

**VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
RADIOFIZIKOS KATEDRA**

Aurimas Juknevičius

DVB-T SFN TINKLO SEGMENTO OPTIMIZAVIMAS

Bakalauro baigiamasis darbas

(studijų programa – Telekomunikacijų fizika ir elektronika)

Studentas	Aurimas Juknevičius
Darbo vadovas	Paulius Dapkevičius
Recenzentas	doc. Vytautas Jonkus
Konsultantas	doc. Kęstutis Svirskas
Katedros vedėjas	prof. Jūras Banys

Vilnius 2017

Turiny

Sutrumpinimai	3
Įvadas	5
DVB-T SFN tinklas	6
MIP paketai	8
QAM ir QAM žvaigždynas	10
COFDM moduliacijos schema	13
Antrinis klaidų taisymas (FEC), MER	15
DVB-T SFN tinklo sinchronizacija	17
Tyrimo metodika	18
Teorinis modeliavimas ICS Telecom paketo priemonėmis.....	20
Praktinė tyrimo metodika (KATHREIN MSK 200)	23
Tyrimo rezultatai ir jų aptarimas	25
Išvados	32
Priedai	32

Sutrumpinimai

LRTC – Lietuvos radijo ir televizijos centras.

RRT – Ryšių reguliavimo tarnyba.

DVB-T SFN (angl. *Digital Video Broadcasting – Terrestrial Single Frequency Network*) – skaitmeninės antžeminės televizijos vieno dažnio tinklas.

COFDM (angl. *Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) - koduotas skaitmeninis kelių statmenų nešlių moduliacijos metodas.

TS (angl. *Transport Stream*) – siunčiamos informacijos srautas.

MIP (angl. *Megaframe Initialization Packet*) – mega kadro įrašymo paketas.

TPS (angl. *Transmission Parameters signalling*) – transmisijos parametrai.

FFT (angl. *Fast Fourier Transformation*) – greita Furjė transformacija.

RS (angl. *Reed Solomon*) – pirminė klaidų taisymo grupė.

QAM (16,64,256) (angl. *Quadrature amplitude modulation*) – kvadratinė amplitudės moduliacija su atitinkamu žvaigždynu.

LTE (angl. *Long-Term Evolution*) – belaidės komunikacijos didelio dydžio duomenų standartas.

WiMax (angl. *Worldwide Interoperability for Microwave Access*) – bevielio ryšio technologija skirta perduoti duomenis radijo ryšiu.

ISI (angl. *Inter-symbol interference*) – simbolių interferencija.

FEC (angl. *Forward Error Correction*) – klaidų taisymo sistema paremta pasirinktu kodavimo režimu.

MER (angl. *Modulation error ratio*) – moduliacijos klaidų skaičiaus dydis.

BER (angl. *Bit Error Ratio*) – klaidingų bitų skaičius.

FDM (angl. *Frequency-division multiplexing*) - kelių statmenų nešlių dažnių moduliacijos metodas.

CACTI – LRTC naudojama speciali monitoringo sistema

RRS – radijo relinė stotis.

C/I – norimo ir interferuojančio signalo santykis.

Ivadas

DVB-T SFN (angl. *Digital Video Broadcasting – Terrestrial Single Frequency Network*) televizijos transliavimo technologija, tai pasaulyje paplitusi technologija, prie kurios pereina vis daugiau pasaulio valstybių. Lietuvoje šios technologijos pradžia laikoma 2003 m. rugpjūčio mėnuo, kai Vilniaus Televizijos bokšte buvo paleistas pirmasis šios technologijos eksperimentinis siųstuvas. Nuo 2006 m. kai Lietuvoje buvo paleista pirmoji DVB-T SFN transliacija, ši technologija pradėta vis labiau plėtoti. Ji tapo ypač svarbia 2012 m., kai Lietuvoje buvo atjungta „Analoginė televizija“.

DVB-T SFN yra televizijos transliavimo technologija, kurią naudojant keli siųstuvai tuo pačiu metu, tuo pačiu dažnių kanalu siunčia tą patį signalą. DVB-T SFN leidžia kuo efektyviau išnaudoti dažnių kanalą bei padidinti skleidžiamo signalo aprėpties zoną. Kadangi yra siunčiamas vieno numatyto dažnio sinchronizuotas signalas, yra labai svarbu parinkti tinkamą sinchronizaciją, kad į imtuvą atėjęs signalas nebūtų su klaidomis (t.y. sumažėtų tarp simbolinių trukdžiai (interferencija) ir kanalo triukšmai).

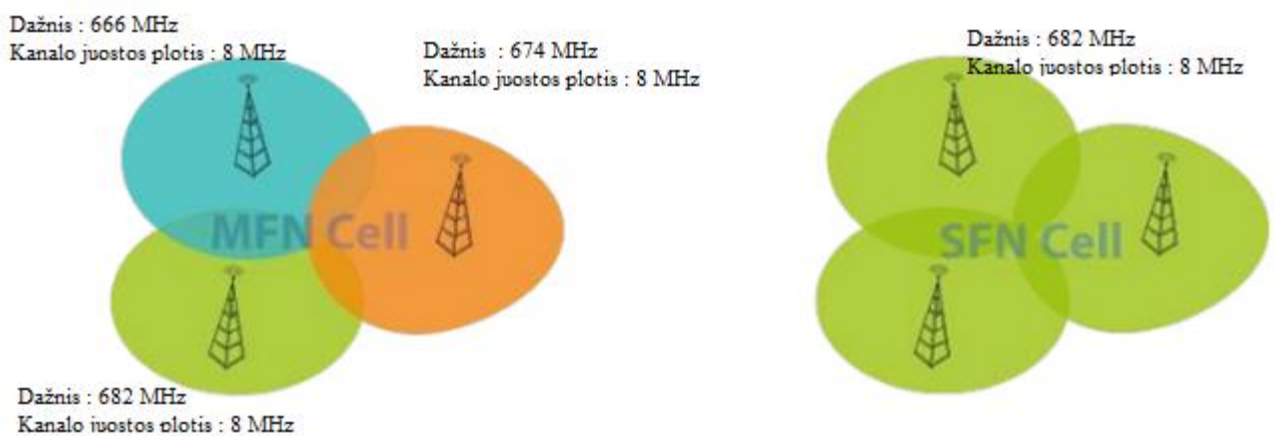
Kadangi kiekviena ryšio sistema susideda iš tam tikro ryšio kanalo ir siunčiamo signalo, yra labai svarbu įvertinti tokios sistemos (šiuo atveju LRTC DVB-T SFN tinklo segmento) patikimumą, t.y. gebėjimą persiųsti reikalingą informaciją tam tikru atstumu su mažiausiu įmanomu klaidingų bitų skaičiumi. Tam tikslui yra pasitelkiama teorinė siųstuvų siunčiamo signalo modeliavimo programa (ICS Telecom) bei praktinė priimamo signalo matavimo sistema „KATHREIN MSK 200“, kuri leidžia išmatuoti triukšmų lygį ryšio kanale. Išmatavus DVB-T SFN tinklo signalą šiuo prietaisu gaunami atitinkami ryšio parametrai t.y. MER (angl. *Modulation Error Ratio*), BER (angl. *Bit Error Ratio*) prieš FEC (angl. *Forward Error Correction*) ir BER po FEC. Būtent šie dydžiai ir apibūdina turimą signalą, gauto signalo kokybę, lyginant ją su išsiųsto signalo kokybe, bei gautą signalą prieš ir po klaidų korekcijos.

Šio darbo tikslas – optimizuoti kursinio darbo metu tirtą LRTC DVB-T SFN tinklo segmentą, pasitelkiant teorines (ICS Telecom) bei praktines (KATHREIN MSK 200) priemones.

DVB-T SFN tinklas

DVB-T SFN tai televizijos transliavimo technologija, kurią naudojant, keli siųstuvai tuo pačiu metu, tuo pačiu dažnių kanalu siunčia tą patį signalą (t.y. siųstuvų tinklas su tuo pačiu transliavimo dažniu ir ta pačia transliavimo informacija). SFN veikimas yra paremtas COFDM (angl. *Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) naudojimu, kuris gerai veikia, esant identiško signalo aidui (daugiakanaliame priėmimui)[1]. Ši COFDM savybė (atsparumas) ir leidžia sukurti SFN tinklą su persiklojančiais to paties dažnio siųstuvų signalais. Vietose, kuriose dviejų siųstuvų signalas persikloja, silpnesnis signalas yra laikomas „aidu“ ir yra pasirenkamas stipresnis signalas. Kadangi MFN tinkle visi siųstuvai signalą siunčia skirtingais dažniais, tai vietose, kuriose signalai persikloja, bus tiesiog matoma ta pati programa dviem skirtingais dažniais.

Ši technologija leidžia padidinti transliuojamo signalo padengiamumo plotą ir efektyviai panaudoti dažnių spektrą, kadangi skirtingai nuo MFN (angl. *Multiple Frequency Network*) signalas yra siunčiamas vienu ir tuo pačiu dažniu, o ne keliais skirtingais dažniais. Tai iliustruoja **1 pav.**



1 pav. MFN ir SFN technologijų palyginimas.

Šis paveikslėlis puikiai atskleidžia SFN technologijos pranašumą prieš MFN technologiją. Kaip galime matyti iš paveikslėlio, MFN tinkle yra naudojami 3 skirtingi transliavimo dažniai (666 MHz, 674 MHz, 682 MHz) su 24 MHz kanalo juostos pločiu. Tuo tarpu SFN tinkle yra naudojamas tik vienas dažnis (682 MHz) su 8 MHz kanalo juostos pločiu, dėl to yra sutaupoma dažnių spektro[2]. Labai svarbu, kad visi tinkle esantys siųstuvai signalą siųstų lygiai tuo pačiu dažniu su nedidesne, nei 1 Hz deviacija. Esant didesniam deviacijos lygiui, suprastėja transliavimo kokybė (atsiranda BER),

dėl ko nukenčia ir transliavimo atstumas. Norint įsitikinti, ar visi SFN tinklo siųstuvai transliuoja tuo pačiu dažniu, kiekvienas siųstuvai turi GPS nuorodos signalą (t.y. sinchronizuotas su kitais šio tinklo siųstuvais)[3]. Mūsų tiriamame SFN tinkle yra naudojamas 8 MHz kanalo juostos plotis, o tai reiškia, kad lyginant su MFN tinklu galime transliuoti 3 kartus daugiau programų (kadangi vienai programai tam tikrame plote panaudojome tikrai vieną dažnį ir tik 8 MHz kanalo juostos pločio).

DVB-T SFN tinklo reikalavimai

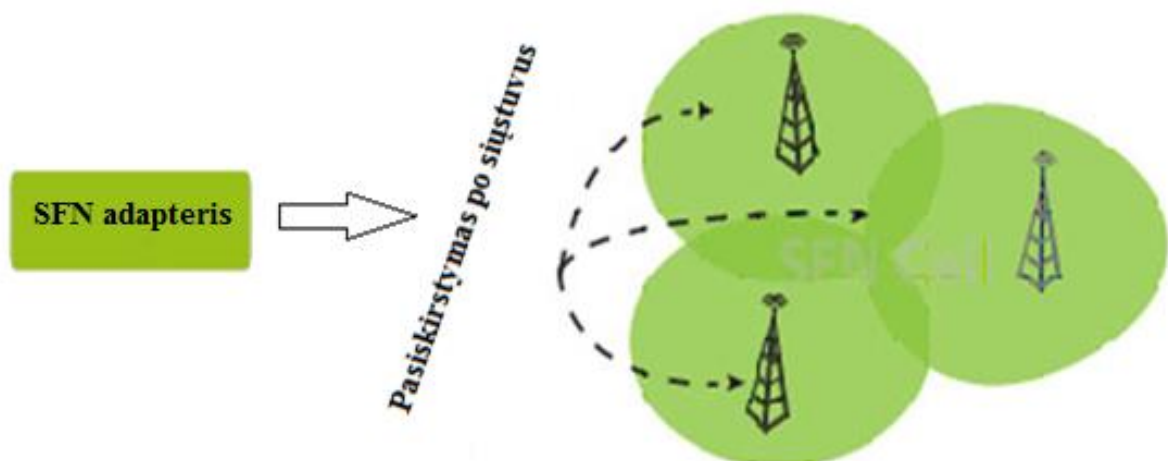
DVB-T SFN tinklui yra keliami tam tikri reikalavimai :

- a) Visi SFN tinklo siųstuvai turi veikti tuo pačiu dažniu.**
- b) Visi SFN tinklo siųstuvai signalą turi išsiųsti tuo pačiu laiko momentu.**
- c) Visi SFN tinklo siųstuvai turi atitikti tuos pačius COFDM moduliacijos parametrus.**

Jeigu visi šie reikalavimai yra išpildyti, tada galima sukurti sėkmingai veikiančią DVB-T SFN tinklą. Pirmasis (a) reikalavimas yra ganėtinai paprastai išpildomas, tereikia nustatyti, kad visi mūsų SFN tinklo siųstuvai signalą siųstų tam tikru nustatytu pastoviu dažniu, pvz.: 682 MHz. Tačiau likusieji du reikalavimai nėra taip lengvai pasiekiami, kadangi siųstuvams yra reikalinga papildoma informacija: siųstuvų parametrai bei atitinkama sinchronizacija.

Viena iš pagrindinių DVB-T SFN tinklo sąlygų yra tuo pačiu metu siunčiamas tas pats signalas, todėl labai svarbu, kad visi tam tikroje teritorijoje esantys siųstuvai būtų sinchronizuoti laike (t.y. jog siųstuvai, esantis Jurbarko, signalą išsiųstų lygiai tuo pačiu metu kaip ir siųstuvai, esantis Marijampolėje). Visa tai yra pasiekama, pasitelkiant GPS signalo nuorodą, bei tam tikrą signalo vėlinimą. Jeigu šios sąlygos tinkle nėra įvykdomos, gali pasireikšti įvairūs tinklo sutrikimai, pvz.: siunčiamo signalo interferencija, dėl kurios priimamas imtuve signalas bus iškraipomas, atsirastų klaidos (BER).

