

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ARTURAS ALEKSANDROVAS

**LAISVAI PASIRENKAMOS TRUKMĖS IR POZICIJOS  
IMPULSŲ SEKOS ULTRAGARSINĖMS  
VIZUALIZACIJOS IR MATAVIMO SISTEMOMS**

Daktaro disertacijos santrauka  
Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

2018, Kaunas

Disertacija rengta 2013–2017 metais Kauno technologijos universiteto Elektros ir elektronikos fakulteto Elektronikos inžinerijos katedroje.

**Mokslinis vadovas:**

Prof. dr. Linas SVILAINIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T)

**Mokslinis konsultantas:**

Doc. dr. Alberto RODRIGUEZ MARTINEZ (Elčės Migelio Hernandeso universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T)

**Redagavo:** Laurita Venslavičiūtė

**Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:**

Prof. dr. Liudas MAŽEIKA (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T) – **pirmininkas**;

Dr. Jorge CAMACHO (Ispanijos mokslų tarybos Informacijos ir fizikinių technologijų institutas, Ispanija, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T);

Prof. dr. Vaidotas MAROZAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T);

Dr. Luca DE MARCHI (Bolonijos universitetas, Italija, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T);

Prof. dr. Dangirutis NAVIKAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Disertacija bus ginama viešame Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2018 m. spalio 31 d. 11 val. Kauno technologijos universiteto Disertacijų gynimų salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73-403, 44249 Kaunas, Lietuva.

Tel. (370) 37 300 042; faks. (370) 37 324 144; el. paštas [doktorantura@ktu.lt](mailto:doktorantura@ktu.lt).

Disertacijos santrauka išsiųsta 2018 m. rugsėjo 28 d.

Su disertacija galima susipažinti internetinėje svetainėje <http://ktu.edu> ir Kauno technologijos universiteto bibliotekoje (K. Donelaičio g. 20, 44239 Kaunas).

## IVADAS

### Nagrinėjamos problemos aktualumas

Ultragarso bangos plačiai taikomos neardomuosiuose bandymuose (NDT), medicinoje, medžiagų savybių tyrimuose, skysčių ir dujų srauto matavimuose (2), taip pat kontroliuojant maisto kokybę ir daugelyje kitų sričių. Išskirtini šie pranašumai: nenaudojama jonizuojančioji spinduliuotė, ultragarso bangos tiesiogiai sąveikauja su medžiagų mechaninėmis savybėmis, gali prasiskverbti į metalus ir neskaidrias medžiagas, reikalinga įranga yra nebrangi, naudoja mažai energijos, santykinai lengva ir mažų gabaritų.

Galima išskirti dvi pagrindines ultragarso taikymo sritis: matavimus ir vizualizaciją. Parametrų svarba kokybei kiekvienoje srityje skirtinga. Matavimo metu informacija apie tiriamus objektus gaunama iš signalo sklidimo trukmės, atspindžio amplitudės ar ultragarso bangų slopinimo medžiagoje. Kalbant apie ultragarso taikymą vizualizacijai, atspindžių intensyvumas ir jų padėtis laike nurodo defektų arba nehomogeniškumo vietą ir dydį.

Reikia paminėti, kad ultragaras turi keletą trūkumų: sklidimo metu signalai slopinami, keičia sklidimo modą, yra sąlygojami difrakcijos, dispersijos, rezonansinių reiškinių, kinta jų spektrinis turinys (3). Spektro turinio kitimą sukelia ne tik sklidimo terpė, bet ir ultragarsiniai keitikliai. Be to, zondavimo signalo spektrinis turinys ir dažnio komponentių pasiskirstymas laike taip pat netolygūs, todėl signalo ir triukšmo santykis (angl. SNR – *Signal to Noise Ratio*) blogėja ir yra nevienodas skirtingoms spektrinėms komponentėms. Paminėtina, kad ultragarsinės vizualizacijos bei matavimo kokybė priklauso nuo priimto signalo. Dauguma ultragarsinių sistemų naudoja paprastus signalus, tokius kaip impulsą arba radijo impulsą, nes šie signalai yra lengvai generuojami, rezultatai lengviau interpretuojami, tačiau pastarieji pasižymi arba energijos trūkumu arba siaura dažnių juosta. Skleisto spektro (SS) signalai (4) šių trūkumų neturi. Skleisto spektro (lyginant su paprastais) signalų taikymas teikia šiuos pranašumus:

- geresnis SNR gali būti pasiektas didinant žadinimo signalo trukmę, kartu neprarandant pralaidos juostos;
- spektro forma yra valdoma, kai tuo metu paprastų signalų spektro forma fiksuota (angl. *sinc*) (9);
- nuostolių kompensavimas leidžia išplėsti dažnių juostą (už keitiklio pralaidos juostos) ar pasiekti glotnią dažninę charakteristiką.

Šiuo metu naudojami SS signalai gali būti suskirstyti į tris tipus: laisvai pasirenkamos formos signalai, dažniu moduluoti ar faze manipuluotos sekos (6). Reikia paminėti, kad SS signalai taip pat turi tam tikrų trūkumų, susijusių su jų ilgiu, dinaminiu diapazonu, spektro tolygumu bei spektrinio turinio valdymu. Kalbant apie jų ilgį, SS signalai turi būti didesnės trukmės tam, kad būtų pasiekta norima energija, dėl to atspindžiai gali persidengti net ir labai retai išdėstyti atspindžių atveju (7). Kita vertus, vizualizacijos dinaminį diapazoną (kontrastą),

lemia šoninių koreliacinių lapelių lygis, tiksliau – šoninių lapelių santykis su pagrindiniu lapeliu, o daugelis SS signalų, ypač trumpi, būtent pasižymi aukštesniu šoninių lapelių lygiu. Pavyzdžiui, faze manipuluotų sekų signalai teikia geras ortogonalumo savybes, kurios svarbios duomenų surinkimo greičiui, tačiau šių signalų spektro forma bei plotis fiksuoti, o pats spektras nėra plokščias, mažesnio ilgio kodų šoniniai lapeliai aukšti (8). Dažniu moduluoti SS, ypač netiesinės moduliacijos, teikia puikias galimybes spektro formai valdyti, tačiau pasižymi aukštu koreliacinių lapelių lygiu. Priežastis – stačiakampė signalo gaubtinė: dėl kompozicijos su *sinc* funkcija, dažnių srityje atsiranda spektro bangavimas. Panaudojus gaubtinės moduliaciją (Hamming, Hann, Tukey) spektro bangavimas gali būti gerokai sumažintas, tačiau tokiu atveju mažėja žadinimo efektyvumas bei reikia sudėtingos elektronikos. Netiesinės moduliacijos signalų spektro valdymas sudėtingas – tiesioginis sprendinys neegzistuoja, todėl taikomi apytikriai atvirkštiniai sprendimai (9).

Dar viena svarbi problema yra susijusi su zondavimo signalų generavimu. Dauguma prieš tai paminėtų signalų yra analoginiai, t. y. jiems generuoti reikalingas greitaigis keitiklis kodas-analogas bei tiesinis, didelės galios stiprintuvas, galintis dirbti apkrautas talpine apkrova. Populiarejant keitiklių gardelių naudojimui, duomenų surinkimo sistemoje tokių žadinimo generatorių reikia labai daug. Tačiau toks žadinimas nėra ekonomiškas, įranga brangi, jos gabaritai ir svoris dideli. Taip prarandamas esminis ultragarsinių sistemų privalumas – portabilumas, maži įrangos gabaritai bei kaina. Analizuojant stačiakampius signalus išskiriami šie, jų teikiami, privalumai: 1) generatoriai yra paprastesni ir įrangos kaina yra mažesnė; 2) didesnis našumas, t. y. mažesnis šilumos išskyrimas ir ilgesnis baterijos tarnavimo laikas; 3) mažesni gabaritai bei svoris, t. y. savybės itin reikalingos nešiojamai, portatyviai įrangai. Be šių privalumų, šie stačiakampiai signalai turi ir tam tikrų trūkumų: didelis spektro netolygumas (2), didelis koreliacinių lapelių lygis.

### **Tyrimo tikslas ir uždaviniai**

Daktaro **disertacijos tikslas** – sukurti naujus signalus, kurie išspręstų įprastinių skleisto spektro signalų problemas bei iširti šių signalų teikiamą naudą ultragarsinėje vizualizacijoje bei matavimuose.

Darbo tikslui pasiekti suformuluoti **uždaviniai**:

1. išanalizuoti įprastinius žadinimo signalus, naudojamus ultragarsinėje vizualizacijoje ir matavimuose bei atskleisti šių signalų trūkumus ir pageidautinas išsaugoti naudingąsias savybes; parinkti taikomuosius uždavinius, kuriuose aiškiausiai matoma gaunama nauda;
2. pasiūlyti naują stačiakampio formos žadinimo signalų tipą, pašalinantį įprastinių signalų trūkumus; sukurti šių signalų optimizavimo metodiką; išskirti signalų savybes, kurios būtų naudojamos kaip konvergavimo

- kriterijus; pasiūlyti sekos generavimo algoritmą, nesudėtingą sistemos perdavimo modelį greitam optimizavimui;
3. ištirti naujų signalų teikiamą naudą remiantis atrinktais kriterijais.
  4. atskleisti naujų signalų teikiamą naudą ultragarsinėje vizualizacijoje bei matavimuose.

### **Mokslinis naujumas**

1. Šiame darbe pasiūlyti naujo tipo stačiakampio žadinimo SS signalai: laisvai pasirenkamos trukmės bei pozicijos impulsų sekos (angl. APWP – *Arbitrary Position and Width Pulse trains*).
2. Įprasta, kad SS signalų taikymas signalo neoptimizuoja, todėl jis nėra priderintas nei prie naudojamų keitiklių, nei prie elektronikos ar tiriamos medžiagos. Todėl siūlomas naujas požiūris – APWP sekos optimizuojamos įvertinant visos sistemos perdavimo funkciją, tokiu būdu sustiprinant pageidaujamas signalų savybes, pvz. koreliacinius lapelius, dažnių juostą ar spektro formą.
3. Optimizacijos procesui pagreitinti pasiūlyta naudoti ne realią sistemą, o paprastą signalo perdavimo modelį, kuris optimizavimą padaro virtualų (t. y. operatyvesnį), taip užtikrinant stabilias konvergavimo sąlygas.
4. Sukurtos ir išbandytos trys optimizavimo procedūros, grįstos *Monte Carlo* metodu, genetiniais algoritmais bei kombinuota. Geriausias našumas nustatytas naudojantis kombinuota procedūra, kuomet pradinės sąlygos gaunamos iš suderinto, netiesinės dažnio moduliacijos, SS signalo, o tuomet atliekamas impulsų trukmės optimizavimas.

### **Praktinė tyrimo reikšmė**

1. Darbe pasiūlyti naujo tipo skleistos spektro signalai, suteikiantys tiek platų dažnių diapazoną, tiek energiją. Signalai pasižymi koreliacinių savybių ir spektro formos valdymo savybe. Sudėtinga žadinimo elektronika nėra būtina. Kadangi yra optimizuojami įvertinant sistemos perdavimo funkciją, šie signalai apjungia naudingąsias stačiakampių impulsų bei skleistos spektro signalų savybes.
2. Ultragarsinių matavimų rezultatų kokybę lemia priimto signalo energija, dažnių juostos plotis bei koreliacinės savybės. Paprasti signalai (impulsas, radijo impulsas, šuolis) vienu metu neužtikrina energijos ir dažnių juostos pločio, tačiau pasižymi puikiais laikinomis savybėmis. Jie nesuteikia spektro formos valdymo (faze manipuluotos m-sekos, tiesinė dažnio moduliacija), negali valdyti koreliacinių savybių arba jiems reikalinga sudėtinga žadinimo įranga (laisvai pasirenkamos formos signalai). Darbe pasiūlyti signalai teikia dažnių juostos valdymą neprarandant energijos, turi valdomas koreliacines savybes ir jų žadinimui nereikia sudėtingos elektronikos.

3. Siūloni signalai teikia naujų savybių sklidimo laiko matavimo sistemose: navigacijoje, anemometrijoje, matuojant srautą, atstumą, storį ar medžiagos savybes. Dėl platesnės dažnių juostos, didesnio signalo ir triukšmo santykio, geresnio spūdumo, mažesnių koreliacinių lapelių APWP signalai suteikia galimybę pagerinti matavimo kokybę.
4. Darbo rezultatai pritaikomi vizualizacijoje: dėl platesnio spektro gaunama geresnė skyra, o mažesni šoniniai lapeliai bei didesnis signalo ir triukšmo santykis leidžia padidinti ultragarsinių vaizdų kontrastą.
5. Signalai yra itin veiksmingi spektroskopijoje, kuomet siekiama maksimalios spektro aprėpties, jo glotnumo bei tolygaus signalo ir triukšmo santykio matavimo dažnių ruože.

Disertacijoje pateikiami tyrimų rezultatai panaudoti moksliniams uždaviniams spręsti šiuose tarptautiniuose projektuose:

- „Novel spread spectrum technologies in digital ultrasonic systems / ULTRASPREAD“. Finansuotas Lietuvos mokslo tarybos (Nr. MIP-058/2012).
- „Smart mechatronics technologies and solutions for processing effectiveness and environment care: from materials to tools / In-Smart“. Finansuotas Europos Sąjungos struktūrinių fondų (Nr. VP1-3.1-ŠMM-10-V-02-012).
- „Adaptive deconvolution algorithms for ultrasonic measurements / ADECON“. Kauno technologijos universiteto tarpšritis projektas (Nr. PP41/1501).
- MTEP sutartis su UAB SCiL Baltic „Electronics prototype for tank leakage detection using ultrasound“.
- MTEP sutartis su Miguel Hernandez universitetu (Spain) „Prototype development of ultrasonic spread spectrum excitation data acquisition system“.

## **Rezultatų aprobavimas**

Doktorantūros studijų metu gauti mokslinių tyrimų rezultatai paskelbti 22 publikacijose: iš jų 6 straipsniai leidiniuose, įrašytuose į Mokslinės informacijos instituto (ISI Web of Science) referuojamų leidinių sąrašą, turinčiuose citavimo indeksą, 2 straipsniai referuojamuose leidiniuose, neturinčiuose citavimo indekso, 14 publikacijų tarptautinių konferencijų medžiagose, kurios buvo pristatytos: Bukarešte (Rumunija), Mece (Prancūzija), Varšuvoje (Lenkija), Prahėje (Čekija), Gente (Belgija), Berlyne (Vokietija), Atėnuose (Graikija), Sofijoje (Bulgarija), Dresdene (Vokietija), Madride (Ispanija), Caparica (Portugalija). Rezultatai taip pat pristatyti Lietuvoje vykusiose konferencijose Vilniuje, Palangoje. Darbą 2013–2017 metais rėmė Lietuvos mokslo taryba, skirdama konkursinį doktorantūros vietos finansavimą. 2016 metais atlikta mokslinė praktika Miguel Hernandez (Elčė, Ispanija) universitete, finansuota ERSASMUS+ programos.

## **Ginti pateikiami rezultatai**

1. Parodyti įprastinių žadinimo signalų trūkumai:
  - tiek impulso, tiek radijo impulso signalai tuo pačiu metu neužtikrina energijos ir juostos pločio;
  - PSK signalų spektro forma ir juostos plotis yra fiksuoti; tiesinės dažnio moduliacijos signalų spektro forma fiksuota, o koreliaciniai lapeliai aukšti;
  - netiesinės dažnio moduliacijos signalams su glotnia gaubtine ar laisvai pasirenkamos formos signalams generuoti reikalinga sudėtinga žadinimo elektronika.
2. Pasiūlyta naudoti APWP signalus juos optimizuojant pagal sistemos (keitiklių, elektronikos) perdavimo funkciją. Kaip konvergavimo kriterijus pasirenkamos pageidaujamos signalo savybės: santykinis šoninių koreliacinės funkcijos lapelių dydis (tiek RF tiek gaubtinei), santykinė triukšmo atsarga, pagrindinio koreliacinio lapelio plotis, efektinis spektro plotis ar spektro forma, tolygumas.
3. Optimizuoti APWP signalai teikia geresnius kokybės parametrus:
  - APWP signalais pasiekiamas šoninių lapelių lygio reguliavimas;
  - erdvinė APWP signalų skyra palyginama su LFM signalais;
  - APWP signalų efektyvumas iteratyvios dekompozicijos atveju, kai atspindžio signalai itin arti, palyginamas su LFM, o esant didesniam atstumui, APWP signalų efektyvumas lenkia kitus;
  - APWP signalai leidžia konstruoti sudėtingos formos spektrą, todėl gali būti naudojami arba pralaidos dažnių ruožui išplėsti arba spektro nuostoliams kompensuoti;
  - APWP signalai nenaudoja moduliacijos (kaip PSK signalai), todėl gaunamas didesnis lankstumas spektro koncentracijai pralaidos juostoje, išlaikant kitus kokybės parametrus.
4. Parodyta APWP signalų nauda vizualizacijoje bei matavimuose:
  - gali būti sumažintos sisteminės srauto matavimo paklaidos (nulinio greičio temperatūros dreifas);
  - santykinė triukšmo atsarga gali būti padidinta net ir naudojant siaurajuosčius keitiklius;
  - gali būti išplėstas spektroskopijai pageidautinas spektro plotis (t. y. platesnis medžiagų savybių bei storio matavimų diapazonas) ir pagerintas matavimų tikslumas (dėl geresnio modelio atitikimo);
  - pagerintas dekompozicijos efektyvumas.

## Disertacijos struktūra

Daktaro disertaciją sudaro įvadas, penki skyriai, išvados, literatūros šaltinių ir autoriaus publikacijų sąrašas. Bendra disertacijos apimtis – 132 puslapiai, kuriuose yra pateikti 144 paveikslai, 73 matematinės formulės, 11 lentelių ir 100 literatūros šaltinių sąrašas. Disertacija suskirstyta į skyrius.

1. Pirmajame skyriuje pateikiama išsami klasikinių signalų analizė, skirta išaiškinti jų trūkumus ir privalumus.
2. Antrajame skyriuje pateikiamos klasikinių skleistos spektro signalų taikymo sritys siekiant išsiaiškinti šių signalų privalumus bei iškilusias problemas.
3. Trečiajame skyriuje pateikiama APWP signalų optimizavimo metodika. Suformuluojami APWP signalų kokybės vertinimo kriterijai, pateikiamas APWP sekų generavimo algoritmas bei sistemos perdavimo modelis.
4. Ketvirtajame skyriuje pateikiama eksperimentinė APWP signalų kokybės vertinimo analizė.
5. Penktajame skyriuje pateikiama APWP signalų taikymo ultragarsinėse vizualizacijose ir matavimuose pridėtinė vertė.



