

---

# Summary in Lithuanian

## Įvadas

### Problemos formulavimas

Pasaulinė Radijo ryšio konferencija 2007 metais paskyrė vadinamąją „skaitmeninio dividendo“ 790–862 MHz dažnių juostą antžeminiams mobiliesiems tinklams Regiono 1 (Europa, Afrika, Viduriniai Rytai) valstybėse nuo 2015 metų. Ši radijo dažnių juosta galėjo būti pradėta eksploatuoti ir prieš 2015 metus, bet tik laikantis visų Radijo Reglamento nuostatų (ITU 2012).

2009 metais Regiono 1 valstybės nusprendė sukurti oficialų sprendimą (ECC 2009), kuris nustatytų orientyrus bendrosioms radijo ryšio naudojimo sąlygoms 790–862 MHz dažnių juostoje diegiant antžeminius mobiliuosius tinklus ir siekiant padėti mobiliojo ryšio operatoriams kovoti su radijo dažnių trūkumu dėl vis didėjančios mobiliojo ryšio paklausos (ECC 2009; Chandhar *et al.* 2014).

Mobiliojo ryšio operatoriai turi išteklių plėsti savo tinklus, tačiau tampa vis sudėtingiau išvengti trukdžių tarp gretimų radijo stočių, dėl vis didėjančio radijo įrenginių tankio (Himayat *et al.* 2010; Boudreau *et al.* 2009).

Be detalios elektromagnetinio suderinamumo analizės LTE (angl. *Long-Term Evolution*) mobiliojo ryšio tinklų nebūtų galima diegti 790–862 MHz dažnių juostoje, dėl ypač veiksmingų radijo bangų sklidimo ypatybių šioje dažnių juostoje ir žalingos šalutinės spinduliuotės lygių, kurie sukelia žalingus radijo trukdžius radijo ryšio sistemoms,

veikiančioms kaimyninėse dažnių juostose. 3GPP standarto vystytojai ieško efektyvaus būdo kaip būtų galima sumažinti žalingus šalutinės spinduliuotės lygius OFDM (angl. *Orthogonal frequency-division multiplexing*) sistemose. Pagrindinė aukštos šalutinės spinduliuotės priežastis OFDM sistemose susijusi su naudojamų skaitmeninių filtrų ypatybėmis, kurie neužtikrina didelio slopinimo už pagrindinio ponešlio kanalo, tai sukelia nepriklausomus ir nesinchronizuotus žalingus radijo trukdžius kaimyninėms radijo sistemoms (Loulou & Renfors 2013; Sadeghi *et al.* 2014; Rajabzadeh Oghaz *et al.* 2014; Selim & Doyle 2013).

LTE sistemos, veikiančios 790–862 MHz dažnių juostoje, kels žalingus trukdžius radijo ryšio sistemoms, kurios veikia kaimyninėse dažnių juostose: skaitmeninė antžeminė televizija DVB-T (470–790 MHz dažnių juosta) ir trumpojo veikimo nuotolio įrenginiai SRD (angl. *Short-Range Devices*) (863–870 MHz dažnių juosta). Taigi, reikalinga detali 790–862 MHz dažnių juostos elektromagnetinio suderinamumo analizė bei būtina pasiūlyti efektyvius žalingų radijo trukdžių valdymo būdus. Visos Europos valstybės ir industrijos atstovai pakviesti pateikti savo indėlių sprendžiant šiuos klausimus.

## Darbo aktualumas

Šiandieniniame pasaulyje, radijo dažniai yra vis aktyviau naudojami. Mobiliosios technologijos plinta dideliais tempais ir mobiliojo ryšio tinklo operatoriai vis dažniau susiduria su radijo spektro trūkumo problema (Zahariadis & Kazakos 2003). Norint kompensuoti šį trūkumą buvo suformuota nauja 790–862 MHz dažnių juosta, skirta mobiliojo ryšio tinklams. Pagrindinė problema, kurią reikia išspręsti prieš įdiegiant mobiliojo ryšio tinklus šioje dažnių juostoje yra elektromagnetinis suderinamumas su trumpojo veikimo nuotolio įrenginiais SRD, veikiančiais gretimoje 863–870 MHz dažnių juostoje. Naujai suformuotos 790–862 MHz dažnių juostos elektromagnetinio suderinamumo problematika buvo įvertinta Europos Elektroninių ryšių komiteto SE24 darbo grupėje (CEPT 2014), kurios aktyviu nariu pateikiant savo tyrimų rezultatus buvo ir disertacijos autorius.

Šioje disertacijoje atlikti teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai, kurie detaliam apibūdina elektromagnetinio suderinamumo situaciją „skaitmeninio dividendo“ dažnių juostoje. Naujai suformuota 790–862 MHz dažnių juosta turi tik 1 MHz dažninį atskyrimą nuo trumpojo veikimo nuotolio įrenginių SRD 863–870 MHz dažnių juostos. Toks nedidelis dažninis atskyrimas rodo, kad SRD įrenginiai galimai patirs žalingus radijo trukdžius. Tipiniai SRD įrenginiai yra: bevielės ausinės, apsaugos sistemos, mikrofoniai, išmanieji skaitikliai, telemetrijos įrenginiai, medicininiai įrenginiai.

Disertacijoje tiriamas galimas šalutinės spinduliuotės sumažinimo būdas LTE tinkluose naudojant susietųjų filtrų informacijos perdavimo būdą FBMC lyginant su tradicinėmis ortogonalinių ponešių sistemomis OFDM, veikiančiomis 790–862 MHz LTE dažnių juostoje (Farhang-Boroujeny 2011a). FBMC informacijos perdavimo būdas siūlo žymius patobulinimus dažnių panaudojimo efektyvumo ir duomenų perdavimo srityse lyginant su OFDM sistemomis: geresnis dažninis selektyvumas, spektrinis efektyvumas, galimybė atsisakyti ciklinio prefikso, pastumtoji QAM moduliacija (H. Zhang *et al.* 2010; Medjahdi, Terré, *et al.* 2011). Atliktuose „skaitmeninio dividendo“

elektromagnetinio suderinamumo tyrimuose FBMC informacijos perdavimo būdas parodė žymią naudą mažinant LTE šalininės spinduliuotės lygius ir žalingus radijo trukdžius.

Atliekant teorinius ir eksperimentinius tyrimus su OFDM ir FBMC sistemomis buvo nagrinėjamas pati kritiškiausia elektromagnetinio suderinamumo situacija, kai LTE mobiliojo stotis ir SRD imtuvas veikia ta pačiame kambaryje ir tarp jų yra tiesioginis matomumas.

