

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
INFORMATIKOS FAKULTETAS
KOMPIUTERIŲ KATEDRA**

Vygintas Kazanavičius

**REALAUS LAIKO NEARDANČIOSIOS
KONTROLĖS SIGNALŲ APDOROJIMO SISTEMA**

Magistro darbas

**Vadovas
prof. habil. dr. Laimutis Telksnys**

KAUNAS, 2005

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
INFORMATIKOS FAKULTETAS
KOMPIUTERIŲ KATEDRA**

**TVIRTINU
Katedros vedėjas
prof. habil. dr. E.Kazanavičius**

2005 05

**REALAUS LAIKO NEARDANČIOSIOS
KONTROLĖS SIGNALŲ APDOROJIMO SISTEMA**

Informatikos magistro baigiamasis darbas

**Kalbos konsultantė
Lietuvių k. kat. lekt.
dr. J. Mikelionienė**

2005 05

**Recenzentas
doc. dr. A.Mikuckas**

2005 05

**Vadovas
prof. habil. dr. L.Telksnys**

2005 05

**Atliko
IFM 9/1 gr. stud.
V.Kazanavičius**

2005 05

KAUNAS, 2005

TURINYS

ĮVADAS	7
1. REALIOJO LAIKO NEARDANČIOSIOS KONTROLĖS METODŲ APŽVALGA.....	9
1.1. Realiojo laiko neardančiosios kontrolės sistema.....	9
1.2. Medžiagos sluoksnių storio nustatymo metodų apžvalga	11
1.2.1. Ultragarsinio signalo sklidimo matematiniai modeliai.....	12
1.2.2. Sluoksnių storio įvertinimo metodai.....	14
1.3. Realiojo laiko signalo sklidimo trukmės nustatymo metodų analizė.....	18
1.3.1. Maksimumų izoliacijos metodas.....	18
1.3.2. Koreliacinis metodas.....	19
1.3.3. Tiesioginis koreliacinės funkcijos taikymas	20
1.4. Sluoksnių ribų nustatymas.....	22
1.4.1. Koreliacinis langų paieškos metodas.....	22
1.4.2. Koreliacinis langų paieškos metodas panaudojant dekonvoliucijos metodus.....	22
1.5. Išvados	23
2. REALIOJO LAIKO NEARDANČIOSIOS KONTROLĖS SISTEMOS MODELIS	24
2.1. Koreliacijos funkcijos taikymo dalimis metodika.....	24
2.2. Fizinės aplinkos modeliavimas	27
2.3. Realiojo laiko NDT sistemos veikimo algoritmas	29
2.4. Sluoksnių nustatymas slenkančio lango paieškos metodu ir algoritmas	30
2.4.1. Langų paieškos algoritmas	31
2.5. Koreliacijos maksimumo paieškos lange metodų sudarymas ir tyrimas	33
2.5.1. Koreliacinės funkcijos skaičiavimo ir maksimumo paieškos perrinkimu metodas ir algoritmas	33
2.5.2. Globalaus optimizavimo metodų panaudojimas koreliacijos maksimumui rasti.....	37
3. Praktinė metodų realizacija.....	45
3.1. Eksperimentinio tyrimo metodika.....	45
3.1.1. Eksperimento priemonės	45
3.1.2. Spartos matavimo metodas.....	49
3.1.3. Tikslumo matavimo metodas	50
3.2. Algoritmų efektyvumo įvertinimas.....	52

3.2.1. Algoritmų spartos įvertinimas.....	52
3.2.2. Algoritmų tikslumo įvertinimas.....	59
3.3. Ultragarsinės NKS sistemos praktinė realizacija.....	64
IŠVADOS.....	66
LITERATŪRA.....	68

Paveikslėlių sąrašas

1 pav. Tipinės RL neardančiosios kontrolės sistemos struktūra	9
2 pav. Ultragarsinės bangos sklidimo aplinka ir registruojamo signalo pavyzdys	10
3 pav. Ultragarsinės bangos sklidimo aplinka ir registruojamo signalo pavyzdys	17
4 pav. Maksimumų izoliacijos metodo iliustracija	18
5 pav. Priešingos fazės visiškai koreliuoti signalai	19
6 pav. Vėlinimo laiko nustatymas tiesiogiai taikant koreliacijos funkciją	21
7 pav. Koreliacijos funkcijos skaičiavimų apimties priklausomybė nuo sekų ilgio	24
8 pav. Sluoksnių atspindžių vėlinimo nustatymas taikant koreliacijos funkciją signalo dalims	25
9 pav. Realiojo laiko NDT sistemos kūrimo metodika	27
10 pav. Tipinės NDT sistemos veikimo algoritmas	29
11 pav. Matavimo fazės darbo ciklas	30
12 pav. Koreliacijos funkcijos skaičiavimas ir maksimumo paieška lange i	33
13 pav. Koreliacijos paieškos perrinkimu algoritmas	35
14 pav. Koreliacijos paieškos perrinkimu algoritmo darbo iliustracija	36
15 pav. Koreliacijos funkcijos skaičiavimas adaptyviu žingsneliu	38
16 pav. <i>EnhancedCCorr</i> metodo konvergavimas	39
17 pav. Koreliacijos maksimumo paieškos <i>EnhancedCCorr</i> algoritmo iliustracija – apytikslė paieška	41
18 pav. Koreliacijos maksimumo paieškos <i>EnhancedCCorr</i> algoritmo iliustracija – maksimumo tikslinimas	42
19 pav. Koreliacijos maksimumo paieškos <i>EnhancedCCorr</i> algoritmo darbo iliustracija	43
20 pav. Koreliacijos maksimumo paieškos <i>EnhancedCCorr</i> algoritmo parametrų iliustracija	44
21 pav. Algoritmo realizacijos vykdymo trukmės matavimo schema	50
22 pav. Algoritmo tikslumo matavimo schema	51
23 pav. Algoritmų efektyvumo palyginimas ARM PXA-255	53
24 pav. Algoritmų efektyvumo palyginimas Analog Devices Blackfin BF-533	54
25 pav. Algoritmų efektyvumo palyginimas Texas Instruments TMS320C6711GFN	55
26 pav. Algoritmų efektyvumo palyginimas AMD Athlon64 architektūroje (trumpesnis laikas – greitesnė realizacija)	56

27 pav. Algoritmų efektyvumo palyginimas Intel Pentium 4M architektūroje (trumpesnis laikas – greitesnė realizacija).....	56
28 pav. Algoritmų efektyvumo palyginimas personalinių kompiuterių ir DSP platformose (trumpesnis laikas – greitesnė realizacija).....	57
29 pav. Algoritmų efektyvumo palyginimas įterptinėse ir DSP platformose (trumpesnis laikas – greitesnė realizacija).....	57
30 pav. Santykinis algoritmų efektyvumo palyginimas, % (mažesnis – geresnis).....	58
31 pav. Matavimo santykinų paklaidų priklausomybė nuo signalo vėlinimo laiko lange	59
32 pav. Matavimo santykinų paklaidų priklausomybė nuo signalo vėlinimo laiko lange,	60
33 pav. Matavimo santykinų paklaidų priklausomybė nuo signalo vėlinimo laiko lange,	61
34 pav. Matavimo santykinų paklaidų priklausomybė nuo signalo vėlinimo laiko lange,	61
35 pav. Vėlinimo laiko matavimo vidutinės santykinės paklaidos priklausomybė nuo triukšmo ir signalo santykio.....	62
36 pav. Koreliacijos maksimumo vertės vidutinės santykinės paklaidos priklausomybė nuo triukšmo ir signalo santykio	63
37 pav. Realiojo laiko sluoksnių storio matavimo proceso valdymo ir signalų apdorojimo blokas	64
38 pav. Skaitmeninio signalų apdorojimo procesoriaus ir duomenų įvedimo modulis.....	65

IVADAS

Realiojo laiko sistemos - tai sudėtingos sistemos, sudarytos iš specializuotos aparatinės ir laikui kritinės programinės įrangos. Tokios sistemos skirtos įvairių objektų valdymui ir kontrolei griežtai fiksuotais laiko momentais. Viena labiausiai paplitusių šiandienos technologijų yra neardančioji kontrolė (NKS – angl. Nondestructive testing), kuri skirta nustatyti tiriamojo objekto fizinėms savybėms. Šiame darbe neardančiosios kontrolės uždavinys yra skirtas stebimo objekto fizinės struktūros geometrijai nustatyti. Daugeliu atvejų, gamybos proceso metu gaminant tam tikros paskirties gaminius, kurie susideda iš skirtingų medžiagų sluoksnių, yra svarbu kontroliuoti jų storį ir aptikti defektus tuose sluoksniuose. Šiame darbe bus nagrinėjama daugiasluoksnių plastikinių vamzdžių liejimo ultragarsinė neardančiosios kontrolės realiojo laiko sistema.

Šios sistemos veikimo principas paremtas ultragarso signalų skaitmeniniais apdorojimo metodais, kai į tiriamąjį objektą siunčiamas ultragarsinis zonduojantis signalas iš siųstuvo ir į imtuvą priimami nuo objekto sluoksnių paviršių atsispindėję signalai. Medžiagos sluoksnio storis nusakomas vėlinimo laiku nuo zonduojančio iki atsispindėjusio signalo, kuris apskaičiuojamas panaudojant diskrečiuosius matematinius metodus. Tokių signalų apdorojimas vykdomas skaitmeniniais metodais, kurie realizuojami atitinkamose skaičiavimo architektūrose. Norint tiksliau nustatyti sluoksnių storį, reikalingas greitas informacijos apdorojimas realiame laike. Šito šiandienos kompiuteriai neužtikrina, todėl juos tam tikslui pakeičia specialios paskirties skaitmeniniai signalų apdorojimo procesoriai, kurių pagrindu realizuotos realiojo laiko sistemos.

Pagrindinė problema - atsispindėjusio ultragarsinio signalo apdorojimas, medžiagos sluoksnių struktūros nustatymui ir sluoksnių storio apskaičiavimui. Šis signalas dėl objekto sluoksnių skaičiaus, jų storio ir medžiagos savybių būna sudėtingas ir jame sunku rasti tikruosius atspindžius, taikant koreliacinius metodus. Jis būna „paskendęs“ triukšmuose ir jame yra koherentiniai atspindžiai.

Darbo tikslas – sukurti medžiagų sluoksnių struktūros nustatymo ir sluoksnių storio matavimo metodus ir algoritmus, grindžiamus koreliacinių metodų panaudojimu.

Uždaviniai. Siekiant šio tikslo darbe reikia atlikti šiuos uždavinius:

- atlikti NKS medžiagų struktūrų sluoksnių storio nustatymo metodų ir algoritmų analizę bei įvertinimą;
- atlikti koreliacinių metodų ir jų realizavimo algoritmų analizę ir įvertinimą;
- sudaryti zonduojančio ir atsispindėjusio signalų sklidimo matematinius modelius;

- sukurti atspindžių paieškos dviejų fazių algoritmą: *adaptacijos fazės*, kurioje panaudojant koreliacinius metodus „slenkančio lango“ principu atliekama tiriamojo objekto analizė ir galimų sluoksnių identifikacija; *matavimo fazės*, kurioje pagal adaptacijos fazės rezultatus atliekamas objekto sluoksnių storio apskaičiavimas ir kontrolė.
- sudaryti modeliavimo sistemą, sukurtų algoritmų efektyvumo, tikslumo ir skaičiavimų apimties tyrimams, MATLAB aplinkoje;
- patikrinti sukurtų medžiagos sluoksnių storio matavimo algoritmų efektyvumą 5 platformų bazėje;
- realizuoti sukurtą medžiagos sluoksnių storio matavimo algoritmą Analog Devices DSP bazėje.

Pirmoje šio darbo dalyje atlikta ultragarsinės NKS medžiagos sluoksnių storio nustatymo metodų apžvalga, įvertintos galimybės panaudoti šiuos metodus realiojo laiko sistemose.

Antrojoje dalyje aprašoma autoriaus sukurta koreliacinės funkcijos taikymo dalimis metodika, pateikiamos siūlomų koreliacijos maksimumo paieškos ir langų paieškos algoritmų specifikacijos bei skaičiavimo apimties įvertinimai.

Trečioje darbo dalyje aprašoma pasirinkta DSP architektūra ir pateikiami eksperimentinio tyrimo rezultatai.

Prieduose pateiktos matematinių modelių programos MATLAB aplinkoje, autoriaus publikacijų kopijos.

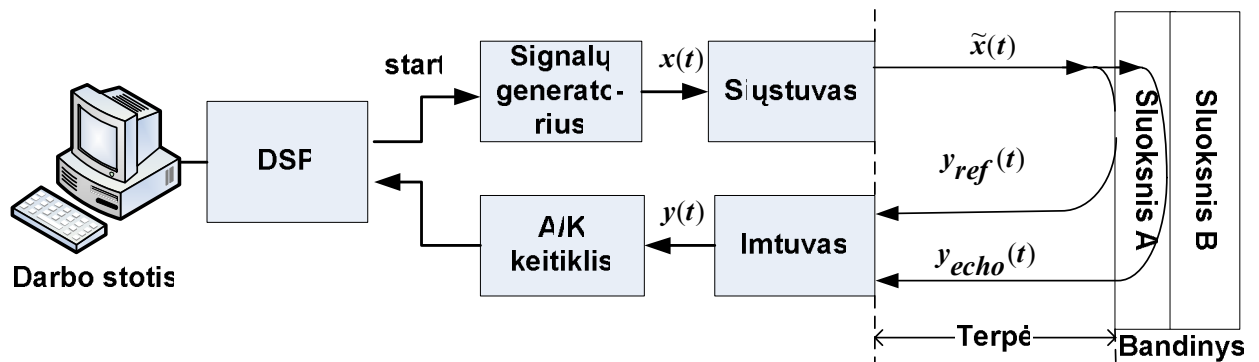
Tyrimų metu paskelbti 4 straipsniai, padaryti pranešimai tarptautinėje konferencijoje GSPx 2004 JAV ir doktorantų ir magistrantų konferencijoje, 2005 m.

Šio darbo rezultatai buvo panaudoti kuriant seriją praktinių sistemų, kurios buvo realizuotos Kompiuterių katedros Signalų apdorojimo laboratorijoje ir K. Baršausko Ultragarso mokslo institute. Sukurtos sistemos perduotos ir įdiegtos užsienio kompanijose Flonidan GAS Division, Plast Adviser ir kitose.

1. REALIOJO LAIKO NEARDANČIOSIOS KONTROLĖS METODŲ APŽVALGA

1.1. Realiojo laiko neardančiosios kontrolės sistema

Tipinė realiojo laiko neardančiosios kontrolės sistema susideda iš komponentų, pavaizduotų 1 pav. esančioje diagramoje.



1 pav. Tipinės RL neardančiosios kontrolės sistemos struktūra

Skaitmeninių signalų procesoriaus (DSP) modulio pagrindinė paskirtis yra valdyti informacijos apdorojimo procesą ir atlikti skaičiavimus su skaitmeniniais signalais. DSP modulio programinė ir aparatinė įranga užtikrina visų įrenginių paskirstytą darbą realiajame laike. Kiekvieno matavimo ciklo pradžioje DSP modulis sugeneruoja signalą START, kurį gavęs signalų generatorius suformuoja zondojuojantį signalą $x(t)$. Ultragarso siųstuvo išėjime suformuotas signalas pasiunčiamas į aplinką. Signalas $\tilde{x}(t)$ sklinda terpe (kaip pavaizduota 1 paveiksle), kuri dažniausiai yra vanduo, nes jis pasižymi maža ultragarso virpesių absorbcija ir mažu akustiniu impedansu.

Siųstuvo išsiųstas signalas $\tilde{x}(t)$ pasiekia terpės ir sluoksnio A sandūrą, kurioje dalis jo energijos pereina sandūrą, o kita dalis atsispindi signalo $y_{ref}(t)$ pavidalu ir praėjus laikui Δt_{ref} nuo išspinduliavimo pradžios pasiekia imtuvą. Sluoksnių A ir B sandūroje atsispindėjęs signalas $y_{echo}(t)$ pasiekia imtuvą signalo praėjus laikui Δt_{echo} nuo $y_{ref}(t)$ išspinduliavimo pradžios. Analogiškai

priimami visi kiti atspindžių signalai. Imtuve priimtas signalas $y(t)$ gali būti išreikštas kaip visų atspindžių signalų suma:

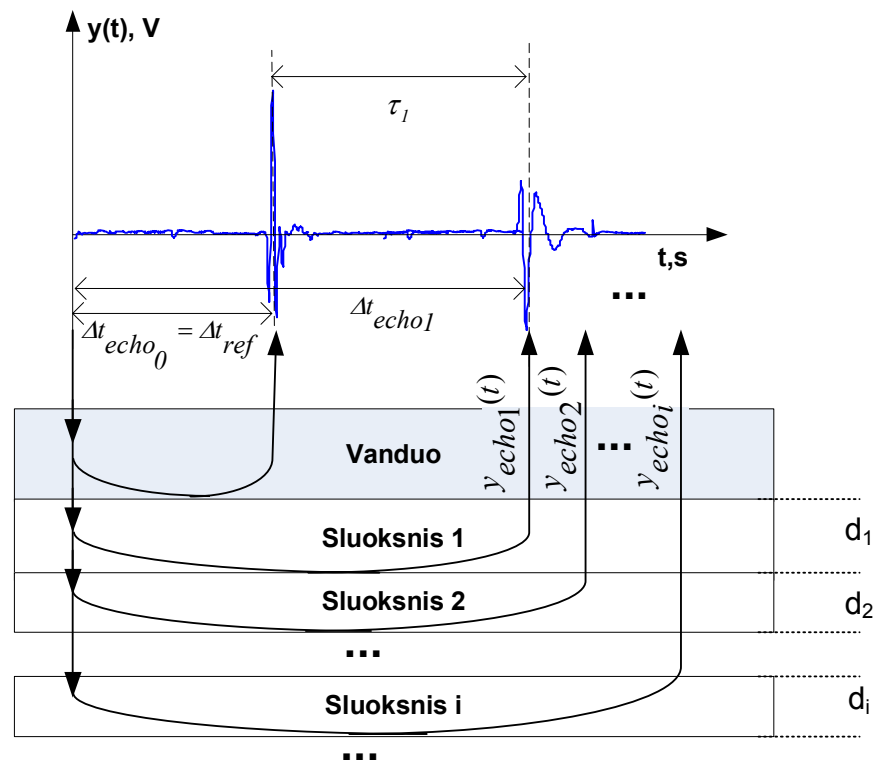
$$y(t) = y_{ref}(t) + \sum_i y_{echo_i}(t),$$

diskrecinė išraiška tada:

$$y[n] = y_{ref}[n] + \sum_i y_{echo_i}[n]$$

(1)

