



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Povilas Ruočkus**

**INFORMACIJOS PERDAVIMAS ULTRAGARSINĖMIS  
BANGOMIS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Prof. dr. Liudas Mažeika

**KAUNAS, 2017**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**  
**TELEKOMUNIKACIJOS KATEDRA**

**INFORMACIJOS PERDAVIMAS ULTRAGARSINĖMIS**  
**BANGOMIS**

Baigiamasis magistro projektas  
Išmaniosios telekomunikacijų technologijos (kodas 621H64001)

**Vadovas**

Prof. dr. Liudas Mažeika

**Recenzentas**

Doc. dr. Paulius Tervydis

**Projektą atliko**

Povilas Ruočkus

**KAUNAS, 2017**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Povilas Ruočkus

(Studento vardas, pavardė)

Išmaniosios telekomunikacijų technologijos (kodas 621H64001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Informacijos perdavimas ultragarsinėmis bangomis“  
**AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA**

20 \_\_\_\_ m. \_\_\_\_\_ d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Povilas Ruočkus** baigiamasis projektas tema „Informacijos perdavimas ultragarsinėmis bangomis“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Ruočkus, Povilas. Informacijos perdavimas ultragarsinėmis bangomis.  
Telekomunikacijos inžinerijos magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Liudas  
Mažeika; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas,  
Telekomunikacijų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai  
Kaunas, 2017. 42 p.

## **SANTRAUKA**

Šio baigiamojo darbo tikslas - ištirti ir nustatyti informacijos perdavimo ultragarsinėmis bangomis parametrus ir jų įtaka perdavimo tikslumui.

Baigiamajame magistro darbe išanalizuotos ultragarso bangų sklidimo vandeninėje terpėje ypatumai, pateikiant pagrindines susiduriamas problemas ir įtaką informacijos perdavimui. Apžvelgti tyrimai ir įrenginiai, skirti informacijos perdavimui povandeninėje terpėje ultragarsu savybes, pateikiant jų naudojamus parametrus ir palyginimo rezultatus. Sudarytas signalo sugeneravimo ir priėmimo modelis, naudojantis OFDM technologiją, pateikiamos modelio sudedamosios dalys ir veikimo principas. Naudojant sudarytą modelį, ištirta sklidimo terpės, triukšmų sukeltos informacijos perdavimo klaidos, nustatytos kritinės parametrų ribos, ištirta ultragarsinio keitiklio naudojamo bangų siuntimui, dažninių charakteristikų įtaka.

Darbą sudaro 4 pagrindinės dalys: įvadas, informacijos perdavimo ultragarsinėmis bangomis ypatumų skyrius, ultragarso perdavimo ultragarsinėmis bangomis sistemos modeliavimas, informacijos perdavimo modeliavimas sklindančioje terpėje, išvados ir literatūros šaltiniai.

Ruočkus, Povilas. Data Transmission Using Ultrasonic Waves: Master's thesis in Telecommunications engineering degree / supervisor assoc. prof. Liudas Mažeika. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Telecommunications

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences  
Kaunas, 2017. 42p.

## **SUMMARY**

The goal of this final Masters work is to analyse data transmission using the ultrasonic waves and determine the parameters and their influence on the transmission accuracy.

In this work, the analysis of ultrasonic wave propagation characteristics in a water medium, presenting the main issues affecting the data transmission is made. It includes review of current achievements in the field of ultrasonic data transmissions, discussion on the ultrasonic properties in the underwater environment by presenting most important parameters and comparison between them. An OFDM transducer and receiver models, components and principals of the operation are analysed. Using the model developed model, the simulation process is performed, examining the data propagation influence of the noise, the characteristics of ultrasonic transduces and errors in a simulated environment and presenting the results.

Final paper consists of 4 parts: an introduction, characteristics of data transmission using ultrasonic waves, model of a data transmission using ultrasonic waves, data transmission simulation over a medium using ultrasonic waves, conclusions and list of references.

# TURINYS

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS .....	5
1 ĮVADAS.....	6
2 INFORMACIJOS PERDAVIMO ULTRAGARSINĖMIS BANGOMIS YPATUMAI.....	7
2.1 Mokslinių tyrimų skirtų informacijos perdavimui ultragarsu apžvalga.....	7
2.2 Pagrindiniai ultragarsinių bangų sklidimo vandeninėse terpėse parametrai.....	9
2.3 Ortogonalus dažnių tankinimo multipleksavimo (OFDM) apžvalga.....	14
2.4 Informacinio signalo formavimo struktūra .....	16
2.5 Signalų priėmimo ir informacijos atstatymo struktūra .....	18
2.6 Informacijos perdavimo ultragarsinėmis bangomis ypatumų apžvalgos išvados.....	19
3 INFORMACIJOS PERDAVIMO ULTRAGARSINĖMIS BANGOMIS SISTEMOS MODELIAVIMAS .....	20
3.1 Informacinio signalo formavimo modelis.....	21
3.2 Informacinio signalo perdavimas ultragarsu modelis .....	25
3.3 Informacinio signalo priėmimo ir informacijos atkūrimo modelis.....	27
3.4 Informacijos perdavimo ultragarsinėmis bangomis sistemos išvados.....	28
4 INFORMACIJOS PERDAVIMO MODELIAVIMAS SKLINDANČIOJE TERPĖJE .....	29
4.1 Ultragarso keitiklio dažnio juostos pločio įtaka .....	30
4.2 Ultragarsinio keitiklio centrinio dažnio nuokrypis .....	32
4.3 Signalas / triukšmas santykio įtaka .....	34
4.4 Rezultatų išvados .....	38
5 IŠVADOS .....	39
6 INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS .....	40

## SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

ODTM – ortogonalus dažnių tankinimo multipleksavimas (angl. *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* – OFDM);

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

IFFT – atvirkštinė greitoji Furjė transformacija (angl. *Inverse Fast Fourier Transformation*);

QAM – kvadratūrinė amplitudinė moduliacija (angl. *Quadrature amplitude modulation*);

DAM – dvilygė amplitudinė manipuliacija (angl. *Amplitude Shift Keying*, ASK)

OOK – įjungta-išjungta DAM (angl. *On-off keying*);

PSK – fazės poslinkio DAM (angl. *Phase-shift keying*);

BPSK – dvejetainio fazės poslinkio DAM (angl. *Binary Phase-shift keying*);

QPSK – kvadratūrinė fazės poslinkio DAM (angl. *Quadrature Phase-shift keying*);

ISI - tarpimbolinė interferencija (angl. *Inter-Symbol Interference*);

MCM - daugia-nešlės moduliacijos (angl. *Multi-carrier modulation*);

PN - pseudo-atsiktitinė (angl. *Pseudo-random*);

PAPR –maksimalios ir vidutinės galios santykis (angl. *Peak-to-Average Power Ratio*);

ZP – nulių užpildymas (angl. *Zero padding*);

## 1 ĮVADAS

Povandeninė terpė iki šių dienų yra viena iš sudėtingiausių terpių bevelei komunikacijai. Mokslo bendruomenės vis labiau domisi povandeniniu bevieliu ryšiu, tai skatina vandenynų eksploatacijos paklausą, ar tai būtų civiliniams ar kariniams tikslams, kaip vandenynų tyrinėjimui, aplinkos stebėjimui, nelaimių numatymui, kariniams tikslams. Tai verčia kurti labiau patikimesnes ir kokybiškesnes komunikacijos priemones povandeniams tikslams ir skiriant kuo daugiau investicijų tai įgyvendinti, kurios suteiktų aukštą duomenų perdavimo spartą. Povandeninė aplinka jau ilgą laiką yra priskiriama kaip viena iš sudėtingiausių aplinkų bevelei komunikacijai. Yra kelios pagrindinės charakteristikos, kurios apsunkina komunikacijas šioje aplinkoje [1] [5]:

- slopinimas yra priklausomas nuo dažnio. Kuo didesnis dažnis, tuo didesnis slopinimas;
- dažnio juostos plotis yra priklausomas nuo atstumo;
- labiau pasireiškia Doplerio efektas ir nevienodas signalo dažnio juostos plotis;
- aplinkos sukeliama triukšmai;
- Ultragarsinių keitiklių dažnių juostos apribojimui.

Komunikacija per vandenį galima trimis būdais: akustiniu, radijo dažniu ir naudojant optika. Radijo dažnio juosta galima naudoti povandeninei komunikacijai, bet tik mažiems atstumams (maždaug iki 10 metrų). Naudojant aukštus dažnius, pasireiškia aukšto lygio absorbcijos povandenėje terpėje. Optinės sistemos gali suteikti labai aukštą perdavimo spartą (suteikiančias Mbps iki Gbps perdavimo spartas), bet kenčia nuo panašių apribojimų kaip ir radijo dažniai ir dėl to gali tik perduoti informaciją mažais atstumais po vandeniu. Tai yra dėl šviesos greito išsibarstymo, taip pat susiklosto nepalankios aplinkybės, susijusios su aplinka, ateinančios šviesos nuo vandens paviršiaus ir šviesos sklaidos. Akustinė sistema tinkamesnė bevieliam ryšiui povandeniniams tikslams dėl sąlyginai mažo slopinimo vandenyje, ypač prie žemesnių dažnių kai ultragarsinės bangos gali sklaidyti didelius atstumus ir gali pasiekti gilius vandenius.

Pažanga povandeninės komunikacijos srityje padaryta tikrai ženkliai, ypač kuriant tobulesnius siųstuvus ir perduodant duomenis trumpais atstumais. Trumpiems atstumams galima naudoti aukštesnius dažnius, iki 1 MHz pagal atliktus tyrimus, pasiekiant maksimaliai iki 1 Mbps duomenų sparta per 20 metrų atstumą [9]. Norint perduoti duomenis didesniais atstumais, reikia žeminti dažnio juostą, kartu sumažinant duomenų perdavimo spartą. Naudojant 10-200 kHz dažnio juostą, pasiekiami tarp 15 iki 150 kbps perdavimo sparta, atstumuose nuo 200 metrų iki kelių kilometrų [1] [5] [6] [8] [16]. Dauguma tyrimų apsibrėžia nustatymus remiantis jau turimais atliktais tyrimų rezultatų modeliais, naudojamais dažniais, norimais atstumais,



persiunčiamo duomenų tipu. Labiausiai paplitę tyrimų ir taikymų sritys yra vaizdo duomenų persiuntimas ir perdavimo spartos didinimo siekiai. Kai kuriais atvejais pritaikomi nauji modeliai su patobulintais siųstuvais [14] arba modeliais, kurie sumažina Doplerio efektą įtaką. Nedaugelis tyrimų bando surasti šių pasirinkimų ir parametrų ribas. Tad tikslinga būtų išanalizuoti ir ištirti ultragarso bangos sklidimo parametrus ir jų galimybes vandeninėje terpėje, apibendrinus veikimo principus ir šių dienų perdavimo ryšio modelius, pasiūlyti savo modelį ir ištirti su jais parenkant skirtingus parametrus.

**Darbo tikslas** – ištirti ir nustatyti informacijos perdavimo ultragarsinėmis bangomis parametrus ir jų įtaka perdavimo tikslumui.

**Darbo uždaviniai:**

- ✓ Apžvelgti ultragarso bangų sklidimo vandeninėje terpėje ypatumus ir galimą jų įtaką informacijos perdavimui.
- ✓ Sukurti informacijos perdavimo panaudojant ultragarsines bangas modelį, įgalinantį keisti informacijos ir perdavimo tepės įvesties parametrus, leidžiantį tirti sistemos veiksnumą bei vizualizuojantį gautus rezultatus.
- ✓ Naudojant sudarytu modeliu atlikti tyrimus, leidžiančius įvertinti perduodamos informacijos tikslumo priklausomybę nuo ultragarsinio keitiklio ir pernašos tepės parametrų, apsibrėžti ribinį ultragarsinio keitiklio dažnių juostos plotį.

## 2 INFORMACIJOS PERDAVIMO ULTRAGARSINĖMIS BANGOMIS YPATUMAI

Skyriaus tikslas – aprašyti ultragarso duomenų perdavimo povandeninėje terpėje galimybes, išanalizuoti parametrus ir apsirašyti jų ribas. Siekdami tai atlikti, išanalizuojame mokslininkų atliktus tyrimus analizuojant ultragarsinių bangų parametrus povandeninėje terpėje, susisteminau problemas su kuriomis susiduriama atliekant šiuos tyrimus. Kadangi dauguma povandeninių ultragarsinių modemų informacijos perdavimui panaudoja OFDM signalo moduliaciją, todėl šiame skyrelyje atliekama ortogonalus dažnių tankinimo multipleksavimo (angl. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, OFDM) apžvalga, išanalizuojant OFDM veikimo principą ir jos sudedamąsias dalis: informacijos signalo sukūrimo ir išsiuntimo, bei informacijos priėmimo ir atgaminimo signalo struktūrą ir algoritmą.

### 2.1 Mokslinių tyrimų skirtų informacijos perdavimui ultragarsu apžvalga

Dauguma atliekamų tyrimų, kurie siejasi su informacijos perdavimu povandeninėje terpėje naudojant ultragarsines bangas, pateikti 2.1 lentelėje. Daugelį atvejų tyrimai atliekami kontroliuojamose vandens sąlygose su nustatytais parametrais norint pasiekti atitinkamą spartą.

Analizuojant moksliniuose šaltiniuose pateiktus tyrimus pastebima, kad pagrindinis perduodamos informacijos tipas, kurį bandoma persiūti dauguma atvejų yra simbolių sekos, kai kuriais atvejais paveikslėliai ir netgi vaizdo įrašai. Vaizdo perdavimas ultragarsinėmis bangomis šiuo metu tampa labai aktualia tyrimų sritimi, tačiau šiai dienai yra atlikta gana mažai tyrimų, kadangi labai daug faktorių įtakoja šio tipo informacijos perdavimą, kas apsunkina tyrimus [1] [5] [6] [8].

Maža dalis tyrimų atliekami realiose sąlygose, kaip upėje ar jūroje, kur gali įtakoti siunčiamą signalą daugiau trukdžių, norint išbandyti sukurtą ar patobulintą metodą. Daugelį atveju tyrimams naudojama vidutinio dažnio juosta (0.1 – 100 MHz) ir priklausomai nuo dažnio, pastebima, kad kuo didesnis dažnis naudojamas, tuo labiau mažinamas atstumas tarp siųstuvo ir imtuvo, bet naudojantis didesniu dažniu, pasiekama didesnė perdavimo sparta [3] [9].

**2.1 lentelė.** Mokslinių atliktų tyrimų naudojami parametrai ir gauti perdavimo spartos rezultatai.

Nuoroda	Metai	Naudojamas dažnis	Moduliacija	Atstumas	Perdavimo sparta
[8]	2003	75 KHz	64-QAM	10 m.	150 kbps
[5]	2009	115 kHz	8-PSK	200 m.	91 kbps
[18]	2010	100 kHz	BPSK	100 m.	28 kbps
[16]	2012	12 kHz	QPSK	7 m.	14 kbps
[17]	2012	38 – 58 kHz	8-QAM	120 m.	23 kbps
[3]	2014	1 MHz	OOK	16 m.	1 Mbps
[9]	2015	1 MHz	OOK	20 m.	1 Mbps

Lyginant moksliniuose straipsniuose pateiktus tyrimams naudojamus parametrus ir gautus rezultatus su šiuolaikinių povandeninių ultragarso modemais, kurie pritaikyti naudoti jūros sąlygose, gėluose vandenyse ar per didelius atstumus [19] [20] [21], pastebimi rezultatų sutapimai, bei išryškėja skirtingo naudojimo parametrai. Dauguma povandeninių ultragarsinių modemų gali pasiekti geresnius rezultatus naudojant OFDM (QAM, BPSK) moduliaciją. Kai kuriais atvejais naudojant OOK moduliaciją, tačiau šiuo atveju naudojami didesni dažniai [3] [9] [23]. *Evo Logics S2CM HS* aparatūra pasiekia iki 62.5 kbps per 300 m atstumą, naudojant 120-200 kHz dažnio juostą. Aparatūros, kurios skirtos 1 km atstumams pernešti informaciją, pasiekia iki 31.2 kbps perdavimo spartą naudojant 42 – 78 kHz dažnio juostą [21].