## Tyrimų objektas

Pagrindinis tyrimų objektas yra šalininės spinduliuotės mažinimo būdai LTE 790–862 MHz dažnių juostoje.

## Darbo tikslas

Disertacijos tikslas – teoriškai ir praktiškai ištirti ir pasiūlyti efektyvų tarpkanalinių radijo trukdžių mažinimo būdą LTE tinkluose sąveikaujant su kitomis radijo ryšio sistemomis, veikiančioms kaimyniniuose dažnių ruožuose.

## Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti sprendžiami tokie uždaviniai:

1. Atlikti teorinę ir eksperimentinę radijo trukdžių atsiradimo tikimybės analizę naujai formuojamoje 790–862 MHz LTE dažnių juostoje.
2. Ištirti FBMC (angl. *Filter Bank MultiCarrier*) informacijos perdavimo būdo panaudojimą ir efektyvumą siekiant išvengti tarpkanalinių radijo trukdžių LTE 790–862 MHz dažnių juostoje.
3. Pateikti rekomendacijas siekiant nustatyti minimalų atstumą tarp LTE mobiliosios stoties ir SRD imtuvo 790–862 MHz dažnių juostoje.

## Tyrimų metodika

Siekiant ištirti pagrindinį disertacijos tyrimų objektą ir išspręsti iškeltus uždavinius buvo pasirinkti šie tyrimų metodai:

1. Klasifikavimas – atlikus literatūros analizę, nustatomas tyrimo objektas.
2. Hipotezė – teorinė 790–862 MHz LTE dažnių juostos elektromagnetinio suderinamumo analizė naudojant MCL (angl. *Minimum Coupling Loss*) metodą.
3. Statistinė analizė – teorinė 790–862 MHz LTE dažnių juostos elektromagnetinio suderinamumo analizė naudojant Monte-Carlo metodą.

4. Eksperimentiniai tyrimai – atliekami eksperimentiniai matavimai, siekiant įvertinti 790–862 MHz LTE dažnių juostos elektromagnetinį suderinamumą ir patvirtinti teorinių tyrimų rezultatus.

### Darbo mokslinis naujumas

Atlikus teorinius ir eksperimentinius tyrimus buvo gauti šie elektros ir elektronikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Monte-Carlo imitacija atitinkanti būsimą LTE tinklų konfigūraciją 790–862 MHz dažnių juostoje bei esamą SRD įrenginių konfigūraciją 863–870 MHz dažnių juostoje.
2. Nauji teorinės analizės ir eksperimentinių matavimų rezultatai, nustatantys reikalingą atstumą tarp LTE mobiliųjų stočių 832–862 MHz dažnių juostoje ir SRD imtuvų 863–870 MHz dažnių juostoje siekiant išvengti žalingo radijo trukdžių poveikio.
3. Nauji teorinės analizės rezultatai įvertinantys FBMC (angl. *Filter Bank Multicarrier*) informacijos perdavimo būdo galimybę sumažinti LTE mobiliųjų stočių veikiančių 832–862 MHz dažnių juostoje, žalingos šalininės spinduliuotės poveikį kaimyninėms radijo ryšio sistemoms.

### Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Rengiant disertaciją gauti šie praktiniai rezultatai:

1. FBMC informacijos perdavimo būdo įdiegimas LTE sistemose leistų efektyviau išnaudoti radijo dažnių resursus lyginant su sistemomis naudojančiomis OFDM.
2. FBMC informacijos perdavimo būdo panaudojimas leidžia sumažinti mobiliųjų įrenginių įrangos gamybos kaštus, t.y. sumažina papildomų anteninių įrenginių bei siųstuvų/imtuvų skaičių.
3. Remiantis disertacijoje aprašytų teorinių ir praktinių tyrimų rezultatais, pateiktos rekomendacijos Europos elektroninių ryšių komitetui elektromagnetinio suderinamumo klausimais, siekiant nustatyti 790–862 MHz dažnių juostos naudojimo sąlygas. (ECC Report 207 publikuotas 2014-01-31 (CEPT 2014)).

### Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbti 6 moksliniai straipsniai: 3 straipsniai Thomson Reuters Web of Science duomenų bazėje referuojamuose mokslo žurnaluose su citavimo indeksu, 3 straipsniai – kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose.

Disertacijos rezultatai buvo pristatyti 4 tarptautinėse mokslinėse konferencijose:

1. Tarptautinė konferencija „*Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering 2013*“. 2013. Ryga, Latvija.

2. Tarptautinė konferencija „*Electronics 2015*“. 2015. Palanga, Lietuva.
3. International scientific conference „*Progress In Electromagnetics Research Symposium*“. 2015. Praha, Čekija.
4. International scientific conference „*Progress In Electromagnetics Research Symposium*“. 2016. Šanchajus, Kinija.

Disertacijos rezultatai buvo pristatyti Europos Elektroninių ryšių komiteto SE24 darbo grupėje dalyvaujant kaip LR Ryšių reguliavimo tarnybos atstovui. Europos Elektroninių ryšių komitetas yra oficialus Europos sąjungos institucija, atsakinga už elektroninių ryšių plėtojimą, reguliavimo nustatymą, teisinį reglamentavimą Europoje. SE24 darbo grupė atsakinga už radijo spektro naudojimo sąlygų nustatymą bei radijo spektro reguliavimą trumpojo veikimo nuotolio įrenginių dažnių juostose.

## Ginamieji teiginiai

1. LTE mobiliosios stotys, veikiančios 832–862 MHz dažnių juostoje, darys žalingą poveikį trumpojo veikimo nuotolio įrenginiams (angl. *Short-Range Devices*), veikiantiems 863–870 MHz dažnių juostoje, kai atstumas tarp LTE siųstuvo ir SRD imtuvo yra mažiau nei 50 m.
2. FBMC informacijos perdavimo būdas yra spektriškai efektyvesnis nei OFDM – LTE sistemos naudojančios FBMC informacijos perdavimo būdą turėtų 20 dB žemesnį šalutinės spinduliuotės lygį lyginant su OFDM.
3. LTE sistemos naudojančios FBMC informacijos perdavimo būdą vietoje OFDM gali sumažinti žalingų trukdžių atsiradimo tikimybę atitinkamai: daugiau nei 2,5 karto (atstumas tarp LTE siųstuvo ir SRD imtuvo lygus 10 m), daugiau nei 3 kartus (atstumas tarp LTE siųstuvo ir SRD imtuvo lygus 20 m) ir daugiau nei 3,2 karto (atstumas tarp LTE siųstuvo ir SRD imtuvo lygus 50 m) lyginant su LTE sistemomis naudojančiomis OFDM.