## 1. ĮPRASTINIŲ SIGNALŲ ANALIZĖ

Ultragarsinio signalo sklaidimo laiko įvertis plačiai taikomas matuojant medžiagos storį bei tiriant medžiagų savybes, taip pat atliekant atstumo, temperatūros, įtempių, skysčių srauto greičio matavimus bei technologinių procesų monitoringui. Atsitiktinių sklaidimo laiko paklaidų analizė remiasi Cramer-Rao žemutine paklaidos riba (CRLB) (10). Čia tiek impulso, tiek radijo impulso signalai pasižymi esminiu trūkumu: efektinio juostos pločio  $F_e$  bei energijos sandauga yra mažas (paprastai 1–2), fiksuotas dydis. T. y., jeigu impulso trukmė mažinama siekiant didesnio  $F_e$ , gaunama mažesnė energija. Siekiant mažinti paklaidas,  $F_e$  turėtų būti didinamas. Paminėtina, kad efektinis juostos plotis  $F_e$  yra signalo centrinio dažnio  $f_0$  ir gaubtinės juostos pločio  $\beta$  kvadratų sumos šaknis. Įvertinus, kad  $\beta$  dažniausiai yra gerokai mažesnis  $f_0$ ,  $F_e$  stipriausiai sąlygojamas  $f_0$ , t. y. pakanka didinti  $f_0$ . Aukštesnio dažnio keitikliui reikalinga mažesnė impulso trukmė – energija mažėja, taip pat ją tenka paskirstyti platesnėje dažnio juostoje, nes keitiklio pralaidos dažnių ruožas priklauso nuo  $f_0$ . Kita problema, susijusi su žadinimo generatoriumi – maksimalus darbo dažnis ribojamas signalo augimo greičio. Jeigu, siekiant didesnės signalo energijos, didinama amplitudė, fronto trukmė ilgėja ir pasiekiamas dažnis tampa dar žemesnis, todėl impulsui sudėtinga užtikrinti signalo ir triukšmo santykį tuo metu, kai didinamas darbo dažnis.

Dar vienas impulso ar eksponentinio šuolio signalų trūkumas – šių signalų energija koncentruota žemų dažnių srityje, todėl neatitinka ultragarsinio keitiklio pralaidos juostos – dalis energijos yra už juostos ribų. Radijo impulsas leidžia pašalinti šį trūkumą, jeigu jo užpildymo dažnis atitinka keitiklio centrinį dažnį, tai yra energija koncentruojama pralaidos diapazone. Tačiau reikia paminėti, kad CRLB riboje neįvertinta koreliacinio maksimumo atsarga pagal triukšmą. Jeigu signalo juosta siaura, o triukšmo atsarga maža, tuomet šoninių lapelių padėtis gali būti įskaityta kaip atėjimo momentas. Tokiu atveju atsitiktinės paklaidos gerokai padidėja. Todėl ne tik keitiklio centrinis dažnis, bet ir gaubtinės juostos plotis bei koreliacinio maksimumo atsarga pagal triukšmą svarbūs siekiant minimalių paklaidų. Siekiant didesnės energijos, radijo impulso trukmė gali būti ilginama, tačiau dėl prieš tai išdėstytų priežasčių, paklaidos gali dar labiau padidėti.

Ultragarsinės vizualizacijos skiriamąją gebą lemia gaubtinės juostos plotis. Kontrastą lemia signalo ir triukšmo santykis (11). Skiriamąją gebą galima pagerinti kompensuojant nuostolius, tačiau tam reikalingas pakankamas signalo ir triukšmo santykis, kitaip dėl padidėjusio triukšmo signale atsiras naujų artefaktų. Impulso spektras yra *sinc* funkcija, todėl impulsas negali suteikti platesnės juostos, nesumažindamas energijos. Radijo impulsas užtikrina pakankamą energiją tik siaurame ruože, todėl šie signalai nėra tinkami inversinei filtracijai.

Medžiagos storio, fizinių savybių matavimui spektroskopijoje išnaudojama signalų persiklojimo sąlygota spektro moduliacija. Čia dar labiau išryškėja minėtų signalų trūkumai: interferencinės spektro fliktuacijos yra itin didelės, o *sinc*

funkcija turi spektrinius nulius, energija koncentruojama tik siaurame dažnių ruože, todėl neužtikrinamas pakankamas signalo ir triukšmo santykis, ribojamas medžiagų bei jų storių diapazonas. Ne tik juostos plotis, bet ir didelis signalo ir triukšmo santykis yra svarbūs spektroskopijoje. Signalų triukšmo lygį galima mažinti vidurkinant. Tačiau tai ne visuomet tinka – kito matavimo metu signalas gali būti pasislinkęs dėl temperatūros poveikio; realaus laiko diagnostikos sistemose objektas paprastai juda, todėl papildomi matavimai nėra įmanomi.

Skleisto spektro signalai įgalina kardinaliai spręsti minėtas paprastųjų signalų problemas: signalo trukmė (t. y. energija) ir juostos plotis nėra susieti. Tokiu atveju signalo energija gali būti didinama signalą ilginant, nekeičiant jo dažnių ruožui. Tokiu būdu ir juostos plotis ir signalo bei triukšmo santykis gaunami didesni arba reguliuojami pagal poreikį. Šie signalai yra spūdūs: net ir persikloję laike gali būti atskirti suspaudus koreliacine funkcija. SS signalai gali naudoti mažesnes žadinimo amplitudes, taip geriau išnaudodami žadinimo elektronikos teikiamą fronto augimo greitį: naudojant mažesnę amplitudę gaunami statesni frontai.

Reikia paminėti, kad SS signalai turi ir trūkumų. Laisvai pasirenkamos formos SS signalai generuojami dirbtinai paskleidus norimo spektro signalą laike. Jie pasižymi itin geromis koreliacinėmis savybėmis, tačiau tiesioginio sprendinio neturi. Ne visi tokiu būdu išvesti signalai gali būti realizuoti praktiškai. Todėl naudojami signalai, kurių išvedimas paprastas: faze manipuluoti (angl. *PSK* – *Phase Shift Keying*) signalai moduluoti pseudo-atsitiktiniu triukšmu (m-sekomis) arba dažniu moduluoti signalai, kai naudojama tiesinė moduliacija (angl. *LFM* – *Linear Frequency Modulation* arba *chirp*) arba netiesinė dažnio moduliacija (NLFM). Paminėtinas esminis šių signalų trūkumas: jiems generuoti reikalingas greitaeigis keitiklis *kodas-analogas* su pakankama buferine atmintimi bei tiesinis analoginis stiprintuvas, galintis dirbti apkrautas talpine aprova. Tokie signalai nėra tinkami daugiakanalėms, portabilioms sistemoms.

Ne visi pseudotriukšmo signalai, naudojami PSK, turi geras koreliacines savybes, todėl naudojamos *Barker*, m-sekų, *Kasami*, *Gold*, *Walsh Hadamard*, *Golay* generavimo metodikos gauti sekos su priimtinais savybėmis. Tačiau tik *Barker* kodai užtikrina  $1/N$  ( $N$ -sekos ilgis) šoninių lapelių lygį, o maksimalus jų ilgis – 13, kas užtikrina tik  $-22.3$  dB šoninių lapelių lygį. Kitų sekų šoninių lapelių lygis yra apytikriai  $1/\sqrt{N}$ . Pvz. sekai, kurios  $N=128$ , šoninių lapelių lygis bus – 15 dB. Siekiant geresnių koreliacinių savybių reikia ilgos sekos. Minėtai sekai naudojant vieno periodo 5 MHz, radijo impulso ilgį tai atitiks 25.6  $\mu$ s. Toks ilgis jau gali būti nepriimtinas. Taip pat reikia paminėti, kad pseudotriukšminės sekos tiesiogiai žadinimui negali būti naudojamos – jų spektras nepriderintas prie ultragarsinio keitiklio pralaidos juostos. Todėl naudojama PSK manipuliacija, tiksliau – sekos kompozicija su radijo impulsu (angl. *chip*), tuomet santykinai tolygus sekos spektras moduluojamas *sinc* gaubtine, atitinkančia radijo impulso trukmę. Todėl PSK signalų spektras yra fiksuotos *sinc* funkcijos formos, o

gaubtinė nėra iki galo užpildyta, t. y. energetinis efektyvumas mažas. PSK signalų spektro forma negali būti valdoma, nes spektre yra nuliai, trukdantys taikyti inversinę filtraciją ar spektroskopiją (12). Keitiklis įves papildomus spektro išskraipymus, todėl koreliacinės savybės skirsis nuo naudotos sekos.

LFM signalai pasižymi puikiomis savybėmis: paprasta analitinė išraiška leidžia šiuos signalus analizuoti ir generuoti matematiniais metodais; yra spūdūs; spektro plotis ir pagrindinio koreliacinio lapelio plotis lengvai valdomi keičiant moduliacijos gylį ir centrinį dažnį; energijos kiekis gali būti valdomas keičiant trukmę; neturi spektrinių nulių; netiesinės dažnio moduliacijos atveju gali būti valdoma spektro forma (13). Tačiau LFM signalai turi ir trūkumų. Pagrindinis trūkumas susijęs su stačiakampio formos gaubtine – dėl kompozicijos su *sinc* funkcijos spektru gaunamas spektro bangavimas bei padidėja koreliacinės funkcijos tolimos zonos šoniniai lapeliai. Stačiakampė spektro forma lemia artimos zonos šoninius lapelius – jie yra tik  $-13,2$  dB (8). Koreliacinės savybės sunkiai valdomos. Tolimos zonos šoniniai lapeliai bei spektro bangavimas gali būti sumažinti naudojant gaubtinės moduliaciją, tačiau artimos zonos šoniniai lapeliai vis tiek išlieka. Pastarieji gali būti sumažinti naudojant dekoreliaciją arba išderintą filtrą, t. y. kitokį atraminį signalą koreliacijai (8). Tačiau minėtiems pakeitimams reikia vis sudėtingesnės žadinimo elektronikos, todėl tokių signalų naudojimas portatyviose, daugiakanalėse sistemose yra netinkamas. Be to, nėra iki galo išnaudojamos žadinimo galimybės – dalį laiko signalo amplitudė yra mažesnė už maksimalią. Spektrinių nuostolių kompensacijai (18) pasiūlyta SS signalo gaubtinės moduliacija. Taip pasiekama norima spektro forma, tačiau žadinimo efektyvumas dar labiau pablogėja, nes didžiąją laiko dalį gaubtinė yra mažesnė už maksimaliai galimą. Siūlymai naudoti netiesinę dažnio moduliaciją (3) ar papildyti amplitudės moduliaciją (9) šią problemą sprendžia tik iš dalies.

Nors LFM ar NLFM signalai teikia priimtina efektyvumą, jų generacijai vis tiek reikalingas greitaiegis keitiklis kodas-analogas bei galios stiprintuvas, galintis dirbti apkrautas talpine apkrova. Straipsnyje (3) pasiūlyta naudoti stačiakampę NLFM versiją – tokiu atveju generatorius išnaudojamas maksimaliai, pagrindinės harmonikos amplitudė yra 1.3 karto didesnė. Svarbiausia, kad gerokai supaprastėja žadinimo elektronika ir padidėja efektyvumas (raktinis išėjimo kaskadų darbas), sumažėja duomenų surinkimo sistemos elektronikos kaina, svoris ir gabaritai. Tačiau lieka neaišku, kokios savybės gaunamos naudojant stačiakampę signalo versiją, kaip tokie signalai elgiasi realaus taikymo atveju. Kitame skyriuje siekiama iširti stačiakampes įprastinių SS signalų formas ir jų taikymą ultragarsiniuose tyrimuose bei atskleisti pageidaujamas signalų savybes.

## 2. STAČIAKAMPIŲ SKLEISTO SPEKTRO SIGNALŲ TAIKYMAS

Šiame skyriuje siekiama išryškinti stačiakampių SS signalų taikymo pranašumus bei reikalavimus trūkstantoms savybėms nustatyti.

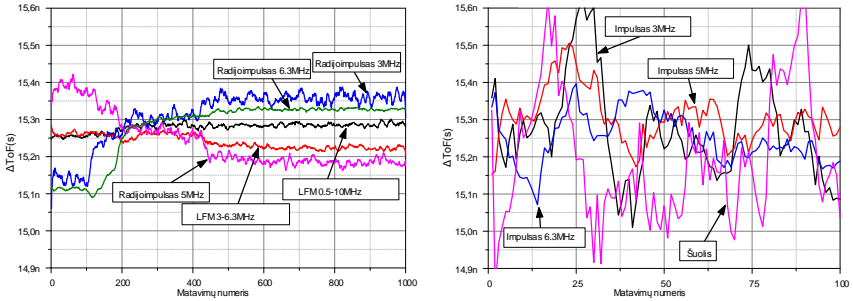
### Atsitiktinių paklaidų sumažinimas polimerizacijos proceso tyrime

Kompozitinių gaminių gamyba neatsiejama nuo proceso optimizavimo. Itin svarbu nustatyti momentą, kada polimerizacijos procesas pasibaigęs ir forma gali būti atlaisvinta kitam gaminiui. Paprastai tai daroma atliekant kelis bandymus, tačiau tai didina gamybos laiką ir gamybos atliekas. Ultragarso sklidimo greitis, slopinimas ar netiesiškumas gali būti naudojami polimerizacijos būsenai įvertinti. Eksperimente tirta ultragarso greičio (tiksliau – sklidimo laiko (angl. ToF – *Time of Flight*) priklausomybė nuo polimerizacijos laipsnio. Proceso metu labai išauga signalo slopinimas, t. y. padidėja atsitiktinės sklidimo laiko nustatymo paklaidos. Nustatyta, kad panaudojus stačiakampius SS žadinimo signalus, paklaidos gali būti labai sumažintos. Radijo impulso atveju, atsitiktinės paklaidos buvo mažesnės nei SS signalo iki žėlatinizacijos proceso pradžios. Žėlatinizacijos proceso metu slopinimas žymiai padidėjo, tuomet sumažėjo atsarga pagal triukšmą ir todėl atsirado labai didelės, anomalios paklaidos dėl maksimumo peršokimo į šoninius koreliacijos lapelius. Taigi apibendrinant galima teigti, jog pageidautina naudoti signalą, kurio spektro forma priderinta prie perdavimo charakteristikos.

### Sisteminų paklaidų sumažinimas skysčio srauto matavimuose

Ultragarso impulso sklidimo laikas gali būti naudojamas skysčio srauto greičiui nustatyti. Eksperimente du ultragarsiniai keitikliai buvo įtvirtinti vienas prieš kitą siekiant nustatyti sklidimo laikų (ToF) skirtumą tarp palei srautą  $ToF_{down}$  ir prieš srautą  $ToF_{up}$  sklindančių signalų.  $ToF_{down}$  ir  $ToF_{up}$  nustatyti naudota koreliacijos maksimumo pozicija ir parabolinė interpoliacija. Keitiklių perdavimo funkcijos fazės kitimas temperatūrų diapazone sukuria grupinio vėlinimo pokytį, kuris virsta sistetine skirtuminio sklidimo laiko nustatymo paklaida. Tuomet atsiranda srauto greičio matavimo paklaida, kuri yra ženkli, nes matuoklis skirtas itin mažiems srautams matuoti. Padaryta prielaida, kad žadinant plataus spektro signalu, šios paklaidos gali būti sumažintos. Eksperimente naudoti trys, vienodos amplitudės (4 V) signalų tipai: 1) siaurajuostis, bet didelės energijos radijo impulsas, 2) didelės energijos plačiauostis LFM, 3) mažos energijos plačiauostis impulsas bei šuolis. Siekiant eliminuoti skysčio įtaką sklidimo sąlygoms, keitikliai buvo suglausti tiesiogiai ir įdėti į termostatą. Temperatūra kito nuo 20°C iki 44°C. Paveiksle (žr. 2.1 pav.) pateikti skirtuminio laiko  $\Delta ToF$  kitimo rezultatai didelės energijos (žr. 2.1 pav., kairė) ir mažos energijos žadinimo atveju (žr. 2.1 pav., dešinė).

Nustatyta, kad mažiausiu kitimu pasižymėjo SS signalai: temperatūros kitimo sukeltas  $\Delta ToF$  pokytis per 20°C temperatūros diapazoną sudarė 50 ps, o impulso atveju kitimas buvo didesnis kaip 800 ps.



**2.1 pav.** Skirtuminio laiko  $\Delta ToF$  kitimo palyginimas: didelės energijos (kairė) ir mažos energijos (dešinė) žadinimo signalams

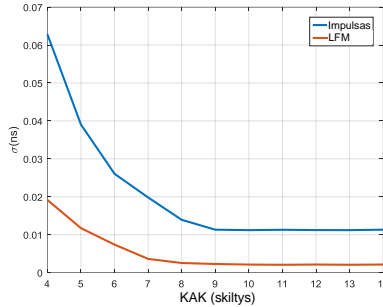
Parodyta, kad temperatūros įtaka srauto matavimo sisteminiams paklaidoms gali būti sumažinta, panaudojus didelės energijos plataus spektro SS signalus. Efektą galima paaiškinti fazinės charakteristikos kitimo išsklaidymu per dažnių diapazoną. Tačiau priimtas šio signalo spektras yra paveiktas keitiklio perdavimo charakteristikos, t. y. netolygus. Žadinimas impulsu ar radijo impulsu tai pat nepasižymi plokščiu spektru, be to, turi stiprią rezonansinę priklausomybę nuo keitiklio centrinio dažnio. T. y. nė vienas iš naudotų signalų nesuteikia tolygaus priimto signalo spektro, kuomet spektriniai nuostoliai kompensuojami Pageidautina būtų iširti naudojant signalus, kurie atitiktų pralaidos juostą ar kompensuotų spektrinius nuostolius.

### **Keitiklio analogas-kodas skilčių skaičiaus įtaka sklidimo laiko paklaidoms SS signalų atveju**

Signalų dinaminis diapazonas (maksimalios signalo amplitudės ir triukšmo efektingės įtampos santykis) lemia reikalaujamą keitiklio analogas-kodas (KAK) skyrą. Paminėtina, kad triukšmo energija yra paskleista laike, o impulso - sukoncentruota viename laiko momente. Todėl reikalaujama aukšta keitiklio analogas-kodas skyra. Kadangi skleisto spektro signalo dedamosios taip pat paskleistos laike, buvo padaryta prielaida, kad tokiu atveju reikalavimai keitiklio analogas-kodas skilčių skaičiui gali būti sumažinti.