Visa ši reikalinga papildoma informacija į siųstuvus yra išsiunčiama, pasitelkiant SFN adapterį, kuris į TS (angl. *Transport Stream*) srautą įterpia siųstuvams reikalingą sinchronizavimo informaciją. (žr. **2 pav.**) TS yra standartinis formatas, reikalingas vaizdo, garso, duomenų siuntimui ir saugojimui įvairaus tipo technologijose, šiuo atveju DVB-T SFN tinkle.



2 pav. SFN tinklas.

Kaip galime matyti iš šio paveikslėlio, gautasis TS srautas su turima vaizdo bei garso informacija yra praleidžiamas per SFN adapterį, kuris TS srautą papildo siųstuvams reikalinga informacija. Tada šis, jau pakeistas, TS srautas yra siunčiamas į atitinkamus Lietuvoje esančius siųstuvus. Siųstuvai, gavę šį signalą, iš jo „pasiima“ sinchronizacijos parametrus bei retransliuoja gautąjį signalą.

MIP paketai

Siųstuvams reikalinga sinchronizacijos informacija bei kiti parametrai yra pridedami į vieną iš TS paketų taip vadinamą MIP (angl. *Megaframe Initialization Packet*) paketą[4]. Visa šiame pakete esanti informacija gali būti skirstoma į 3 pagrindines dalis (žr. **3 pav.**) :

- a) Perdavimo parametrus**
- b) Sinchronizacijos informacija**
- c) Papildomas funkcijas**

Perdavimo parametrai dažnai yra apibūdinami kaip TPS (angl. *Transmission Parameters signalling*) bitai. Šie parametrai dažniausiai apibūdina signalo moduliacijos nustatymus, tokius kaip

kanalo juostos plotį, apsaugos intervalą (angl. *Guard Interval*), FFT režimą. Kaip jau buvo minėta anksčiau, mūsų SFN tinkle yra parinktas 8 MHz kanalo juostos plotis. Tuo tarpu apsaugos intervalas yra parenkamas, atsižvelgiant į tai, kokį tinklą norime gauti. Priklausomai nuo šio pasirinkimo mūsų tinklas bus daugiau arba mažiau apsaugotas nuo tarpsimbolinių trukdžių (interferencijos), tačiau kuo labiau tinklas yra apsaugomas tuo didesnė dalis greitaveikos yra prarandama.

Sinchronizacijos informacija, pagrindinė šios dalies informacija, yra maksimalus tinklo vėlinimo laikotarpis (t.y. maksimalus laikotarpis, per kurį į siųstuvą turi ateiti signalas).

Papildomos funkcijos dažniausiai yra aprašomos kuriam nors specifiniam siųstuvai ir pagal to siųstuvo TxID (identifikavimo numerį) yra pritaikoma viena ar kita funkcija.

MIP paketų įterpimas

Norint įterpti MIP paketą į TS srautą, reikia žinoti tam tikrus taip vadinamo „mega kadro“ (angl. *Megaframe*) parametrus, kuris ir apibūdina MIP įkėlimo normas. Šie parametrai priklauso nuo mūsų pasirinkto SFN tinklo parametrų: kodavimo rodiklio, žvaigždyno (angl. *Constellation*) bei pasirinkto FFT režimo. Kiekvienas „mega kadras“ yra sudarytas iš tam tikro n skaičiaus paketų, kur n skaičius priklauso nuo RS (angl. *Reed Solomon*) paketų. RS – tai tam tikra klaidų taisymo grupė, kuri yra naudojama daugelyje signalų perdavimo sistemų (t.y. pirminis kodų klaidų taisymo mechanizmas). Svarbu paminėti, kad sutrikus MIP paketų perdavimui arba jeigu šie paketai yra perduodami, tačiau su klaidomis atsiranda didelė tikimybė jog visas SNF tinklas praras sinchronizaciją [5]

Signalui perduoti yra naudojamos dvi pagrindinės sistemos, pagrįstos 2048 (2K mode) arba 8192 (8K mode) nešlių skaičiumi [6]. Didelis nešlio signalų skaičius yra gaunamas, pasitelkiant FFT (angl. *Fast Fourier Transformation*), kuri yra paremta šaknies iš 2 arba 4 algoritmu ir nuo šio parinkto algoritmo priklauso praktinis mūsų tinkle generuojamų antrinių nešlių skaičius (kuo didesnis nešlių skaičius, tuo didesnę kiekį informacijos bus galima perduoti). Šiuos „mega kadrus“ formuoja anksčiau aptartasis SFN adapteris ir, priklausomai nuo jo, yra naudojami 8 kadrai (2 super kadrai) 8k režime, 16 kadrų (4 super kadrai) 4k režime arba 32 kadrai (8 super kadrai) 2k režime. Tai iliustruoja 1 lentelė. Dėl savo sudėtingos sudėties 4k režimas yra retai naudojamas ir susideda iš FFT paremto 2 ir 4 algoritmu.

1 lentelė. RS paketų skaičius, priklausomai nuo režimo.

Code rate	QPSK			16 QAM			64 QAM		
	2K mode	4k mode	8k mode	2K mode	4k mode	8k mode	2K mode	4k mode	8k mode
$\frac{1}{2}$	252	504	1008	504	1008	2016	756	1512	3024
$\frac{2}{3}$	336	672	1344	672	1344	2688	1008	2016	4032
$\frac{3}{4}$	378	756	1512	756	1512	3024	1134	2268	4536
$\frac{5}{6}$	420	840	1680	840	1680	3360	1260	2520	5040
$\frac{7}{8}$	441	882	1764	882	1764	3528	1323	2646	5292

Iš lentelės matyti, kad „mega kadro“ dydis priklauso nuo naudojamo žvaigždyno (QPSK, 16 QAM, 64 QAM), pasirinkto kodavimo režimo ($\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{5}{6}$, $\frac{7}{8}$), bei nuo pasirinkto nešlių skaičiaus (2K mode, 4K mode, 8K mode).

QAM ir QAM žvaigždynas

Norint geriau pažinti DVB-T SFN tinklą, reikia įsigilinti į tai, kaip pats signalas yra užkoduojamas ir perduodamas. Tam tikslui reikia išnagrinėti QAM (angl. *Quadrature amplitude modulation*) veikimo principą [7]. QAM – tai moduliacijos forma, kuri dėl savo universalumo bei didesnio duomenų perdavimo koeficiento yra dažniau naudojama duomenų perdavimui negu paprastos amplitudės ir fazės moduliacijos schemas. Skaitmeninė QAM forma yra dažnai apibūdinama kaip „kvantuota“ QAM, kadangi gali būti naudojama skirtingų technologijų duomenų signalams perduoti, pradedant LTE, WiMax ir WiFi technologijomis ir baigiant DVB-T SFN technologija. Šis moduliacijos tipas yra plačiai naudojamas radijo komunikacijoje.

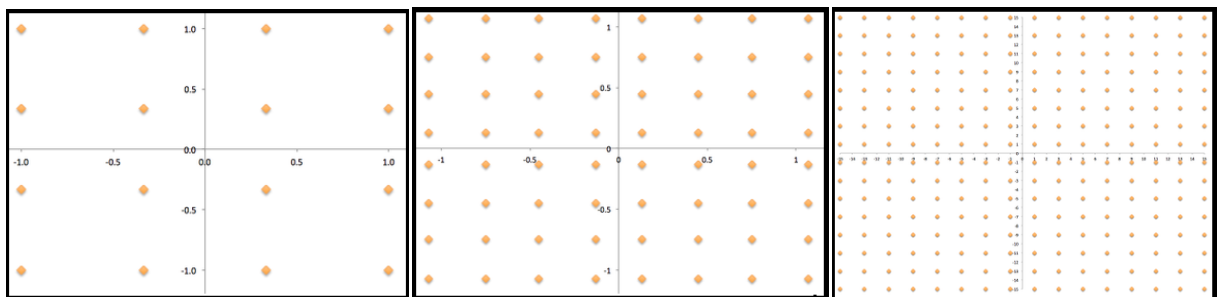
Bendru atveju QAM susideda iš dviejų to paties dažnio nešlio bangų (dažniausiai sinusoidžių), kurių fazės viena nuo kitos skiriasi 90 laipsnių. Tačiau dažniausiai vien fazės moduliacijos nepakanka, todėl kartu su fazės moduliacija yra naudojama ir amplitudės moduliacija, keičiant nešlio bangų amplitudes. Yra išskiriami trys pagrindiniai QAM moduliacijos tipai, kurie, priklausomai nuo pasirinktos moduliacijos, turi didesnę arba mažesnę duomenų perdavimo spartą (svarbu nepamiršti, jog pasirenkant didesnę moduliacijos tipą, padidėja tikimybė atsirasti klaidoms :

a) 16 QAM

b) 64 QAM

c) 256 QAM

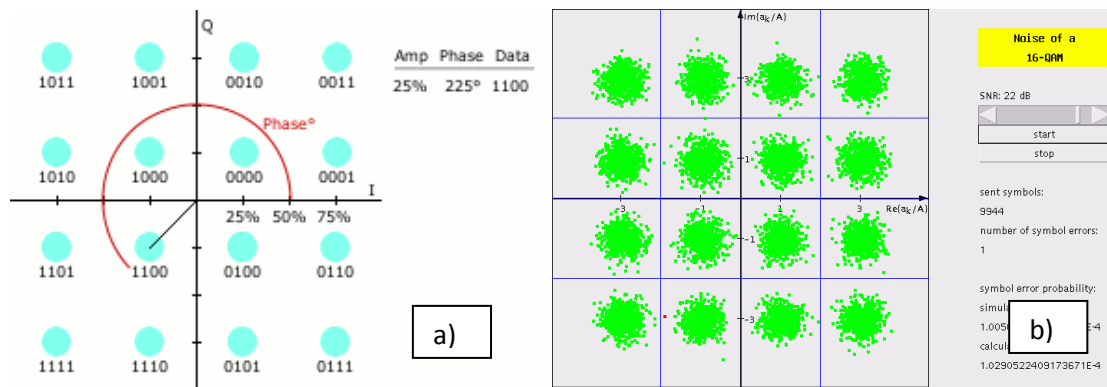
Norint geriau suprasti kaip veikia QAM moduliacija, reikia nagrinėti šių trijų skirtingų moduliacijų žvaigždynus. (žr. 3 pav.)



3 pav. Moduliacijų tipai : a) QAM 16, b) QAM 64 ir c) QAM 256.

Iš 3 pav. aiškiai matyti, kad moduliacijos tipai žvaigždyne skiriasi taškų (bitų) skaičiumi, o tai pat ir atitinkamų fazės bei amplitudės moduliacijos veiksmų skaičiumi. Pavyzdžiui, jeigu turime QAM 16 moduliaciją, vadinasi turėsime atitinkamas 4 bitų sekas (1011, 1001 ir t.t.). Šis 4 bitų skaičius yra apibūdinamas, parenkant moduliacijos bei fazės pokytį nuo centrinio taško (žr. 4 pav.). Matome, jog 4 bitų skaičius „1100“ atitinka 225 laipsnių fazės pokytį, bei 75 procentų amplitudės pokytį (t.y. šis taškas yra atvaizduojamas paslinktas per 225 laipsnius ir sumažinus amplitudę iki 25 procentų pilnos amplitudės). Tuo tarpu 4 bitų skaičius „0000“ atitiks 45 laipsnių fazės pokytį, bei 75 procentų amplitudės pokytį ir t.t.

Tarkime, kad turime 8 bitų žodį, kurį norime persiųsti. QAM 16 moduliacijoje vienas taškiukas (bitas) atitinka 4 bitus, vadinasi, norėdami persiųsti 8 bitų žodį (informaciją), turėsime tuos 8 bitus sugrupuoti į dvi atskiras grupes po 4 bitus, ir, pasinaudoję skirtingomis amplitudės ir fazės moduliacijomis tas dvi grupes persiųsti. Atitinkamai QAM 64 moduliacijoje 1 taškas (bitas) atitinka 6 bitus, QAM 256 vienas taškas (bitas) atitinka 8 bitus (t.y. galėsime 8 bitų informaciją persiųsti viena moduliacija).



4 pav. QAM 16 žvaigždynas su atitinkamomis fazės ir amplitudės moduliacijos vertėmis (a) teorinis bei b) praktinis.

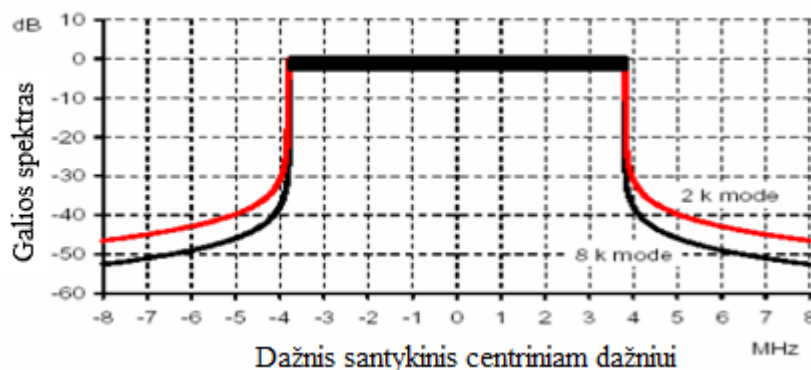
Idealiu (teoriniu atveju) visi gautieji bitai yra jiems skirtose vietose ir niekur nenukrypsta, tačiau tyrimai parodė, kad daugeliu atveju ryšio kanalas nėra visiškai švarus (yra triukšmų), vadinasi, atėjęs bitas gali būti pasislinkęs nuo atitinkamo taško arčiau į vieną ar kitą pusę. Kuo didesni kanalo triukšmai, tuo bus juntamas didesnis nuokrypis, todėl atsiras tokių taškų (bitų), kurie pateks visai ne į savo vietą ir bus priimami kaip teisingi bitai, nors iš tikrųjų atitiks klaidą.

Priklausomai nuo pasirinktos moduliacijos QAM 16, QAM 64, QAM 256 gali būti pasiektas geresnis duomenų perdavimo koeficientas, kadangi vienas taškas atitiks didesnę bitų skaičių, tačiau kuo bus didesnis perdavimo koeficientas, tuo didesnė tikimybė, kad tokia moduliacija bus mažiau atspari klaidoms. Didinant perdavimo koeficientą, yra pridėjama daugiau taškų (bitų) žvaigždyne (pvz.: QAM 256), o tai reiškia, kad bus lengviau perduoti didesnę kiekį informacijos, tačiau atstumai aplink kiekvieną tašką sumažės, todėl bus didesnė tikimybė, kad tam tikras bitas nuklys nuo savo originalios vietos ir dėl to atsiras signalo iškraipymai (klaidos). QAM 256 moduliacija dažniausiai naudojama radijo linijose, kuriose gali būti užtikrintas ryšio kanalas be arba su minimaliais trukdžiais.

Mano pasirinktame LRTC SFN tinkle yra naudojama QAM 64 moduliacija, kuri veikia lygiai taip pat kaip QAM 16, vienintelis skirtumas yra geresnis duomenų perdavimo koeficientas, bet mažesnis atsparumas klaidoms. Priklausomai nuo to, kokią informaciją siunčiame, bitai yra sugrupuojami ir išsiunčiami, pasitelkiant skirtingus fazės bei amplitudės moduliacijos derinius.

COFDM moduliacijos schema

COFDM tai FDM (angl. *Frequency-division multiplexing*) naudojamas kaip skaitmeninis kelių nešlių moduliacijos metodas. Literatūroje dažnai minimas tiesiog OFDM terminas (COFDM nuo OFDM skiriasi tuo, kad COFDM yra į siunčiamą signalą įterpiamas klaidų taisymo kodas FEC, tuo tarpu į OFDM šis kodas nėra įterpiamas)[8]. COFDM modulatorius vieną didelį duomenų srautą (šiuo atveju skaitmeninės televizijos duomenų srautą) išskaido į didelį skaičių mažesnių duomenų srautus. Tada šie išskaidyti duomenų srautai yra moduluojami dideliu skaičiumi sutankintų statmenų antrinių nešlių signalų, kad būtų galima pernešti tam tikrą informaciją keliais skirtingais kanalais arba duomenų srautais. Didelis nešlio signalų skaičius yra gaunamas, pasitelkiant jau ankščiau aptartą FFT (angl. *Fast Fourier Transformation*). Sudėjus visus nešlio signalus, gaunamas perduodamo signalo spektras 8 MHz kanale (kanalas gali būti ir 7 MHz tačiau mūsų tiriamame SFN tinkle naudojamas 8 MHz kanalas). (žr. **5 pav.**)



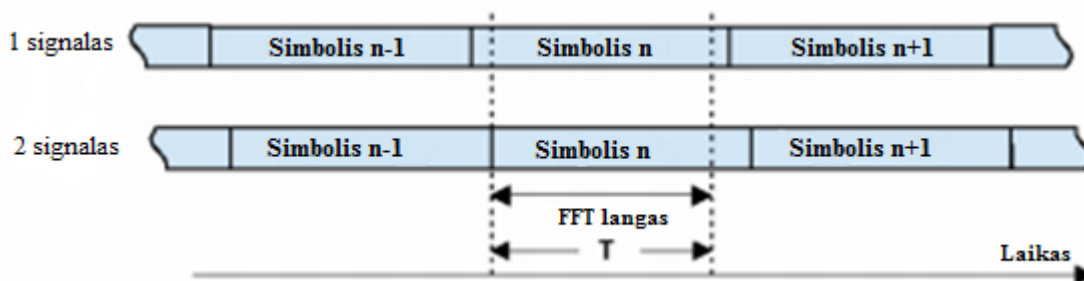
5 pav. Perduodamo signalo spektras.

Perduodamų nešlio signalų skaičius praktiškai visada yra mažesnis ir ne visai atitinka 8K arba 2K režimus. 8K režime praktinis nešlio signalų skaičius yra apie 6817, o 2K režime apie 1705[9]. Šie aktyvūs nešlio signalai perneša duomenis (informaciją) ir yra moduluojami jau ankščiau minėta QAM moduliacijos schema. Taip yra išlaikomas toks pats signalo perdavimo koeficientas kaip ir vieno nešlio schemeje tame pačiame kanalo juostos plotyje. Bendru atveju galime sakyti, kad COFDM yra FDM ir QAM schemų suma.

Kiekvienam COFDM moduliacijoje naudojamam nešlio signalui yra skirtas tam tikras laiko laiko intervalas (time slot) informacija perduoti (t.y. atitinkamas nešlio signalas yra moduluotas faze

ir amplitudė tik tam tikrą laiką, per kurį turi atiduoti informaciją). Šis duomenų vienetas vadinamas simboliu. Po tam tikro laiko fazės ir amplitudės moduliacija yra pakeičiama ir yra perduodamas kitas simbolis informacijos. Bendru atveju signalai, atėję skirtingais keliais, pasižymi skirtingu vėlinimo laiku, kas gali sukelti ISI (angl. *Inter-symbol interference*, t.y. simbolių interferenciją (trukdžius)). Norint to išvengti, yra pridedamas „apsaugos intervalas“ (angl. *Guard Interval*)[10].

Apsaugos intervalas yra tam tikras laiko tarpas, kuris yra pridedamas prie simbolio, norint išvengti priimamų simbolių interferencijos. Tarkime turime originalų simbolį, dalis to originalaus simbolio pradžios yra nukopijuojama ir pridedama prie mūsų simbolio pabaigos. Taip yra sukuriamas Δ ilgio apsaugos intervalas. Vadinasi, net ir atėję su didesniu vėlinimu simboliai bus nuskaityti taisyklingai ir nebus priimami kaip klaidos (žr. **6 pav.**). Svarbu paminėti, kad priklausomai nuo to, koks yra parenkamas apsaugos intervalas, galima sumažinti priimamų klaidų skaičių, tačiau atitinkamai prarasime informacijos perdavimo koeficientą, kadangi didinsime atitinkamų simbolių ilgį. Žiūrėti **2 lentelę**. Bendru atveju galime teigti, jog padidinus apsaugos intervalą yra padidinama tikimybė, kad simbolis bus gautas be klaidos. Tačiau tai taip pat reiškia, kad padidinus apsaugos intervalą, pailgės kiekvieno simbolio QAM moduliacijos laikas.



6 pav. Apsaugos intervalo panaudojimas.

Pagrindinis COFDM privalumas yra tas, kad skirtingai, nei vieno nešlio schemeje, jis gali gerai dirbti, esant kelių kanalų schemei, be papildomų kompleksinių lyginamųjų filtrų (t.y. nereikia į schemą instaliuoti papildomų elementų tam, kad išlyginti signalą). Šis mechanizmas yra ypač naudingas mūsų tiriamame DVB-T SFN tinkle, kur keli gretimi siųstuvai siunčia tą patį signalą tuo pačiu dažniu. Naudojant COFDM moduliaciją SFN tinkle, iš skirtingų siųstuvų atėję signalai persiklos, netrukdydami vienas kitam, tuo tarpu vieno nešlio dažnio schemeje iš skirtingų siųstuvų atėję signalai tiesiog interferuos vienas su kitu, taip sudarydami klaidas ir pakenkdami ryšio kokybei.

Antrinis klaidų taisymas (FEC), MER.

FEC (angl. *Forward Error Correction*) yra duomenų perdavime naudojama technologija, skirta klaidų kontrolei ir taisymui tam tikrame triukšmingame ryšio kanale (šiuo atveju DVB-T SFN tinkle)[11]. Pagrindinis tokio klaidų taisymo principas pagrįstas tuo, kad į siunčiamą signalą pridedama papildoma informacija (kontroliniai bitai). Ši papildoma informacija leidžia aptikti ir ištaisyti tam tikras klaidas, kai jos neviršija nustatytos normos. FEC dažnai naudojamas ryšio kanaluose, kuriuose atgalinis ryšys yra sudėtingas arba išvis neįmanomas. Viena iš tokių situacijų tai informacijos siuntimas keliems imtuvams vienu metu. Daugelis FEC koderių gali taip pat generuoti BER, kuris nusako ryšio kanale priimamų klaidų skaičių (transliavimo patikimumą). Maksimalus klaidų skaičius, kurį gali ištaisyti FEC, priklauso nuo pasirinkto tinklo kodavimo režimo.

Teoriškai FEC galima aiškinti kaip signalą, kuris yra siunčiamas 3 kartus. Jeigu visus tris kartus yra gaunamas lygiai toks pats signalas, tada yra teigiama, jog yra gauta teisinga informacija. Pvz.: Jeigu gauname tris kartus 0, tai laikome, jog informacija yra teisinga ir turėjome gauti 0, o jeigu du kartus gauname 0, o vieną kartą gauname 1, tada teigiame, jog kažkuris iš signalų atėjo su klaida ir galutinis signalas yra interpretuojamas kaip 0 (kadangi likę du signalai atėjo su 0).

Realiu atveju FEC priklauso nuo kodavimo režimo ir signalas nėra siunčiamas tris kartus, tiesiog yra siunčiama papildoma informacija tam signalui patikrinti ir atkurti. Yra 5 pagrindiniai FEC kodavimo režimai : $\frac{1}{2}$; $\frac{2}{3}$; $\frac{3}{4}$; $\frac{5}{6}$; $\frac{7}{8}$ [12]. Priklausomai nuo pasirinktos QAM moduliacijos, apsaugos intervalo, bei kodavimo režimo, galima pasiekti vienokį arba kitokį duomenų perdavimo greitį (**2 lentelė**). Svarbu paminėti, kad kiekvienas kodavimo režimas parodo, kiek signalo siunčiamos informacijos užima klaidoms atitaisyti skirta informacija. Pvz.: $\frac{1}{2}$ Kodavimo režimo atveju pusę signalo užima papildomi klaidų taisymo bitai. Jeigu turime minimalų apsaugos intervalą bei minimalų FEC kodavimo režimą, galime pasiekti geriausią signalo perdavimo spartą, tačiau tokiu atveju mūsų tinklas automatiškai tampa mažiausiai atsparus klaidoms. Kodavimo režimas ir apsaugos intervalas yra pasirenkami atsižvelgiant į ryšio kanale galimų trukdžių dydį.

Mano pasirinktas LRTC SFN tinklas naudoja QAM 64 moduliaciją (dėl to ir yra įkelta būtent ši lentelė), $\frac{1}{4}$ apsaugos intervalą, bei $\frac{2}{3}$ FEC kodavimo režimą. Vadinasi šis tinklas yra labai gerai apsaugotas nuo simbolių interferencijos, bei labai gerai apsaugotas nuo klaidų tinkle, tačiau yra prarandama didelė dalis greitaveikos.

2 lentelė. QAM 64 moduliacijos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo apsaugos intervalo bei FEC kodavimo režimo.

Galimi bitai/s DVB-T sistemai 8 MHz kanale.					
Modulation	Coding rate	Guard interval			
		1/4	1/8	1/16	1/32
QAM 64	1/2	14,929	16,588	17,564	18,096
	2/3	19,906	22,118	23,419	24,128
	3/4	22,394	24,882	26,346	27,144
	5/6	24,882	27,647	29,273	30,16
	7/8	26,126	29,029	30,737	31,668

MER

MER (angl. *Modulation error ratio*) tai dydis nusakantis skaitmeninio televizijos signalo (DVB-T) patikimumą. Idealaus siųstuvo išsiųstas signalas turėtų visus QAM moduliacijos žvaigždyno taškus vienoje vietoje (t.y. jie visiškai nebūtų išsibarstę QAM žvaigždyne). Realiau atveju to pasiekti yra praktiškai neįmanoma dėl kanalo triukšmų, iškraipymų ir t.t. MER formulė :

$$MER(dB) = 10\log_{10}\left(\frac{P_{signal}}{P_{error}}\right)$$

Šioje formulėje P_{error} yra „klaidos vektoriaus“ galia, o P_{signal} viso signalo galia. Klaidos vektorius tai linija, esanti tarp idealaus žvaigždyno taško bei realaus žvaigždyno taško. Šios linijos ilgis ir yra jos dydis. Pagal formulę galime pastebėti, kad kuo mažesnė „klaidos vektoriaus“ galia (perduodamo signalo žvaigždyno taškas (bitas) yra arti idealaus žvaigždyno taško), tuo didesnę MER gausime, o tai reišk, kad realus ir idealus žvaigždyno taškai (bitai) yra toje pačioje vietoje.

Kai kuriais atvejais MER yra išreiškiamas procentais :

$$MER(\%) = \sqrt{\frac{P_{error}}{P_{signal}}} \times 100\%$$

Ši formulė yra naudinga, norint procentais nusakyti perduodamo SFN signalo patikimumą. MER signalo galia yra apskaičiuojama pagal vidutinę signalo galią. Svarbu paminėti, kad MER

apibūdina pagrindinius SFN tinkle kylančius signalo trukdžius, tokius kaip amplitudės disbalansas, kvadratinės amplitudės moduliacijos klaidos, signalo iškraipymas. Todėl galima teigti, jog MER yra vienas iš pagrindinių dydžių, nusakančių siųstuvo išsiunčiamo signalo kokybę bei ryšio kanale patiriamų klaidų skaičių.

DVB-T SFN tinklo sinchronizacija

Kaip jau buvo minėta anksčiau, DVB-T SFN tinklui yra labai svarbu, kad visi siųstuvai signalą siųstų tiksliai tuo pačiu metu, o tai reiškia, jog visi siųstuvai turi būti sinchronizuoti. Ši sinchronizacija yra pasiekama į TS srautą įterpiant MIP paketus su sinchronizacijai reikalinga informacija, paremta GPS nuoroda (tinklo vėlinimas, apsaugos intervalas, kodavimo režimas ir t.t.). Žinoma GPS nėra naudojamas vietos nustatymo tikslais, bet tam, kad tiek siųstuvas tiek ir SFN adapteris gautų tą pačią informaciją tuo pačiu laiku. Ši GPS nuoroda kontroliuoja specialaus MIP paketo įterpimo laiką į TS srautą ir yra lygi 1pps(1 pulsas per sekundę).

Norint, kad visi siųstuvai išsiųstų signalą lygiai tuo pačiu metu, į MIP paketą yra įterpiamas maksimalus tinklo vėlinimo laikas (angl. *Maximum network delay*). Tai reiškia, jog yra nustatomas tam tikras laikas, per kurį iš SFN adapterio siunčiama informacija turi pasiekti visus SFN tinklo siųstuvus. Šis dydis yra visada kruopščiai išmatuojamas ir yra pastovus. Mano tirtame SFN tinkle maksimalus tinklo vėlinimo laikas yra nustatytas 0,7s. Šis dydis yra naudojamas kaip tam tikra atskaitos sistema, kad visi siųstuvai žinotų, kuriuo laiko momentu reikia išsiųsti signalą.

Žinoma, atstumai tarp siųstuvų skiriasi, todėl visada bus atvejų, kada vieną siųstuvą signalas iš SFN adapterio pasieks daug greičiau, negu kitą, tačiau maksimalus vėlinimo laikas nesikeis. Net jeigu vieną siųstuvą signalas pasieks greičiau negu kitą, jis vis tiek lauks, kol šis signalas apeis visus SFN tinkle esančius siųstuvus (žr. **7 pav.**). Jeigu atsitinka taip, kad kažkurį SFN tinkle esantį siųstuvą signalas pasiekia vėliau, negu per 0,7s, šis siųstuvas yra automatiškai išjungiamas, kad neatsirastų trukdžių kitiems šiame tinkle esantiems siųstuvams.



7 pav. SFN tinklo vėlinimas.

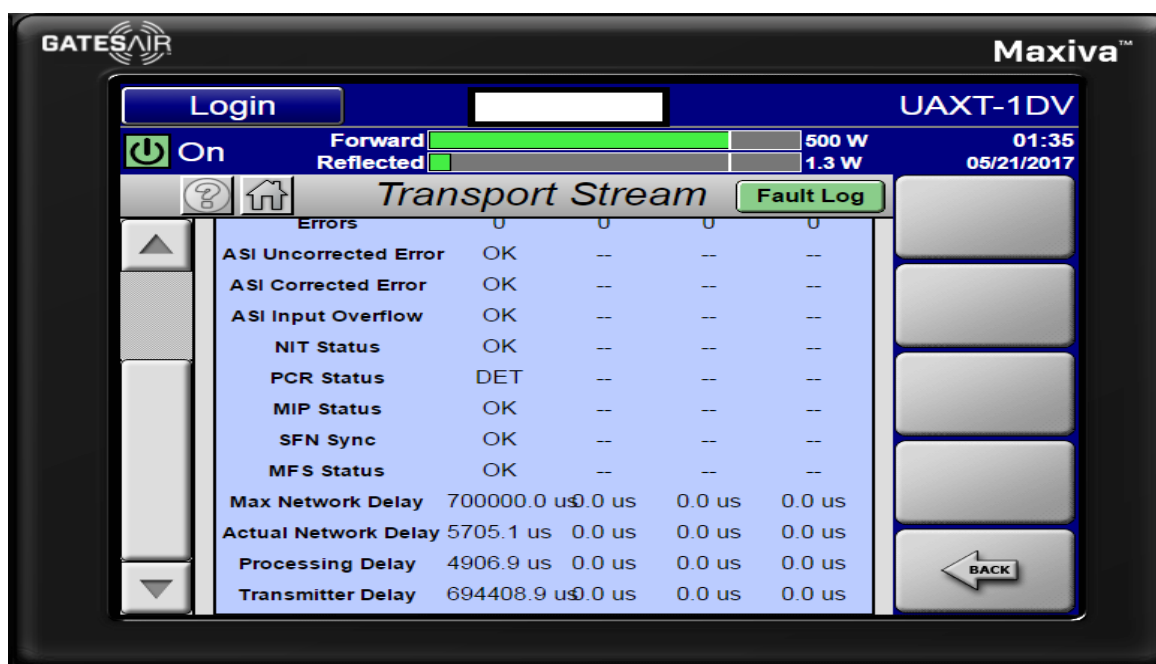
Šis paveikslėlis (8 pav.) pagrindžia SFN tinklo sinchronizacijos teoriją. Turime 3 skirtingus siųstuvus, pažymėtus skirtingomis spalvomis (violetinė, raudona, geltona). Šiuos siųstuvus signalas pasiekia skirtingu laiku, tačiau visi šie trys siųstuvai laukia, kol praeis maksimalus vėlinimo laikas ir tik tada išsiunčia signalą. Taip yra išpildoma viena iš pagrindinių DVB-T SFN tinklo sąlygų, jog visi siųstuvai signalą turi išsiųsti lygiai tuo pačiu metu.

Tyrimo metodika

Bakalaurinio darbo praktika buvo atliekama LRTC (Lietuvos radijo ir televizijos centre) įmonėje ir buvo stengiamasi optimizuoti kursinio darbo metu ištirto DVB-T SFN tinklo segmento darbą. Svarbiausias tokio tinklo reikalavimas, tai jog visi šiame tinkle esantys siųstuvai būtų griežtai sinchronizuoti ir, nepriklausomai nuo siųstuvo vietovės, signalą išsiųstų lygiai tuo pačiu metu. Tai yra pasiekama, į perduodamą signalą įterpiančiais pagalbinius MIP paketus, kuriuose yra pridėjama siųstuvų sinchronizacijai reikalinga informacija (vėlinimo laikas, apsaugos intervalas, kodavimo režimas). Mano tirtas tinklo segmentas naudoja COFDM moduliaciją, kuri susideda iš QAM 64 ir FDM moduliacijų bei FEC kodavimo. Šios moduliacijos principas yra aptartas teorinėje dalyje.

DVB-T SFN tinklas yra stebimas specialia monitoringo programa vadinama „CACTI“. Joje yra suvesti visos Lietuvos SFN tinklo siųstuvų duomenys, kurie yra atnaujinami realiu laiku. Naudojantis šia programa, bei naudojamų „Gates Air“ siųstuvų valdymo programa, buvo stebimas skirtingų tinklo segmento siųstuvų darbas, tikrinami siųstuvų gaunami sinchronizacijos parametrai, bei stebima signalo kokybė (žr. 8 pav.) (ar nėra atspindžio, bei ar siųstuvai nepameta GPS signalo). Svarbu paminėti, kad tam tikram siųstuvui pametus GPS signalo nuorodą, gali kilti nesklandumų išsiunčiant

signalą, kadangi gali sutrikti sinchronizacija su kitais SFN tinklo siųstuvais. Naudojantis šia programa eksperimentiškai buvo patikrinta teorinėje dalyje išdėstyto vėlinimo laiko teorija. Pasirinkus kelis tiriamo tinklo segmente esančius SFN tinklo siųstuvus ir prie jų prisijungus, buvo stebimas realus vėlinimo laikas, bei patikrintas maksimalus visiems LRTC SFN tinklo siųstuvams nustatytas vėlinimo laikas. Pastebėta, jog LRTC tinklui maksimalus vėlinimo laikas yra nustatomas 0,7s. Tai reiškia, jog griežtai per tiek laiko signalas turi būti pasiekęs visus Lietuvos teritorijoje esančius siųstuvus. Kaip pavyzdį galima paminėti „Miesto1“ esančio siųstuvo vėlinimo laiką. Nors signalas „Miesto1“ siųstuvą pasiekia per 0,56 s (šis laikas skirtingų miestų siųstuvams yra skirtingas ir priklauso nuo atstumo, kurį turi nukeliauti signalas), tačiau, atsižvelgiant į visiems siųstuvams nustatytą 0,7 s vėlinimo laiką, šis siųstuvas 0,14 s laukia, kad galėtų kartu su kitais SFN tinklo siųstuvais išsiųsti signalą.



8 pav. SFN tinklo siųstuvo stebėjimo langas (maksimalus vėlinimo laikas).

Naudojantis „Gates Air“ siųstuvų stebėjimo sistema, buvo nustatyta, kad mano tirtame tinkle yra nustatytas $\frac{1}{4}$ apsaugos intervalas bei $\frac{2}{3}$ kodavimo režimas. Kaip jau buvo minėta anksčiau, (teorinėje dalyje, 2 lentelė) pasirinkus tokius SFN tinklo parametrus, yra prarandama signalo greitaveikos, tačiau tinklas yra labiau apsaugomas nuo išorinių poveikių bei klaidų. Esant idealiam perdavimo kanalui (be trukdžių) būtų galima pasirinkti mažiausią kodavimo režimą bei apsaugos

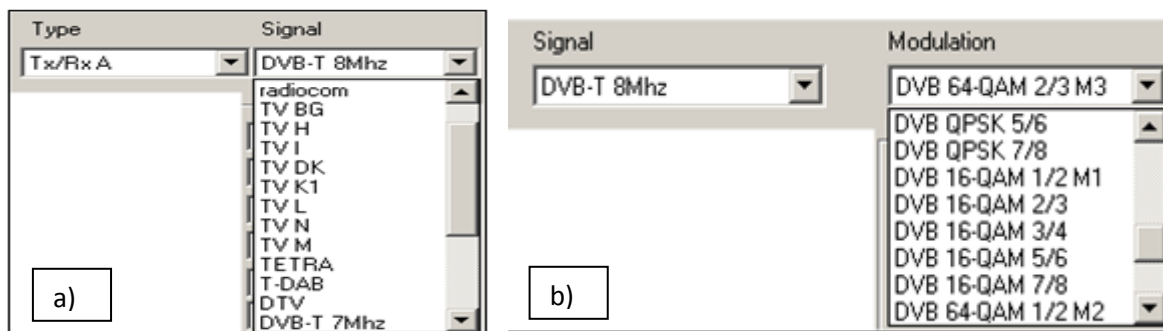
intervalą. Priklausomai nuo signalo greitaveikos galima išsiųsti didesnį arba mažesnį skaičių skaitmeninės televizijos programų (informacijos). Žinoma, naudojantis šia programa, buvo galima ištirti tik signalą, pasiekiantį atitinkamus Lietuvos siųstuvus.

Nors SFN tinklas ir yra apsaugomas nuo kelių siųstuvų tarpimbolinės interferencijos (trukdžių), pridant apsaugos intervalą, tačiau realiu atveju šis pašalinis triukšmas vis tiek pasireiškia turimame tinklo segmente. Norint sumažinti atsirandančią interferenciją tam tikriems siųstuvams yra pridamas papildomas signalo vėlinimas, taip tam tikroje vietovėje gali būti pagerinama priimamo signalo kokybė. Tačiau svarbu paminėti, kad siųstuvų signalą siunčia į visas puses, vadinasi pridėjus papildomą signalo vėlinimą ir pagerinus vienoje vietovėje transliavimo kokybę, kitoje vietovėje ši kokybė gali pablogėti. Kadangi mano tirtas tinklo segmentas yra komercinės paskirties, todėl signalo vėlinimas laisvai keičiamas negali būti, nes būtų sukelti trukdžiai daugybei klientų. Norint apskaičiuoti šios tarpimbolinės interferencijos poveikį tinklui, bei norint tą tinklą optimizuoti yra pasitelkiamos teorinės bei praktinės matavimo priemonės.

Teorinis modeliavimas ICS Telecom paketo priemonėmis

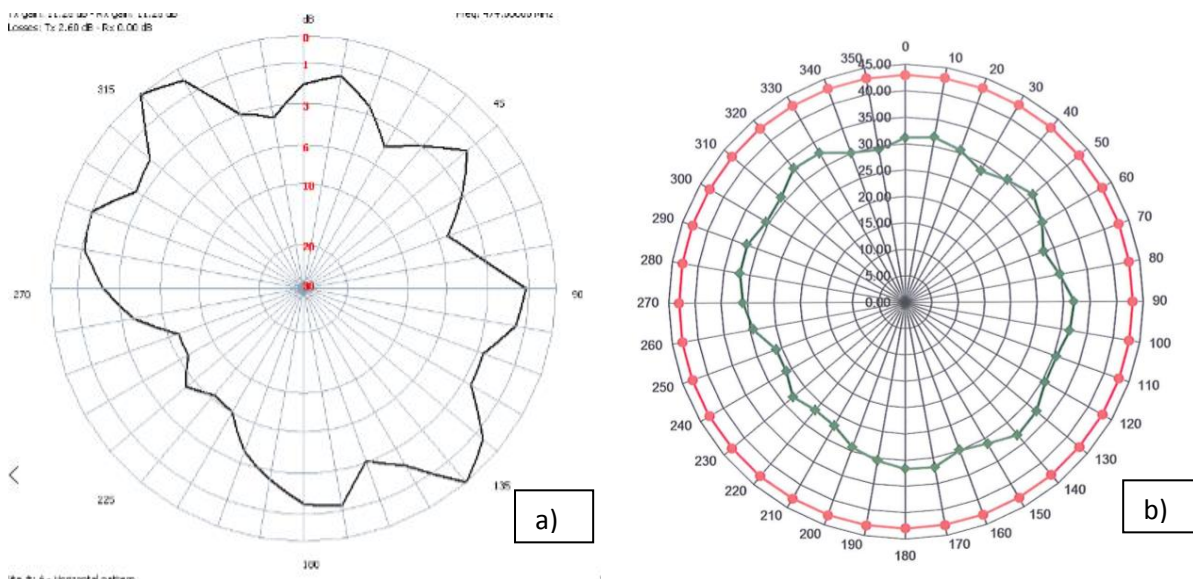
Teorinė tyrimo dalis yra atliekama pasitelkiant „ICS Telecom“ programą, kurią naudoja daugelis telekomunikacinių įmonių. ICS Telecom tai radijo planavimo ir techninio spektro analizavimo programinė įranga, kuri leidžia apskaičiuoti įvairių technologijų siųstuvų signalo lygių padengimus, greitaveikos padengimus ir mano tyrimo atveju - tarpimbolinės interferencijos padengimą SFN tinkle. Atsižvelgiant į turimą ryšio kanalą, yra sudaroma tam tikra duomenų bazė, kurioje yra įskaičiuojami daugelis ryšio kanale kylančių trukdžių (reljefas, pastatai ir netgi oro drėgmė). Savaimė suprantama, kad kiekviena įmonė, skaičiuodama tam tikrą padengimą, galėtų pasirinkti savo norimus trukdžių parametrus, taip gaudama vienokį arba kitokį padengimą, tačiau yra parenkamos specifinės parametrų vertės, suderintos su RRT. Taip parinkus vienodus trukdžių parametrus, abi įmonės, skaičiuodamos tam tikro tinklo padengimą, gaus vienodus rezultatus.