## Disertacijos struktūra

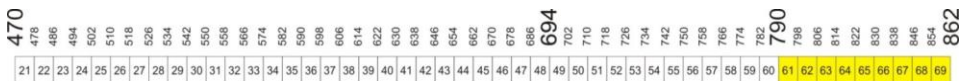
Disertaciją sudaro įvadas, 3 skyriai, bendrosios išvados, šaltinių ir literatūros sąrašas, autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas ir santrauka lietuvių kalba. Disertacijos apimtis – 146 puslapiai. Disertacijoje yra 39 paveikslai, 26 lentelės ir 17 numeruotų formulių, disertacijoje panaudoti 102 literatūros šaltiniai.

## 1. Elektromagnetinio suderinamumo iššūkiai mobiliuosiuose tinkluose

Šiandieniniame pasaulyje radijo dažniai yra naudojami vis aktyviau. Auga mobiliojo ryšio technologijų plėtra dėl vis didėjančios mobiliojo ryšio paslaugų paklausos ir apimčių. Mobiliosios technologijos plinta stulbinančiais tempais, bet mobiliojo ryšio tinklo

operatoriai vis dažniau susiduria su radijo spektro trūkumo problema (Zahariadis & Kazakos 2003), (Osseiran *et al.* 2014). Įmonė „Cisco Systems“ 2015 metais išplatino prognozę dėl persiųstų duomenų kiekio mobiliuosiuose tinkluose iki 2019 metų (Cisco 2015). Prognozėje deklaruojama, kad persiųstų duomenų kiekis mobiliuosiuose tinkluose visame pasaulyje išaugs 6 kartus ir 2019 metais sieks 24,3 eksabaito per mėnesį. Išmanieji telefonai, daiktų internetas, M2M tinklai ir kiti mobilieji įrenginiai 2019 metais generuos 90 % pasaulio mobiliojo interneto srauto. Šį kilimą labiausiai stimuliuos sparčiai besivystanti interneto televizija ir vaizdo transliacijų paslaugos. Mobilioji ryšio operatoriai turi ribotą radijo spektro dalį. Norint patenkinti išaugusią duomenų perdavimo paklausą mobiliais tinklais, reikia skirti papildomas dažnių juostas mobiliojo ryšio tinklams.

Nuo 2015 metų yra suformuota papildoma 790–862 MHz dažnių juosta skirta LTE mobiliesiems tinklams. Ši dažnių juosta, dar kitaip vadinama „skaitmeninis dividendas“, bus atlaisvinta mobiliesiems tinklams, kai Europoje bus galutinai išjungta analoginė televizija ir bus pradėta naudoti skaitmeninė televizija, kuri yra žymiai spektriškai efektyvesnė.



**S1.1 pav.** „Skaitmeninis dividendas“ formuojamas išjungiant analoginės televizijos kanalus nuo 61 iki 69 (ECC 2009)

S1.1 paveiksle pavaizduota visa analoginės televizijos dažnių juosta 470–862 MHz. Geltoname fone paryškintas „skaitmeninis dividendas“ po skaitmeninės televizijos išjungimo.

Toks radijo spektro performavimas, skiriant 790–862 MHz dažnių juosta mobiliesiems tinklams, sukels nemažai elektromagnetinio suderinamumo problemų su radijo ryšio sistemomis, veikiančiose kaimyninėse dažnių juostose:

- LTE mobiliųjų stočių žalingas poveikis trumpojo veikimo nuotolio SRD įrenginiams, veikiančioms 863–870 MHz dažnių juostoje. LTE mobiliosios stotys gali sukelti žymias elektromagnetinio suderinamumo problemas, nes jų santykinė spinduliuojama galia yra pakankamai didelė – 23 dBm. Atstumas tarp LTE siųstuvo ir SRD imtuvo gali siekti vos keletą centimetrų, nes įrenginiai gali veikti ta pačiame kambaryje. Taip pat LTE mobiliųjų stočių ir SRD įrenginių tankis nuolat auga.
- LTE bazinių stočių žalingas poveikis skaitmeninės antžeminės televizijos imtuvams veikiančioms 470–790 MHz dažnių juostoje. LTE bazinės stotys ir skaitmeninės antžeminės televizijos programų transliavimo bokštai nuolat veiks tose pačiose geografinėse vietose.
- Radijo navigacijos sistemos ARNS (angl. *Aeronautical Radio Navigation Service*), veikiančios 638–862 MHz dažnių juostoje, taip pat galimai turės elektromagnetinio suderinamumo problemų su skaitmeninio dividendo dažnių juosta. Šios problemos daugiausiai iškilis buvusiose TSRS

valstybėse, kur iki šiol šioje dažnių juostoje veikia ARNS sistemos, kurios turi ypač jautrius radijo imtuvus.

Tai yra pagrindinės problemos, kurias reikia išspręsti, siekiant pradėti naudoti „skaitmeninio dividendo“ dažnių juostą. Šios problemos buvo aktyviai sprendžiamos Tarptautinės telekomunikacijų sąjungos ITU, Europos elektroninių ryšių komiteto ECC.

Literatūros, ITU ir ECC ataskaitų analizė parodė, kurios dažnių juostos yra detalios analizuojamos, o kurioms dažnių juostoms trūksta elektromagnetinio suderinamumo įvertinimo. Daugiausia šios ataskaitos yra orientuotos į DVB-T ir LTE sistemų suderinamumą, DVB-T aktyviai naudojamas kiekvienoje Europos šalyje. Mažiau dėmesio skiriama ARNS ir LTE sistemų elektromagnetiniam suderinamumui, nes ARNS stočių šioje dažnių juostoje randama tik buvusiose TSRS valstybės ir stočių tankis nėra didelis.

Analizuojant literatūrą, ITU ir ECC ataskaitas, nustatytas informacijos trūkumas bei detalesnė elektromagnetinio suderinamumo analizė tarp SRD ir LTE įrenginių. Europos šalys turi būti suinteresuotos galimais žalingais LTE mobiliųjų stočių trukdžiais žemiau 862 MHz. Nustačius šias problemas buvo nuspręsta aktyviai dalyvauti Europos Elektroninių ryšių komiteto SE24 darbo grupėje kaip LR Ryšių reguliavimo tarnybos atstovui, pristatant savo tyrimų rezultatus susijusius su „skaitmeninio dividendo“ elektromagnetiniu suderinamumu trumpojo veikimo nuotolio SRD įrenginiais. SE24 darbo grupė atsakinga už radijo spektro naudojimo sąlygų nustatymą bei radijo spektro reguliavimą trumpojo veikimo nuotolio įrenginių dažnių juostose. Siekiant išspręsti išsikelto problemą, pagrindinė hipotezė buvo iškelta ir įrodyta:

Susietųjų filtrų informacijos perdavimo būdo FBMC (angl. *Filter Bank Multicarrier*) panaudojimas daugelio nešlių sistemose pasiūlo efektyvų būdą sumažinti šalutinės spinduliuotės lygius lyginant su tradicinėmis ortogonalinių ponešlių sistemomis OFDM (angl. *Orthogonal frequency-division multiplexing*).