Atliktas signalo sklidimo laiko ToF matavimai esant  $-50$  dB SNR. ToF atsitiktinės paklaidos, keičiant keitiklio analogas-kodas skilčių skaičių LFM ir impulso žadinimo atveju pateikiamos 2.2 pav.

Nustatyta, kad SS (LFM) žadinimo atveju, keitiklio analogas-kodas skilčių skaičius gali būti sumažintas nuo 9 iki 5, lyginant su impulso žadinimu.



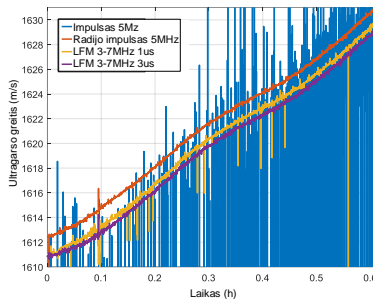
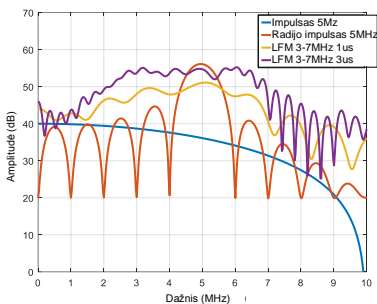
**2.2 pav.** Signalų sklaidimo laiko ToF atsitiktinės paklaidos, keičiant KAK skilčių skaičių LFM ir impulso žadinimo atveju

Daroma išvada, kad SS signalų naudojimas leidžia sumažinti reikalavimą keitklio analogas-kodas skyrai. Paminėtina, kad siekiant tokių pačių paklaidų impulso žadinimo atveju, tektų labai padidinti zonduojančio signalo amplitudę ir, reikia paminėti, kad tai papildomai sukeltų netiesiškumą terpėje.

### Elektromagnetinių trukdžių įtakos sumažinimas naudojant SS signalus

Elektromagnetiniai trukdžiai (EMI – elektromagnetinė interferencija) neišvengiami moderniose ultragarso sistemose. Trukdžiai patenka kabeliu, jungiančiu duomenų surinkimo sistemą su ultragarsiniu keitikliu: paprastai pageidautina, kad kabelis būtų lankstus, lengvas, ilgas ir koaksialinis (t. y. mažo diametro, mažas ekrano padengimo koeficientas, plonas vienasluoksnis šarvas). Pagrindiniai šių trukdžių šaltiniai yra impulsiniai maitinimo šaltiniai, ultragarsinių signalų žadinimo įtampos šaltiniai, pozicionavimo variklių valdikliai. Trukdžio šuolis šiuose įrenginiuose pagal spektrą atitinka impulsinio žadinimo signalo spektrą bei formą. Todėl tokių EMI signalų filtravimas yra sudėtingas.

EMI trukdžių problemoms atskleisti, atliktas sūrio formavimosi proceso stebėjimas ultragarso. Sūrio formavimuisi iš pieno metu, svarbu laiku pastebėti pieno sutraukos pjaustymo momentą. Ultragarso sklaidimo laikas naudotas kaip įvertis sutraukos pjaustymo momentui nustatyti. Eksperimentinė įranga naudoja impulso pločio moduliaciją termostatui valdyti. Todėl nepageidaujami termostato valdymo impulsai buvo suindukuoti matavimo signaluose. Šių EMI trukdžių signalų amplitudė buvo itin didelė, palyginama su priimto signalo amplitudė. Sklidimo laikui ToF (tarp skysčio paviršiaus ir ultragarsinio keitklio vėlinimo linijos) nustatyti naudota koreliacinė funkcija ir parabolinė interpoliacija. 2.3 pav. pateikiamas išmatuoto sklaidimo laiko ToF kitimas, žadinimui naudojant 100 ns trukmės impulsą, 1  $\mu$ s trukmės radijo impulsą ir 1  $\mu$ s trukmės LFM signalą dengiantį (3–7) MHz bei 3  $\mu$ s trukmės LFM signalą dengiantį (3–7) MHz.



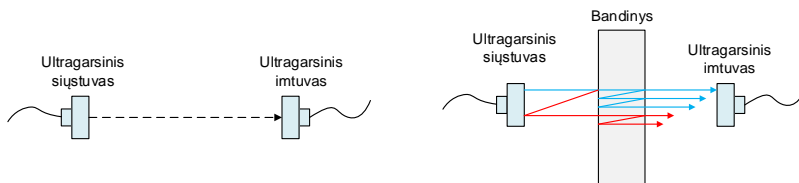
**2.3 pav.** Tyrimams naudotų signalų spektrai (kairė) ir išmatuoto ToF kitimas (dešinė)

Nustatyta, kad anomalios, EMI sukeltos paklaidos ypač ženklios, kuomet žadinimui naudojamas impulsas. Kiti signalai (radijo impulsas ir SS) pasižymėjo dideliu atsparumu trukdžiams. Paminėtina, kad radijo impulso atsparumas EMI žymiai sumažėjo pradėjus formuotis sutraukai. Signalų slopinimas sutraukoje yra žymiai didesnis, todėl sumažėjo signalo lygis ir todėl sumažėjo radijo impulso atsarga pagal triukšmą. Pažymėtina, kad SS signalai yra žymiai atsparesni EMI.

### SS signalų taikymas spektroskopijoje

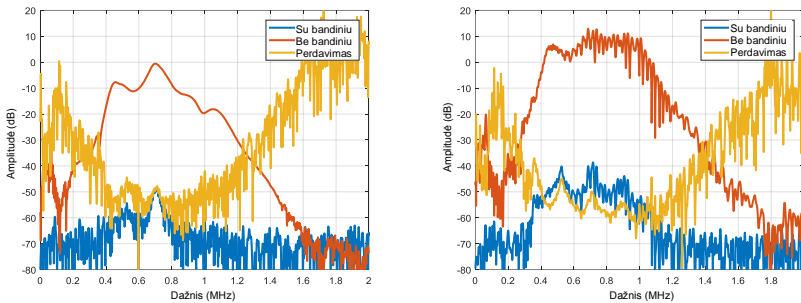
Spektrinių komponentų interferencija dėl atspindžių persiklojimo spektroskopijoje panaudojama vizualizacijai ar medžiagos savybių matavimui. Signalų dažnių juostos plotis ir didelis signalo ir triukšmo santykis tokiu atveju itin svarbūs. Skleisto spektro signalai buvo palyginti su radijo impulsu integrinio grandymo vidinės struktūros vizualizacijoje, imersinei spektroskopijai naudojant 20 MHz keitiklį. Nustatyta, kad net ir minimalios trukmės radijo impulsas neužtikrina pakankamo SNR 20 MHz dažniui, tuo tarpu SS signalo SNR buvo aukštas net ir ties 32 MHz dažniui.

Imersiniai matavimai nepageidautini kompozitinių medžiagų gamybos procese. Tokiu atveju naudojamas bekontaktis ultragarsas – signalai sklinda ore. Bekontaktės spektroskopijos storio matavimo tyrimui pasirinktas itin dideliu slopinimu pasižymintis purkštas kompozitas. Medžiagos storio matavimas atliktas ore, storiui kintant nuo 0,8 mm iki 6,7 mm. Pasirinkta perdavimo (angl. *thru-transmission*) matavimo schema (žr. 2.4 pav.).



**2.4 pav.** Matavimo schema be bandinio (kairė) ir su bandiniu (dešinė)

Matavimams naudoti du plačiajuosčiai 0,6 MHz centrinio dažnio orui skirti keitikliai. Naudoti trys, 200 V amplitudės, vienpoliai žadinimo signalai: impulsas priderintas 750 kHz, 30  $\mu$ s LFM ir 100  $\mu$ s LFM dengiantys nuo 0,2 MHz iki 1,4 MHz spektro ruožą. Priėmimo kanalo stiprinimas esant bandiniui 69 dB. Storis nustatomas dviem matavimais: pradžioje išmatuojamas signalo perdavimas tarp dviejų keitiklių be bandinio, o po to išmatuojama tarp keitiklių įterpus bandinį. Gautus signalus transformavus į dažnių sritį paskaičiuojamas spektrų santykis. Signalų spektrai bei jų santykis (perdavimas) pateikti 2.5 pav. (bandinio storis 6,7 mm). Lyginami spektrai, kuomet žadinimui naudotas impulsas (žr. 2.5 pav., kairė) ir 100  $\mu$ s LFM signalas (žr. 2.5 pav., dešinė).



**2.5 pav.** Impulso (kairė) ir LFM (dešinė) signalų spektrinės charakteristikos

Impulso žadinimo atveju gali būti išskirtas vos vienas (oranžinė kreivė), sunkiai žiūrimas, rezonansinis maksimumas. Tačiau, naudojant SS signalą, galima išskirti net 4 rezonansinius maksimumus. Atkreiptinas dėmesys, kad tik SS signalo atveju aiškiai yra matomi ir minimumai. Išsprendus inversinį uždavinį (priderinus medžiagos modelio spektrą), buvo nustatytas ir medžiagos storis bei ultragarso greitis medžiagoje. Siekiant nustatyti matavimų sklaidą, matavimai atlikti 100 kartų. Nustatyta, kad bekontaktės spektroskopijos storio matavimuose impulso pakeitimas SS signalu rezultatų sklaidą sumažino nuo 58 iki 24 kartų.

Ištyrus stačiakampių impulso, radijo impulso bei LFM žadinimo signalų taikymą praktiniams matavimo bei vizualizacijos uždaviniams nustatyta, kad stačiakampės versijos nenusileidžia analoginėms, tačiau signalų spektrai nėra tolygūs, neužtikrinamas pastovus signalo ir triukšmo santykis.

Kitam tyrimų etapui suformuluoti šie uždaviniai:

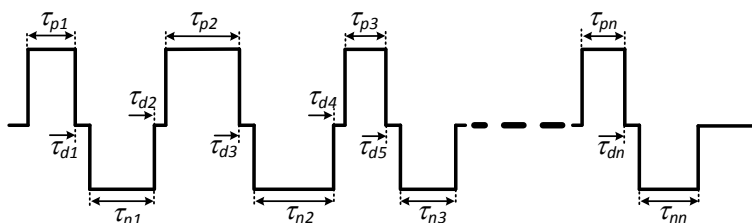
1. pasiūlyti naują stačiakampio formos žadinimo signalų tipą, sprendžiantį įprastinių signalų trūkumus; sukurti optimizavimo metodiką; išskirti konvergavimo kriterijus; pasiūlyti sekos generavimo algoritmą, nesudėtingą sistemos perdavimo modelį greitam optimizavimui;
2. ištirti naujų signalų savybes remiantis pasirinktais kriterijais;
3. pateikti naujų signalų taikymo ultragarsinėje vizualizacijoje bei matavimuose teikiamą naudą.



### 3. APWP SIGNALŲ PROJEKTAVIMAS

Šiame skyriuje siekiama išsiaiškinti kaip energija ir dažnių juostos plotis lemia ultragarsinės vizualizacijos ir matavimų kokybę. Paprasti signalai: impulsas ar radijo impulsas šių parametų vienu metu užtikrinti negali. Nors ir skleisto spektro (SS) signalai šio trūkumo neturi, jiems generuoti reikia sudėtingos elektronikos, o tai komplikuoja SS signalų taikymą portabiliose, daugiakanalėse sistemose (14). Stačiakampių SS signalų naudojimas leistų supaprastinti žadinimo elektroniką bei pasiekti didesnę efektyvumą (15). Šiuo metu naudojamų SS signalų stačiakampių versijų analizė atskleidė, kad tokių signalų taikymas sąlygoja papildomus spektro netolygumus bei padidina šoninių lapelių lygį. Ankstesniame skyriuje buvo suformuluoti reikalavimai naujo tipo SS signalams: 1) paprasta žadinimo elektronika (stačiakampiai); 2) spektrinių parametų bei formos valdymas; 3) koreliacinių parametų valdymas; 4) minėtų parametų adaptavimas prie keitklio ar sistemos perdavimo charakteristikos.

Problemai spręsti siūloma naudoti laisvas, pasirenkamas trukmės bei pozicijos laike impulsų APWP sekas (žr. 3.1 pav.).



3.1 pav. Maksimaliai sudėtingo APWP signalo pavyzdys

Paveiksle 3.1 pateiktas tipinės sekos pavyzdys iliustruoja sudėtingiausią APWP signalo tipą, kai yra kombinuojami skirtingos trukmės bei poliarumo impulsai su papildomais nuliais. APWP signalas apibrėžiamas kaip aukšto  $\tau_p$  ir žemo  $\tau_n$  lygio impulsai, tarp kurių yra pauzės su  $\tau_d$  trukme. Tačiau galimi ir paprastesni APWP tipai, kuomet nenaudojami papildomi nuliai ar naudojami tik vieno poliarumo impulsai.

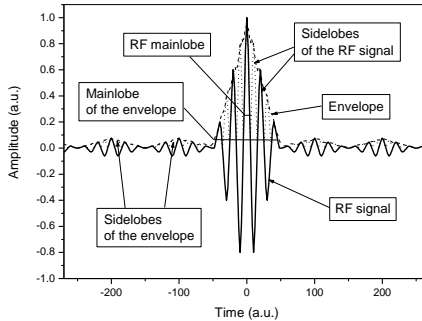
Signalams generuoti nenaudojama jokia moduliacija. Signalai gana paprastai aprašomi: optimizuojamos tik  $\tau_p$ ,  $\tau_n$  ir  $\tau_d$  reikšmės. Nauja, kad APWP sekų optimizavimas atliekamas atsižvelgiant į visos sistemos perdavimo charakteristiką. Signalą optimizuojant valdomi koreliaciniai šoniniai lapeliai, spektro forma ar juostos plotis, signalą adaptuojant prie sistemos spektrinių iškraipymų ar šiuos iškraipymus kompensuojant.

Labai svarbu, kad APWP signalai išlaikytų SS signalų savybes: plačią pralaidos juostą ir didelį SNR. Dėl SNR APWP signalams numatyti du pagrindiniai uždaviniai: SNR ir pralaidos juostos didinimas neprarandant koreliacinių savybių bei pagerinant jas ir spektrinės formos valdymas.

Optimizacijai siūlomi parametrai skirstomi į dvi grupes:

- koreliacinės savybės;
- spektrinės savybės.

Koreliacinės savybės lemia matavimo kokybę bei vizualizacijos kontrastą. Analizei naudojama normalizuota koreliacinė funkcija (žr. 3.2 pav.).



3.2 pav. Signalų koreliacinės funkcijos parametrai (19)

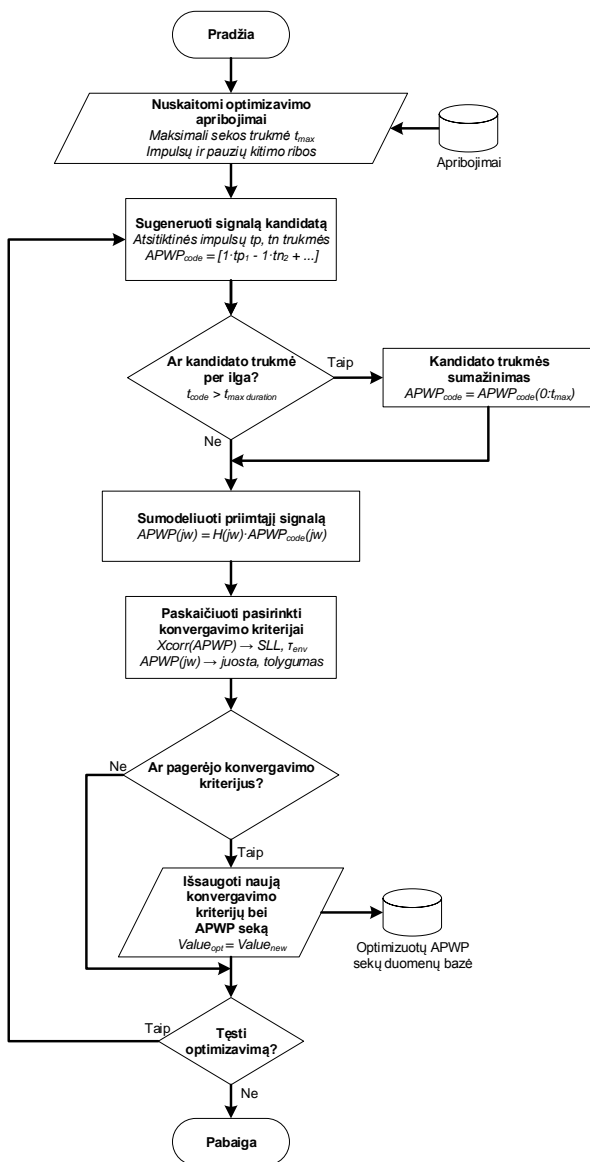
Koreliacinėms savybėms priskirtini šie pasiūlyti optimizacijos parametrai:

- pagrindinio koreliacinio (angl. *RF mainlobe*) lapelio plotis lemia ToF įverčio atsitiktinių paklaidų dydį (žr. 3.2 pav.);
- artimos zonos šoninių koreliacinių lapelių (angl. *Sidelobes of the RF signal*) lygis lemia anomalijų ToF įverčio paklaidų dydį bei vizualizacijos skiriamąją gebą (žr. 3.2 pav.);
- tolimos zonos šoninių koreliacinių lapelių bendroji energija lemia vizualizacijos kontrastą;
- gaubtinės pagrindinio koreliacinio lapelio (angl. *Mainlobe of the envelope*) plotis lemia ToF įverčio atsitiktinių paklaidų dydį, kai ToF nustatyti naudojama koreliacinės funkcijos gaubtinė bei vizualizacijos kontrastas (žr. 3.2 pav.);
- gaubtinės šoninių koreliacinių lapelių (angl. *Sidelobes of the envelope*) lygis lemia vizualizacijos kontrastą (žr. 3.2 pav.);
- koreliacinio maksimumo bei šoninių lapelių aukščių skirtumo santykis su SNR parodo atsargą pagal triukšmą.

Spektrinėms savybėms priskirtini šie optimizacijos parametrai:

- efektingas spektro plotis, sąlygojantis ToF įverčio atsitiktines paklaidas;
- gaubtinės spektro plotis sąlygoja anomalijų ToF įverčio paklaidų dydį bei vizualizacijos skiriamąją gebą;
- spektro tolygumas svarbus spektroskopijos atveju;
- spektro atitikimas numatytai formai svarbus spektrinių nuostolių kompensavimo, spektroskopijos ar dekompozicijos atveju.