Darbas su šia programa pradedamas nuo tiriamo tinklo pasirinkimo, bei siųstuvų parametrų įvedimo. Kadangi mano tirtame LRTC DVB-T SFN tinkle yra naudojamas 8 MHz kanalo juostos plotis (**9 pav. a**), QAM 64 moduliacija, bei 2/3 kodavimo režimas (**9 pav. b**), todėl būtent šie parametrai ir yra parenkami[13].



9 pav. ICS Telecom parametrai a) kanalo juostos plotis b) moduliacija bei kodavimo režimas.

Tada priklausomai nuo tinklo taip pat yra parenkamas nešlio signalo režimas, mano tirto tinklo atveju lygus 8K (nešlio signalų skaičius 6817), bei nustatomas antenos dažnis (474 MHz) ir antenos kryptingumo diagrama (**10 pav.** ji turi būti nubraižoma pagal sumontuotą anteną ir turi atitikti antenos projekto teorinę kryptingumo diagramą) .

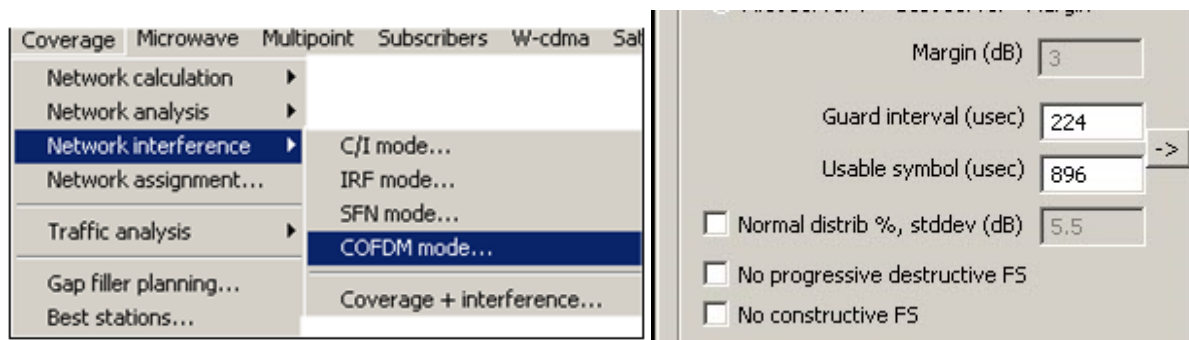


10 pav. Antenos kryptingumo diagrama a)ICS Telecom programoje b)teorinė projekto diagrama.

Svarbu paminėti, kad yra daugybė kitų parametų, kurie yra nepaminti, tačiau kuriuos yra būtina nustatyti antenai prieš pradedant tirti tarpsibolinę interferenciją (antenos iškėlimo aukštis, tinklo segmente turimų siųstuvų galia ir t.t.). Prieš skaičiuojant tarpsimbolinius trukdžius

(interferenciją) reikia leisti programai paskaičiuoti tinklo segmento padengimą, neįvertinant tarp siųstuvų atsirandančios interferencijos (vieno siųstuvo padengimo skaičiavimas trunka apie 3h). Gavus siųstuvų padengimą galima pradėti skaičiuoti tarpsimbolinę interferenciją.

Kaip jau buvo minėta anksčiau apsaugos intervalas apsaugo siunčiamą signalą nuo kelių siųstuvų signalo persiklojimo (interferencijos) ir dažnais atvejais šis apsaugos intervalas yra pakankamas, norint perduoti kokybišką signalą, tačiau pasitaiko atvejų, kai šio apsaugos intervalo neužtenka ir norint pagerinti ryšio kokybę yra priskiriami papildomi signalo vėlinimo laikai vienam arba kitam siųstuvui. Kadangi mano tirtas DVB-T SFN tinklas yra komercinės paskirties, todėl šis vėlinimas siųstuvams negali būti laisvai pridodamas ir yra naudinga iš pradžių susidaryti tam tikrą teorinį modelį, kaip visi tinkle esantys siųstuvai interferuoja vienas su kitu. Tai yra pasiekama, pasitelkus vieną iš ICS Telecom programos funkcijų, „Tinklo interferencijos skaičiavimą COFDM režime“ (**11 pav.**).

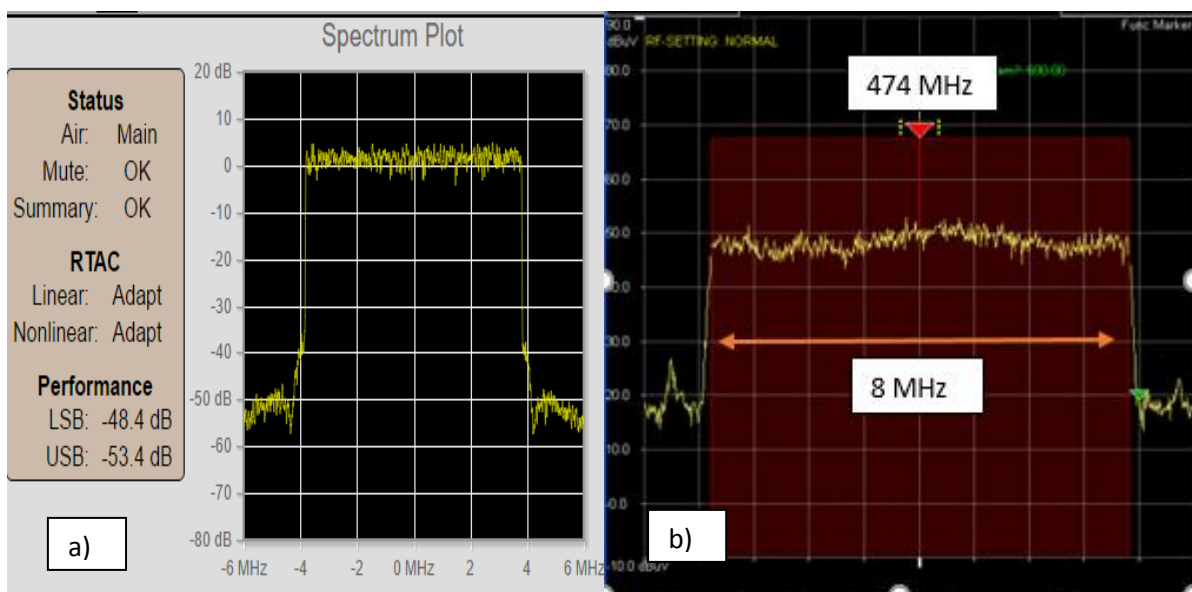


11 pav. ICS Telecom interferencijos matavimų parinkimas.

Kaip galime matyti iš šio paveikslėlio, parinkus reikalingą funkciją, reikia būtinai įvesti ir tinkle naudojamą apsaugos intervalą bei naudojamo simbolio trukmę. Buvo pasirinktas $\frac{1}{4}$ apsaugos intervalas, kadangi jis yra naudojamas mano tirtame tinklo segmente. Jeigu turime 2K nešlių skaičiaus režimą, tada siunčiamo tam tikro simbolio trukmė atitiks 224 μ s, tai reiškia, jog parinkus $\frac{1}{4}$ apsaugos intervalą, šio intervalo trukmė bus lygi 56 μ s. Analogiškai ir turint 8K nešlių skaičiaus režimą, šiuo atveju simbolio trukmė atitiks 896 μ s, o tai reiškia, jog apsaugos intervalas bus lygus 224 μ s. Suvedus visus reikalingus parametrus yra gaunami atitinkami tarpsimbolinės interferencijos grafikai.

Praktinė tyrimo metodika (KATHREIN MSK 200)

Praktinė tyrimo dalis atliekama specialiu prietaisu „KATHREIN MSK 200“. Pasirinktoje Lietuvos vietovėje, kurioje reikia patikrinti signalo patikimumą, yra iškeliamą 10 m. aukščio antena ir šiuo prietaisu yra išmatuojama priimamo signalo QAM 64 moduliacija bei signalo juostos pločio spektras. Pasirinkus ir prietaise nustačius tiriamo kanalo dažnį, gaunamas tam tikras signalo juostos pločio spektras su nešlio signalais jame [14] (**12 pav.**).

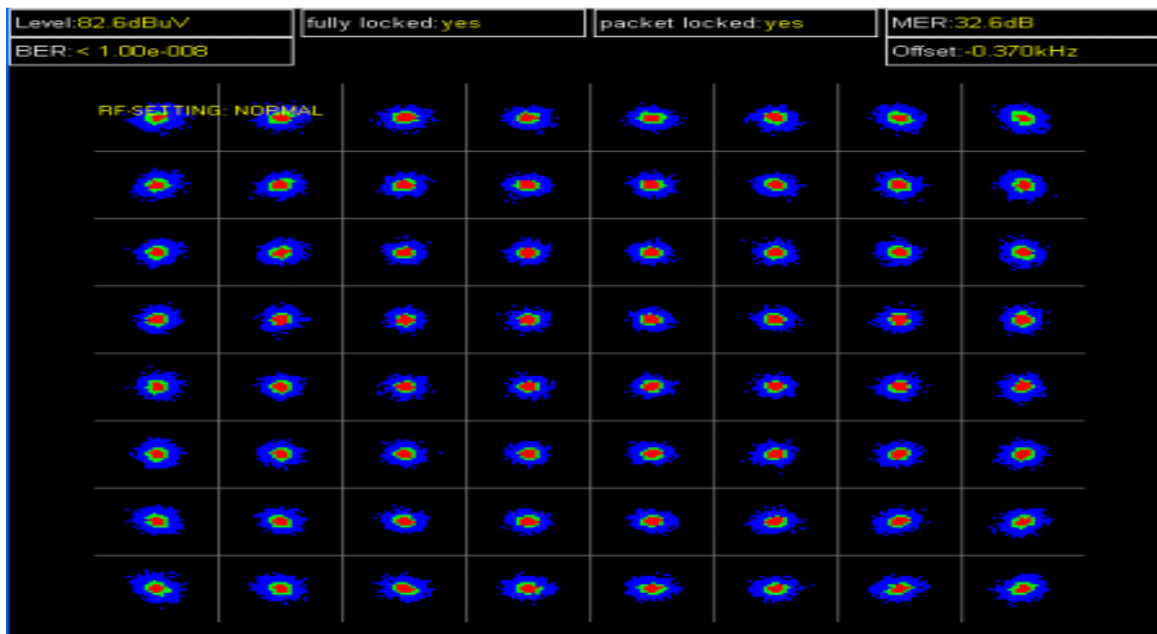


12 pav. Kanalo juostos pločio spektras a) siųstuvo siunčiamo signalo b) KATHREIN MSK 200 prietaiso priimamo signalo.

Iš 12 paveikslėlio galime matyti, kad „KATHREIN MSK 200“ prietaise yra parinktas 474 MHz centrinis dažnis su 8 MHz juostos pločio kanalu. Šiame juostos pločio kanale yra pasiskirstę teorinėje dalyje aptarti 6817 nešliai, kurie perneša atitinkamą informaciją. Iš 12 paveikslėlio a) ir b) dalių galime matyti, jog siunčiamo ir priimamo signalo spektras išlieka toks pats.

Priklausomai nuo signalo kokybės QAM 64, moduliacijos taškiukai (bitai) žvaigždyne bus vienoje arba kitoje vietoje. Šį QAM moduliacijos taškų pasiskirstymą apibūdina teorinėje dalyje jau aptartas MER dydis (**13 pav.**). Paveikslėlyje galima pastebėti, jog QAM žvaigždyno taškiukai nėra pasiskirstę tolygiai. Vietoje kur dominuoja raudona spalva taškiukų patenka daugiau, o vietoje kurioje

dominuoja mėlyna spalva taškiukų patenka mažiau. Kuo mėlyni taškiukai yra labiau išsibarstę, tuo egzistuoja didesnė tikimybė, kad atitinkamas taškiukas (bitas) nukryps nuo idealios jam vietos ir bus priskiriamas prie kito bito vietos.



13 pav. KATHREIN MSK 200 QAM 64 žvaigždynas.

Taip pat šiuo prietaisu papildomai yra išmatuojamas klaidų skaičius prieš klaidų taisymo kodą bei po jo (BER prieš FEC, BER po FEC). Matuojant signalą prieš FEC yra imamas signalo juostos spektras prieš klaidų taisymą ir, neatsižvelgiant į kontrolinius bitus, išmatuojamas signalas, priimamas su klaidomis. Matuojant signalą po FEC, yra imamos signalo juostos spektro vietos, kuriose signalas priimtas su klaida ir matuojama signalo kokybė po kontrolinių bitų pritaikymo. Kuo galingesnis siųstuvas, tuo didesnė tikimybė, kad signalas galės nukeliauti didesnį atstumą, tačiau tai taip pat reiškia, kad šis siųstuvas interferuos su didesne dalimi tinklo, taip sukeldamas papildomą tarpsimbolinę interferenciją.

Atliekant šį eksperimentą buvo tirtas tinklo segmentas, susidedantis iš 7 skirtingos galios siųstuvų, transliuojančių vienu ir tuo pačiu 474 MHz dažniu :

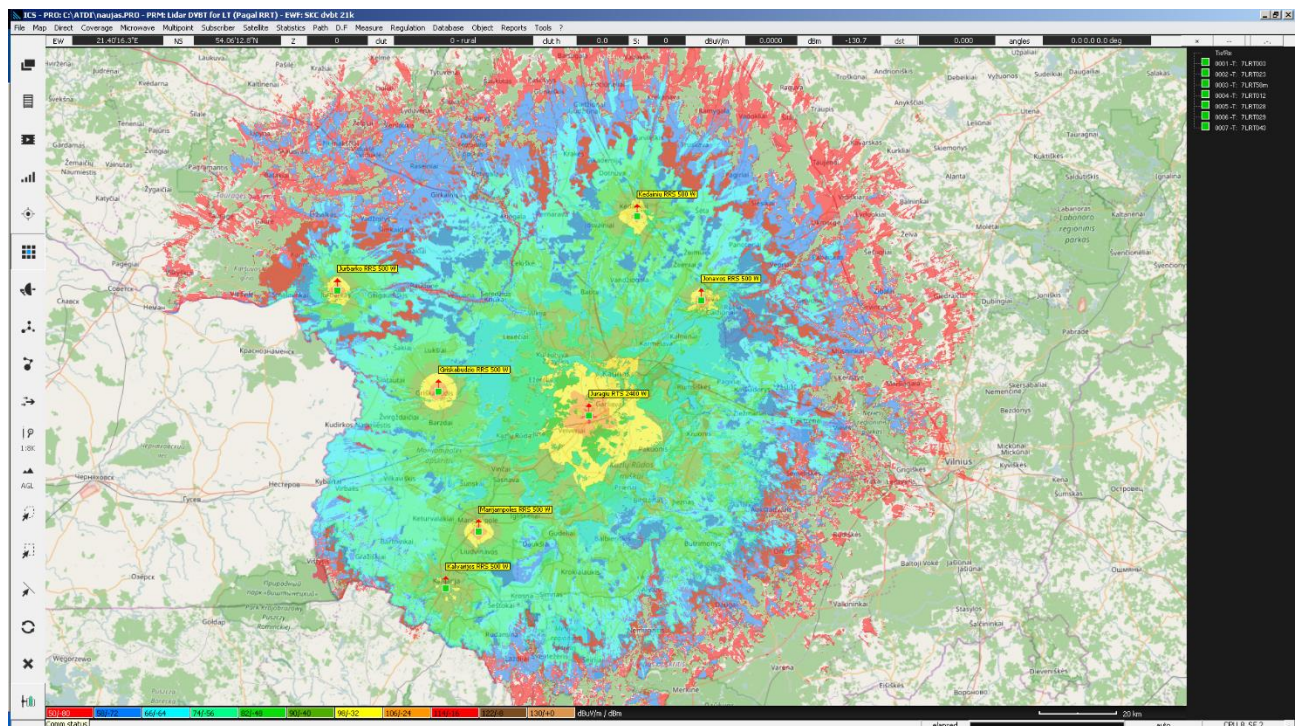
- a) Kalvarijos RRS (500 W)
- b) Marijampolės RRS (500 W)

- c) Juragių RTS (2400 W)
- d) Griškabūdžio RRS (500 W)
- e) Jonavos RRS (500 W)
- f) Kėdainių RRS (500 W)
- g) Jurbarko RRS (500 W)

Priklausomai nuo gautų ICS Telecom teorinių modelių, bei atliktų „KATHREIN MSK 200“, matavimų, galima nustatyti pasirinkto siųstuvo transliuojamo signalo patikimumą, bei kokybę, kuria signalas yra priimamas tam tikroje teritorijoje.

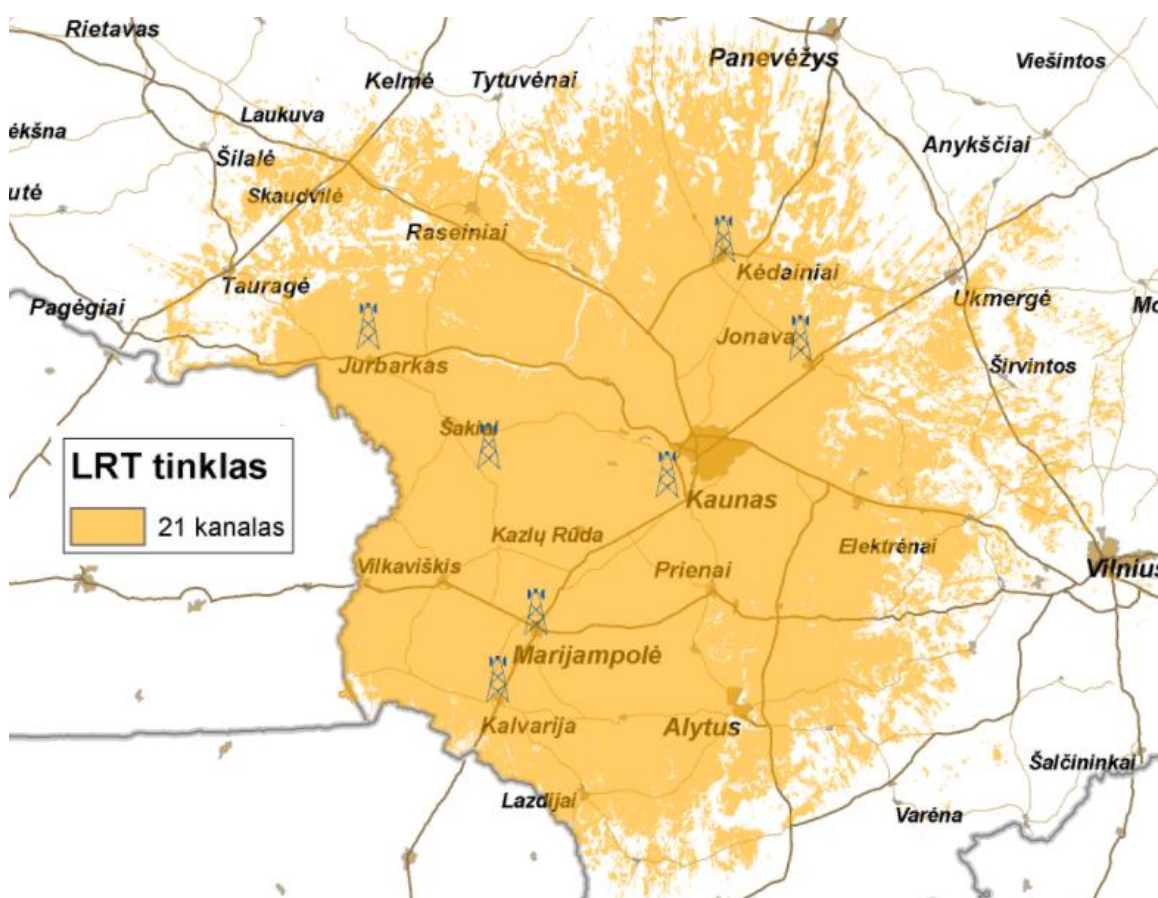
Tyrimo rezultatai ir jų aptarimas

Norint gauti tam tikrą siųstuvų padengimo bei interferencijos teorinį modelį, pirmiausia buvo atlikti matavimai su ICS Telecom programa.



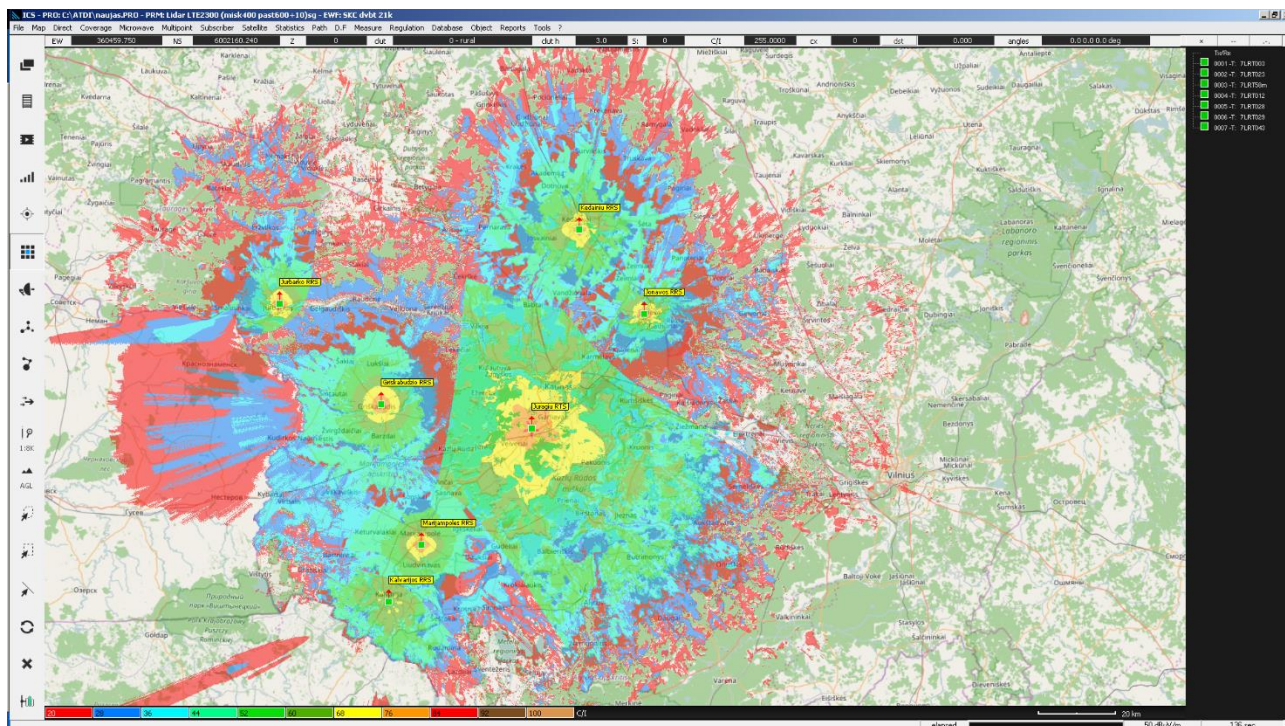
14 pav. ICS Telecom tinklo segmentų siųstuvo signalų lygio padengimas.

Šiame 14 paveikslėlyje yra parodytas 21 kanalo (474 MHz dažnio) padengimas, neatsižvelgiant į tarpimbolinę interferenciją. Kaip galime matyti vietovėse, kuriose dominuoja geltona, žalia arba žydra spalva priimamas signalas yra daugiau negu minimalus leistinas signalo stiprumas, o vietovėse, kuriose dominuoja šviesiai raudona spalva, signalas atitinka tik minimalų leistiną signalo stiprumą, lygų apie 50 dBμV/m. Tai reiškia, jog vietovės, kurios pateks į šio žemėlapijo padengimą, turės bent jau minimalų leistiną signalo stiprumą. Palyginimui įdėtas RRT gautas 21 kanalo padengimas (15 pav.), kuris atitinka mano paskaičiuotą padengimą.



15 pav. RRT apskaičiuotas 21 kanalo padengimas.

Svarbu paminėti, kad signalo stiprumas ne visada užtikrina priimamo signalo kokybę. Norint ištirti pasirinkto tinklo segmento siųstuvų tarpusavio poveikį, buvo nubraižyti atitinkami interferencijos žemėlapiai, kurie su signalo stiprumu nieko bendra neturi.



16 pav. Pasirinkto tinklo segmento interferencijos žemėlapis su originaliais siųstuvuose nustatytais signalo vėlinimo laikais.

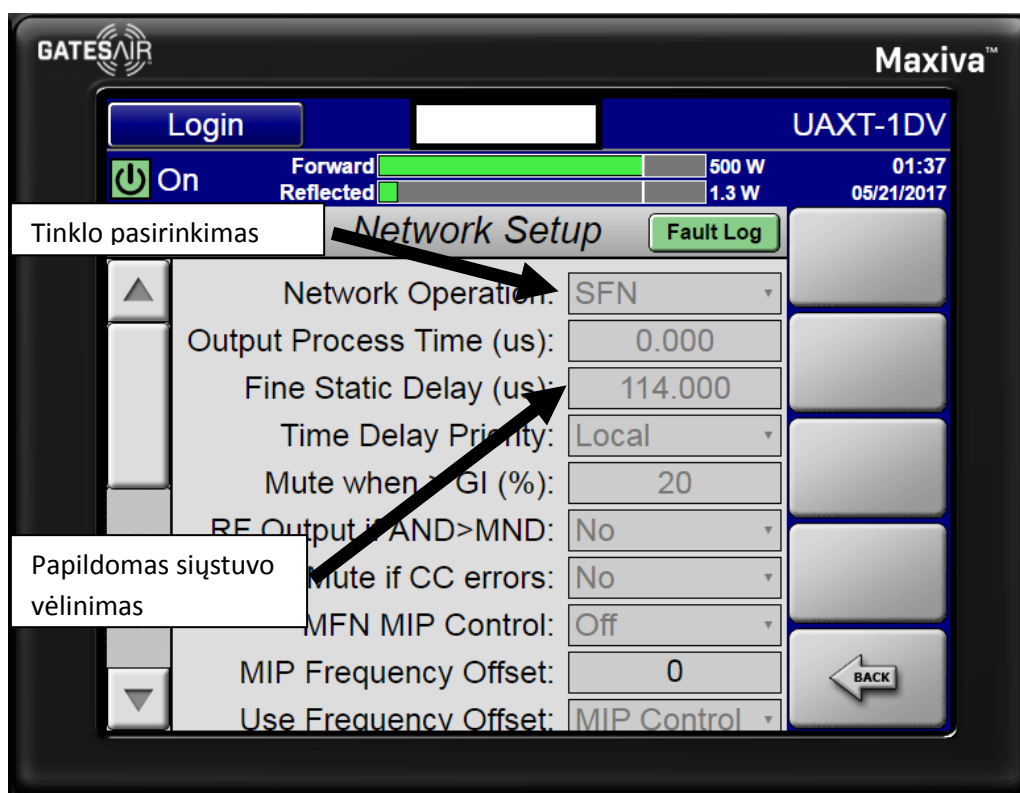
16 paveikslėlyje žemėlapis skalė parodo ne signalo stiprumą, o norimo ir interferuojančio signalo santykį (C/I , C -norimas signalas, I - interferuojantis signalas). Iš karto galima pastebėti, kad nors pagal **14 pav.** signalo stiprumas tam tikrose teritorijose ir atitinka minimalų signalo lygį, tačiau dėl tarpimbolinės interferencijos informacija negali būti kokybiškai priimama (t.y. atsiranda klaidos). Šią tarpimbolinę interferenciją galima sumažinti teorinėje dalyje aptartu papildomu siųstuvam pridedamu signalo vėlinimo laiku. Mano pasirinkto tinklo segmento siųstuvuose naudojami vėlinimo laikai :

- h) Kalvarijos RRS (73 μs)
- i) Marijampolės RRS (52 μs)
- j) Juragių RTS (14 μs)
- k) Griškabūdžio RRS (24 μs)
- l) Jonavos RRS (11 μs)

m) Kėdainių RRS (0 μ s)

n) Jurbarko RRS (114 μ s)

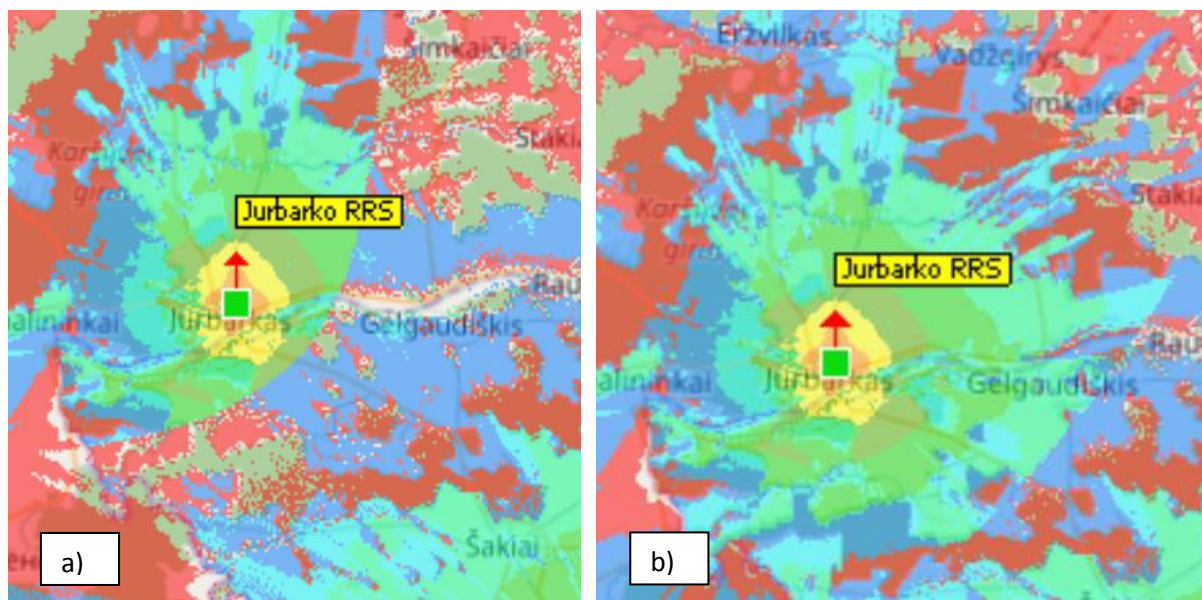
Kadangi iš visų siųstuvų signalas sklinda tokiu pačiu greičiu, tai reiškia, kad iki tam tikros vietovės iš vieno siųstuvų signalas atkeliaus daug greičiau, negu iš kitų. Kai signalas keliauja iš kelių siųstuvų į tą patį tašką, atsiranda tikimybė, kad vienas priimtas signalas atitiks vienokį taškiuką (bitą), o kitas, daug ilgiau keliavęs signalas, bus priimamas jau kaip kitas taškiukas (t.y. iš skirtingų siųstuvų atkeliavę signalai turės ne tą pačią informaciją, kadangi bus viršijamas apsaugos intervalas). Keičiant (didinant/mažinant) signalo vėlinimo laiką, galima „padėti“ signalui patekti į apsaugos intervalą, taip tam tikroje vietovėje sumažinti kelių siųstuvų interferenciją (**17 pav.**). Tačiau svarbu paminėti, kad taip keičiant signalo vėlinimo laikus atsiranda tikimybė, kad pagerinus vienoje vietoje priimamą signalą, kitoje vietoje šis signalas gali labai suprastėti.



17 pav. Siųstuvo nustatymai su pridėtu papildomu signalo vėlinimo laiku.

Bandymui buvo pasirinktas Jurbarko siųstuvas, kuriame pagal tiriamą tinklo segmentą jau yra nustatytas 114 μ s signalo vėlinimas. Mažinant signalo vėlinimo laiką šiame siųstuve, buvo pastebėta,

kad Gelgaudiškio miestelyje gerėja priimamo signalo kokybė. Galiausiai rastas optimalus signalo vėlinimas, kuriam esant visame Gelgaudiškio miestelyje pagerėja signalo kokybė (**17 pav.**).



18 pav. Interferencija esant skirtingam siųstuvų signalų vėlinimui a) 114 μ s b) 60 μ s.

Iš 17 paveikslėlio a) dalies galima matyti, kad Jurbarko siųstuve nustačius 114 μ s signalo vėlinimo laiką, Gelgaudiškio miestelyje dominuoja mėlyna spalva (vietose, kuriose jokia spalva nedominoja, priimamas signalas neatitinka minimalaus leistino signalo). Tuo tarpu pakeitus signalo vėlinimo laiką į 60 μ s, Gelgaudiškio miestelyje pradeda dominuoti žalia spalva (**17 pav. b)**), o tai reiškia jog pagerėjo priimamo signalo kokybė (t.y. perduodamame signale atsiras mažesnis klaidingų taškiukų/bitų skaičius). Svarbu paminėti, kad nors ir sumažėja klaidų skaičius šiame miestelyje, tačiau palikti pakeistą signalo vėlinimo laiką nėra tikslinga, kadangi, nors šiame miestelyje kokybė ir yra pagerinama, tačiau kitoje vietovėje taip keičiant signalo vėlinimo laiką kokybė gali būti labai pabloginama, todėl yra labai svarbu pasirinkti optimaliausią signalo vėlinimo laiką.

Norint patikrinti teorinio tyrimo rezultatus antra tyrimo dalis buvo atliekama su specialiu prietaisu „KATHREIN MSK 200“. Šis prietaisas leidžia pamatuoti priimamo signalo kokybę ir stiprumą tam tikroje vietovėje (mano tyrimo atveju – Gelgaudiškio miestelyje). Kadangi mano tirtas tinklo segmentas yra komercinės paskirties, todėl negalima laisvai keisti siųstuvo signalo vėlinimo laiko. Norint patikrinti teorinius eksperimento rezultatus, 2 min. buvo pakeistas Jurbarko siųstuvo signalo vėlinimo laikas į 60 μ s ir išmatuotas priimamas signalas. Praėjus 2 min. siųstuvo vėlinimas

buvo atstatytas į 114 μ s vėlinimą. Tokiu būdu žiūrovai beveik nepajuto sutrikimo, kadangi, kaip jau buvo minėta anksčiau, žemėlapyje esanti žydra spalva atitinka didesnę negu minimalią signalo kokybę, todėl palikti pakeistą vėlinimo laiką nėra tikslinga. Išmatavus šiame taške signalo bei klaidų lygius pastebėta, kad BER prieš FEC, esant mažesniai signalo vėlinimo laikui (60 μ s), yra mažesnis (**3 lentelė**) negu BER prieš FEC esant didesniai signalo vėlinimo laikui (114 μ s).

3 lentelė. Skirtingų signalo vėlinimo laikų matavimo rezultatai.

Matavimai	dB μ V/m	MER, dB	BER prieš FEC	BER po FEC
Prieš	74,6	32,2	5,21E-04	1E-10
Po	74,6	34,5	1,11E-04	1,2E-11
Priimamo patikimo signalo ribos	>50	>20	<2E-02	<2E-04

Iš 3 lentelės galima teigti, jog kuo didesnis MER, tuo didesnė tikimybė, jog visi QAM moduliacijos taškai žvaigždyne atsidurs tinkamose vietose. Keičiant signalo vėlinimo laiką galime sumažinti priimamų klaidingų bitų skaičių (BER prieš FEC, BER po FEC). Tai reiškia, kad vietovėse, kuriose dėl siųstuvų tarpimbolinės interferencijos atsiranda ypač didelis kiekis klaidų šis metodas padės pagerinti signalo kokybę. Nepriklausomai nuo tinklo segmente esančio siųstuvo SFN tinkle yra nustatomos patikimo signalo ribos atitinkamiems dydžiams :

- a) MER > 20 dB
- b) BER prieš FEC < 2×10^{-2}
- c) BER po FEC < 2×10^{-4}

Mano tirtu atveju BER prieš FEC neviršija nustatytos priimamo patikimo signalo ribos, todėl pritaikius klaidų taisymo technologiją (FEC) didelė dalis klaidų yra ištaisoma ir žiūrovai gali naudotis paslauga be trukdžių. Tačiau, jeigu tarpimbolinė interferencija, būtų daug didesnė ir BER prieš FEC

viršytų patikimo signalo ribas, tada būtų nebeįmanoma ištaisyti šių klaidų ir žiūrovas negalėtų žiūrėti skaitmeninės televizijos be klaidų (t.y. atsirastų vaizdo/garso iškraipymai, nutrūkimai).

Svarbu paminėti, kad, keičiant signalo vėlinimo laiką, priimamo signalo stiprumas nekinta, tai reiškia, kad nepriklausomai nuo to, kokio stiprumo signalas bus priimamas imtuve, jeigu leistinas klaidų skaičius viršys nustatytas ribas, skaitmeninės televizijos transliacija bus labai blogos kokybės. Galima teigti, jog norint pasiekti maksimalų tinklo segmento efektyvumą, yra labai svarbu atsižvelgti į tarp siųstuvų kylančią tarpsimbolinę interferenciją ir kiek galima ją sumažinti.

Išvados

1. Tarpsimbolinė interferencija (trukdžiai) atsiranda dėl skirtingo signalų atėjimo laikų iki numatytos vietovės.
2. Tinklo optimizavimo uždavinyje Gelgaudiškio miestelyje atsirandančius trapsimbolinius trukdžius (interferenciją) galima sumažinti, mažinant Jurbarko siųstuvo signalo vėlinimo laiką.
3. Signalų vėlinimo laiką sumažinus nuo 114 μs iki 60 μs , BER prieš FEC sumažėja nuo $5,21 \times 10^{-4}$ iki $1,11 \times 10^{-4}$.
4. Esant nekritiniam klaidų skaičiui ($\text{BER prieš FEC} < 2 \times 10^{-2}$) FEC sugeba ištaisyti šias klaidas ir priimamas signalas yra stebimas su minimaliais trukdžiais.

Literatūra

- [1] http://h30357.www3.hp.com/whitepapers/Single_frequency_network_overview_ENENSYS.pdf
- [2] ROLAND BEUTLER – Digital Terrestrial Broadcasting Networks, 2008 Springer Science + Business Media, 5 p.
- [3] E. P. J. TOZER – Broadcast Engineer's reference book , 2004 Elsevier Inc., 332 p.
- [4] http://www.radioeng.cz/fulltexts/2007/07_04_002_006.pdf
- [5] W. FISCHER – Digital Video and Audio Broadcasting Technology A Practical Engineering guide, Second edition, 2008 Springer, 376 p.
- [6] BORKO FURHT, SYED AHSON - Handbook of Mobile Broadcasting, 2008 Taylor and Francis Group, 11 p.
- [7] MARCELO S. ALENCAR – Digital Television Systems, 2009 Cambridge University Press, 173 p.
- [8] <http://sna.csie.ndhu.edu.tw/~cnyang/MCCDMA/tsld004.htm>
- [9] LARS-INGEMAR LUNDSTROM – Understanding Digital Television, 2006 Lars-Ingemar Lundstrom. Elsevier Inc., 147 p.
- [10] HERVE BENOIT – Digital Television Satellite, Cable, Terrestrial, IPTV, Mobile TV in the DVB Framework Third Edition, 2006 Dunod, Paris, 134 p.
- [11] <http://searchmobilecomputing.techtarget.com/definition/forward-error-correction>
- [12] <http://www.satsig.net/symbol01.htm>
- [13] ICS Telecom user guide, Network design and analysis for analog and digital broadcast, 5 p., 28 p.
- [14] Measurement Guide KATTTTHREIN MSK 200, Version 5, 37 p.
- [15] A. Juknevičius – Kursinis darbas „ DVB-T SFN signalo tyrimas“, 2017.

Vilnius University
Faculty of Physics

Aurimas Juknevičius

DVB-T SFN network optimization

The aim of this work is to investigate and to optimize the performance of DVB-T SFN network segment. In order to successful optimization of this network it's necessary to understand how this network works and how different transmitters are connected. The main property of DVB-T SFN network is that it can work with several different transmitters that are broadcasting signal at the same frequency. However, even with the resistance to interference that this network has, some of the singals are still interfering and it can deteriorate the work of this network. In order to reduce this interference theoretical and experimental measurements were made.

The theoretical part of this work were done with an ICS Telecom software. This special software helps to calculate the power that signal can be received at a specific area and the interference between different transmitters. After many theoretical simulation it was clarified that the interference that occurs at my chosen area (Gelgaudiškis village) can be reduced by alternating launch delay time at a specific transmitter (Jurbarkas). After reducing launch delay time in this particular transmitter from 114 μ s to 60 μ s, an improvement of the quality of the signal was noticed.

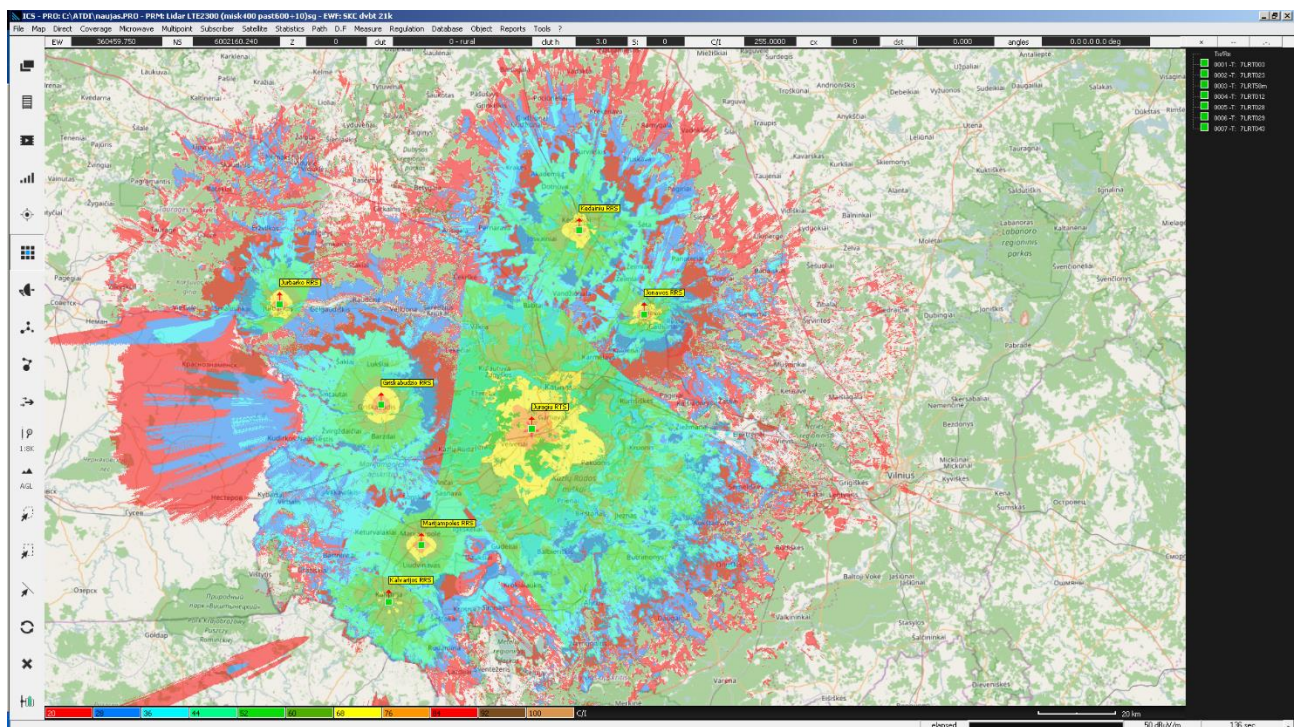
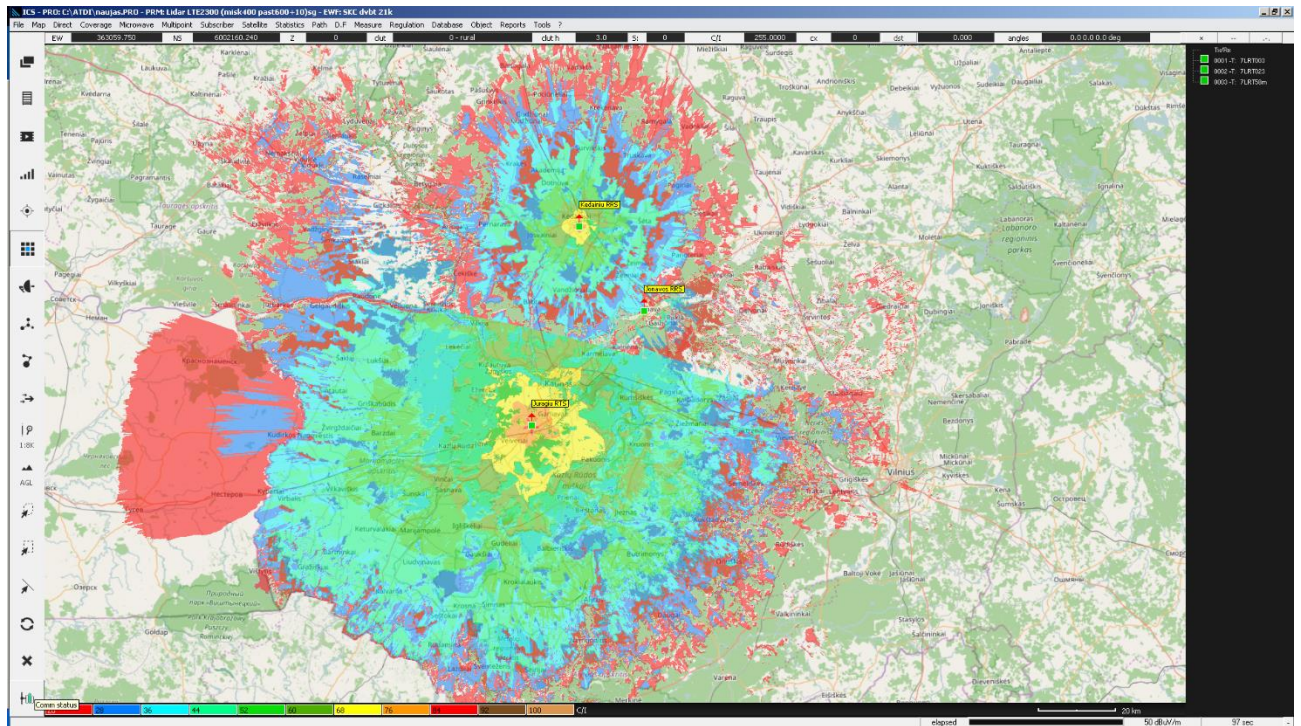
In order to fully understand this network and to confirm these theoretical simulations some experimental measurements had to be made. It was done with a signal meter „KATHREIN MSK 200“ at chosen location, in my case at Gelgaudiškis village. This special tool helps to measure bit error ratio (BER) before and after forward error correction (FEC). After conducting these experiments it was obvious that the quality of the signal was improved from 5,21E-04 (BER before FEC) to 1,11E-04 (BER before FEC).

Finally, conclusion can be made : it's possible to reduce the interference in a chosen area by alternating launch delay time on a different transmitters. However, it's necessary to mention that by improving the quality of signal in one location we can compromise the quality of signal in totally different location, because of that it's necessary to chose the optimum launch delay time.

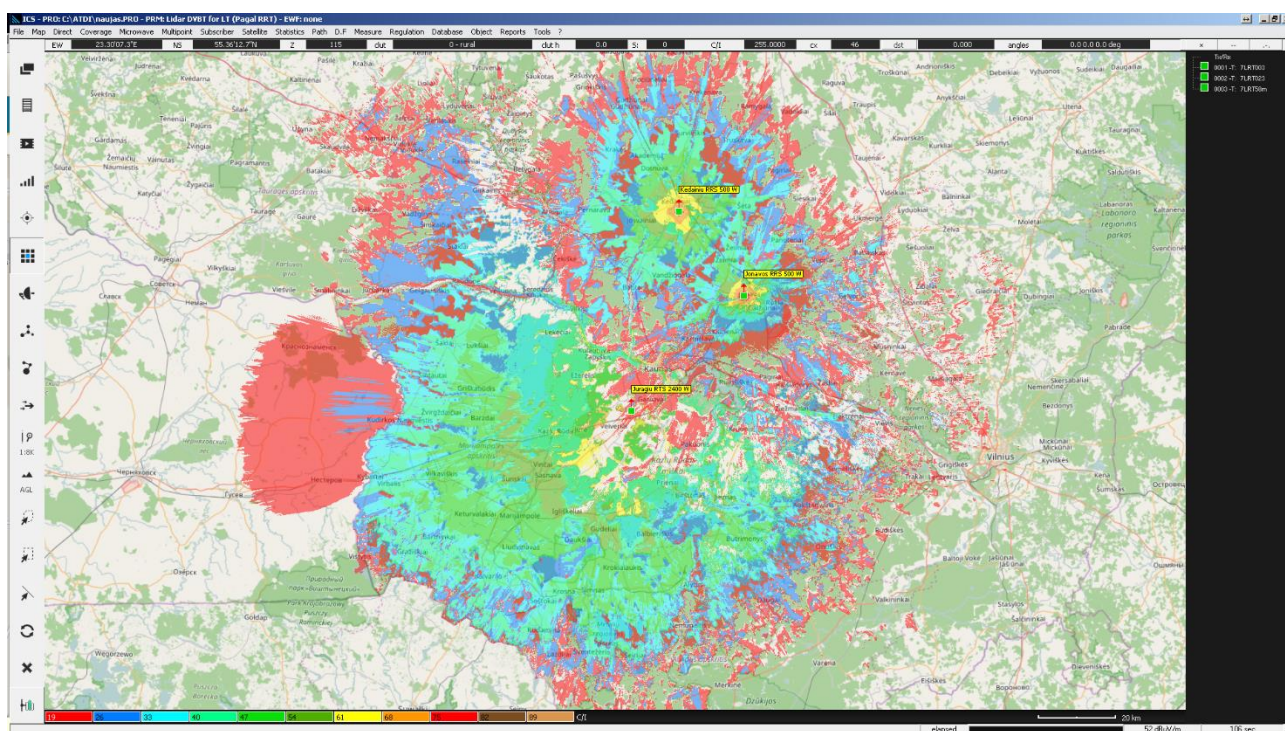
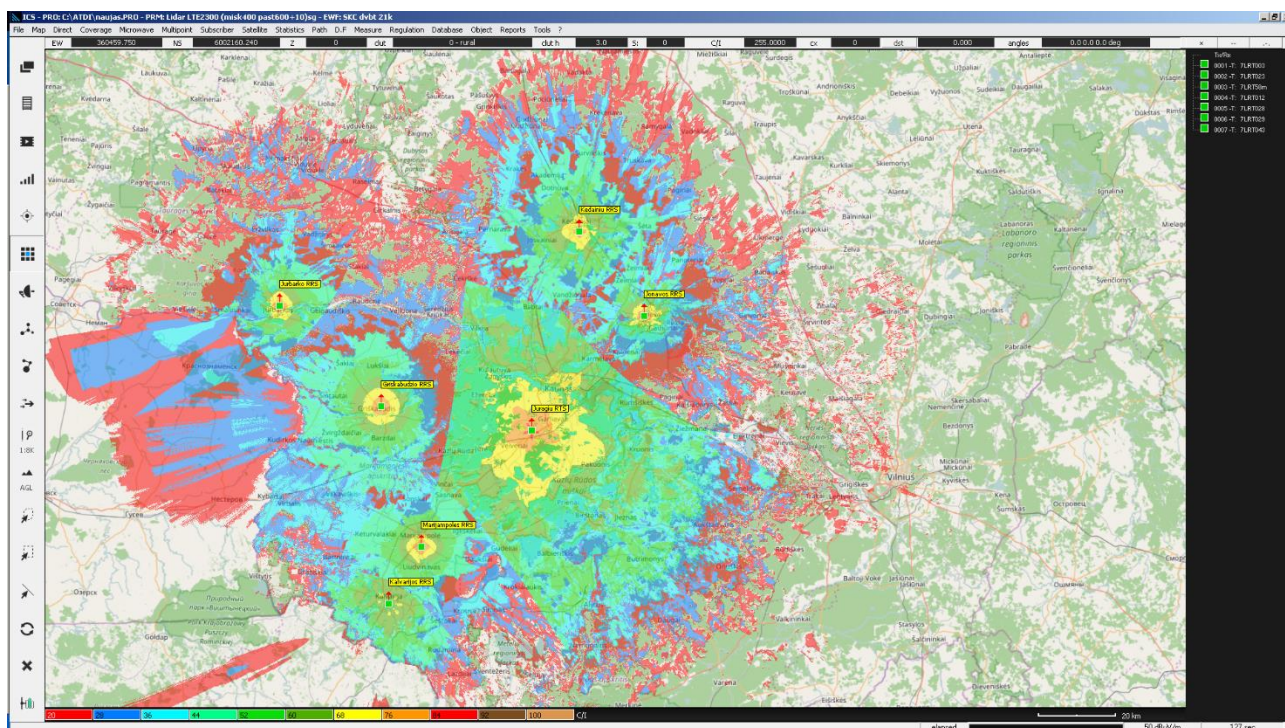
Priedai

1 priedas

ICS Telecom paketo papildomi tarpsimbolinės interferencijos grafikai, keičiant skirtingų siųstuvų signalo vėlinimo laikus.



1 priedas



1 priedas