## 2. Teorinė ir statistinė žalingų trukdžių analizė

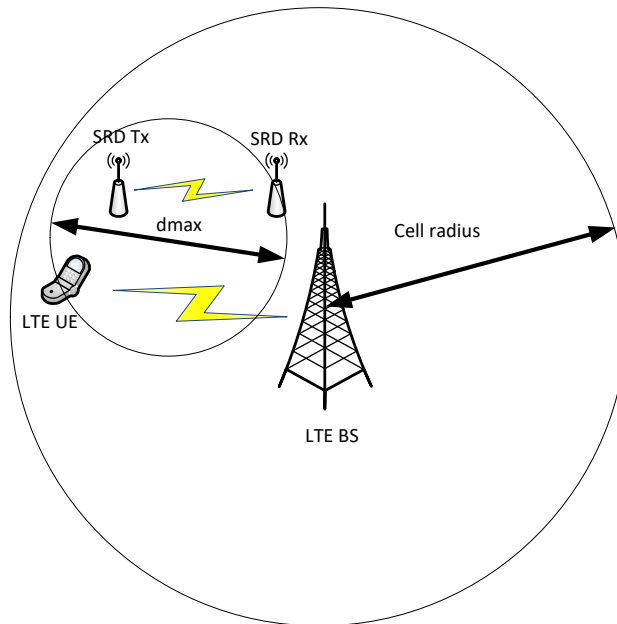
Du analizės metodai buvo naudojami šiame tyrime: a) teorinė analizė, vertinant minimalius sąveikos nuostolius MCL (angl. *Minimum Coupling Loss*), b) statistinė analizė – Monte Carlo modeliavimas su SEAMCAT programine įranga, siekiant patikrinti gautus rezultatus atliekant teorinę analizę.

Minimalių sąveikos nuostolių metodas MCL (J. Zhu *et al.* 2007) vertina reikalingą slopinimą tarp trukdančiojo siųstuvo ir žalingus trukdžius patiriančio imtuvo, siekiant, kad imtuvo darbas nebūtų paveiktas žalingų trukdžių. Šis metodas vertina blogiausią elektromagnetinio suderinamumo situaciją, kai imtuvai veikia 3 dB aukščiau nei jo jautrumo riba. Žalingų trukdžių vertinimo kriterijus turi būti susietas su imtuvo triukšmų lygiu (Seidenberg *et al.* 1999; Grandell 2001). MCL metodas naudingas pradiniai bendrajai elektromagnetinio suderinamumo analizei.

Kitas naudotas žalingų trukdžių vertinimo metodas: Monte Carlo modeliavimas leidžiantis statistiškai įvertinti visas galimas radijo ryšio technologijas (Doucet *et al.* 2013; Fishman 2013). Toks lankstumas leidžia išanalizuoti daugelį galimų radijo sistemų konfigūracijos variantų. Šio tyrimo metu buvo naudota SEAMCAT (ECO 2010) programinė įranga.

Monte Carlo metodas yra plačiai naudojamas atsitiktinių procesų modeliavime. Šio metodo principas yra vertinti atsitiktinius dydžius apibrėžtus tikimybių tankio funkcijomis.

S2.1 paveikslas rodo detalesnę žalingųjų trukdžių modeliavimo metodiką.



**S2.1 pav.** SEAMCAT modeliavimo metodika

S2.1 paveiksle parodyti pagrindiniai modeliavimo metodikos aspektai: atstumas tarp LTE mobiliosios sties ir SRD imtuvo kinta nuo 0 iki 10 m atsitiktinai, tarp įrenginių visada nustatomas tiesioginis matomumas. Atstumas tarp LTE mobiliosios sties ir SRD imtuvo apribotas iki 10 m, siekiant atkartoti situaciją, pagal kurį abu įrenginiai veikia vieno kambario ribose. SRD modeliavimo kanalas tarp siųstuvo ir imtuvo nustatomas taip: sklidimo modelis – Extended Hata SRD, veikimo aplinka – pastato viduje. LTE modeliavimo kanalas tarp siųstuvo ir imtuvo nustatomas taip: sklidimo modelis – Extended Hata, veikimo erdvė – mobilioji stotis pastato viduje, bazinė stotis pastato išorėje. Modeliavimo rezultatai gaunami atliekant 500 000 skirtingų tinklo konfigūracijų atvejų, tuomet visiškai nusistovi trukdžio tikimybės priklausomybė nuo iteracijų skaičiaus.

Atstumas tarp LTE bazinės ir mobiliosios sties kinta nuo 0 iki 350 m. Ši reikšmė parinkta įvertinus vidutinį LTE sties veikimo spindulį Vilniaus mieste. Atstumas tarp SRD siųstuvo ir imtuvo kinta nuo 0 iki 30 m. Ši reikšmė parinkta įvertinus SRD įrenginių gamintojų rekomendacijas.

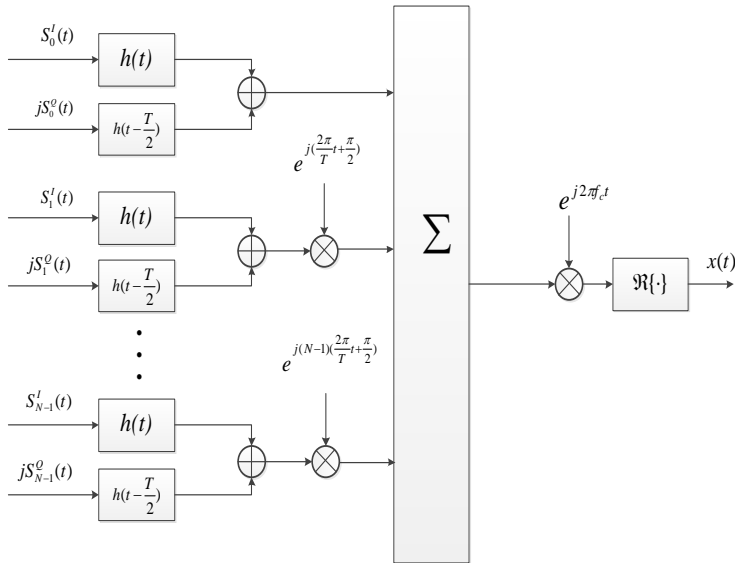
Disertacijoje modeliuojamos LTE sistemos, naudojančios OFDM ir vis labiau populiarėjantį FBMC informacijos perdavimo būdą.



FBMC informacijos perdavimo būdo užuomazgos aptinkamos Chang (R. Chang 1966) ir Saltzberg (Saltzberg 1967) moksliniuose darbuose. Susietųjų filtrų informacijos perdavimo būdo FBMC panaudojimas daugelio ponešlių sistemose spredžia pagrindinius OFDM trūkumus susijusius su spektriniu efektyvumu, žema kanalo šalutine spinduliute.

Naudojant FBMC informacijos perdavimo būdą galima atsisakyti ciklinio prefikso, siekiant pagerinti spektrinį efektyvumą. Ponešliai FBMC kanale yra neortogonalūs, kaip yra OFDM sistemose. Ortogonalumas FBMC sistemose užtikrinamas tarp naudojamų sub-kanalų. Šiam tikslui naudojama pastumtoji QAM moduliacija (angl. *offset quadrature amplitude modulation – OQAM*) (Lélé *et al.* 2008; Vangelista & Laurenti 2001; Siohan *et al.* 2002). OQAM moduliacija užtikrina didesnę greitaveiką lyginant su tradicinėmis OFDM sistemomis (Bellanger 2010).

FBMC informacijos perdavimo būdas reikalauja didesnio duomenų apdorojimo sudėtingumo, lyginant su OFDM sistemomis (Renfors *et al.* 2013; Premnath *et al.* 2013). OFDM sistemos turi didelių pranašumų taškas-taškas tipo radijo ryšio sistemose, o FBMC lengviau įdiegiamas taškas-daug taškų bei kognityviojo pobūdžio sistemose (Datta *et al.* 2011; Medjahdi, Terre, *et al.* 2011; Schellmann *et al.* 2014).



**S2.2 pav.** Susietųjų filtrų informacijos perdavimo būdo veikimo struktūra (Farhang-Boroujeny 2011b)

S2.2 paveiksle matyti pagrindinius FBMC veikimo principus. Informacijos perdavimo signalai nuo  $S_0(t)$  iki  $S_{N-1}(t)$  yra susieti su perduodamų simbolių seka, kuri analitiškai aprašoma kaip (2.1) išraiška (Farhang-Boroujeny 2011b):

$$S_k(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_k[n] \delta(t - nT), \text{ for } k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (\text{S2.1})$$

čia  $S_k[n]$  yra kompleksinis skaičius arba QAM ar PSK moduliacijų informaciniai simboliai, kuris analitiškai aprašoma kaip (2.3) išraiška (Farhang-Boroujeny 2011b):

$$S_k[n] = S_k^I[n] + jS_k^Q[n], \quad (S2.2)$$

čia  $I$  ir  $Q$  atitinka realiąją ir menamąją dalis atitinkamai. Periodas  $T$  atitinka vieno simbolio trukmę kiekviename sub-kanale. Svarbus aspektas yra tai, kad realioji ir menamoji  $S_k[n]$  signalo dalys yra perstumtos per  $T/2$ . Tai įgyvendinta naudojant impulso formavimo filtrą  $h(t)$ , kuris yra paslinktas laiko ašyje.

Pagrindinė disertacijoje analizuojama problema yra OFDM ponešlių šalutinės spinduliuotės lygis. Jeigu pavyktų sumažinti šį lygį, galėtume išvengti elektromagnetinio suderinamumo problemų arba reikšmingai jas sumažinti. FBMC informacijos perdavimo informacijos perdavimo būdas atrodo kaip galimas šios problemos sprendimas ar bent jos sušvelninimas. Pagrindiniai skirtumai tarp OFDM ir FBMC yra vertinami, lyginant naudojamų skaitmeninių baigtinės impulsinės reakcijos filtrų laikines ir dažnines charakteristikas.

Skaitmeniniai filtrai įdiegti FBMC sistemoje yra ilgesni laiko ašyje ir tęsiasi per keletą persiunčiamų simbolių (tipiškai per 4 simbolius, tai yra vadinama persidengimo faktoriumi  $K$ ) (Mitra 1996). Naudojant ilgesnį filtrą laiko ašyje, gauname selektyvesnį filtro dažninį atsaką. Bet ilgesnis skaitmeninis filtras laiko ašyje turi ir privalumų ir trūkumų. Ryškiausias privalumas – selektyvus skaitmeninio filtro dažninis atsakas.

Taip pat verta paminėti, kad kiekvieno ponešlio spektras iš esmės apima tik dalį sub-kanalo resursų, taip spektras yra naudojamas taupiai, tai suteikia lankstesnes galimybes reguliuojant duomenų srautus daugelio vartotojų prieigos radijo sistemose. Pagrindiniai trūkumai – perduodamus duomenis reikia siųsti didesniais blokais, todėl tampa sudėtingiau atskirti simbolius, perduodamus vienu laiko momentu. Taip pat daug kompleksiškesnis yra kanalo vertinimas dėl didelės interferencijos tarp gretimų perduodamų simbolių.

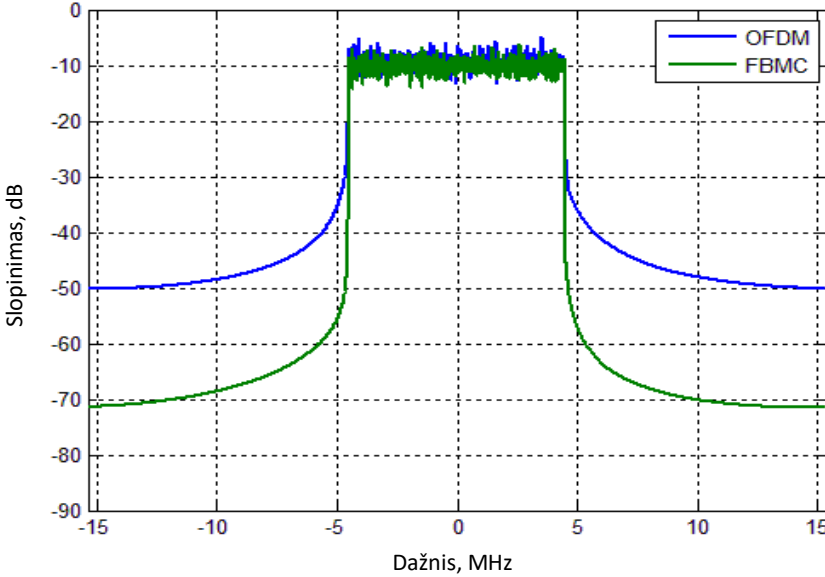
Turint šią pradinę informaciją galima suformuoti standartinį LTE kanalą pagal 3GPP standarto reikalavimus (ETSI 2011a).

### S2.1 lentelė. Pagrindiniai Long-Term Evolution kanalo parametrai

Kanalo plotis, MHz	5	10	15	20
Kadro trukmė, ms	10			
Nešlių atskyrimas, kHz	15			
Diskretizacijos dažnis, MHz	7.68	15.36	23.04	30.72
Aktyvuoti nešliai kanale	301	601	901	1201
Realus kanalo plotis, MHz	4.515	9.015	13.515	18.015

Atliekant 790–862 MHz dažnių juostos elektromagnetinio suderinamumo analizę sumodeliuotas LTE 10 MHz pločio kanalas.

Siekta imituoti blogiausią elektromagnetinio suderinamumo situaciją, kad vienas vartotojas užima visą kanalą ir spinduliuoja didžiausią leistiną galią. S2.3 paveiksle matyti spektriniai skirtumai tarp OFDM ir FBMC:



**S2.3 pav.** Ortogonalųjų ponešių ir Susietųjų filtrų informacijos perdavimo būdo spektriniai skirtumai, kai naudojamas standartinis 10 MHz LTE kanalas

S2.3 paveiksle galima pamatyti, kad šalutinės spinduliuotės lygiai OFDM ir FBMC kanale skiriasi apie 20 dB. FBMC kanalas yra žymiai selektyvesnis, šis rezultatas turės didelę įtaką mažinant žalingus šalutinės spinduliuotės lygius ir sprendžiant elektromagnetinio suderinamumo problemas.

Turint šiuos tarpinius rezultatus galima įvertinti, kokią įtaką tai turės skaitmeninio dividendų elektromagnetinio suderinamumo problemai tarp LTE mobiliųjų stočių ir trumpojo veikimo nuotolio įrenginių SRD. Pirmiausiai minimalūs sąveikos nuostoliai tarp trukdančiojo siųstuvo ir žalingus trukdžius patiriančio imtuvo buvo apskaičiuoti remiantis išraiška (S2.3):

$$RPC = P_{tx} - S_{rx} + G_{rx} + UEBC, \quad (S2.3)$$

čia  $RPC$  – reikalingi kelio nuostoliai,  $P_{tx}$  – trukdančiojo siųstuvo spinduliuojama galia,  $S_{rx}$  – žalingus trukdžius patiriančio imtuvo jautrumo riba,  $G_{rx}$  – žalingus trukdžius patiriančio imtuvo antenos stiprinimas,  $UEBC$  – žalingų trukdžių vertinimo kriterijus, faktorius dėl skirtingų kanalo pločių.

Buvo įvertintos dvi spinduliavimo kaukės: OFDM ir FBMC, kai LTE mobilioji stotis maksimaliai išnaudoja 10 MHz kanalą:

$$RPC_{\text{OFDM}} = -23\text{dBm} / 100\text{kHz} - (-101\text{dBm}) + 0\text{dB} + 8\text{dB} = 86\text{dB}, \quad (\text{S2.4})$$

$$RPC_{\text{FBMC}} = -43\text{dBm} / 100\text{kHz} - (-101\text{dBm}) + 0\text{dB} + 8\text{dB} = 66\text{dB}, \quad (\text{S2.5})$$

Gauti minimalūs kelio nuostoliai pagal išraiškas (S2.4) ir (SS2.5), buvo perskaičiuoti į reikalingą atstumą tarp LTE siųstuvo ir SRD imtuvo remiantis Laisvosios erdvės radijo bangų sklidimo modeliu (angl. *Free Space Loss propagation model*). Šis sklidimo modelis šioje situacijoje yra tinkamas, nes tarp LTE mobiliosios stoties ir trumpojo veikimo nuotolio įrenginio SRD yra tiesioginis matomumas. Atlikus skaičiavimus gauta, kad minimalus atstumas tarp LTE mobilios stoties, naudojančios OFDM, ir trumpojo veikimo nuotolio įrenginio SRD yra 389 m. O minimalus atstumas tarp LTE mobilios stoties, naudojančios FBMC, ir trumpojo veikimo nuotolio įrenginio SRD yra 39 m. Taigi FBMC informacijos perdavimo būdas sumažina reikalingą atstumą apytiksliai 10 kartų.

Sekantis žingsnis – patikrinti gautus rezultatus atliekant Monte-Carlo modeliavimą. Šiam uždaviniui įgyvendinti buvo pasitelkta SEAMCAT programinė įranga. Modeliavimo metodika aptarta S2.1 paveiksle. Atliekant įvairius Monte-Carlo modeliavimus, buvo gautos įvairios žalingų trukdžių atsiradimo tikimybės. Modeliavimo metu buvo laikoma, kad trukdžiai laikomi žalingais, kai žalingų trukdžių tikimybė *IT* yra daugiau nei 5 %. Atstumas tarp LTE mobiliosios stoties ir trumpojo veikimo nuotolio įrenginio SRD yra žymima  $d_{\text{max}}$ .

**S2.2 lentelė.** Žalingų trukdžių tikimybių lygiai, kai nustatomas skirtingas atstumas tarp Long-Term Evolution siųstuvo ir Short Range devices imtuvo

Žalingų trukdžių tikimybė <i>IT</i> naudojant OFDM ir FBMC	SRD įrenginių tipai ERC/Rec 70-03 rekomendaciją			
	Nespecifiniai įrenginiai	Alarmai	Radijo mikrofonai	Bevielės ausinės
$d_{\text{max}} = 10 \text{ m}$				
<i>IT</i> su OFDM, %	21,11	17,76	50,52	32,27
<i>IT</i> su FBMC, %	4,02	2,85	20,22	9,68
$d_{\text{max}} = 20 \text{ m}$				
<i>IT</i> su OFDM, %	13,85	10,62	34,30	19,92
<i>IT</i> su FBMC, %	2,20	1,76	11,27	4,85
$d_{\text{max}} = 50 \text{ m}$				
<i>IT</i> su OFDM, %	7,66	4,41	15,07	8,52
<i>IT</i> su FBMC, %	1,04	0,81	4,72	2,22

Atliktas Monte-Carlo modeliavimas rodo, kad naudojant FBMC perdavimo būdą galima žymiai sumažinti trukdžių atsiradimo tikimybę SRD imtuvams lyginant su OFDM

(žiūrėti S2.2 lentelę). LTE mobilioji stotis nekelia žalingų trukdžių SRD imtuvams, kai atstumas yra bent 50 m. Vertinant tris skirtingus atstumus tarp LTE siųstuvo ir SRD imtuvo gauta, kad FBMC gali sumažinti trukdžių atsiradimo tikimybę SRD imtuvams lyginant su OFDM daugiau 2,5 karto ( $d_{\max} = 10$  m atvejis), daugiau nei 3 kartus ( $d_{\max} = 20$  m atvejis) daugiau nei 3,2 karto ( $d_{\max} = 50$  m atvejis). Gautų rezultatų pasikliautinumo intervalas yra 95 %.

Nagrinėjant pačią kritiškiausią elektromagnetinio suderinamumo situaciją, kai atstumas tarp LTE siųstuvo ir SRD imtuvo lygus 10 m, matyti, kad nespecifiniai SRD įrenginiai ir aliarmo davikliai gali būti nepaveikti žalingų trukdžių (trukdžiai laikomi žalingais, kai žalingų trukdžių tikimybė IT yra daugiau nei 5 %.), jeigu šiuolaikiniuose LTE tinkluose būtų naudojama FBMC informacijos perdavimo būdas. Padidinus atstumą tarp LTE siųstuvo ir SRD imtuvo iki 20 m dar daugiau SRD įrenginių gali būti elektromagnetiškai suderinami su LTE mobiliosiomis stotimis, kai jos veikia kaimyninėje dažnių juostoje. Kai atstumas tarp LTE siųstuvo ir SRD imtuvo lygus 50 m, visų nagrinėtų SRD įrenginių neveikia žalingi trukdžiai, jei būtų naudojamas FBMC informacijos perdavimo būdas.

Visų modeliavimų metu nespecifiniams SRD imtuvams, aliarmo davikliams, bevielėms ausinėms buvo taikomas  $C/(I+N) = 8$  dB žalingų trukdžių kriterijus. Gautų rezultatų pasikliautinumo intervalas yra 95 %. Radijo mikrofonams buvo taikomas 17 dB žalingų trukdžių kriterijus nustatytas pagal EN 300 220 (ETSI 2012), EN 301 357 (ETSI 2008) SRD standartus.

### 3. Eksperimentinis žalingų trukdžių atsiradimo tyrimas

Šiame skyriuje pateikti eksperimentinių tyrimų rezultatai, kuriais siekta patikrinti teorinių skaičiavimų ir modeliavimų metu gautus rezultatus.

Matavimams naudoti dvių skirtingų gamintojų nespecifiniai SRD įrenginiai: Semtech SX1231 ir Analog Devices ADF7023. Visi matavimai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos fakulteto Telekomunikacijų inžinerijos katedroje 2013 metais.

Pagrindiniai matavimų etapai:

- Sukonfigūruojamas informacijos perdavimo kanalas tarp SRD įrenginių.
- Sukonfigūruojama LTE mobilioji stotis ir nustatomas maksimalaus siuntimo režimas.
- SRD siųstuvai siunčia duomenis serijomis po 1000 paketų.

LTE mobilioji stotis artinama prie SRD imtuvo. SRD imtuve skaičiuojamas gautų paketų procentas.

Matavimų metu LTE mobiliosios stoties šalutinės spinduliuotės galia neviršijo 3GPP 136 101 rekomendacijoje nustatytų maksimalių ribų:  $-23$  dBm/100 kHz lygio šalutinės spinduliuotės galia.

SRD imtuvo dažnis matavimų metu buvo nustatytas ties 868,1 MHz, kaip nusako ERC/Rec 70-03 rekomendacija.

Vokietijos Federalinė tinklų agentūra ECC SE24 darbo grupėje pristatė studiją (Federal Network Agency 2013), kurioje daroma išvada, kad šiuolaikinių LTE mobiliųjų stočių šalutinės spinduliuotės lygiai yra žymiai mažesni nei leidžia 3GPP standartas. Vokietijos Federalinė tinklų agentūros studija (Federal Network Agency 2013) parodo, kad realaus LTE įrenginio šalutinė spinduliuotė yra apytiksliai  $-46$  dBm/100 kHz, nors 3GPP standartas leidžia  $-23$  dBm/100 kHz. Vokiečių atliktoje studijoje šis įrenginys pristatytas kaip tipinis.

Gauti eksperimentinių matavimų rezultatai buvo papildomai patikrinti naudojant laisvosios erdvės sklidimo modelį (S2.6).

$$PL = 32,5 + 20 \cdot \log(f, \text{GHz}) + 20 \cdot \log(d, \text{m}), \quad (\text{S2.6})$$

čia  $PL$  – kelios nuostoliai, dB;  $f$  – signalo dažnis, GHz;  $d$  – nuotolis, m.

Faktorius prieš nuotolio algoritimą yra vadinamas kelio nuostolių eksponentė  $\gamma$ . Radijo sistemų literatūroje (Goldsmith 2005) kelio nuostolių eksponentė  $\gamma$  tradiciškai kinta nuo 2, kas yra laikoma sklidimu laisvojoje erdvėje, iki 4, kas yra laikoma sklidimu erdvėje su dideliais aplinkos nuostoliais. Bet radijo bangų sklidimas viduje pastatų sukuria didesnę slopinimą (dėl didelio kiekio atspindžių, signalo išsklaidymo nuo aplinkoje esančių objektų), nei radijo bangų sklidimas išorėje su kliūtimis (Goldsmith 2005). Taigi kelio nuostolių eksponentė  $\gamma$  vidinėse patalpose gali siekti iki 6,5 (Goldsmith 2005). Šioje disertacijoje visi matavimai buvo atlikti viduje pastato, tipinėje biuro aplinkoje, todėl buvo pasirinkta, kad kelio nuostolių eksponentė  $\gamma = 5$ .

S2.2 lentelėje matyti eksperimentinių matavimų rezultatų sulyginimas su teoriniais skaičiavimais, siekiant patikrinti gautų rezultatų patikimumą. LTE mobiliosios stoties šalutinės spinduliuotės lygis atitinka 3GPP 136 101 standartą.

**S2.2 lentelė.** Matuoto ir apskaičiuoto C/I trukdžių kriterijaus palyginimas, kai trukdis veikė pagal 3GPP 136 101 standartą

Eksperimentiniai matavimai atlikti Semtech gamintojo SRD įrenginiu				
<sup>1, 2, 3</sup> Atstumas, m	C, dBm	I, dBm	C/I pamatuotas, dB	<sup>1</sup> C/I skaičiuotas pagal PL išraišką, dB
9	-92	-104	12	10
4	-72	-85	13	12
Eksperimentiniai matavimai atlikti Analog Devices gamintojo SRD įrenginiu				
8	-94	-101	7	5
3	-72	-82	10	6

Pastaba<sup>1</sup>: Normalus imtuvo darbo režimas laikomas, kai prarastų paketų procentas yra mažiau nei 10.

Pastaba<sup>2</sup>: Atstumas, kai SRD imtuvo darbas sutrikdomas.

Pastaba<sup>3</sup>: C/I kriterijus apskaičiuojamas taip: C/I apskaičiuotas =  $-23$  dBm/100 kHz – kelio nuostoliai – C, dBm.

S2.2 lentelėje matyti, kad C/I pamatuotos reikšmės koreliuoja su teoriškai apskaičiuotomis C/I reikšmėmis. Pamatuotos C/I reikšmės kinta intervale nuo 7 dB iki 13 dB. Apskaičiuotos C/I reikšmės kinta nuo 6 dB iki 12 dB.

S2.3 lentelėje matyti eksperimentinių matavimų rezultatų sulyginimas su teoriniais skaičiavimais, siekiant patikrinti gautų rezultatų patikimumą. LTE mobiliosios stoties šalutinės spinduliuotės lygis atitinka tipinio įrenginio veikimo charakteristiką.

**S2.3 lentelė.** Trukdžių kriterijaus C/I palyginimas tarp pamatuoto ir suskaičiuoto, kai trukdis veikė pagal tipinio įrenginio charakteristiką

Eksperimentiniai matavimai atlikti Semtech gamintojo SRD įrenginiu				
<sup>1, 2, 3</sup> Atstumas, m	C, dBm	I, dBm	C/I pamatuotas, dB	<sup>1</sup> C/I skaičiuotas pagal PL išraišką, dB
4	-92	-103	11	15
1.5	-72	-83	11	14
Eksperimentiniai matavimai atlikti Analog Devices gamintojo SRD įrenginiu				
3	-94	-101	7	7
1.5	-72	-83	11	14

Pastaba<sup>1</sup>: Normalus imtuvo darbo režimas laikomas, kai prarastų paketų procentas yra mažiau nei 10.

Pastaba<sup>2</sup>: Atstumas, kai SRD imtuvo darbas sutrikdomas.

Pastaba<sup>3</sup>: C/I kriterijus apskaičiuojamas taip:  $C/I$  apskaičiuotas =  $-23 \text{ dBm}/100 \text{ kHz} - \text{kelio nuostoliai} - C$ , dBm.

S2.3 lentelėje matyti, kad C/I pamatuotos reikšmės koreliuoja su teoriškai apskaičiuotomis C/I reikšmėmis. Pamatuotos C/I reikšmės kinta intervale nuo 7 dB iki 11 dB. Apskaičiuotos C/I reikšmės kinta nuo 7 dB iki 15 dB.

Atlikti eksperimentiniai matavimai parodė, kad reikalingas minimalus trukdžių kriterijus C/I kinta nuo 7 iki 13 dB, kai LTE mobilioji stotis veikia pagal 3GPP 136 101 standartą. Atlikti eksperimentiniai matavimai parodė, kad reikalingas minimalus trukdžių kriterijus C/I kinta nuo 7 iki 11 dB, kai LTE mobilioji stotis veikia pagal 3GPP 136 101 standartą. Eksperimentinių matavimų rezultatai buvo patikrinti remiantis adaptuota laisvosios erdvės sklidimo modelio išraiška. Matavimų neapibrėžtis yra mažiau nei  $\pm 5 \%$ .

## Bendrosios išvados

1. Atlikus 790–862 MHz dažnių juostos elektromagnetinio suderinamumo analizę nustatyta, kad LTE stotys spinduliuos žalingus trukdžius radijo ryšio sistemoms, veikiančioms kaimyninėse dažnių juostose – skaitmeninei antžeminei televizijai, veikiančiai 470–790 MHz dažnių juostoje, radijo navigacijos sistemoms, veikiančioms 638–862 MHz dažnių juostoje ir trumpojo veikimo nuotolio įrenginiams, veikiančioms 863–870 MHz dažnių juostoje. Elektromagnetinio suderinamumo problema tarp LTE mobiliųjų stočių ir SRD imtuvų yra opiausia šioje dažnių juostoje, nes LTE mobiliųjų stočių ir SRD imtuvų tankis nuolat auga ir jų fizinė veikimo vieta nuolat kinta.

2. FBMC informacijos perdavimo būdas yra spektriškai efektyvesnis nei OFDM. LTE sistemos, naudojančios FMBC informacijos perdavimo būdą, turėtų 20 dB žemesnį šalutinės spinduliuotės lygį, lyginant su OFDM.
3. Atlikus Monte-Carlo modeliavimą nustatyta, kad naudojant FBMC informacijos perdavimo būdą, galima žymiai sumažinti trukdžių atsiradimo tikimybę SRD imtuvams, lyginant su OFDM. LTE mobilioji stotis nekelia žalingų trukdžių SRD imtuvams, kai atstumas tarp jų yra bent 50 m. FBMC gali sumažinti trukdžių atsiradimo tikimybę SRD imtuvams daugiau nei 2,5 karto. Gautų rezultatų pasikliautinumo intervalas yra 95 %.
4. Eksperimentiniais matavimais nustatyta, kad minimalus apsauginis kriterijus  $C/I$  turi būti daugiau nei 7 dB, kai LTE mobiliosios stoties šalutinė spinduliuotė neviršija 3GPP TS 36.101 standarto reikalavimų. Eksperimentiniais matavimais nustatyta, kad minimalus apsauginis kriterijus  $C/I$  turi būti daugiau nei 7 dB, kai LTE mobiliosios stoties šalutinė spinduliuotė atspindi realaus įrenginio veikimo charakteristikas. Matavimų neapibrėžtis yra mažiau nei  $\pm 5$  %.
5. Eksperimentiniais matavimais nustatyta, kad laisvojo sklidimo modelio kelio nuostolių eksponentė  $\gamma$  turi būti lygi 5, siekiant atspindėti situaciją, kai eksperimentiniai matavimai atliekami tipinėje biuro aplinkoje.



---

## Annexes<sup>1</sup>

**Annex A.** The co-authors agreement to present publications material in the dissertation.

**Annex B.** Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation.

---

<sup>1</sup>The annexes are supplied in the enclosed compact disc

Evaldas STANKEVIČIUS

INVESTIGATION OF TECHNIQUES FOR REDUCING  
MOBILE COMMUNICATION SYSTEMS HARMFUL  
OUT-OF-BAND EMISSION

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,  
Electrical and Electronic Engineering (01T)

Evaldas STANKEVIČIUS

MOBILIOJO RYŠIO SISTEMŲ ŽALINGOS  
ŠALUTINĖS SPINDULIUOTĖS MAŽINIMO  
BŪDŲ TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,  
Elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

2017 02 09. 10 sp. I. Tiražas 20 egz.  
Vilniaus Gedimino technikos universiteto  
leidykla „Technika“,  
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,  
<http://leidykla.vgtu.lt>  
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“,  
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius