



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**OTT vaizdo paslaugų perdavimo mobiliaisiais tinklais
kokybės tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Mantas Macaitis

Projekto autorius

Doc. dr. Vitas Grimaila

Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

OTT vaizdo paslaugų perdavimo mobiliaisiais tinklais kokybės tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektronikos inžinerija (6211EX012)

Mantas Macaitis

Projekto autorius

Doc. dr. Vitas Grimaila

Vadovas

Doc. dr. Paulius Tervydis

Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Mantas Macaitis

OTT vaizdo paslaugų perdavimo mobiliaisiais tinklais kokybės tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, **Manto Macaičio**, baigiamasis projektas tema „OTT vaizdo paslaugų perdavimo mobiliaisiais tinklais kokybės tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir 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 nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

Mantas Macaitis

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Macaitis, Mantas. *OTT vaizdo paslaugų perdavimo mobiliaisiais tinklais kokybės tyrimas*. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Doc. dr. Vitas Grimaila; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Elektronikos inžinerija, inžinerijos mokslai

Reikšminiai žodžiai: *mobiliesi tinklai, OTT, LTE*.

Kaunas, 2020. 57 p.

Santrauka

Šiame magistro baigiamajame darbe atliekamas *OTT* vaizdo paslaugų perdavimo mobiliaisiais tinklais kokybės tyrimas. Šis tyrimas atliekamas *OTT* vaizdo paslaugų, perduodamų mobiliojo ryšio tinklu, reikšmingų ryšio kokybės ir tinklo apkrovos parametrų tyrimu, mobiliojo ryšio tinklo operatoriaus vaizdo perdavimo paslaugų galimybių įvertinimu bei mobiliojo ryšio tinklo modelio sukūrimu, pritaikant mobiliojo ryšio tinklo pagerinimo sprendimus perduodant *OTT* vaizdo paslaugas.

Pirmojoje darbo dalyje apžvelgiama *OTT* problematika ir reikšmingi parametrai *OTT* vaizdo paslaugų perdavimui mobiliuoju ryšiu. Antrojoje dalyje atliekamas mobiliojo ryšio tinklo *OTT* vaizdo paslaugų perdavimo galimybių tyrimas, kurio metu gautų rezultatų pagrindu sukuriamas *LTE* tinklo modelis.

Trečiojoje dalyje sukuriamas *LTE* mobiliojo ryšio tinklo modelis *OTT* vaizdo perdavimo paslaugų kokybės parametrų įvertinimui ir pritaikomi du tinklo kokybės pagerinimo sprendimai. Pirmuoju sprendimu pritaikoma grupinio transliavimo technologija, o antruoju sprendimu pritaikomas aukštesnio prioriteto priskyrimas *OTT* paslaugų vartotojams mobiliajame tinkle, perskirstant tinklo resursus aukštesnio prioriteto vartotojams, žemesnio prioriteto vartotojų sąskaita. *LTE* mobiliojo ryšio modelis sukuriamas panaudojant *NS-3* atvirtojo kodo diskretinių interneto įvykių modeliavimo programą.

Macaitis, Mantas. Investigation of the OTT video services quality over mobile networks. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. dr. Vitas Grimaila; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics Engineering, Engineering Sciences.

Keywords: *mobile networks, OTT, LTE*.

Kaunas, 2020. 57 p.

Summary

The present Master's thesis introduces the investigation of *OTT* video services quality over mobile networks. The investigation implemented for *OTT* video streaming services over mobile networks significant radio network quality and network traffic load parameters research, mobile internet service provider video streaming services opportunity to provide different quality video services evaluation and creation of mobile network model, applying mobile network improvement solutions for *OTT* video streaming services.

Part one of the paper discusses issues of *OTT* and significant parameters for *OTT* video streaming over mobile networks. Part two is performed research of significant parameters for *OTT* video streaming services over mobile network. The results are used for *LTE* mobile network model development.

The part three is developed *LTE* mobile network model for evaluation of significant parameters for *OTT* video streaming over mobile networks. Model is customized according two improvement solutions. First solution is applying multicast technology, second solution is applying higher priority for *OTT* video streaming services users in the account of lower priority users. Mobile network is distributing network resources for higher priority users. *LTE* mobile network model is developed using *NS-3* discrete events simulation program.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Literatūros analizė ir problematika.....	11
1.1. Problematika.....	11
1.2. <i>OTT</i> paslaugų analizė	13
1.3. Didžiausi <i>OTT</i> vaizdo paslaugų tiekėjai.....	13
1.4. Vaizdo kokybės reikalavimai	15
1.5. Mobiliojo ryšio tinklai.....	16
2. <i>LTE</i> Mobiliojo ryšio tinklo kokybės parametrų analizė.....	17
2.1. Radijo ryšio parametrų analizė.....	17
2.2. Pralaidumas	17
2.3. Vėlinimas ir vėlinimo fluktuacija.....	18
2.4. Paketų praradimo santykis.....	18
2.5. Vaizdo paslaugų kokybė.....	19
3. Mobiliojo ryšio tinklo <i>OTT</i> vaizdo paslaugų galimybių tyrimas.....	21
3.1. Mobiliojo ryšio tinklo <i>OTT</i> vaizdo paslaugų galimybių tyrimo algoritmas.....	21
3.2. Mobiliojo ryšio kokybės ir tinklo apkrovos parametrų matavimas.....	22
3.3. <i>OTT</i> vaizdo paslaugų kokybės teikimo mobiliojo ryšio tinklu galimybių įvertinimas	23
3.4. Mobiliojo ryšio kokybės parametrų matavimo rezultatai.....	24
3.5. Mobiliojo tinklo apkrovos parametrų matavimo rezultatai	25
3.6. <i>OTT</i> vaizdo paslaugų kokybės teikimo galimybių įvertinimo rezultatai.....	29
3.7. Tyrimo išvados	30
4. Tinklo modelio sudarymas.....	32
4.1. Tinklo modelio algoritmo sudarymas.....	33
4.2. <i>OTT</i> paslaugų kokybės pagerinimo būdai	34
4.3. Scenarijų aprašymas	34
4.4. Mobiliojo ryšio tinklo kokybės parametrų modeliavimo rezultatai	35
4.5. Mobiliojo ryšio tinklo apkrovos parametrų modeliavimo rezultatai.....	36
4.6. Rezultatų apibendrinimas	39
5. Tyrimo ir modeliavimo rezultatų palyginimas	40
Išvados	41
Literatūros sąrašas	43
Priedai.....	46
1 priedas. <i>LTE</i> tinklo modelio <i>NS-3</i> programos kodas.....	46

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Populiariausių <i>OTT</i> vaizdo paslaugų tiekėjų palyginimas	15
1.2 lentelė. Vaizdo įrašų kokybės perdavimo reikalavimai	15
2.1 lentelė. Mobiliojo <i>LTE</i> ryšio kokybės parametrai [15]	17
2.2 lentelė. <i>OTT</i> vaizdo paslaugų parametrų reikalavimai [6]	20
2.3 lentelė. Vaizdo paslaugų peržiūros kokybės rodiklio <i>MOS</i> reikšmės [31]	20
3.1 lentelė. Tyrimui naudotų mobiliųjų telefonų parametrai	22
3.2 lentelė. <i>OTT</i> vaizdo paslaugų kokybės teikimo galimybių įvertinimo rezultatai.....	29
4.1 lentelė. Pradiniai modelio parametrai	34
5.1 lentelė. Maksimalios apkrovos metu tyrimo ir modelio rezultatų palyginimas	40

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Interneto paslaugų sukuriama srauto dalis [2, 3]	11
1.2 pav. Interneto praleisto laiko naudojant mobilųjį ir fiksuotą ryšį palyginimas [4]	12
1.3 pav. <i>OTT</i> vaizdo paslaugų populiarumas JAV [8]	14
3.1 pav. Mobiliojo ryšio tinklo <i>OTT</i> vaizdo paslaugų galimybių tyrimo algoritmas.....	21
3.2 pav. <i>OTT</i> paslaugų tyrimo įrangos sujungimo schema	23
3.3 pav. <i>RSRP</i> rezultatai savaitės eigoje	24
3.4 pav. <i>RSRQ</i> rezultatai savaitės eigoje	24
3.5 pav. <i>SINR</i> rezultatai savaitės eigoje	25
3.6 pav. Mobiliojo ryšio perdavimo sparta savaitės eigoje	26
3.7 pav. Mobiliojo ryšio vėlinimas savaitės eigoje	27
3.8 pav. Trečiadienio vidutinės perdavimo spartos ir vėlinimo palyginimas	27
3.9 pav. Mobiliojo ryšio vėlinimo fluktuacija savaitės eigoje	28
3.10 pav. Mobiliojo ryšio paketų praradimas savaitės eigoje	29
3.11 pav. <i>OTT</i> vaizdo įrašų peržiūros paslaugų įvertinimas	30
4.1 pav. <i>LTE</i> tinklo topologija naudota modelio sudarymui	32
4.2 pav. Modeliavimo algoritmas	33
4.3 pav. <i>RSRP</i> rezultatai	35
4.4 pav. <i>SINR</i> rezultatai	35
4.5 pav. Perdavimo spartos rezultatai	36
4.6 pav. Pradinio scenarijaus, be <i>OTT</i> prioriteto, vartotojų perdavimo spartos pasiskirstymas	37
4.7 pav. Antro scenarijaus, su <i>OTT</i> prioritetu, vartotojų perdavimo spartos pasiskirstymas.....	37
4.8 pav. Vėlinimo rezultatai	38
4.9 pav. Vėlinimo fluktuacijos rezultatai	38
4.10 pav. Paketų praradimo rezultatai	39

Santrumpų ir terminų sąrašas

3G – trečiosios kartos mobiliojo ryšio technologija (angl. *Third generation*).

4K UltraHD – labai aukštos raiškos vaizdo kokybė, kai vaizdo rezoliucija yra 3840 x 2160 pikselių (angl. *4K Ultra-high-definition*).

5G – penktosios kartos mobiliojo ryšio technologija (angl. *Fifth generation*).

8K UltraHD – labai aukštos raiškos vaizdo kokybė, kai vaizdo rezoliucija yra 7680 × 4320 pikselių (angl. *8K Ultra-high-definition*).

FullHD – aukštos kokybės raiškos vaizdo kokybė, kai vaizdo rezoliucija yra 1920 x 1080 pikselių (angl. *Full-high-definition*).

GSM – globalus mobilių telefonų ryšio standartas (angl. *Global System for Mobile communication*).

HD – aukštos kokybės raiškos vaizdo kokybė, kai vaizdo rezoliucija yra 1280 x 720 pikselių (angl. *High-Definition*).

IPTV – televizijos duomenų transliavimas interneto protokolu (angl. *Internet Protocol Television*).

ISP – interneto ryšio tiekėjas (angl. *Internet Service Provider*).

LTE – ketvirtosios kartos mobiliojo ryšio technologija (angl. *Long-term-evolution*).

OTT – vaizdo, garso ar kitų duomenų perdavimo paslauga, atliekama interneto protokolu, kai interneto ryšio tiekėjas neatsako už duomenų turinį, bet tik už duomenų ryšio užtikrinimą (angl. *Over-The-Top*).

QoE – vartotojo patirtis (angl. *Quality-of-Experience*).

QoS – paslaugos kokybė (angl. *Quality-of-Service*).

RSRP – priimto atraminio signalo galia (angl. *Received Signal Reference Power*).

RSRQ – priimto atraminio signalo kokybė (angl. *Reference Signal Received Quality*).

SD – įprastos raiškos vaizdo kokybė (angl. *Standard-Definition*)

SINR – signalo ir interferencijos su triukšmu santykis (angl. *Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio*).

SMS – trumposios žinutės (angl. *Short-Messages-Service*)

VoIP – balso perdavimo paslauga naudojant interneto protokolus (angl. *Voice-over-IP*)

VoLTE – balso perdavimo paslauga naudojant mobiliojo ryšio LTE technologiją (angl. *Voice-over-LTE*).

Ivadas

Sparčiai tobulėjant technologijoms neišvengiamai tobulėja ir telekomunikacijos, tai lemia didesnę vartotojų kiekį ir jų sukuriamą duomenų srautą. Vartotojai yra suinteresuoti gauti geresnės ir aukštesnės kokybės paslaugas už mažesnę kainą, todėl ieško alternatyvų. *OTT* (angl. *Over-The-Top*) paslaugos vartotojams gali pasiūlyti pigiau aukštesnės kokybės įprastus skambučius ar žinutes siųsti internetu, nevaržomai domėtis karščiausiomis naujienomis ir stebėti tiesioginius vaizdo įrašus.

Transliavimo srityje *OTT* yra vaizdinės, garsinės ar kitokios informacijos perdavimas internetu, be tiesioginio ryšio tiekėjo (toliau – *ISP*, angl. *Internet Service Provider*) turinio tikrinimo ar kontroliavimo. Šiuo atveju, mobiliojo ryšio operatoriai atsakingi tik už turinio perdavimą interneto protokolu, o ne už patį turinį, autorių teises, peržiūros galimybes.

Pavyzdžiui, žiūrimas vaizdo įrašas *Youtube* socialiniame tinkle, telefone naudojantis mobiliuoju ryšiu yra vienas iš *OTT* vaizdo paslaugų atvejų. Už duomenų turinį yra atsakingas turinio tiekėjas *Youtube*, už duomenų ryšio užtikrinimą – mobiliojo ryšio tiekėjas. Kitas pavyzdys yra *IPTV*, kai perkama interaktyviosios televizijos paslauga ar filmas iš mobiliojo ryšio kompanijos *Telia*. Ryšio tiekėjas yra atsakingas tiek už parduodamą turinį, tiek už ryšio užtikrinimą, tai jau ne *OTT* paslauga. Todėl labai svarbu apibrėžti, kurios paslaugos yra priskiriamos *OTT*, o kurios ne.

OTT terminas aprašomas, kaip vaizdo, garso ar kitų duomenų perdavimo paslauga, atliekama interneto protokolu, kai interneto ryšio tiekėjas atsako už duomenų ryšio užtikrinimą, bet ne už duomenų turinį. Perduodant *OTT* vaizdo įrašų paslaugas internetu, labai svarbu užtikrinti aukštą perdavimo spartą, ryšio vėlinimą ir kitus kokybės parametrus pasirinktai vaizdo kokybei. Šiuo metu tobulėjant technologijoms, populiarėja vis aukštesnės kokybės vaizdo įrašai, užtikrinti kokybišką jų perdavimą mobiliuoju ryšiu tampa vis didesne problema [1].

Šio darbo tikslas – ištirti mobiliaisiais tinklais perduodamų *OTT* paslaugų reikšmingus kokybės parametrus.

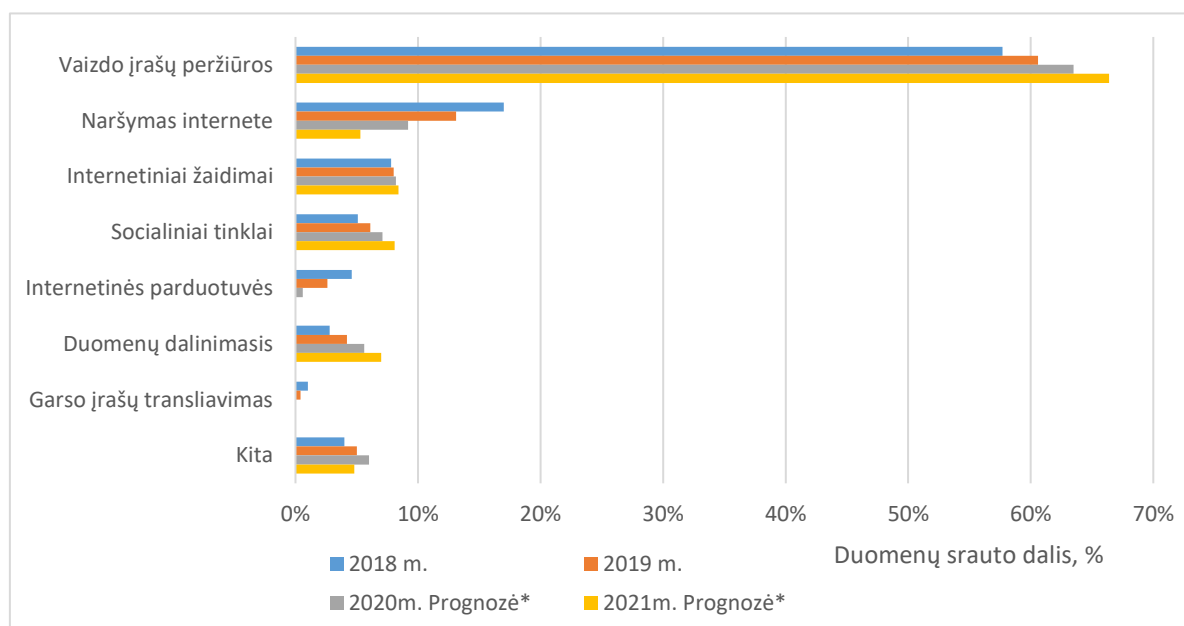
Išskiriami šio darbo uždaviniai:

- išanalizuoti *OTT* paslaugų problematiką ir literatūrą;
- išanalizuoti *OTT* vaizdo paslaugoms teikti reikšmingų mobiliojo ryšio kokybės parametrus;
- sudaryti *OTT* vaizdo paslaugoms teikti mobiliuoju ryšiu reikšmingų kokybės parametru tyrimo algoritmą;
- atlikti *OTT* vaizdo paslaugų perdavimo mobiliaisiais tinklais kokybės parametru tyrimą;
- sudaryti mobiliojo ryšio tinklo modelio algoritmą;
- atlikti mobiliojo ryšio tinklo modeliavimą;
- palyginti gautus rezultatus.

1. Literatūros analizė ir problematika

1.1. Problematika

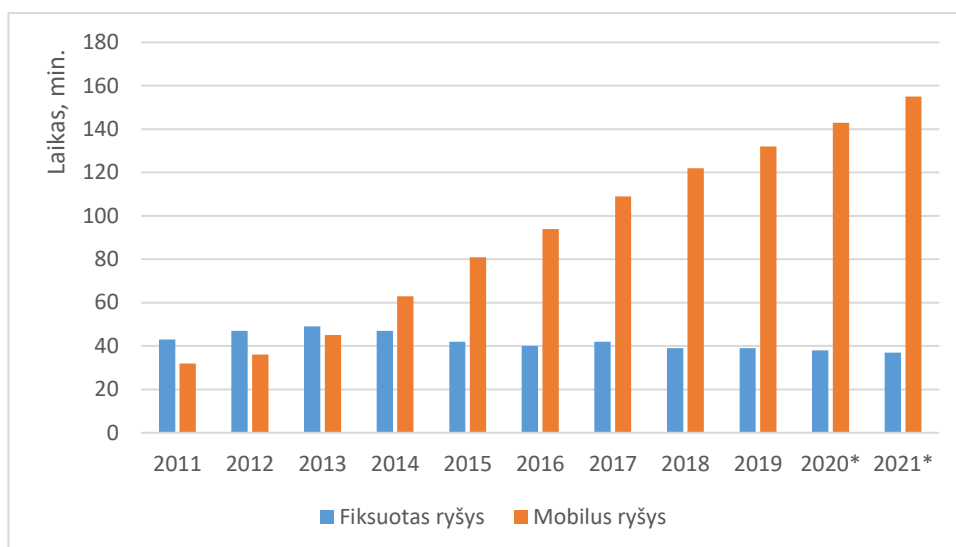
2018 m. *Variety* kompanijos surinktais duomenimis, daugiau nei 58 % viso internete sukuriamo duomenų srauto sudarė vaizdo įrašų peržiūros, 17 % naršymas internetinėse svetainėse, 8 % vaizdo žaidimai, 5 % socialiniai tinklai, 5 % internetinės parduotuvės, 3 % duomenų dalinimasis, 1 % garso įrašų transliavimas, 4 % sudarė kitos paslaugos. 2019 m. *Sandvine* ir *Variety* kompanijų atlikto bendro tyrimo duomenimis, vaizdo įrašų peržiūrų internete sukuriamas srautas išaugo iki 61 %, pastebimas 3 % kilimas, naršymo internete sukuriamas srautas krito iki 13 %, pastebimas 4 % kritimas. Kitų paslaugų sukuriamas srautas išliko mažai pakitęs. Internete sukuriamo srauto dalies palyginimas tarp 2018 m. ir 2019 m. pateiktas 1.1 pav. [2,3].



1.1 pav. Interneto paslaugų sukuriamo srauto dalis [2, 3]

Remiantis aukščiau pateiktais duomenimis galima teigti, kad vaizdo įrašų peržiūrų internete sukuriamas srautas vis didėja, o pagal 2018–2019 metų tyrimuose pastebimą 3 % vaizdo įrašų peržiūros paslaugų pakilimą galima prognozuoti, kad 2020 metais jis turėtų pasiekti 64 %, o 2021 metais 66 % viso internete sukuriamo duomenų srauto. Įvertinant 2020 m. susiklosčiusią pandemijos situaciją, dėl daugelyje valstybių paskelbto karantino, gyventojų priverstinės saviizoliacijos, vaizdo įrašų peržiūros sukuriamas srautas gali dar labiau didėti.

Zenith Media kompanijos atlikto tyrimo duomenys atskleidžia kasdien internete praleisto vidutinio laiko pasiskirstymą tarp mobilųjų ir fiksuotą interneto ryšį naudojančių vartotojų. Tyrimo metu nustatyta, kad vartotojai nuo 2014 m. daugiau laiko praleidžia naudodamiesi mobiliuoju ryšiu, nei fiksuotu. Ši tendencija nuo to laiko auga tiesiškai, o vartotojų fiksuoto ryšio naudojamas neženkliai mažėja. Vartotojai 2014 m. mobiliaisiais interneto duomenimis naudojami vidutiniškai 63 minutes per dieną, fiksuotu ryšiu – 47 min. 2019 m. mobiliuoju ryšiu vidutiniškai naudojosi 132 min. per dieną, o fiksuotu ryšiu – 39 min. Prognozuojama, kad ši tendencija nepasikeis ir bus pastebimas vis didesnis skirtumas tarp vartotojų naudojimosi mobiliuoju ir fiksuotu ryšiu [4]. Palyginimas tarp mobilųjų ir fiksuotą ryšį naudojančių vartotojų pateiktas 1.2 pav.



1.2 pav. Internete praleisto laiko naudojant mobilųjį ir fiksuotą ryšį palyginimas [4]

Per paskutinius kelis metus pasaulyje vyko labai daug įvairių didelio masto renginių, tokių kaip *FIFA* pasaulio taurės futbolo čempionatas, žiemos olimpinės žaidynės, įvairūs koncertai ir kiti renginiai, kurių tiesiogines vaizdo transliacijas visame pasaulyje stebėjo milijonai žiūrovų. Ypatingai didelio susidomėjimo sulaukė renginiai, tokie kaip 2018 m. *FIFA* pasaulio taurės futbolo čempionatas atskleidė, didelį tokių masinių renginių vaizdo transliacijų kokybės trūkumą. Vykstant masiniams renginiams vaizdo transliacijos buvo ypatingai prastos kokybės ir net su 30 sekundžių ryšio vėlinimu. Vaizdo transliacijos kokybei ir vėlinimui darė įtaką labai didelis žiūrovų skaičius [5].

Šiandien didžiausios problemos perduodant *OTT* vaizdo įrašų paslaugas yra aukštos perdavimo spartos ir mažo ryšio vėlinimo užtikrinimas. Fiksuoto interneto ryšio operatoriai šias problemas sprendžia, diegdami didesnės spartos ryšio tinklus. Įdiegiant šviesolaidžio ryšio liniją iki galinio vartoto yra labai pagerinama paslaugų kokybė, padidinama perdavimo sparta ir sumažinamas ryšio vėlinimas. Fiksuoto ryšio technologijos atveju, *OTT* paslaugų problematika išsprendžiama, tačiau žvelgiant į mobiliojo ryšio operatorius ji išlieka aktualia tema. Mobiliojo ryšio operatoriai negali mobilaus ryšio vartotojams pasiūlyti fiksuotų šviesolaidžio linijų, taip pat mobiliais tinklais negali užtikrinti aukštos vaizdo kokybės įrašų transliacijų perdavimo su mažu vėlinimu, dėl to šiuo metu ryšio operatorių tinklai nėra pasirengę teikti tokio masto aukštos kokybės *OTT* vaizdo įrašų paslaugas.

Šiuo metu *OTT* paslaugoms, teikiamoms internetu, nėra suteikiamas aukštesnis tinklo resursų paskirstymo prioritetas, kitų paslaugų atžvilgiu ir jos nėra valdomos *QoE* (angl. *Quality-of-Experience*) programomis. *OTT* vaizdo paslaugų perdavimo technologija skiriasi nuo tradicinės vaizdo įrašo peržiūros paslaugos, o esant dideliame prarastų paketų santykiui, prarasti duomenys negali būti atkurti. Didelis vaizdo įrašo duomenų paketų praradimas lemia vaizdo kokybės pablogėjimą, išsikraipymą, garso įrašo kokybės suprastėjimą, o tai labai pablogina vaizdo peržiūros paslaugos kokybę [6].

OTT vaizdo perdavimo mobiliaisiais tinklais paslaugos tampa vis populiarnesnės, tačiau jų kokybės įvertinimui atliekama per mažai tyrimų ir skiriama per mažai dėmesio. Dėl šios priežasties yra labai aktualu tirti *OTT* vaizdo paslaugų, perduodamų mobiliaisiais tinklais kokybę.

1.2. *OTT* paslaugų analizė

OTT – duomenų perdavimas per internetą be *ISP* atsakomybės už turinį. *OTT* paslaugos yra skirstomos į balso, teksto, vaizdo, bendravimo ir dalyvavimo paslaugas. Visos šios paslaugos vis labiau populiarėja ir pakeičia esamas šių paslaugų alternatyvas, o *OTT* vaizdo įrašų perdavimo ir pranešimų paslaugos sudaro labai didelį indelį telekomunikacijų industrijos vystymuisi [6].

Didžiausią ir populiariausią *OTT* paslaugų duomenų srauto dalį sudaro vaizdo perdavimo paslaugas. Šis turinys pasiekiamas naudojant vaizdo turinio tiekėjo programėlę ar interneto naršyklę išmaniajame telefone, televizoriuje ar kompiuteryje. Vaizdo įrašų transliavimas yra daugiausiai pajamų atnešanti *OTT* paslauga, dėl *OTT* vaizdo kanaluose talpinamos reklamos sukuriamų pajamų.

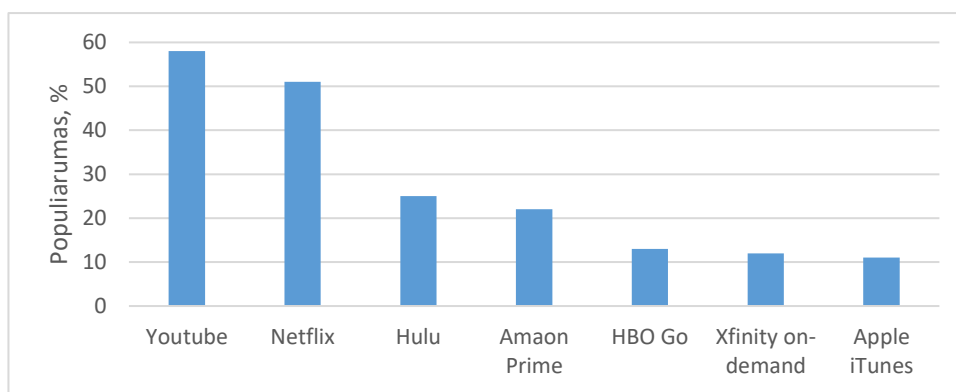
OTT teksto žinutės yra trečiųjų šalių greitųjų žinučių paslaugos, sukurtos kaip trumpųjų žinučių (toliau – *SMS*, angl. *Short-Messages-Service*) alternatyva. Pavyzdžiui, *Messenger*, *Viber* ir kitos aplikacijos teikia greitųjų žinučių siuntimo paslaugas internetu ir tai pranoksta *SMS* tiek išsiųstų žinučių kiekiu, tiek ir vartotojo galimybėmis. Pagrindiniai aspektai, kodėl *OTT* teksto žinutės tampa populiarnesnės už *SMS* yra kaina ir vieninga platforma. *OTT* atveju, žinučių kiekis nėra apmokestinamas, tačiau mokama tik už išnaudojamą duomenų srautą informacijos siuntimo metu.

OTT balso skambučiai – balso perdavimas per internetą naudojant trečiųjų šalių pagalbą, pavyzdžiui, skambučiai per *Messenger*, *Viber* ir kitų paslaugų tiekėjų platformas. Šiuo atveju siekiama pakeisti ar net kartais pagerinti operatoriaus kontroliuojamas paslaugas, kurias siūlo *ISP*. *OTT* balso skambučiai iš pirmo žvilgsnio gali pasirodyti tas pats, kaip *VoLTE* ar *VoIP*, tačiau šios dvi sąvokos klasifikuojamos skirtingai, nors gali būti naudojamos vienam tikslui – perduoti balso informaciją internetu. *VoLTE* naudojamas balso perdavimui *LTE* tinklu, tačiau už visą perduodamą informaciją yra atsakingas *ISP*. *OTT* atveju, ryšio tiekėjas neatsako už informacijos turinį.

OTT bendravimo ir dalyvavimo paslaugos yra sukurtos naudojant pirmų trijų paslaugų pagrindus. Labiausiai žinomas *OTT* bendravimo paslaugos pavyzdys – vaizdo ir garso konferencijos. Šios paslaugos tapo labai populiarios 2020 m., dėl paskelbtos pandemijos. *Forbes* duomenimis, 2020 m. Italijoje *Microsoft Teams* vartotojų kiekis išaugo iki 775 %, ši tendencija pastebima ir su kitomis populiariomis *OTT* bendravimo platformomis [7].

1.3. Didžiausi *OTT* vaizdo paslaugų tiekėjai

1.3 pav. pateikiamas *OTT* vaizdo paslaugų vartotojų populiarumo grafikas, iš kurio matoma, kad *Youtube* yra laikoma populiariausia *JAV* *OTT* vaizdo paslaugų platforma ir net 58 % *OTT* vaizdo paslaugų vartotojų ja naudojasi. Kita, mažiau populiari *OTT* vaizdo platforma yra *Netflix*, jos populiarumas lygus 51 %. Kitos ženkliai mažiau populiarios platformos yra *Hulu* – 25 % ir *Amazon Prime* – 22 % [8].



1.3 pav. OTT vaizdo paslaugų populiarumas JAV [8]

Vienas didžiausių OTT paslaugų tiekėjų – *Youtube* socialinis tinklas, kuris priklauso *Google* korporacijai. Šis socialinis tinklas vartotojams leidžia dalintis vaizdo įrašais bei kita informacija. Į šią platformą kiekvieną minutę vidutiniškai įkeliama apie 60 valandų naujų vaizdo įrašų. *Youtube* palaiko *4K UltraHD* ir *8K UltraHD* vaizdo kokybę ir suteikia galimybę, esant poreikiui ar mažesnei interneto ryšio perdavimo spartai, sumažinti vaizdo kokybę.

Kitas didžiausias OTT paslaugų tiekėjas yra *Netflix* platforma, kuri teikia vaizdo įrašų transliavimo internete paslaugas. Svetainė palaiko įvairius vaizdo kokybės formatus ir teikia svetainės lankytojams galimybę išsipirkti abonementą ir mėgautis visa platformos vaizdo įrašų biblioteka. Šiuo metu *Netflix* programėlė palaiko įvairios platformos, kaip *Android*, *iOS*, *Google Chromecast*, *Apple TV*, *Nintendo*, *Playstation*, *Xbox* bei daugelis televizorių su *Smart TV* funkcija. Aukščiausia suteikiamo vaizdo įrašų peržiūros kokybė yra *4K UltraHD*.

Hulu – internetinės televizijos kanalas, kuris priklauso *Disney* bendrovei. Nuo 2017 m. šis kanalas suteikė galimybę vartotojams gyvai stebėti televizijos transliacijas. Tai buvo didelis žingsnis ir pastūmėjimas *Hulu* platformos populiarumui. *Hulu* suteikia galimybę stebėti įrašus didžiausia *4K UltraHD* kokybe.

Amazon Prime yra *Amazon* kompanijos interneto svetainė, vartotojams suteikianti galimybę naudotis muzikos ir serialų bibliotekomis, saugoti nuotraukas debesyje. Tai yra ketvirtas pagal populiarumą tarp vartotojų OTT paslaugų tiekėjas JAV. *Amazon Prime* vaizdo įrašus leidžia stebėti *4K UltraHD* kokybe, bet esant poreikiui ar mažesnei tinklo greitaveikai yra galimybė sumažinti vaizdo įrašo kokybę.

Netflix platformos vartotojų sukuriamas srautas piko valandomis sudaro apie 30 % viso OTT internete sukuriamo srauto JAV, kai *Youtube* socialinio tinklo vartotojų sukuriamas srautas sudaro apie 20 %. *Hulu* ir *Amazon Prime* vartotojai generuoja palyginus mažesnę duomenų srautą, kuris sudaro apie 10 % JAV OTT sukuriamo duomenų srauto [9].

Pagal 2019 m. *Verto Analytics* atlikto tyrimo duomenis, kurio metu buvo nustatomas populiariausias OTT vaizdo įrašų transliavimo tiekėjas JAV, *Youtube* yra pati populiariausia vaizdo peržiūros platforma. 2019 m. rugsėjo mėnesį *Youtube* portalas turėjo daugiau nei 163 milijonus aktyvių vartotojų, kai tuo tarpu antra pagal populiarumą vaizdo peržiūros platforma *Netflix* tuo metu turėjo 3,5 karto mažiau – 46 milijonus, *Hulu* – 26 milijonus, o *Amazon Prime* – 16 milijonus aktyvių vartotojų [10].

Visi vaizdo įrašų peržiūros paslaugų tiekėjai stengiasi savo vartotojams pasiūlyti aukščiausios kokybės vaizdo įrašų peržiūras, todėl detaliau išanalizavus vaizdo kokybės reikalavimus išsiaiškinta, kad *Youtube* nuo 2015 m. vartotojams pasiūlė *8K UltraHD* aukščiausios vaizdo kokybės įrašų palaikymą, tokios vaizdo kokybės įrašui rekomenduojama bent 50 Mb/s perdavimo sparta. *Netflix*, *Hulu* ir *Amazon Prime* suteikia aukščiausios *4K UltraHD* vaizdo kokybės įrašų peržiūros paslaugas, kurioms rekomenduojama bent 25 Mb/s perdavimo sparta [11]. 1.1 Lentelėje pateiktas populiariausių *OTT* vaizdo peržiūros paslaugų tiekėjų palyginimas.

1.1 lentelė. Populiariausių *OTT* vaizdo paslaugų tiekėjų palyginimas

Paslaugų tiekėjas	JAV aktyvių vartotojų kiekis per mėn.	OTT paslaugų sukuriamas srautas JAV, %	Aukščiausia galima vaizdo kokybė	Rekomenduojama perdavimo sparta, Mb/s
<i>Youtube</i>	163 mln.	20	<i>8K Ultra HD</i>	50
<i>Netflix</i>	46 mln.	30	<i>4K Ultra HD</i>	25
<i>Hulu</i>	26 mln.	10	<i>4K Ultra HD</i>	25
<i>Amazon Prime</i>	16 mln.	10	<i>4K Ultra HD</i>	25

1.4. Vaizdo kokybės reikalavimai

Šiuo metu ypatingai sparčiai tobulėjant mobiliesiems įrenginiams didėja ir aukštesnės raiškos bei rezoliucijos vaizdo perdavimo poreikis. Esant poreikiui transliuoti aukštesnės raiškos vaizdo įrašą, reikia žymiai aukštesnės perdavimo spartos. 1.2 lentelėje pateikiama vaizdo įrašo rezoliucijos, rekomenduojamos perdavimo spartos ir vėlinimo palyginimas.

1.2 lentelė. Vaizdo įrašų kokybės perdavimo reikalavimai

Kokybė	Rezoliucija	Rekomenduojama perdavimo sparta, Mb/s	Vėlinimas, ms
<i>SD</i>	480 x 640	1,5	<100
<i>HD</i>	720 x 1280	3	<100
<i>FullHD</i>	1080 x 1920	5	<50
<i>4K Ultra HD</i>	2160 x 3840	25	<20
<i>8K Ultra HD</i>	4320 x 7680	50	<20

Kiekviena aukštesnės raiškos vaizdo kokybė turi 2^X daugiau raiškos taškų, todėl didesnės rezoliucijos vaizdo perdavimui reikalinga žymiai didesnė raiška. Šiuo metu norint internetu žiūrėti *SD* (angl. *Standard-Definition*) kokybės vaizdo įrašą, reikia bent 1,5 Mb/s perdavimo spartos, *HD* kokybės (angl. *High-Definition*) įrašui 3 Mb/s, *FullHD* kokybės įrašui 5 Mb/s spartos, *4K UltraHD* kokybės vaizdui jau reikės 25 Mb/s, tuo tarpu norint stebėti *8K UltraHD* kokybės vaizdo įrašą reikės net 50 Mb/s spartos. *SD* ir *HD* vaizdo kokybės vaizdo įrašo transliavimui rekomenduojamas mažesnis nei 100 ms ryšio vėlinimas. *FullHD* kokybės įrašo stebėjimui rekomenduojamas mažesnis nei 50 ms, o *4K UltraHD* ir *8K UltraHD* – mažesnis nei 20 ms ryšio vėlinimas.

1.5. Mobiliojo ryšio tinklai

3G (angl. *Third generation*) – trečiosios kartos mobiliojo ryšio technologija, pristatyta 2000 m. Japonijoje. Ši technologija iki šiol aktyviai naudojama, nes gali pasiūlyti didesnės aprėpties tinklą nei kitos mobiliojo ryšio technologijos, tačiau vėlinimo ir duomenų perdavimo spartos rezultatai ženkliai atsilieka nuo naujesnių technologijų. Vidutinis ryšio vėlinimas siekia 200 ms, o maksimali perdavimo sparta – apie 30 Mb/s. Technologija veikia 900 MHz ir 2,1 GHz dažniu. Maksimali bazinės stoties aprėptis gali siekti iki 30 km [28].

LTE (angl. *Long-term-evolution*) – mobiliojo ryšio technologija pirmą kartą pristatyta 2009 m., o plačiai pradėta naudoti nuo 2010 m. Pagrindiniai naudojami dažniai Europoje yra 800 MHz, 1,8 GHz, 2,1 GHz, 2,6 GHz. Maksimali perdavimo sparta siekia iki 300 Mb/s, o vidutinis vėlinimas apie 60 ms. Šiuo metu tai plačiausiai naudojama mobiliojo ryšio technologija Europoje. *LTE* technologijos ryšio padengimas siekia daugiau nei 97 % Lietuvos teritorijos, o maksimali bazinės stoties aprėptis gali siekti iki 15 km [12].

5G (angl. *Fifth generation*) – penktosios kartos mobiliojo ryšio tinklas, pirmą kartą pristatytas 2018 m. Šiuo metu *5G* technologija yra vis dar vystymo stadijoje, tačiau Europoje jau yra įdiegtos kelios testinės *5G* stotys. Viena tokių yra ir Lietuvos sostinėje Vilniuje. *Bitė Lietuva* kompanijos 2018 m. atliktos demonstracijos metu Vilniuje buvo pasiekta apie 1,8 Gbps duomenų perdavimo sparta ir 6 ms ryšio vėlinimas bei naudojamas labai aukštas dažnis nuo 25 iki 39 GHz. Reikia pastebėti, kad ilgalaikė tokio aukšto dažnio įtaka žmogaus organizmui dar nėra galutinai ištirta. Pilnas *5G* mobiliojo ryšio technologijos įdiegimas Lietuvoje planuojamas iki 2025 m. pabaigos [13, 14].

Nors *5G* technologija daug žadanti ir gali pasiūlyti labai didelę perdavimo spartą bei mažą vėlinimą, tačiau turi daug trūkumų, lyginant su kitomis, šiuo metu naudojamomis mobiliojo ryšio technologijomis. Šios technologijos įdiegimas užtruks, o pilnai įdiegus išliks didelė tinklo aprėpties problema. Dėl aukšto dažnio, *5G* bazinės stoties aprėptis gali siekti vos 500 metrų. Tai yra labai mažas atstumas tarp bazinių stočių, todėl užmiesčio ir mažiau apgyvendintose teritorijose *5G* technologijos mobilusis ryšys neturėtų būti plačiai išvystytas, nes tokiose vietose yra mažas gyventojų tankumas. Šiuo metu mažesnio gyventojų tankumo teritorijose yra labai gerai išvystytas *LTE* technologijos pagrindu sukurtas tinklas, kuris ir toliau tokiose teritorijose turėtų būti vystomas, ypač teikiant *OTT* vaizdo perdavimo paslaugas [29].

2. LTE Mobiliojo ryšio tinklo kokybės parametrų analizė

Perduodant duomenis mobiliuoju ryšiu ypač svarbu atsižvelgti į daugelį ryšio kokybės faktorių ir rodiklių, nuo kurių priklauso duomenų perdavimo kokybė. Perduodant bet kokius duomenis LTE tinklu, reikia atsižvelgti į radijo ryšio kokybės, duomenų perdavimo kokybės, ryšio vėlinimo, perdavimo spartos ir kitus parametrus.

2.1. Radijo ryšio parametrų analizė

LTE radijo ryšio kokybės parametrai, pagal kuriuos sprendžiama, ar tinklas tinkamai funkcionuoja ir teikia kokybiškas mobiliąsias paslaugas, yra *SINR* (angl. *Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio*), *RSRQ* (angl. *Reference Signal Received Quality*) ir *RSRP* (angl. *Received Signal Reference Power*). Šių parametrų reikalavimai pateikiami 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Mobiliojo LTE ryšio kokybės parametrai [15]

Parametras		<i>SINR</i> (dB)	<i>RSRQ</i> (dB)	<i>RSRP</i> (dBm)
Signalų kokybė	Labai gera	> 12,5	> -5	> -84
	Gera	10 – 12,5	-5 – -9	-85 – -102
	Patenkinama	7 – 10	-9 – -12	-103 – -111
	Prasta	< 7	< -12	< -111

SINR rodiklis parodo, koks yra siunčiamo signalo ir interferencijos su triukšmu santykis. Tipiškai šis rodiklis LTE tinklui, kai matuojamas signalas yra daugiau nei 12,5 dB, vertinamas labai geru signalu, o nuo 10 dB iki 12,5 dB, geru signalu. Nuo 7 iki 10 dB yra patenkinamo lygio signalas, o mažiau nei 7 dB, prastas signalas [15].

Priimto atraminio signalo kokybės parametras *RSRQ* parodo priimto signalo kokybę. Kuo aukštesnis šis parametras, tuo geresnės kokybės signalas gali būti priimtas, palyginus su kitų mobiliojo ryšio celių interferencija. Tipiškai šis rodiklis svyruoja tarp -12 dB (prastas) ir -5 dB (labai geras). Šiuo parametru suteikiama papildoma informacija, kai signalo kokybė slopsta, mobilusis įrenginys tolsta nuo esamos prijungtos bazinės stoties ir reikia persijungti prie kitos bazinės stoties [15, 16].

RSRP – priimta atraminio signalo galia parodo, koks yra priimamas signalas mobiliajame įrenginyje, ar jis tenkina perduodamo signalo lygį. Šiuo parametru gali būti palyginamos mobilaus ryšio stotys, kurios naudoja to pačio dažnio nešlius (angl. *carrier*). Labai geru signalu vertinama, kai signalo lygis yra daugiau nei -84 dBm, o geru nuo -85 dBm iki -102 dBm. Patenkinamu signalu vertinama nuo -103 dBm iki -111 dBm, žemesnio lygio nei -111 dBm vertinama prastu signalu, tačiau vis dar tinkamu perduoti duomenis radijo ryšiu [15,16].

2.2. Pralaidumas

Duomenų perdavimo spartos efektyvumas įvertinamas pralaidumo parametru. Pralaidumas – sėkmingai persiųstų duomenų kiekis per laiko tarpą, dažniausiai išreiškiamas Mb/s, arba Kb/s. Pralaidumas priklauso nuo tinklo dažnių juostos pločio, tinklo kokybės rodiklių ir techninės įrangos [17].

Pralaidumas B apskaičiuojamas, kaip persiųstas duomenų kiekis P , per laiko trukmę t :

$$B = \frac{P}{t}. \quad (1)$$

2.3. Vėlinimas ir vėlinimo fluktuacija

OTT paslaugoms vėlinimas yra ypatingai svarbus kriterijus, kuris atspindi laiko trukmę, kurią užtrunka duomenų paketų persiuntimas nuo duomenų tiekėjo iki vartotojo. Pagal *Statistica.com* duomenis, 2019 m. vidutinis *LTE* mobiliųjų tinklų vėlinimas Lenkijoje buvo 68 ms. **Vėlinimas** – laiko trukmė, per kurią paketas persiunčiamas per ryšio liniją. Dėl fizikinių dėsnių vėlinimas negali būti mažesnis už šviesos greitį terpėje. Vėlinimui ženklia įtaką daro atstumas, vartotojų ir tarpinių mazgų kiekis [19, 20].

Kuo didesniu atstumu perduodama informacija, tuo didesnę laiko tarpą užtrunka ją perduoti. Jei paketas išsiunčiamas iš siuntėjo t_d laiko momentu ir pasiekia gavėją laiko momentu t_a , tai linijos vėlinimas t_p linijoje skaičiuojamas pagal formulę [21]:

$$t_p = t_a - t_d. \quad (2)$$

Vidutinis vėlinimas – skirtumų suma tarp paketo išsiuntimo laiko momento t_d ir paketo gavimo laiko t_a , padalintas iš matavimo trukmės T [21]:

$$\bar{t}_p = \frac{\sum t_a - t_d}{T}. \quad (3)$$

Vėlinimo fluktuacija (angl. *Jitter*) – vėlinimo variacija tarp skirtingų paketų. Vėlinimo variacija lygi gautų paketų laiko momentais t_n ir t_{n-1} skirtumui τ :

$$\tau = t_n - t_{n-1}. \quad (4)$$

Vidutinė vėlinimo fluktuacija – vėlinimo variacijų suma padalinta iš matavimų kiekio q :

$$\bar{\tau} = \frac{\sum \tau}{q}. \quad (5)$$

Kai vėlinimo fluktuacija yra pastovi, ją galima filtruoti ar kompensuoti matematiniais metodais. Dažniausiai pasitaiko atsitiktinis šio faktoriaus elgesys. Vėlinimo fluktuacija yra mažai pastebima jei yra maži perdavimo atstumai, tačiau gali turėti rimtos įtakos, kai duomenys yra perduodami tolimais atstumais ir ypač didele sparta. Išsiuntus paketus iš siųstuvo pastoviais laiko tarpais, paketai imtuvą pasiekia ne tokios pačios trukmės intervalais, kurie yra didesni arba lygūs siuntimo laikui. Tai vyksta dėl įrangos, perdavimo mazgų įtakos, trukdžių ir kitų priežasčių [18].

2.4. Paketų praradimo santykis

Paketų praradimas – reiškinys, kai duomenų perdavimo linijoje prarandami duomenų paketai. Padidėjusį duomenų paketų praradimą labai jaučia galiniai vartotojai, ypač naudojantys *OTT* vaizdo paslaugas. Esant dideliame paketų praradime, jaučiami stiprūs vaizdo ar garso trikdžiai, kurie labai pablogina paslaugos kokybę. Išskiriamos pagrindinės duomenų paketų praradimo priežastys [22]:

- tinklo apkrova;
- programinės įrangos klaidos;
- tinklo įrangos gedimai;
- tinklo saugumo spragos.

Duomenų paketų praradimas įvertinamas sėkmingai pristatytų P_p ir iš viso išsiųstų paketų P_s santykiu P :

$$P = 1 - \frac{P_p}{P_s}. \quad (5)$$

2.5. Vaizdo paslaugų kokybė

Labai svarbu perduodamas *OTT* vaizdo paslaugas įvertinti *QoS* lygmeniu. *OTT* vaizdo paslaugų įvertinimas aprašomas matuojant paslaugų teikimo trikdžių trukmę, kiek vartotojas yra priverstas laukti, kol vaizdo įrašas bus paruoštas kokybiškai peržiūrai.

Labai svarbus parametras *OTT* vaizdų paslaugų peržiūrai – buferis (angl. *buffer*). **Buferis** – laikina duomenų saugojimo vieta įrenginio atmintyje, kol duomenys bus perkelti arba ištrinti. Buferis naudojamas gautų vaizdo duomenų saugojimui, kol jie bus panaudoti vaizdo įrašo atvaizdavimui.

Pradinis buferis (angl. *initial buffer*) – pradinė laiko trukmė, trunkanti užkrauti vaizdo įrašą. Tai yra laiko trukmė tarp įrašo paleidimo ir laiko momento, kada įrašas pradėjo groti. Žemu rodikliu vertinama, kai buferio užkrovimas trunka mažiau nei 1 s, vidutiniu – nuo 1 iki 5 sekundžių. Aukštu rodikliu vertinama, kai trukmė yra daugiau nei 5 sekundės [6].

Pakartotinio buferio dažnumas (angl. *rebuffer frequency*) – rodiklis, parodantis pakartotinio buferio pasikartojimo dažnumą. Šis parametras atspindi, kiek kartų įvyko pakartotinio buferio pasikartojimų per laiko trukmę. Kai vaizdo įrašų duomenys, esantys buferyje, išnaudojami, vaizdo įrašas sustabdomas, tuo metu vaizdo įrašo grotuvas pereina į pakartotinio buferio krovimo būseną, kurios metu užkraunami vaizdo įrašo duomenys. Jeigu duomenys buferyje atnaujinami greičiau, nei išnaudojami, vaizdo įrašo grotuvas į šią būseną nepereina ir vaizdo įrašas nėra sustabdomas. Šis rodiklis vertinamas žemu, kai dažnis yra 0–0,02 Hz. Kai dažnis yra 0,02–0,15 Hz, toks rodiklis vertinamas vidutiniu, o daugiau nei 0,15 Hz – aukštu rodikliu [6, 23, 30].

Pakartotinio buferio trukmė (angl. *rebuffer duration*) – rodiklis, parodantis, kiek vidutiniškai laiko vartotojas turėjo laukti, kol vaizdo įrašo metu pakartotinai bus užkrautas buferis. Kai vaizdo peržiūros metu vartotojui tenka laukti mažiau nei 5 sekundes, kol vaizdo įrašas bus pakartotinai užkrautas, vertinama, kad lygis yra žemas. Kai vartotojas priverstas laukti nuo 5 iki 10 sekundžių, vertinama kad rodiklis yra vidutinio lygio, o jei daugiau nei 10 sekundės – aukšto lygio [6, 23, 30].

Kuo aukštesnio lygio parametrai nustatomi, tuo labiau kenčia vartotojo vaizdo paslaugų kokybė. Šių rodiklių palyginimas pateiktas 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. OTT vaizdo paslaugų parametrų reikalavimai [6]

Lygis	Pradinio buferio trukmė T_{ini} , s	Pakartotinio buferio dažnumas f_{rebuf} , Hz	Pakartotino buferio trukmė T_{rebuf} , s
Žemas	0 - 1	0 - 0,02	0 - 5
Vidutinis	1 - 5	0,02 - 0,15	5 s 10 s
Aukštas	> 5	> 0,15	> 10

Įvertinus aukščiau aprašytus pradinio buferio T_{ini} , pakartotinio buferio dažnumo f_{rebuf} ir pakartotino buferio trukmės T_{rebuf} parametrus, vaizdo paslaugų peržiūros kokybę galima apskaičiuoti MOS (angl. *mean opinion score*) rodikliu [6]:

$$MOS = 4,23 - 0,0672 \times T_{ini} - 0,742 \times f_{rebuf} - 0,106 \times T_{rebuf} \quad (6)$$

2.3 lentelėje pateiktas vaizdo paslaugų kokybės rodiklio MOS verčių palyginimas. MOS rodiklio vertės vertinamos nuo 1 balo iki 5 balų. MOS rodiklio vertė lygi 1 balui reiškia, kad paslaugos teikti nėra galimybės, 5 balai, kad paslauga teikiama idealia kokybe. Pagal (6) formulę maksimalus pasiekiamas kokybės įvertinimas gali būti lygus 4,23, tai vertinama idealia paslaugos kokybe. Apskaičiuotoms vertėms esant žemiau 1, įvertis prilyginamas 1 balui, nes pagal MOS metodiką, įvertis negali būti žemesnis nei 1 balas ir didesnis nei 5 [32].

2.3 lentelė. Vaizdo paslaugų peržiūros kokybės rodiklio MOS reikšmės [31]

MOS rodiklio vertė	Kokybė	Trikdžiai
1–2	Nepatenkinama	Labai erzinantys
2–3	Bloga	Erzinantys
3–4	Prasta	Šiek tiek erzinantys
4–4,23	Gera	Pastebimi, tačiau neerzinantys
5 (4,23)	Ideali	Nepastebimi

Rodiklio reikšmėms esant nuo 1 iki 2 yra vertinama, kad paslaugos kokybiškai teikti neįmanoma, o vartotojui pastebimi labai dideli trikdžiai. Balui esant nuo 2 iki 3, paslaugos kokybė vertinama, kaip bloga, o trikdžiai dažni ir erzinantys, tokia paslauga, nors ir blogos kokybės, tačiau įmanoma naudotis. Kai MOS balas gaunamas nuo 3 iki 4, kokybė vertinama, kaip prasta, trikdžiai, nors ir mažesni, tačiau vis dar vartotojui pastebimi, tačiau neerzinantys. Kai įvertis gaunamas nuo 4 iki 4,23, paslauga teikiama geros kokybės, trikdžiai pastebimi, tačiau vartotojo neerzina ir netrukdo kokybiškai naudotis paslauga. Kai įvertis gaunamas 4,23, paslauga vertinama idealia kokybe, trikdžiai nepastebimi ir visiškai netrukdo vartotojui naudotis labai kokybiška paslauga [24, 30, 31].

3. Mobiliojo ryšio tinklo *OTT* vaizdo paslaugų galimybių tyrimas

Naudojantis *OTT* vaizdo paslaugomis, labai svarbu vartotojui užtikrinti stabilų ryšį, kurio reikalauja paslaugos kokybė. Vartotojui teikiant *OTT* vaizdo paslaugas labai svarbu atsižvelgti ir įvertinti mobiliojo ryšio kokybės parametrus ir nustatyti vartotojui teikiamo signalo lygį, kad įvertinti signalo kokybę. Taip pat reikia įvertinti tinklo apkrovos parametrus, nustatyti, ar vartotojui teikiamos paslaugos perdavimui užtikrinimas reikiamos spartos ir vėlinimo parametrų duomenų srautas. Be to, reikia išsiaiškinti, kokia vartotojui suteikiama paslaugų kokybė.

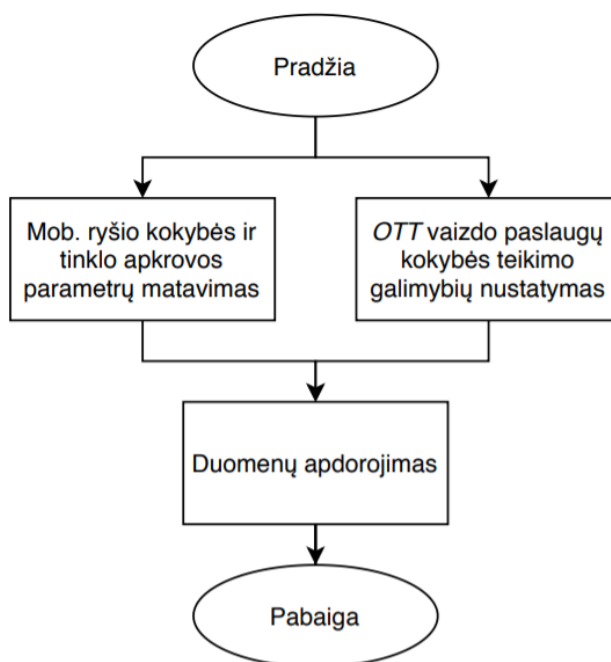
Vertinat mobiliojo ryšio kokybę, svarbu įvertinti gaunamo signalo kokybės parametrus, tokius kaip *SINR*, *RSRQ* ir *RSRP*. Užtikrinat reikiamus mobiliojo ryšio kokybės parametrus, užtikrinamas kokybiškas mobilusis ryšys iki galinio vartotojo. *OTT* vaizdo paslaugas teikiant mobiliuoju ryšiu, reikia užtikrinti didelės spartos ir mažo vėlinimo nenutrūkstamą mobilųjį ryšį. Taip pat svarbu įvertinti mobiliojo ryšio metu esančią vėlinimo fluktuaciją ir paketų praradimo santykį.

Vertinant *OTT* vaizdo paslaugų perdavimo mobiliaisiais tinklais kokybę, svarbu įvertinti paslaugų kokybę *QoS* lygmeniu. Šiuo atveju atsižvelgiama į laiko trukmę, kurią vartotojas priverstas laukti, kol jam bus suteikta kokybiška vaizdo peržiūros paslauga, tai įvertinama *MOS* rodikliu.

Toliau, šiame darbe aprašomas atliktas mobiliojo ryšio kokybės parametrų, mobiliojo tinklo teikiamos apkrovos ir mobiliaisiais tinklais teikiamų *OTT* vaizdo paslaugų kokybės tyrimas. Šis tyrimas atliekamas, kad būtų galimybė įvertinti, ar mobiliojo ryšio operatoriai yra pasirengę vartotojams teikti aukštos kokybės *OTT* vaizdo perdavimo paslaugas.

3.1. Mobiliojo ryšio tinklo *OTT* vaizdo paslaugų galimybių tyrimo algoritmas

Mobiliojo ryšio tinklo *OTT* vaizdo paslaugų galimybių tyrimas atliekamas pagal sudarytą metodinę schemą, kuri pateikta 3.1 pav.



3.1 pav. Mobiliojo ryšio tinklo *OTT* vaizdo paslaugų galimybių tyrimo algoritmas

Tyrimas skirstomas į du pagrindinius etapus:

1. mobiliojo ryšio apkrovos ir kokybės parametrų matavimas. Šiame etape mobiliaisiais įrenginiais fiksuojami *OTT* vaizdo perdavimui mobiliuoju ryšiu reikšmingi mobiliojo ryšio kokybės ir tinklo apkrovos parametrai;
2. *OTT* vaizdo paslaugų kokybės teikimo galimybių įvertinimas. Šiame etape nustatoma, kokias galimybes tinklo operatorius turi, teikdamas skirtingos kokybės *OTT* vaizdo įrašų perdavimo paslaugas.

Atlikus parametrų matavimo ir kokybės galimybių nustatymo darbus, atliekamas duomenų apdorojimas ir pateikiami rezultatai.

3.2. Mobiliojo ryšio kokybės ir tinklo apkrovos parametrų matavimas

Šiame mobiliojo ryšio kokybės ir tinklo apkrovos parametrų matavimo etape pasirenkama duomenų nuskaitymo įranga, programinė įranga, pasirenkama tyrimo vieta, tyrimo laikas bei periodiškumas. Tyrimas atliekamas tam, kad nustatyti mobiliojo ryšio tinklo galimybes teikti *OTT* vaizdo paslaugas, dėl to pasirenkami dažniausiai naudojami mobiliojo ryšio įrenginiai – vidutinės klasės mobilieji telefonai, nes tai yra populiariausios klasės mobilieji įrenginiai visuomenėje. Tyrimo atlikimui naudotų mobiliųjų telefonų parametrai pateikti 3.1 Lentelėje. Tyrimui išrinkti tipiniai vidutinės klasės telefonai, kurie palaiko ne mažesnės nei 4 kategorijos *LTE* ryšio technologiją.

3.1 lentelė. Tyrimui naudotų mobiliųjų telefonų parametrai

	Ryšio technologija	Maksimali perdavimo sparta	Gamybos metai
Sony Z3	GSM / HSPA / LTE	LTE Cat4 150/50 Mb/s	2015
Sony Xperformace	GSM / HSPA / LTE	LTE Cat9 450/50 Mb/s	2016
Samsung J7	GSM / HSPA / LTE	LTE Cat4 150/50 Mb/s	2017
Samsung A3	GSM / HSPA / LTE	LTE Cat4 150/50 Mb/s	2015
Samsung J5	GSM / HSPA / LTE	LTE Cat4 150/50 Mb/s	2017
Samsung A6	GSM / HSPA / LTE	LTE Cat6 300/50 Mb/s	2018

Šiais įrenginiais atliekamas mobiliojo ryšio kokybės ir mobiliojo ryšio operatoriaus teikiamos apkrovos parametrų fiksavimas. Tyrimas vykdomas didžiausios tikėtinos tinklo apkrovos laikotarpiu – dienos metu. Nakties metu tikėtina, kad didžioji dauguma mobiliojo ryšio vartotojų bus pasyvūs, ilsėsis ar miegos. Duomenys pradedami fiksuoti nuo 7:00 val. ryto iki 22:00 val. vakaro, automatiškai kas valandą nuskaitant ir įrašant duomenis į duomenų failą.

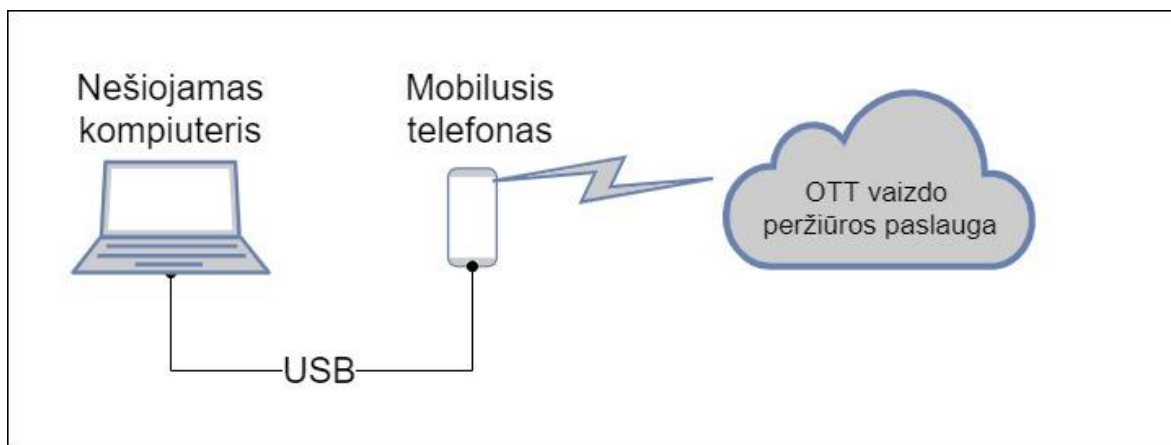
Tyrimui atlikti, kiekvienas mobilusis įrenginys paruošiamas su *Tele2* mobiliojo ryšio operatoriaus *Pildyk* mobiliojo tinklo ryšio kortele, kuri yra suderinama su *LTE* ryšio technologija. Į mobiliuosius telefonus įdiegiama *SPEEDCHECK Internet Speed Test 5.1.8.6* programinė įranga, kuri teikia automatinio tinklo apkrovos matavimų funkciją. Mobiliojo ryšio kokybės parametrams fiksuoti, naudojama *NetMonitor Cell Signal Logging 1.65* programinė įranga, kuri leidžia nuskaityti mobiliojo ryšio kokybės parametrus įrenginyje realiu laiku [25, 26].

Tyrimo metu mobiliojo ryšio įrenginiams užtikrinimas elektros ryšio maitinimas, kad neišsikrautų jų baterijos ir įrenginiai nepereitų į energijos taupymo režimą. Energijos taupymo režimo metu apribojami įrenginio resursai, tarp jų ir mobiliojo ryšio sąsaja. Įrengimui perėjus į šį režimą gali būti perjungiama prastesnė ryšio technologija.

Tyrimui atlikti pasirenkama tipinė užmiesčio teritorija – Domeikava. Tyrimo vieta yra nutolusi apie 100 metrų nuo mobiliojo ryšio operatoriaus *LTE* bazinės stoties. Ši vietovė pasirenkama dėl to, kad yra didžiausia kaimo statusą turinti gyvenvietė Lietuvoje, tačiau mažai tikėtina, kad greitai metu šioje vietovėje bus diegiama naujesnė nei esama *LTE* technologijos mobiliojo ryšio sistema.

3.3. *OTT* vaizdo paslaugų kokybės teikimo mobiliojo ryšio tinklu galimybių įvertinimas

Šiame etape įvertinama, kokias galimybes turi pasirinkto mobiliojo ryšio tinklo operatorius, teikdamas skirtingos kokybės *OTT* vaizdo paslaugas. Tyrimui paruošiamas *Samsung A6* mobilusis įrenginys, kuriuo bus tiekiamas mobilusis ryšys, kompiuteris, per kurį bus naudojamosi *OTT* vaizdo įrašo perdavimo paslaugomis ir *USB* kabelis, kuriuo bus perduodamas ryšys iš mobiliojo telefono į kompiuterį. Ryšys tarp kompiuterio ir mobiliojo įrenginio tiekiamas *USB* kabeliu, kad būtų užtikrinamas mažesnis ryšio vėlinimas tarp mobiliojo telefono ir kompiuterio bei būtų mažiau aplinkos trukdžių. Mobilusis telefonas veikia su *Pildyk* tinklo mobiliojo ryšio kortele, palaikančia *LTE* ryšio technologiją. Įrangos sujungimo schema pateikta 3.2 pav.

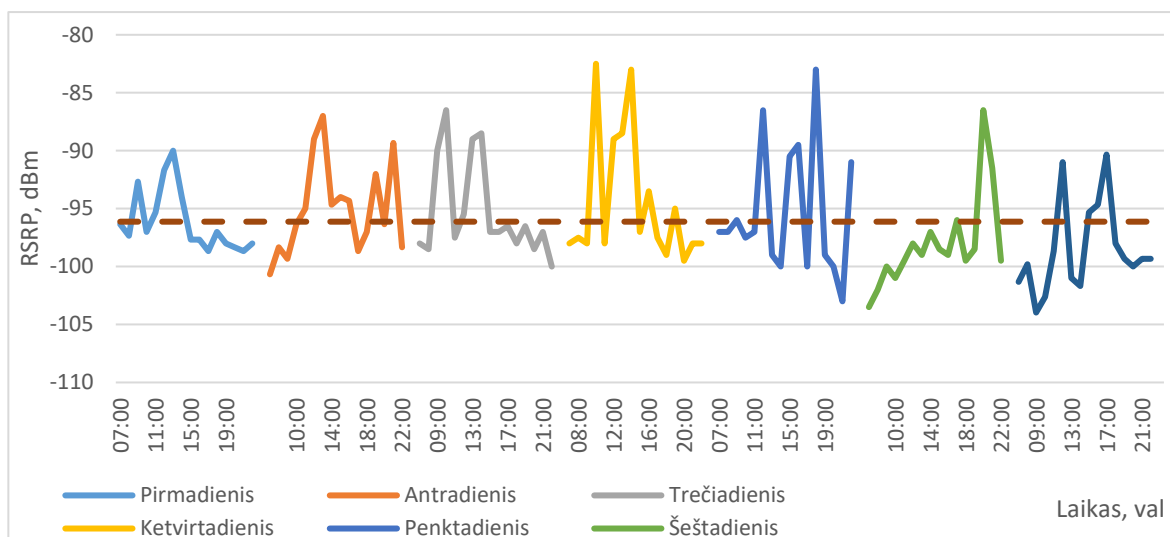


3.2 pav. *OTT* paslaugų tyrimo įrangos sujungimo schema

Tyrimo metu siekiama įvertinti mobiliojo ryšio operatoriaus galimybes, teikiant skirtingos kokybės *OTT* vaizdo paslaugas, todėl tiriama *FullHD*, *4K UltraHD* ir *8K UltraHD* raiškos vaizdo įrašų peržiūros kokybė populiariausioje *OTT* vaizdo peržiūros paslaugų platformoje *Youtube*. Kompiuteryje peržiūrimas skirtingos kokybės tas pats 60 sekundžių trukmės vaizdo įrašas. Pagal 2.5 skyriuje aprašytą *OTT* vaizdo paslaugų kokybės įvertinimo metodiką, įvertinama gaunama vaizdo peržiūros kokybė.

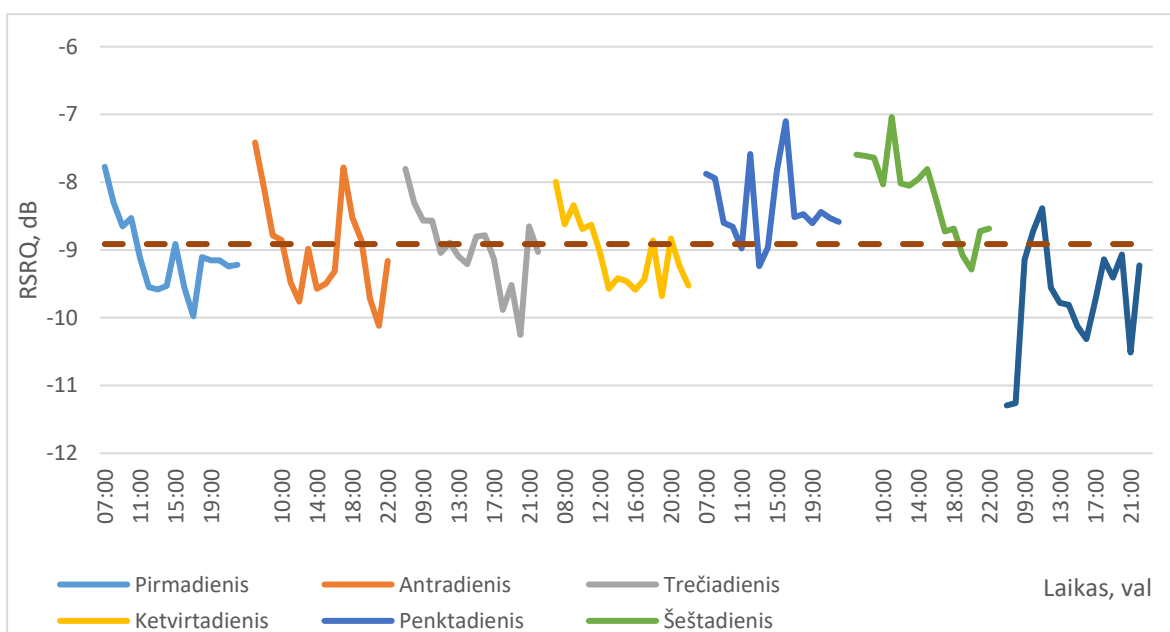
3.4. Mobiliojo ryšio kokybės parametų matavimo rezultatai

Tyrimo metu gauti priimtos atraminės signalo galios rezultatai parodė, kad vidutinė *RSRP* vertė savaitės eigoje lygi -96 dBm. Rezultatai nepastovūs ir tam tikrais dienos momentais pagerėja ir pakyla iki -83 dBm arba pablogėja ir nukrenta iki -100 dBm ir žemiau. Tyrimo metu užfiksuoti signalo lygio rezultatai laikomi gerais, nes didžioji matavimų dalis buvo geresni nei -100 dBm. Viso matavimo metu neužfiksuoti blogesni, nei -103 dBm rezultatai. Vidutiniai *RSRP* rezultatai savaitės eigoje pateikti 3.3 pav.



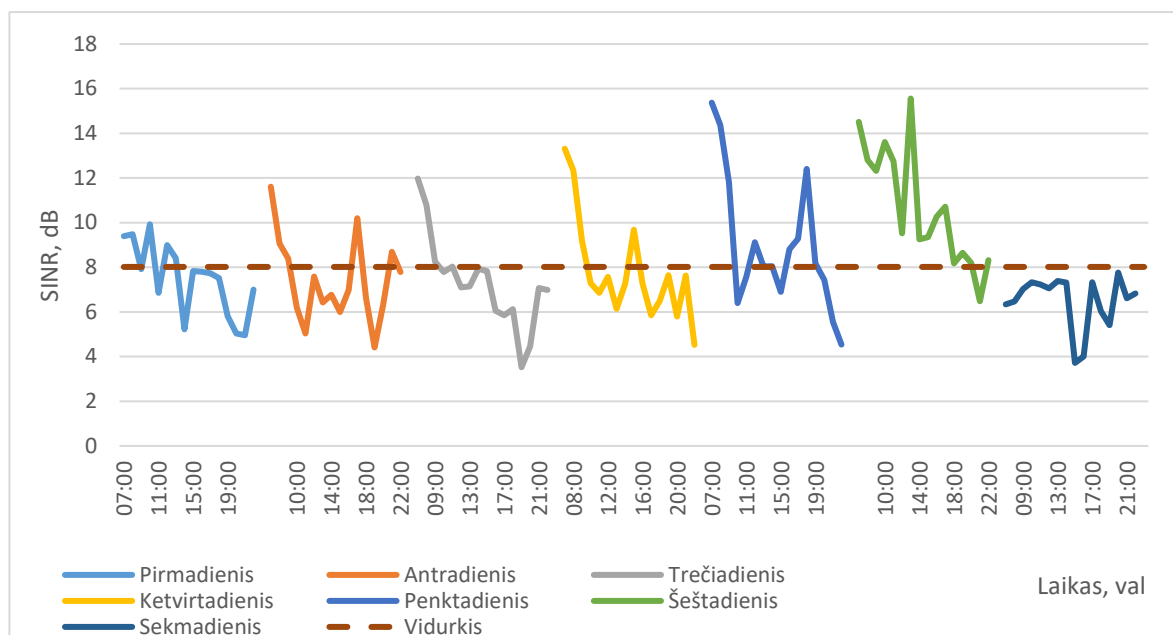
3.3 pav. *RSRP* rezultatai savaitės eigoje

Vidutinis priimto atraminio signalo kokybės rodiklis savaitės eigoje apskaičiuotas -8,9 dB. Rezultatai varijuoja nuo -7 dB iki -11,5 dB. Šios vertės vertinamos kaip gero ar patenkinamo signalo vertės. Pastebimas *RSRQ* parametro verčių prastėjimas antroje dienos pusėje, iki vidutiniškai -9,5 dB. Tyrimo metu gauti *RSRQ* savaitės eigoje rezultatai pateikti 3.4 pav.



3.4 pav. *RSRQ* rezultatai savaitės eigoje

Tyrimo metu gautų signalo ir interferencijos su triukšmu santykio vidutinė vertė lygi 8 dB. *SINR* parametro vertės varijuoja nuo 4 dB iki 15 dB. Pastebimas ženklus *SINR* pagerėjimas šeštadienio dienos pirmoje pusėje. *SINR* rezultatai dienos eigoje pateikti 3.5 pav.



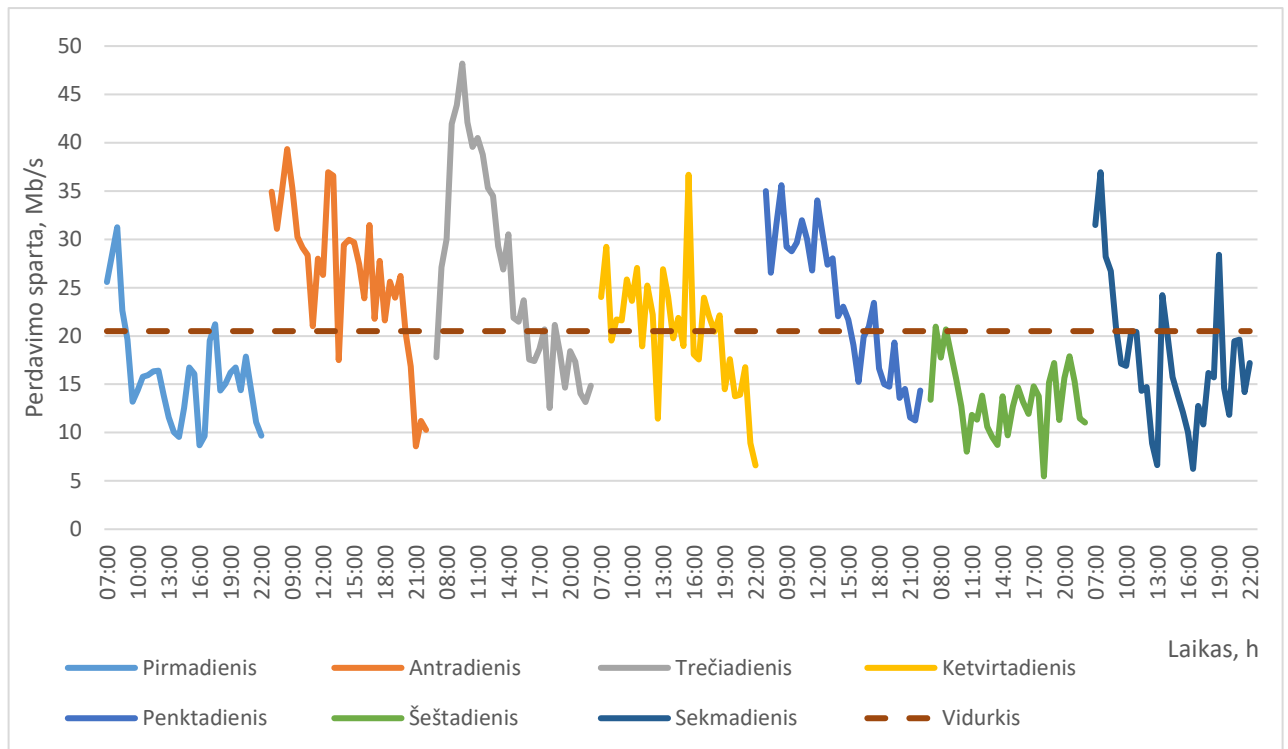
3.5 pav. *SINR* rezultatai savaitės eigoje

Remiantis tyrimo duomenimis galima teigti, kad viso mobiliojo ryšio kokybės parametrų tyrimo metu užfiksuotos gero signalo vertės. Laiko momentų, kurių metu galėtų būti gauti prasti tolimesnių tyrimų rezultatai, neaptinkama.

3.5. Mobiliojo tinklo apkrovos parametrų matavimo rezultatai

Tiriant mobiliojo ryšio perdavimo spartą nustatyta, kad vidutinė visų dienų sparta buvo lygi 20,5 Mb/s. Pastebėta, kad pirmoje dienos pusėje, nuo 7 iki 14 valandos, vidutinė perdavimo sparta siekė 24,3 Mb/s, o antroje dienos pusėje, nuo 14 iki 22 valandos, krito iki 16,6 Mb/s. Šis duomenų perdavimo spartos kritimas antroje dienos pusėje pastebimas penkiose iš septynių dienų, nuo antradienio iki penktadienio. Pirmadienio dienos rezultatai parodo, kad perdavimo spartos kritimas vyko nuo 9 valandos. Perdavimo sparta krito nuo 31 Mb/s iki 15 Mb/s, o sekmadienio dienos eigoje perdavimo sparta krito nuo 36 Mb/s iki 14 Mb/s.

Tokį perdavimo spartos dėsningumą dienos eigoje galima paaiškinti jį susiejant su vartotojų mobiliųjų paslaugų vartojimo įpročiais. Dienos pradžioje didžioji dauguma vartotojų yra užsiėmę darbo ar kitais reikalais, o po pietų, antroje dienos pusėje, atlikę reikalingas užduotis, atsipalaiduoja ir daugiau laiko praleidžia naršydami internete ar kitaip naudodami mobilųjį ryšį, sukurdami didesnę duomenų srautą, kuris apkrauna tinklą. Vidutinės perdavimo spartos savaitės eigoje palyginimas pateiktas 3.6 pav.

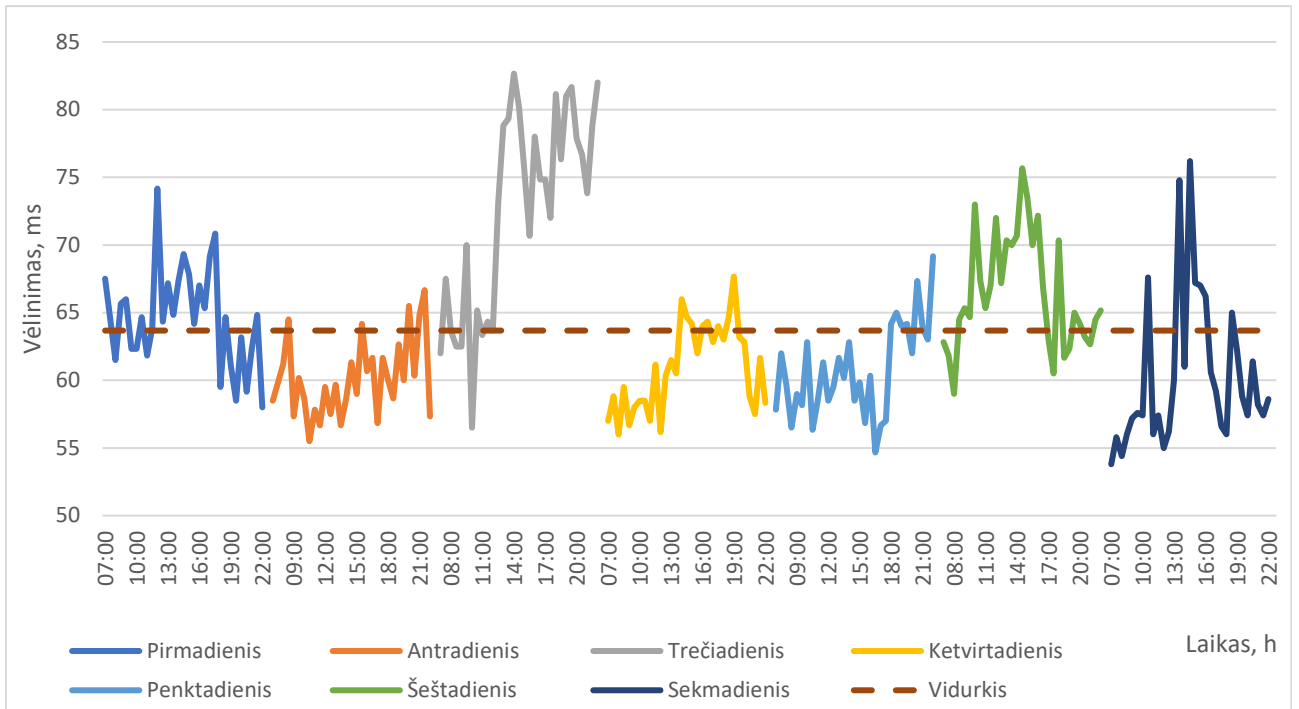


3.6 pav. Mobiliojo ryšio perdavimo sparta savaitės eigoje

Lyginant gautus perdavimo spartos duomenis su reikalaujama perdavimo sparta *OTT* vaizdo paslaugoms teikti, pastebima, kad pirmoje dienos pusėje, vartotojams neturėtų kilti didelių trikdžių stebint *4K Ultra HD* kokybės vaizdo įrašą, kuriam peržiūrėti rekomenduojama bent 25 Mb/s perdavimo sparta. Tačiau antroje dienos pusėje *4K UltraHD* kokybės vaizdo įrašo nepavyktų peržiūrėti sklandžiai, nes vartotojams suteikiama ženkliai mažesnė sparta, kurios užtektų peržiūrėti *FullHD* kokybės įrašui.

Nors didžiausia savaitės eigoje užfiksuota perdavimo sparta siekė net 48 Mb/s, šios spartos pakaktų *8K UltraHD* vaizdo įrašo peržiūrai, tačiau neužtikrinus pastovių ryšio kokybės rodiklių, vaizdo perdavimo paslaugų kokybiškai teikti nebūtų galimybės. Iš tyrimo rezultatų pastebima, kad mobilios ryšio tiekėjas negali užtikrinti pastovios duomenų perdavimo spartos.

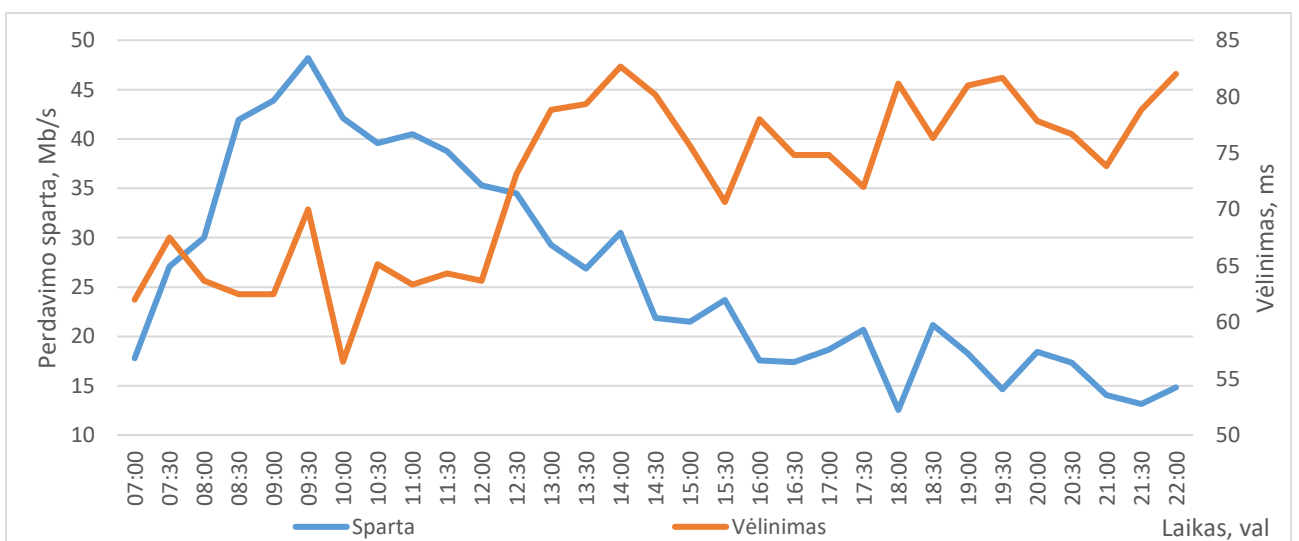
Remiantis tyrimo rezultatais nustatyta, kad vidutinis visos savaitės vėlinimas buvo lygus 63,7 ms. Tiriant mobiliojo ryšio vėlinimą pastebimas atvirkštinis dėsningumas perdavimo spartai. Pirmoje dienos pusėje vėlinimas išmatuotas ženkliai mažesnis, nei antroje dienos pusėje. Kai kuriais atvejais, pavyzdžiui, trečiadienio dienos pirmoje pusėje, nuo 7 iki 14 valandos, vėlinimas buvo užfiksuotas 67,7 ms, kai tos pačios dienos antroje pusėje, nuo 14 iki 22 valandos, vidutinis vėlinimas siekė 77,2 ms. Vidutinio vėlinimo savaitės eigoje palyginimas pateiktas 3.7 pav.



3.7 pav. Mobiliojo ryšio vėlinimas savaitės eigoje

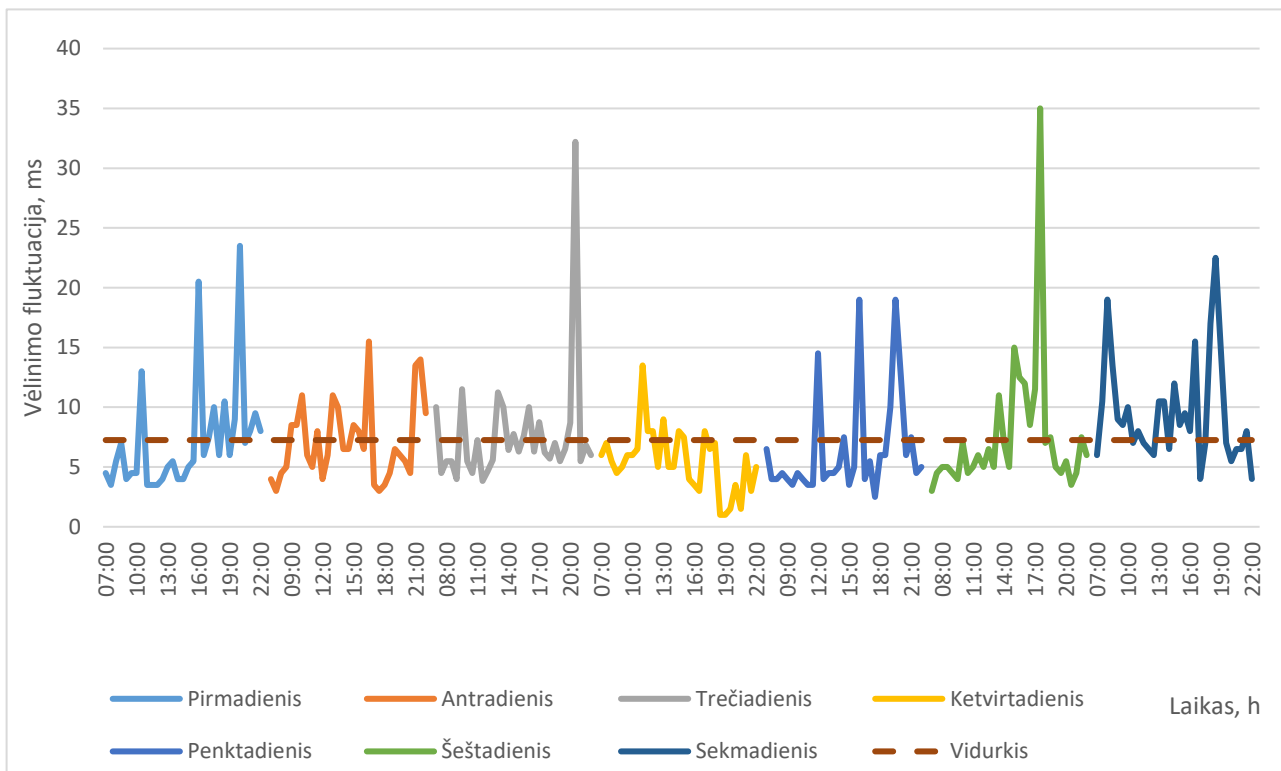
Norint teikti aukštos kokybės *OTT* vaizdo paslaugas, tyrimo metu pasirinktu tinklu, reikia ženkliai sumažinti ryšio vėlinimą bent iki 20–30 ms. Šiuo metu dėl didelio ryšio vėlinimo mobiliojo ryšio operatorius negali suteikti kokybiškų ir pastovių *4K UltraHD* ir *8K UltraHD* aukštos raiškos vaizdo transliavimo paslaugų.

Lyginant perdavimo spartos ir vėlinimo rezultatus pastebima, kad esant mažam ryšio vėlinimui išmatuojama didesnė perdavimo sparta. Šis dėsniumas labiausiai pastebimas trečiadienio vėlinimo ir perdavimo spartos rezultatų palyginime, kuris pateiktas 3.8 pav. Esant ryšio vėlinimui apie 63 ms, vidutinė perdavimo sparta išmatuojama net iki 48 Mb/s. Toliau, dienos eigoje, didėjant vėlinimui iki vidutiniškai 77 ms, išmatuojama perdavimo sparta krenta iki 18 Mb/s.



3.8 pav. Trečiadienio vidutinės perdavimo spartos ir vėlinimo palyginimas

Tiriant vėlinimo fluktuaciją, nustatyta, kad vidutinė savaitės vertė lygi 7,2 ms. Savaitės eigoje vėlinimo fluktuacija svyruoja nuo 1,5 ms iki 35 ms, tačiau didžioji dalis matavimų rezultatų pasiskirstę intervale nuo 5 ms iki 10 ms. Lyginant trečiadienio ir šeštadienio vėlinimo ir vėlinimo fluktuacijos reikšmes, pastebima, kad esant padidėjusiam vėlinimui antrąje dienos pusėje, išmatuojamos didžiausios savaitės vėlinimo fluktuacijos vertės yra nuo 32 ms iki 35 ms. Šie nukrypimai nuo vidutinės vertės, tikėtina, kad yra labiau atsitiktiniai nei dėsningi. Tačiau kitomis dienomis – pirmadienį, penktadienį ir sekmadienį, antrąje dienos pusėje išmatuojant didesnes vėlinimo vertes, gaunamos didesnės vėlinimo fluktuacijos vertės, todėl galima teigti, kad esant pasidėjusiam ryšio vėlinimui, padidėja vėlinimo fluktuacija. Gauti savaitės eigoje vėlinimo fluktuacijos rezultatai pateikti 3.9 pav.

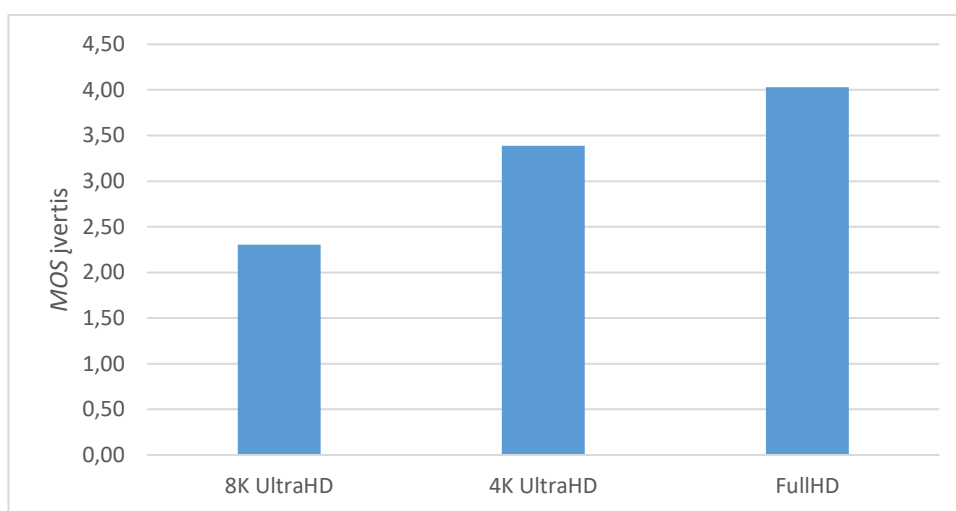


3.9 pav. Mobiliojo ryšio vėlinimo fluktuacija savaitės eigoje

Tiriant paketų praradimą nustatyta, kad vidutinė savaitės paketų praradimo vertė lygi 0,79 %. Šis rodiklis, panašu, kad yra labiau atsitiktinis, nes didžiąją matavimų dalį lygus arba labai artimas 0 %. Tačiau kai kuriais duomenų matavimo atvejais, paketų praradimo parametras pakyla iki vidutiniškai 3,6 %, o kai kuriais, pavieniais atvejais, pakyla net iki 7–8 %. Tai yra arti dešimtadalio prarastų duomenų, toks didelis prarastų duomenų kiekis gali ženkliai pabloginti bet kokių paslaugų kokybę. Gauti paketų praradimo savaitės eigoje rezultatai pateikti 3.10 pav.

4K UltraHD vaizdo peržiūros metu, paslauga suteikiama sklandžiau, nei *8K UltraHD* atveju, nors pakartotinio buferio užkrovimas vyko 18 kartų, tačiau vidutinė užkrovimo trukmė buvo 4 sekundės, o pakartotinio buferio užkrovimas sudarė apie 50 % peržiūros trukmės. Išmatuota duomenų perdavimo sparta vidutiniškai buvo apie 39 Mb/s. Tokia perdavimo sparta turėtų būti pakankama sklandžiam paslaugos teikimui, tačiau buvo pastebimas dažnas, bet trumpas buferio užkrovimas. Apskaičiuotas paslaugos teikimui *MOS* rodiklis lygus 3,39. Paslaugos teikimas vertinamas kaip prastas, nes buvo pastebimi dažni trikdžiai, nors ir trumpesni, nei *8K UltraHD* kokybės atveju.

Vykstant *FullHD* kokybės vaizdo įrašo peržiūrai, pakartotinai buferis buvo užkrautas 1 kartą, kurio trukmė buvo apie 0,5 sekundės. Šiuo atveju buvo teikiama kokybiška vaizdo įrašo peržiūra. Vidutinė duomenų perdavimo sparta peržiūros metu buvo apie 26,5 Mb/s, o apskaičiuotas *MOS* rodiklis lygus 4,03. Paslauga vertinama, kad suteikta kokybiškai, be dažnų ir pastebimų trukdžių. 3.11 pav. pateikiamas *OTT* vaizdo įrašų paslaugos skirtingų vaizdo kokybių peržiūros įvertinimo palyginimas.



3.11 pav. *OTT* vaizdo įrašų peržiūros paslaugų įvertinimas

Remiantis gautais duomenimis galima teigti, kad pasirinktas mobiliojo ryšio operatorius nėra pasirengęs kokybiškam *8K UltraHD* ir *4K UltraHD* *OTT* vaizdo įrašo peržiūros paslaugų teikimui. Paslaugų kokybės įvertinimas suprastėjo dėl per ilgo pakartotinio buferio užkrovimo *8K UltraHD* peržiūros metu ir per dažno pakartotinio buferio užkrovimo *4K UltraHD* peržiūros metu. *FullHD* vaizdo įrašo peržiūros metu kokybė užtikrinama gera ir sklandi, be didesnių trukdžių.

3.7. Tyrimo išvados

Mobiliojo ryšio kokybės parametų tyrimo metu nustatyta, kad vidutinė *RSRP* vertė lygi -96 dBm. Viso matavimo metu užfiksuotos vertės vertinamos geru arba patenkinamu signalo lygiu. Išmatuota vidutinė *RSRQ* parametro reikšmė lygi -8,9 dB. Vertės nežymiai varijuoja, tačiau neviršija prasto signalo ribos. Nustatyta, kad *SINR* vidutinė vertė savaitės eigoje lygi 8 dB, o išmatuotos vertės varijuoja nuo 4 dB iki 12 dB. Išskiriama šeštadienio diena, nes gaunami geriausi signalo lygio rezultatai. *RSRP* vertė pirmoje dienos pusėje išmatuojama vidutiniškai apie 97 dBm, tačiau antroje dienos pusėje nukrenta iki -86 dBm. *RSRQ* pirmoje dienos pusėje fiksuojamas apie -7,5 dB, tačiau antroje dienos pusėje pakyla iki vidutinės savaitės vertės – -9 dB. *SINR* pirmoje dienos pusėje išmatuojamas apie 12 dB, tačiau antroje dienos pusėje nukrenta iki savaitės vidutinės vertės – 8 dB. Pastebima, kad visos savaitės eigoje neužfiksuota prasto mobiliojo ryšio rezultatų, todėl galima

teigti, kad tolimesni tinklo apkrovos ir kokybės parametrų tyrimai nedaro įtakos prastam mobiliojo ryšio signalui.

Nustatyta, kad tyrimo metu gaunami perdavimo spartos rezultatai labai stipriai priklauso nuo dienos laiko. Dienos pradžioje, nuo 7 iki 14 valandos, matuojamo tinklo ryšio pralaidumo rezultatai gaunami geresni, o sparta siekia 25 Mb/s. Perdavimo sparta vidutiniškai nuo 14 valandos pradeda blogėti ir nukrenta iki 16 Mb/s. Geriausi užfiksuoti perdavimo spartos rezultatai yra trečiadienį – 48 Mb/s, o prasčiausi šeštadienį – 5 Mb/s. Savaitės eigoje pralaidumo rezultatų vidurkis siekia 21 Mb/s. Vidutinis savaitės vėlinimas užfiksuotas 63 ms, o vėlinimo rezultatai savaitės eigoje varijuoja ± 10 ms, nuo vidutinės vertės. Trečiadienio rezultatuose, antroje dienos pusėje, pastebimas ženklus vėlinimo pablogėjimas. Tai gali būti perdavimo spartos rezultatų pablogėjimo tą dieną priežastis. Vėlinimui pablogėjus nuo 65 ms iki 80 ms, perdavimo sparta krito nuo 48 iki 18 Mb/s. Išvelgiama atvirkštinė vėlinimo įtaka perdavimo spartai. Vidutinė ryšio vėlinimo fluktuacija savaitės eigoje išmatuota apie 7 ms. Vėlinimo fluktuacijos vertės svyruoja nuo vidutinės vertės apie 10 ms, tačiau retais atvejais išauga iki 32–35 ms, kai išauga ryšio vėlinimas ir suprastėja perdavimo spartos rezultatai. Ištyrus paketų praradimą ryšio metu, nustatyta, kad vidutinis paketų praradimas lygus 0,7 %, tačiau tai yra atsitiktinis parametras, kurio rezultatai tam tikrais matavimo momentais padidėja iki 7–8 %. Ženklus paketų praradimo padidėjimas reiškia informacijos turinio praradimą, kuris negali būti atkurtas, o tai ženkliai pablogina teikiamų paslaugų kokybę.

Pastebima, kad tirtas mobilusis tinklas neturi galimybės teikti stabilių aukštos kokybės *OTT* vaizdo paslaugų, dėl nestabilios perdavimo spartos, didelio ryšio vėlinimo ir didelio paketų praradimo. Tiriant *OTT* vaizdo paslaugų kokybės teikimo galimybes patvirtinta, kad tinklas negali užtikrinti stabilių sąlygų teikiant aukštos kokybės *OTT* vaizdo perdavimo paslaugas. Nustatyta, kad vertinant paslaugų suteikimo kokybę *8K UltraHD* ir *4K UltraHD* atveju, paslaugų teikimo rezultatai gaunami prasti dėl nepakankamo buferio užkrovimo. *MOS* įvertis *8K UltraHD* kokybės peržiūros metu lygus 2,3, *4K UltraHD* kokybės peržiūros metu – 3,39. Vertinant *FullHD* kokybės vaizdo įrašo perdavimą, peržiūros kokybė buvo labai gera, vartotojui tiekama stabili ir kokybiška paslauga, o *MOS* rodiklis apskaičiuotas apie 4,03.

4. Tinklo modelio sudarymas

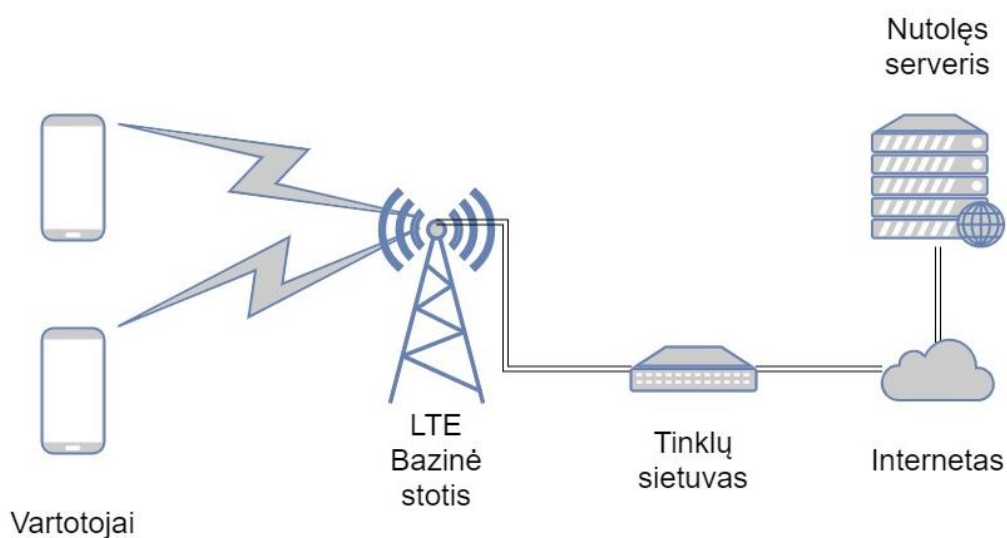
OTT paslaugų, perduodamų mobiliuoju ryšiu kokybei įvertinti, sukurtas *LTE* tinklo modelis, kurio rezultatai panašūs į mobiliojo ryšio tinklo tyrimo metu gautus rezultatus. Gavus tinkamus rezultatus pritaikomi tinklo modelio pagerinimo sprendimai. *OTT* paslaugų perdavimo mobiliuoju *LTE* tinklu modelis aprašomas atvirojo kodo *NS-3* programos bibliotekomis. *NS-3* yra atvirojo kodo diskretinių įvykių modeliavimo programa, skirta modeliuoti interneto sistemų scenarijus, veikianti *Linux* operacinėje sistemoje, o programos kodas aprašomas *Python*, *C* arba *C++* kalbomis [27].

Sukuriamam modeliui naudojama *LTE* tinklo topologijos struktūra, kuri sudaryta iš:

- vartotojų;
- *LTE* bazinės stoties;
- tinklų sietuvo (angl. *gateway*);
- nutolusio serverio.

Tarp vartotojų ir bazinės stoties vykdomas mobilusis *LTE* technologijos ryšys. Ryšys tarp *LTE* bazinės stoties, tinklų sietuvo ir nutolusio serverio vykdomas laidinėmis priemonėmis. Sudarytas modelis yra teorinio lygmens, todėl jame nėra įvertinami su šio modelio struktūra nesusiję veiksniai, tokie, kaip kitų mobiliojo ryšio operatorių bazinių stočių sukuriama interferencija ir kita.

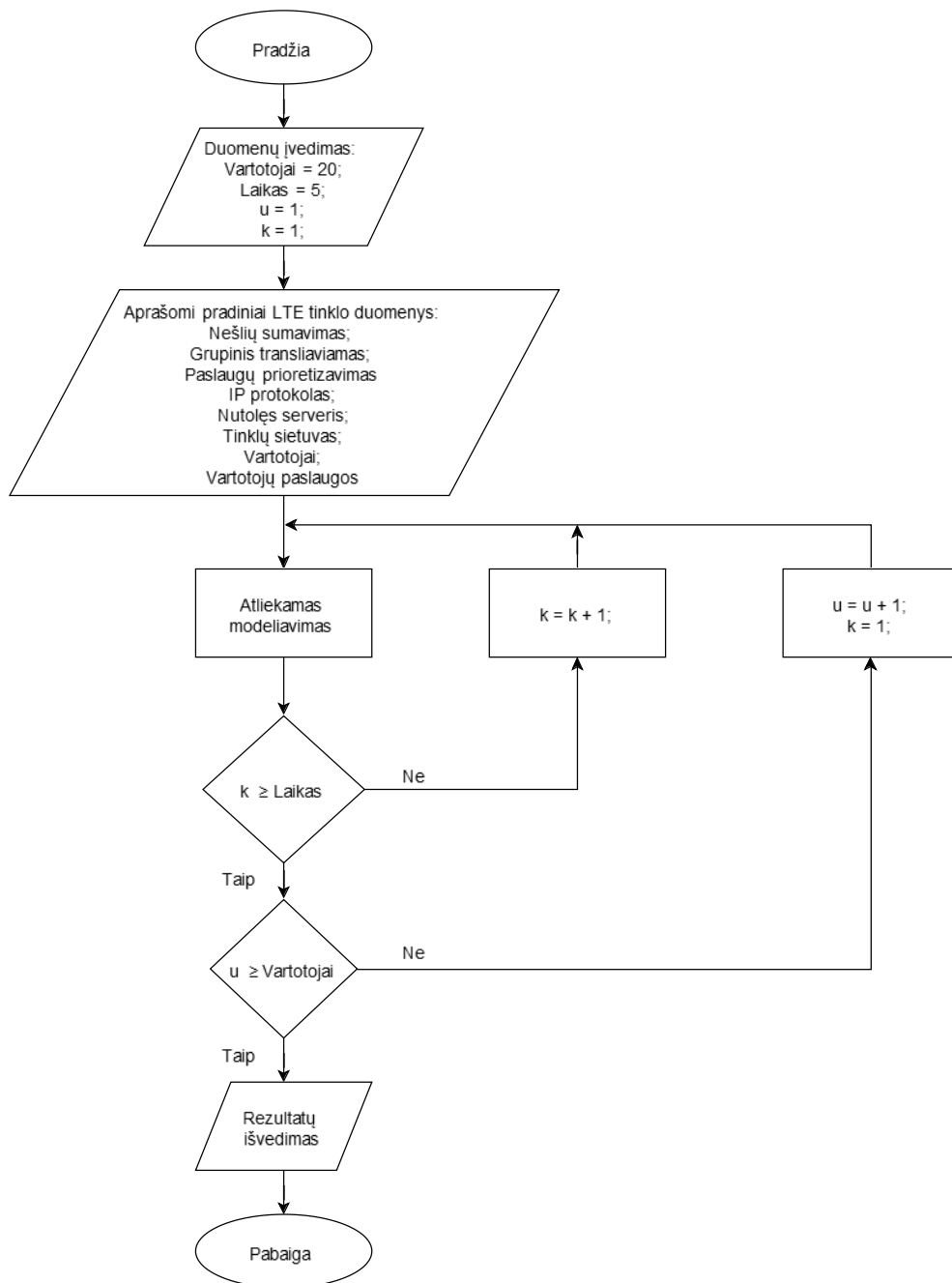
Ryšys vyksta nenutrūkstamai tarp nutolusio serverio ir vartotojų, nustatytą laiko trukmę. Modeliavimo metu nuskaitomi tinklo apkrovos ir mobiliojo ryšio kokybės parametrai, kurie sisteminami ir įrašomi į išorinius dokumentus. 4.1 pav. pateikta modeliui sudaryta naudota *LTE* mobiliojo ryšio tinklo topologija. Pilnas *LTE* tinklo modelio *NS-3* programos kodas pateiktas 1 priede.



4.1 pav. *LTE* tinklo topologija naudota modelio sudarymui

4.1. Tinklo modelio algoritmo sudarymas

Modeliavimui naudojama pagal 4.1 pav. sudaryto *LTE* topologijos tinklo struktūra. Modeliavimas atliekamas, didinant vartotojų kiekį tinkle nuo 1 vartotojo iki tol, kol kiekis tinkle sudaro 20 vartotojų. Modelis pradedamas esant vienam vartotojui tinkle ir trunka 5 sekundes, o 1 sekundės intervalu fiksuojami tinklo apkrovos ir ryšio kokybės parametrai. Modeliavimui pasiekus 5 sekundžių trukmę, padidinamas vartotojų kiekis tinkle, o modeliavimas pradedamas nuo pradžių. Modeliavimas baigiamas, pasiekus 20 vartotojų tinkle ir į išorinį duomenų failą išvedami modeliavimo metu sukaupti duomenys. *LTE* tinklo modeliavimo algoritmas pateikiamas 4.2 pav.



4.2 pav. Modeliavimo algoritmas

4.2. OTT paslaugų kokybės pagerinimo būdai

Šiuo metu OTT paslaugos perduodamos vienaipė sąsaja (angl. *unicast*). Vienatipė sąsaja – duomenų perdavimo metodas, kai duomenų srautas siunčiamas iš siuntėjo į vieną konkretų gavėjo įrenginį. Taip pat OTT paslaugoms nėra suteikiamas aukštesnis prioritetas interneto ryšio sraute ir įrenginiuose.

Galimi OTT paslaugų kokybės pagerinimo būdai:

1. naudoti grupinį transliavimą (angl. *multicast*). Grupinis transliavimas – duomenų perdavimas vienu metu keliems iš anksto aprašytiems vartotojams ar vartotojų grupėms. Tai gali būti vartotojai, naudojantys to pačio turinio OTT vaizdo paslaugas, o paslaugų turinio duomenys užsaugomi LTE bazinės stoties kaupikliuose (angl. *cache*);
2. aukštesnio prioriteto išskyrimas OTT paslaugų duomenų perdavimui. Šioms paslaugoms gali būti suteikiamas aukštesnio prioriteto lygis, kai OTT paslaugas naudojantiems vartotojams išskiriami papildomi ryšio resursai, kitų, ne tokio aukšto prioriteto, vartotojų sąskaita.

4.3. Scenarijų aprašymas

Modeliavimui sukuriama 3 scenarijai. Pradinis modeliavimo scenarijus atspindi mobiliojo ryšio kokybės ir tinklo apkrovos tyrimo rezultatus. Scenarijaus metu aprašomas vartotojų kiekis, kintantis nuo 1 iki 20 vartotojų, o modeliavimo laikas yra 5 sekundės, duomenų nuskaitymo dažnis 1 sekundė. Duomenų spartai užtikrinti naudojamas nešlių sumavimas (angl. *carrier aggregation*), o naudojamas duomenų perdavimo metodas – vienaipė sąsaja. Scenarijaus metu OTT paslaugų aukštesnio prioriteto priskyrimas yra išjungtas.

Antrojo scenarijaus metu, modelyje didinamas vartotojų kiekis nuo 1 iki 20. Modelio trukmė yra 5 sekundės, duomenų nuskaitymo intervalas – 1 sekundė. Duomenys perduodami grupinio transliavimo duomenų perdavimo sąsaja, naudojant įjungtą nešlių sumavimo funkciją. OTT paslaugų aukštesnio prioriteto priskyrimas yra išjungtas.

Trečiojo scenarijaus metu, kaip ir ankstesnių scenarijų atvejais, vartotojų kiekis didinamas nuo 1 iki 20, modelio trukmė – 5 sekundės, duomenų nuskaitymo dažnis kas 1 sekundę, nešlių sumavimo funkcija įjungta. Duomenys perduodami vienaipė sąsaja, su įjungta OTT paslaugų aukštesnio prioriteto suteikimo funkcija.

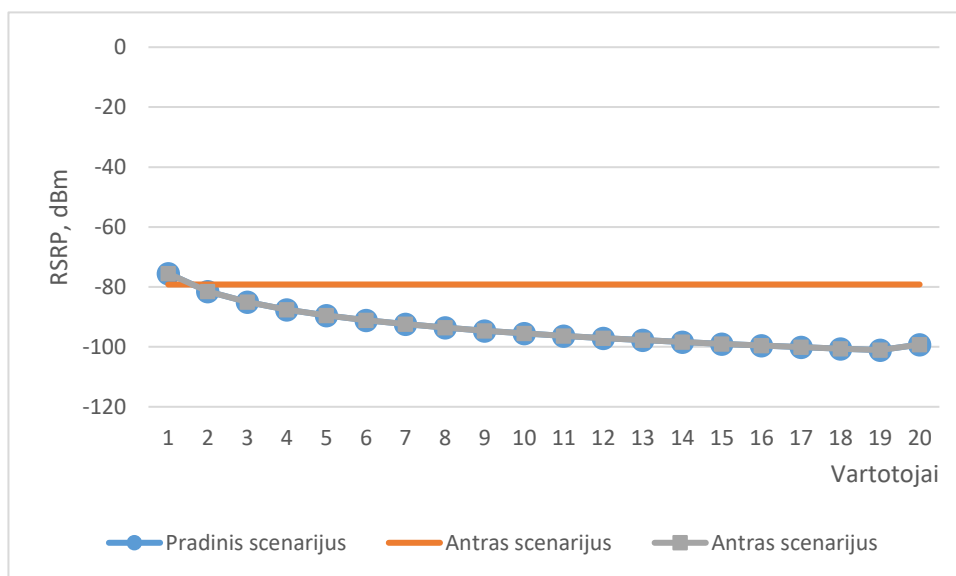
Pradinio, antrojo ir trečiojo scenarijų palyginimas pateiktas 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Pradiniai modelio parametrai

	Pradinis scenarijus	2 scenarijus	3 scenarijus
Vartotojų kiekis, vnt.	Nuo 1 iki 20	Nuo 1 iki 20	Nuo 1 iki 20
Modelio laikas, s	5	5	5
Duomenų nuskaitymo dažnis, s	1	1	1
Nešlių sumavimas	Ijungtas	Ijungtas	Ijungtas
Duomenų perdavimo metodas	Vienatipė sąsaja	Grupinis transliavimas	Vienatipė sąsaja
OTT paslaugų prioriteto suteikimas	Išjungtas	Išjungtas	Ijungtas

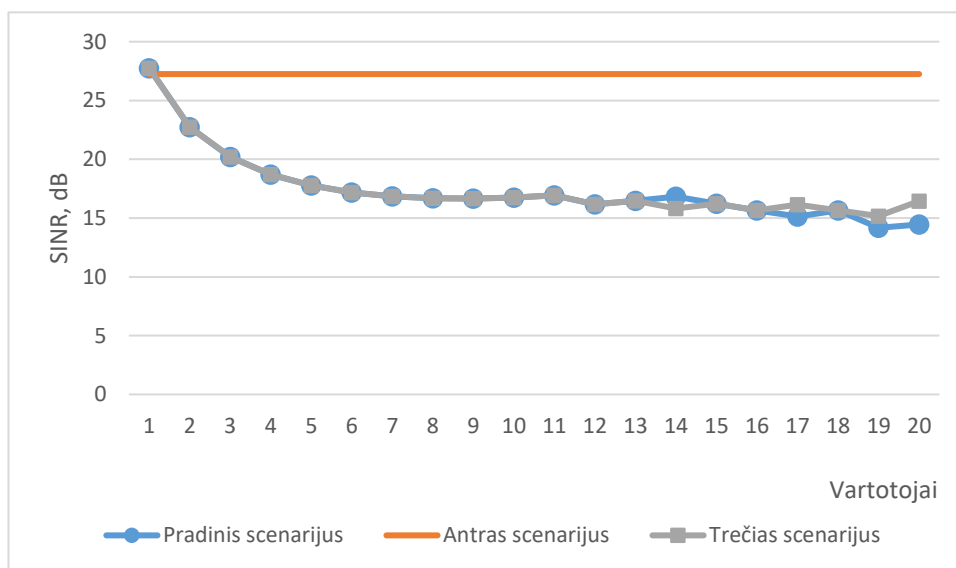
4.4. Mobiliojo ryšio tinklo kokybės parametrų modeliavimo rezultatai

Visų trijų scenarijų metu priimtas atraminis signalas buvo geros kokybės, nuo -75 dBm iki -101 dBm. Didėjant vartotojų kiekiui tinkle priimamas signalas yra slopinamas kitų vartotojų sukuriamos interferencijos. Tiek pradinio, tiek trečio scenarijaus metu, didėjant vartotojų kiekiui, signalas nežymiai slopsta. Antrojo scenarijaus metu signalas išlieka stabilus, nes visiems vartotojams siunčiama to paties turinio informacija, tuo pačiu ryšio kanalu. Aukštos kokybės signalu laikoma, kai *RSRP* yra žemiau nei -84, o geros kokybės signalu laikoma, kai *RSRP* mažiau nei -100. *RSRP* rezultatai pateikti 4.3 pav.



4.3 pav. *RSRP* rezultatai

Analizuojant signalo ir interferencijos rezultatus, priimamas signalas interferencijos ir triukšmo santykiu yra labai geras visą modeliavimo laiką. Daugėjant vartotojų kiekiui šis rodiklis mažėja. *SINR* viso modeliavimo metu nenukrenta žemiau 16 dB. Aukštos kokybės signalu laikoma, kai *SINR* apskaičiuojamas daugiau nei 12 dB. *SINR* rezultatai pateikti 4.4 pav.

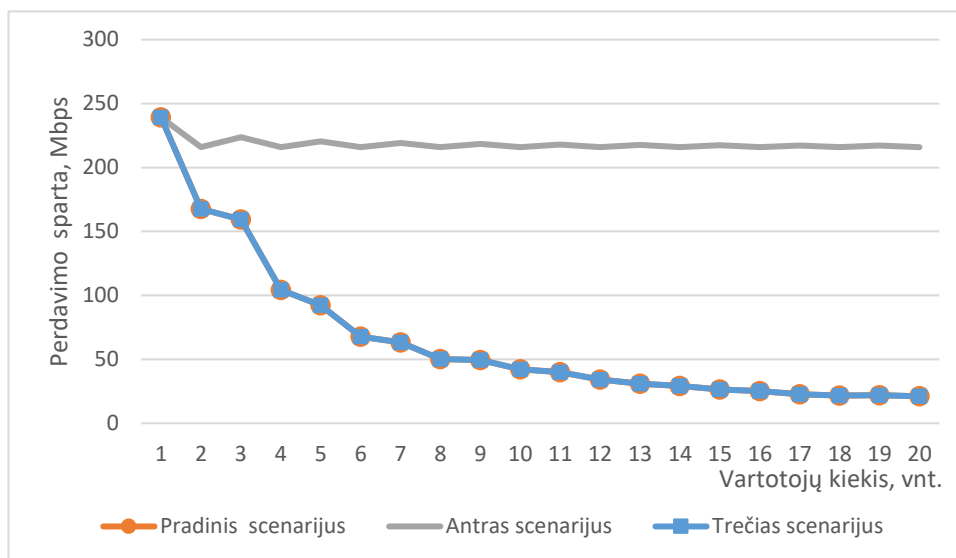


4.4 pav. *SINR* rezultatai

Apžvelgus gautus *RSRP* ir *SINR* rezultatus galima teigti, kad modeliavimo metu visiems vartotojams buvo tiekiamas puikios arba geros kokybės mobiliojo ryšio signalas.

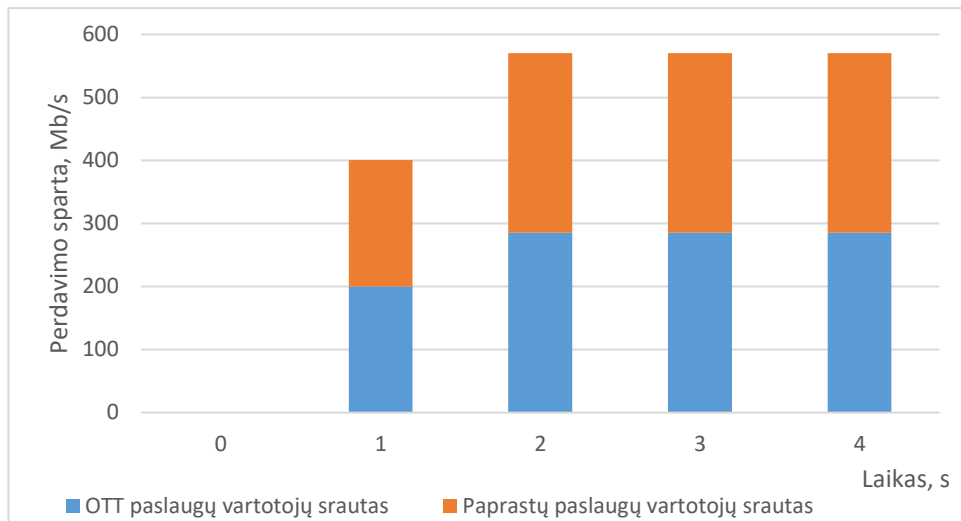
4.5. Mobiliojo ryšio tinklo apkrovos parametrų modeliavimo rezultatai

Analizuojant modeliavimo metu vartotojams suteikiamo duomenų perdavimo spartos rezultatus, pastebima, kad visų trijų scenarijų metu, kai vartotojų kiekis minimalus, jiems suteikiama maksimali 240 Mb/s sparta, tačiau pradinio ir trečio scenarijaus metu sparta ženkliai krenta augant vartotojų skaičiui. Pasiėkus 9 vartotojus tinkle, perdavimo sparta siekia 50 Mb/s, o tai yra rekomenduojama *8K UltraHD* vaizdo kokybės perdavimui. Pasiėkus 16 vartotojų tinkle, perdavimo sparta siekia 25 Mb/s, o tokia sparta yra rekomenduojama *4K UltraHD* vaizdo kokybės perdavimui.



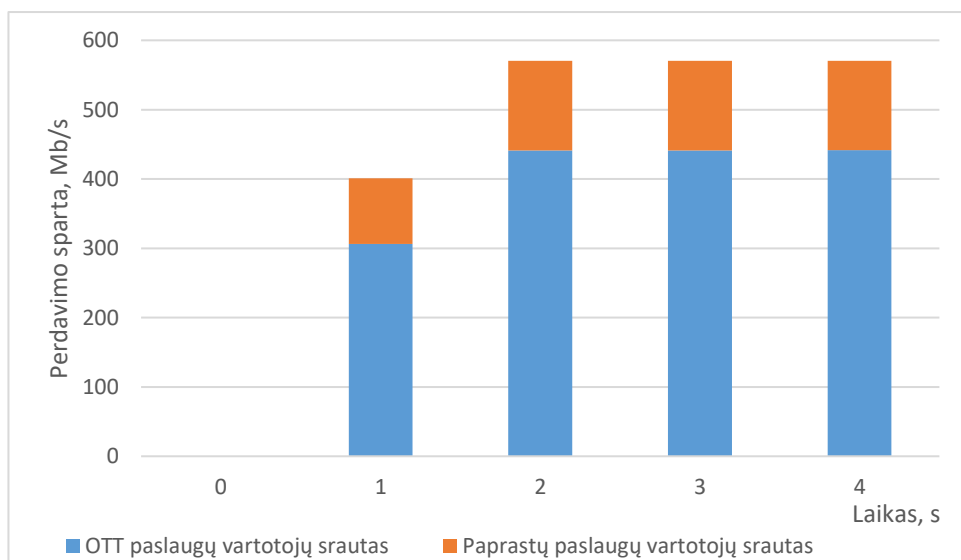
4.5 pav. Perdavimo spartos rezultatai

Analizuojant *OTT* paslaugų prioriteto sprendimą, aukštesnio prioriteto priskyrimo scenarijaus metu, bendra vartotojams teikiama duomenų perdavimo sparta nepadidėja, tačiau yra perskirstoma aukštesnio prioriteto vartotojams. 4.6 pav. ir 4.7 pav. pateiktas vartotojams suteikiamo srauto dalies pasiskirstymo palyginimas, kai tinkle yra 20 vartotojų. Kai nėra aktyvuotas *OTT* paslaugų aukštesnio prioriteto priskyrimas, duomenų perdavimo sparta vartotojams paskirstoma tolygiai, nepriklausomai nuo to, kokias paslaugas jie vartoja. Šiuo atveju visiems vartotojams pasiūloma vidutinė 28 Mb/s perdavimo sparta.



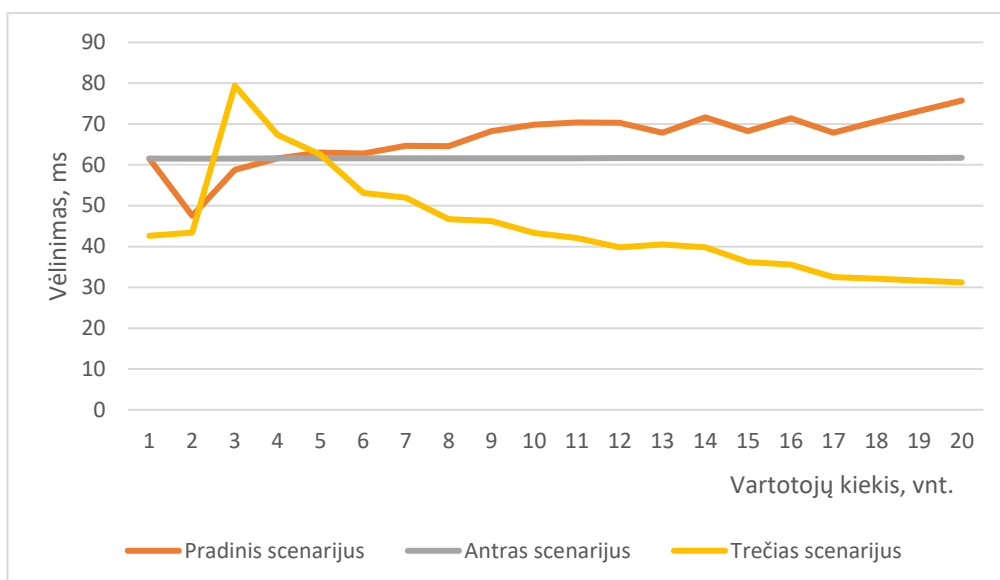
4.6 pav. Pradinio scenarijaus, be *OTT* prioriteto, vartotojų perdavimo spartos pasiskirstymas

Aktyvavus modeliuojamo tinklo *OTT* paslaugų aukštesnio prioriteto priskyrimą, iš karto pastebimas *OTT* paslaugų vartotojų perdavimo spartos padidėjimas. 10 vartotojų, kurie naudoja *OTT* paslaugas, pasiūloma 75 % tinklo galimos perdavimo spartos. Kitai 10 vartotojų grupei, kuri naudoja kito tipo paslaugas, pasiūloma 25 % galimos perdavimo spartos. *OTT* paslaugų vartotojams šiuo atveju pasiūloma vidutinė 44 Mb/s sparta, o kitų paslaugų vartotojams – vidutinė 12 Mb/s sparta. *OTT* paslaugas naudojantiems vartotojams pritaikius aukštesnio prioriteto priskyrimą, pateikiama 71 % didesnė perdavimo sparta.



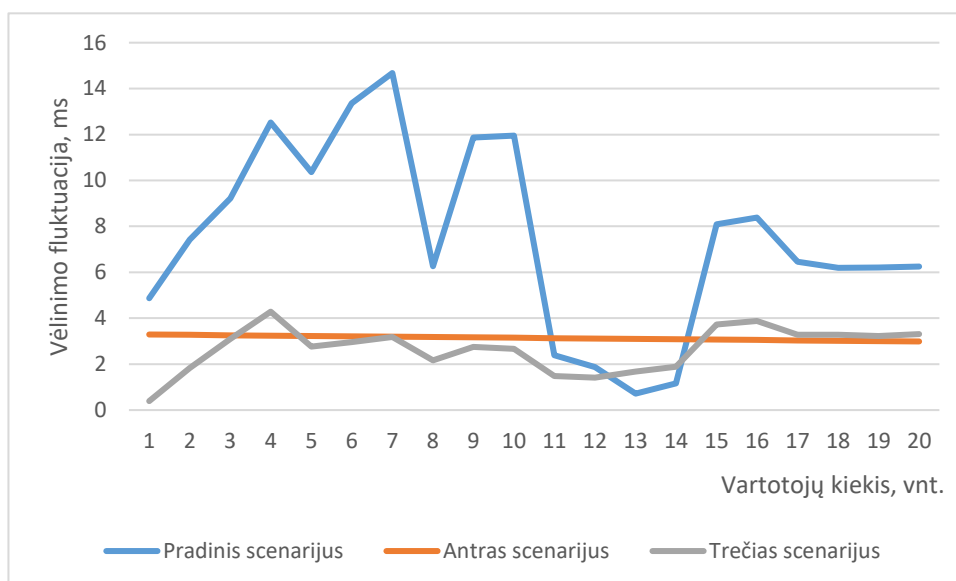
4.7 pav. Antro scenarijaus, su *OTT* prioritetu, vartotojų perdavimo spartos pasiskirstymas

Analizuojant vėlinimo rezultatus, kardinalių pokyčių tarp scenarijų nepastebima. Pradinio ir antro scenarijaus vėlinimas svyruoja apie 60 ms, trečio scenarijaus metu gauti vėlinimo rezultatai yra šiek tiek geresni, svyruoja apie 30–40 ms. *4K UltraHD* ir *8K UltraHD* vaizdo perdavimui tai gali būti šiek tiek per didelis vėlinimas. *FullHD* kokybės įrašui perduoti toks vėlinimas neturėtų sudaryti trikdžių. Modeliavimo metu gauti vėlinimo rezultatai pateikti 4.8 pav.



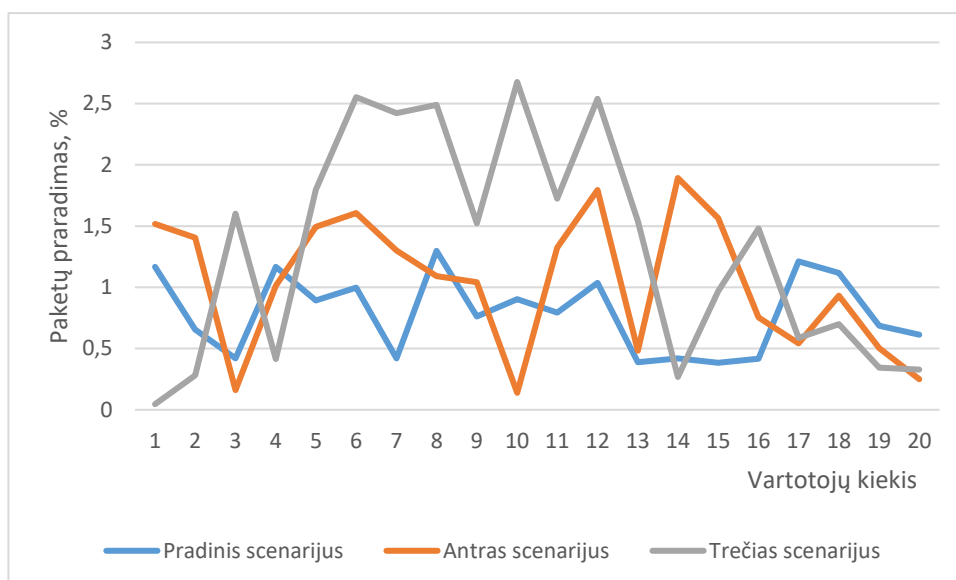
4.8 pav. Vėlinimo rezultatai

Modeliavimo metu gauti vėlinimo fluktuacijos rezultatai yra atsitiktiniai. Pradinio scenarijaus metu gaunami prastesni rezultatai svyruojantys nuo 0,7 ms iki 14,6 ms. Antro ir trečio scenarijaus rezultatai yra pastovesni ir svyruoja tarp 1,5 ms ir 3 ms. Vėlinimo fluktuacijos rezultatai pateikti 4.9 pav.



4.9 pav. Vėlinimo fluktuacijos rezultatai.

Tyrimo metu nustatyta, kad paketų praradimas yra atsitiktinis parametras. Iš modeliavimo metu gautų paketų praradimo rezultatų, kurie pateikti 4.10 pav., galima patvirtinti, kad paketų praradimas yra atsitiktinis parametras. Visų trijų scenarijų gauti rezultatai yra atsitiktiniai ir svyruoja labai įvairiai. Pradinio scenarijaus paketų praradimas svyruoja nuo 0,4 % iki 1,2 %, antro scenarijaus nuo 0,13 % iki 1,9 %, o trečio scenarijaus nuo 0,01 % iki 2,7 %.



4.10 pav. Paketų praradimo rezultatai

4.6. Rezultatų apibendrinimas

Išanalizavus gautus modeliavimo rezultatus, galima teigti, kad radijo ryšys visų scenarijų metu visiems vartotojams buvo užtikrintas tinkamos kokybės. Priimto signalo atraminė galia *RSRP* svyravo nuo -75 dBm iki -100 dBm, o signalo ir interferencijos su triukšmu santykis *SINR* buvo daugiau nei 16 dB.

Nustatyta, kad naudojant grupinio transliavimo sąsają, vartotojams naudojamiems to paties turinio vaizdo *OTT* paslaugas, galima pasiūlyti didžiausią maksimalią perdavimo spartą iki 230 Mb/s. Tačiau naudojant skirtingo turinio *OTT* vaizdo paslaugas, grupinis transliavimas yra netinkama technologija, todėl pritaikius *OTT* paslaugoms aukštesnio prioriteto priskyrimą, aukštesnio prioriteto vartotojams pateikiama iki 71 % didesnė perdavimo sparta, kuri siekia iki 48 Mb/s. Abu scenarijai užtikrina perdavimo spartą kokybiškai *4K UltraHD* ir *8K UltraHD* vaizdo peržiūrai.

Modeliavimo metu gauti duomenys parodo, kad mažesnio vėlinimo nei 20 ms pasiekti nepavyko. Rezultatai svyruoja tarp 30–60 ms. Tinklo *OTT* paslaugų aukštesnio prioriteto suteikimo atveju rezultatai šiek tiek geresni, nes nukrenta iki 30 ms. Tokio vėlinimo teoriškai turėtų pakakti *4K UltraHD* vaizdo įrašo peržiūrai. Vėlinimo fluktuacijos rezultatai parodo, kad lyginant su pradiniu scenarijumi, antro ir trečio scenarijaus metu pasiekti geresni rezultatai, kurie svyruoja tarp 1,5 ms ir 3 ms. Tokia vėlinimo fluktuacija laikoma maža.

Modeliavimo metu gauti duomenys patvirtina tyrimo metu iškeltą teoriją, kad paketų praradimas yra atsitiktinis parametras, neturintis tendencijos. Šis parametras yra labai nepastovus ir visais scenarijais parodė atsitiktines charakteristikas. Geriausi rezultatai pastebėti pradinio ir grupinio transliavimo scenarijaus atvejais, o prastesni aukštesnio prioriteto priskyrimo scenarijaus atveju.

5. Tyrimo ir modeliavimo rezultatų palyginimas

5.1 lentelėje pateiktas tyrimo ir modeliavimo rezultatų palyginimas, kai analizuojami maksimalios apkrovos tinklo ir *OTT* vaizdo paslaugų perdavimui reikšmingi rodikliai. Lentelėje patiekiamas parametų palyginimas tarp maksimalios apkrovos metu apskaičiuotų rezultatų. Tyrimo atveju vidutinės savaitės vertės laikomos maksimalios apkrovos metu registruoti rezultatai, o scenarijų atvejais – 20 vartotojų tinkle metu gauti rezultatai.

5.1 lentelė. Maksimalios apkrovos metu tyrimo ir modelio rezultatų palyginimas

	Tyrimas	Pradinis scenarijus	Grupinio transliavimo scenarijus	Aukštesnio prioriteto priskyrimo scenarijus
<i>RSRP</i> , dBm	-96	-99,2	-79,2	-99,2
<i>SINR</i> , dB	8	14,4	12,7	16,4
Perdavimo sparta, Mb/s	20,5	21,1	215,9	21,1
Vėlinimas, ms	63,7	75,7	61,7	31,2
Vėlinimo fluktuacija, ms	7,3	6,2	2,9	3,3
Paketų praradimas, %	0,8	0,6	0,3	0,3

Pastebima, kad tyrimo metu išmatuoti parametrai neženkliai skiriasi nuo modeliavimo pradinio scenarijaus apskaičiuotų rezultatų, o visi rodikliai nežymiai varijuoja. Grupinio transliavimo scenarijaus metu, kai buvo pritaikyta grupinio transliavimo technologija, perdavimo spartos rezultatai gaunami 10 kartų geresni, nei tyrimo metu gauti rezultatai. Modeliavimo metu apskaičiuotų ryšio kokybės *RSRP* ir *SINR* parametų reikšmės gaunamos geresnės už tyrimo rezultato reikšmes, nes modeliavimo metu nėra įvertinama kitų, pašalinių signalų įtaka, kuri yra juntama realių matavimų metu. Aukštesnio prioriteto priskyrimo scenarijaus metu ryšio kokybės ir perdavimo spartos rezultatai gaunami panašūs į pradinio scenarijaus, tačiau pastebimas 2 kartus mažesnis vėlinimas, nei kitais atvejais.

Išvados

1. Literatūros analizės metu buvo išsiaiškinta mobiliaisiais tinklais perduodamų *OTT* vaizdo paslaugų problematika ir apžvelgti *OTT* vaizdo paslaugoms teikti mobiliuoju ryšiu reikšmingi kokybės parametrai. Išsiaiškinta, kad vaizdo perdavimo paslaugos yra populiariausios rūšies *OTT* paslaugos, o vartotojai 4 kartus daugiau laiko linkę naudotis mobiliuoju ryšiu, nei fiksuotu ryšiu. Aptarta *5G* technologijai būdinga problematika, dėl mažos tinklo aprėpties, todėl mažesnio gyventojų tankumo teritorijose, turėtų būti labiau plėtojamas *LTE* mobiliojo ryšio tinklas, kuris užtikrina didesnę tinklo aprėptį.
2. Nustatyta, kad kokybiškam *LTE* mobiliojo ryšio signalui reikalingas *RSRP* parametras, ne mažesnis nei -100 dBm, *RSRQ* – -9 dB, *SINR* – $12,5$ dB. Perduodant aukštos kokybės *OTT* vaizdo paslaugas mobiliuoju ryšiu ypač svarbu vartotojams užtikrinti stabilų mažo vėlinimo ir didelės perdavimo spartos ryšį, *8K UltraHD* kokybei bent 50 Mb/s, o *4K UltraHD* kokybei 25 Mb/s spartą. Perduodant tokios aukštos kokybės vaizdo įrašą reikia užtikrinti rekomenduojamą 20 – 30 ms vėlinimą. Aptartas *OTT* vaizdo paslaugų kokybės įvertinimo metodas, kurio metu įvertinama, kiek vartotojas buvo priverstas laukti, kol jam suteikiamos kokybiškos *OTT* vaizdo perdavimo paslaugos.
3. Atlikus mobiliojo ryšio ir tinklo apkrovos matavimus nustatyta, kad vidutinė savaitės *RSRP* vertė lygi -96 dBm, *RSRQ* – $-8,9$ dB, *SINR* – 8 dB. Viso tyrimo metu prastų mobiliojo ryšio matavimų neužfiksuota. Todėl galima teigti, kad tolimesniems tinklo apkrovos matavimams, prastas mobiliojo ryšio signalas įtakos nedarė. Atliekant mobiliojo ryšio tinklo apkrovos parametrų matavimus nustatyta, kad vidutinė savaitės perdavimo sparta siekė 21 Mb/s, ryšio vėlinimas – 63 ms, vėlinimo fluktuacija – 7 ms, o paketų praradimas – $0,8$ %. Tyrimo metu pastebimas tiesioginis ryšys tarp perdavimo spartos ir vėlinimo pokyčių, priklausančių nuo dienos laiko ir vartotojų naudojimosi mobiliuoju ryšiu įpročių. Antroje dienos pusėje pastebimas perdavimo spartos sumažėjimas ir ryšio vėlinimo padidėjimas. Apskaičiuota, kad *OTT* vaizdo paslaugų *8K UltraHD* kokybės įvertinimo rodiklis lygus $2,3$, o tokia paslaugos kokybė vertinama bloga, nes juntami dažni ir ilgos trukmės paslaugos trikdžiai. Peržiūrint *4K UltraHD* kokybės vaizdo įrašą, apskaičiuotas rodiklis lygus $3,39$, paslaugos kokybė vartotojui teikiama prasta, juntami dažni, bet trumpi trikdžiai. Stebint *FullHD* kokybės vaizdo įrašą, užtikrinta stabilios kokybės peržiūra be didelių juntamų trikdžių, o *MOS* apskaičiuotas rodiklis lygus $4,03$. Nustatyta, kad esant dažnam arba ilgam pakartotinio buferio užkrovimui, įrašo peržiūros kokybė ženkliai krenta.
4. Mobiliuoju ryšiu perduodamoms *OTT* vaizdo paslaugoms teikti reikšmingų parametrų įvertinimui sudarytas *LTE* tinklo modelio algoritmas ir pagal jį atliekamas *LTE* tinklo modeliavimas. Pradinio scenarijaus metu gauti rezultatai yra artimi tyrimo metu gautiems rezultatams. Grupinio transliavimo scenarijaus metu pasiekta apie 9 kartus didesnė perdavimo sparta – 220 Mb/s, tačiau vėlinimo rezultatai panašūs į pradinio scenarijaus. Aukštesnio prioriteto priskyrimo scenarijaus metu, perskirstant srautą aukštesnio prioriteto vartotojams, pasiekiamas iki 71% šių vartotojų perdavimo spartos padidėjimas, iki 48 Mb/s. Taip pat pasiekiamas ryšio vėlinimas iki 30 ms. Grupinio transliavimo ir aukštesnio prioriteto priskyrimo pagerinimo scenarijų metu pasiekiamas sparta, kuri yra tinkama teikti

8K *UltraHD* kokybės įrašų peržiūrą, tačiau tik aukštesnio prioriteto priskyrimo scenarijumi pasiekiamas tinkamas ryšio vėlimas tokios kokybės vaizdo įrašo perdavimui.

5. Atliekant tyrimo ir modelio rezultatų palyginimą, pastebima, kad pradinio scenarijaus metu gauti duomenys nežymiai skiriasi nuo tyrimo metu gautų duomenų. Analizuojant mobiliojo ryšio kokybės parametrus, pastebima, kad modeliavimo metu gaunama neženkliai geresnio signalo kokybė, taip yra dėl to, kad modelio metu neatsižvelgiama į kitus, su modeliu nesusijusius veiksnius, pavyzdžiui, kitų mobiliojo ryšio operatorių bazinių stočių sukuriama interferencija. Grupinio transliavimo scenarijaus metu nustatomas ženklus perdavimo spartos padidėjimas, o aukštesnio prioriteto priskyrimo scenarijaus metu – ženklus vėlinimo sumažėjimas. Vėlinimo fluktuacijos ir paketų praradimo parametrai gaunami dvigubai geresni nei tyrimo metu gauti rezultatai.

Literatūros sąrašas

1. ZHANG Xincheng. LTE Optimization Engineering Handbook. John Wiley & Sons [interaktyvus]. 2018, 654-655 [žiūrėta 2020-05-21]. Prieiga per: <https://books.google.lt/books?id=Q1s1DwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=lt#v=onepage&q&f=false>
2. VARIETY, SANDVINE. Distribution of global downstream internet traffic as of October 2018, by category [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2020-05-21]. Prieiga per: <https://www.statista.com/statistics/271735/internet-traffic-share-by-category-worldwide/>
3. SANDVINE. The Global Internet Phenomena Report COVID-19 Spotlight [interaktyvus] . 2020 [žiūrėta 2020-05-21]. Prieiga per: https://www.sandvine.com/hubfs/Sandvine_Redesign_2019/Downloads/2020/Phenomena/COVID%20Internet%20Phenomena%20Report%2020200507.pdf
4. ZENITH. Daily time spent with the internet per capita worldwide from 2011 to 2021, by device [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2020-05-21]. Prieiga per: <https://www.statista.com/statistics/319732/daily-time-spent-online-device/>
5. FAUTIER Thierry. How OTT Services Can Match the Quality of Broadcast. SMPTE Motion Imaging Journal [interaktyvus] 2020, 16-25 [žiūrėta 2020-05-21] Prieiga per: doi: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9069342>
6. HUANG Feng-Hui et al. QoE Issues of OTT Services over 5G Network. Guangdong, Kinija [interaktyvus]. 2014, 267-273 [žiūrėta 2020-05-21]. Prieiga per: doi: [10.1109/BWCCA.2014.74](https://doi.org/10.1109/BWCCA.2014.74)
7. GILES Martin. Microsoft Teams Has Seen A 775% Rise In Users In Italy Because Of COVID-19 [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2020-05-22]. Prieiga per: <https://www.forbes.com/sites/martingiles/2020/03/30/microsoft-cloud-service-775-percent-rise-covid-19/#59cd06986862>
8. PARK Eun-A. Why the networks can't beat Netflix: speculations on the US OTT Services Market. Digital Policy, Regulation and Governance ISSN: 2398-5038 [interaktyvus]. 2017, 21-39 [žiūrėta 2020-05-22]. Prieiga per: doi: [10.1108/DPRG-08-2016-0041](https://doi.org/10.1108/DPRG-08-2016-0041)
9. BING Benny. Next-generation video coding and streaming. John Wiley & Sons, Kanada [interaktyvus]. 2015, 3-4 [žiūrėta 2020-05-22]. Prieiga per: <https://books.google.lt/books?id=xQueCAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=lt#v=onepage&q&f=false>
10. VERTO ANALYTICS. Most popular video streaming services in the United States as of September 2019, by monthly average users [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2020-05-22]. Prieiga per: <https://www.statista.com/statistics/910875/us-most-popular-video-streaming-services-by-monthly-average-users/>
11. DILLEY John. How Much Speed Do I Need to Stream Video? [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2020-05-22]. Prieiga per: <https://www.highspeedinternet.com/resources/how-much-speed-do-i-need-to-watch-netflix-and-hulu>

12. MACAITIS, Mantas. Geležinkelių manevrinio radijo ryšio modernizacija: Baigiamasis bakalauro projektas [interaktyvus]. Kauno technologijos universitetas, Kaunas, 2017 [žiūrėta 2020-05-21]. Prieiga per: ELABa – Nacionalinė Lietuvos Akademinė Elektroninė Biblioteka.
13. DEGUTIS, Gintautas. 5G ryšys – jau Vilniuje [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2020-05-22]. Prieiga per: <https://www.vz.lt/technologijos-mokslas/2018/12/21/5g-ryšys--jau-vilniuje>
14. HUAWEI. 5G: A Technology Vision [interaktyvus] 2013 [žiūrėta 2020-05-22] Prieiga per: https://www.huawei.com/ilink/en/download/HW_314849
15. ROTHSCILD, Esse. Understanding LTE Signal Strength Values [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2020-05-22]. Prieiga per: <http://usatcorp.com/faqs/understanding-lte-signal-strength-values/>
16. SAUTER Martin. From GSM to LTE– An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband [interaktyvus]. 2010, 251 [žiūrėta 2020-05-22]. Prieiga per: <https://books.google.lt/books?id=uso-6LN2YjsC&printsec=frontcover&hl=lt#v=onepage&q&f=false>
17. MACAITIS, Mindaugas. Internetinių skaičiavimų sukeltos tinklo apkrovos tyrimas: Magistro darbas [interaktyvus]. Kauno technologijos universitetas, Kaunas, 2010 [žiūrėta 2020-05-21]. Prieiga per: <https://epubl.ktu.edu/object/elaba:2089705/MAIN>
18. VARUN SINGH. The Difference Between Jitter and Latency in WebRTC [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2020-05-22]. Prieiga per: <https://www.callstats.io/blog/2018/03/07/difference-between-jitter-and-latency>
19. OFFICE OF ELECTRONIC COMMUNICATIONS. Average latency for selected devices in Poland in 2019. Lenkija. [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2020-05-21]. Prieiga per: <https://www.statista.com/statistics/1023850/poland-latency-for-selected-devices/>
20. AHMADI Sassan. Link-Level and System-Level Performance of LTE-Advanced [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2020-05-21]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405162-1.00011-3>
21. PÉREZ-NEIRA Ana I, CAMPALANS Marc Realp. Different views of delay in resource allocation for wireless systems [interaktyvus]. 2009, 125-149 [žiūrėta 2020-05-21]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374141-7.00007-5>
22. FORCEPOINT. What is Packet Loss? [interaktyvus] [žiūrėta 2020-05-21] Prieiga per: <https://www.forcepoint.com/cyber-edu/packet-loss>
23. MILLER Eliot. Recover from Rebuffering: Mux Metrics Explained [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2020-05-21]. Prieiga per: <https://mux.com/blog/recover-from-rebuffering-mux-metrics-explained/>
24. MOK, Ricky, et al. Inferring the QoE of HTTP video streaming from user-viewing activities [interaktyvus]. 2011 [žiūrėta 2020-05-21]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/238591899_Inferring_the_QoE_of_HTTP_video_streaming_from_user-viewing_activities

25. NET MONITOR MOBILE. NetMonitor Cell Signal Logging 1.65 [programinė įranga]. 2020-02-04 [žiūrėta 2020-05-21]. Prieiga per: https://play.google.com/store/apps/details?id=ru.v_a_v.netmonitor&hl=lt
26. ETRALITY GMBH. SPEEDCHECK Internet Speed Test5.1.8.6 [programinė įranga]. 2020-03-03 [žiūrėta 2020-05-21]. Prieiga per: <https://play.google.com/store/apps/details?id=org.speedspot.speedanalytics>
27. NSNAM. NS-3. 3.30.1 [programa]. 2008 m. [žiūrėta 2020-05-24]. Prieiga per: <https://www.nsnam.org/docs/models/html/lte-user.html>
28. GHYS Freddy. 3G Multimedia Network Services, Accounting, and User Profiles technologies [interaktyvus]. 2003, 87-88 [žiūrėta 2020-05-24]. Prieiga per: https://books.google.lt/books?id=ZL_Ykqx1B84C&printsec=frontcover&hl=lt
29. ITU. 5G - Fifth generation of mobile technologies [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2020-05-24]. Prieiga per: <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx>
30. MOK Ricky et al. Measuring the Quality of Experience of HTTP Video Streaming [interaktyvus]. 2011, Proc. of IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management [žiūrėta 2020-05-30]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/221293512_Measuring_the_Quality_of_Experience_of_HTTP_Video_Streaming
31. HUAWEI TECHNOLOGIES CO. LTD. Mobile Video Service Performance Study [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2020-05-30]. Prieiga per: <https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/white%20paper/mobile-video-service-performance-study.pdf>
32. EPSTEIN Joseph. Scalable VoIP Mobility [interaktyvus]. 2009, 57-72 [žiūrėta 2020-05-30]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-508-1.00003-7>

Priedai

1 priedas. *LTE* tinklo modelio *NS-3* programos kodas

```
using namespace ns3;

    const int NumMeasure = 20; // number for measurements
    double duration = 5; //duration of simulation in s
    bool useCa = true; //Carrier aggregation
    bool useBW = true; //Increased bandwidth for Ul & Dl
    bool usePriority = false; //Priority for OTT
    bool MultiCast = false; //multiCast for OTT
    std::ofstream ofs;
    std::fstream iofs;
    double Curr = 0;
    double TotalRx = 0;
    double Rxbytes = 0;
    double OldRxbytes[NumMeasure][NumMeasure];
    double OldTime[NumMeasure][NumMeasure];
    float Throughput = 0;

void CreateFile (int u, int k)
{
    ofs.open("Output/"+ std::to_string (k) + " ue/AAA-Throughput-"+ std::to_string (u) + ".txt", std::ios::out |
std::ios::trunc);

    //Writes headers to file
    ofs <<"EuNodeNum;";
    ofs <<"OldTime(s);";
    ofs <<"CurrTime(s);";
    ofs <<"OldRxbytes(Kb);";
    ofs <<"Rxbytes(Kb);";
    ofs <<"TotalRx(Kb);";
    ofs <<"Throughput(kbps);";
    ofs <<"\n";
    ofs.close();
}

void CreateFlowFile (int k)
{
    ofs.open("Output/Flowmonitor/FlowAverages"+ std::to_string (k) + ".txt", std::ios::out | std::ios::trunc);
```

```

//Writes headers to file
ofs <<"Eu number;";
ofs <<"Sent packets;";
ofs <<"Received Packets;";
ofs <<"Average Throughput;";
ofs <<"Packet loss Ratio;";
ofs <<"Delay;";
ofs <<"Jitter;";
ofs <<"\n";
ofs.close();
}

void WriteToFile (int u, int k, Ptr<PacketSink> sink)
{
    //Writes values in created file
    ofs.open("Output/"+ std::to_string (k) +" ue/AAA-Throughput-"+ std::to_string (u) +".txt", std::ofstream::out |
std::ofstream::app);

    //Gets simulation time
    Time now = Simulator::Now ();
    Curr = now.GetSeconds ();

    //Gets Rx total bytes
    TotalRx = sink->GetTotalRx ()/1000;

    //Gets Rx bytes
    Rxbytes = TotalRx - OldRxbytes[k][u];

    //Gets Throughput
    Throughput = Rxbytes* 8.0 / (Curr - OldTime[k][u]);

    //Writes calculated values to file
    ofs << u<<" ";
    ofs <<OldTime[k][u]<<" ";
    ofs <<Curr<<" ";
    ofs << OldRxbytes[k][u]<<" ";
    ofs <<Rxbytes<<" ";
    ofs <<TotalRx<<" ";
    ofs <<Throughput<<" ";
    ofs <<"\n";
    ofs.close();
}

```

```

// counters
OldRxbytes[k][u] = OldRxbytes[k][u] + Rxbytes;
OldTime[k][u]=Curr;

//Repeteadly activates function
 Simulator::Schedule (Seconds(1), &WriteToFile, u, k, sink);
}

void Laikas ()
{
 auto time = std::time(nullptr);
 std::cout<< std::put_time(std::localtime(&time), "%F %T %z") << '\n';
 std::cout<< '\n';
}

int
main (int argc, char *argv[])
{
 std::cout <<"Pradzios laikas"<<std::endl;
 Laikas();

//Empty arrays
for (int i = 0; i <= NumMeasure; i++)
{
 for (int j = 0; j <= NumMeasure; j++)
 {
 OldTime[i][j] = 0;
 OldRxbytes[i][j] = 0;
 }
}

if (useCa)
{
 Config::SetDefault ("ns3::LteHelper::UseCa", BooleanValue (useCa));
 Config::SetDefault ("ns3::LteHelper::NumberOfComponentCarriers", UIntegerValue (3));
 Config::SetDefault ("ns3::LteHelper::EnbComponentCarrierManager", StringValue
("ns3::RrComponentCarrierManager"));
 std::cout <<"Carrier aggregation is on"<<std::endl;
}

```



```

//Config::SetDefault ("ns3::LteRlcUm::MaxTxBufferSize", UIntegerValue (1024000));
// Config::SetDefault ("ns3::LteRlcTm::MaxTxBufferSize", UIntegerValue (20971520));

if (useBW)
{
    Config::SetDefault ("ns3::LteEnbNetDevice::UlBandwidth", UIntegerValue (100));
    Config::SetDefault ("ns3::LteEnbNetDevice::DlBandwidth", UIntegerValue (100));
    std::cout << "Increased BandWidth is on" << std::endl;
}

if (usePriority)
{
    std::cout << "OTT priority is on" << std::endl;
}

//Config::SetDefault ("ns3::LteEnbRrc::DefaultTransmissionMode", UIntegerValue (2));
// Config::SetDefault ("ns3::LteEnbRrc::DefaultTransmissionMode", UIntegerValue (1));
//Config::SetDefault ("ns3::RadioEnvironmentMapHelper::Bandwidth", UIntegerValue (100));

if (MultiCast)
{
    std::cout << "Multicast is on" << std::endl;
}

for (uint16_t k = 20; k <= NumMeasure; k++)
{
    uint16_t NumNodes = k;

    //Model variables
    uint16_t NumEuNode = NumNodes; //Number of Eu nodes
    uint16_t NumEnbNode = 1; //Number of EnbNodes

    //uint16_t NumEnbNode = NumNodes; //Number of EnbNodes
    Time simTime = Seconds (duration);
    double starttime = 0.1; // start of apps in s
    double Freq = 5000;
    double Period = 1/Freq;
    Time interPacketInterval = Seconds (Period);

    double FreqLow = 1000;

```

```

double PeriodLow = 1/FreqLow;
Time interPacketIntervalLow = Seconds (PeriodLow);

//double MaxPackets = 2000000;
double MaxPackets = 900000000;
//double distance = 60.0;

//Flow monitor variables
uint32_t SentPackets = 0;
uint32_t ReceivedPackets = 0;
uint32_t LostPackets = 0;
int j=0;
float AvgThroughput = 0;
Time Jitter;
Time Delay;

//Create log files
for (uint16_t u = 1; u <= NumNodes; u++)
{
    CreateFile (u, k);
}

    CreateFlowFile (k);

//-----LTE model starts from here-----
ConfigStore inputConfig;
inputConfig.ConfigureDefaults ();

// Creating station nad gateway
Ptr<LteHelper> lteHelper = CreateObject<LteHelper> ();
Ptr<PointToPointEpcHelper> epcHelper = CreateObject<PointToPointEpcHelper> ();
lteHelper->SetEpcHelper (epcHelper);
Ptr<Node> pgw = epcHelper->GetPgwNode ();

// Create a single RemoteHost
NodeContainer remoteHostContainer;
remoteHostContainer.Create (1);
Ptr<Node> remoteHost = remoteHostContainer.Get (0);
InternetStackHelper internet;
internet.Install (remoteHostContainer);

```

```

// Create the Internet
PointToPointHelper p2ph;
p2ph.SetDeviceAttribute ("DataRate", DataRateValue (DataRate ("100Gb/s")));
p2ph.SetDeviceAttribute ("Mtu", UIntegerValue (1500));
p2ph.SetChannelAttribute ("Delay", TimeValue (Milliseconds (10)));
NetDeviceContainer internetDevices = p2ph.Install (pgw, remoteHost);
Ipv4AddressHelper ipv4h;
ipv4h.SetBase ("1.0.0.0", "255.0.0.0");
Ipv4InterfaceContainer internetIpIfaces = ipv4h.Assign (internetDevices);
Ipv4Address remoteHostAddr = internetIpIfaces.GetAddress (1);

Ipv4StaticRoutingHelper ipv4RoutingHelper;
Ptr<Ipv4StaticRouting> remoteHostStaticRouting = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (remoteHost->GetObject<Ipv4> ());
remoteHostStaticRouting->AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("7.0.0.0"), Ipv4Mask ("255.0.0.0"), 1);

//Creating nodes
NodeContainer ueNodes;
NodeContainer enbNodes;
enbNodes.Create (NumEnbNode);
ueNodes.Create (NumEuNode);

// Install Mobility Model
Ptr<ListPositionAllocator> positionAlloc = CreateObject<ListPositionAllocator> ();

for (uint16_t i = 0; i < NumEuNode; i++)
{
//positionAlloc->Add (Vector (distance * i, 0, 0));
positionAlloc->Add (Vector (0, 0, 0));
}
MobilityHelper mobility;
mobility.SetMobilityModel("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility.SetPositionAllocator(positionAlloc);
mobility.Install(enbNodes);
mobility.Install(ueNodes);

// Install LTE Devices to the nodes
NetDeviceContainer enbLteDevs = lteHelper->InstallEnbDevice (enbNodes);
NetDeviceContainer ueLteDevs = lteHelper->InstallUeDevice (ueNodes);

// Install the IP stack on the UEs

```

```

internet.Install (ueNodes);
Ipv4InterfaceContainer ueIpIface;
ueIpIface = epcHelper->AssignUeIpv4Address (NetDeviceContainer (ueLteDevs));

if (MultiCast)
{
    Ipv4Address multicastSource ("10.1.1.1");
    Ipv4Address multicastGroup ("225.1.2.4");
    Ipv4StaticRoutingHelper multicast;
    // Assign IP address to UEs, and install applications
    for (uint32_t u = 0; u < ueNodes.GetN (); ++u)
    {
        Ptr<Node> multicastRouter = ueNodes.Get (u); // The node in question
        Ptr<NetDevice> inputIf = ueLteDevs.Get (u); // The input NetDevice
        NetDeviceContainer outputDevices; // A container of output NetDevices
        outputDevices.Add (enbLteDevs.Get (1)); // (we only need one NetDevice here)

        multicast.AddMulticastRoute (multicastRouter, multicastSource,
            multicastGroup, inputIf, outputDevices);
    }
    Ptr<Node> sender = enbNodes.Get (0);
    Ptr<NetDevice> senderIf = ueLteDevs.Get (0);
    multicast.SetDefaultMulticastRoute (sender, senderIf);
}

else
{
    // Assign IP address to UEs, and install applications
    for (uint32_t u = 0; u < ueNodes.GetN (); ++u)
    {
        Ptr<Node> ueNode = ueNodes.Get (u);
        // Set the default gateway for the UE
        Ptr<Ipv4StaticRouting> ueStaticRouting = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (ueNode->GetObject<Ipv4>
());
        ueStaticRouting->SetDefaultRoute (epcHelper->GetUeDefaultGatewayAddress (), 1);
    }
}

//-----Priority status start-----
int Status[k];
for (uint32_t u = 0; u < NumNodes; ++u)

```

```

    {
    if (usePriority)
        {
        if (u > NumNodes/2)
            {
            Status[u] = 0; // set high priority
            }
        }
    }

    else
    {
        Status[u] = 1; // set low priority
    }
}

/-----Priority status end-----

lteHelper->Attach (ueLteDevs); // automatically attach eu to one enb

// Install and start applications on UEs and remote host
uint16_t dlPort = 1100;
uint16_t ulPort = 2000;
uint16_t multicastPort = 9;

ApplicationContainer clientApps;
ApplicationContainer serverApps;

ApplicationContainer clientAppsNo;
ApplicationContainer serverAppsNo;

if (MultiCast)
{
for (uint32_t u = 0; u < ueNodes.GetN (); ++u)
{
    PacketSinkHelper dlPacketSinkHelper ("ns3::UdpSocketFactory", InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (),
multicastPort));
    serverApps.Add (dlPacketSinkHelper.Install (ueNodes.Get (u)));
    UdpClientHelper dlClient (ueIpIface.GetAddress (u), multicastPort);
    dlClient.SetAttribute ("Interval", TimeValue (interPacketInterval));
    dlClient.SetAttribute ("MaxPackets", UintegerValue (MaxPackets));
    dlClient.SetAttribute ("PacketSize", UintegerValue (2017));
    clientApps.Add (dlClient.Install (remoteHost));
}
}

```

```

++ulPort;
PacketSinkHelper ulPacketSinkHelper ("ns3::UdpSocketFactory", InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (),
multicastPort));
serverApps.Add (ulPacketSinkHelper.Install (remoteHost));

UdpClientHelper ulClient (remoteHostAddr, multicastPort);
ulClient.SetAttribute ("Interval", TimeValue (interPacketInterval));
ulClient.SetAttribute ("MaxPackets", UintegerValue (MaxPackets));
ulClient.SetAttribute ("PacketSize", UintegerValue (2017));
clientApps.Add (ulClient.Install (ueNodes.Get(u)));
std::cout<< "Node: "<<u<<" Status: "<<Status[u]<<" Multicast is on"<< "\n";
}
}

else
{
for (uint32_t u = 0; u < ueNodes.GetN (); ++u)
{
if (Status[u] == 0 ) // High Priority
{
PacketSinkHelper dlPacketSinkHelper ("ns3::UdpSocketFactory", InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (),
dlPort));
serverApps.Add (dlPacketSinkHelper.Install (ueNodes.Get (u)));
UdpClientHelper dlClient (ueIpIface.GetAddress (u), dlPort);
dlClient.SetAttribute ("Interval", TimeValue (interPacketInterval));
dlClient.SetAttribute ("MaxPackets", UintegerValue (MaxPackets));
dlClient.SetAttribute ("PacketSize", UintegerValue (2017));
clientApps.Add (dlClient.Install (remoteHost));
++ulPort;
PacketSinkHelper ulPacketSinkHelper ("ns3::UdpSocketFactory", InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (),
ulPort));
serverApps.Add (ulPacketSinkHelper.Install (remoteHost));
UdpClientHelper ulClient (remoteHostAddr, ulPort);
ulClient.SetAttribute ("Interval", TimeValue (interPacketInterval));
ulClient.SetAttribute ("MaxPackets", UintegerValue (MaxPackets));
ulClient.SetAttribute ("PacketSize", UintegerValue (2017));
clientApps.Add (ulClient.Install (ueNodes.Get(u)));
std::cout<< "Node: "<<u<<" Status: "<<Status[u]<<" Freq: "<< Freq <<" High Priority"<< "\n";
}
}

else // Low Priority
{

```

```

    PacketSinkHelper dlPacketSinkHelper ("ns3::UdpSocketFactory", InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (),
dlPort));
    serverAppsNo.Add (dlPacketSinkHelper.Install (ueNodes.Get (u)));
    UdpClientHelper dlClientNo (ueIpIface.GetAddress (u), dlPort);
    dlClientNo.SetAttribute ("Interval", TimeValue (interPacketIntervalLow));
    dlClientNo.SetAttribute ("MaxPackets", UintegerValue (MaxPackets));
    dlClientNo.SetAttribute ("PacketSize", UintegerValue (2017));
    clientAppsNo.Add (dlClientNo.Install (remoteHost));
    ++ulPort;
    PacketSinkHelper ulPacketSinkHelper ("ns3::UdpSocketFactory", InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (),
ulPort));
    serverAppsNo.Add (ulPacketSinkHelper.Install (remoteHost));
    UdpClientHelper ulClientNo (remoteHostAddr, ulPort);
    ulClientNo.SetAttribute ("Interval", TimeValue (interPacketIntervalLow));
    ulClientNo.SetAttribute ("MaxPackets", UintegerValue (MaxPackets));
    ulClientNo.SetAttribute ("PacketSize", UintegerValue (2017));
    clientAppsNo.Add (ulClientNo.Install (ueNodes.Get(u)));

    std::cout<< "Node: "<<u<<" Status: "<<Status[u]<<" Freq: "<< FreqLow <<" Low Priority"<< "\n";
}
}

}

serverApps.Start (Seconds (starttime));
clientApps.Start (Seconds (starttime));
serverApps.Stop (Seconds (simTime));
clientApps.Stop (Seconds (simTime));
serverAppsNo.Start (Seconds (starttime));
clientAppsNo.Start (Seconds (starttime));
serverAppsNo.Stop (Seconds (simTime));
clientAppsNo.Stop (Seconds (simTime));

lteHelper->EnableTraces ();
// Uncomment to enable PCAP tracing
//p2ph.EnablePcapAll("lena-simple-epc");

for (uint16_t u = 1; u <= NumNodes; u++)
{
    Ptr<PacketSink> sink = serverApps.Get (u)->GetObject<PacketSink> ();
    Simulator::Schedule (Seconds(0), &WriteToFile, u, k, sink);
}

```

```

for (uint16_t u = 1; u <= NumNodes; u++)
{
    Ptr<PacketSink> sinkNo = serverAppsNo.Get (u)->GetObject<PacketSink> ();
    Simulator::Schedule (Seconds(0), &WriteToFile, u, k, sinkNo);
}

//Install FlowMonitor on all nodes
FlowMonitorHelper flowmon;
Ptr<FlowMonitor> monitor = flowmon.InstallAll();

Simulator::Stop (simTime+Seconds(0.5));
Simulator::Run ();
Simulator::Destroy ();

//-----LTE model ends here-----
//-----Flow monitor starts here-----

Ptr<Ipv4FlowClassifier> classifier = DynamicCast<Ipv4FlowClassifier> (flowmon.GetClassifier ());
std::map<FlowId, FlowMonitor::FlowStats> stats = monitor->GetFlowStats ();
for (std::map<FlowId, FlowMonitor::FlowStats>::const_iterator iter = stats.begin (); iter != stats.end (); ++iter)
{
    SentPackets = SentPackets +(iter->second.txPackets);
    ReceivedPackets = ReceivedPackets + (iter->second.rxPackets);
    LostPackets = LostPackets + (iter->second.txPackets-iter->second.rxPackets);
    AvgThroughput = AvgThroughput + (iter->second.rxBytes * 8.0/(iter->second.timeLastRxPacket.GetSeconds()-
iter->second.timeFirstTxPacket.GetSeconds())/1024);
    Delay = Delay + (iter->second.delaySum);
    Jitter = Jitter + (iter->second.jitterSum);
    j = j + 1;
}

// Writes average values
ofs.open("Output/Flowmonitor/FlowAverages"+ std::to_string (k) +".txt", std::ofstream::out | std::ofstream::app);
ofs <<k<<";";
ofs <<SentPackets<<";";
ofs <<ReceivedPackets<<";";
ofs <<AvgThroughput<<";";
ofs <<(LostPackets*100)/SentPackets<<";";
ofs <<Delay<<";";

```



```
ofs <<Jitter<<"";
ofs <<"\n";
ofs.close();

//-----Flow monitor ends here-----
std::cout << "-----End of measurement-----\n";
}
std::cout << "\nPabaigos laikas" << std::endl;
Laikas();
return 0;
}
```