Minėtos savybės naudojamos kaip konvergavimo parametras APWP signalą adaptuojant prie sistemos perdavimo charakteristikos. Optimizavimo algoritmo struktūra pateikta 3.6 pav.



3.3 pav. Apibendrintas APWP signalų optimizavimo algoritmas

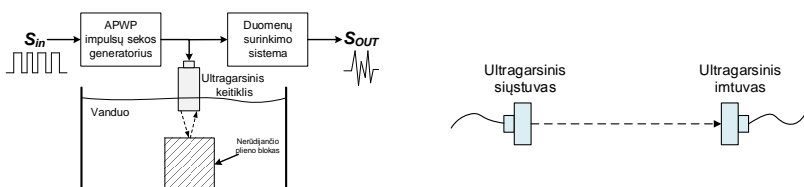
Pagrindinis APWP signalų trūkumas yra tai, kad jie turi būti optimizuoti, o tiesioginis jų parametru išvedimas naudojant tikslo funkciją (konvergavimo kriterijų) yra neįmanomas. Idealiu atveju optimizavimo algoritmas turėtų perrinkti visas galimas impulsų trukmių ir pauzių kombinacijas. Tačiau galimų kombinacijų skaičius yra didelis. Pavyzdžiui, atvejui, kada seka sudaryta iš 10 segmentų (impulsas arba pauzė), kurie gali įgyti 10 galimų verčių, kombinacijų skaičius yra  $10^{10}$ . Jei vieno kandidato analizė užtruks 1 ms, visų galimų kombinacijų patikrinimas užtruks keturis mėnesius. Kandidatų sekoms generuoti pasiūlyti du algoritmai: *Monte Carlo* ir genetinis. *Monte Carlo* algoritmas generuoja atsitiktines trukmių vertes, įvertindamas keitiklio bei sistemos galimybes (ribojama maksimali ir minimali trukmė) bei bendrą sekos trukmę (fiksuoja). Šis algoritmas yra paprastas, tačiau nėra efektyvus, nes nevertina ankstesnio rezultato. Atsižvelgiant į tai, buvo pasiūlyta naudoti genetinį algoritmą. Šis algoritmas vertina visus ankstesnius rezultatus, juos koncentruodamas į rinkinius.

Pagrindinis APWP sekų skirtumas nuo PSK naudojamų sekų yra tas, kad trukmė ir pozicijos parenkamos visiškai laisvai. Dėl visiško perrinkimo, APWP sekos gali pavirsti ir į stačiakampius, dažniu moduluotus PSK ar radijo impulso signalus. Dėl aukšto pasirinkimo laipsnis ir matematinių metodų trūkumo, norint išvesti tokias sekas, net ir naudojant genetinį algoritmą, reikia didelio galimų kombinacijų kiekio. Kiekvieną naują rinkinį (potencialų kandidatą į geriausius) tikrinant realioje sistemoje būtų gaištama daug laiko. Todėl, siekiant pagreitinti optimizavimo procesą, realų eksperimentą pasiūlyta pakeisti sistemos perdavimą aprašančiu modeliu.

APWP signalų optimizavimas pradedamas pasirenkant konvergavimo kriterijų, kuris priklauso nuo taikymo srities, impulsų trukmių kitimo diapazono, kuriam turi įtakos įrangos galimybės bei naudojamo keitiklio pralaidos juosta. Nustatant pradinę konvergavimo kriterijaus reikšmę, paprastai tam naudojamas pirmosios iteracijos rezultatas. Tuomet sugeneruojamas kandidatas, APWP seka. *Monte Carlo* algoritmo atveju, impulsų ir pauzių trukmės parenkamos tolyginio skirstinio atsitiktinių sveikų skaičių generatoriumi. Seka komplektuojama iki pasiekiamą maksimali nustatyta sekos trukmė. Paskutinis impulsas atmetamas, jeigu sekos trukmė viršija ribą ir skirtumas nuo pageidaujamo ilgio šį impulsą atmetus yra mažesnis nei perviršis. Sugeneruotas APWP kandidatas perleidžiamas pro sistemos modelį, taip imituojant priimtą signalą, gautą realia sistema. Tuomet priimtam signalui paskaičiuojamas pasirinktas konvergavimo parametras. *Monte Carlo* algoritmo atveju, jeigu konvergavimo parametras geresnis už ankstesnių iteracijų rezultatą, APWP seka įsimenama, fiksuojama nauja konvergavimo parametro vertė. Genetinio algoritmo atveju gauta konvergavimo parametro vertė priskiriama vienam iš genetinių klasterių. Vertinama naujo kandidato vertė klasterio viduje. Algoritmas atitinkamai mutuoja. Genetinio algoritmo atveju tikrinama ar progresas efektyvus, o *Monte Carlo* atveju tikrinama ar neviršytas leistinas iteracijų kiekis. Jei šis stabdymo kriterijus neviršytas, abiem atvejais

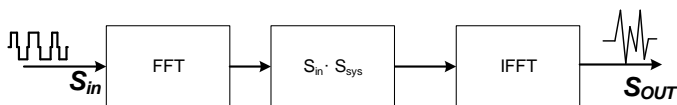
grįžtama į generavimo dalį. *Monte Carlo* atveju, generavimo modulio veikimas nesikeičia, o genetinio algoritmo atveju įvertinamas mutavimo rezultatas. Jei stabdymo kriterijus viršytas, algoritmas stabdomas, fiksuojami ir atvaizduojami optimizacijos rezultatai.

Priimtam signalui modeliuoti pasiūlyti du skirtingi sklaidimo modeliai: spektrinis ir kompozicinis. Spektrinis modelis remiasi prielaida, kad nuo pavienės, dideliu atspindžio koeficientu pasižyminčios ribos atspindėtas signalas teikia informaciją apie visos sistemos impulsinę reakciją. Atspindžio matavimo atveju, šiam tikslui naudojamas imersiniu režimu gautas atspindys nuo poliruoto nerūdijančio plieno bloko (žr. 3.4 pav., kairė). Perėjimo matavimo atveju naudojamas tarp keitiklių perskildęs signalas (žr. 3.4 pav., dešinė).



**3.4 pav.** Sklaidimo modelio sudarymas: atspindžio (kairė) ir perėjimo (kairė) režime

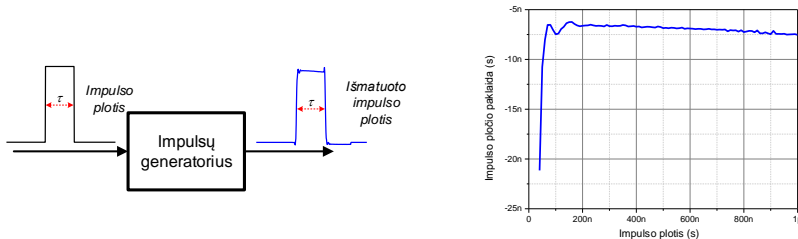
Šios impulsinės reakcijos spektro santykis su išsiųsto signalo spektru (naudojamas žadinimo generatoriaus valdymui skirtas kodas) yra naudojamas kaip sistemos modelis. Optimizavimo metu sugeneruotas, kandidatą atitinkantis kodas, taikant diskretinę Furje transformaciją konvertuojamas į dažnių sritį. Gautas spektras padauginamas su sistemos modelio spektru, o rezultatas konvertuojamas į laiko sritį taikant inversinę Furje transformaciją (žr. 3.5 pav.). Gautas signalas traktuojamas kaip realia sistema gautas atsakas.



**3.5 pav.** Spektrinio sklaidimo modelio struktūra

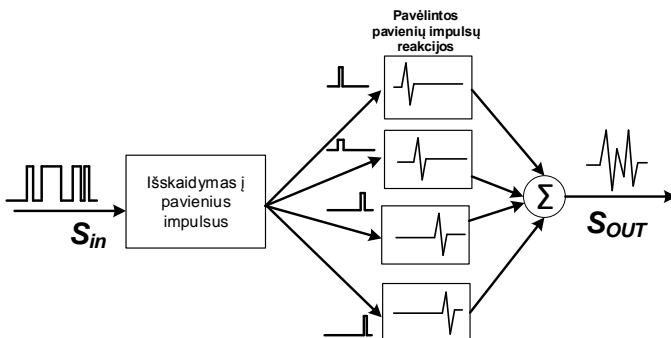
Reikia paminėti, kad impulsinio signalo negalima naudoti sistemos reakcijai gauti. Šis signalas turi spektrinius nulius, todėl sistemos reakcijai gauti naudotinas LFM signalas.

Tyrimai parodė, kad šis modelis neįvertina žadinimo generatoriaus sukeltų impulsų frontų iškreipimų, todėl generatoriui valdyti naudojamo kodo trukmė ir generuojamo kodo trukmė skiriasi (žr. 3.6 pav.). Didžiausias trukmės nuokrypis nustatytas transformatorinio sumatoriaus topologijai, o mažiausiu nuokrypiu pasižymėjo kaskadinė topologija.



**3.6 pav.** Žadinimo generatoriaus įvedamų iškraipymų tyrimo schema (kairė) ir nustatytas impulso trukmės nuokrypis (dešinė)

Todėl buvo pasiūlytas kompozicinis modelis. Pradžioje eksperimentiškai išmatuojama sistemos reakcija į pavienius žadinimo impulsus. Tuomet žadinimo kodas išskaidomas į pavienius impulsus ir kiekvienam jų, įvertinant jų padėtį sekoje, pritaikoma eksperimentiškai gauta sistemos reakcija. Gautos reakcijos sumuojamos (kompozicija, žr. 3.7 pav.).



**3.7 pav.** Kompozicinio sklidimo modelio struktūra

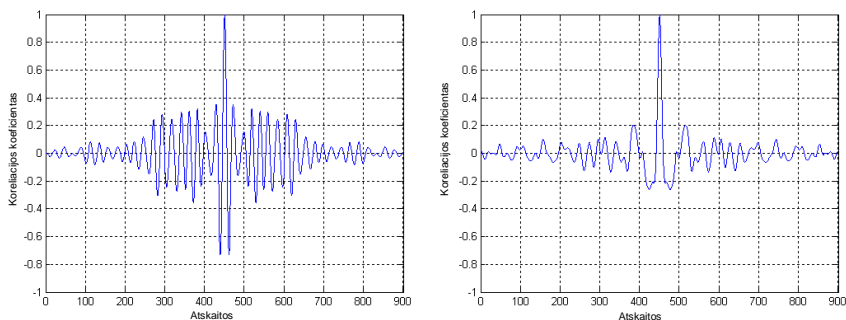
Kompozicinis modelis buvo palygintas su spektriniu, tam naudojant realius signalus, užfiksuotus naudojant kelis APWP kodus. Nustatyta, kad kompozicinis modelis geriau aproksimuoja realų signalą: koreliacijos koeficientas tarp realaus ir sumodeliuoto signalo, kompozicinio modelio atveju, buvo 0,995–0,997, o spektrinio 0,986–0,989. Darytina išvada, kad abu modeliai yra tinkami sistemos reakcijai modeliuoti, tačiau pasirenkant modelį, reikia atsižvelgti į generatoriaus topologiją. Spektrinis modelis yra greitesnis, jo sudarymui reikia atlikti mažiau eksperimentinių matavimų, tačiau jis netinka esant impulso fronto iškraipymams.

Kitam tyrimų etapui iškelti šie uždaviniai:

1. ištirti APWP signalus pagal nustatytus kriterijus;
2. ištirti APWP signalų efektyvumą pasirinktuose uždaviniuose.

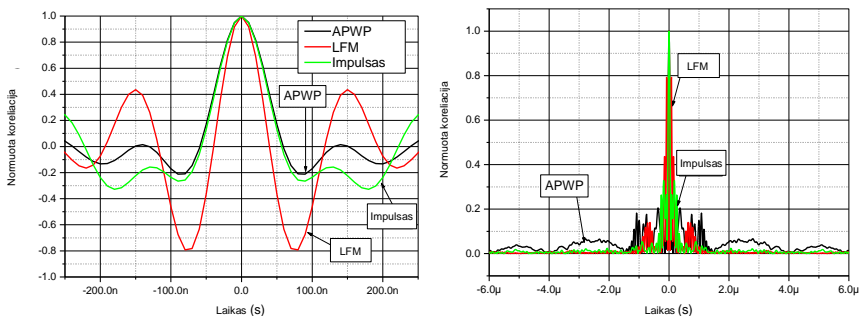
## 4. APWP SIGNALŲ TYRIMAS

Preliminarūs eksperimentai buvo skirti optimizavimo algoritmo veikimui analizuoti. Tyrimui pasirinktas šoninių koreliacinių lapelių minimizavimas. Kodams generuoti naudotas *Monte Carlo* algoritmas (10 000 iteracijų). Pasirinktas sferinio fokuso 60 % juostos pločio 5 MHz centrinio dažnio ultragarsinis keitiklis IRY405. Naudotas atspindys nuo vandenyje panardinto nerūdijančio plieno bloko. Žadinimui naudoti unipolariniai stačiakampiai signalai. Naudotas spektrinis perdavimo modelis. Koreliacinė funkcija optimizavimo pradžioje pateikta 4.1 pav. kairėje.



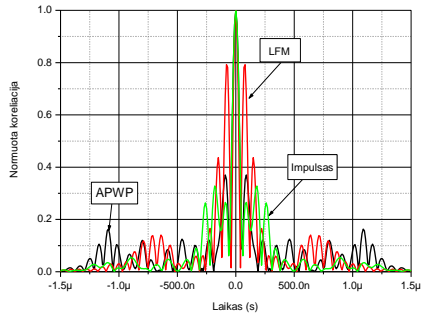
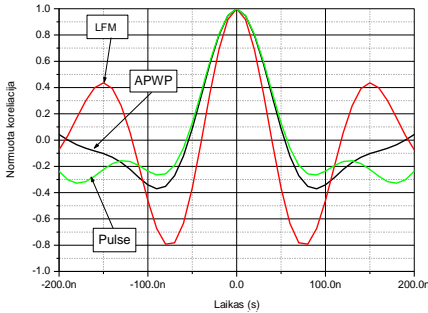
**4.1 pav.** APWP optimizavimo algoritmo veikimas: neoptimizuota (kairė) ir optimizuota (dešinė) koreliacinė funkcija

Po optimizacijos (žr. 4.1 pav. dešinė) koreliacinės funkcijos šoniniai lapeliai sumažėjo 11 dB. APWP signalo RF šoninių lapelių maksimalaus lygio optimizavimo rezultato palyginimas su panašios juostos impulsu ir LFM signalu pateiktas 4.2 pav.



**4.2 pav.** RF (kairė) ir gaubtinės (dešinė) šoninių lapelių minimizavimas

Nustatyta, kad APWP signalo artimos zonos šoniniai lapeliai mažiausi tiek RF, tiek gaubtinei. Šoninių lapelių energijos optimizavimo rezultato palyginimas su panašios juostos impulsu ir LFM signalu pateiktas 4.3 pav.



**4.3 pav.** RF (kairė) ir gaubtinės (dešinė) šoninių lapelių energijos minimizavimas

Galima įžvelgti, kad APWP šoninių lapelių bendras lygis gerokai mažesnis už LFM signalo lygį ir sulyginamas su impulsinio signalo lygiu.

### Skiriamosios gebos laike tyrimas

Ultragarsinės vizualizacijos skiriamoji geba sąlygojama priimto signalo gaubtinės juostos pločiu. Skiriamoji geba taip pat gali būti vertinama koreliacinės funkcijos RF šoninių lapelių lygiu arba gaubtinės centrinio lapelio pločiu. Tačiau ultragarsinio keitiklio pralaidos juosta riboja šiuos parametrus. Kadangi tikėtina, kad APWP signalai suteiks pakankamą energiją (SNR), dalis energijos gali būti skiriama spektriniais nuostoliams kompensuoti, taip susiaurinant centrinį lapelio plotį. Buvo atliktas eksperimentinis APWP signalų palyginimas su įprastiniais signalais naudojant tą pačią eksperimento struktūrą, kaip ir prieš tai aprašyta (žr. 3.4 pav., kairė). Žadinimui naudojami unipoliariniai 15 V amplitudės signalai. Visų, išskyrus impulsų signalų, trukmės buvo 3  $\mu$ s siekiant vienodos žadinimo energijos. Impulsinių signalų trukmės parinktos pagal skirtingus kriterijus: 1) 50 ns parinktas dėl plačiausios juostos; 2) 120 ns parinkta pagal maksimalią atspindžio amplitudę; 3) 220 ns parinkta minimizuojant RF šoninių lapelių lygį. Panaudoti dviejų tipų radijo impulsai: 1) 4,5 MHz (maksimali atspindžio amplitudė) ir 2) 7,45 MHz (mažiausi šoniniai lapeliai ir siauriausias RF pagrindinis lapelis). Buvo atrinkti trys, dažniu moduluoto signalo tipai: 1) 3  $\mu$ s trukmės LFM (1–10) MHz (maksimalus keitiklio juostos perdengimas); 2) 3  $\mu$ s trukmės LFM (1–5) MHz (mažiausias šoninių lapelių lygis); 3) 3  $\mu$ s trukmės NLFM, sukurtas naudojant adaptyvų 4-ojo laipsnio polinomą momentiniam dažniui generuoti (optimizuotas RF šoninių lapelių lygiui). APWP signalas su 3  $\mu$ s trukme optimizuotas RF šoninių lapelių lygiui. Kaip PSK atstovas pasirinktas 3  $\mu$ s 13 elementų Barkerio kodo signalas. Gauti analizės rezultatai apibendrinti 1 lentelėje.

Nustatyta, kad APWP ir NLFM signalai turi mažiausią RF šoninių lapelių lygį. Šių signalų energija (10–4) dB didesnė už impulsų, o energijos nuostoliai, skirti spektrui išplėsti nedideli (palyginus su PSK ir LFM signalais –(4–6) dB). RF



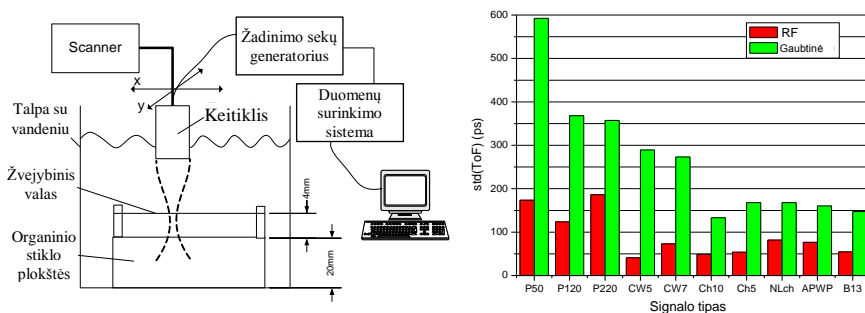
šoninių lapelių lygis žemiausias APWP signalui (signalai buvo optimizuoti RF šoninių lapelių lygiui).

**1 Lentelė.** Signalų koreliacinių bei dažniųjų savybių tyrimo rezultatai

Žyma	Signalas tipas	$SLL_{RF}$ dB	$SLL_{Henv}$ dB	$\tau_{RF}$ ns	$E_i$ dB	$F_e$ MHz	$\beta$ MHz
P50	Impulsas 50 ns	-3,1	-22	73	0	4,9	2
P120	Impulsas 120 ns	-3,3	-22	85	6	4,2	1,7
P220	Impulsas 220 ns	-7,6	-22	108	4	3,7	2,3
CW5	Radio impulsas 4,5 MHz 3 $\mu$ s	-0,3	-31	74	19	4,6	0,8
CW7	Radio impulsas 7,45 MHz 3 $\mu$ s	-3,6	-7,1	53	7	7,1	4,0
Ch10	LFM (1-10) MHz 3 $\mu$ s	-3,7	-13,7	74	14	4,9	2,2
Ch5	LFM (1-5) MHz 3 $\mu$ s	-2,6	-14,9	87	16	4,1	1,6
NLch	NLFM 3 $\mu$ s	-13,1	-11,3	106	10	3,9	2,6
APWP	APWP 3 $\mu$ s	-15,1	-10,7	103	10	4	2,7
B13	Barker13 3 $\mu$ s	-2,5	-18	78	16	4,5	1,7

Paminėtina, kad Barkerio kodas pasižymi mažiausiu gaubtinės šoninių lapelių lygiu, tačiau vietoj numatomo  $-22,3$  dB, pasiektas tik  $-18$  dB. Nors APWP signalai nebuvo optimizuoti gaubtinės šoninių lapelių lygiui, rezultatas tik 8 dB prastesnis. Nors impulso ir radio impulso šoninių lapelių lygis dar mažesnis,  $(-22-31)$  dB, šiems signalams toks rezultatas itin prastas, nes teoriškai šoninių lapelių neturėtų būti. Kaip ir buvo tikėtasi, siauriausiu RF centru lapeliu pasižymėjo 7,45 MHz radio impulsas, tačiau reikia paminėti, kad šiam signalui triukšmo atsarga itin maža.

Tas pats signalų rinkinys panaudotas kitame eksperimente. Nagrinėta situacija imitavo mažą defektą, esantį arti bandinio sienelės. Defektas buvo imituotas naudojant 0,34 mm skersmens valą, pritvirtintą 4 mm atstumu virš 20 mm storio organinio stiklo plokštės (žr. 4.4 pav., kairė). Atspindys nuo organinio stiklo plokštės yra daug stipresnis už atspindį nuo valo, todėl galima teigti, kad SNR yra prastas.



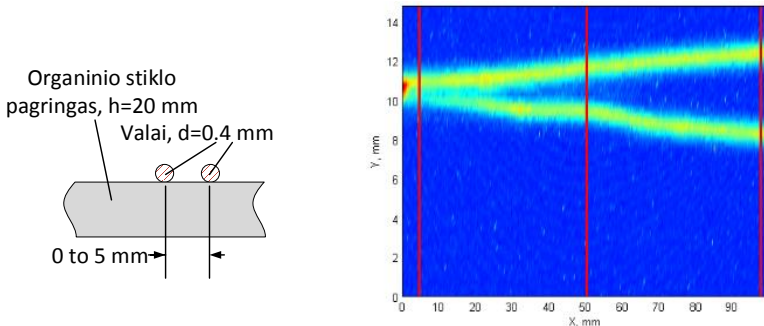
**4.4 pav.** Eksperimento schema (kairė) ir atsitiktinės ToF matavimo paklaidos (dešinė)

Keitiklį pozicionavus tiksliai virš valo, buvo surinkta 1000 signalų. Signalai panaudoti ToF matuoti (naudojant RF ir gaubtinę). Vandens temperatūra nebuvo nekintanti, todėl temperatūros pokyčiai sukėlė sisteminę paklaidą ToF matavimuose. Sisteminių paklaidų įtaka panaikinta iš rezultatų atimant nufiltruotus duomenis. Tada apskaičiuota ToF standartinė deviacija, kuri naudota kaip atsitiktinių ToF matavimo paklaidų įvertis (žr. 4.4 pav., dešinė).

Nustatyta, kad mažiausios atsitiktinės paklaidos yra naudojant RF koreliacinę funkciją. Mažiausios atsitiktinės paklaidos gautos radijo impulso, atitinkančio keitiklio centrinį dažnį, atveju, tačiau paminėtina, kad šis signalas pasižymi mažiausia atsarga pagal triukšmą, todėl slopinimui išaugus, šiuo atveju atsiras anomalijų paklaidų. APWP signalas nuo geriausio rezultato atsiliko tik 25 %. Taip atsitiko dėl to, kad APWP signalas buvo optimizuotas šoninių lapelių lygiui, t. y. dalis energijos buvo skiriama juostai išplėsti.

### Erdvinės skiriamosios gebos tyrimas

Šiuo eksperimentu buvo siekiama įvertinti atsitiktines defektų erdvinę padėtį įvertinimo klaidas. Naudota ta pati, 4.4 pav. pateikta struktūra, tie patys signalai, tik šiuo atveju 4 mm atstumu nuo organinio stiklo buvo įtvirtinti du sueinantys valai, imituojantys du, skirtingu atstumu esančius defektus (žr. 4.5 pav.)

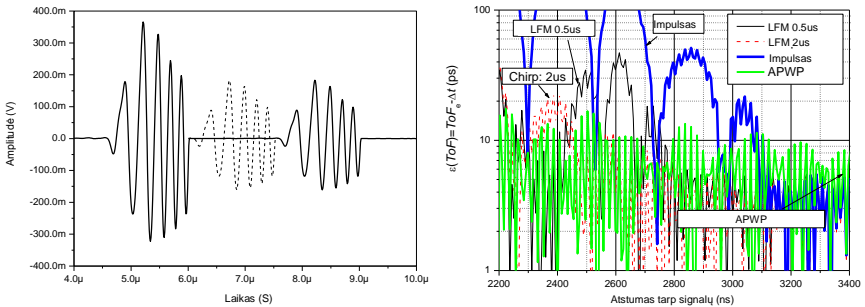


**4.5 pav.** Eksperimento schema (kairė) ir APWP signalu gautas vaizdas (dešinė)

Skenuota skersai valų naudojant 10  $\mu\text{m}$  žingsnį. Panaudojant koreliaciją su atramine kryptingumo diagrama (angl. PSF – *Point Spread Function*), buvo nustatoma erdvinė valo padėtis. Atsižvelgiant į atstumą tarp valų, kai erdvinę padėtį nebebuvo galima nustatyti, vertinta erdvinė skyra. Nepaisant to, kad siauriausia PSF pasižymėjo 7,45 MHz radijo impulsas, defektų atskyrimas naudojant APWP ir LFM signalus parodė geriausią erdvinę skyrą. Tai paaiškinama tuo, kad defektai buvo skirtinguose aukščiuose, todėl geriausia laikine skyra ir aukštų dažnių turiniu pasižymintys signalai užtikrino skyrą abiejose srityse. Įrodyta, kad APWP signalų koreliacinės funkcijos forma gali būti valdoma ir pasiekiamas mažiausias šoninių lapelių lygis.

## Dekompozicijos efektyvumas

Pateikiamas tyrimas buvo skirtas APWP signalų efektyvumui iteracinės dekompozicijos atvejams tirti. ToF nustatymas artimų atspindžių atveju yra dar sudėtingesnis dėl kaimyninių atspindžių poveikio ToF įverčiui. Atstumas tarp dviejų atspindžių (žr. 4.6 pav., kairė) buvo mažinamas iki visiško signalų persidengimo. Naudojant iteratyvią dekompoziciją, kiekvieno signalo laikinė padėtis buvo nustatoma atskirai, prieš tai atimant analizuotą signalą. Buvo lyginami septyni signalai: 100 ns impulsas; trumpas, 0,5  $\mu$ s trukmės 5 MHz radijo impulsas; ilgas, 2  $\mu$ s trukmės 5 MHz radijo impulsas; (2–8) MHz trumpas, 0,5  $\mu$ s trukmės ir ilgas, 2  $\mu$ s trukmės LFM signalai; trumpas, 0,5  $\mu$ s trukmės APWP signalas ir ilgas, 2  $\mu$ s APWP signalas. Sisteminės ToF paklaidos, susidariusios dėl signalų persiklojimo pateiktos 4.6 pav. dešinėje pusėje.



**4.6 pav.** Artimų atspindžių atvejis (kairė) ir tokiu atveju gaunamos ToF sisteminės paklaidos tirtiems signalams (dešinė)

Nustatyta, kad ilgi 2  $\mu$ s APWP ir LFM signalai, nepaisant didelio persiklojimo (mažesnis nei 230 ns) iki suspaudimo, pasižymėjo minimaliomis sisteminėmis paklaidomis: 10 ns paklaida impulsui, 3,6 ns paklaida 0,5  $\mu$ s trukmės LFM bei 1 ns paklaida 2  $\mu$ s trukmės LFM, 0,5 ns paklaida APWP signalui. Esant dideliame persiklojime (2600 ns) gautos: 500 ps paklaida impulsui, 50 ps paklaida 0,5  $\mu$ s trukmės LFM bei 12 ps paklaida 2  $\mu$ s trukmės LFM, 10 ns paklaida APWP signalui.

## 5. APWP SIGNALŲ TAIKYMAS

Šiame skyriuje tirta APWP signalų teikiama nauda realiems matavimo ir vizualizacijos uždaviniams. Pateikiami keturi skirtingi taikymo atvejai, kuomet panaudojamos esminės šių signalų savybės: spektro formos ir šoninių lapelių valdymo galimybės.

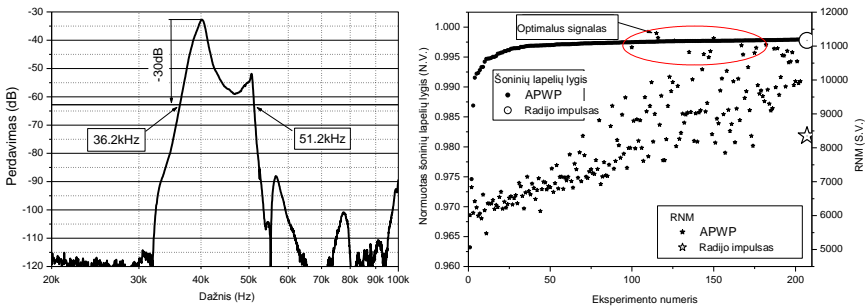
Spektro formos programavimas naudingas spektroskopijoje, kai reikalinga spektrinė kompensacija. Programuojamos savybės taip pat pasirodė naudingos ToF sisteminėms paklaidoms sumažinti srauto matavimuose.

Parodytos APWP galimybės padidinti signalo atsargos pagal triukšmą lygį siaurajuosčio keitiklio taikymo anemometrijoje atveju.

Ištirtas defektų aptikimo plonasluoksniuose kompozituose efektyvumas.

### Atsargos pagal triukšmą pagerinimas

Šiame tyrime nagrinėtas APWP signalų taikymas anemometrijoje, kai buvo siekiama sumažinti koreliacinės funkcijos šoninius lapelius, naudojant siaurajuosčius keitiklius matavimo kanale. Tyrimams naudotas anemometras, kuriame srauto matavimo kanale naudojami oriniai 40 kHz keitikliai. Siuntimui naudotas keitiklis 400ST160, o priėmimui – keitiklis 400SR160, atstumas tarp keitiklių buvo 120 mm. Pralaidos dažnių juostos plotis –6 dB lygyje yra nuo 38,8 kHz iki 41,1 kHz, t. y. 2,3 kHz. Tokia siaura juosta sukels ToF matavimo problemų: dėl mažos atsargos pagal triukšmą atsiras anomalių paklaidų. Tačiau paminėtina, kad juosta –30 dB lygyje yra 15 kHz (žr. 5.1 pav., kairė), t. y. įmanoma spektrinius nuostolius kompensuoti energijos nuostolių sąskaita.



5.1 pav. Keitiklių poros perdavimo dažninė charakteristika (kairė) bei APWP signalo optimizavimo rezultatas (dešinė)

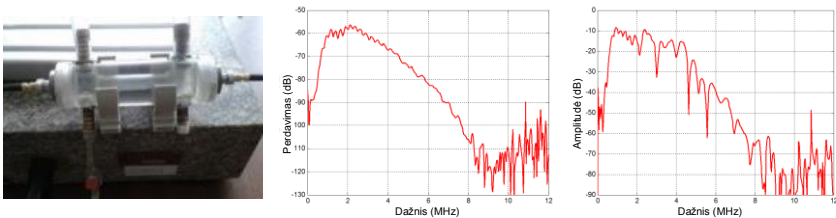
Tačiau nėra aišku, koks juostos kompensavimo lygis užtikrina maksimalią atsargą pagal triukšmą (angl. RNM – *Relative Noise Margin*). APWP optimizavimo algoritme šis parametras panaudotas kaip konvergavimo kriterijus. Signalo trukmė tai pat optimizuota ją keičiant nuo 125  $\mu$ s iki 500  $\mu$ s. Palyginimui naudotas tokios pačios trukmės 40 kHz radijo impulsas. Optimizavimo rezultatai pateikiami paveiksle (žr. 5.1 pav., dešinė). Rezultatai pateikti atsižvelgiant į šoninių lapelių lygio mažėjimą. Paminėtina tai, kad šoninių lapelių lygio (apskritimai) sumažinimas nebūtinai priskirtinas pagerintam RNM (žvaigždutės). Palyginimui pateikiami ir radijo impulso rezultatai (dideli simboliai).

Galima teigti, kad optimalaus APWP triukšmo atsarga RNM yra 11500, neoptimizuoto APWP RNM yra 5000, o radijo impulso RNM yra 8250. Daroma išvada, kad naudojant APWP, gautas reikšmingas atsargos pagal triukšmą pagerėjimas (daugiau nei 40 % palyginti su tuo paties ilgio radijo impulsu).

## Sisteminių paklaidų mažinimas srauto matavimuose

Buvo parodyta, kad SS signalų taikymas srauto matavimuose sumažina sisteminę ToF įvertinimo paklaidą, atsirandančią dėl ultragarsinių keitiklių poros perdavimo funkcijų kitimo. Toliau pateikti eksperimentai buvo skirti iširti APWP signalų efektyvumą siekiant sumažinti šias paklaidas. Buvo iškelta hipotezė, kad spektro tolygumas ir maksimalus perdengimas leidžia mažinti minėtas paklaidas. Kadangi šoninių lapelių lygis priklauso nuo spektro plokštumo, APWP optimizavimui naudotas šis kriterijus.

Eksperimentui naudota srauto matavimo kamera (žr. 5.2 pav.). Tyrimui atrinkta 30 signalų. Septyni LFM signalai: 5  $\mu$ s trukmės, (0,1–10) MHz juostos; 3  $\mu$ s trukmės, (0,1–10) MHz; 3  $\mu$ s (3–8) MHz; 3  $\mu$ s (1–5) MHz; 3  $\mu$ s (1–7) MHz; 3  $\mu$ s (3–9) MHz, taip pat šeši 3  $\mu$ s trukmės radijo impulsai su užpildymo dažniu nuo 1 MHz iki 6 MHz. Šeši impulsai yra su trukmėmis, priderintomis dažniui nuo 1 MHz iki 6 MHz. Vienuolika 3  $\mu$ s trukmės APWP signalų, kurie optimizuoti šoninių lapelių lygiui.

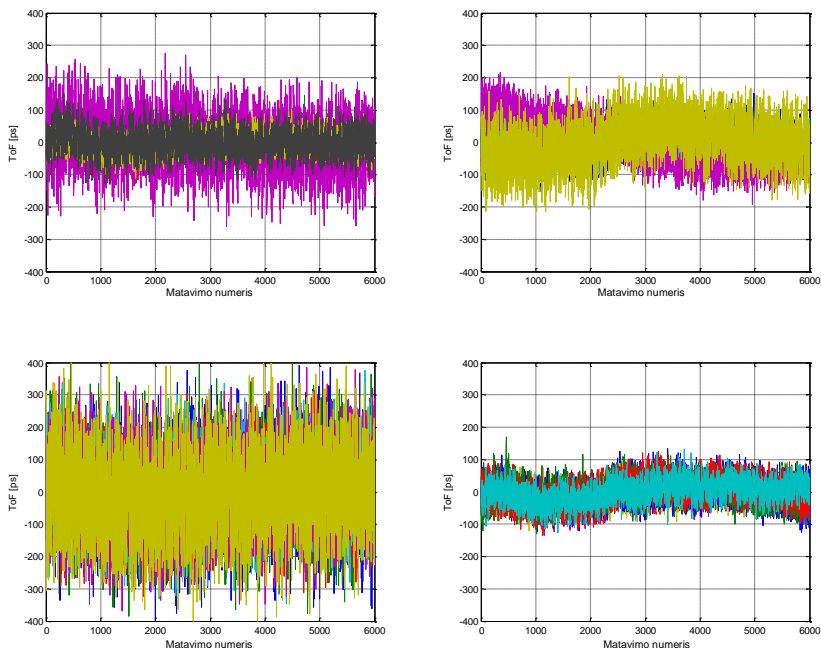


5.2 pav. Matavimo kameros vaizdas (kairė), LFM (centras) bei APWP (dešinė) spektrai

Žemiausias šoninių lapelių lygis ( $-11,32^{\circ}\text{dB}$ ) ir siauriausias pagrindinio lapelio plotis ( $15,03^{\circ}\text{ns}$ ) pasiekti APWP11 signalui. Siauras pagrindinis lapelis rodo plačią dažnių juostą, o žemas šoninių lapelių lygis rodo spektro plokštumą.

Srauto padavimo kanalai buvo uždaryti tam, kad skysčio judėjimo nebūtų. Kaip eksperimento kintamasis buvo naudotas aplinkos temperatūros kitimas. Temperatūra registruota skaitmeniniu temperatūros davikliu AD7414ARTZ, panardintu į matavimo kamerą. Eksperimentas vyko 17 valandų. Temperatūros svyravimai buvo maži, didžiausias nuokrypis  $4^{\circ}\text{C}$ . Žadinimo įtampa buvo 24 V, priėmimo kanalo stiprinimas buvo 20,21 dB.

Eksperimento metu užregistruota 6000 signalų. Šie signalai panaudoti ToF prieš srautą (keitiklis 1 į keitiklį 2) ir palei srautą (keitiklis 2 į keitiklį 1) suskaičiuoti naudojant parabolinę interpoliaciją. Šie rezultatai buvo panaudoti apskaičiuojant skirtuminį  $\Delta\text{ToF}$  tarp prieš srautą ir palei srautą išmatuotų ToF. Eksperimento metu nustatyti  $\Delta\text{ToF}$  rezultatai pateikti 5.3 pav. Matyti, kad mažiausios atsitiktinės paklaidos nustatytos APWP signalams. Didesnės atsitiktinės paklaidos radijo impulso signalui atsirado dėl to, kad perėjusio signalo energija yra mažesnė dėl keitiklių dažnių charakteristikų nesutapimo.



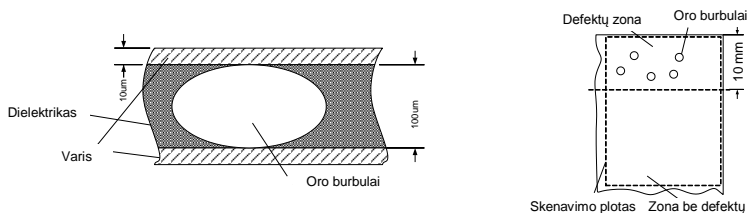
**5.3 pav.**  $\Delta ToF$  kitimas žadinant LFM (viršus, kairė), radijo impulso (viršus, dešinė), impulso (apačia, kairė) ir APWP (apačia, dešinė) signalais

Nustatyta, kad mažiausios sisteminės paklaidos tarp naudotų signalų yra: 1,507 ps 3  $\mu$ s trukmės (0,1–10) MHz LFM signalui; 3,712 ps 3  $\mu$ s trukmės 4 MHz radijo impulsui; 1,195 ps impulsui derintam 5 MHz; ir  $-0,474$  ps APWP7 signalui. Daroma išvada, didžiausias efektyvumas mažinant skirtuminio srauto matavimo paklaidas buvo pasiektas naudojantis APWP signalų.

### Defektų aptikimo laminuotuose struktūrose efektyvumas

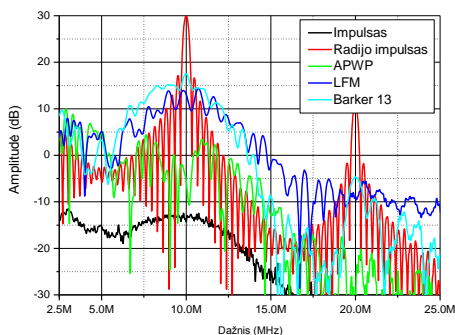
Šiame eksperimente tirtas plonas, spausdintinio montažo plokštės ruošinys, skirtas daugiasluoksniams plokštėms gaminti. Laminatas itin plonas – 100  $\mu$ m storio dielektrikas (žr. 5.4 pav., kairė), laminuotas 10  $\mu$ m vario folija iš abiejų pusių. Didelė santykinė dielektrinė skverbtiis sukuria paskirstytą talpą, tačiau gamyboje sunku išvengti oro burbuliukų patekimo. Atsiradęs oro burbuliukas labai sumažina talpą toje plokštės vietoje. Neardomosios kontrolės užduotis – laminatė aptikti nuo 100  $\mu$ m dydžio burbuliukus (žr. 5.4 pav., dešinė). Sluoksnių išdėstymo analizė parodė, kad jei nėra defekto, pagrindinis storio rezonansas bus 14,6 MHz (atspindžio koeficientas 0,2), o papildomi rezonansai bus 18,2 MHz

(atspindžio koeficientas 0,6) ir 29,6 MHz (atspindžio koeficientas 0,5). Esant defektui atsiras tik silpnas 5 MHz rezonansas (atspindžio koeficientas 0,78).



**5.4 pav.** Ieškomų defektų modelis (kairė) bei jų pasiskirstymas bandinyje (dešinė) (20)

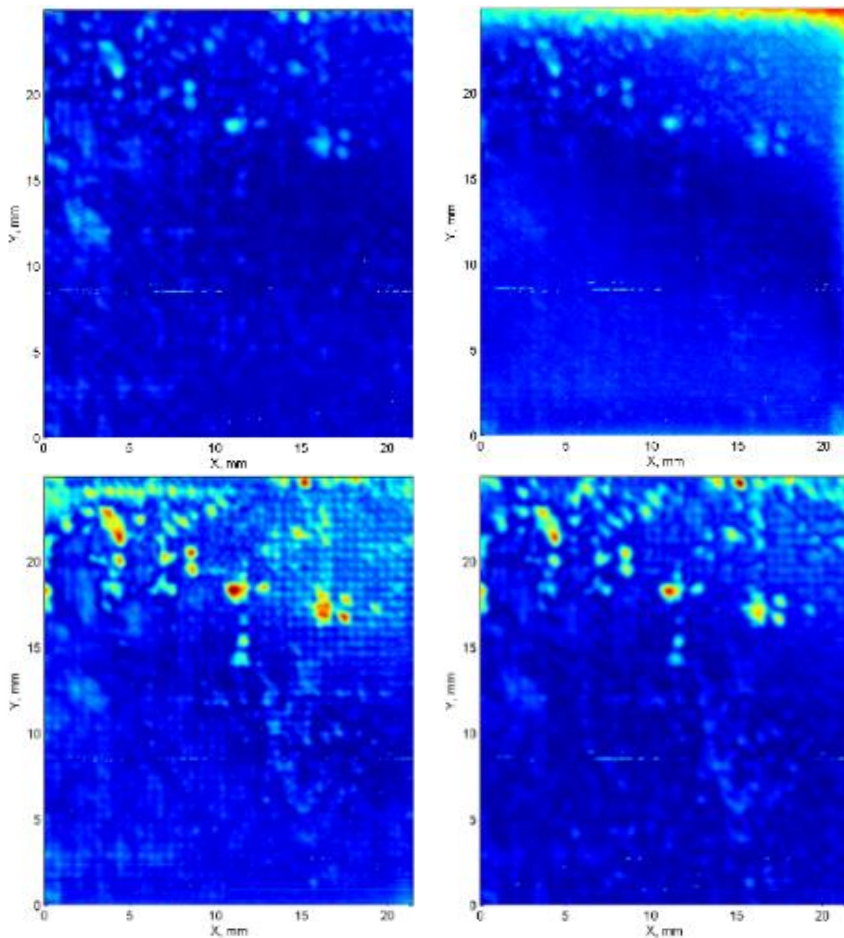
Tyrimui pasirinktas plačiajuostis, sferinio fokuso, 10 MHz centrinio dažnio ultragarsinis keitiklis IRY210 (3 MHz-19 MHz juostos plotis (-20 dB)). Skenavimui pasirinktas 230 x 250 mm plotas laminato krašte (žr. 5.4 pav., dešinė). Tyrimo pradžioje pasirinkta 13 signalų, iš kurių atrinkti penki: 20 ns trukmės impulsas; 10 MHz 3 μs radijo impulsas; APWP signalas; 3 μs trukmės (1–20) MHz LFM signalas ir 3 μs trukmės, 13 elementų 1,5 periodo segmentų Barkerio kodas. Signalų spektrai pateikti 5.5 pav.



**5.5 pav.** Tyrimui naudotų signalų spektrai

Žadinimo amplitudė buvo 15 V, priėmimo kanalo stiprinimas 11 dB, skenuota 0,1 mm žingsniu. Dėl itin žybaus vandens ir bandinio akustinių pilnutinių varžų skirtumo tiesioginė vizualizacija rezultatų nedavė. Pasiūlytas efektyvus defekto signalų išskyrimas grįstas prielaida, kad daugumoje bandinio vietų defektų nėra. Tuomet vidutinis signalas iš visos testavimo srities atitinka signalą be defekto. Pašalinus vidutinį signalą iš kiekviename skenavimo taške išmatuoto signalo turėtų likti tik signalas nuo defekto. Tačiau bandinys nėra idealiai plokščias, todėl tiesiogiai vidurkinti neįmanoma. Tačiau pasinaudojus itin tiksliu ToF įvertinimu, signalas per šią reikšmę gali būti pastumtas naudojant postūmį dažnių srityje. Tokiu atveju signalai gali būti vidurkinami. Bandinio ploto vaizdas, gautas minėtu metodu, visiems signalas pateikiamas 5.6 pav.





**5.6 pav.** C-scan vaizdas po vidurkio pašalinimo: radijo impulsui (viršus, kairė), APWP (viršus, dešinė), LFM (apačia, kairė) ir PSK (apačia, dešinė)

Galima pamatyti, kad LFM ir PSK (Barker 13) užtikrina geriausią kontrastą. Prasto APWP efektyvumo priežastis yra ta, kad APWP yra vienintelis signalas, galintis efektyviai nustatyti pažeidimą viršutinėje vaizdo dalyje. Šie dideli krašto defektų signalai sumažina vaizdo dinaminį diapazoną.

Atlikta defekto nustatymo tikimybės analizė parodė, kad PSK (Barker 13 kodas) buvo efektyviausias. Impulso ir APWP rezultatai, esant 1 % klaidingo aliarmo tikimybei, yra netinkami. Jei naudojamas 10 % klaidingo aliarmo lygis, visi signalai turi panašų efektyvumą: aptikimo tikimybė yra 100 %.



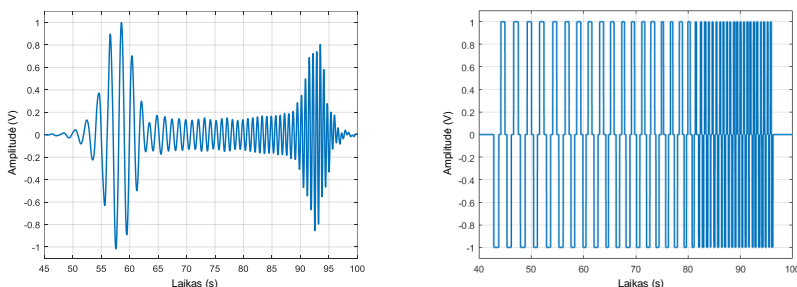
## Spektrinių nuostolių kompensavimas

Šio eksperimento paskirtis – ištirti APWP signalų efektyvumą, siekiant kompensuoti spektrinius nuostolius. Spektroskopijos matavimai buvo atliekami matuojant ploną membraną (187  $\mu\text{m}$  storio). Eksperimento vykdymo sąlygas iliustruoja nuotrauka, pateikta 5.7 pav.



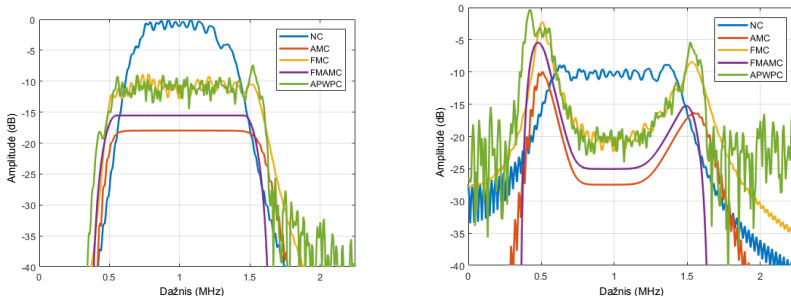
5.7 pav. Spektroskopijos matavimo sąranka

Ultragarsiniai keitikliai pasižymi netolygia perdavimo dažnine charakteristika ir santykinai siaura juosta. Reikia paminėti, kad efektyviam spektroskopijos taikymui juosta turi būti kiek įmanoma platesnė ir spektras tolygus (17). Spektriniais nuostoliams kompensuoti galima būtų naudoti AM ar AM-FM moduliaciją (18), tačiau tokiu atveju bus reikalinga sudėtinga žadinimo elektronika, o naudojamo stiprintuvo galimybės bus išnaudojamos ne visiškai: didžioji signalo dalis yra mažos amplitudės (žr. 5.8 pav.).



5.8 pav. Spektro nuostolių kompensavimas naudojant AM-NLFM moduliaciją (kairė) ir APWP signalus (dešinė)

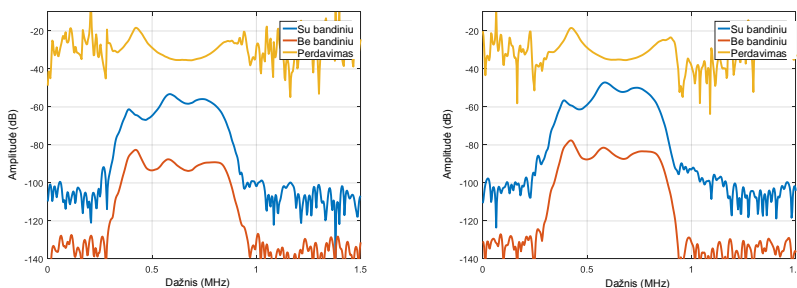
Pasiūlyta spektro kompensavimo metodika naudojant APWP signalo išvedimą iš NLFM signalo. APWP palyginimas su AM, NLFM ir AM-FM kompensuotais signalais pateikiamas 5.9 pav. dešinėje.



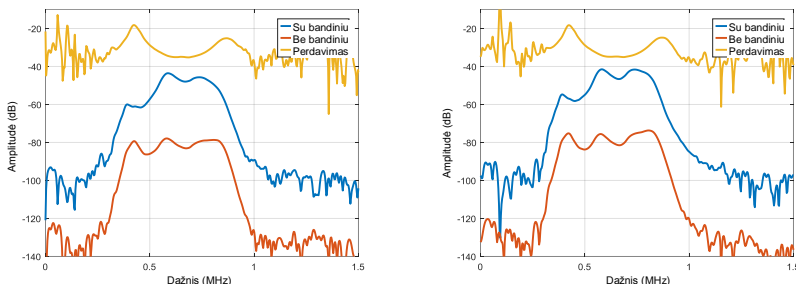
**5.9 pav.** Priimto (kairė) ir išsiųsto (dešinė) signalo spektras po kompensacijos

Matoma, kad nekompensuotas signalas turi didžiausią energijos tankį pralaidos juostoje, tačiau energija greitai krenta už juostos ribų. Nekompensuotas signalas taip pat pasižymi spektriniu netolygumu. Signalai, kompensuoti naudojant AM ir AM-FM, turi labai tolygų spektrą, tačiau jų energija itin žema, nes galios stiprintuvas naudojamas neefektyviai. Energija yra mažesnė, nors ir ilgesnės šių signalų trukmės. NLFM ir APWP signalų energija yra 8 dB didesnė. Svarbu paminėti, kad NLFM ir APWP signalų spektrai panašūs. Tačiau APWP signalai nėra analoginiai, todėl jų generavimas daug paprastesnis.

Pasiūlyta metodika pritaikyta 0,65 MHz centrinio dažnio ultragarso keitiklių poros, patalpintos 30 mm atstumu, spektriniais nuostoliams kompensuoti. Žadinimo įtampa buvo 50 V, priėmimo kanalo stiprinimas buvo 34,59 dB. Eksperimento metu buvo naudojami keturi signalų tipai: trumpi impulsai (šaulis ir impulsas), radijo impulsai (0,65 MHz 1 periodas, 0,35 MHz 5 periodai, 0,9 MHz 5 periodai, 1 periodas 0,5 MHz, 5 periodai 0,5 MHz), LFM (0,3–1) MHz juostos su 3  $\mu$ s, 10  $\mu$ s ir 15  $\mu$ s trukmėmis) ir APWP optimizuotas maksimaliam priimto signalo juostos pločiui (žr. 5.10 pav. ir 5.11 pav.). Paveikslėliuose pateikiami trys spektrai: etaloninio signalo (be bandinio, mėlynos kreivės), matavimo signalo (su bandiniu, raudonos kreivės) ir gautas tiriamosios medžiagos spektroskopinis atsakas (oranžinės kreivės).



**5.10 pav.** Dažninės charakteristikos naudojant impulsą (dešinė) ir radijo (kairė) signalą



**5.11 pav.** Dažninės charakteristikos naudojant LFM (dešinė) ir APWP (kairė) signalą

Impulso spektras nesiekia antrojo rezonansinio dažnio. Radijo impulso signalai turi didelę energiją, bet jų spektras nedengia abiejų rezonansinių smailių. Specialus dvigubas radijo impulso signalas yra kombinuotas iš 0,35 MHz ir 0,9 MHz radijo impulsų. Šie dažniai buvo pasirinkti, kad apimtų bandomosios medžiagos spektrines smailes. Daroma išvada, kad LFM signalai teikia plačiausią pralaidos juostą ir užtikrina didžiausią SNR.

Membranų parametrų matavimai buvo atlikti naudojant rezonansinės spektroskopijos metodą, pasiūlytą (16). Rezonansinė spektroskopija leidžia nustatyti ultragarso greitį, medžiagos storį ir tankį. Apdorojant buvo naudojamas dažnių diapazonas (0,4–0,9) MHz. Matavimai buvo atlikti po 50 kartų kiekvienam signalui. Gautiems greičio, storio ir tankio rezultatams buvo įvertintos atsitiktinės paklaidos, rezultatų sklaida pateikiama 2 lentelėje.

**2 lentelė.** Medžiagos parametrų įvertinimo paklaidos

Signalas	Greitis $\sigma$ (m/s)	Storis $\sigma$ ( $\mu$ s)	Tankis $\sigma$ (g/cm <sup>3</sup> )
Impulsas 0,65 MHz	0,0029	0,3944	0,3426
Radijo impulsas 0,65 MHz 1 periodas	0,0194	2,5691	2,2236
Radijo impulsas 0,35 MHz 5 periodas	0,0266	8,6794	7,1459
Radijo impulsas 0,9 MHz 5 periodas	0,0113	1,4983	0,9799
LFM (0,3–1) MHz 3 $\mu$ s	0,0009	0,3772	0,3265
LFM (0,3–1) MHz 10 $\mu$ s	0,0017	0,3782	0,3279
LFM (0,3–1) MHz 15 $\mu$ s	0,0013	0,3841	0,3324
Šuolis	0,0094	0,8760	0,7582
Radijo impulsas 0,5 MHz 1 periodas	0,5418	3,4897	5,0158
Radijo impulsas 0,5 MHz 5 periodas	0,0092	0,4480	0,3916
LFM (0,2–1) MHz 15 $\mu$ s	0,0014	0,3232	0,2797
Radijo impulsas (0,35 ir 0,9) MHz 5 periodai	0,0021	0,8106	0,7017
APWP	0,0005	0,3381	0,2926

Lentelėje matyti, kad mažiausios atsitiktinės paklaidos gaunamos APWP signalo (Nr. 13) naudojimo atveju. Tokio gero rezultato priežastis ta, kad spektras aprėpia keletą rezonansinių smailių ir užtikrina didelį SNR spektro įdubose. Dvigubo radijo impulso rezultatai prastesni, palyginus su LFM ir APWP. Tai pat

paminėtinas tokio dvigubo radijo impulso trūkumas: kiekvienam naujam bandymo objektui dažniai turi būti parinkti iš naujo, remiantis kalibravimo matavimu. Tuo tarpu APWP signalas optimizuojamas tik kartą, be bandinio.

Membranų parametų matavimai buvo atliekami naudojant rezonansinę spektroskopiją. Buvo padaryta išvada, kad naudojant APWP signalą pasiekiamos mažiausios atsitiktinės paklaidos visų parametų matavimuose: 0,29 g/cm<sup>3</sup> tankio nustatymo paklaida, lyginant su (0,4–7) g/cm<sup>3</sup> kitiems signalams; 0,3 μm storio paklaida lyginant su (0,4–8,6) μm kitiems signalams; 0.5 mm/s ultragarso greičio medžiagoje nustatymo paklaida lyginant su (1–500) mm/s kitiems signalams.

## IŠVADOS

1. Atlikta įprastinių žadinimo signalų analizė atskleidžianti jų trūkumus. Buvo parodyta, kad paprastieji (impulsas arba radijo impulsas) signalai vienu metu neužtikrina energijos ir dažnių juostos pločio. Impulso energijos auginimas, didinant žadinimo amplitudę, sumažina maksimalų veikimo dažnį dėl frontų augimo greičio apribojimų. Šių signalų spektras nėra plokščias, turi spektrinius nulius, didžioji spektrinio turinio dalis yra už keitiklio juostos ribų. Skleisto spektro signalai teikia nepriklausomą energijos ir dažnių juostos pločio valdymą: energija gali būti padidinta ilginant trukmę, kartu nemažinant pralaidos juostos. Tačiau įprasti skleisto spektro signalai turi trūkumų. Jie gali būti suspausti naudojant koreliacinį apdorojimą, o tai sukelia koreliacinius lapelius. Nepaisant to, kad LFM signalai turi platų spektrą, jų šoniniai lapeliai dideli. Nors PSK signalai turi reguliuojamą šoninių lapelių lygį (keičiant kodo ilgį), jų spektras turi įdubas, spektro forma ir juosta yra fiksuota. Nors NLFM, AM ir laisvai pasirenkamos formos signalai teikia spektro valdymą, jiems reikalinga sudėtinga žadinimo elektronika.
2. Atlikus taikymo uždavinių analizę išskirtos signalo savybės, kurios išlaikytos naujuosiuose signaluose: žadinimo efektyvumas ir reikalingos elektronikos paprastumas, spūdimas, didelė energija, koreliacinių savybių ir spektro valdymas. Efektyvumui atskleisti pasirinktos trys taikymo sritys: rezonanso spektroskopija, matavimų ir vizualizacijos atvejai, pasižymintys plačiu signalų dinaminiu diapazonu.
3. Pasiūlyta nauja skleisto spektro signalų klasė – APWP (angl. *Arbitrary Position and Width Pulses*) laisvai pasirenkamos trukmės bei pozicijos impulsų sekos. Jų generavimas grindžiamas stačiakampiais, nmoduliuotais impulsais, kurie gali būti vienpoliarūs ar bipoliarūs su pasirinktinai įterpiamomis pauzėmis. Signalai optimizuojami pagal pasirinktą parametą. Kaip konvergavimo kriterijų buvo pasiūlyta naudoti priimto signalo koreliacijos lapelių lygį, trukmę, energiją, spektro formą ar juostos plotį. Optimizacija įvertina visos sistemos perdavimą. Optimizacijai pagreitinti buvo pasiūlyta realius matavimus pakeisti skaitiniu sistemos perdavimo modeliu. Dėl didelio laisvės laipsnių kiekio galimų kombinacijų skaičius yra itin didelis,

o tiesioginio sprendimo matematinių metodų nebuvimas reikalauja visų galimų derinių per rinkimo. Kadangi visų derinių patikrinti neįmanoma, optimizavimui pasiūlyti trys algoritmai: *Monte-Carlo*, genetinis ir išvedimas iš NLFM.

4. APWP signalų savybės ištirtos remiantis pasirinktais kriterijais. Parodyta, kad šie signalai spektrą gali sutelkti į pasirinktą juostą ar formą. Signalai turi programuojamą šoninių lapelių lygį, kuris yra mažesnis nei LFM ir PSK (Barker) signalų ir sulyginamas su impulso. Parodyta, kad, nepaisant ženklaus signalų persidengimo, APWP ir LFM signalai, palyginus su impulsu, labai pagerino iteratyvios dekompozicijos algoritmo efektyvumą. APWP signalai pasižymėjo geriausiu dekompozicijos efektyvumu (paklaidos sumažintos nuo 10 ns iki 0,5 ns).
5. Pademonstruota APWP signalų pridėtinė vertė ultragarsiniuose matavimuose bei vizualizacijoje. Parodyta, kad dėl mažesnio šoninių lapelių lygio ir didesnės SNR, atsarga pagal triukšmą gali būti pagerinta iki 40 % net ir siaurajuosčio keitiklio atveju. Nustatyta, kad srauto matavimo sisteminės paklaidos (skirtuminio ToF) sumažėja naudojant APWP (0,93 l per 15 h), palyginus su įprastiniu impulsu (39 l), radijo impulso (5 l) ir LFM signalais (5 l). Pademonstruotas geriausias spektrinių nuostolių kompensavimo efektyvumas rezonanso spektroskopijoje, jį palyginus su skleisto spektro AM, LFM, NLFM, AM-NLFM signalais. Mažiausios atsitiktinės medžiagos storio, bangų sklaidimo greičio ir tankio įvertinimo paklaidos gautos APWP signalams (pvz. 0,29 g/cm<sup>3</sup> lyginant (0,4–7) g/cm<sup>3</sup> kitiems signalais).

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. KALASHNIKOV, A.N., IVCHENKO, V., CHALLIS, R.E., and HOLMES, A.K. Compensation for temperature variation in ultrasonic chemical process monitoring. In *Ultrasonics Symposium, 2005 IEEE*. 2005, vol 2, pp. 1151-1154. ISSN 1051-0117
2. ZHENG, D., FU, X. and YANG, Z. Research and realisation of reciprocal electronic circuits for gas ultrasonic flow meter. *IET Science, Measurement & Technology*. 2017, vol. 11, issue 5, pp. 666-672. ISSN 1751-8822
3. POLLAKOWSKI, M. and ERMERT, H. Chirp signal matching and signal power optimization in pulse-echo mode ultrasonic nondestructive testing. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 1994, vol. 41, no.5, pp. 655-659. ISSN 0885-3010.
4. VIROLAINEN, T., ESKELINEN, J., and HAEGGSTROM, E. Frequency domain low timebandwidth product chirp synthesis for pulse compression side lobe reduction. In *Ultrasonics Symposium (IUS), 2009 IEEE International*, 2009, pp. 1526-1528. ISSN 1051-0117
5. ZAPF, M., DEROUICHE, B.F. and RUITER, N.V. Evaluation of chirp and binary code based excitation pulses for 3D USCT. In *Ultrasonics Symposium (IUS), 2009 IEEE International*, 2009, pp. 1996-1999. ISSN 1051-0117
6. HUANG, S.W. and LI, P.C. Arbitrary waveform coded excitation using bipolar square wave pulsers in medical ultrasound. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 2006, vol 53, no 1, pp. 106-116. ISSN 0885-3010
7. HUTCHINS, D., et al. Coded waveforms for optimised air-coupled ultrasonic non-destructive evaluation. *Ultrasonics*, 2014, vol. iss. 7, pp. 1745–1759. ISSN 0041-624X
8. MISARIDIS Thanassis. *Ultrasound Imaging Using Coded Signals*. Ph.D. thesis. Technical University of Denmark, Department of Electrical Engineering, 2001, p. 228.
9. CHIMURA, D., TOH, R. and MOTOOKA S. Spectrum Compensation for Time Reversal Method on Ultrasonic Target Detection Using Pulse Compression. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2017, vol. 64, iss. 12, pp. 1874 – 1883. ISSN 0885-3010
10. RADHAKRISHNA RAO, C. Information and the accuracy attainable in the estimation of statistical parameters. Springer, New York, NY 1992. ISBN 978-0-387-94037-3
11. ZALA, C. A., BARRODALE, I. and MCRAE K. I. High Resolution Deconvolution of Ultrasonic Traces. In *Signal Processing and Pattern*

- Recognition in Nondestructive Evaluation of Materials*. Vol.44, pp. 101-108. Print ISBN 978-3-642-83424-0
12. JAHANGIR KHAN Kayani. *Development and application of spread-spectrum ultrasonic evaluation technique*. Dissertation. Digital Repository, Iowa State University 1996, p.-227
  13. KAGEYAMA, S., HASEGAWA, H. and HIROSHI, K. Increasing Bandwidth of Ultrasound Radio Frequency Echoes Using Wiener Filter for Improvement of Accuracy in Measurement of Intima-Media Thickness. *Japanese journal of applied physics*, 2013, vol. 52, no. 7s, pp. 07HF04-1-6. ISSN 0021-4922
  14. YAO, Z. and YANG, J. Optimization of Self-Matching Chaotic Pulse Position Modulation Excitation Sequences for Multichannel Sonar Ranging System. *Journal of Information & Computational Science*. 2011, vol. 8, no. 16, pp. 4105–4114. ISSN 1548–7741
  15. COWELL, DM. and FREEAR, S. Quinary excitation method for pulse compression ultrasound measurements. *Ultrasonics*, 2008, vol. 48, iss. 2, pp. 98-108. ISSN 0041-624X
  16. ALVAREZ-ARENAS, T. E. G. Magnitude and phase spectral analysis of through-transmitted ultrasound pulses for the determination of the ultrasound velocity and the thickness of solid plates. *Physics Procedia*. 2010, vol.3, iss. 1, pp. 541–550. ISSN 1875-3892
  17. POLLAKOWSKI, M., ERMERT, H., BERNUS, L. and SCHMEIDL, T. The optimum bandwidth of chirp signals in ultrasonic applications. *Ultrasonics*. 1993, vol. 31, no. 6, pp. 417-420. ISSN 0041-624X
  18. TOH, R. and MOTOOKA, S. Target ranging using ultrasonic sensitivity-compensated signal and pulse compression. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2009, vol. 48, no. 7s, pp. 07GB09-1-7. ISSN 0021-4922
  19. SVILAINIS, L., ALEKSANDROVAS, A., LUKOŠEVIČIŪTĖ, K. and EIDUKYNAS, V. Investigation of the time of flight estimation errors induced by neighboring signals. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2013 IEEE 7th International Conference on*. 2013, vol. 1, pp. 413-418. ISBN 9781479914265
  20. SVILAINIS, L., RODRÍGUEZ, A., EIDUKYNAS, V. and ALEKSANDROVAS, A. Comparison of Conventional and Spread Spectrum Signals Application in Thin PCB Imaging. In *ECNDT 2014 proceedings : 11th European conference on non-destructive testing*. 2014, pp. 1-9. ISBN 9788021450189

## PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

### **Straipsniai, paskelbti Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą**

1. Svilainis, L.; Rodriguez-Martinez, A.; Chaziachmetovas, A.; **Aleksandrovas, A.** Ultrasound Transmission Spectral Compensation Using Arbitrary Position and Width Pulse Sets. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. ISSN: 0018-9456. DOI: 10.1109/TIM.2018.2809838. 2018, vol. 67, iss. 8, pp. 1778-1785. (IF: 2.794, Q1)
2. **Aleksandrovas A.**; Rodríguez, A.; Svilainis, L.; de la Casa, M.A.; Salazar, A. Ultrasound-based density estimation of composites using water-air interface. *Elektronika ir elektrotechnika*. Kaunas: KTU. ISSN 1392-1215. 2016, vol. 22, iss. 6, pp. 28-32. (IF: 0,859, Q4)
3. Svilainis, L.; Rodríguez, A.; **Aleksandrovas, A.** Ultrasonic system models for pulse trains excitation tuning. *Elektronika ir elektrotechnika*. Kaunas: KTU. ISSN 1392-1215. 2016, vol. 22, iss. 2, pp. 62-65. (IF: 0,859, Q4)
4. Svilainis, L.; Dumbrava, V.; Kitov, S.; **Aleksandrovas, A.**; Tervydis, P.; Liaukonis, D. Electronics for ultrasonic imaging system. *Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and electrical engineering*. Kaunas: KTU. ISSN 1392-1215. 2014, Vol. 20, no. 7, pp. 51-56. (IF: 0,561, Q4)
5. Svilainis, L.; **Aleksandrovas, A.** Application of arbitrary pulse width and position trains for the correlation sidelobes reduction for narrowband transducers. *Ultrasonics*. Amsterdam: Elsevier Science. ISSN 0041-624X. 2013, vol. 53, iss. 7, pp. 1344-1348. (IF: 1,805, Q2)
6. Svilainis, L.; Lukoševičiūtė, K.; Dumbrava, V.; Chaziachmetovas A.; **Aleksandrovas, A.** Application of arbitrary position and width pulse trains signals in ultrasonic imaging: correlation performance study. *Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and Electrical Engineering*. Kaunas: KTU. ISSN 1392-1215. 2013, vol. 19, no. 3, pp. 57-60. (IF: 0,445, Q4)

### **Straipsniai, paskelbti recenzuojamų tarptautinių mokslinių konferencijų pranešimų medžiagoje**

1. Svilainis, L.; Dumbrava, V.; Kitov, S.; **Aleksandrovas, A.**; Chaziachmetovas, A.; Eidukynas, V.; Kybartas, D.; Lukoševičiūtė, K. Acquisition system for the arbitrary pulse width and position signals application in ultrasound. *Sensor letters*. Valencia, CA: American Scientific Publishers. ISSN 1546-198X. 2014, vol. 12, iss. 9, pp. 1399-1407.
2. Svilainis, L.; Dumbrava, V.; **Aleksandrovas, A.**; Chaziachmetovas, A.; Kitov, S. Application of iterative deconvolution technique for ultrasonic imaging. *Sensor letters*. Valencia, Ca: American Scientific Publishers. ISSN 1546-198X. 2014, vol. 12, iss. 11, pp. 1572-1582.



3. Svilainis, L.; **Aleksandrovas, A.**; Lukoševičiūtė, K.; Eidukynas, V. Comparison of conventional and spread spectrum signals time of flight error caused by neighboring reflections. *International Journal of Computing. Research Institute of Intelligent Computer Systems. Ternopil National Economic University. ISSN 1727-6209. 2013, vol. 12, iss. 3, pp. 241-247*
4. Svilainis, L. ; Dumbrava, V.; Chaziachmetovas, A.; **Aleksandrovas, A.** Application of spread spectrum signals in ultrasonic imaging. *Journal of applied electromagnetism. Athens: ICCS. ISSN 1109-1606. 2013, vol. 15, no. 1, pp. 49-64.*

### **Santraukos mokslinių konferencijų medžiagoje**

1. Svilainis, L.; Rodriguez-Martinez, A.; Chaziachmetovas, A.; **Aleksandrovas, A.** Application of binary excitation spread spectrum signals for spectral compensation. *IDAACS 2017: 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, 21-23 September 2017, Bucharest, Romania. Piscataway, NJ: IEEE, 2017. ISBN 9781538606964. pp. 1105-1110.
2. Chaziachmetovas, A.; Svilainis, L; Kybartas, D.; **Aleksandrovas, A.**; Liaukonis, D. Evaluation of material nonlinearities using rectangular pulse trains for excitation. *Physics procedia: proceedings of the 2015 ICU international congress on ultrasonics, Metz, France, May 10-15, 2015.* Amsterdam : Elsevier. 2015, vol. 70, pp. 582-585.
3. Svilainis, L.; Dumbrava, V.; Chaziachmetovas, A.; Jurkštas, P.; **Aleksandrovas, A.** Technique for the performance evaluation of the ultrasonic preamplifier input protection circuits. *IDAACS'2015: proceedings of the 8th international conference on intelligent data acquisition and advanced computing systems: technology and applications*, September 24-26, 2015, Warsaw, Poland. Piscataway, NJ: IEEE, 2015. ISBN 9781467383592. pp. 102-107.
4. Liaukonis, D.; **Aleksandrovas, A.**; Svilainis, L. Epoxy cure monitoring using ultrasonic spread spectrum binary signals. *2014 IEEE 2nd Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE): proceedings of the 2nd workshop*, November 28-29, 2014, Vilnius, Lithuania / Vilnius Gediminas Technical University, Riga Technical University. Piscataway, NJ: IEEE, 2014. ISBN 9781479971220. pp. 1-7
5. Svilainis, L.; Rodríguez, A.; Dumbrava, V.; Lukoševičiūtė, K.; **Aleksandrovas, A.**; Liaukonis, D. Application of arbitrary position and width pulse train signals in ultrasonic imaging. *ECNDT 2014 proceedings: 11th European conference on non-destructive testing*, October 6-10, 2014, Prague, Czech Republic / Czech Society for NDT and European Federation for NDT.

- Brno: Brno Technical University of Technology, 2014. ISBN 9788021450189. pp. 1-9.
6. Svilainis, L.; Rodríguez, A.; Eidukynas, V.; **Aleksandrovas, A.** Comparison of conventional and spread spectrum signals application in thin PCB imaging. *ECNDT 2014 proceedings: 11th European conference on non-destructive testing*, October 6-10, 2014, Prague, Czech Republic / Czech Society for NDT and European Federation for NDT. Brno: Brno Technical University of Technology, 2014. ISBN 9788021450189. pp. 1-9.
  7. Svilainis, L.; Lukoševičiūtė, K.; **Aleksandrovas, A.** Time of flight estimation of sparse ultrasonic reflections using reiterative deconvolution technique. *ACOMEN 2014: book of abstracts of the 6th international conference on Advanced computational methods in engineering*, 23-28 June 2014. Ghent University June 6, 2014. Ghent: Ghent University, 2014. ISBN 9789082230901. pp. 27-28.
  8. Svilainis, L.; **Aleksandrovas, A.**; Lukoševičiūtė, K.; Eidukynas, V.. Investigation of the Time of Flight estimation errors induced by neighboring signals. *IDAACS'2013: proceedings of the 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*, September 12-14, 2013, Berlin, Germany. Vol. 1. Piscataway: IEEE, 2013. ISBN 9781479914265. pp. 413-418.
  9. Svilainis, L.; Dumbrava, V.; **Aleksandrovas, A.**; Chaziachmetovas, A.; Kitov, S.; Pagodinas, D. Signal stripping technique for ultrasonic imaging. *IC-MINDT-2013: Materials integrated non destructive testing : 5th international conference on NDT of HSNT*, 20-22 May, 2013 Athens, Greece. Athens: HSNT. 2013, pp. 1-8.
  10. Svilainis, L.; Dumbrava, V.; Kitov, S.; **Aleksandrovas, A.**; Chaziachmetovas, A.; Eidukynas, V.; Kybartas, D.; Lukoševičiūtė, K. Ultrasonic systems for arbitrary pulse width and position trains application for imaging. *IC-MINDT-2013: Materials Integrated Non Destructive Testing - 2013 : 5th International Conference on NDT of HSNT*, 20-22 May, 2013 Athens - Greece Athens : HSNT. 2013, pp. 1-10.
  11. Svilainis, L.; **Aleksandrovas, A.**; Lukoševičiūtė, K. Arbitrary width and position pulse trains application for ultrasonic imaging: initial study. *Proceedings of 7th international conference on communications, electromagnetics and medical applications*, Athens, Greece, 8-10 November, 2012 (CEMA'12) / Faculty of Telecommunications Technical University of Sofia, Bulgaria; National Technical University of Athens, Greece. School of electrical and computer engineering. ISSN 1314-2100. 2012, pp. 87-90.
  12. Svilainis, L.; Dumbrava, V.; Chaziachmetovas, A.; **Aleksandrovas, A.** Pulser for arbitrary width and position square pulse trains generation. *2012 IEEE International Ultrasonics Symposium*, October 7 - 10, 2012, Dresden,

Germany: proceedings. Piscataway: IEEE, 2012. ISBN 9781467345620. pp. 1746-1749.

## **Konferencijų pranešimai**

1. Rodríguez, A.; de la Cassa Lillo, M. A.; **Aleksandrovas, A.**; Svilainis, L.; Galiana, J. C. Characterization of nanoparticles doped composites using ultrasound. *Ultrasonics 2016: 2nd international conference on ultrasonic-based applications: from analysis to synthesis*, 6-8th June 2016, Caparica, Portugal. (S.I.): Proteomass, 2016. ISBN 9789899936195. pp. 177.

## **INFORMACIJA APIE DISERTACIJOS AUTORIŲ**

Arturas Aleksandrovas gimė 1988 m. Kaune.

### **Išsilavinimas**

- 2007 m. baigė Kauno Milikonių vidurinę mokyklą.
- 2011 m. baigė Kauno technologijos universitetą (Telekomunikacijų ir elektronikos fakultetą) ir įgijo elektronikos inžinerijos bakalauro laipsnį.
- 2013 m. su pagyrimu baigė Kauno technologijos universitetą (Telekomunikacijų ir elektronikos fakultetą) ir įgijo elektronikos inžinerijos magistro kvalifikacinį laipsnį.
- 2013–2017 m. studijavo elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties (01T) doktorantūroje Kauno technologijos universiteto Elektros ir elektronikos fakulteto Elektronikos inžinerijos katedroje.

### **Darbo patirtis**

- 2010–2012 m. Kauno technologijos universiteto Elektroninių ir matavimo sistemų bei Signalų apdorojimo katedrose dirbo jaunesnioju laborantu.
- 2012–2014 m. Kauno technologijos universiteto Signalų apdorojimo katedroje dirbo projekto inžinieriumi.
- 2013–2015 m. Kauno technologijos universiteto Elektronikos inžinerijos katedroje dirbo projekto jaunesnioju mokslo darbuotoju.
- Nuo 2014 m. Kauno technologijos universiteto Elektronikos inžinerijos katedroje dirba asistentu.

### **Svarbiausi pasiekimai**

Arturas Aleksandrovas yra 22 mokslinių publikacijų bendraautoris. 6 iš jų paskelbtos mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą. Jis taip pat yra 14 tarptautinių konferencijų pranešimų autorius.

El. paštas [arturas.aleksandrovas@gmail.com](mailto:arturas.aleksandrovas@gmail.com)

## ABSTRACT

### Relevance of the research

The area of ultrasound applications is very wide. It is used in medical measurements, NDT (Nondestructive Testing) (1), materials properties study, liquid and gas flow measurement (2), food quality inspection and many other areas. The main advantages of ultrasound are that it does not use ionizing radiation, it directly interacts with material mechanical properties, it can penetrate metals and opaque materials, and that the required equipment is of low cost, low energy, lightweight and relatively small in size.

There are two main ultrasonic NDT applications: measurements and imaging. Each of these applications requires different parameters to get reliable results. In measurement applications, the information about the objects under analysis is obtained from the signal propagation time, the reflection amplitude and/or the attenuation in the material. As for imaging applications, the intensity of the reflections and their position in time provide the location and severity of defects or inhomogeneities.

Unfortunately, ultrasound has also some disadvantages: probing signals undergo not just attenuation, but also mode conversion, diffraction and have a limited bandwidth (3). This bandwidth limiting is caused by the material (attenuation depends on frequency, therefore higher frequencies are attenuated more) and the transducer. Therefore, the quality of imaging and measurement applications depends on the probing signal. Most ultrasonic systems use simple signals, such as pulse or toneburst, because these signals are easy to generate and easy to interpret the results, but they either lack energy or bandwidth.

Spread spectrum (SS) signals, such as arbitrary waveform, chirp (LFM – Linear Frequency Modulation), nonlinear chirp (NLFM – Nonlinear Frequency Modulation) and PSK – Phase Shift Keying) sequences, appear to be a solution for these shortcomings (4,5,6). Application of spread spectrum signals offers significant advantages over simple signals, which can be summarized as:

- better SNR can be achieved by increasing excitation signal duration, yet not losing the signal bandwidth;
- spectral shape can be programmed, while spectrum of the simple signals has a fixed shape (*sinc*) (9);
- bandwidth expansion beyond the transducer passband or smoothing can be achieved due to losses compensation.

Unfortunately, SS signals also has some disadvantages, mainly related to their length, dynamic range, spectral flatness and programmability. Regarding their length, SS signals have to be long in order to gain the energy, which could lead to reflections overlap; even for very sparsely spaced reflections. On the other hand, the dynamic range in imaging is directly related with the dynamic range of the sidelobes, that is, the ration between main lobe and sidelobe amplitudes, and

SS signals suffer from large correlation sidelobes. For example, PSK are good in orthogonal probing, but have significant sidelobes and their spectrum is fixed and not flat (7). Chirp, especially nonlinear, is good in spectral flatness, but it has also significant correlation sidelobes. The cause is at the start and the end of the signal: all frequencies are present here so the spread spectrum property is distorted. This can be suppressed using windowing (Hamming, Tukey) but then efficiency will suffer. Spectral programming of chirp is complex – no direct solution is available, although inverse solutions and approximations have been offered with some success.

Finally, there is another important issue. Probing signals can be classified by the way and how they are generated. For example, rectangular signals are generated by simple switch(-es) and arbitrary waveform generators use linear amplifier at the output. Rectangular excitation is more attractive and is widely used because: i) it is simpler and the cost of the equipment is lower, ii) it has a higher efficiency, resulting in less heat and longer battery life and iii) the size and weight of the equipment is lower, and portability is demanded everywhere. Unfortunately, rectangular signals exhibit certain disadvantages: additional spectral ripples and additional correlation sidelobes.

**The aim of the research** is to develop a new signals class in order to overcome the problems of conventional spread spectrum signals, and to investigate the performance of these signals in ultrasonic imaging and measurements.

### **Tasks of the research**

The following tasks were formulated in order to achieve the objective:

1. Performance analysis of conventional excitation signals in imaging and measurement applications in order to rectify the shortcomings of these signals. Useful properties to be retained should be identified and possible applications for performance demonstration should be selected.
2. Development of a new type of the rectangular excitation signals capable of solving the shortcomings of the conventional signals. Design of the APWP (Arbitrary Position and Width Pulses) optimization technique; rectify performance parameters to be used as convergence criteria; propose a candidate set generation algorithm; propose a simple system transfer model for optimization.
3. Investigate the performance of APWP signals using the metrics rectified.
4. Demonstrate the APWP signals performance in imaging and measurement.

## **Scientific novelty**

1. As a result of this work, a new type of rectangular excitation SS signals has been proposed: trains of arbitrary position and width pulses (APWP).
2. The usual approach to SS signals application does not assume signal optimization, therefore it is not adapted neither to the electronics, the transducers nor the materials under analysis. The novelty of the proposed APWP approach is the optimization of the APWP train accounting of the signal transmission through the system, which enhance the properties of the signals in terms of dynamic range, bandwidth and spectral flatness.
3. It was proposed to use a simple numerical model of the signal transmission through the ultrasonic system to speed up the optimization process: instead of doing the iterations on-line (in real environment), those are carried out virtually, using the system transmission model; such an approach not only speeds up the process but also ensures stable experiment conditions.
4. Three types of optimization procedures (Monte Carlo, genetic and combined) have been developed and tested. The best performance has been found when the initial conditions are defined by the rectangular waves derived from optimized nonlinear frequency modulation SS signals, and then optimization of pulse durations is carried out.

## **Practical value of the work**

It is important to ensure the quality of results in ultrasonic measurements. Quality is determined by the received signal energy, bandwidth and correlation properties. Signals currently in use either do not provide the energy and bandwidth simultaneously but have good temporal properties (pulse, toneburst, step and spike). Conventional SS signals (phase manipulation by m-sequences, linear frequency modulation, chirp) do not offer the programmability of the spectral shape, or do not have the ability to control the correlation properties (chirp), or require complex equipment for excitation (arbitrary waveform signals).

To overcome the aforementioned shortcomings and limitations, a new type of spread spectrum signals (optimized APWP) was proposed in this work, which offers both wide bandwidth, high energy, has the ability to program the spectral shape and correlation properties and simultaneously do not require complex excitation electronics. The main advantages of the proposed APWP signals can be summarized as follows:

- simple excitation electronics is required, thanks to the elementary construction of pulse sets;
- spectral parameters can be programed, maintaining the excitation efficiency;

- combination of the advantages of square pulses and the SS signals;
- sidelobes' level can be minimized by adapting the excitation to the transducer and/or the system frequency response, therefore increasing the dynamic range.

With these enhancements, the proposed signals will be of great interest for the time delay estimation based applications, such as navigation, anemometry, flow measurement, ranging and material measurements. The signals allow to improve the measurement quality; due to the expanded effective bandwidth, better compression, lower correlation sidelobes and higher SNR.

It will also be of interest for imaging applications. Imaging resolution is improved by the expanded envelope bandwidth, and contrast is increased by the higher SNR and lower sidelobes.

Finally, these signals are extremely efficient in spectroscopy, where both the spectral coverage, flatness and SNR are important.

Results have been applied while carrying out these research projects:

- „Novel spread spectrum technologies in digital ultrasonic systems“, ULTRASPREAD from the Research Council of Lithuania.
- „Smart mechatronics technologies and solutions for processing effectiveness and environment care: from materials to tools“, In-smart EU structural support program.
- „Adaptive deconvolution algorithms for ultrasonic measurements“, ADECON, Kaunas University of Technology – funded interdisciplinary project.
- Industry contract for R&D with UAB SCiiL Baltic „ Electronics prototype for tank leakage detection using ultrasound“.
- R&D contract with the University Miguel Hernandez (Spain) „Prototype development of ultrasonic spread spectrum excitation data acquisition system“.

### **Approbation**

The scientific results obtained during the period of the dissertation were presented in 22 publications: 6 articles were published in international journals referred in the Thomson Reuters Web of Science DB, 2 articles in journals referred in WoS DB but with no indexing, 14 publications appeared in conference proceedings of the conferences held in Bucharest (Romania), Metz (France), Warsaw (Poland), Prague (Czech Republic), Ghent (Belgium), Berlin (Germany), Athens (Greece), Sofia (Bulgaria), Dresden (Germany), Madrid (Spain) and Caparica (Portugal). The results were also presented in conferences held in Lithuania (Vilnius and Palanga). A grant for doctoral studies was received, provided by the Research Council of Lithuania and the Ministry of Education of the Republic of Lithuania for the period 2013-2017. A doctoral internship was

carried out in University Miguel Hernandez in Elche, Spain, in 2016, funded by the ERSASMUS+ program.

### **Results presented in defense of the thesis**

1. It has been demonstrated that conventional excitation signals have shortcomings and limitations:
  - pulse or toneburst signals do not provide energy and bandwidth simultaneously;
  - spectral shape and bandwidth of PSK signals is fixed; chirp signals have fixed spectral shape and large correlation sidelobes;
  - nonlinear chirp or arbitrary waveforms require complex excitation electronics.
2. APWP signals optimization technique has been proposed. Optimization accounts for the transfer function of the system. It is based on the following convergence criteria: the relative sidelobes level (both RF and envelope), the relative noise margin, the mainlobe width, the effective bandwidth and the spectral flatness.
3. Optimized APWP signals can give better performance metrics, in particular:
  - APWP signals offer programmable correlation sidelobes, which can be made lower or comparable to other SS signals;
  - APWP spatial resolution is comparable to chirp;
  - APWP performance in the iterative deconvolution in the case of small reflections spacing is comparable to chirp, APWP performance is best in the case of large spacing;
  - complex spectral shape can be designed, which can be used for either bandwidth improvement or spectral losses compensation;
  - instead of using modulation (as PSK signals), spectra concentration within the passband can be achieved without sacrificing other parameters.
4. Performance of the APWP signals has been tested in imaging and measurement applications with successful results:
  - bias errors of flow measurement (zero flow temperature drift) can be improved;
  - relative noise margin can be improved, even with narrowband transducers;
  - spectral coverage (wider material properties and thickness range) and accuracy (better model fitting performance) of spectroscopy measurements can be improved;
  - deconvolution performance is improved.



## Structure and coverage of the thesis

The dissertation consists of an introduction, five parts, conclusions, list of references and annexes. The volume of the work is 127 pages (132 pages with annexes). There are 11 tables, 73 equations and 144 figures. The list of references consists of 100 titles. The content of the thesis is organized as follows:

1. In the first chapter, an extensive analysis of the existing signals is presented, aiming to outline the shortcomings and advantages of the existing signals.
2. The second chapter analyzes applications of rectangular spread spectrum signals, aiming to indicate the advantages of these signals and also to rectify the problems occurring.
3. The third chapter is dedicated to develop the APWP optimization technique. Design of the convergence criteria, candidate set generation algorithm and system transfer model are presented.
4. The fourth chapter presents an exhaustive experimental performance analysis of the proposed APWP signals.
5. The fifth chapter is devoted to demonstrate the added value that APWP signals bring in imaging and measurement applications.

## CONCLUSIONS

1. Limitations of conventional excitation signals have been rectified through performance analysis. It has been demonstrated that simple (pulse or toneburst) signals do not provide energy and bandwidth simultaneously. Energy increase of the pulse by larger excitation amplitude reduces the maximum operation frequency, due to a slew rate limitation. The spectral shape of these signals is not flat, spectral zeros are present and a large part of the spectral content is outside of the transducer passband. Spread spectrum signals offer independent control over energy and bandwidth: energy can be increased by longer durations without bandwidth reduction. Yet, conventional spread spectrum signals have shortcomings. Though they can be compressed through correlation processing, this produces correlation sidelobes. LFM (chirp) signals have good spectral coverage, they possess large sidelobes. While PSK signals have controllable sidelobes (by code length), their spectrum has dips, spectral shape and bandwidth are fixed. Despite NLFM, AM and arbitrary waveform signals having spectral control, they require complex excitation electronics.
2. Applications analysis allowed to select the properties that have been retained in new signals: efficiency of the excitation, low complexity of the electronics required for signal generation, compressibility, high energy, correlation properties and spectral control. Three application areas were selected: resonant spectroscopy, measurements and imaging cases with a high dynamic range of reflections.

3. A new class of spread spectrum signals has been proposed, APWP (Arbitrary Position and Width Pulses) sequences. They are based purely on binary, unmodulated unipolar or bipolar pulses with optional zeros inserted. Signals are optimized according to the selected performance parameter. Correlation lobes, energy, spectral shape and bandwidth of the received signal were proposed as convergence criteria. The optimization accounts for the system transmission response. It was proposed to replace the online measurements by a numerical model of the system transmission in order to speed up the optimization. A high degree of freedom and absence of mathematical methods for such sequences derivation requires full permutation of all possible pulse combinations, but the number of possible combinations is extremely large. Three algorithms have been suggested to ease the generation of candidate sequences: Monte Carlo, genetic and derivation from NLFM.
4. Performance of the APWP signals has been investigated using rectified metrics. It has been demonstrated that APWP signals are able to concentrate the signal's spectrum into an arbitrary bandwidth or shape, or can add energy out of band (8 dB higher spectral components have been obtained in stop band). It was shown that APWP signals have a programmable sidelobes' level. Sidelobes' level lower than chirp and PSK (Barker) signals and similar to pulse can be achieved. APWP signals provide better iterative deconvolution performance compared to pulse signals. It was demonstrated that APWP signals, despite significant overlap, have improved the iterative deconvolution performance (error was reduced from 10 ns to 0.5 ns).
5. It has been demonstrated that APWP signals offer improved performance in imaging and measurement applications. The relative noise margin was improved by 40 % due to the lower sidelobe level and higher SNR; even for narrowband transducers in anemometry. Significant flow meter bias errors (differential ToF) reduction is achieved with APWP (0.935 l over 15 h), compared to conventional pulse (39 l), toneburst (5 l) and LFM signals (5 l). Superior APWP performance over conventional spread spectrum AM, LFM, NLFM, AM-NLFM signals has been demonstrated in spectral losses compensation in resonant spectroscopy. The APWP signal provides the lowest random errors in material thickness, velocity and density estimation (e.g. 0.29 g/cm<sup>3</sup> versus (0.4-7) g/cm<sup>3</sup> for other signals).



UDK 620.179.16.+534.08](043.3)

SL344. 2018-09-19, 3,25 leidyb. apsk. I. Tiražas 50 egz.

Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas  
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas