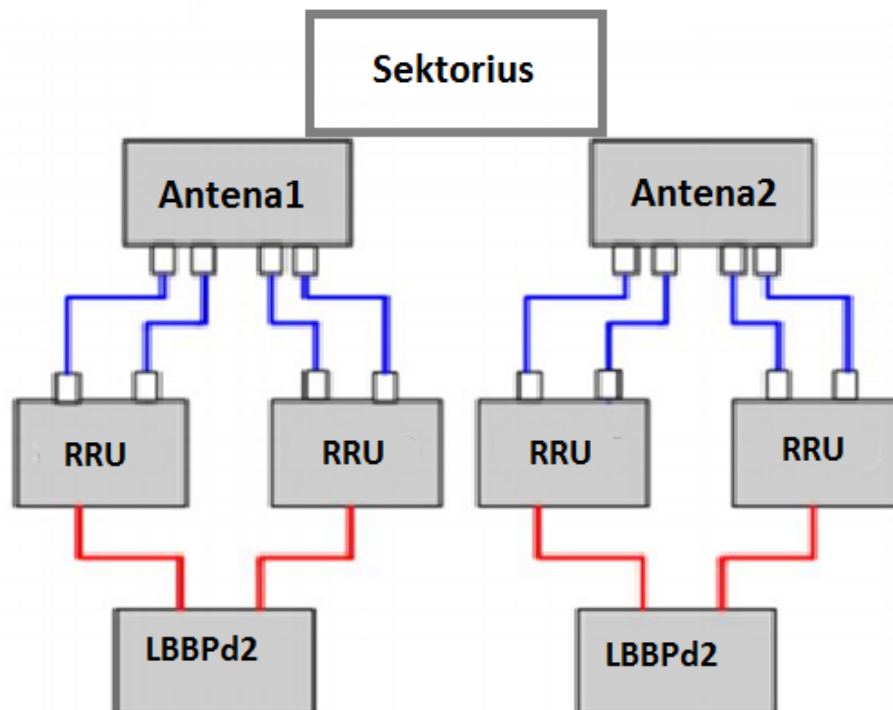
UTRPc modulis užtikrina reikiamas jungtis su optiniu duomenų perdavimo tinklu. Šiame modulyje yra 2 SFP prievadai bei 4 RJ45 prievadai, kurių kiekvienas gali užtikrinti spartas, viršijančias 1 Gb/s.



Pav. 4.13 LTE įrangos valdymo bei signalo apdorojimo elementas [16]

LMPT2 modulis (Pav. 4.13) atlieka įrangos bei jos parametrų valdymą, signalų apdorojimą bei radijo resursų valdymą. Šis modulis valdo visus kitus sisteminius modulius.

RRU moduliui pasirinktas RRU3841, kuris esant 4T4R sistemai, gali perduoti du signalus, kurių kiekvieno galia yra po 60 W (46 dBm). Esant 4x4 MIMO konfigūracijai su dviem 20 MHz kanalais, vienam sektoriui reikalingi 4 RRU įrenginiai, dvi antenos (su 4 jungtimis) bei po vieną LBBPd2, LMPT2 ir UTRPc modulį. Sektoriaus sujungimai, esant tokiai konfigūracijai pavaizduoti Pav. 4.14



Pav. 4.14 Sektoriaus antenų bei RRU ir BBU dalių sujungimų struktūra

Duomenų perdavimui tarp RRU ir BBU dalių pasirinkta medžio tipo topologija, kai kiekvienas RRU su BBU sujungiamas atskira optine skaidula. Ši topologija pasirinkta dėl aukšto perdavimo patikimumo – esant gedimui vienoje optinėje linijoje, kitų linijų darbas yra netrikdomas, neveikia tik ta sektoriaus dalis, kurioje įvykęs gedimas. Šios topologijos įdiegimas yra brangesnis, lyginant su kitomis topologijomis, tačiau tai atperka paprastesnę eksploataciją bei padidėjęs sistemos patikimumas.

4.3. Vartotojų sukuriami srautai

Projekte numatyta, kad naujas mobilusis tinklas bus naudojamas keleiviams teikti Wi-Fi interneto prieigos taškų paslaugas bei perduoti vaizdo duomenis iš ant traukinių ar juose sumontuotų vaizdo stebėjimo kamerų. Atlikdami šių paslaugų sukuriamų srautų skaičiavimus, laikomės prielaidos, kad vienu metu celėje nepertraukiamai veikia 10 vaizdo stebėjimo kamerų bei interneto prieiga naudojasi 30 žmonių, kurių kiekvieno sunaudojamas srautas yra po 2,5 Mb/s. Dėl tinklo saugumo įvedamas 5 Mb/s greičio apribojimas vartotojams. Tokio duomenų srauto užtenka įprastiniam interneto naudojimui – puslapių naršymui ar aukštos raiškos tiesioginio vaizdo stebėjimui. Didelių failų atsiuntimui tokios duomenų spartos nepakaks, tačiau neribojamas duomenų siuntimo greitis gali pakenkti stabiliam tinklo veikimui – net ir keli vartotojai, išnaudojantys maksimalią galimą greitaveiką gali visiškai apkrauti tinklą, dėl ko būtų sutrikdyta tinklo veikla kitiems vartotojams.

Jeigu vaizdo kodavimui naudojamas MPEG-4 H.264 glaudinimo algoritmas, vienos kameros sukuriamas duomenų srautas, panaudojant 720p (1280x720) raišką bei 25 kadru per sekundę skaičių, yra 2453 kb/s [10]. Kadangi vykdomas vaizdo stebėjimas saugumo užtikrinimui, o ne patenkinti išrankaus vartotojo akį stebint televiziją, norint padidinti vaizdo stebėjimų kamerų skaičių labai neapkraunant tinklo, galima naudoti 10 kadru per sekundę vaizdą, kuris nebus malonus stebėti nepertraukiamą vaizdą, tačiau visiškai atliks savo pirminę funkciją. Naudojant 10 kadru per sekundę vaizdą, vienos kameros sukuriamas srautas yra 981 kb/s. Esant poreikiui pastatyti daug aukštos raiškos kamerų su dideliu kadru skaičiumi per sekundę, galima įdiegti sistemą, kuri saugotų vaizdo duomenis traukinyje, o esant poreikiui būtų prisijungiama prie sistemos ir stebimas vienos ar kelių kamerų tiesioginis vaizdas ar peržiūrimas vaizdas išsaugotas sistemoje.

Taigi, skaičiuojant jog bus naudojama 10 kamerų su 10 kadru per sekundę skaičiumi bei 720p raiška, bendras sukuriamas srautas bus:

$$V_{IPCAM} = 10 \times 981 = 9810 \text{ kb/s} = 9,81 \text{ Mb/s.}$$

Wi-Fi prieigos taško paslaugos sukuriami srautai:

$$V_{Wi-Fi} = 30 \times 2,5 = 75 \text{ Mb/s.}$$

Šie srautai yra sukuriami skirtingomis ryšio kryptimis, t.y. iš vaizdo kamerų vaizdas yra siunčiamas į bazinę stotį, todėl daugiausiai naudojamas aukštnykryptis ryšys, žemynkryptis ryšys naudojamas neženkliai, didelės apkrovos nėra sukuriamos, todėl jo skaičiuodami vaizdo stebėjimo kamerų srautus nevertinsime. Vartotojams naršant internete, daugiausiai naudojamas žemynkryptis ryšys, aukštnykrypčio kanalo naudojimas yra daug mažesnis, todėl skaičiavimuose vadovausimės nuostatai, kad Wi-Fi paslaugos sukuriamas aukštnykrypčio ryšio srautas lygus 5% žemynkrypčio ryšio srauto.

Iš viso sukuriamas srautas, tenkantis aukštnykrypčiam ryšiui:

$$V_{apkr_UL} = 3,75 + 9,81 = 13,56 \text{ Mb/s.}$$

Iš viso sukuriamas srautas, tenkantis žemynkrypčiam ryšiui:

$$V_{apkr_DL} = 75 \text{ Mb/s.}$$

Projekte numatyta, tinklas negali būti apkrautas daugiau nei 80%. Turėdami šiuos duomenis, galime apskaičiuoti reikiamas mobilaus tinklo aukštnykrypčio bei žemynkrypčio ryšio spartas:

$$V_{DL} = 75 \div 0,8 = 93,75 \text{ Mb/s,}$$

$$V_{UL} = 13,56 \div 0,8 = 16,95 \text{ Mb/s.}$$

Turėdami šiuos duomenis, nusistatome projektuojamo tinklo tikslus – pasiekti 100 Mb/s spartą žemynkrypčiame ryšyje bei 20 Mb/s spartą aukštnykrypčiame ryšyje visoje geležinkelio linijoje.

4.4. Galios biudžeto skaičiavimas

Galios biudžeto skaičiavimas leidžia nustatyti maksimalius galimus nuostolius tarp siųstuvo ir imtuvo. Žinodami galios biudžetą bei slopinimą erdvėje galime koreguoti celės dydį – matydami, jog galios biudžetas pakankamas bei yra atsarga, galime jį plėsti. Jeigu matome, jog galios biudžetas per mažas – būtina mažinti celės dydį arba keisti įrangą bei jos parametrus, kadangi aprėptis visoje celėje nebus užtikrinama. Mažinant celės dydį atsirastų poreikis statyti papildomus bokštus, kas ženkliai padidintų tinklo diegimo kaštus, todėl šiame projekte svarbu to išvengti. Skaičiavimus atliekame panaudodami pasirinktos įrangos specifikacijas (kai kurie duomenys nurodyti geležinkelių tinklų projektavimo nuostatuose [2]).

4.2 lentelė. LTE tinklo aukštynkryptis energetinis biudžetas

| Žymuo | Reikšmė | Dydis |
|------------------------------|--|--------|
| Siųstuvas – vartotojo įranga | | |
| a | Maks. Siųstuvo galia [dBm] | 23 |
| b | Siųstuvo antenos stiprinimas [dBi] | 0 |
| c | Nuosavi antenos nuostoliai [dB] | 0 |
| d | EIRP [dBm] | 23 |
| Imtuvas – bazinė stotis | | |
| e | Bazinės stoties savitasis triukšmas [dB] | 2 |
| f | Temperatūrinis triukšmas [dBm] | -118,4 |
| g | Imtuvo bendrasis triukšmas [dBm] | -116,4 |
| h | SINR [dB] | -7 |
| i | Imtuvo jautrumas [dBm] | -123,4 |
| j | Interferencijos riba [dB] | 1 |
| k | Nuosoliai kabeliuose [dB] | 6 |
| l | Imtuvo antenos stiprinimas [dBi] | 21,3 |
| m | Maksimalus galimas praradimas erdvėje [dB] | 160,7 |

$$EIRP = a + b - c = 23 + 0 - 0 = 23 \text{ dBm}, \quad (4.1)$$

$$g = e + f = 2 + (-118,4) = -116,4 \text{ dBm}, \quad (4.2)$$

$$i = g + h = -116,4 + (-7) = -123,4 \text{ dBm}, \quad (4.3)$$

$$m = d - i - j - k + l = 23 - (-123,4) - 1 - 6 + 21,3 = 160,7 \text{ dB}. \quad (4.4)$$

4.3 lentelė. LTE tinklo žemynkryptis energetinis biudžetas

| Žymuo | Reikšmė | Dydis |
|----------------------------|--|--------|
| Siųstuvas – bazinė stotis | | |
| a | Maks. Siųstuvo galia [dBm] | 46 |
| b | Siųstuvo antenos stiprinimas [dBi] | 21,3 |
| c | Nuosoliai kabeliuose [dB] | 6 |
| d | EIRP [dBm] | 61,3 |
| Imtuvas – vartotojo įranga | | |
| e | Vartotojo įrangos savitasis triukšmas [dB] | 7 |
| f | Temperatūrinis triukšmas [dBm] | -104,5 |
| g | Imtuvo bendrasis triukšmas [dBm] | -97,5 |
| h | SINR [dB] | -9 |
| i | Imtuvo jautrumas [dBm] | -106,5 |
| j | Interferencijos riba [dB] | 4 |
| k | Kontrolinio kanalo perdengimas [dB] | 1 |
| l | Imtuvo antenos stiprinimas [dBi] | 0 |
| m | Maksimalus galimas praradimas erdvėje [dB] | 162,8 |

$$EIRP = a + b - c = 46 + 21,3 - 6 = 61,3 \text{ dBm}, \quad (4.5)$$

$$g = e + f = 7 + (-104,5) = -97,5 \text{ dBm}, \quad (4.6)$$

$$i = g + h = -97,5 + (-9) = -106,5 \text{ dBm}, \quad (4.7)$$

$$m = d - i - j - k + l = 61,3 - (-106,5) - 4 - 1 + 0 = 162,8 \text{ dB}, \quad (4.8)$$

Slopinimą laisvoje erdvėje skaičiuosime pasinaudodami dažniausiai naudojamu, apgyvendintoms vietovėms skirtu *Okumura Hata* modeliu (4.9). Duomenys skaičiavimams imami iš Kaišiadorių – Pravieniškių ruožo, kadangi šis tarpstotis yra ilgiausias visoje linijoje, todėl ir slopinimas linijos viduryje bus didžiausias.

$$L_u = 69,55 + 21,16 \times \log(f) - 13,82 \times \log(h_b) - C_H + [44,9 - 6,55 \times \log(h_b)] \times \log(d) . \quad (4.9)$$

Čia:

L_u – nuostoliai erdvėje [dB]

h_b – bazinės stoties antenos aukštis [m]

f – perdavimui naudojamas dažnis [MHz]

d - atstumas nuo bazinės stoties iki vartotojo įrangos [km]

C_H – bazinės stoties antenos aukščio koregavimo faktorius [dB]

h_M – vartotojo įrangos antenos aukštis [m]

Bazinės stoties antenos aukščio koregavimo faktorius priklauso nuo vietovės apgyvendinimo. Kadangi aplink geležinkelio liniją labai tankiai apgyvendintų vietovių nėra, skaičiuodami naudosime mažai bei vidutiniškai tankiai apgyvendintų vietovių modelį

$$C_H = 0,8 + [1,1 \times \log(f) - 0,7] \times h_M - 1,56 \times \log(f), \quad (4.10)$$

Iš čia:

$$C_H = 0,8 + [1,1 \times \log(850) - 0,7] \times 4 - 1,56 \times \log(870) = 6,348 \text{ dB},$$

Įstatę reikšmes į formulę (4.9), gauname:

$$L_u = 69,55 + 21,16 \times \log(850) - 13,82 \times \log(50) - 6,35 + [44,9 - 6,55 \times \log(50)] \times \log(8) = 132,42 \text{ dB}.$$

Matome, jog nuostoliai erdvėje neviršija turimo energetinio biudžeto tiek aukštynkrypčio tiek žemynkrypčio ryšio atveju. Kadangi skaičiavimams panaudota problematiškiausia vieta, galime teigti, jog ir kituose tarpstočiuose bus užtikrinamas tinkamas galios balansas. Iš dalies tokios geros LTE tinklo energetinio biudžeto reikšmės gaunamos dėl naudojamos ortogonaliosios moduliacijos, kuri yra atspari interferencijai, todėl skaičiavimuose interferencijos slopinimo reikšmės yra mažesnės lyginant su GSM-R ar UMTS sistemomis.

4.5. Tinklo modeliavimas

Didelės spartos mobilųjų LTE tinklą projektuosime pasinaudodami Cellular Expert plėtiniu, kuris veikia ant ArcGIS programinės įrangos pagrindo. Šiam projektui įgyvendinti užsibrėžiame šiuos tikslus – geležinkelio linijoje pasiekti 100 Mb/s žemynkrypčio bei 20 Mb/s aukštynkrypčio ryšio spartą bei užtikrinti didesnę nei specifikacijose[12] nurodytą 95 % ryšio

užtikrinimo tikimybę (100 m intervale), kuri turi būti skaičiuojamas su šiomis RSRP reikšmėmis:

- -98 dBm, kai duomenys nėra kritinės reikšmės
- -95 dBm, kai traukinio greitis mažesnis arba lygus 220 km/h
- -95 dBm - -92 dBm, kai traukinio greitis iki 280 km/h

Šiuo metu maksimalus traukinių greitis Lietuvoje siekia 120 km/h, tačiau būtina atsižvelgti, kad greitis ateityje gali išaugti, todėl skaičiavimams naudosime -94 dBm reikšmę, kas leis užtikrinti traukinių greitį iki 280 km/h. Į šias signalo stiprumo reikšmes jau įskaičiuotas 6 dB galimas maksimalus slopinimas tarp antenos ir imtuvo (3dB įskaičiuoti dėl galimo slopinimo didėjimo dėl sistemos amžiaus). Šios reikšmės yra nustatytos dėl to, jog visada būtų užtikrinamas reikiamas signalo lygis imtuve. Be to, visada galima kompensuoti slopinimą parenkant anteną, kuri turėtų didesnę stiprinimą nei 0 dBi.

LTE tinkle 20 MHz kanalas turi 100 resursų bloką, kurių kiekvienas turi 168 simbolius per 1 ms, taigi iš viso per ms perduodama 16800 simbolių, arba 16,8 Msimb/s. Perduodamų bitų per simbolį skaičius priklauso nuo naudojamos moduliacijos – QPSK perduoda 2 bitus per simbolį, 16QAM – 4 bit/simb, 64 QAM 6 bit/simb. LTE tinklo palaikoma aukščiausio lygio moduliacija yra 64QAM, taigi turėdami šiuos duomenis galime apskaičiuoti maksimalias teorines 20 MHz kanalo spartas priklausomai nuo moduliacijos:

Naudojant QPSK moduliaciją gaunama $16,8 * 2 = 33,6 \text{ Mb/s}$ sparta

Naudojant 16QAM moduliaciją gaunama $16,8 * 4 = 67,2 \text{ Mb/s}$ sparta

Naudojant 64QAM moduliaciją gaunama $16,8 * 6 = 100,8 \text{ Mb/s}$ Sparta

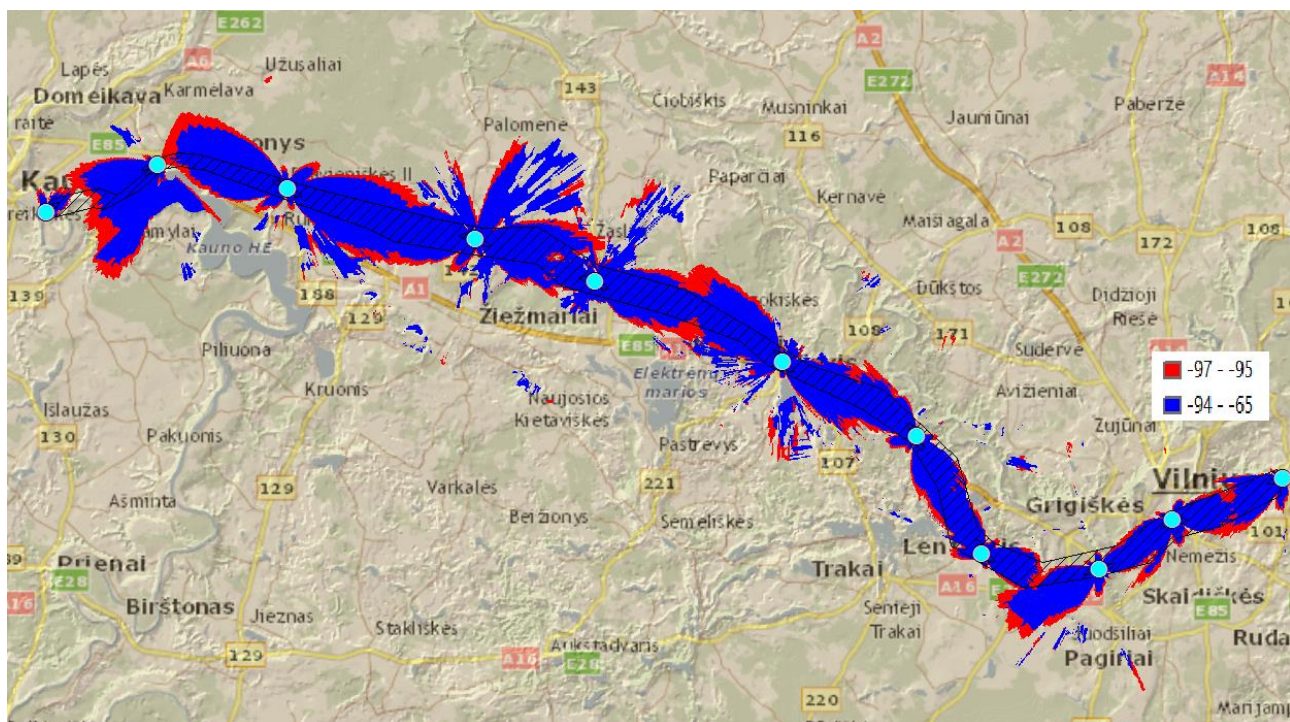
Jeigu panaudojama dar ir 4x4 MIMO technologija, maksimali teorinė sparta padidėja iki $100,8 * 4 = 403,2 \text{ Mb/s}$. Ši sparta galioja tik aukštynkrypčiam ryšiui, žemynkrypčiam ryšiui naudojama tik viena grandis, todėl teorinė sparta siekia 100,8 Mb/s.

Tačiau yra dar vienas rodiklis – kodavimo koeficientas, kuris nurodo moduliacijos efektyvumą. Jeigu naudojama 64QAM moduliacija su 0,5 kodavimo koeficientu, informacijos bus perduodami 3 bitai, o likę 3 bitai bus panaudoti perdavimo informacijai – kontroliavimui bei signalizavimui. Šiame projekte naudosime adaptyvinę (prisitaikančią prie signalo lygio) moduliaciją, kuri leidžia užtikrinti, kad bus išgaunama maksimali galima sparta prie esamo signalo lygio. Iš teorinių duomenų akivaizdu, jog nepavyks pasiekti reikiamų spartų su dabar naudojamais 4 MHz pločio kanalais, todėl modeliavimus atliksime laikydamiesi prielaidos, kad galimi naudoti 20 MHz pločio kanalai.

Pradinį modeliavimą atliekame su dabartinio GSM-R tinklo antenų parametrų reikšmėmis (stiprinimas, azimutas, palinkimo kampas). Šiuo modeliavimu sieksime išsiaiškinti ar parametrai tinkami LTE tinklo įdiegimui ar reikalingos kitokių parametrų antenos bei jų pozicijų pakeitimai. GSM-R tinklo duomenis pateikti 4.4 lentelėje

4.4 lentelė. Pagrindiniai GSM-R tinklo antenų duomenys

| Stoties pavadinimas | Bokšto aukštis, m | Sektorius | Azimutas | Antenos palinkimo kampas | Antenos stiprinimas, dBi | Antenos spindulio plotis |
|---------------------|-------------------|-----------|----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Naujoji Vilnia | 50 | 1 | 245°N | 3° | 17 | 34° |
| Vilnius | 50 | 1 | 80°N | 4° | 17 | 34° |
| | | 2 | 230°N | 3° | 17 | 34° |
| Paneriai | 40 | 1 | 65°N | 3° | 17 | 34° |
| | | 2 | 240°N | 4° | 17 | 34° |
| Lentvaris | 30 | 1 | 110°N | 5° | 17 | 34° |
| | | 2 | 330°N | 2° | 17 | 34° |
| Lazdėnai | 40 | 1 | 155°N | 4° | 17 | 34° |
| | | 2 | 315°N | 2° | 17 | 34° |
| Vievis | 40 | 1 | 120°N | 4° | 17 | 34° |
| | | 2 | 310°N | 1° | 17 | 34° |
| Žasliai | 50 | 1 | 110°N | 1° | 17 | 34° |
| | | 2 | 280°N | 8° | 17 | 34° |
| Kaišiadorys | 50 | 1 | 105°N | 2° | 17 | 34° |
| | | 2 | 275°N | 3° | 17 | 34° |
| Pravieniškės | 50 | 1 | 110°N | 2° | 17 | 34° |
| | | 2 | 290°N | 2° | 17 | 34° |
| Palemonas | 40 | 1 | 220°N | 1° | 17 | 34° |
| | | 2 | 235°N | 4° | 17 | 34° |
| Kaunas | 30 | 1 | 45°N | 8° | 17 | 34° |
| | | | | | | |

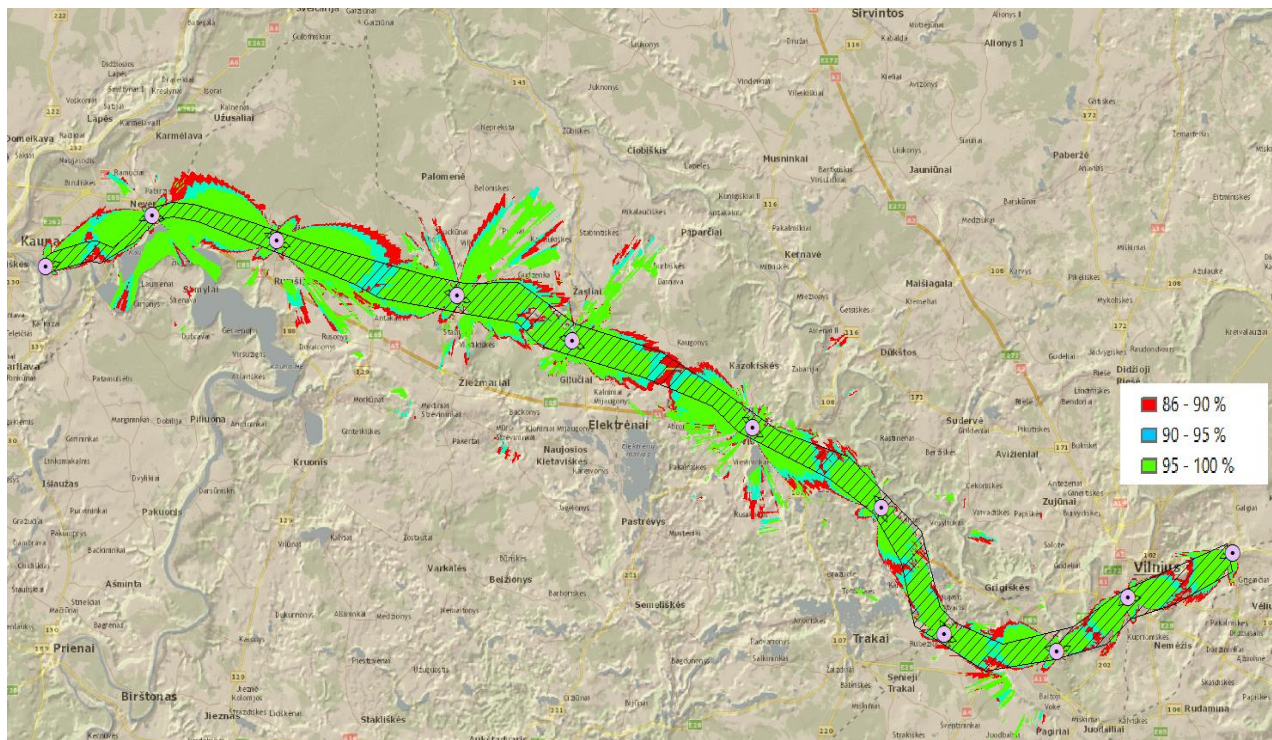


Pav. 4.15 LTE tinklo RSRP lygis panaudojus GSM-R tinklo duomenis

Iš Pav. 4.15 matyti, jog reikiamas signalo lygis neužtikrinamas kai kuriose apibrėžtos teritorijos dalyse (per mažą signalo lygį simbolizuoja raudona spalva). Taip pat iš pateikto vaizdo

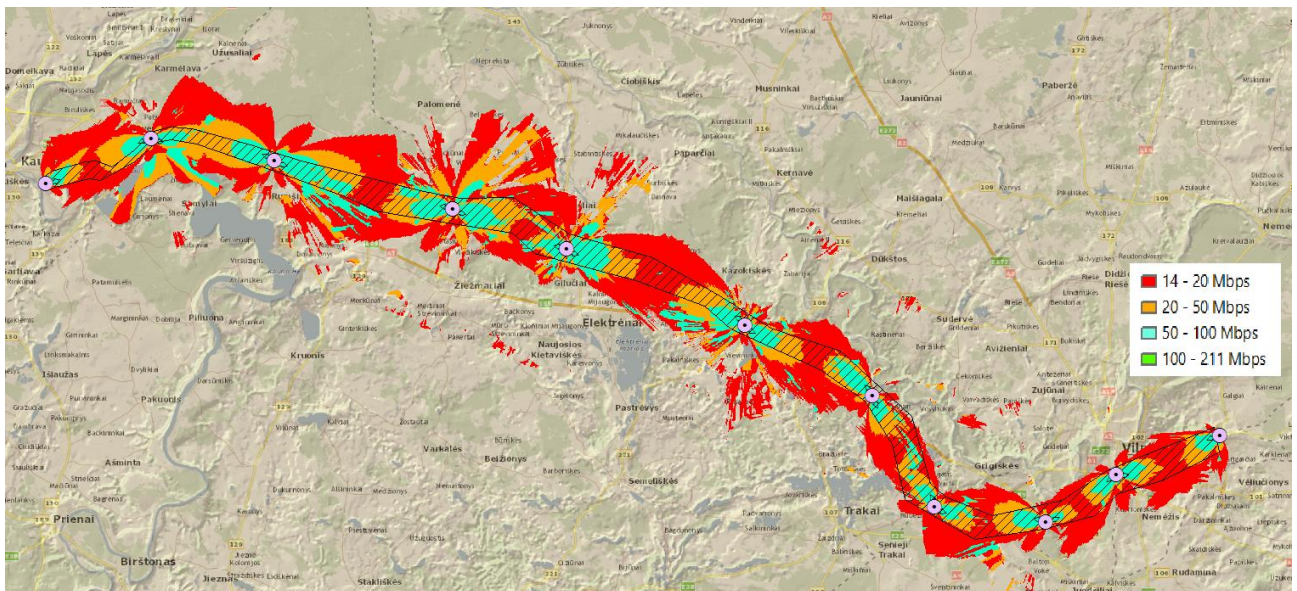
galime daryti išvadas, jog antenų kryptys kai kuriose bazinėse stotyse gali būti koreguotos, norint užtikrinti efektyviausią jų panaudojimą ir linijoje gauti didžiausią signalo lygį, kuris yra tiesiogiai susijęs su apibrėžtais tikslais – norima pasiekti sparta bei aprėpties užtikrinimu visoje teritorijoje.

Norėdami pasiekti geresnius rezultatus, programinės įrangos pagalba apskaičiuojame probleminių vietų azimutus bei antenų palinkimo kampus. Be to, šį kartą panaudosime antenas su didesniu stiprinimu – 21,3 dBi vietoj 17 dBi.



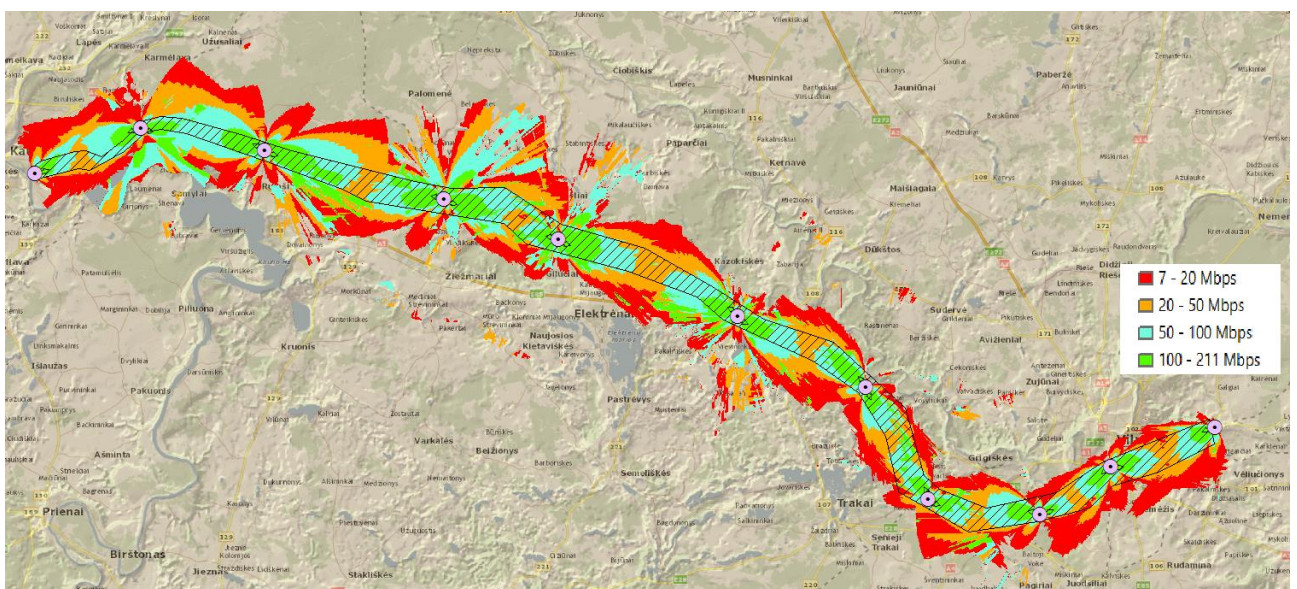
Pav. 4.16 Aprėpties užtikrinimo tikimybė pakeitus antenas bei jų kryptis

Pav. 4.16 pavaizduota ryšio užtikrinimo tikimybė, kuri pagal standartus turi būti ne mažesnė nei 95% prie anksčiau darbe nurodytų signalo lygio reikšmių. Matome, jog situacija lyginant su praeitu modeliavimu pagerėjo - tam įtakos turėjo parinkta didesnio stiprinimo antena bei tikslesnis azimuto bei antenų palinkimo kampų apskaičiavimas. Nors situacija ir pagerėjo, ryšio užtikrinimo tikimybė vis dar neatitinka reikiamos. Žalia spalva simbolizuoja vietas kur pasiektos tinkamos reikšmės, kitos spalvos parodo, jog reikšmės per mažos. Matome, jog beveik kiekviename tarpstotyje yra po nedidelį plotą, kuriame signalo lygis yra per mažas. Atliekame tinklo pralaidumo modeliavimą, kad būtų galima susidaryti vaizdą ar įmanoma pasiekti norimas spartas nedidinant bazinių stočių bei bokštų skaičiaus. Bokštų statyba bei papildomos bazinės stotys labai padidintų projekto įgyvendinimo kaštus, todėl ieškosime būdų to išvengti. Tinklo žemynkrypčio ryšio pralaidumo modeliavimas pateiktas Pav. 4.17.



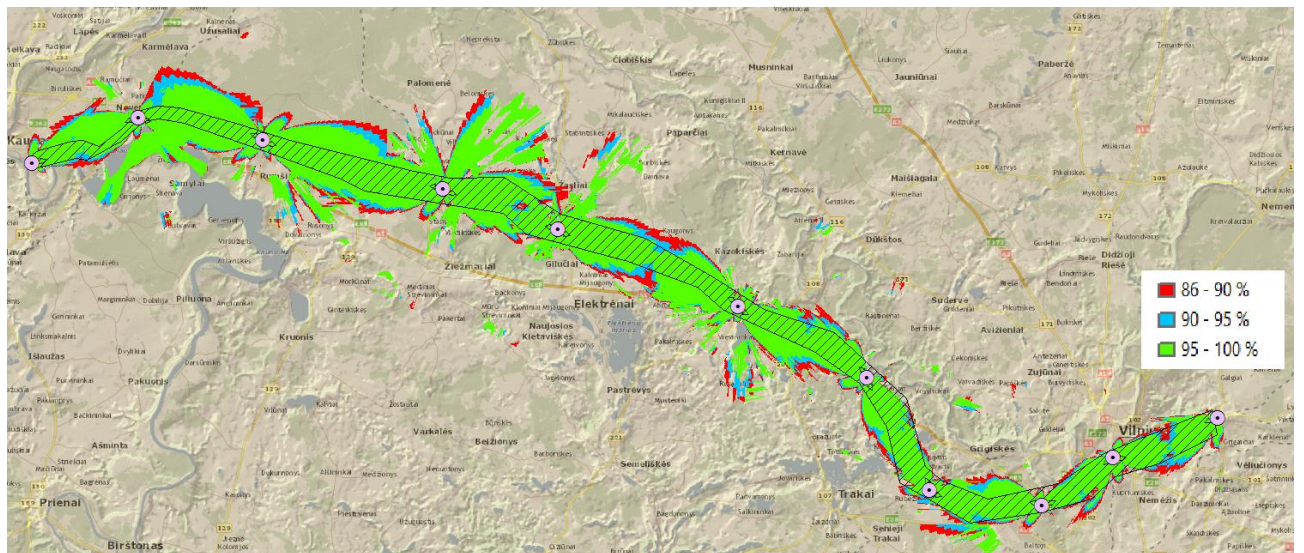
Pav. 4.17 Žemynkrypčio ryšio spartos

Iš Pav. 4.17 akivaizdu, kad užsibrėžtas spartos tikslas taip pat nepasiektas - didžiojoje dalyje apibrėžtos zonos vyrauja spartos iki 50 Mb/s, o 100 Mb/s sparta nepasiekama nė vienoje zonos dalyje. Tam, kad pasiektume užsibrėžtus tikslus, naudosime MIMO techniką, kuri leidžia padidinti signalo lygį bei tuo pačiu ir pralaidumą. Kitam modeliavimui naudosime 2x2 antenų konfigūraciją, kuri padidina ryšio spartą 1,9 karto bei padidina tinklo pateikiamumo lygį 3 dB.



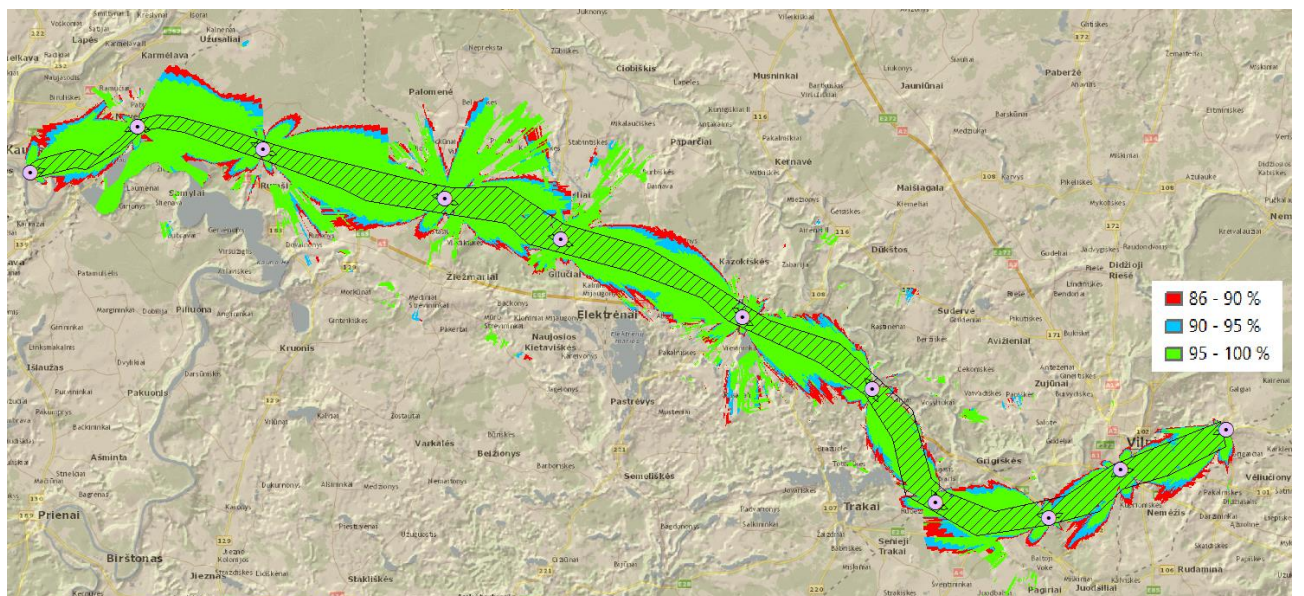
Pav. 4.18 Tinklo žemynkrypčio ryšio sparta su 2x2 antenų konfigūracija

Iš Pav. 4.18 matyti, jog tinklas su 2x2 MIMO antenų konfigūracija jau pasiekia spartas, viršijančias 100 Mb/s (žalia spalva), tačiau ne visame ruože. Ilgesniuose tarpstočiuose spartos vietomis neviršija 50 Mb/s.



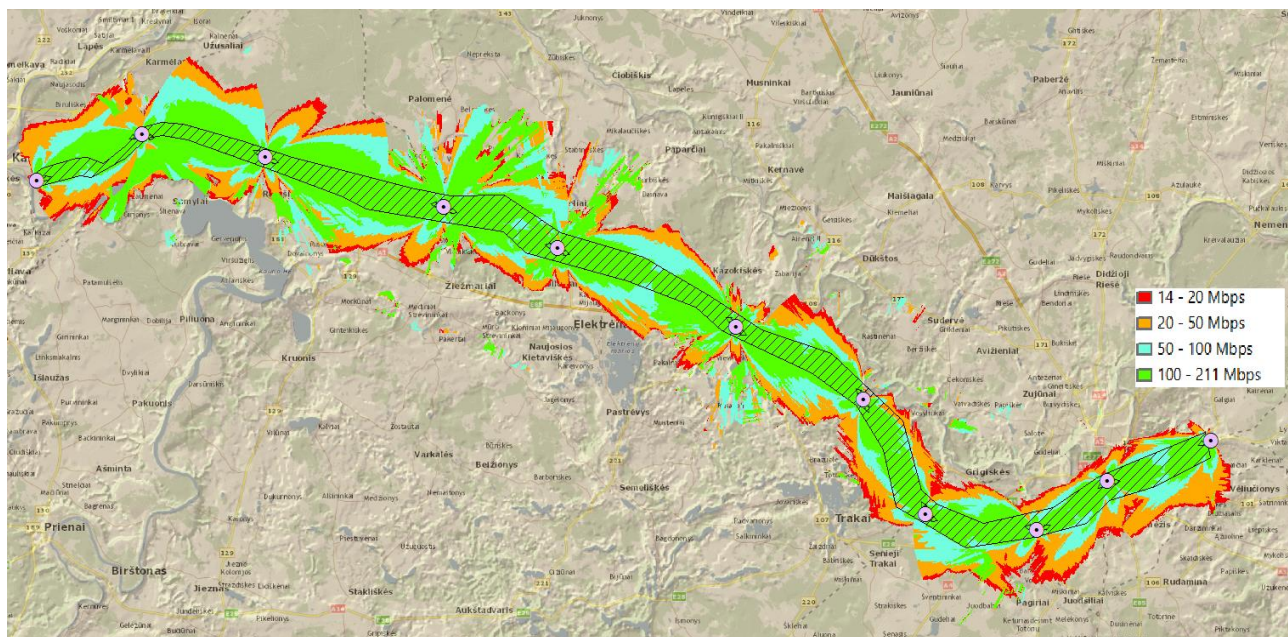
Pav. 4.19 Aprėpties užtikrinimo tikimybė su 2x2 antenų konfigūracija

Iš Pav. 4.19 matosi, jog pateikiamumo lygis beveik atitinka nustatytus reikalavimus, tačiau tarp Kaišiadorių ir Žašlių stočių yra nedidelis plotelis, kuriame pateikiamumas yra mažesnis už nustatytą minimalų. Kitam modeliavimui panaudosime didžiausią spartą bei pateikiamumą užtikrinančią 4x4 MIMO konfigūraciją. Ši konfigūracija teoriškai turėtų padidinti pralaidumą 3,8 karto bei padidina tinklo pateikiamumo lygį 6 dB, lyginant su standartinė konfigūracija.



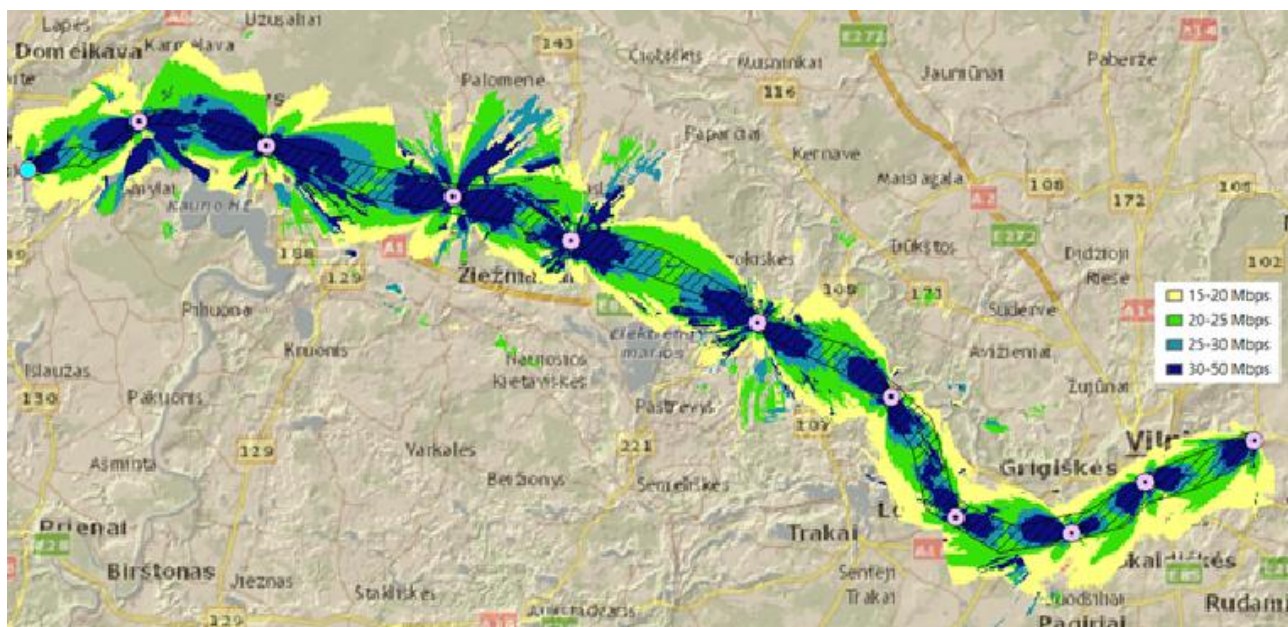
Pav. 4.20 Aprėpties užtikrinimo tikimybė su 4x4 antenų konfigūracija

Matome, jog reikiamas pateikiamumo lygis užtikrinamas visoje linijoje (žalia spalva padengė visą reikiamą plotą, taigi šį tikslą su 4x4 antenų konfigūracija pasiekėme.



Pav. 4.21 Tinklo žemynkrypčio ryšio sparta su 4x4 antenų konfigūracija

Iš Pav. 4.21 matyti, jog taip pat pasiekta reikiama sparta - visoje linijoje žemynkrypčio ryšio sparta viršija 100 Mb/s. Maksimali apskaičiuota sparta siekia 211 Mb/s, kai tuo tarpu maksimali teorinė LTE tinklo su 20 MHz kanalu sparta panaudojant 4x4 MIMO antenų konfigūraciją gali siekti ~300 Mb/s. Tokio rezultato šiame projekte pasiekti nepavyks dėl didelių atstumų tarp bazinių stočių, tačiau ir gautą spartą galime laikyti geru rezultatu, nes sparta pasiekta nedidinant bokštų bei bazinių stočių skaičiaus. Toliau atliekame žemynkrypčio ryšio spartos modeliavimą.



Pav. 4.22 Tinklo aukštnykrypčio ryšio sparta su 4x4 antenų konfigūracija

Panaudoję 20 MHz kanalą aukštnykrypčiam ryšiui, gavome spartas, atitinkančias užsibrėžtą tikslą. Visoje linijoje aukštnykrypčio ryšio spartą viršija 20 Mb/s didžiausia užfiksuota sparta viršija 30 Mb/s.

Atlikę modeliavimus, galime daryti išvadas, jog nors ir atstumai tarp esamų bokštų yra pakankamai dideli, tačiau, panaudojus didelio stiprinimo antenas, LTE tinklo diegimas yra galimas. Nustatyta, jog panaudojant esamus 4 MHz pločio kanalus didelės spartos pasiekti nepavyktų, todėl būtina ieškoti galimybės praplėsti naudojamų dažnių ruožą, kad būtų įmanoma panaudoti bent du 20 MHz kanalus. Įranga, naudojama projektui, parinkta taip, kad esant poreikiui padidinti tinklo talpą, būtų galima jos nekeičiant, o tik įdiegiant papildomus modulius, pereiti prie LTE-A standarto tinklo, kur yra galimybė apjungti kelis kanalus taip išgaunant ženkliai didesnes spartas. Modeliavimuose buvo panaudotas 850 MHz dažnis žemynkrypčiam ryšiui bei 930 MHz dažnis aukštynkrypčiam ryšiui. Kadangi pasiekti užsibrėžtą tikslą su šiais dažniais buvo pakankamai sunku (ilgesnėse atkarpose vietomis tinklo sparta tik neženkliai viršija minimalią), galime daryti išvadą, jog aukštesnių dažnių panaudojimas (pvz. 1.8 GHz) šiam projektui yra negalimas - dėl mažesnės aukštų dažnių skvarbos ilguose atstumuose būtų pastebimas didelis signalo silpimas, dėl ko sumažėtų ryšio užtikrinimo tikimybė bei duomenų perdavimo sparta. Aukštesnius dažnius panaudoti įmanoma tik pastačius papildomų bazinių stočių.

Užsibrėžtus tikslus pavyko pasiekti tik pakoregavus antenų palinkimo kampus ir azimutus bei panaudojus aukščiausią LTE tinkle galimą 64 QAM moduliaciją bei 4x4 MIMO antenų konfigūraciją, su mažiau antenų tikslo pasiekti nepavyko. Galutiniai duomenys, kuriuos naudojant buvo pasiekti užsibrėžti tikslai pateikti lentelėje.

4.5 lentelė Suprojektuoto tinklo duomenys

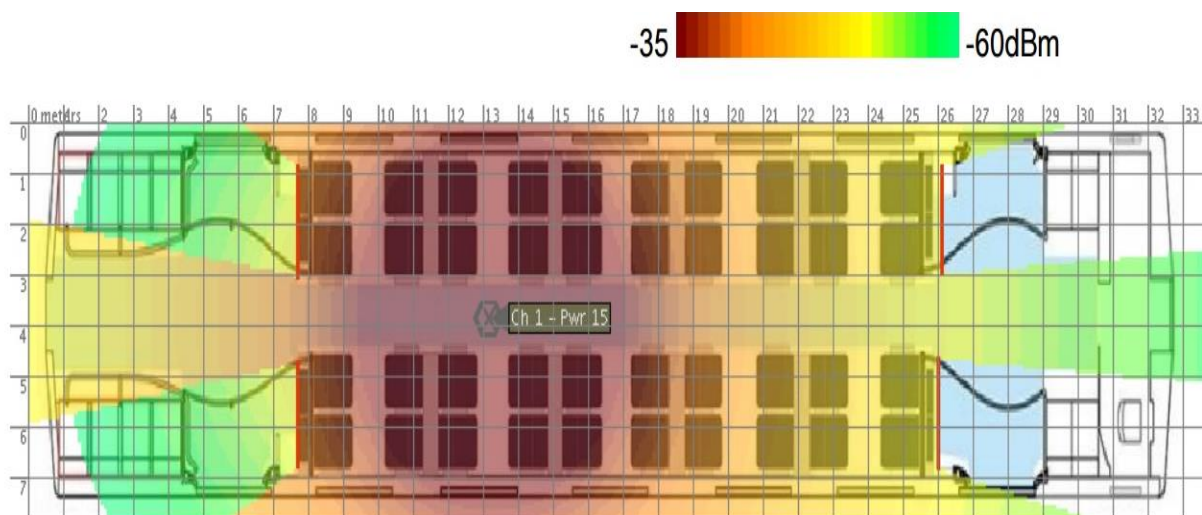
| Stoties pavadinimas | Bokšto aukštis, m | Sektorius | Azimutas | Antenos palinkimo kampas | Antenos stiprinimas, dBi | Antenos spindulio plotis | Antenų konfigūracija |
|---------------------|-------------------|-----------|----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|
| Naujoji Vilnia | 50 | 1 | 245°N | 3° | 21,3 | 33° | MIMO 4x4 |
| Vilnius | 50 | 1 | 80°N | 4° | 21,3 | 33° | MIMO 4x4 |
| | | 2 | 230°N | 3° | 21,3 | 33° | MIMO 4x4 |
| Paneriai | 40 | 1 | 65°N | 3° | 21,3 | 33° | MIMO 4x4 |
| | | 2 | 276,35°N | 0,78° | 21,3 | 33° | MIMO 4x4 |
| Lentvaris | 30 | 1 | 110°N | 5° | 21,3 | 33° | MIMO 4x4 |
| | | 2 | 330°N | 2° | 21,3 | 33° | MIMO 4x4 |
| Lazdėnai | 40 | 1 | 155°N | 4° | 21,3 | 33° | MIMO 4x4 |
| | | 2 | 315°N | 2° | 21,3 | 33° | MIMO 4x4 |
| Vievis | 40 | 1 | 120°N | 4° | 21,3 | 33° | MIMO 4x4 |
| | | 2 | 298,26°N | 0,41° | 21,3 | 33° | MIMO 4x4 |
| Žasliai | 50 | 1 | 110°N | 1° | 21,3 | 33° | MIMO 4x4 |
| | | 2 | 280°N | 8° | 21,3 | 33° | MIMO 4x4 |
| Kaišiadorys | 50 | 1 | 105°N | 2° | 21,3 | 33° | MIMO 4x4 |
| | | 2 | 275°N | 3° | 21,3 | 33° | MIMO 4x4 |
| Pravieniškės | 50 | 1 | 104,71°N | 0,63° | 21,3 | 33° | MIMO 4x4 |
| | | 2 | 290°N | 2° | 21,3 | 33° | MIMO 4x4 |
| Palemonas | 40 | 1 | 96,74°N | 0,66° | 21,3 | 33° | MIMO 4x4 |
| | | 2 | 235°N | 4° | 21,3 | 33° | MIMO 4x4 |
| Kaunas | 30 | 1 | 67,16°N | 0,35° | 21,3 | 33° | MIMO 4x4 |

Kad mobilusis ryšys veiktų visoje atkarpoje, būtina ryšį užtikrinti ir tunelyje. Tunelyje naudosime LTE tinklo kartotuvus, kurie bus statomi abiejuose tunelio galuose. Nors šis geležinkelio tunelis nėra ilgas, jis ties viduriu sukasi, todėl būtina kartotuvus, nukreiptus į tunelio pusę statyti abiejuose išoriniuose galuose.

4.6. Radijo įrangos dislokacijos vietos geležinkelio vagonė parinkimas

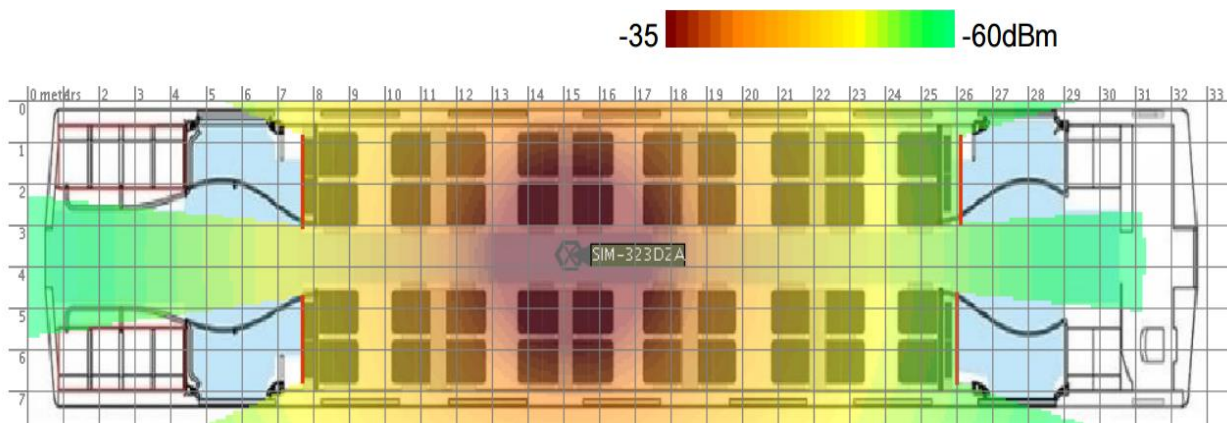
Renkant įrangos vietą vagonė, svarbiausia yra parinkti tinkamą antenos vietą. Antena turi būti iškelta ant traukinio stogo bei jos matomumo zonoje negali būti kitų objektų, kurie galėtų tapti kliūtimis sklindančioms bangoms. Taip pasiekiamas mažiausias signalo slopinimas, kas leidžia užtikrinti kuo didesnį ryšio pateikiamumą. Modemo pastatymo vieta vagonė nėra tokia svarbi, tačiau patogiausia įrangą įdiegti bei prižiūrėti bus, jeigu modemas nebus labai nutolęs nuo antenos. Prieigos taškas dėl patogumo montuojamas ant lubų, jį montuojant taip pat būtina atsižvelgti į galimą signalo silpimą (pvz. dėl metalinių pertvarų).

Nors iš anksčiau pateiktų duomenų matyti, jog 802.11ac standarto maršrutizatoriai gali veikti atstumu iki beveik 90 metrų, traukinio vagonė esančios metalinės pertvaros labai slopina signalą. Tam, kad įsitikintume ar naudojami prieigos taškai užtikrins viso traukinio vagono padengimą reikiamos galios signalu, panaudodami *Aerohive* programinę įrangą, atliekame modeliavimą. Pirmame modeliavime naudojamas 802.11ac standarto maršrutizatorius, veikiantis 2,4 GHz dažniu bei naudojantis 20 MHz pločio kanalą.



Pav. 4.23 Wi-Fi tinklo RSSI reikšmės, esant 2,4 GHz dažniui

Iš gautų duomenų matyti, kad prieigos tašką pastačius viduryje vagono, visoje sėdimoje zonoje užtikrinamos didesnės RSSI reikšmės nei minimali -60 dBm, kuri reikalinga stabiliam didelės spartos sujungimui. Didesnis signalo slopinimas pastebimas tik už metalinių pertvarų. Kitą modeliavimą atliekame naudodami 5 GHz dažnį.



Pav. 4.24 Wi-Fi tinklo RSSI reikšmės, esant 5 GHz dažniui

Iš gautų rezultatų matyti, kad naudojamas aukštesnis dažnis lemia didesnę signalo silpimą, tačiau reikiamas signalo lygis išlaikomas visoje sėdimoje traukinio vagono dalyje. Nors iš anksčiau darbe pateiktų duomenų matyti, kad 802.11ac standarto maršrutizatoriai gali veikti atstumu iki 90 m, šiame projekte tokių skaičių išgauti nepavyks dėl metalinės traukinio konstrukcijos, kuri lemia didelį signalo slopinimą. Taigi, nors teoriškai būtų galima vieną prieigos tašką panaudoti daugiau nei vienam vagonui padengti, dėl metalinių konstrukcijų įnešamo slopinimo kiekviename traukinio vagonė naudosime po atskirą prieigos tašką. Šie prieigos taškai su maršrutizatoriumi bus sujungiami nuosekliai UTP kabeliu, panaudojant *Ethernet* duomenų pernašos technologiją.

5. Ekonominis projekto vertinimas

Šiame skyriuje atliekami projekto ekonominiai skaičiavimai – tinklo diegimo ir eksploatacijos kaštai, atliekamos pelno/nuostolio prognozės bei apskaičiuojamas projekto atsiperkamumo laikas.

5.1. Tinklo diegimo kaštų skaičiavimas

Šį tinklo projektą sudaro 11 bazinių stočių, kurios iš viso turi 20 sektorių. Kiekvienam sektoriui reikalingos 4 RRU3841 dalys bei 2 signalo siuntimo/priėmimo antenos. Taigi, iš viso šiam projektui įgyvendinti reikia 11 bazinių stočių DBS3900, 80 RRU3841 įrenginių bei 40 siuntimo/priėmimo antenų. Tinklo branduolio daliai reikalingas EPC serveris bei NMS sistema, 20 traukinių bus montuojama signalo priėmimo ir paskirstymo įranga, taip pat kiekviename traukinyje bus sumontuoti 5 bevielės prieigos taškai. Lentelėje 5.1 pateiktos šios įrangos kainos bei nusidėvėjimo duomenys.

5.1 lentelė Viso tinklo realizavimui reikalinga įranga ir jos kiekiai

| Eil. Nr. | Turto pavadinimas | Poreikis, vnt. | Vieneto kaina, eur | Bendra suma, eur | Tarnavimo laikas, metais | Nusidėvėjimas per mėn, eur | Nusidėvėjimas per metus, eur |
|----------|-----------------------------|----------------|--------------------|------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 1 | DBS3900 | 11 | 3 500 | 38 500 | 20 | 160,42 | 1 925,00 |
| 2 | RRU3841 | 80 | 1 700 | 136 000 | 15 | 755,56 | 9 066,67 |
| 3 | BS siuntimo/priėmimo antena | 40 | 100 | 4 000 | 15 | 22,22 | 266,67 |
| 4 | EPC serveris | 1 | 112 000 | 112 000 | 20 | 466,67 | 5 600,00 |
| 5 | NMS | 1 | 54 000 | 54 000 | 20 | 225,00 | 2 700,00 |
| 6 | Priėmimo įranga traukinyje | 20 | 490 | 9 800 | 15 | 54,44 | 653,33 |
| 7 | Prieigos taškai | 100 | 146 | 14 600 | 8 | 152,08 | 1 825,00 |
| Viso: | | | | 368 900 | | 1 836,39 | 22 036,67 |

Kiekvienai tinklo daliai įdiegti taip pat reikalingi atitinkami finansiniai ištekliai – kainuoja montavimo darbai bei instaliacinės medžiagos. Montavimo darbų išlaidos pateiktos lentelėje 5.2

5.2 lentelė Tinklo įrangos įdiegimo kaštai

| Eil. Nr. | Darbas | Kiekis | Vnt. kaina, eur | Suma, eur |
|----------|--|--------|-----------------|-----------|
| 1 | Bazinės stoties įrangos diegimas | 11 | 3 500 | 38 500 |
| 2 | Tinklo branduolio diegimas | 1 | 15 400 | 15 400 |
| 3 | Signalų priėmimo/skirstymo įrangos diegimas traukinyje | 20 | 600 | 12 000 |
| 4 | Bevielės prieigos taškų montavimas | 50 | 100 | 5 000 |
| 5 | Instaliacinės medžiagos | | | 8 500 |
| Viso: | | | | 79 400 |

Iš lentelėse pateiktų duomenų matome, kad tinklo įranga projektui kainuoja 368 900 eurų, o įrangos diegimo kaštai yra 79 400 eurų, taigi viso tinklo įdiegimo kaštai siekia 448 tūkst. 300 eurų.

5.2. Projekto generuojamos pajamos

Šio projekto generuojamos pajamos yra sunku įvertinti, nes pajamos gaunamos ne tik parduodant su projektu susijusias paslaugas, tačiau ir iš keleivių pervežimo paslaugų. Naujasis modernus tinklas padidins pervežamų keleivių srautus dėl naujų paslaugų patrauklumo, todėl įvertinant projekto atsipirkimą būtina atsižvelgti ir į papildomas pajamas, gaunamas iš keleivių pervežimo paslaugų.

Pirmiausia skaičiuojame pajamas, kurias generuos naujos teikiamos paslaugos. Įmonės galimus pardavimus įvertiname 3 būdais: labiausiai tikėtiniu, optimistiniu ir pesimistiniu. Tikėtinos pardavimų prognozės – tai tokios prognozės, kurios būtų realiausios verslui įvertinus rinką, konkurentus, jų teikiamas paslaugas, kainą. Optimistinis pardavimų prognozavimas – tai toks prognozavimas, kai tikimasi, jog pardavimai bus labai dideli. Tokie pardavimai kelia ne tik įmonės pelną, bet tai būtų signalas, kad paslauga klientų yra vertinama teigiamai, o paslaugos yra kokybiškos. Pesimistinės pardavimo prognozės – tai tokios prognozės, kuriomis parodoma, kad įmonė turi susirūpinti teikiamos paslaugos efektyvumu.

Taip pat reikia įvertinti sąnaudas, kurios bus reikalingos tinklo eksploatavimo metu. Tinklo administravimui ir priežiūrai naujų darbo vietų sukurti neplanuojama – už tai atsakingi bus kitus tinklus prižiūrintys įmonės darbuotojai. Numatoma, jog per penkis ateinančius metus tinklo eksploatacinės sąnaudos (įskaitant komunalines paslaugas) neviršys 10 tūkstančių eurų per metus (50 tūkst. eurų per 5 metus). Įgyvendinus projektą planuojamos teikti paslaugos generuojančios pajamas – Wi-Fi prieigos taškų pagalba geležinkelio klientai galės naudotis internetu bei balso paslaugomis, panaudojant VoWi-Fi technologiją. Planuojami keturi paslaugos planai – Wi-Fi dienai, savaitei, mėnesiui ir metams. Ši paslauga turi nemažai perspektyvų – geležinkelio ruožuose dažnai neveikia mobilusis ryšys, todėl šio tinklo įdiegimas gali ne tik generuoti pajamas iš Wi-Fi paslaugų pardavimo, tačiau ir padidinti pajamas iš keleivių pervežimo, nes vartotojams geležinkelių paslaugos taptų patrauklesnės. Kadangi šis mobilusis tinklas diegiamas ne tik su tikslu generuoti pajamas, tačiau ir pačių geležinkelių vidiniam naudojimui, projekto atsiperkamumas nėra būtinas. Iš lentelių matome, jog pesimistinių prognozių atveju generuojamos pajamos per 5 metus tesiekia 105 000 eurų, kas padengia tinklo eksploatacines išlaidas, tačiau pilnas projekto atsipirkimas yra mažai tikėtinas. Labiausiai tikėtinių ir optimistinių prognozių atveju pajamos kelis kartus didesnės, taigi jos ne tik, kad atperka eksploatacines išlaidas, bet ir generuoja pelną. Taip padengiamos vidinio geležinkelių tinklo eksploatavimo išlaidos bei iš dalies padengiami tinklo diegimo kaštai.

5.3 lentelė Generuojamos pajamos remiantis labiausiai tikėtinomis prognozėmis

| Mokėjimo planas | Kaina, eur | Vartotojų skaičius per mėnesį | Suma per mėn. , eur | Suma per metus, eur |
|-----------------|------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| Wi-Fi dienai | 0,5 | 2 000 | 1 000 | 12 000 |
| Wi-Fi savaitei | 2 | 800 | 1 600 | 19 200 |
| Wi-Fi mėnesiui | 5 | 500 | 2 500 | 30 000 |
| Wi-Fi metams | 30 | 120 | 3 600 | 43 200 |
| Viso: | | 3 420 | 8 700 | 104 400 |

5.4 lentelė. Generuojamos pajamos remiantis optimistinėmis prognozėmis

| Mokėjimo planas | Kaina, eur | Vartotojų skaičius per mėnesį | Suma per mėn. , eur | Suma per metus, eur |
|-----------------|------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| Wi-Fi dienai | 0,5 | 4 000 | 2 000 | 24 000 |
| Wi-Fi savaitei | 2 | 1 400 | 2 800 | 33 600 |
| Wi-Fi mėnesiui | 5 | 800 | 4 000 | 48 000 |
| Wi-Fi metams | 30 | 200 | 6 000 | 72 000 |
| Viso: | | 6 400 | 14 800 | 177 600 |

5.5 lentelė. Generuojamos pajamos remiantis pesimistinėmis prognozėmis

| Mokėjimo planas | Kaina, eur | Vartotojų skaičius per mėnesį | Suma per mėn. , eur | Suma per metus, eur |
|-----------------|------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| Wi-Fi dienai | 0,5 | 800 | 400 | 4 800 |
| Wi-Fi savaitei | 2 | 200 | 400 | 4 800 |
| Wi-Fi mėnesiui | 5 | 100 | 500 | 6 000 |
| Wi-Fi metams | 30 | 15 | 450 | 5 400 |
| Viso: | | 1 115 | 1 750 | 21 000 |

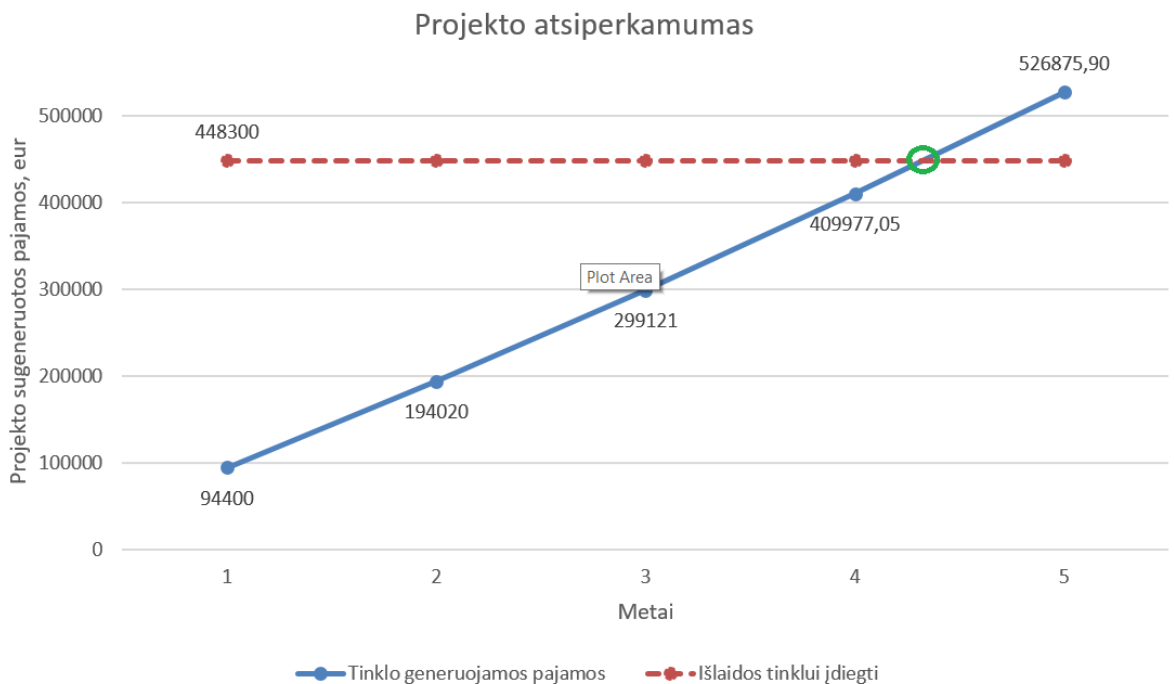
5.3. Projekto atsiperkamumo įvertinimas

Norint suskaičiuoti projekto atsiperkamumą, pirmiausia reikia suskaičiuoti generuojamas pajamas ilgalaikiame laikotarpyje. Skaičiuodami generuojamas pajamas per ilgalaikį laikotarpį laikomės nuostatos, kad pirmais metais paslaugos pardavimai atitiks labiausiai tikėtinas prognozes, o toliau kas metus vartotojų skaičius bei tuo pačiu ir pajamos didės po 5 %, lyginant su prieš tai buvusiais metais.

5.6 lentelė Projekto generuojamas pelnas

| | Pirmi metai | Antri metai | Treti metai | Ketvirtai metai | Penkti metai |
|---|-------------|-------------|-------------|-----------------|--------------|
| Generuojamos pajamos, eur | 104 400 | 109 620 | 115 101 | 120 856,05 | 126 898,85 |
| Išlaidos tinklo eksploatacijai, eur | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 |
| Pelnas, eur | 94 400 | 99 620 | 105 101 | 110 856,05 | 116 898,85 |
| Pelnas, sugeneruotas iki šio laikotarpio pabaigos | 94 400 | 194 020 | 299 121 | 409 977,05 | 526 875,90 |

Kadangi projektą įgyvendinti kainavo 448 300 eurų, kai pelnas pasiekia šią ribą, galime sakyti, jog projektas atsiperko.



Pav. 5.1 Projekto atsiperkamumas

Iš Pav. 5.1 diagramos matyti, jog tinklo diegimo kaštai atsiperks tarp ketvirtų ir penktų eksploatacijos metų. Kadangi mobilusis tinklas naudojamas ne tik paslaugoms keleiviams teikti, bet ir vidinėms įmonės reikmėms, galime sakyti, jog investicija yra gera bei greitai atsiperkanti. Mobilusis duomenų tinklas gali padėti sumažinti krovinių saugumui užtikrinti reikiamas lėšas, įgyvendinant IP kamerų projektą, taip pat tinklas turi visas reikiamas struktūrines dalis, jeigu atsirastų būtinybė esamą GSM-R tinklą išjungti ir pilnai pakeisti naujuoju LTE tinklu – tereikia tinkamai sukonfigūruoti tinklo įrangą bei įsigyti mobiliųjų vartotojų terminalų.

5.4. Projekto rizikos ir kokybės valdymas

Šis projektas dėl jo specifikos nėra rizikingas – tinklas diegiamas linijoje, kuri per metus perveža daugiausiai keleivių Lietuvoje – apie 1,2 mln., todėl net ir jeigu paslaugomis naudosis nedidelis procentas keleivių, šis projektas neš pelną. Be to, šis projektas yra naudingas pačiai įmonei – krovinių saugumo užtikrinimas dabar kainuoja didelius pinigus, todėl atsiradusi galimybė stebėti krovinius vaizdo kameromis gali ženkliai sumažinti saugumo užtikrinimo kaštus. Kadangi keleivių pervežimas įmonei yra nuostolinga veikla, papildomų paslaugų teikimas gali tapti puikia priemone pritraukti daugiau keleivių taip sumažinant nuostolius.

Projekto kokybės valdymas atliekamas keliais etapais – pirmiausia vykdomi darbuotojų apmokymai, kurie padės susipažinti su nauju tinklu, jame naudojama įranga, jos specifika,

galimais gedimais bei jų šalinimo būdais. Apmokymų rezultatai bus kontroliuojami baigiamuoju egzaminu, kurį išlaikę darbuotojai gaus leidimą dirbti su naująjį įranga. Egzamino neišlaikę darbuotojai bus papildomai apmokomi bei egzaminuojami tol, kol atitiks nustatytus reikalavimus. Kitas darbo kokybės užtikrinimo etapas yra organizuojama savaitės trukmės patikra, kurią atliks kompetentinga komisija. Šios patikros metu bus tikrinami vykdomi darbai, jų atitikimas reikalavimams, laikymasis darbų saugos taisyklėms bei kiti veiksniai. Kai naujasis tinklas bus įdiegtas, būtina atlikti jo kokybinius matavimus specialiais prietaisais ir įsitikinti ar tinklas veikia tinkamai, kokybiškas ryšys užtikrinamas visur ir ar tinklas atitinka nustatytus reikalavimus.

Pabaigus diegti tinklą, atlikus visus kokybinius matavimus, bei paruošus tinklo techninę dokumentaciją bus vykdoma techninė komisijos patikra, kuria bus vertinamas tinklo užbaigtumas, ar visi darbai yra atlikti iki galo bei išbandomas tinklas, tikrinama QoE. Pasibaigus techninei komisijai bei ištaisius visus jos nustatytus trūkumus pradedamas projekto uždarymo etapas.

Išvados

1. LTE technologija projektui įgyvendinti pasirinkta dėl didelio jos populiarumo, aiškaus evoliucionavimo kelio, paprastos tinklo struktūros bei plačių galimybių. Visos šios priežastys lemia, jog suprojektuotas tinklas bus pigus įdiegti, paprastas eksploatuoti bei, atsiradus poreikiui jį praplėsti, lengvai atnaujinamas.
2. Esama GSM-R tinklo infrastruktūra šiame geležinkelio ruože yra tinkama LTE tinklo įdiegimui, tačiau turimi du dažnių ruožai po 4 MHz yra per siauri, norint pasiekti spartas, kurios galėtų patenkinti keleivių bei įmonės poreikius.
3. Suprojektuotas tinklas, panaudojus 64QAM moduliaciją, 20 MHz pločio kanalus ir 4x4 MIMO antenų konfigūraciją, yra pajėgus visoje linijoje užtikrinti ne mažesnę nei 100 Mb/s žemynkrypčio ir 20 Mb/s aukštynkrypčio ryšio spartą. Didžiausia pasiekta sparta yra 211 Mb/s aukštynkrypčiame ryšyje.
4. Atlikus belaidės prieigos taškų aprėpties modeliavimą nustatyta, jog prieigos taškus būtina statyti kiekviename vagone, nes metalinės traukinio konstrukcijos stipriai slopina perduodamą signalą.
5. Atlikus ekonominius vertinimus nustatyta, kad tinklo įdiegimo kaštai yra 448 300 eurų, eksploatacija kiekvienais metais kainuos 10 000 eurų. Labiausiai tikėtinas projekto atsipirkimo laikas – tarp ketvirtų ir penktų eksploatacijos metų.
6. Šis projektas įmonei ekonomiškai naudingas ne tik dėl bevielės interneto prieigos paslaugos pardavimų, tačiau ir dėl galimo su kitomis teikiamomis paslaugomis susijusių išlaidų sumažėjimo.

Literatūros sąrašas

1. Standards of Future Railway Wireless Communication, 2013 [žiūrėta 2015-05-04]. Prieiga per internetą: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2014/Tenerife/INFORM/INFORM-50.pdf>
2. UIC Project EIRENE (2010), Functional Requirements Specification. [žiūrėta 2015-05-08]. Prieiga per internetą: http://www.uic.org/IMG/pdf/eirene_frs_v7.pdf
3. Huawei LTE for Rail technical white paper, 2014 [žiūrėta 2015-04-25]. Prieiga per internetą: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2014/Tenerife/INFORM/INFORM-50.pdf>
4. Jaime Calle-Sanchez, Mariano Molina-Garcia & José I. Alonso, Top Challenges of LTE to become Next Generation Railway Communication System. 2014 [žiūrėta 2015-05-25]. Prieiga per internetą: <http://www.witpress.com/e-library/wit-transactions-on-the-built-environment/127/23852>
5. 802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi Cisco Technical White Paper, 2014 [žiūrėta 2015-05-04]. Prieiga per internetą: http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/white_paper_c11-713103.html
6. Nacionalinė RRT dažnių paskirstymo lentelė, 2015 [žiūrėta 2015-04-25]. Prieiga per internetą: <http://www.rrt.lt/rrt/download/10393/ndpl-rm.doc>
7. Evolved Packet Core whitepaper, 3GPP. [žiūrėta 2015-06-14]. Prieiga per internetą: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core>
8. Mustafa Ergen. Mobile Broadband, Including WiMAX and LTE. e-ISBN: 978-0-387-68192-4, [žiūrėta 2015-04-25]. Prieiga per internetą: <http://www.springer.com/fr/book/9780387681894>
9. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 36.104 version 9.4.0 Release 9).
10. ITU H.264 recommendation for AVC coding [žiūrėta 2015-11-20]. Prieiga per internetą: <http://www.itu.int/rec/T-REC-H.264/>
11. Alain Bertout, Eric Bernard, Next generation of railways and metros wireless communication systems, [žiūrėta 2015-10-14]. Prieiga per internetą: <http://www.irse.org/knowledge/publicdocuments/3.10%20Bertout%20-%20Next%20generation%20of%20railways%20and%20metros%20wireless%20communications.pdf>

12. LTE for Railways: Impact on Performance of ETCS Railway Signaling, [žiūrėta 2015 m. spalio 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6807723>
13. J. Salo, M. Nur-Alam, K. Chang. Practical Introduction to LTE Radio Planning. [žiūrėta 2015 m. spalio 10 d.]. Prieiga per internetą: http://digitus.itk.ppke.hu/~takacsgy/lte_rf_wp_02Nov2010.pdf
14. Steffen Amundsen, Future Rail Communication - Implementation Scenarios for LTE. [žiūrėta 2015 m. spalio 16 d.]. Prieiga per internetą: <http://daim.idi.ntnu.no/masteroppgaver/009/9290/masteroppgave.pdf>
15. Huber railway antenna. [žiūrėta 2015 m. spalio 16 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.hubersuhner.com/en/Recent-Products/SENCITY-Rail-Mimo>
16. eNodeB LTE FDD V100R005 Product Description, Huawei, 2013. [žiūrėta 2015 m. lapkričio 27 d.]. Prieiga per internetą: https://www.academia.edu/4944715/eNodeB_LTE_FDD_V100R005_Product_Description_Confidential_Information_of_Huawei_No_Spreading_Without_Permission
17. Andrew LBX antenna parameters and diagrams, [žiūrėta 2015 m. spalio 28 d.]. Prieiga per internetą: http://www.commscope.com/catalog/andrew/product_details.aspx?id=15661
18. Huawei LTE network equipment solutions, [žiūrėta 2015 m. spalio 16 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.huawei.com>
19. Selecom LTE network repeater brochure, [žiūrėta 2015 m. gruodžio 15 d.]. Prieiga per internetą: http://www.selecom.fr/documents/010025E-DAT_Digirep_Mono_GB.pdf