Minėti tyrimai susiję su didesnės perdavimo spartos gavimu keičiant įvairius moduliacijos kitus įtakojančių faktorių parametrus. Dalis tyrimų siejasi su vaizdo perdavimo

kokybės užtikrinimu. Tačiau yra atlikta mažai atliktų tyrimų, kurie leistų įvertinti perduodamos informacijos tikslumą nuo ultragarsinio keitiklio ir pernašos terpės parametrų. Tad tikslinga būtų ištirti šią sferą.

## 2.2 Pagrindiniai ultragarsinių bangų sklidimo vandeninėse terpėse parametrai

Garsas yra tam tikra kinetinės energijos (judesio energijos) forma, kurią sukuria, bet kuris virpantis objektas. Garso bangos perneša energiją, kurią galima panaudoti tame tarpe ir informacijos perdavimui.

Ultragarsas – elastinės slėgio bangos, kurių dažnis viršija žmogaus girdimo garso viršutinę ribą (15-20 kHz). Ultragarso dažnio viršutinę ribą lemia medžiagos sandara: dujų elastinių bangų ilgis didesnis už molekulių laisvojo kelio ilgį, o skysčių ir kietųjų kūnų – už nuotolį tarp atomų. Ultragarso dažnių diapazonas skirstomas į tris sritis:

- žemo dažnio 20 – 100 kHz;
- vidutinio dažnio 0,1 – 10 MHz;
- aukšto dažnio 10 – 1000 MHz;

Dujose ir skysčiuose gali sklirti tik išilginės bangos, kietuosiuose kūnuose – išilginės ir skersinės elastinės bangos. Sklidimo greitis priklauso nuo medžiagos tamprumo ir tankio, kai kuriose medžiagose, tai priklauso ir nuo bangų naudojamo dažnio – pasireiškia ultragarso greičio dispersija, kartu ultragarsas slopsta daugiau už žemesnio dažnio bangas.

Vandeninė terpė yra viena iš pačių sudėtingiausių terpių komunikacijai. Pagrindinės kliūtys, su kuriomis susiduriama yra: slopinimas, kuri labiausia paveikia, kai yra naudojami aukšti dažniai, pralaidumo priklausomybė nuo atstumo, didelė triukšmų įtaka ir pasireiškiantis Fedingo efektas.

Akustinės bangos labiausiai yra naudojamos povandeninėms komunikacijos sistemoms. Akustinė banga gali nukeliauti didelius atstumus per jūros vandenį ar kitas vandenines terpes, bet norint perduoti kokybišką informaciją per didelius atstumus, naudojami maži dažniai. Be to, akustinė banga yra mechaniniai virpesiai, todėl bangos greitis priklauso nuo medžiagos savybių. Vandeninėje terpėje akustinė banga turi labai mažą sklidimo greitį palyginus su elektromagnetinėmis bangomis (apie 1480 m/s), o tai sukelia didelį perdavimo vėlavimą.

**Vėlinimas.** Vėlinimas povandeninėje komunikacijoje naudojant ultragarso bangas, pasireiškia žymiai didesnis vėlinimas, nei apžvelgiant elektromagnetinių bangų komunikaciją per oro aplinką. Tai yra todėl, kad garso greitis vandenyje yra apie 1480 m/s, o elektromagnetinių bangų greitis per orą –  $3 \cdot 10^8$  m/s. Tai reiškia, kad vėlavimas turi didelę reikšmę ir tai paveikia

komunikacinių sistemų charakteristikas.

Garso greitį vandenyje įtakoja šios savybės: temperatūra, druskingumas ir giluma. Didinant nors vieną iš šių savybių, garso greitis vandenyje padidėja. Yra kelios formulės, kurios apskaičiuoja garso greitį vandenyje, priklausomai nuo sąlygų, bet supaprastinta naudojama lygtis yra [17]:

$$c = 1449.2 + 4.6 \cdot T - 0.055 \cdot T^2 + 0.00029 \cdot T^3 + (1.34 - 0.01 \cdot T) \cdot (S - 35) + 0.016 \cdot D \quad (2.1)$$

čia  $c$  – garso greitis, išreiškiamas metrais per sekunde (~343.2 m/s),  $T$  – vandens temperatūra, išreiškiamas Celcijais (°C),  $S$  – druskingumas, išreiškiamas dalimis vienam tūkstančiui (ppt),  $D$  – giluma, metrais (m). Šią formulę galima naudoti tik tam tikrame parametų ruože:  $0 \leq T \leq 35$  °C,  $0 \leq S \leq 45$  ppt ir  $0 \leq D \leq 1000$  m. Vidutinis vandenyno druskingumas yra 34.7 ppt, bet gali būti žymiai mažesnis lyginant su geriamu vandeniu, kurio druskingumas būna 0.1 ppt [17].

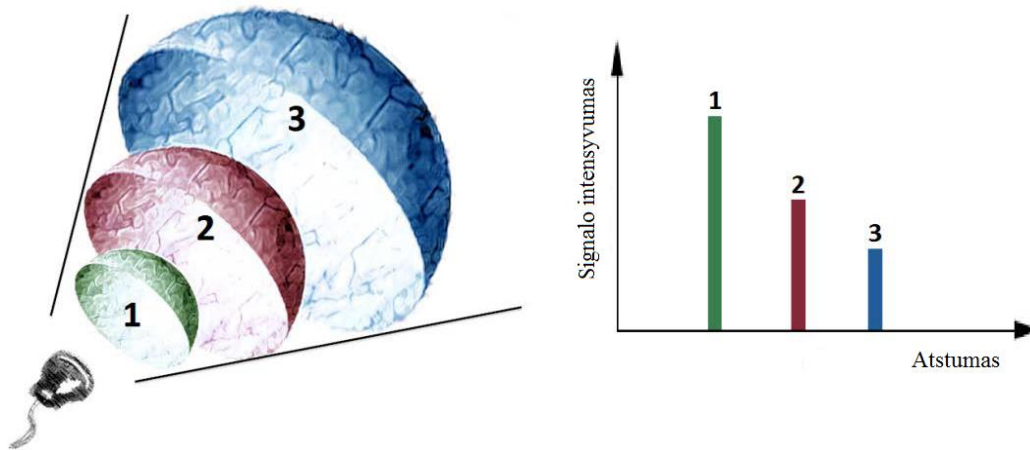
Signalų sklaidimo savybes lemia įvairūs fizikiniai reiškiniai: slopinimas, atspindys, interferencija, difrakcija, absorbcija, sklaida.

**Slopinimas.** Ultragarso signalo sklaidimui turi įtakos sklaidimo terpės savybės ir sklaidimo kelyje sutikti objektai. Tokiam signalui sklindant nuo siųstuvo iki imtuvo, bangos energija išsisklaido arba prarandama. Energijos praradimas labiausiai pasireiškia dėl slopinimo. Slopinimas yra viena iš įtakingiausių ultragarso sklaidimo per vandenį dedamoji, nes gali pasireikšti visokiausiai tipais vandens terpėse ir didėja priklausomai nuo nukeliauto atstumo ir naudojamo dažnio. Slopinimas susidaro iš kelių komponentų:

- sklaidos (difrakcijos) nuostoliai;
- absorbcijos nuostoliai;

**Sklaidos (difrakcijos) nuostoliai** priklauso, kai garso bangos yra spinduliuojamos, kitais žodžiais tariant, nuo siuntiklio kryptingumo diagramos. Priklausomai nuo to, ultragarso bangos skirstomos į sferines, cilindrinės ir kryptines formas. Perduoti signalą nuo siųstuvo iki imtuvo naudojama kryptinės formos ultragarso signalas, tai sumažina sklaidą per didesnius atstumus.

Dėl sklaidos, ultragarso bangai sklindant, jos frontas plečiasi ir energija pasiskirsto didesniame plote, tuo būdu signalo energija pasirinkta kryptimi mažėja, didėjant atstumui nuo bangų šaltinio. Tai pagrindžiama paveikslėliu 2.1 su kryptinio signalo sklaidos nuostoliais.



2.1 pav. Kryptinio signalo sklaidos grafikas [10]

Kai kryptinė sklaidos efektas pasireiškia vienalytinėje ir išplėstoje terpėje, ultragarso bangos energija spinduliuojama garso signalą su tam tikru kryptingumo kampu, kuris apskaičiuojamas taip [10]:

$$\delta = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{\lambda}{D}\right), \quad (2.2)$$

čia  $D$  – siųstuvo diametras,  $\lambda$  – bangos ilgis.

Kryptinė sklaida galima apskaičiuoti pasinaudojus formulę [10]:

$$G(r) = 10 \cdot \log \left[ \frac{l}{l_0} \right] = 10 \cdot \log \left[ \frac{\delta \cdot r^2}{\pi \cdot r_0^2} \right], \text{ dB}, \quad (2.3)$$

čia  $l_0$  – garso intensyvumas nuo atskaitos atstumo  $r_0$ ,  $l$  – garso intensyvumas  $r$  atstumu.

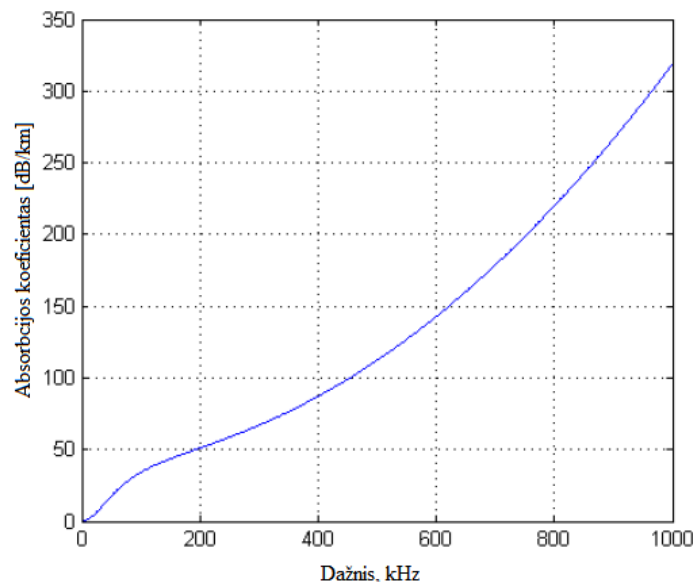
**Absorbcijos nuostoliai** susidaro dėl akustinės energijos transformacijos į šilumą. Šis reiškinys labai priklauso nuo naudojamo dažnio, kuo didesnis dažnis, tuo daugiau energijos yra absorbuojama.

Absorbcijos nuostolių koeficientą galima išreikšti pasinaudojus *Thorpo* formule [23]:

$$10 \cdot \log a(f) = 0.11 \cdot \frac{f^2}{1+f^2} + 44 \cdot \frac{f^2}{4100+f} + 2.75 \cdot 10^{-4} \cdot f^2 + 0.003, \text{ dB/km}, \quad (2.4)$$

čia  $a(f)$  – absorbcijos koeficientas,  $f$  – dažnis kHz.

Absorbcijos koeficientas yra vienas iš pagrindinių faktorių ribojančių naudojamą dažnių spektrą povandeninėms komunikacijoms. Šis koeficientas sparčiai auga didinant naudojamą dažnį (2.2 pav.), todėl povandeninėse komunikacijose naudojamas pakankamai mažas dažnis, kad sumažinti absorbcijos koeficientą [1] [17] [23].



**2.2 pav.** Absorbcijos koeficientas priklausomybė nuo dažnio [1]

**Triukšmai.** Triukšmas – tai atsitiktinių dydžių seka. Jei šie atsitiktiniai dydžiai yra nepriklausomi, tai toks triukšmas vadinamas baltu triukšmu. Bendru atveju ši triukšmo seka gali turėti bet kokią skirstinį, tačiau dažniausiai yra nagrinėjamas baltas Gauso triukšmas. Povandeninėje terpėje sukeltus triukšmus galima suskirstyti į tris tipus: prietaisų, konkrečios vietos ir aplinkos sukelti triukšmai.

Sunkiausia yra apskaičiuoti aplinkos sukeltus triukšmus, bet pasitelkus pagrindinius pasireiškiančius aplinkos sukeltus triukšmus (vandens sukuriavimas, bangos, jūros aktyvumas ir temperatūros triukšmai), galima apskaičiuoti apytikslius triukšmų nuostolius. Dauguma triukšmų galima paaiškinti pasinaudojus Gauso statistika ir nuolatinio galios tankio pasiskirstymo spektru (PSD). Triukšmus galima apibrėžti pasinaudojant šiomis formulėmis [10]:

$$\begin{aligned}
 10 \cdot \log N_t(f) &= 17 - 30 \cdot \log(f) \\
 10 \cdot \log N_s(f) &= 40 + 20 \cdot (s - 0.5) + 26 \cdot \log(f) - 60 \cdot \log(f - 0.03) \\
 10 \cdot \log N_w(f) &= 50 + 7.5 \cdot \omega^{\frac{1}{2}} - 20 \cdot \log(f) \\
 10 \cdot \log N_{th}(f) &= -15 + 20 \cdot \log(f)
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

čia  $N_t$  – vandens sukuriavimo triukšmai,  $N_s$  – jūros aktyvumo triukšmai,  $N_w$  – bangų sukelti triukšmai,  $N_{th}$  – temperatūriniai triukšmai,  $s$  – jūros aktyvumas, kurio diapazonas nuo 0 iki 1, nuo mažo iki didelio aktyvumo,  $w$  – vėjo greitis (m/s). Vandens sukuriavimo triukšmai paveikia signalą tik labai mažuose dažniuose,  $f < 10$  Hz. Jūros aktyvumas paveikia signalą tarp 10-100 Hz dažnio juostos. Bangavimas, kurį sukelia vėjas, gali sukelti labiausiai triukšmų, nes pasireiškia

100 Hz – 100 kHz dažnių juostoje, o temperatūros triukšmai pasireiškia, kai naudojama  $f > 100$  kHz dažnių juostos.

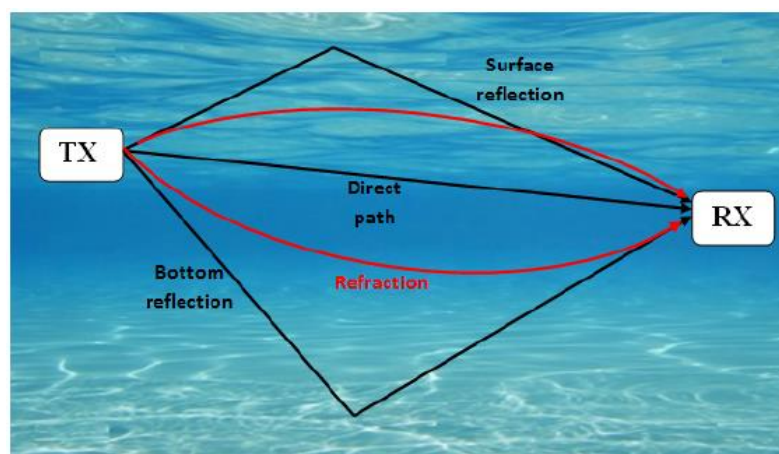
Susumavę šiuos triukšmus gauname vandens aplinkos sukeltus triukšmus [10].

$$N(f) = N_t(f) + N_s(f) + N_w(f) + N_{th}(f), dB, \quad (2.6)$$

**Doplerio efektas.** Ultragarso komunikacija povandeninėje terpėje dažnai susiduria su Doplerio efektu - dažnio pokytis. Šį efektą sukuria judesiai nuo srovių, bangų ar nuo kitų veiksnių. Doplerio efektas sukelia dažnių pasistūmimą ir paskleidimą. Radijo dažnio komunikacijose, kur elektromagnetinio signalo greitis yra  $3 \cdot 10^8$  m/s, Doplerio efektas yra labai mažas, apie  $\alpha = 10^{-7}$  ( $\alpha$  – Doplerio koeficientas) ir labai mažai įtakoja signalo kokybiškumą, bet povandeninėse komunikacijose naudojant ultragarso bangas, Doplerio koeficientas gali būti lygus  $\alpha = 10^{-4}$ , dėl sąlyginai mažo sklidimo greičio [1].

**Fedingo efektas.** Dažniausia susiduriama problema akustinėje komunikacijoje, povandeninėje terpėje, yra Fedingo efektas, kitaip – daugiakelis signalų sklidimas (angl. *Multipath propagation*). Šis efektas pasireiškia, kai iš siųstuvo siunčiamas signalas į imtuvą priimamas dviem ar daugiau keliais. Kiekvienas priimtas signalas dėl šio efekto, turi skirtingą amplitudę, fazę ir priėmimo laiką.

Daugiakelio signalų sklidimas vandens terpėje priklauso nuo geometrijos, dažnio, garso greičio, atstumo tarp siųstuvo ir imtuvo, ir gilumos. Yra du pagrindiniai reiškiniai, kurie nusako Fedingo efektą: atspindžiai nuo paviršių (dugno, vandens paviršiaus, objektų ir t.t.) ir lūžiai (2.3 pav.).



**2.3 pav.** Fedingo efektas – daugiakelio signalo sklidimo pavidavimas [1]

Fedingo efektas sukuria nereikalingus signalo aidus, kurie sukelia tarpsimbolinę interferenciją (ISI, angl. *Inter-Symbol Interference*) skaitmeniniuose komunikacijos sistemose. Siekiant to išvengti, kiekviename simbolių bloke yra įvedamas apsauginis laiko intervalas.

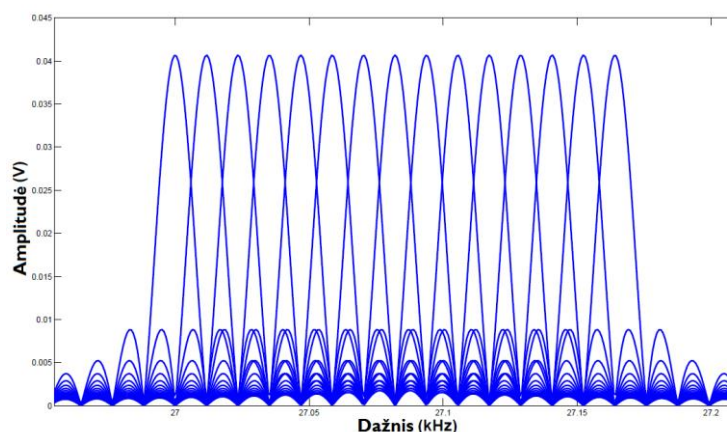
Tačiau tai sumažina siunčiamų simbolių kiekį, kuris yra ir taip jau mažas dėl sistemos riboto pralaidumo [1] [17].

### 2.3 Ortogonalus dažnių tankinimo multipleksavimo (OFDM) apžvalga

Šiuolaikinės bevielės informacijos perdavimo technologijos reikalauja aukštos perdavimo spartos ir užtikrinamo patikimumo. Žinoma, susiduriant su nenuspėjama ir sudėtingą bevielę terpę kaip vanduo, užtikrinti aukštą perdavimo spartą yra sunki užduotis. Pastaruoju metu, informacijos perdavimui užtikrinti, per oro ar vandens terpę, pasitelkiama daugia-nešlės moduliacijos (angl. *Multi-carrier modulation*, MCM) principu. MCM principas – padalinti siunčiamą signalą į dalis, kurios po to persiunčiamos per atskirus nešlius su skirtingais dažniais.

Ortogonalus dažnių tankinimo multipleksavimas (angl. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, OFDM) pasinaudoja MCM principu, tik skirtumas tai, kad informacijai perduoti, pasitelkiama glaudžiai suspaustais ortogonaliais nešliais. Kiekvienas nešlys yra ortogonalus kitiems nešliams, taip kad jų centriniai dažniai nepersidengtų, ką labai gerai atlieka greitoji Fourjė transformacija (angl. *Fast Fourier Transform*, FFT). Šis efektyvus įgyvendinimas, naudojant greitąją Fourjė transformaciją, gali būti vykdomas vietoj daugianešlės moduliacijos ir aptikimo funkcijos.

Visas siunčiamas signalas padalinamas į dalis, su atitinkamais simbolių kiekiais, kas vadinama OFDM kadrai. Šiuose kadruose siunčiama informacija padalinama į bitų sekas, kurios, priklausomai nuo nešlių skaičiaus, suskirstomos nešliams ir poto sumoduliuojamos su pasirinkta moduliacija (kaip QAM ar PSK). Visos sistemos pralaidumas yra visų nešlių pralaidumo suma, tai reiškia, kad kiekvieno nešlio perdavimo sparta yra tik dalis visos perdavimo spartos. Dėl šių savybių, naudojant OFDM sistema galima pasiekti pakankamai aukštą perdavimo spartą. OFDM kanalo dažnio juostos pasiskirstymo pavyzdys pavaizduojamas 2.4 paveikslėlyje [16] [22].



2.4 pav. OFDM nešlių pasiskirstymas spektre [16]



OFDM yra sudarytas iš kadru, kuriuos sudaro siunčiamo signalo dalys. Kiekvienas kadras ( $T$ ) sudarytas iš simbolių, kurie pasiskirstę tarp nešlių ir apsaugos laiko intervalo.

$$T = T' + T_g \quad (2.6)$$

čia  $T_g$  - apsauginis laiko intervalas (s),  $T'$  - siunčiamas simbolių intervalas, turi būti ilgesnis negu kanalo atsakomojo impulso trukmė, kad išvengti simbolių interferencija (angl. *Inter-Symbol Interference*, ISI) tarp nuoseklių OFDM blokų. Dauguma atveju, apsauginis laiko intervalas sudaromas iš 25% siunčiamo simbolių laiko intervalo, o kokie duomenys įdedami į apsauginį laiko intervalą, priklausoma kaip yra sukonfigūruotas OFDM. Siunčiama simbolių intervalas yra aprašomas taip [16]:

$$T' = K/B \quad (2.7)$$

čia  $B$  – bendra sistemos dažnio juosta (kHz) ir  $K$  – nešlių skaičius.

Tarpai tarp nuoseklių nešlių yra:

$$\Delta f = 1/T' \quad (2.8)$$

Kiekvienas nešlys turi tam priskirtus QAM simbolius, kurie po to yra sumoduliuojami. Naudojami moduliacijos tipai gali būti PSK, QAM, OOK, nuo 4 iki 64 simbolių tankumu. Nuo OFDM apibrėžimo, išvedama funkcija, kuri apskaičiuoja dažnio juostos pralaidumo efektyvumą [16].

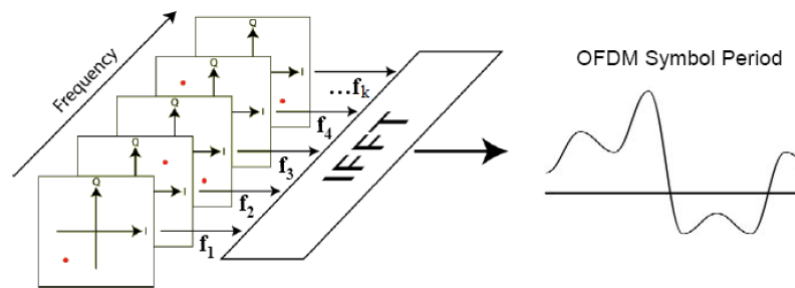
$$\frac{R}{B} = \frac{m \cdot \alpha}{1 + T_g \cdot (B/K)} \quad (2.9)$$

čia  $m$  – moduliacijos dydis, aprašomas bitais.  $\alpha$  yra kodavimo koeficientas, skirtas blokų kodavimui. Iš 2.9 formulės, matom, kad sistemos efektyvumas gerėja, kai tarpai tarp nešlių ir apsauginio laiko intervalo mažėja [1] [16] [22].

OFDM nešliai yra ortogonalūs vieniems kitam ir dėl to, modulatoriai ir demodulatoriai gali būti lengvai įgyvendinami pasinaudojus Fourjė transformacijos algoritmu. Signalo išsiuntimui pro siųstuvą naudojama atvirkštinė greitoji Fourjė transformacija (angl. *Inverse Fast Fourje Transformation*, IFFT) [16].

$$x(l) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} X(k) e^{\frac{j2\pi kl}{K}}, \quad l = 0, \dots, K - 1, \quad (2.10)$$

čia  $x(l)$  – signalas laiko intervale. Persiuntimo charakteristikos pavaizduotos 2.5 paveikslėlyje, kur nurodoma kaip pritaikoma IFFT nešliams su sumoduliuotais simboliais ir išdėstoma per laiko intervalą. Demoduliacijoje atliekama atvirkštinė greitoji Fourjė transformacija ant gauto sumoduliuoto signalo [5] [16].



**2.5 pav.** Nešlių sumoduliavimas pasinaudojus IFFT, perteikiant iš dažninės charakteristikos į laikinę [5]

**Privalumai.** OFDM moduliacijos metodai yra naudojami laidinėse ir bevieliose sistemose, dėl jos paprastumo ir efektyvumo. Viena iš pagrindinių OFDM privalumų yra jos moduliacijos schema, kuri yra atspari ISI, dėl apsauginio laiko intervalo įtraukimo tarp siunčiamų signalo dalių. Kartu reikia paminėti ir tolimesnius privalumus [1] [5]:

- efektyvus spektro išnaudojimas;
- lengvai prisitaiko prie sunkių kanalo sąlygų be sudėtingų skaičiavimų;
- pasiekiamas palankus efektyvumas panaudojus Fourjė transformacija;
- mažas interferencijos požymis tarp siaurų juostų kanaluose;
- nėra jautrus laiko sinchronizacijos klaidoms;
- mažas vidinės simbolių interferencijos pasireiškimas (ISI).

**Trūkumai.** Viena iš labiausiai sukeliančių problemų OFDM sistemoje yra aukšto PAPR (angl. *Peak-to-Average Power Ratio*) pasireiškimas. Tai sumažina siųstuvo ir stiprintuvo efektyvumą, nes stiprintuvai turi prisitaikyti prie didelių amplitudinių pokyčių. Kitos pasireiškiančios problemos OFDM sistemoje [1] [5]:

- jautrus Doplerio efektui;
- jautrus nešlių dažnių pakitimams;
- efektyvumo praradimas naudojant apsauginį laiko intervalą. Siunčiamas signalas yra ilgesnis.

## 2.4 Informacinio signalo formavimo struktūra

Šiame skyriuje aprašomas kiekvienas siųstuvo blokas ir jo teorinis veikimo principas. Numatomas siųstuvo modelis pagrįstas OFDM sistemos technologija (2.6 pav.).



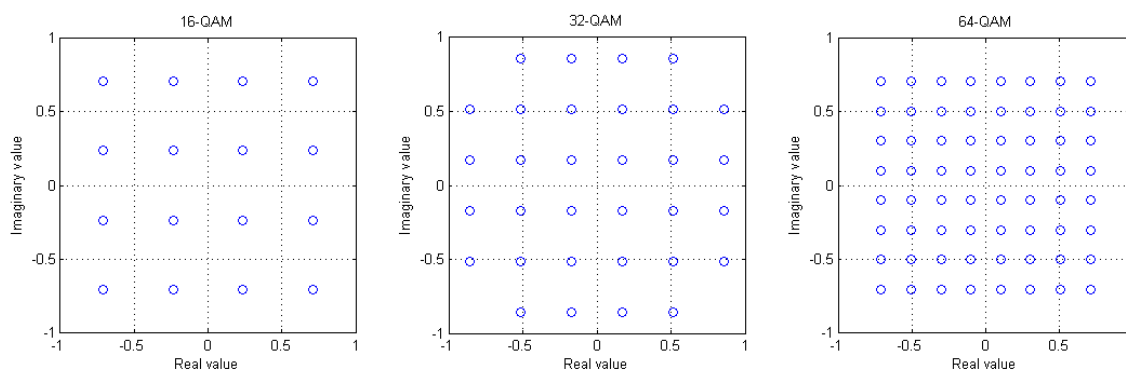
2.6 pav. Informacijos siuntimo signalo suformavimo modelis

**Duomenys.** Tai siunčiama informacija, ar tai būtų simbolių seka, paveikslukas ar vaizdo įrašas. Norint persiųsti informacija, reikia šiuos duomenis paversti į bitų seką. Siunčiant vaizdo įrašą, įeina daugiau faktorių, kaip vaizdo įrašo kompensavimas ir formato parinkimas.

**Moduliacija.** Moduliacijos tikslas yra įterpti kuo daugiau informacijos į kuo siauresnį spektrą. Naudojant labiau sutankintą moduliacijos tipą, pasiekama didesnė perdavimo sparta, bet naudojant praktikoje, kuo didesnis simbolių tankumas, tuo didesnė tikimybė, kad simboliai bus netinkamai aptikti ir taip pasireiškia kaip klaidos. Todėl yra svarbu įvertinti ir pasirinkti atitinkamą moduliacijos tipą, kuris suteiktų optimaliausią sprendimą, priklausomai nuo terpės per kurią yra siunčiamas signalas [5].

Pagal atliktus tyrimus, kurie pateikti 2.1 skyriuje, pastebima, kad povandeninėms komunikacijoms populiariausi moduliacijos tipai naudojami PSK, QAM ir OOK.

- PSK (angl. *Phase Shift Keying*) perteikia duomenis pakeisdami atskaitos signalo fazę. Šios moduliacijos atskaitos taškai dažniausia išsibarsto apskritimo forma, vienodais kampais. Vieni iš pagrindinių PSK tipų, kurie yra naudojami, yra QPSK ir 8-PSK [5].
- QAM (angl. *Quadrature Amplitude Modulation*) perteikia duomenis pakeisdami atskaitos signalo amplitudę. Dažniausia ši moduliacija įgyvendinama pasinaudojus dviem amplitudinėmis moduliacijomis, dviem nešliams, kuriuos skiria 90° fazė viena nuo kitos. Pagrindiniai QAM moduliacijos tipai: 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM (2.7 pav.) [5].



2.7 pav. 16-QAM, 32-QAM ir 64-QAM moduliacijos žvaigždyno išsidėstymai [5]

- OOK (angl. On-off keying) yra viena iš paprasčiausių skaitmeninės amplitudės moduliacijos tipų. Signalas yra persiunčiamas tik, kai loginis skaičius yra 1, o kai loginis skaičius yra 0 – nesiunčiamas signalas. Dėl šios savybės, yra sutaupoma siųstuvo galia.

**IFFT moduliacija.** Šiame bloke, atliekama atvirkštinė Fourjė transformacija pagal algoritmą, kuris yra aprašytas 2.10 formule. Ši operacija atliekama tam, kad OFDM blokai būtų teisingai sumoduliuoti, pasitelkus *Naikvisto* teorema. Pasitelkus šią teorema, atrinkimo dažnis  $f_s$  turėtų atitikti  $f_s > 2 \cdot f_h$  reikalavimams, kur  $f_h$  žymi aukščiausia naudojamą dažnį iš siunčiamo signalo komponentų.

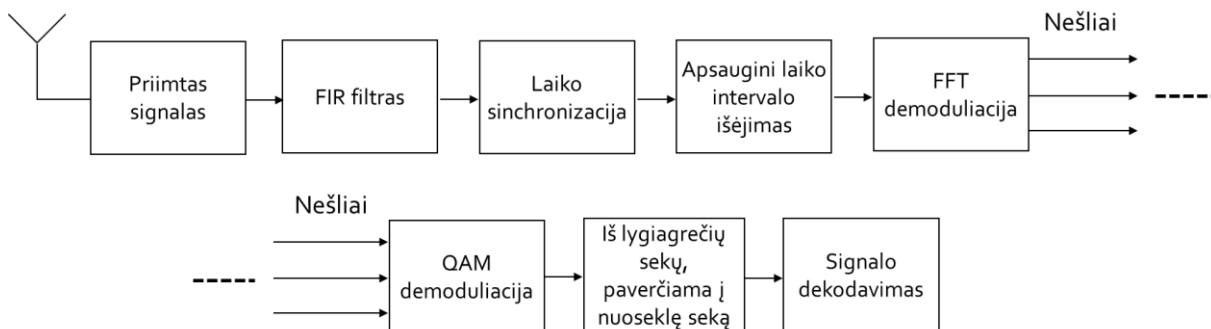
Praktiniams tikslams, rekomenduojama naudoti atrinkimo santykį tarp 3 ar 4, dėl povandeninės terpės sudėtingumo.

**Apsauginis laiko intervalas.** Norint apsisaugoti nuo ISI, būtina įdiegti apsauginį laiko intervalą. Šis laiko intervalas pagrindžiamas nulių užpildymu (angl. *Zero-padding*, ZP), kur visas apsauginis laikas yra užpildomas nuliais. ZP schema pasirenkama, nes ši sistema reikalauja mažiau galios ir yra labiau efektyvesnis sprendimas [5].

**Laiko sinchronizacija.** Laiko sinchronizacijos pagrindinis darbas yra suteikti sistemai galimybę gauti signalą imtuve su teisingu laiku, taip išvengiant kadrų interferencijos. Laiko sinchronizacija sudaro antraštės, kurios pridedamos prie signalo pradžios ir pabaigos. Antraštė išsiunčiama iš siųstuvo su kuo didesne galia, taip užtikrinant, kad imtuve signalas bus priimtas teisingai ir lengviau susinchronizuotų signalą [5].

## 2.5 Signalų priėmimo ir informacijos atstatymo struktūra

Šiame skyriuje aprašomas kiekvienas imtuvo blokas ir jo veikimo principai. Numatomas modelis yra pagrįstas OFDM sistemos technologija (2.8 pav.).



**2.8 pav.** Signalų priėmimo ir informacijos dekodavimo modelis

**Filtrai.** Kai yra priimtas signalas, jis praleidžiamas pro juostinį filtrą, taip sumažinant triukšmų kiekį signalo ir interferencijas. Taip padarant, signalas tampa mažiau apsiukšlintas prieš taikant sinchronizacijos procesą.

**Laiko sinchronizacija.** Sinchronizacija atliekama suskaičiuojant kryžminę koreliaciją tarp išsiųsto signalo ir gauto signalo antraščių. Šei operacijai atlikti, paaimama tam tikra gauto signalo pradžios dalis, kurią sudarytų pradžios antraštė ir kadro dalis. Antraštės signalas pasireiškia su aukšta amplitude, dėl kryžminės koreliacijos. Taip aptinkama signalo duomenų pradžia. Toliau gautas signalas suskaidomas į OFDM kadrus ir tolimesni dekodavimo procesai atliekami [16].

**Apsauginio laiko intervalo išėmimas.** Apsauginis laiko intervalo trukmė yra žinoma, pasitelkus siųstuvo duomenimis, kuri buvo apsirašyta 3.1 skyriuje. Žinant apsaugos laiko intervalą ir jos išsidėstymo laikus, galima pašalinti šias trukmes. Taip gaunama tik tikroji signalo dalis.

**Demoduliacija ir dekodavimas.** Kai gaunamas susinchronizuotas signalas, panaudojamas FFT (angl. *Fast Fourier Transform*) algoritmas, atgauti nešiklių atsiunčiamus simbolius prieš dekodavimą. Jos formulė išreiškia:

$$y(k) = \sum_{l=0}^{N_s-1} S_r(l) \cdot e^{-\frac{j2\pi kl}{N_s}}, k = 0, \dots, N_s - 1 \quad (3.2)$$

čia  $N_s$  – mėginių skaičius per simbolių laiką,  $s_r(l)$  – gautas signalas.

Po demoduliacijos, pradedamas signalo dekodavimas, aptikimo algoritmas, kuris atgauna signalo atskaitos taškus ir taip atgaunamas pilnas signalas.

## 2.6 Informacijos perdavimo ultragarsinėmis bangomis ypatumų apžvalgos išvados

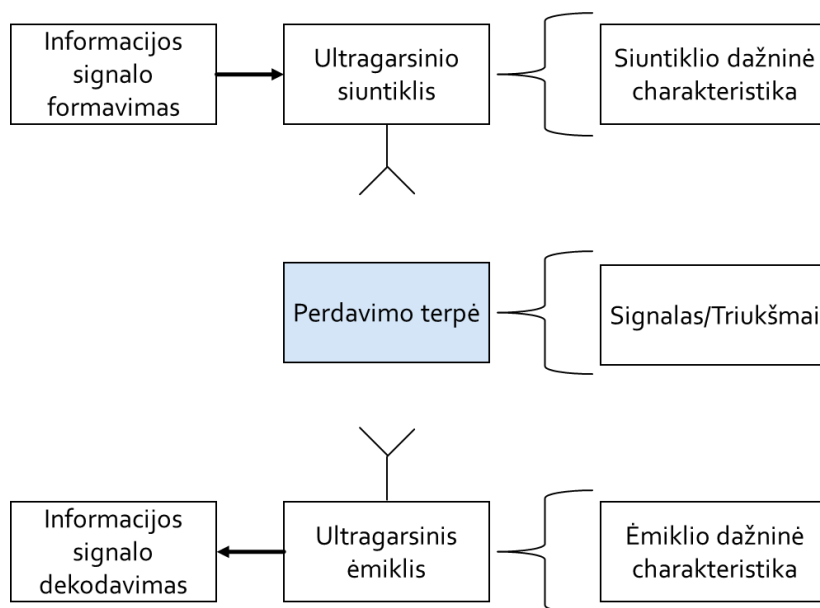
Išanalizavus pagrindines problemas su kuriomis susiduriama ultragarso komunikacijoje povandeninėje terpėje ir kartu išanalizavus informacijos perdavimo atliktus tyrimus, pastebima, kad povandeninė terpė iš tikrųjų yra viena sudėtingiausių terpių beveliai komunikacijai, ir tai reikalauja tolimesnių tyrimų šioje srityje. Pagrindiniai parametrai, kurie įtakoja siunčiamą signalą, sklindantį per vandens terpę yra: vėlinimas, slopinimas (sklaidos ir absorbcijos nuostoliai), triukšmai, Doplerio efektas ir Fedingo efektas.

Labiausiai įtakoiantys parametrai į informacijos perdavimo tikslumą yra ultragarso keitiklio dažnio charakteristika ir triukšmų lygis. Abu šie faktoriai gali smarkiai įtakoti perduodamos informacijos patikimumą. Todėl šio tyrimo tikslas ir bus ištirti, kokią įtaką perduodamos informacijos patikimumui gali turėti ultragarsinių keitiklių dažnių juostos ribotumas, tame tarpe dar ir blogėjant santykiui signalas/triukšmas. Šiai užduočiai atlikti pasitelkiama OFDM technologija, per kurią siųstuvo dalyje, signalas yra suformuojamas ir paruošiamas išsiuntimui, o ėmiklio dalyje – priimamas ir dekoduojamas. Pagal ją, apsirašomas modeliavimo modelis, su kuriuo atliekamas tyrimas.

### 3 INFORMACIJOS PERDAVIMO ULTRAGARSINĖMIS BANGOMIS SISTEMOS MODELIAVIMAS

Telekomunikacijoje, signalui perduoti pasinaudojama moduliacija, persiunčiant skaitmeninio kodo srautą arba akustinį signalą, pasinaudojant dar vieno tipo signalu, kuris gali būti persiųstas fiziškai. Atsižvelgiant į parametrus, kaip atsparumą nuo kanalų poveikio, duomenų perdavimo spartą, reikia tinkamai pasirinkti norimą moduliaciją. Ultragarso komunikacijoje naudojami įvairūs moduliacijos tipai, kaip QPSK, BPSK, QAM ar OOK moduliacijos, bet viena iš populiariausių ir efektingiausių naudojamų moduliacijos tipų, perduodant ultragarsinį signalą povandeninėse terpėse, yra 16-QAM moduliacija. Todėl modeliavime naudojamas 16-QAM moduliacija.

Informacijos perdavimui ultragarsinėmis bangomis sistemos modeliui apibrėžti, pasitelkta OFDM technologija. 3.1 paveikslėlyje nurodomas naudojamas ultragarsinis OFDM sistemos modulis, kuriame nurodoma pagrindinės sistemos modeliavimo dalys: informacinio signalo formavimas, kur pagal užduotus pradinius duomenis modeliuojamas signalas, ultragarsinis siuntiklis, kuriame paruošiamas signalas siuntimui ir jį įtakojantis siuntiklio dažninė charakteristika, perdavimo terpė, kurioje nurodomas signalo/triukšmo santykis, ultragarsinio ėmiklis ir jį įtakojantis ėmiklio dažninė charakteristika ir informacijos signalo dekodavimas, kurioje signalas yra dekoduojamas į duomenis.



**3.1 pav.** Ultragarsinio OFDM siuntimo ir priėmimo sistemos modelis

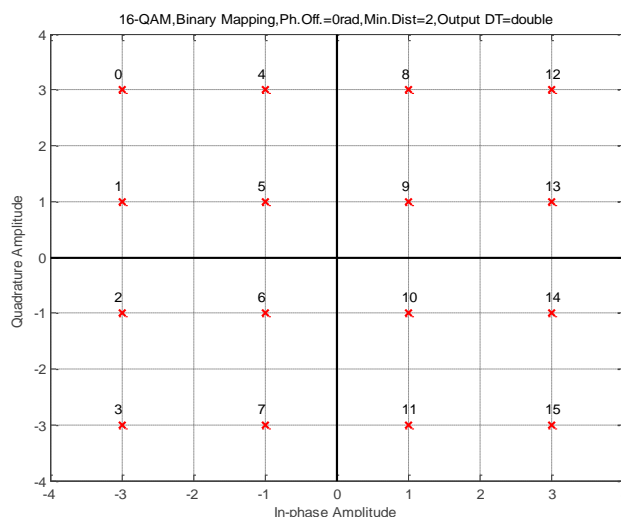
Pasinaudojus apibrėžtu informacinio signalo siuntimo ir ėmiklio modeliu, aprašytu 2.4 ir 2.5 skyriuje, atliekamas sistemos modeliavimas. Šiai moduliacija atlikti, pasitelkta programinė įranga MATLAB, kurioje apibrėžtas modelis. Modeliavimas suskirstomas į tris pagrindines

dalis: signalo formavimo ir siuntimo aprašymas, keitiklių dažninės charakteristikos ir siunčiamos terpės įtaka ir ėmiklio ir signalo dekodavimo aprašymas.

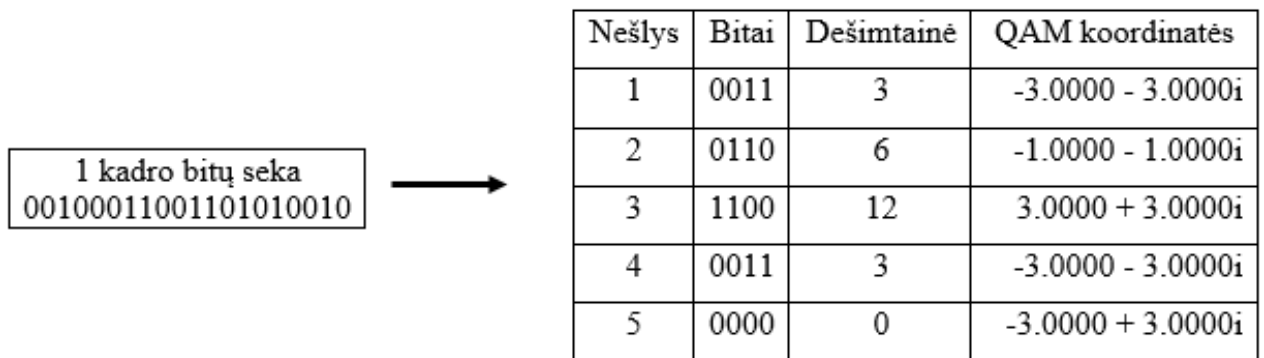
### 3.1 Informacinio signalo formavimo modelis

Pasitelkiant 2.4 skyriuje apsirasytu informacijos siuntimo signalo suformavimo modeliu, apsirashomas veikimo principas su duotais parametrais. Pirmoji uzduotis siustuvo įgyvendinimui yra apsirasyti kintamuosius. Šie kintamieji įrašomi rankiniu būdu, kai paleidžiama programa: naudojamas dažnis; nešlių skaičius  $N_{nst} = 5$  nešliai; OFDM kadro periodas  $T_s = 50$  mikro sekundės; 16-QAM moduliacijos simbolių ilgis  $N_{QAM} = 4$  bitai. Toliau atliekami nustatyti punktai signalo generavimui.

1. Tyrime persiunčiama simbolių seka. Parenkama siunčiamų simbolių seka  $S_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, N_s$ , kur  $N_s$  yra bendras perduodamų simbolių skaičius. Tikslumui apskaičiuoti, naudojama atsitiktinė 100 simbolių seka.
2. Simbolių seka transformuojama į bitinę seką  $S_k \rightarrow B_{kb}$ ,  $kb = 8 \cdot N_s$ . MATLAB programoje, tai atliekama su integruota funkcija  $dec2bin(S_k)$ .
3. Bitinė seka grupuojama į bitų atskiras grupes, kurių ilgiai yra  $N_{step} = N_{QAM} \cdot N_{nst}$ . Galutiniu sprendimu, viename OFDM kadre yra 20 bitų seka.
4. Pasirinkta bitų grupė transformuojama į matricą, kur kiekvienam nešliui priskiriama bitų seka, priklausomai nuo moduliacijos simbolių ilgio  $N_{QAM}$ . Kiekviena bitų seka transformuojama į dešimtinius simbolius ir pasitelkus 16-QAM modeliu (3.2 pav.), nustatoma pasiskirstymo koordinatės nešliams 16-QAM modelyje (3.3 pav.).

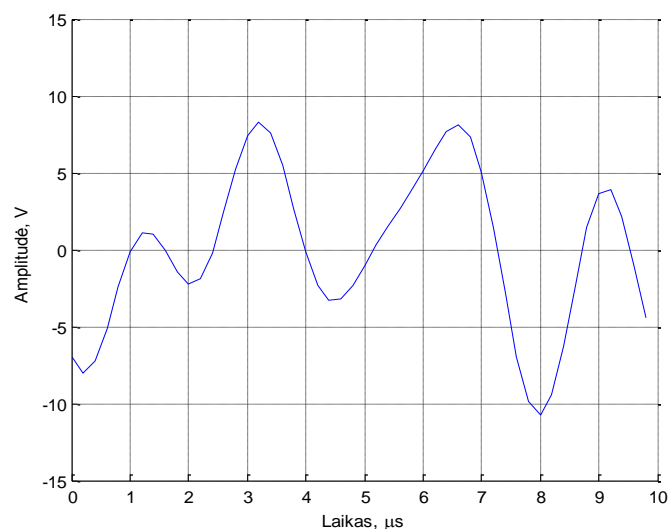


3.2 pav. 16-QAM moduliacijos žvaigždynas



**3.3 pav.** Signalo kadro bitų sekos paskirstymas į nešlius ir 16-QAM žvaigždyno simbolių paskirstymas

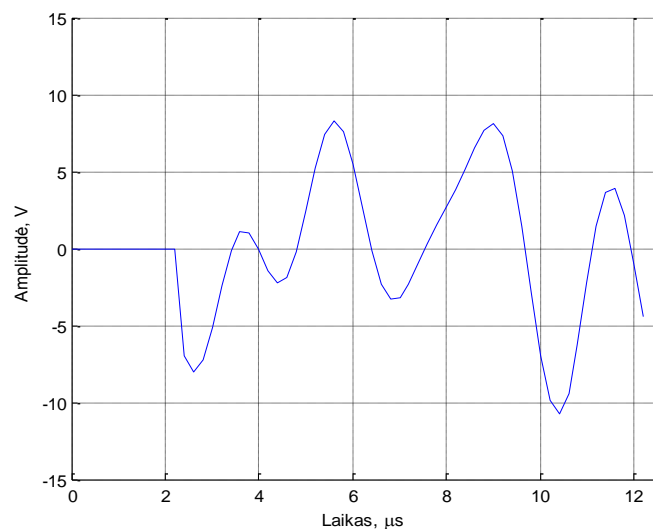
5. Atliekama inversinė greitoji Furjė transformacija  $iff_t(u(t))$  ir sugeneruojamas kadro signalas laikinėje ašyje (3.4 pav.).



**3.4 pav.** Vieno OFDM kadro sugeneruotas signalas

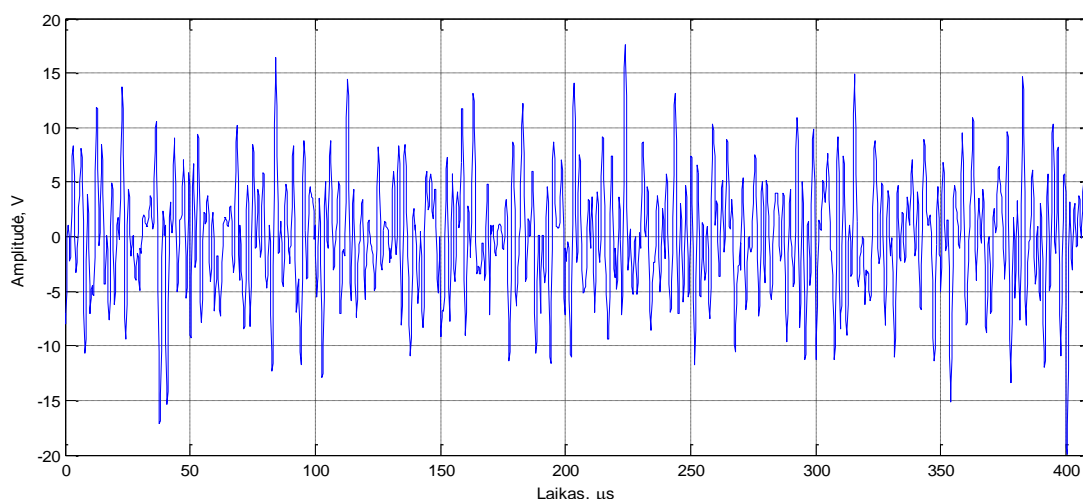
6. Prieš sugeneruotą signalą prijungiamas apsauginis laiko intervalas  $U_k(t) = [T_g u(t)]$ , kurį sudaro  $\frac{1}{4}$  OFDM kadro periodo laikas  $T_g = T_s/4$ . Mūsų sistemoje pasitelkta nulių užpildymu (angl. *Zero padding*, ZP) apsaugos schema, kurioje visą apsauginį laikotarpį sudaro nuliai. OFDM kadro signalo su apsauginio laiko intervalu, atvaizduojame 3.5 paveikslėlyje.





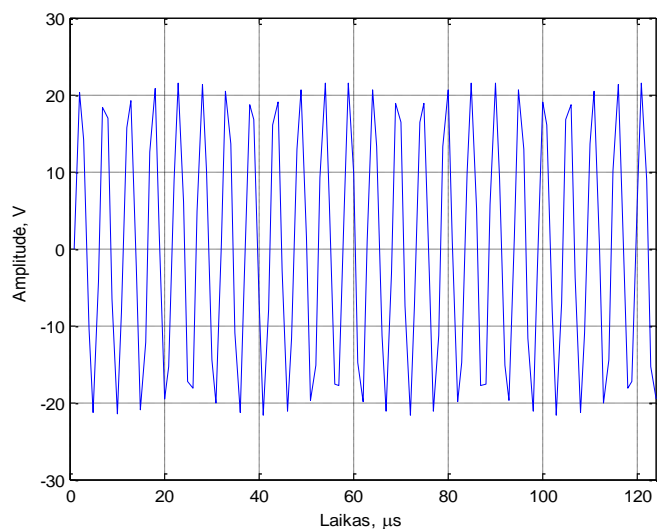
**3.5 pav.** Vieno OFDM kadro sugeneruotas signalas su apsauginiu laiko intervalu

7. Po sugeneruoto pilno kadro signalo, kartojami 3-6 žingsniai likusioms bitų sekoms ir prijungiami paeiliui  $U_{pilnas}(t) = [U_{k1}(t) U_{k2}(t) \dots U_{kN}(t)]$ , kur  $N$  – OFDM kadro skaičius, kol gauname pilnai sujungtą sugeneruotą signalą (3.6 pav.).



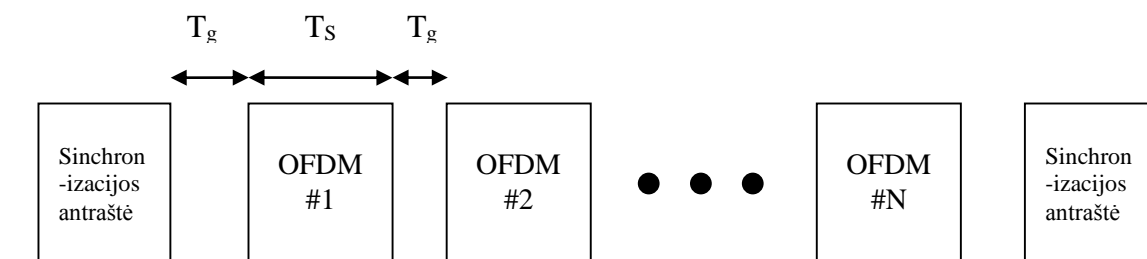
**3.6 pav.** Pilnai sugeneruotas signalas su apsauginiais laiko intervalais

8. Atliekama sinchronizacijos užtikrinimo funkcija. Prie sukurto pilno signalo  $U_{pilnas}(t)$  pridedamos antraštės, signalo pradžioje ir pabaigoje. Antraštę sudaro 124 bitų pseudoatsitiktinė (angl. *Pseudo-random*, PN) seka kvadvatūriškai sumoduluota su centriniu naudojamu dažniu  $f_c$  ir jo trukmė yra dvigubai ilgesnė negu pilno OFDM kadro  $T_A = 2 \cdot (T_S + T_g)$ . Sinchronizacijos antraštės trukmė yra 124 ms (3.7 pav.).

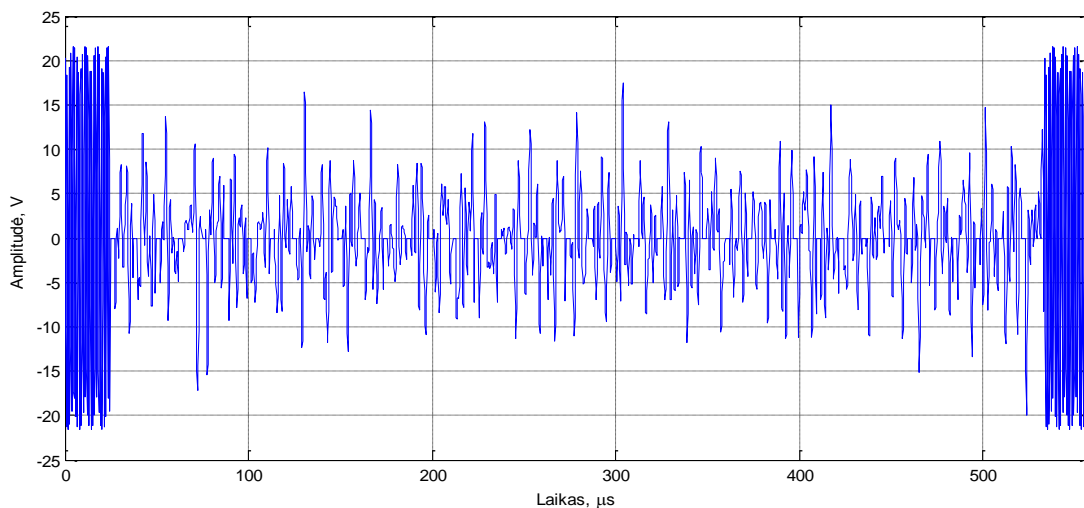


**3.7 pav.** Sugeneruoto antraštės signalas

Pilno siunčiamo signalo pasiskirstymo schema pavaizduota 3.8 paveikslėlyje, o sugeneruoto signalo su prijungtomis sinchronizacijos antraštėmis, atvaizduojama 3.9 paveikslėlyje.

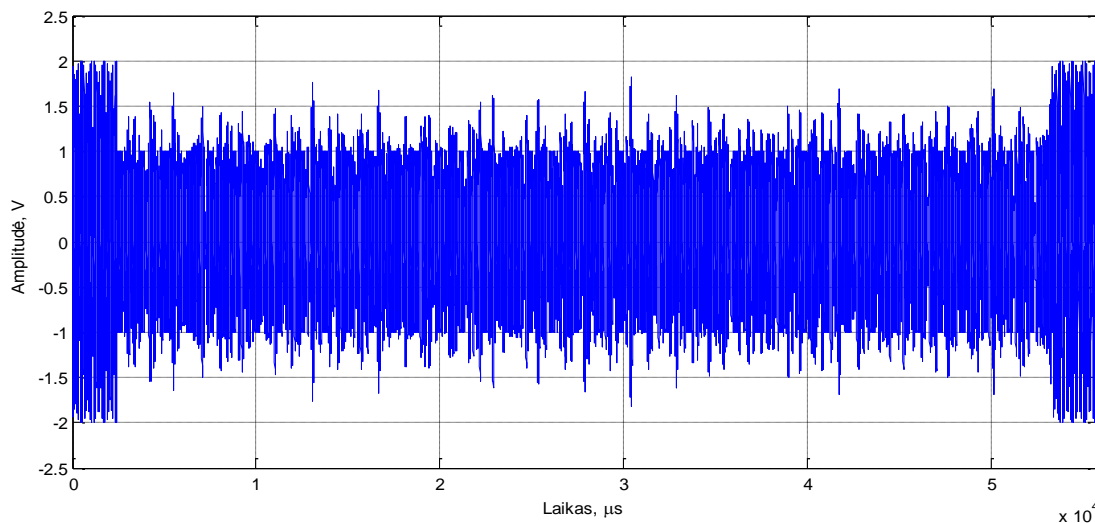


**3.8 pav.** Pilno sumoduliuoto signalo išsidėstymo schema

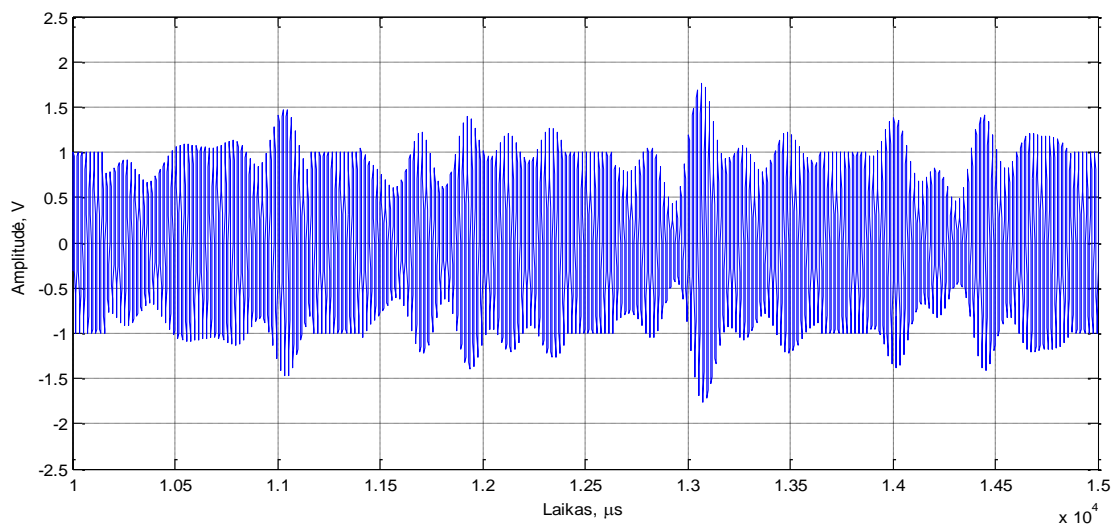


**3.9 pav.** Pilnas sumoduliuotas signalas su sinchronizacijos antraštėmis

9. Galutinis signalas paduodamas į siųstuvą ir yra sumoduliuojamas į pagrindinį nešančią dažnį, naudojant amplitudinę moduliaciją. Gaunamas tikrasis išsiunčiamas signalas  $U(t)$ . Toks signalas pavaizduojamas 3.10 paveikslėlyje ir jo fragmentas 3.11 paveikslėlyje.



**3.10 pav.** Pilnas paruoštas signalas su sumoduliuotu nešančiu dažniu



**3.11 pav.** Fragmentas paruošto signalo su sumoduliuotu nešančiu dažniu

Paruoštas signalas persiunčiamas į imtuvą iš siųstuvo per terpę, kurioje signalas iškraipomas. Pradžioje, modeliavime pasitelkiama, kad signalas sklinda per idealioje terpėje ir nėra paveikiamas išorinių trukdžių.

### 3.2 Informacinio signalo perdavimas ultragarsu modelis

Viena iš pagrindinių problemų perduodant informaciją ultragarsu yra, kad skirtingai nuo elektromagnetinių bangų generavimo technologijų, užtikrinti sistemos plačiajuostiškumą dažnių

srityje yra ženkliai sudėtingiau. Ultragarsinis keitiklis, keičiantis elektrinį signalą į ultragarsinį, faktiškai yra elektromechaninė sistema turinti nesavą rezonansą – tai yra iš principo rezonansiniai, siaurajuosčiai. Ir nors kuriant ultragarsinius keitiklius naudojami įvairūs metodai, tiek mechaniniai (dempferavimas), tiek elektriniai (elektrinis suderinimas) dažnių juostai praplėsti, vis tiek jų juosta išlieka pakankamai ribota.

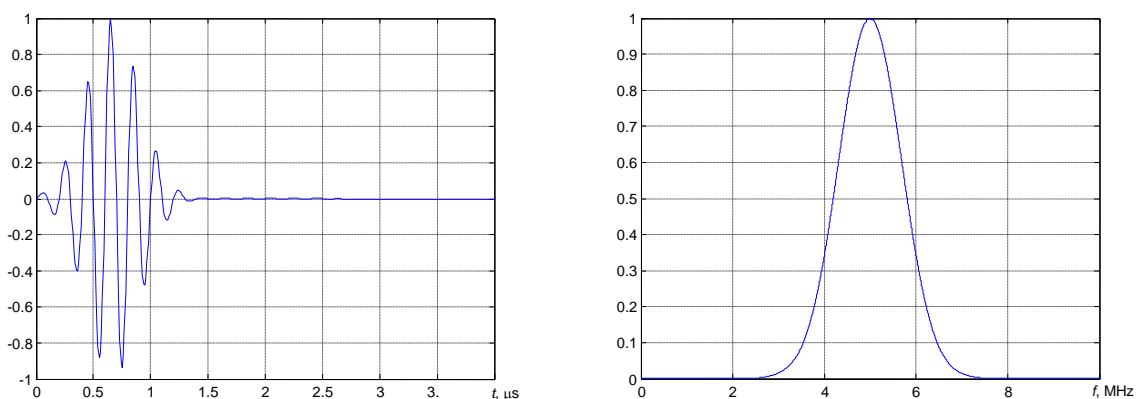
**Ultragarsinio keitiklio dažninė charakteristikos įtaka.** Bendru atveju jei turime pilnai suformuotą signalą (paruoštą siuntimui)  $U(t)$  ir ultragarsinio keitiklio kompleksinę dažninę charakteristiką  $H_{uk}(jf)$ , tai jo bendras poveikis perduodant signalę ir po to priimant, gali būti aprašomas konvoliucija:

$$U_{ul}(t) = \text{real}(\text{FFT}^{-1}\{\text{FFT}[U(t)] * H_{uk}(j \cdot f) \cdot H_{uk}(j \cdot f)\}); \quad (3.1)$$

Šios išraiškos esmė yra tame, kad siunčiamo signalo dažninis spektras lygtai filtruojamas keitiklio dažninės charakteristikos du kartus, pirmiausiai siunčiant, po to priimant. Paprastai priimama, kad keitiklio dažninė charakteristika tiek siuntimo, tiek priėmimo režimuose yra tos pačios. Idealizuota ultragarsinio keitiklio dažninė charakteristika ir ją atitinkantis signalas, parodomas 3.12 pav. Paprastai dažnių juostos plotis nustatomas pagal tam tikrą lygį, tarkime - 6dB arba 0.5 atžvilgiu maksimumo. Šiuo atveju juostos plotis yra apie  $\Delta f=1.6\text{MHz}$ . Tačiau nurodant juosto plotį absoliutiniais dažnio vienetais, nesigauna tikslus įvertis, kadangi prie žemesnių dažnių toks plotis bus labai ženklus, iš kitos pusės, prie aukštesnių jis gali būti skaitomas labai siauru. Todėl juostos plotis nusakomas santykiniais vienetais (procentais) atžvilgiu centrinio dažnio.

$$\Delta f_{\%} = \frac{\Delta f}{f_0} \cdot 100\% ; \quad (3.2)$$

Pasirinktu atveju  $f_0=5\text{MHz}$ , todėl juostos plotis yra 32%.



**3.12 pav.** Idealizuotas 5 MHz keitiklio signalas (kairinis grafikas) ir jo dažninis spektras (dešininis grafikas)

Reikia įvertinti ir tai, kad kuo platesnis dažnių spektras, juo trapesnį signalą (su mažesniu periodų skaičiumi) gali išspinduliuoti keitiklis. Tyrimuose buvo daroma prielaida, kad didžiausią įtaką informacijos patikimumui daro keitiklio dažninės charakteristikos juostos plotis.

**Signalas/triukšmas santykis.** Ultragarsiniai bangai sklindant per terpę, signalą visą laiką įtakoja triukšmai, jei sklindant, blogėja santykis signalas/triukšmas. Šiuo atveju, triukšmams pritaikyti, naudojama funkcija, kuri iškraipo signalą atsitiktiniuose taškuose,

$$U_{\text{triukš}} = U(t) + K_{s/t} * n(t) \quad (3.3)$$

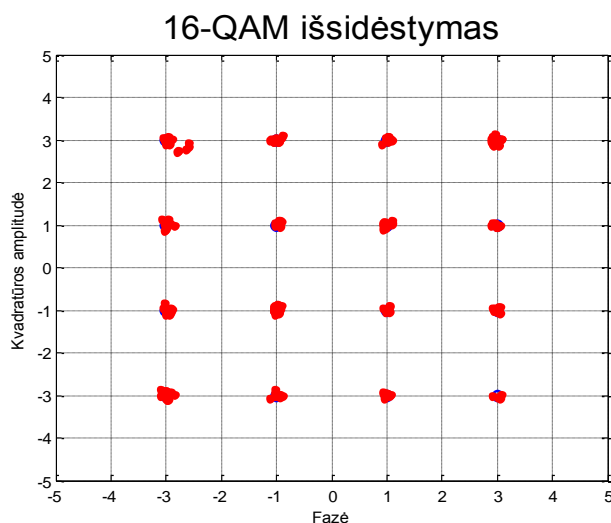
kur  $K_{s/t}$  yra triukšmo daugiklis ir  $n(t)$  – triukšmo sąlyga.

### 3.3 Informacinio signalo priėmimo ir informacijos atkūrimo modelis

Šiame skyriuje aprašoma kaip aptinkamas gautas signalas iš siųstuvo ir dekoduoja, išanalizuojame ir apsirąšome veikimo principus. Modeliavimas atliekamas pasitelkus signalo priėmimo modeliu, kuris atvaizduojamas 2.8 schemeje, kuriame atliekama priimto signalo atkūrimo funkcijos. Veikimo modeliavimo principui, signalas sklinda per idealę terpę ir nepaveikiamas išorinių triukšmų. Tai reiškia, kad imtuve gaunamas toks pats signalas koks buvo išsiunčiamas (3.10 pav.).

1. Gautą signalą demoduliuojame, panaikinant nešantį signalą iš gauto signalo. Tam pasinaudojama  $Hilbert(U(t))$  funkcija. Gaunamas 3.9 paveikslėlio signalas.
2. Imtuvui priėmus signalą iš siųstuvo, atliekama sinchronizacijos funkcija, kuri aptinka tikrojo signalo pradžią. Pirmojo kadro aptikimui paimama pakankamai didesnė signalo dalis, kuri apimtų pradinę sinchronizacijos antraštę ir pirmuosius OFDM kadrus. Šitam laiko diapazone ieškoma minimalių taškų, kurie nusako pirmojo kadro apsauginį laiko intervalą. Aptikę jį, sužinoma tikrojo signalo pradžią.
3. Žinant tikslų OFDM kadro laiko intervalą  $T_S + T_g$ , gautą signalą galima skaidyti į dalis  $Y_N(t)$ , kur N – kadro skaičius, ir pradėti atlikti demoduliacijos procesą.
4. Iš gauto OFDM kadro, išimamas apsauginis laiko intervalas  $Y_{T_N}(t) = [T_g; Y_N(t)]$  ir gauname tikroji signalo dalį, kaip pavaizduota 3.4 paveikslėlyje.
5. Atliekama greitoji Furjė transformacija  $Y_{fft_N} = fft(Y_{T_N})$ , paverčiant signalą iš laikinės ašies į dažninę. Atliekant  $Y_{dem_N} = 2 * (Y_{fft_N}(N_{nsl})/T_S)$  funkcija, gaunami OFDM kadro signalo 16-QAM simboliai.
6. Atliekama atvirkštinė informacijos signalo formavimo 4 punkto dalis. Gautus 16-QAM simbolius atvaizduojame 16-QAM moduliacijos žvaigždyne ir dekoduojame į

dešimtainius skaičius, ir galutinai į bitinę seką, pasinaudojus  $dec2bin(Si_k)$  funkcija. Signalo 16-QAM moduliacijos žvaigždyno išsidėstymas atvaizduojamas 3.13 paveikslėlyje.



**3.13 pav.** Pilnai priimto signalo, su papildomais triukšmais, 16-QAM moduliacijos žvaigždyno išsidėstymas

7. Kartojami 3-6 punktai ir jungiamos gautos bitų sekos paeiliui  $Si = [Si_1 Si_2 \dots Si_N]$ , kur  $N$  – OFDM kadro skaičius, kol gaunama viso signalo bitų seka  $Si$ .
8. Turint viso signalo bitų seką, dekoduojamas visas signalas į simbolius. Kiekvieną simbolį sudaro 8 bitai, tai dekoduojami  $Si$  bitai kas 8 žingsnius  $Si_{simb}(k_{simb}) = bin2dec(Si_k)$ , kur  $k_{simb} = 1, 2, \dots N_s$  ir  $k = 0, 8, 16, \dots Si$ , kol gauname visą simbolių seką. Galutinai susumuojami visi simboliai  $S_S = [Si_{simb}(1) Si_{simb}(2) \dots Si_{simb}(N_s)]$ , gaunant priimtą dekodotą signalą.

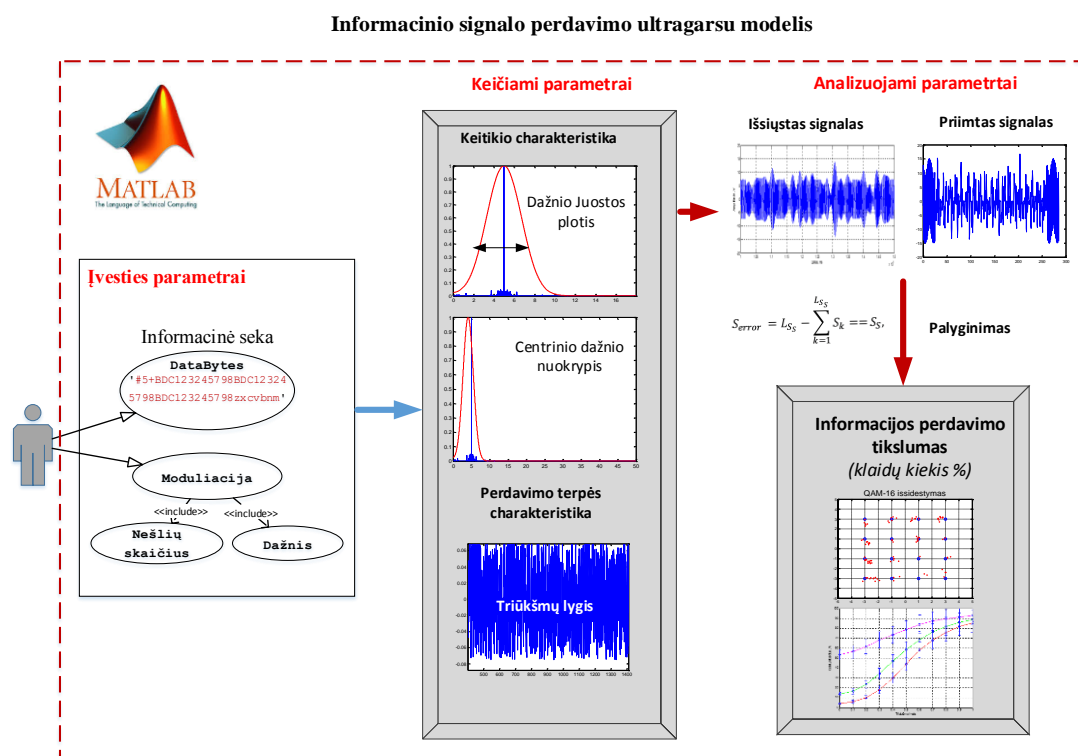
### 3.4 Informacijos perdavimo ultragarsinėmis bangomis sistemos išvados

Sukurta informacijos perdavimo ultragarsinėmis bangomis sistema, kuri leidžia imituoti siunčiamą signalą, įterpią pageidaujamus signalo pakitimus ir dekoduoja imtuvė. Sukurtas skaitmeninis modelis, kurio paskirtis leisti ištirti išsiųstos informacijos tikslumą, naudojant ultragarsiniu signalu, perteikiant signalą per keitiklio charakteristikos pakitimų funkcijas ir įtakojančius triukšmus, taip leidžiant įvertinti komunikacijos charakteristikas. Modeliavimas apsirąšomas ir atliekamas pasitelkus Matlab aplinkoje sukurtą modelį.

## 4 INFORMACIJOS PERDAVIMO MODELIAVIMAS SKLINDANČIOJE TERPĖJE

Šiame skyriuje pateikiami atlikto modeliavimo rezultatai. Atliekant tyrimus atskirai buvo vertinama ultragarsinio keitiklio charakteristikos įtaka siunčiamam signalui, kai kinta ultragarsinio keitiklio centrinis dažnis nuokrypis ir spektro plotis, kartu įvertinama triukšmų įtaka signalui. Po to atliekama grupinė įtaka signalui, kai siunčiamas signalas yra paveikiamas ultragarsinio keitiklio charakteristikos pakitimais ir kartu įtakojančiais triukšmais.

Sudarius informacijos signalo perdavimo ultragarsinėmis bangomis modeliavimo modelį, informacijos perdavimo tikslumui iširti, kuris pavaizduotas 4.1 paveikslėlyje, įvedus nustatytus parametrus ir paleidus modeliavimo programą, gauname signalo išskrypimo rezultatus, iš kurių atvaizduojame 16-QAM simbolių žvaigždyną ir klaidų skaičiaus priklausomybę nuo keičiamų parametrų.



**4.1 pav.** Informacijos signalo perdavimo ultragarsinėmis bangomis modeliavimo modelis, informacijos perdavimo tikslumui iširti

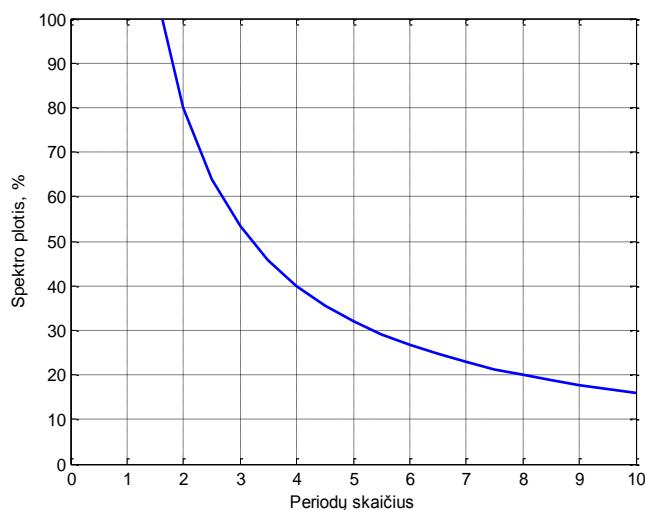
Tiksliai įvertinti jų įtaka signalui, imtume suskaičiuojama signalui sukeltos klaidos. Klaidų skaičius suskaičiuojamas, lyginant paimant siųstuve išsiunčiamą simbolių seką ir palyginus ją su priėmimo gauta simbolių seką. Jei simboliai nesutampa, tai skaitoma kaip klaida.

$$S_{error} = L_{SS} - \sum_{k=1}^{L_{SS}} S_k == S_S, \quad (4.1)$$

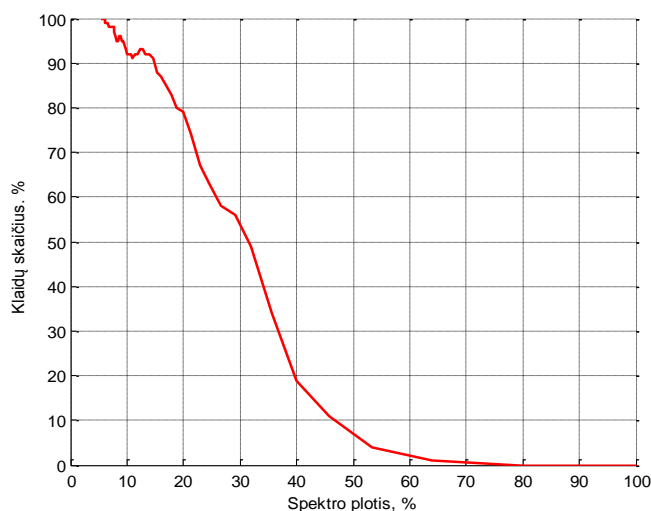
čia  $L_{SS}$ - simbolių skaičius,  $S_k$  – siunčiama simbolių seką,  $S_S$  – priimta ir dekoduoja simbolių seką.

## 4.1 Ultragarso keitiklio dažnio juostos pločio įtaka

Pagal 3.2 skyriaus apsirašytu informacijos signalo perdavimo ultragarsu modeliu, atliekama ultragarso keitiklio dažnio juostos pločio įtaka signalui. Kaip buvo minėta anksčiau, ultragarsiniai keitikliai yra kaip rezonansinė sistema, turinti ribotą pločio dažninio charakteristiką. Laikinėje srityje, dažnių juostos plotis siejasi su bendra ultragarsinio signalo trukme. Kuo siauresnis ultragarsinio keitiklio dažnio spektras, tuo ilgiau jis „skamba“, tai yra, sugeneruotas signalas turi daugiau periodų. Tyrimuose naudoti spektrų pločiai ir jiems atitinkantys signalų ilgių periodų skaičiumi yra pateikti 4.2 paveikslėlyje. Tyrimuose naudoti spektrų pločiai ir jiems atitinkantys signalų ilgių periodai, bei gautas klaidų skaičius, yra pateikti 4.1 lentelėje ir jų rezultatus nubrėžiame 4.3 paveikslėlyje.



4.2 pav. Ultragarsinio keitiklio spektro juostos plotis ir jį atitinkantys signalo ilgio periodai



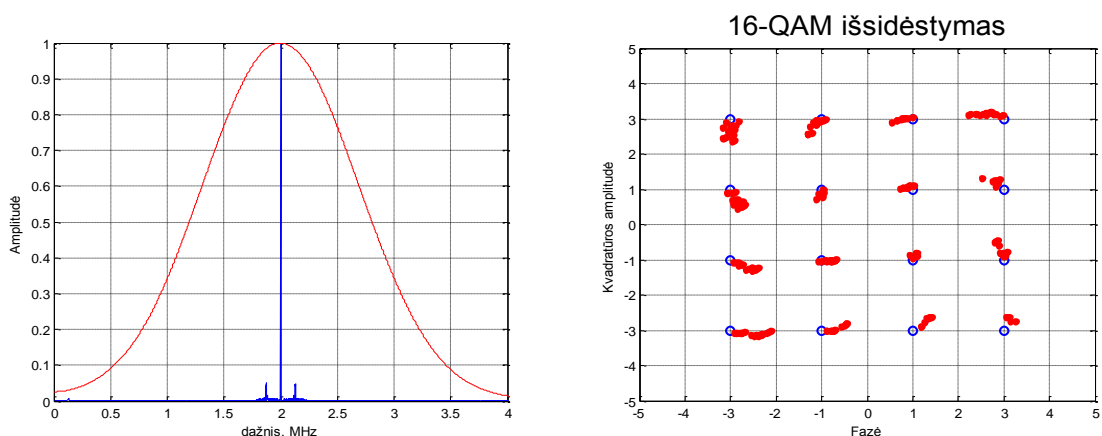
4.3 pav. Klaidų priklausomybė nuo ultragarsinio keitiklio dažninio juostos pločio kitimo



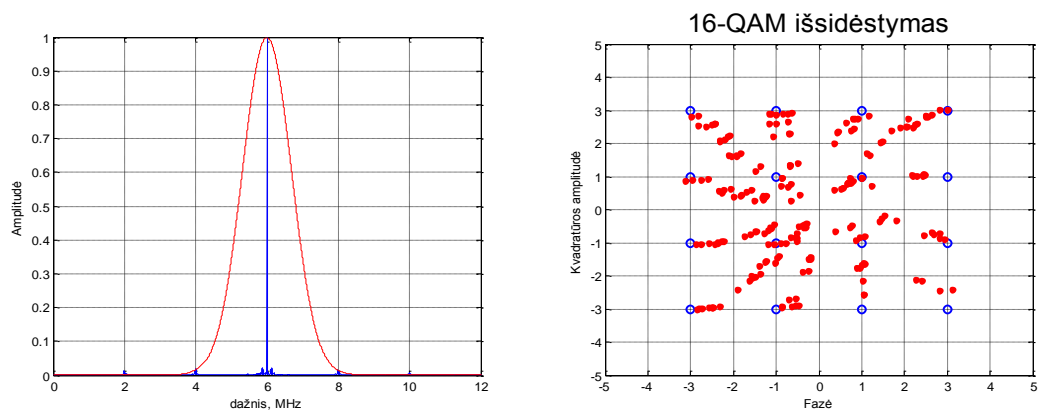
**4.1 lentelės.** Klaidų kiekio priklausomybė nuo keitiklio dažnių spektro juostos pločio

Periodų skaičius ultragarsiniame signale	Ultragarinio keitiklio dažnių juostos plotis, procentais (%)	Klaidų skaičius, %
2	80	0
2.5	64	1
3	53.3	4
3.5	45.7	11
4	40	19
4.5	35.6	34
5	32	49
5.5	29.1	56
6	26.7	58
6.5	24.6	63
7	22.9	67
7.5	21.3	74
8	20	79
8.5	18.8	80
9	17.8	83
9.5	16.8	85
10	16	87

Pastebima iš 4.1 lentelės ir 4.2-4.3 pav., kad šiose sąlygose, gaunami optimaliausi rezultatai su 4% klaidų kiekiu, kai ultragarinio keitiklio dažnio juosta nesiekia 53,3 %, Naudojant mažesnio dažnio juostą, drąstiškai didėja klaidų kiekis. 4.4 ir 4.5 paveikslėliuose atvaizduojama keitiklio dažnio juostos pločio pakitimai ir 16-QAM simbolių išsidėstymas, kai dažnio juostos plotis yra mažinamas.



**4.4 pav.** Signalų dažnio spektras ir 16-QAM simbolių išsidėstymas, kai keitiklio dažnio juostos plotis yra 80 %. Klaidų skaičius lygus 0%.

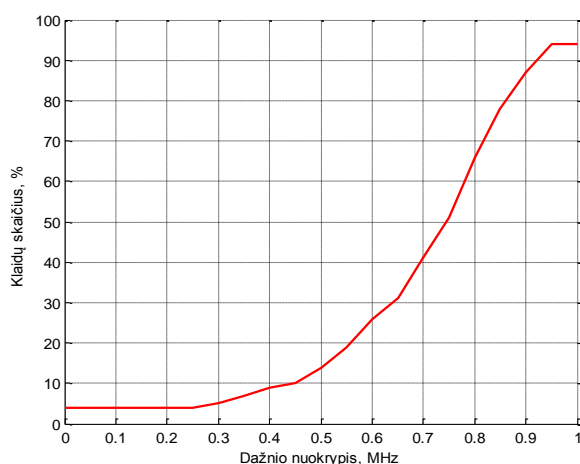


**4.5 pav.** Signalų dažnio spektras ir 16-QAM simbolių išsidėstymas, kai keitiklio dažnio juostos plotis yra 26.7 %. Klaidų skaičius lygus 58%.

## 4.2 Ultragarsinio keitiklio centrinio dažnio nuokrypis

Norint tinkamai aptikti dažnių spektrą, keitiklio dažnio spektras turi centralizuotis su gauto signalo dažnio juosta. Nesutapimai gali pašalinti reikalingą informaciją ir taip gaunamas nepilnas signalas, kas išsireiškia kaip klaidos.

Išanalizuojame klaidų skaičių, kai ultragarsinio keitiklio dažnio spektro juosta yra nukrypusi nuo sugeneruoto signalo nešančio dažnio juostos centro. Nešantis dažnis pernešą sugeneruotą signalą naudojant 5 MHz dažnį. Keitiklio dažnio spektras nukrypimas kinta kas 0.05 MHz  $df = 0.0, 0.05, 0.10 \dots 1.0 \text{ MHz}$ . Pagal atliktus optimaliausių ultragarso keitiklio spektro pločio pakitimų modeliavimo rezultatus, pasitelkta naudoti optimaliausia keitiklio dažnio juostos plotį 53.3%, su turimu klaidų skaičiumi 4% (4.1 lentelė). Klaidų skaičiaus priklausomybė nuo ultragarsinio keitiklio centrinio dažnio pakitimo rezultatai pateikiami 4.2 lentelėje ir atvaizduojami 4.6 paveikslėlyje.

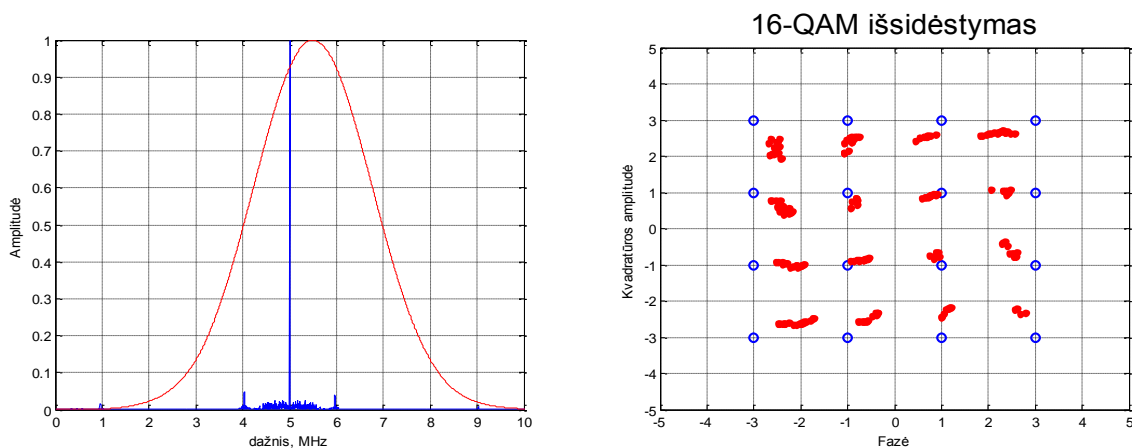


**4.6 pav.** Klaidų priklausomybė nuo ultragarsinio keitiklio dažnio nukrypimo nuo nešančio centrinio dažnio, esant bendram keitiklio dažnio juostos pločiui 53.3%

**4.2 lentelės.** Klaidų priklausomybė nuo ultragarso keitiklio centrinio dažnio pakitimo

Ultragarso keitiklio centrinis dažnis, MHz	Ultragarso keitiklio centrinis dažnio nuokrypis nuo nešančio dažnio, MHz	Klaidų skaičius, %
5	0.0	4.0
5.05	0.05	4.0
5.1	0.1	4.0
5.15	0.15	4.0
5.2	0.2	4.0
5.25	0.25	4.0
5.3	0.3	5.0
5.35	0.35	7.0
5.4	0.4	9.0
5.45	0.45	10.0
5.5	0.5	14.0
5.55	0.55	19.0
5.6	0.6	26.0
5.65	0.65	31.0
5.7	0.7	41.0
5.75	0.75	51.0
5.8	0.8	66.0
5.85	0.85	78.0
5.9	0.9	87.0
5.95	0.95	94.0
6	1.0	94.0

Apžvelgiant rezultatus gautus 4.2 lentelėje, galima daryti prielaidą, kad ultragarso keitiklio centrinis dažnis gali turėti mažą paklaidą, nesukeliant per daug klaidų. Aišku, modeliavimu atveju nėra įtakojami papildomi triukšmai. 4.7 paveikslėlyje pateikiama ultragarso keitiklio dažnio nukrypimas nuo nešančio dažnio centro. Atliekant ultragarso keitiklio centrinio dažnio nukrypimo tyrimą, buvo naudojamas 53.3 % juostos plotis, su kuriuo pasireiškia 4 % klaidų skaičius, todėl reikia įvertinti gautus rezultatus su juostos pločio rezultatais



**4.7 pav.** Klaidų priklausomybė nuo ultragarsinio keitiklio dažnio nukrypimo nuo nešančio centrinio dažnio ir 16-QAM simbolių išsidėstymas, kai keitiklio centrinis dažnis 5.5 MHz.

Klaidų skaičius 14 %

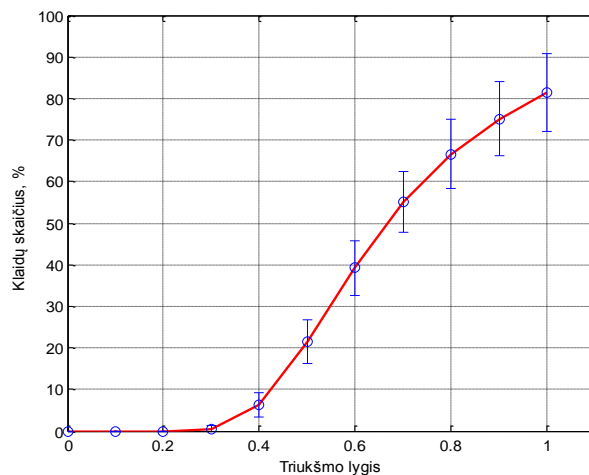
### 4.3 Signalas / triukšmas santykio įtaka

Tiriant triukšmų įtaka imtuve, prie siunčiamo signalo pridedami atsitiktiniai triukšmai, kurie iškraipo signalą atsitiktiniuose taškuose. Triukšmams pritaikyti, naudojama funkcija apsirasyta 3.2 skyriuje (3.3 formulė). Triukšmų lygio stiprumas  $K_{s/t}$  kinta nuo 0 iki 1, didinant stiprumą kas 0.1. Vienam triukšmo lygiui atliekamas 100 siuntimų bandymų ir paimamas jo vidurkis. Vidutinį klaidų skaičių priklausomai nuo triukšmo lygio, pateikiame 4.3 lentelėje.

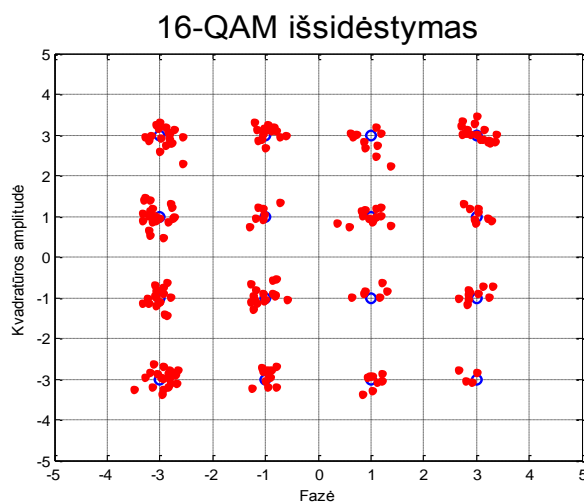
**4.3 lentelė.** Vidutinis klaidų skaičius procentaliai, priklausomai nuo triukšmo lygio  $K_{s/t}$

Triukšmo lygis $K_{s/t}$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Vidutinis klaidų skaičius, %	0	0	0	0.44	6.22	21.47	39.24	55.19	66.64	75.12	81.40

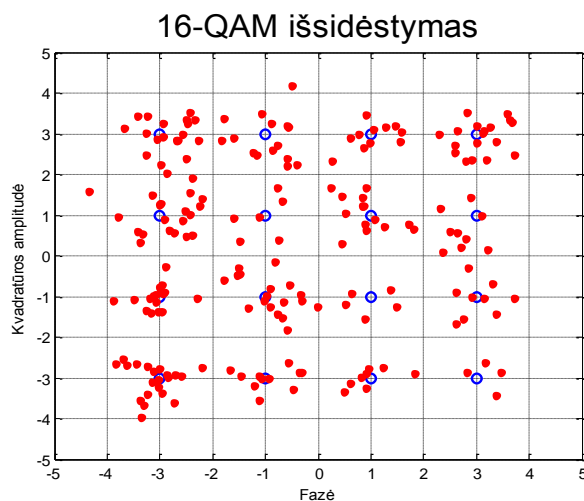
4.8 paveikslėlyje pateikiama klaidų priklausomybė nuo triukšmo lygio su klaidų juostomis. Pastebima, kad nuo 0.3 triukšmų lygio, pradeda susidaryti klaidos dekoduoiant signalą. 16-QAM simbolių pasiskirstymą galima apžvelgti paveikslėliuose 4.9 – 4.12 ir galima pastebėti, kaip triukšmų lygis įtakoja taškų pasiskirstymą.



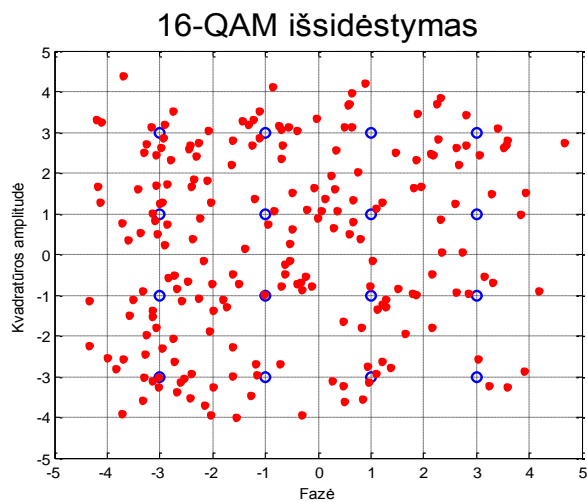
4.8 pav. Klaidų priklausomybė nuo triukšmo lygio ( su paklaidomis)



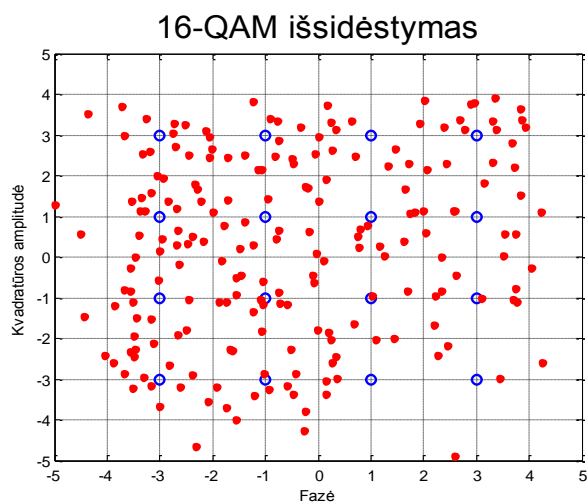
4.9 pav. 16-QAM simbolių pasiskirstymas su 0.2 triukšmo lygiu. Klaidų skaičius 0 %



4.10 pav. QAM simbolių pasiskirstymas su 0.4 triukšmo lygiu. Klaidų skaičius 6.22 %



**4.11 pav.** QAM simbolių pasiskirstymas su 0.6 triukšmo lygiu. Klaidų skaičius 39.24 %

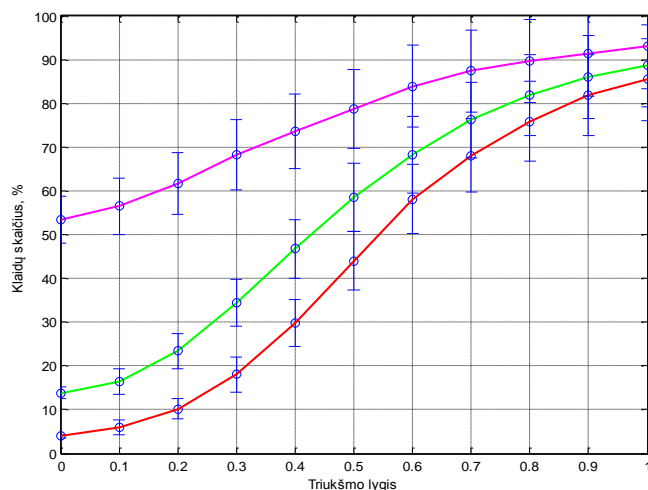


**4.12 pav.** QAM simbolių pasiskirstymas su 0.8 triukšmo lygiu. Klaidų skaičius 66.64 %

Modeliuojame abiejų ultragarsinio keitiklio dažnio charakteristikos ir triukšmų įtaka sugeneruotam signalui. Kinta ultragarsinio keitiklio centrinis dažnis, kas 0.25 MHz iki 0.75 MHz nuo priimto signalo centrinio dažnio ir triukšmų lygio stiprumas  $K_{s/t}$  kinta nuo 0 iki 1, didinant stiprumą kas 0.1. Vienam triukšmo lygiui atliekamas 100 siuntimų bandymų ir paimamas jo vidurkis. Rezultatai pateikiami 4.4 lentelėje ir pateikiame jos priklausomybę grafiškai (4.13 pav.).

**4.4 lentelė.** Vidutinis klaidų skaičius procentais, priklausomai nuo triukšmo lygio  $K_{s/t}$ , bei ultragarso keitiklio centrinio dažnio.

Triukšmo lygis $K_{s/t}$	Vidutinis klaidų skaičius, kai keitiklio centrinis dažnis nuokrypis 0.25 MHz, %	Vidutinis klaidų skaičius, kai keitiklio centrinio dažnio nuokrypis 0.5 MHz, %	Vidutinis klaidų skaičius, kai keitiklio centrinio dažnio nuokrypis 0.75 MHz, %
0	3.96	13.86	53.46
0.1	5.97	16.52	56.49
0.2	10.2	23.36	61.73
0.3	18.01	34.49	68.28
0.4	29.8	46.78	73.64
0.5	44.01	58.6	78.74
0.6	58.05	68.17	83.9
0.7	68.08	76.2	87.4
0.8	75.91	81.85	89.63
0.9	81.85	86.09	91.27
1.0	85.44	88.62	93.06



**4.13 pav.** Klaidų priklausomybė keičiant ultragarso keitiklio centrinių dažnių nuokrypį (raudona – 0.25 MHz; žalia – 0.5 MHz; violetinė – 0.75 MHz) ir triukšmo lygį. Nurodytas vidutinis klaidų skaičius ir standartinis nuokrypis

Iš rezultatų galima pastebėti, kad kai ultragarso keitiklio centrinis dažnis pasislinka nuo signalo centrinio dažnio tik 0.25 MHz, tai nelabai neįtakoja klaidų skaičių tiek daug ir galutinai, rezultatai yra panašūs į 4.2 lentelėje gautais rezultatais, tik be papildomų ultragarsinio keitiklių trukdžių. Didinant ultragarsinio keitiklio centrinių dažnių, rezultatai sutampa su 4.2 lentelėje pateiktais rezultatais, kurie nusako pradinį klaidų lygį.

#### 4.4 Rezultatų išvados

Tiriant ultragarsinio keitiklio dažnio juostos pločio įtaką, iširta, kad signalo klaidos pradeda pasireikšti, kai keitiklio dažnių juostos plotis yra mažesnis negu 64% imtinai. Optimaliausias sprendimas yra naudoti didesnę kaip 53.3 % juostos plotį, kurioje pasireikšta 4% klaidų kiekis. Naudojant mažesnę juostos plotį, klaidų kiekis stipriai išauga.

Atliekant tyrimus, kai ultragarsinio keitiklio centrinis dažnis yra nukrypęs nuo siunčiamo signalo centrinio dažnio, pastebima, kad klaidos pradeda pasireikšti, kai keitiklio centrinis dažnis yra nukrypęs 0.3 MHz arba daugiau. Atliekant ultragarsinio keitiklio centrinio dažnio nukrypimo tyrimą, buvo pastebėta, kad pačioj pradžioje pasireiškia 4 % klaidų skaičius, kadangi yra naudojamas 53.3 % juostos plotis. Todėl reikia įvertinti gautus rezultatus su juostos pločio rezultatais.

Tiriant triukšmų įtaka signalui, buvo atliekama 100 bandymų su skirtingais signalo/triukšmo santykiais, didinant santykį tarp jų nuosekliai ir išvedamas klaidų vidurkis. Klaidos prasideda pasireikšti, kai signalas/triukšmo santykis viršija 0.3 ir klaidų kiekis nuosekliai didėjo, kas 16 % imtinai. Apžvelgiant signalo 16-QAM žvaigždyno pasiskirstymą su skirtingais signalo/triukšmo santykiais, simboliai pasiskirsto netolygiai, kai triukšmo santykis didesnis negu 0.6.



## 5 IŠVADOS

1. Atlikus ultragarso tyrimų apžvalgą, pastebėta, kad parametrai, labiausiai įtakojantys į informacijos perdavimo tikslumą yra ultragarso keitiklio dažnio charakteristika ir triukšmų lygis.
2. Atlikta egzistuojančių informacijos perdavimo tyrimų apžvalga atskleidė, kad nors informacijos perdavimo ultragarsu technologijos yra naudojamos, tačiau mokslinių tyrimų skirtų perdavimo tikslumo analizei ir tikslumo priklausomybei nuo įvairių parametų, sutinkama labai mažai.
3. Tikslumo tyrimams atlikti buvo sudarytas skaitmeninis modelis, įgalinantis sugeneruoti signalus pagal OFDM technologiją, o taip pat atlikti perdavimo tikslumo tyrimus, įvedant iškraipymus sąlygotus ultragarsinių keitiklių charakteristikų ir pernašos terpės trukdžių parametų.
4. Naudojant sudarytą modelį, ištirta perdavimo tikslumo priklausomybė nuo ultragarsinių keitiklių dažninės juostos pločio, centrinio dažnio nuokrypio, bei įvairaus lygio santykio signalas/triukšmas. Buvo nustatyta, kad pasirinkus leistiną klaidų skaičių 4%, ultragarsinio keitiklio dažnio juostos plotis turi būti ne mažesnis kaip 53 %, centrinio dažnio nukrypimas neturi viršyti 0.35 MHz, o signalo/triukšmo santykis neturi viršyti daugiau nei 0.35.

## 6 INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. Laura Dubreuil Vall, Milica Stojanovic, „Towards Underwater Video Transmission“, 2011. Interneto prieiga:  
<http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12587/thesis.pdf?sequence=1>
2. Jaime Lloret, Sandra Sendra, Miguel Ardid, Joel J. P. C. Rodrigues, „Underwater Wireless Sensor Communications in the 2.4 GHz ISM Frequency Band“, Kovo 28 2012. Interneto prieiga:  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3355409/>
3. M. Martins, „High Data Rate Acoustic Modem for Underwater Applications“, Rugsėjo 2014. Interneto prieiga:  
[https://www.researchgate.net/publication/270049665\\_High\\_Data\\_Rate\\_Acoustic\\_Modem\\_for\\_Underwater\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/270049665_High_Data_Rate_Acoustic_Modem_for_Underwater_Applications)
4. Jagdale M.R., Puranik V.G., „FPGA based Underwater System for Ultrasound Communication“ Liepos 2016. Interneto prieiga:  
<http://www.ijsr.net/archive/v4i5/SUB154444.pdf>
5. Jordi Ribas, Milica Stojanovic, „Underwater Wireless Video Transmission using Acoustic OFDM“, Gruodžio 27 2009. Interneto prieiga:  
<http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/8801/thesis.pdf>
6. Jordi Ribas, Daniel Sura, Milica Stojanovic, „Underwater Wireless Video Transmission for Supervisory Control and Inspection using Acoustic OFDM“, 1 puslapis, 2009. Interneto prieiga:  
<http://web.mit.edu/millitsa/www/resources/pdfs/oc11-jordi.pdf>
7. Tae-Hee Won, Sung-Joon Park, „Design and Implementation of an Omni-Directional Underwater Acoustic Micro-Modem Based on a Low-Power Micro-Controller Unit“, Vasario 20 2012. Interneto prieiga:  
[www.mdpi.com/1424-8220/12/2/2309](http://www.mdpi.com/1424-8220/12/2/2309)
8. Costas Pelekanakis, Milica Stojanovic, Lee Freitag, „High Rate Acoustic Link for Underwater Video Transmission“, Rugsėjo 22 2003, 1-7 puslapiai. Interneto prieiga:  
<http://www.mit.edu/~millitsa/resources/pdfs/costas.pdf>
9. M.Martins, Gil Lopes, Fernando Ribeiro, „Underwater acoustic modem with streaming video capabilities“, Ocean-Genova, 2-7 puslapiai, Kovo 2015 . Interneto prieiga:  
[https://www.researchgate.net/publication/283906504\\_Underwater\\_acoustic\\_modem\\_with\\_streaming\\_video\\_capabilities](https://www.researchgate.net/publication/283906504_Underwater_acoustic_modem_with_streaming_video_capabilities)
10. Marcos Silva Martins, „Ultrasonic Wireless Broadband Communication System for

- Underwater Applications“, Rugsėjo 2013. Interneto prieiga:  
[https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/28861/1/Tese\\_Marcos%20Silva%20Martins\\_2013.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/28861/1/Tese_Marcos%20Silva%20Martins_2013.pdf)
11. Lurton, Xavier, „An Introduction to Underwater Acoustics. Chapter 2: Underwater acoustic wave propagation“, 2010. Interneto prieiga:  
[http://www.springer.com/cda/content/document/cda\\_downloaddocument/9783540784807-c1.pdf?SGWID=0-0-45-970850-p173940109](http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9783540784807-c1.pdf?SGWID=0-0-45-970850-p173940109)
  12. Jun-Jong Cui, Jiejun Kong, Mario Gerla, Shengli Zhou, „Challenges: Building Scalable and Distributed Underwater Wireless Sensor Networks (UWSNs) for Aquatic Applications“, Rugsėjo 2005. Interneto prieiga:  
[http://www.cse.uconn.edu/~jcui/UWSN\\_papers/UCONN\\_CSE\\_UbiNet-TR05-02.pdf](http://www.cse.uconn.edu/~jcui/UWSN_papers/UCONN_CSE_UbiNet-TR05-02.pdf)
  13. I. Vasilescu, K. Kotay, D. Rus, M. Dunbabin, P. Corke, „Data Collection, Storage, and Retrieval with an Underwater Sensor Network“, Lapkričio 2 2005. Interneto prieiga:  
<http://web.stanford.edu/class/cs344a/papers/p154-vasilescu.pdf>
  14. M. Martins, V. Correia, J. M. Cabral, S. Lanceros-Mendez, „Optimization of piezoelectric ultrasound emitter transducers for underwater communications“, Sausio 27 2012. Interneto prieiga:  
<http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/19949/1/Optimization%2520of%2520Opiezoelectric%2520ultrasound%2520emitter%2520transducers%2520for%2520underwater.pdf>
  15. Frank M. Caimi, Donna M. Kocak, Fraser Dalgleish, John Watson, „Underwater Imaging and Optics: Recent Advances“, Rugsėjo 18 2008. Interneto prieiga:  
<http://www.oceanicengineering.org/history/080530-004.pdf>
  16. Mine Merve Yuksel, „Underwater acoustic modem using OFDM“, Sausio 2012. Interneto prieiga:  
<https://pdfs.semanticscholar.org/6dca/6c3ed641fb0f88c00a83e67662800235ee1a.pdf>
  17. Johannes du Preez, „An investigation into OFDM as a suitable modulation technique for an acoustic underwater modem“, Gruodžio 2012. Interneto prieiga:  
[https://scholar.sun.ac.za/bitstream/handle/10019.1/71806/dupreez\\_investigation\\_2012.df?sequence=1](https://scholar.sun.ac.za/bitstream/handle/10019.1/71806/dupreez_investigation_2012.df?sequence=1)
  18. Nusrat Newsheen, Craig Benson, Michael Frater, „A high data-rate, software-defined underwater acoustic modem“, Rugsėjo 20 2010. Interneto prieiga:  
<http://ieeexplore.ieee.org/document/5664474/>
  19. Teledyne Benthos, „Underwater acoustic modems“. Interneto prieiga:  
[http://teledynebenthos.com/product\\_dashboard/acoustic\\_modems](http://teledynebenthos.com/product_dashboard/acoustic_modems)

20. LinkQuest Inc., „Underwater Acoustic Modem Models“.Interneto prieiga:  
<http://www.link-quest.com/html/models1.htm>
21. Evo Logics, „Underwater Acoustic Modems“.Interneto prieiga:  
[https://www.evologics.de/en/products/acoustics/s2cm\\_series.html](https://www.evologics.de/en/products/acoustics/s2cm_series.html)
22. Gregersen, Svein Erik Sondervik, „An OFDM-system for Underwater Communication“, Birželio 5 2007.Interneto prieiga:  
<https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2369065>
23. Salvador Climent, Antonio Sanchez, Juan Vicente Capella, Nirvana Meratnia, Juan Jose Serrano, „Underwater Acoustic Wireless Sensor Networks: Advances and Future Trends in Physical, MAC and Routing Layers“, Sausio 6 2013.Interneto prieiga:  
<http://www.mdpi.com/1424-8220/14/1/795>