Tokio signalo pavyzdys pateiktas žemiau:



2 pav. Ultragarinės bangos sklidimo aplinka ir registruojamo signalo pavyzdys

Imtuve gautas signalas $y(t)$ yra perduodamas į analogas/kodas (A/K) keitiklį, kur jis diskretizuojamas periodu Δt_s ir skaitmeninis signalas perduodamas į signalų apdorojimo procesorių (DSP). DSP modulis atlieka skaičiavimus pagal parametrus, užduotus iš darbo stoties. Šių skaičiavimų rezultatas yra sluoksnių 1,2,3...,i,... storių išmatavimai d_i , kurie atlikus skaičiavimus perduodami į darbo stotį. Naudojami skaičiavimo metodai suranda atspindžių signalų vėlinimo laikus Δt_{echo} . Sluoksnio i storis d_i apskaičiuojamas pagal formulę:

$$d_i = \frac{\tau_i}{c_i} = \frac{\Delta t_{echo_i} - \Delta t_{echo_{i-1}}}{c_i}, \text{ kai } i > 0, \quad (2)$$

čia $i > 0$,

τ_i - i-ojo sluoksnio atspindžio vėlinimo laikas

c_i - garso sklaidimo greitis sluoksnio i medžiagoje

$\Delta t_{echo_0} = \Delta t_{ref}$ - atspindžio nuo pirmo sluoksnio pradžios sklaidimo trukmė

Δt_{echo_i} - i-jo sluoksnio atspindžio sklaidimo trukmė

1.2. Medžiagos sluoksnių storio nustatymo metodų apžvalga

Pastaruoju metu labai paplitęs daugiasluoksnių medžiagų naudojimas šiuolaikinėse pramonės šakose dėl šių medžiagų puikių inžinerinių savybių [1, 2]. Daugeliu atvejų tokių medžiagų gamybos metu reikia kontroliuoti sluoksnių storius, juos matuojant dideliu tikslumu. Šiuo tikslu yra sukurta nemažai plonų daugiasluoksnių medžiagų storių matavimo metodų, pavyzdžiui rentgenografija, optinė mikroskopija, magnetinė indukcija ir sūkurinių srovių metodas [3,4]. Storio matavimai, pagrįsti ultragarsinio signalo sklaidimo trukmės nustatymu, yra dažnai naudojami įvairiems procesams valdyti. Išmatuotas signalo vėlinimas dėl bangos sklaidimo tarp dviejų medžiagos sluoksnio ribų, gali būti naudojamas to sluoksnio storiui įvertinti. Tačiau, esant mažiems sluoksnių storiams, antrasis ir pirmasis atspindžiai gali iš dalies persidengti. Tam, kad sumažėtų šis persidengimas, paprastai naudojamas aukštesnio dažnio ultragarasas. Tačiau, egzistuoja tam tikros matavimui naudojamo ultragarso dažnio ribos, kurias lemia šie faktoriai:

1. Ultragarsinio siųstuvo generuojamas aukščiausio dažnio signalas.
2. Ultragarsinio imtuvo dažnių juostos plotis.
3. Ultragarso keitiklio dažninė charakteristika
4. Matuojamos medžiagos savybės nulemia ultragarsinio signalo aukštų dažnių slopinimą, todėl jame prarandamos tam tikros dažninės komponentės.
5. Signalų apdorojimo sistemos gali riboti aukšto dažnio ultragarsinių signalų apdorojimą, nes juos reikia diskretizuoti aukštesniu diskretizavimo dažniu, tai padidina skaičiavimų apimtį.

Dėl šių daugelio signalo sklaidimo trukmės nustatymo metodų apribojimų buvo sukurta keletas skirtingų signalų apdorojimo algoritmų, kurie leidžia atskirti persidengiančius atspindžius [5, 6, 7]. 1992-1998 metais buvo pasiūlyta naudoti metodus, paremtus modelio bazės įvertinimu [8, 9]. Šių metodų pagrindu buvo sukurtas algoritmas SAGE [8,9], kuris leidžia modeliuoti ultragarsinius atspindžių signalus

ir įvertinti plonų sluoksnių storius. Tačiau, reikia pastebėti, kad jo konvergavimo greitis yra lėtas, kai pradinis sprendinys yra artimas optimaliam. Be to šis metodas reikalauja papildomų skaičiavimų.

1.2.1. Ultragarinio signalo sklidimo matematiniai modeliai

Dauguma šiame darbe apžvelgiamų sluoksnių storių įvertinimo algoritmų priklauso nuo ultragarinio signalo savybių, kurios apibrėžiamos parametrais. Norint parinkti tinkamą signalą, reikia apibrėžti šio signalo parametrus. Todėl tam tikslinga naudoti matematinį modeliavimą. Šiame skyriuje apžvelgiami populiariausi signalo modeliai.

1.2.1.1. Gauso atspindžių modelis

Ramazan Demirili 2001 metais pasiūlė ultragarinių atspindžių signalų modeliavimui naudoti Gauso atspindžius su baltu triukšmu [11]. Kiekvienas Gauso atspindys modeliuojamas netiesinė funkcija su šiais parametrais: atspindžio dažnių juostos plotis, pasirodymo laikas, centrinis dažnis, amplitudė ir fazė. Šie parametrai priklauso nuo atspindžio signalo formos ir gali būti susieti su medžiagos sluoksnių sandūros fizinėmis atspindėjimo savybėmis bei signalo sklidimo kelio dažnine charakteristika. Čia nuo dviejų medžiagų paviršiaus atsispindėjęs signalas aprašomas:

$$\begin{aligned} s(\theta; t) &= \beta e^{-\alpha(t-\tau)^2} \cos(2\pi f_c(t-\tau) + \phi), \\ \theta &= [\alpha \quad \tau \quad f_c \quad \phi \quad \beta]. \end{aligned} \quad (3)$$

Čia atspindžio signalo parametrai θ yra: α -dažnių juostos pločio faktorius, τ -atspindžio pasirodymo laikas, f_c -centrinis dažnis, ϕ -fazė, β -amplitudė. Paprastai šių parametru priklausomybė nėra tiksliai žinoma, jie priklauso nuo matuojamos medžiagos fizinių savybių. Pasirodymo laikas τ yra susijęs su medžiagos paviršiaus padėtimi. Dažnių juostos pločio faktorius α nulemia atspindžio dažnių juostos plotį arba atspindžio trukmę laikinėje erdvėje. Centriniam dažniui f_c turi įtaką ultragarinio keitiklio centrinis dažnis ir sklidimo kelio dažninė charakteristika. Atspindys turi fazę ϕ ir amplitudę β , kurie įvertina medžiagos akustinį impedansą, dydį ir orientaciją.

Gauso atspindžio modelis taip pat įvertina triukšmo efektus. Šiame modelyje triukšmas charakterizuojamas kaip adityvinis baltasis Gauso triukšmas (BGT). Tuomet ultragarinio atspindys nuo paviršiaus aprašomas taip:

$$x(t) = s(\theta; t) + \nu(t), \quad (4)$$

kur $s(\theta; t)$ yra Gauso atspindžio modelis, o $\nu(t)$ yra adityvinis BGT procesas.

Daugiasluoksnės medžiagos atveju atspindžiai modeliuojami kaip M sluoksnių paviršių Gauso suvėlintų atspindžių superpozija:

$$y(t) = \sum_{m=1}^M s(\theta_m; t) + v(t). \quad (5)$$

Čia θ_m vektorius pilnai aprašo atitinkamo atspindžio formą ir padėtį.

Toks ultragarsinio signalo modeliavimas yra paprastas ir lengvai realizuojamas bet kurioje architektūroje. Tačiau šis modelis neleidžia tiksliai įvertinti realios fizinės aplinkos ultragarsinio atspindžio signalo parametrų, nes neįvertinami tokie faktoriai, kaip signalo sklidimas nehomogenine aplinka ir atspindžio koeficiento dažninės charakteristikos. Šie veiksniai lemia tai, kad atsispindėjęs signalas praranda idealaus Gauso impulso formą.

1.2.1.2. Gauso bangelių dekompozicijos modelis

JAV Panametrics kompanijos mokslininkai 2002 m. pasiūlė aprašyti terpės ir medžiagos pirmo sluoksnio atspindį ne kaip Gauso atspindį, o kaip M Gauso bangelių kompoziciją [12]:

$$s(\theta; t) = \sum_{m=1}^M \beta e^{-\alpha_m(t-\tau_m)^2} \cos(2\pi f_m(t-\tau_m) + \phi_m) = \sum_{m=1}^M f(\theta_m; t), \quad (6)$$

$$\theta = [\alpha_m \quad \tau_m \quad f_m \quad \phi_m \quad \beta_m].$$

Optimalus bangelių kiekis M apskaičiuojamas naudojantis minimalaus ilgio aprašymo principu [8].

Jeigu medžiaga susideda iš N sluoksnių, tada pilnas signalas su atspindžiais nuo N sluoksnių bus superkompozicija N atspindžių $s(\theta; t)$ suvėlintų per laikus τ_n :

$$y(t) = \sum_{n=1}^N A_n \sum_{m=1}^M f(\theta_m; t - \tau_n). \quad (7)$$

Čia A_n yra n-ojo atspindžio koeficientas, o τ_n - n-ojo atspindžio pasirodymo laikas.

Šis modelis leidžia tiksliai aprašyti pirmąjį atspindį, o sekantys atspindžiai aprašomi darant prielaidą, kad jie yra suvėlintos, permąsteliuotos amplitudės pirmojo atspindžio kopijos. Toks modelis leidžia įvertinti realios aplinkos signalus tiksliau, nei Gauso atspindžių modelis, tačiau tiksliai įvertinamas tik pirmasis atspindys.

1.2.1.3. Perdavimo matricomis paremtas modelis

R. J. Freemantle atliko detalią sistemos signalų studiją, pagal modelį pagrįstą perdavimo matricomis daugiasluoksnei medžiagai [13]. Šiame modelyje naudojami daugiasluoksnės medžiagos sluoksnių kompleksiniai atspindžio ir perdavimo koeficientai, kurie aprašomi kaip funkcijos nuo dažnio. Sluoksniai gali būti charakterizuojami nuo dažnio priklausančiais faziniais greičiais ir absorbcijos

koeficientais, tokiu būdu įvertinant signalo dažninių dedamųjų praradimus plonuose sluoksniuose. Ultragarso keitiklio dažnių juostos ribojimo efektas įvertinamas naudojant sandaugą dažnių srityje. Atsispindėjęs signalas gaunamas pereinant iš dažninės į laikinę sritį, pritaikant atvirkštinę greitąją diskretinę Furje transformaciją šio modelio sugeneruotai dažninei charakteristikai.

1.2.2. Sluoksnių storio įvertinimo metodai

Didžioji dalis daugiasluoksnės medžiagos sluoksnių storio matavimo metodų remiasi ultragarso signalo modeliu. Jei signalas aprašomas remiantis Gauso bangelių modeliu, storio matavimui buvo pasiūlyta naudoti inversijos-dekonvoliucijos metodus (Vynerio filtravimas) [5]. Taip pat buvo pasiūlytas kitas būdas - naudojantis mažiausių kvadratų metodu minimizuoti formulės (7) paklaidą parametrų A_n ir τ_n atžvilgiu. Tai yra daugiadimensinio optimizavimo uždavinys, reikalaujantis didelių skaičiavimo pajėgumų. Be to šis metodas lėtai konverguoja, o esant tam tikroms sąlygoms metodas išvis nekonverguoja. Nemažai autorių bandė spręsti šias problemas naudodami signalo modelio bazės θ įvertinimo metodus. S.Zala 1992 m. pasiūlė didelio tikslumo inversijos algoritmą, kuris buvo paremtas sluoksnio signalo dryžavimu ir didelio tikslumo dekonvoliucija [8]. Buvo parodyta, kad šis algoritmas yra pakankamai stabilus esant triukšmams ir tinkamas apribotos dažnių juostos duomenų apdorojimui. *Autoriai nustatė, kad naudojant TMS320C30 signalų apdorojimo procesorių galima apdoroti 256 signalus per 15s. Tokia sparta neatitinka šiuolaikinėms realiojo laiko neardančios kontrolės sistemoms keliamų reikalavimų, kur signalas turi būti apdorojamas per 1ms.*

1.2.2.1. Ultragarso atspindžio parametrų įvertinimas didžiausio tikėtimumo metodais

Išmatuoto ultragarso atspindžio signalo modelis (4) gali būti užrašytas diskretinėje formoje:

$$x = s(\theta) + v, \quad (8)$$

kur $x \in \mathfrak{R}^N$ yra atsitiktinis vektorius, $v \in \mathfrak{R}^N$ yra BGT seka, o $s(\theta) : \theta \in \mathfrak{R}^5 \rightarrow s(\theta) \in \mathfrak{R}^N$ yra Gauso atspindžio vektorius, aprašomas modeliu:

$$s(\theta; t(nT)) = \beta e^{-\alpha(t(nT)-\tau)^2} \cos\{2\pi f_c(t(nT)-\tau) + \phi\}, \text{ kai } n=0,1,2,\dots,N-1, \quad (9)$$

kur $t(nT)$ yra diskretiniai laiko t taškai, o T yra diskretizavimo periodas. Atspindžio parametrai laikomi parametrų vektoriuje $\theta = [\alpha \ \tau \ f_c \ \phi \ \beta]$.

Norint nustatyti sluoksnio storį didžiausio tikėtimumo metodu, reikia surasti atsitiktinio vektoriaus x parametrų θ įvertį. Ieškant paremtų įverčio iškyla šios problemos:

1. Transformacija iš parametų erdvės į signalo erdvę, netgi aprašyta tinkamu Gauso atspindžio modeliu, yra netiesinė. Todėl, transformacija iš signalo erdvės į parametų erdvę, yra taip pat atvirkštinis netiesinis procesas ir neegzistuoja vienareikšmis sprendinys.
2. Triukšmas išmatuotame signale apsunkina parametų įvertinimą. Šis signalo nuvertėjimas turi būti išmatuotas tam, kad būtų galima nustatyti parametų įvertinimo tikslumą.

Demirili[11] siūlo netiesinio parametų įvertinimo problemą spręsti didžiausio tikėtimumo įvertinimo metodais. Čia daroma prielaida, kad atsitiktiniai vektoriai (x) yra nepriklausomi atsitiktiniai dydžiai ir yra pasiskirstę pagal normalaus pasiskirstymo dėsnį:

$$p(x : \theta) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N}{2}} |C(\theta)|^{\frac{1}{2}}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(x - \mu(\theta))^T C^{-1}(\theta)(x - \mu(\theta))\right\}, \quad (10)$$

kur $\mu(\theta) = E\{s(\theta) + v\}$ yra vidurkis, o $C(\theta) = E\{(x - \mu(\theta))(x - \mu(\theta))^T\}$ - kovariacijos matrica. Ši tikimybinio tankio funkcija, parametro θ atžvilgiu, vadinama tikėtimumo funkcija. Didžiausio tikėtimumo metode, θ apibrėžiamas kaip parametų vektoriaus reikšmė, maksimizuojanti tikėtimumo funkciją. Baltojo triukšmo ir pastovaus parametų vektoriaus atveju, modelį (8) galima suprastinti iki mažiausių kvadratų funkcijos minimizavimo:

$$J(\theta) = (x - s(\theta))^T (x - s(\theta)) = \|x - s(\theta)\|^2. \quad (11)$$

Parametro θ didžiausio tikėtimumo įvertis gali būti randamas minimizuojant šią funkciją, kuri priklauso tik nuo išmatuoto signalo x ir jo modelio $s(\theta)$. Tačiau, tikslo funkcija θ parametro atžvilgiu yra netiesinė, todėl neegzistuoja tiesioginis sprendinys. Ši problema dar žinoma kaip netiesinis mažiausių kvadratų uždavinys be apribojimų, nes parametro θ erdvė neapribota jokia regionu. Tokiems uždaviniams spręsti egzistuoja nemažai iteracinių algoritmų. Šie algoritmai pradeda darbą nuo pradinio parametų vektoriaus θ reikšmių spėjimo, o po to jų tikslinimo taip, kad būtų minimizuojama tikslo funkcija. Surastas tikslo funkcijos minimumas (globalus minimumas) yra optimalus sprendinys. Tačiau, gali egzistuoti ir daug lokalių minimumų. Todėl priklausomai nuo pradinio parametų θ spėjimo, algoritmas gali „užstrigti“ lokaliame minimume ir nebus rastas optimalus sprendinys.

Tikslo funkcijos (11) minimizavimui yra naudojami du skirtingi optimizavimo metodai: simplekso ir Levenberg-Marquardt. Klasikinis simplekso metodas (pirmos eilės), pasiūlytas dar 1967m. [14], sekančios iteracijos parametų vektoriaus apskaičiavimui naudoja tik funkcijos reikšmės skaičiavimą. Toks metodas atsparus lokaliems minimumams, tačiau jam reikia atlikti žymiai didesnę kiekį iteracijų, nei antros eilės metodams. Levenberg-Marquardt metodas [15] yra antros eilės metodas ir be funkcijos reikšmių skaičiavimo naudoja gradiento informaciją bei Hessian matricinę aproksimaciją perėjimui prie

sekančios iteracijos. Toks metodas yra greitesnis nei simplekso, tačiau jis gali „užstrigti“ lokaliame minimume. Šis metodas reikalauja gero pradinių parametru reikšmių spėjimo, kad būtų užtikrintas konvergavimas į optimalų sprendinį [16].

Šiai specifinei problemai buvo pritaikytas Gauso-Niutono (GN) optimizavimo metodas [11]. Pasinaudojant Gauso atspindžio modeliu, galima užrašyti GN metodo parametru vektoriaus iteravimo formulę[17]:

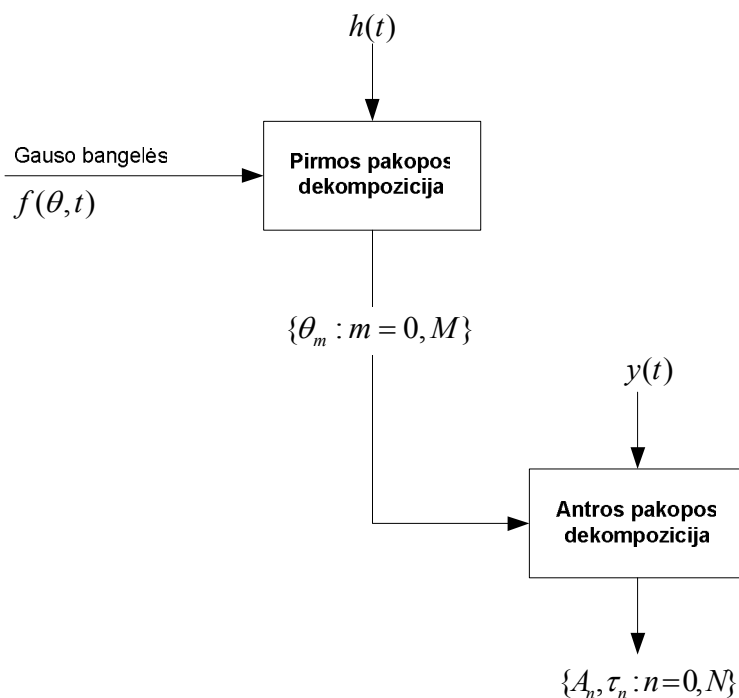
$$\theta^{(k+1)} = \theta^{(k)} + (H^T(\theta^{(k)})H(\theta^{(k)}))^{-1} H^T(\theta^{(k)})(x - s(\theta^{(k)})), \quad (12)$$

kur $H(\theta)$ yra modelio gradientai parametru $\theta = [\alpha \quad \tau \quad f_c \quad \phi \quad \beta]$ atžvilgiu. Algoritmas pabaigia darbą tada, kai pasiekiamas nurodytas parametru tikslumas. Norint padidinti skaičiavimų greitį, gradientai $H(\theta)$ ir $H^T(\theta^{(k)})H(\theta^{(k)})$ gali būti apskaičiuojami naudojant analitines išraiškas.

Simplekso metodas yra paprastas, suranda globalų minimumą, tačiau tam reikia atlikti daug iteracijų. Levenberg-Marquardt metodas greitesnis, tačiau labai jautrus pradiniam parametru spėjimui ir dažnai suranda ne globalų, o lokalų minimumą. Modifikuotas Gauso-Niutono metodas apima ankstesnių metodų privalumus ir trūkumus. Šis metodas dirba greičiau už ankstesnius, tačiau buvo parodyta, kad esant pradiniam parametrui toli nuo optimalių, algoritmas dažniausiai ras tik lokalų minimumą ir nepasiekis globalaus. Dėl šių metodų konvergavimo greičio ir tikslumo neapibrėžtumo, šie metodai nėra tinkami realizuoti realiojo laiko neardančiosios kontrolės sistemose.

1.2.2.2. Gauso bangelių dekompozicijos modelio parametru įvertinimas

A. Abbate pasiūlė algoritmą, pagrįstą Gauso bangelių dekompozicija, kuri iliustruojama 3 paveiksle.



3 pav. Ultragarsinės bangos sklaidimo aplinka ir registruojamo signalo pavyzdys

Ultragarsinis signalas $h(t)$, charakterizuojantis daugiasluksnę medžiagą, gaunamas išsiųstam signalui atsispindėjus nuo bandinio paviršiaus. Šis signalas $h(t)$ dekomponuojamas į eilę Gauso bangelių. Šios algoritmo pakopos rezultatas yra bangelių parametrai, kurie laikomi pastoviais ir naudojami pilno daugiasluksnės medžiagos atspindžio signalo analizei. Antros pakopos dekompozicijoje yra tik du kintami parametrai – amplitudė ir vėlinimas, kurie susieti su $N+1$ atspindžiu nuo daugiasluksnės medžiagos sluoksnių sandūrų. Tokiu būdu randami visų sluoksnių storių įverčiai.

Šiame skyriuje buvo išnagrinėti kitų autorių siūlomi sluoksnių storio įvertinimo metodai. Dauguma jų pagrįsti modelio parametrų įvertinimo metodais. Pagrindinė šių metodų problema yra ta, kad priklausomybė tarp parametrų ir signalų erdvės yra netiesinė ir neegzistuoja vienareikšmis sprendinys. Todėl reikia spręsti daugiadimensinio optimizavimo uždavinį, kuriam išspręsti naudojami iteraciniai algoritmai. Šių algoritmų esminis trūkumas yra lėtas konvergavimo greitis, o kartais net nekonvertavimas bei jautrumas pradiniam spėjimui. Tokio tipo algoritmai nėra tinkami realizuoti kritinės realiojo laiko sistemose, dėl savo vykdymo laiko ir skaičiavimo tikslumo neapibrėžtumo. Dėl šių priežasčių realiojo laiko sistemose tikslinga naudoti laikinėje srityje dirbančius metodus arba metodus, pagrįstus vienareikšmėmis diskrečiosiomis transformacijomis. Šie metodai apžvelgiami tolimesniame skyriuje.

1.3. Realiojo laiko signalo sklidimo trukmės nustatymo metodų analizė

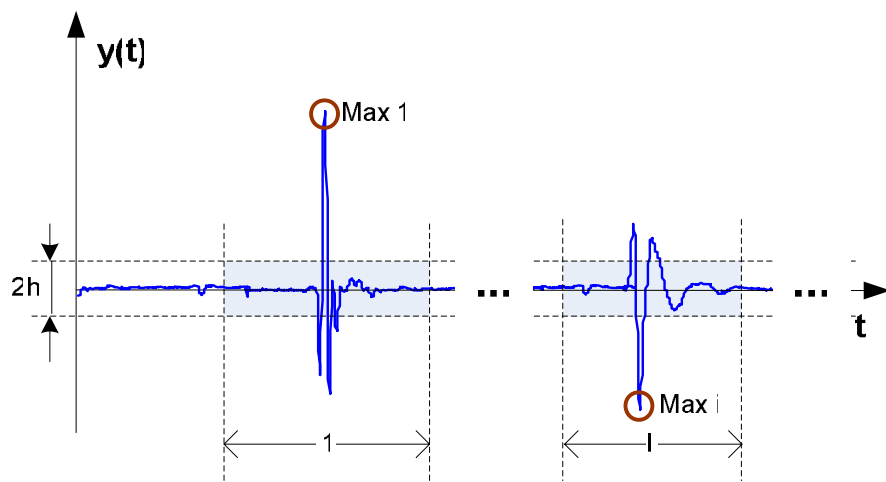
Pagal realiojo laiko neardančiosios kontrolės sistemos apibrėžimą, norint nustatyti bandinio sluoksnių storį, reikia apskaičiuoti atspindžių sluoksniuose vėlinimo laikus τ_i . Skaičiuojant atspindžio signalo vėlinimo laiką atraminiais Δt_{echo_i} ir $\Delta t_{echo_{i-1}}$ imami taškai, kuriuose atspindžio signalas įgyja maksimalią vertę:

$$\tau_i = \Delta t_{echo_i} - \Delta t_{echo_{i-1}} = \max_t y_i(t) - \max_t y_{i-1}(t). \quad (13)$$

Šiame skyriuje aprašomi metodai, kurie naudojami matavimo fazėje, sluoksnių storių nustatymui.

1.3.1. Maksimumų izoliacijos metodas

Tiesiogiai taikyti klasikinių maksimumo paieškos algoritmų šiuo atveju negalima, nes DSP sistemoje registruojamas signalas yra su triukšmais. Šiuo atveju reikia taikyti triukšmo pašalinimo metodus [18] arba šiame darbe autoriaus siūlomą metodą [19] (straipsnis pateikiamas prieduose). Pašalinus triukšmą iš registruoto signalo $y(t)$, būtų galima taikyti n-maksimumų paieškos algoritmą naudojant maksimumų izoliacijos intervalus. Šio metodo esmė parodyta žemiau:



4 pav. Maksimumų izoliacijos metodo iliustracija

Čia įvedamas slenksčio parametras h , kur signalo reikšmės patenkančios į slenksčio zoną yra ignoruojamos vykdant maksimumų paiešką. Antras šio algoritmo parametras yra maksimumų izoliacijos intervalų pločiai l_i . Šio metodo esmė yra tokia, kad suradus funkcijos maksimumą nuo jo yra atidedamas

izoliacijos intervalas, kuriame yra nevykdoma kitų maksimumų paieška. Tokiu būdu išvengiama situacija, kai surandami du ar daugiau maksimumų tame pačiame sluoksnyje.

Taikant pasiūlytus maksimumų izoliacijos ir triukšmo pašalinimo metodus reikia atlikti mažiau operacijų lyginant su kitais signalų apdorojimo metodais, tačiau pasiūlytas metodas turi esminių trūkumų:

- signalo triukšmo pašalinimui naudojamas metodas pritaikytas slankaus taško aritmetikai,
- nėra ištirtas metodo tikslumas,
- metodas nėra tinkamas naudoti, kai registruotame signale yra daugkartinių atspindžių,
- panaudojus daugkartinių atspindžių pašalinimo metodus, skaičiavimo trukmė viršija priimtinas ribas lyginant su kitais metodais.

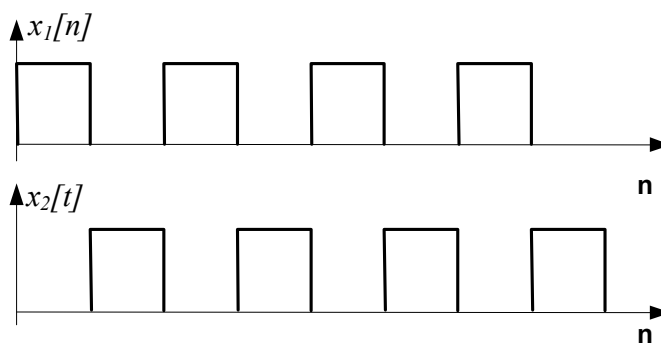
1.3.2. Koreliacinis metodas

Koreliaciniai metodai yra labai paplitę radiolokacijos ir ultragarsinės regos sistemose. Šie metodai aprašyti [11, 20]. Koreliacija r_{12} leidžia kiekybiškai įvertinti dviejų diskrečių atsitiktinių dydžių $x_1[n]$ ir $x_2[n]$ tarpusavio priklausomybę:

$$r_{12} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1[n] \cdot x_2[n]. \quad (14)$$

Kai $x_1[t]$ ir $x_2[t]$ yra susiję tiesiogine priklausomybe r_{12} įgyja maksimalią reikšmę, o kai $x_1[n]$ ir $x_2[n]$ yra nepriklausomi atsitiktiniai dydžiai $r_{12} = 0$.

Anksčiau pateiktas koreliacijos apibrėžimas nėra tinkamas naudoti praktikoje, nes egzistuoja atvejis, kai pagal šį apibrėžimą koreliacija bus lygi 0, nors signalai $x_1[n]$ ir $x_2[n]$ bus 100% koreliuoti. Toks pavyzdys galėtų būti priešingų fazių signalo koreliacija:



5 pav. Priešingos fazės visiškai koreliuoti signalai

Kai $x_1=1$, visada $x_2=0$ ir atvirkščiai, todėl taikant (14) formulę, rezultatas visada bus nulių suma. Todėl norint išvengti šios problemos, signalą x_2 reikia pastumti per j atskaitų į kairę, kad išlyginti signalus. Tokiu atveju gauname daug koreliacijos reikšmių prie skirtingų postūmio j reikšmių ir turime koreliacijos funkciją. Jeigu $x_1[n]$ pažymėsime iš NKS sistemos signalų generatoriaus išsiųstą signalą $x[n]$, o $x_2[n]$ priimtą atspindį $y_{echo}[n]$ (žiūrėti 1,2 pav.), tai gausime šią koreliacinės funkcijos diskretinę išraišką:

$$r[j] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot y_{echo}[n+j], j = -N/2, N/2+1, \dots, N/2. \quad (15)$$

Tuomet postūmio dydis j , prie kurio koreliacinė funkcija (2) įgyja maksimalią reikšmę, atitiks pirmojo sluoksnio atspindžio vėlinimo laiką τ_1 :

$$\tau_1 = \arg \max_j r[j] = \arg \max_j \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot y_{echo}[n+j]. \quad (16)$$

Vėlinimo laiko nustatymo metodikoje [20] signalas $x(t)$ dar vadinamas etaloniniu. Šiame uždavinyje iškyla problemos su signalo $x(t)$ nustatymu. Dėl ultragarsinio keitiklio dažnio juostos ribojimo savybių į keitiklį paduotas signalas $x(t)$ ir išspinduliuotas $\tilde{x}(t)$ skiriasi. Todėl norint atlikti tikslūs matavimus koreliaciniu metodu, nepakanka žinoti $x(t)$, reikia imti $\tilde{x}(t)$ kaip etaloninį signalą. Kadangi sistemoje tarp ultragarso keitiklio ir bandinio yra vanduo, kuris pasižymi maža ultragarso bangos energijos absorbcija ir mažu akustiniu impedansu, nuo vandens ir bandinio sandūros pirmas atsispindėjęs signalas yra labai panašus savo dažninėmis savybėmis į išsiųstą signalą $\tilde{x}(t)$. Todėl pirmasis atspindys $y_{echo_0}(t)$ naudojamas kaip etaloninis signalas $y_{ref}(t)$.

Įvertinus anksčiau minėtus pakeitimus dėl etaloninio signalo, galima užrašyti i -ojo atspindžio vėlinimo laiko išraišką:

$$\tau_i = \arg \max_j r_i[j] = \arg \max_j \sum_{n=0}^{N-1} y_{ref}[n] \cdot y_{echo_i}[n+j]. \quad (17)$$

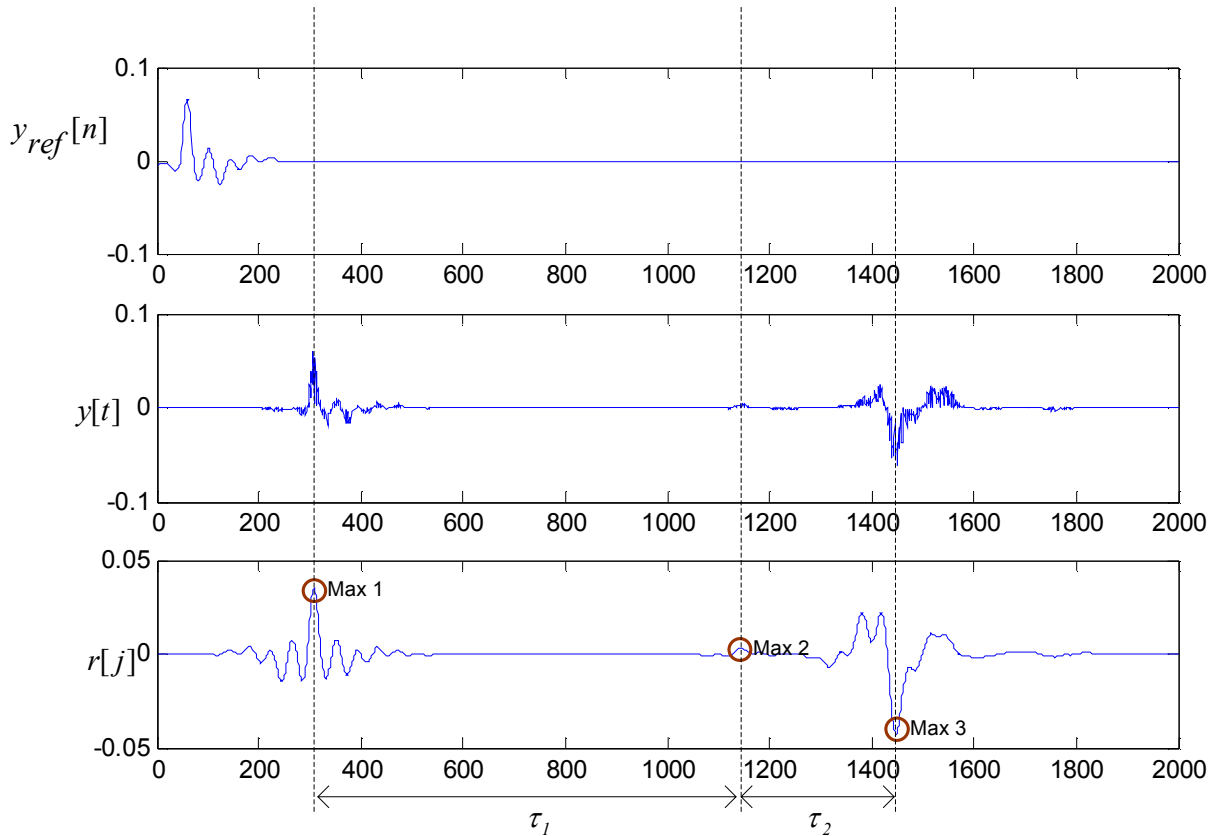
Ši išraiška yra lengvai realizuojama bet kurioje skaičiavimo architektūroje, todėl tolimesniame skyriuje aprašomas jos tiesioginis panaudojimas medžiagos sluoksnių storiams rasti.

1.3.3. Tiesioginis koreliacinės funkcijos taikymas

Galima tiesiogiai apskaičiuoti priimto signalo $y(t)$ ir etaloninio signalo $y_{ref}(t)$ koreliacinę funkciją $r(j)$. Po to pritaikant skyriuje 1.3.1 aprašytą maksimumų izoliacijos metodą galima surasti koreliacinės

funkcijos maksimumus, kurie atitiks signalo $y(t)$ maksimumus. Tuomet bus galima pritaikyti formulę (13) ir surasti atspindžių vėlinimo laikus.

Žemiau pateikiamas signalo maksimumų radimo pavyzdys tiesioginio koreliacijos taikymo metodu. Kaip matyti iš 6 paveikslėlio priimtas signalas $y[n]$ yra su triukšmais ir maksimumo tiesiogiai nustatyti neįmanoma. Tuo tarpu apskaičiuotos koreliacinės funkcijos $r[j]$ maksimumai yra aiškūs ir lengvai randami maksimumų izoliacijos metodu.



6 pav. Vėlinimo laiko nustatymas tiesiogai taikant koreliacijos funkciją

Aukščiau pateiktas pavyzdys yra iš realaus eksperimento NKS sistemos, kur naudojamas DSP procesorius su 18ns darbo ciklo trukme, o 20 mks trukmės signalas diskretizuojamas 100MHz dažniu. Tiesiogiai taikant koreliacinės funkcijos išraišką (15) skaičiavimai užtruktų iki 1s. Netgi pritaikius logaritminio sudėtingumo algoritmus būtų viršyti realiojo laiko sistemos reikalavimai (tipinės NKS sistemos matavimo ciklo trukmė turi būti neilgesnė kaip 1ms).

Akivaizdu, kad šis metodas turi visus maksimumų izoliacijos ir triukšmo pašalinimo metodo trūkumus. Be to šis metodas dirba daug lėčiau.

Nors metodas turi visus maksimumų izoliacijos ir triukšmo pašalinimo metodo trūkumus, dirba daug lėčiau, dėl pilnos koreliacinės funkcijos skaičiavimų apimties, tačiau pasiūlytas metodas yra labai

paprastas, tikslus ir palyginti lengvai realizuojamas bet kurioje DSP architektūroje. Greitąją koreliaciją pakanka skaičiuoti procesoriumi su fiksuoto taško aritmetika. Dėl šių savybių šis metodą tikslinga naudoti NKS sistemos adaptacijos fazėje, sluoksnių ribų nustatymui, kur skaičiavimo greitis nėra svarbus (žiūr. skyrių 1.1).

1.4. Sluoksnių ribų nustatymas

Šio uždavinio sprendimo metodai turi nustatyti sluoksnių $i=1,2,\dots,n$ atitinkamų langų, kuriuose bus ieškomi koreliacijos maksimumai, pozicijas w_i . Šiame skyriuje aprašomi metodai, kurie naudojami adaptacijos fazėje sluoksnių langų nustatymui.

1.4.1. Koreliacinis langų paieškos metodas

Šis metodas paremtas tiesioginiu koreliacijos funkcijos taikymu ir maksimumų izoliacijos metodu, kurie yra aprašyti 1.3.3 skyriuje. Esminis skirtumas yra tas, kad langų paieškos atveju surastų maksimumų aplinkose atidedami N pločio langai. Šio metodo taikymas langų paieškai turi beveik tuos pačius trūkumus kaip ir atspindžių signalų maksimumų paieškos atveju. Tačiau didelės skaičiavimų apimtys šiuo atveju nėra problema, nes langų paieškai netaikomi realiojo laiko reikalavimai. Tačiau išlieka daugkartinių atspindžių egzistavimo problema ir tokio metodo naudoti negalima, kai bandinyje yra plonų sluoksnių.

1.4.2. Koreliacinis langų paieškos metodas panaudojant dekonvoliucijos metodus

Šių metodų esmė yra ta, kad jų pagalba iš priimto signalo pašalinama nepageidaujama daugkartinių atspindžių dedamoji. Egzistuoja nemažai dekonvoliucijos metodų (pvz.: tiesinei dekonvoliucijai – atvirkštinis ir Vynerio (Wiener) filtravimas; netiesinės dekonvoliucijos algoritmai – CLEAN, LUCY, maksimalios entropijos [22, 23]). Šie metodai yra didelės skaičiavimų apimties ir daugelis jų orientuoti į triukšmo pašalinimą. Dekonvoliucijos metodų taikymą ultragarso srityje nagrinėja [24, 25].

Šie metodai yra tolimesnių studijų tyrimo objektas. Taip pat planuojama panaudoti šiame darbe sudarytus matematinius fizinės aplinkos modelius daugkartinių atspindžių numatymui ir pašalinimui.

1.5. Išvados

Šio skyriaus pirmoje dalyje buvo išnagrinėti kitų autorių siūlomi sluoksnių storio įvertinimo metodai, pagrįsti modelio parametrų įvertinimu:

- šiuose metoduose priklausomybė tarp parametrų ir signalų erdvės yra netiesinė ir neegzistuoja vienareikšmis sprendinys ir reikia spręsti daugiadimensinio optimizavimo uždavinį;
- kuriam išspręsti naudojami iteraciniai algoritmai, pasižymintys lėtu konvergavimo greičiu;
- dėl tol šie algoritmai nėra tinkami realizuoti kritines realiojo laiko sistemas;
- realiojo laiko sistemose tikslinga naudoti laikinėje srityje dirbančius metodus arba metodus, pagrįstus vienareikšmėmis diskrečiosiomis transformacijomis;
- maksimumų izoliacijos metodas gali per determinuotą laiką surasti L maksimumų, tačiau šis metodas netinkamas naudoti praktinėse sistemose, kur gaunami signalai su triukšmu, o taikant triukšmo ir daugkartinių atspindžių pašalinimo metodus, maksimumų izoliacijos metodas tampa neefektyvus skaičiavimų apimties prasme;
- taikant koreliacinius sluoksnių storio įvertinimo metodus, nereikia naudoti triukšmo pašalinimo metodų, nes baltojo triukšmo ir signalo koreliacija visada artima nuliui.

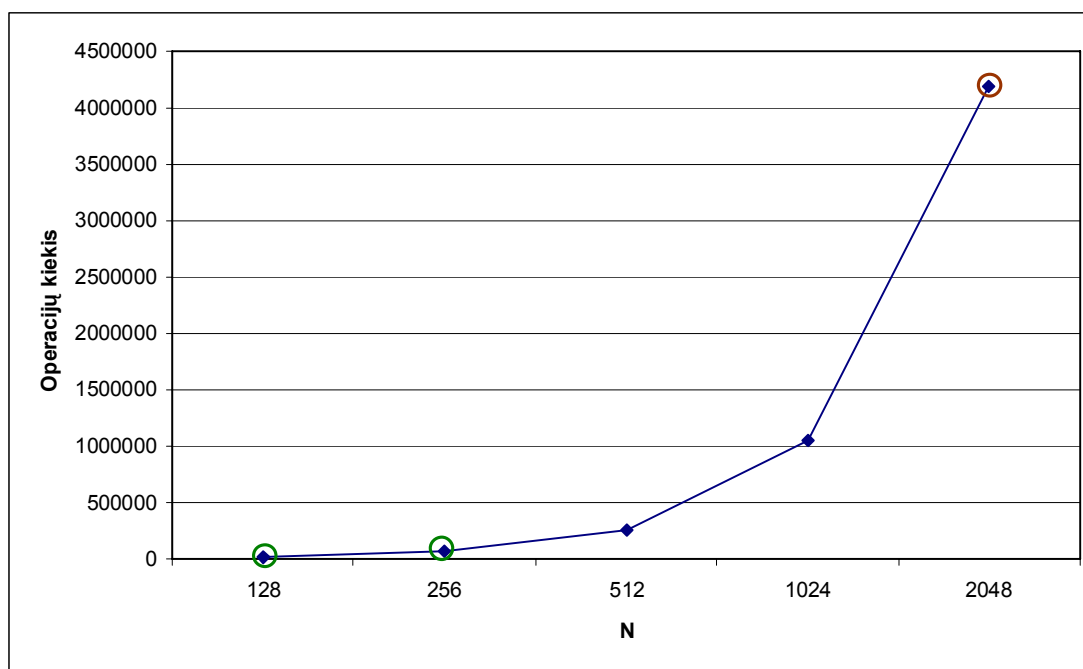
Šiame skyriuje apžvelgti metodai pasižymi didelėmis skaičiavimų apimtimis, be to jie negali atskirti tikrųjų atspindžių nuo daugkartinių. Tačiau koreliaciniai metodai labiausiai tinka NKS uždavinio sprendimui, nes DSP architektūra turi daug priemonių optimaliam koreliacijos funkcijos skaičiavimui, pvz.: lygiagretūs kaupiančios sandaugos įtaisai (MAC), ciklinis adresavimas, lygiagretūs aritmetiniai-loginiai įtaisai (ALU). Dėl šių priežasčių, tikslinga kurti metodus, kurie leistų:

- sumažinti koreliacijos funkcijos maksimumo paieškos skaičiavimų apimtį;
- nustatyti tikruosius atspindžius signale.

2. REALIOJO LAIKO NEARDANČIOSIOS KONTROLĖS SISTEMOS MODELIS

2.1. Koreliacijos funkcijos taikymo dalimis metodika

Anksčiau aprašytų metodų esminis trūkumas yra didelės skaičiavimų apimtys. Pavyzdžiui, tiesiogiai pritaikant koreliacijos funkcijos skaičiavimą atspindžių vėlinimams nustatyti reikia ~4196352 aritmetinių operacijų, kai registruoto signalo ilgis yra 2048 atskaitos. Iš 7 pav. matyti, kad koreliacijos skaičiavimų apimtys susijusios su signalų ilgiais kvadratine priklausomybe.

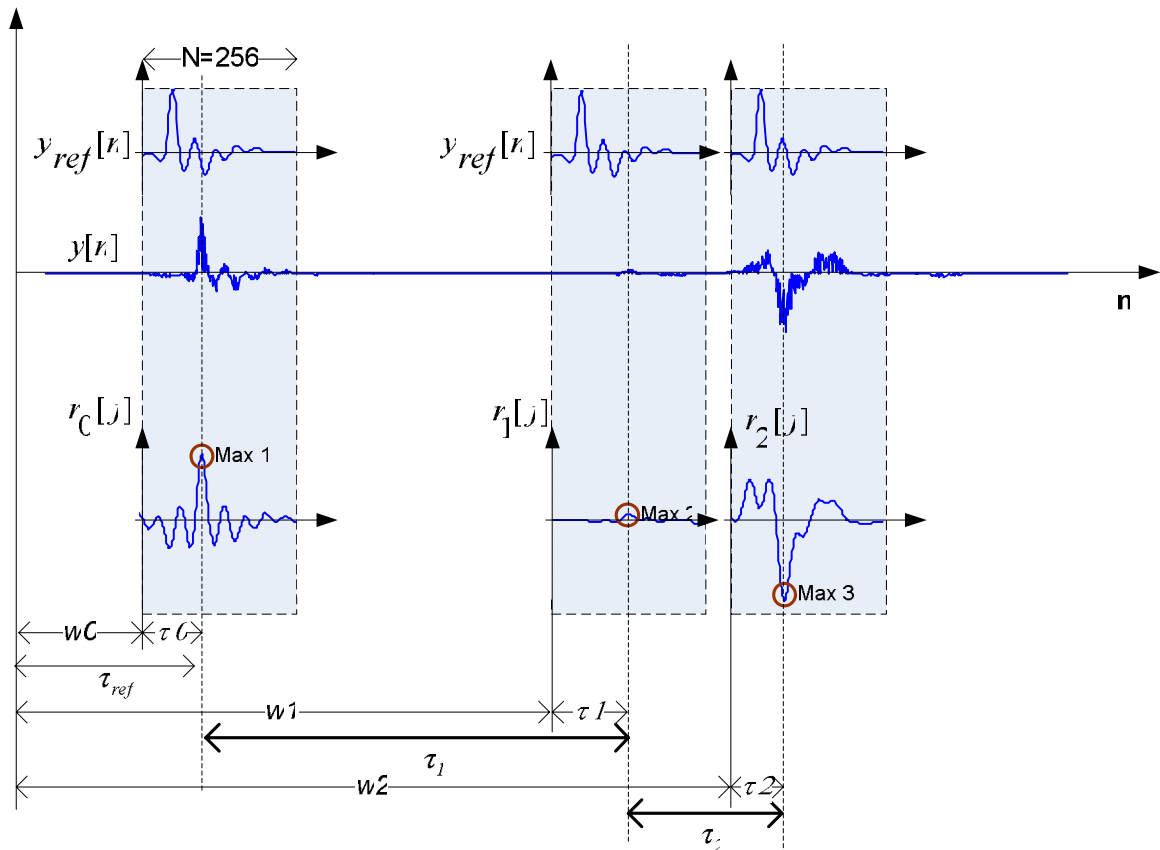


7 pav. Koreliacijos funkcijos skaičiavimų apimtys priklausomybė nuo sekų ilgio

Sekos ilgio sumažinimas nors pusiau leidžia ženkliai sumažinti skaičiavimų apimtį. Kita vertus, norint apskaičiuoti i -ojo sluoksnio atspindžio signalo sklidimo trukmę, pakanka apskaičiuoti koreliacijos funkciją sluoksnio ribose. Dažniausiai atspindžio ir atraminio signalo naudingos dalies ilgis siekia 128-256 atskaitas (diskretizuojant 100MHz dažniu), todėl norint nustatyti $M=(1..3)$ sluoksnių atspindžių signalų sklidimo trukmes reikia apskaičiuoti M koreliacinių f -jų po 256 (arba 128) taškus. Skaičiuojant 3 sluoksnių atspindžių sklidimo trukmes, kai sekų ilgis $N=256$, šiuo metodu prireiks

$3 \times 65'792 = 197'376$ operacijų, tuo tarpu skaičiuojant vieną $N=2048$ taškų koreliacinę funkciją prireiks $4'196'352$ aritmetinių operacijų. Tokiu būdu įmanoma sumažinti skaičiavimų apimtį net iki 21 karto. Ši riba nėra galutinė, ją galima dar labiau sumažinti taikant logaritminio skaičiavimų sudėtingumo algoritmus, o naudojant šiame darbe siūlomus metodus įmanoma sumažinti aritmetinių operacijų kiekį netgi šimtus kartų.

Žemiau pateikiama sluoksnių atspindžių nustatymo metodo iliustracija.



8 pav. Sluoksnių atspindžių vėlinimo nustatymas taikant koreliacijos funkciją signalo dalims

Naudojant šį matavimo metodą, sistemos darbo ciklas susideda iš:

- adaptacijos fazės
- matavimo fazės.

Adaptacijos fazėje sprendžiamas bandinio sluoksnių ribų nustatymo uždavinys. Šioje fazėje atliekami vienas ar daugiau zonduojančio signalų šūviai ir vidurkinami keitiklyje registruoti signalai. Vidurkinant signalus gautus prie pastovių aplinkos sąlygų, gaunamas signalas, kuriame ženkliai sumažėjęs triukšmų lygis. Šioje fazėje naudojant slenksčio metodą, randama etaloninio signalo pradžia w_0 ir maksimumo pozicija pradžios atžvilgiu τ_0 , tada etaloninio signalo išraiška bus:

$$y_{ref}[t] = y[n + w_0], \text{ kai } 0 \leq n < N, \quad (8)$$

čia N – lango plotis (atstumas mažesnis arba lygus ploniausio sluoksnio storiui).

Po to vykdoma sluoksnių $i=1,2,\dots$ ribų paieška, kurios rezultatas yra langų koordinatės w_1, w_2, \dots .

Matavimo fazėje pirmiausia surandamas etaloninio signalo poslinkis išmatuotame signale, naudojant vieną iš maksimumo paieškos koreliacinių metodų:

$$\tau'_0 = \arg \max_j r_0[j] = \arg \max_j \sum_{n=0}^{N-1} y_{ref}[n] \cdot y[n + j + w_0]. \quad (9)$$

Pagal surastą etaloninio signalo poslinkį pakoreguojamos visų langų pozicijos:

$$w'_i = w_i + \tau'_0, \quad (10)$$

čia w'_i - i -ojo sluoksnio lango koordinatė po koregavimo

w_i - i -ojo sluoksnio lango koordinatė prieš koregavimą.

Po to kiekviename lange, naudojant maksimumo paieškos koreliacinį metodą, randami atsispindėjusio signalo vėlinimai sluoksniuose $i > 0$:

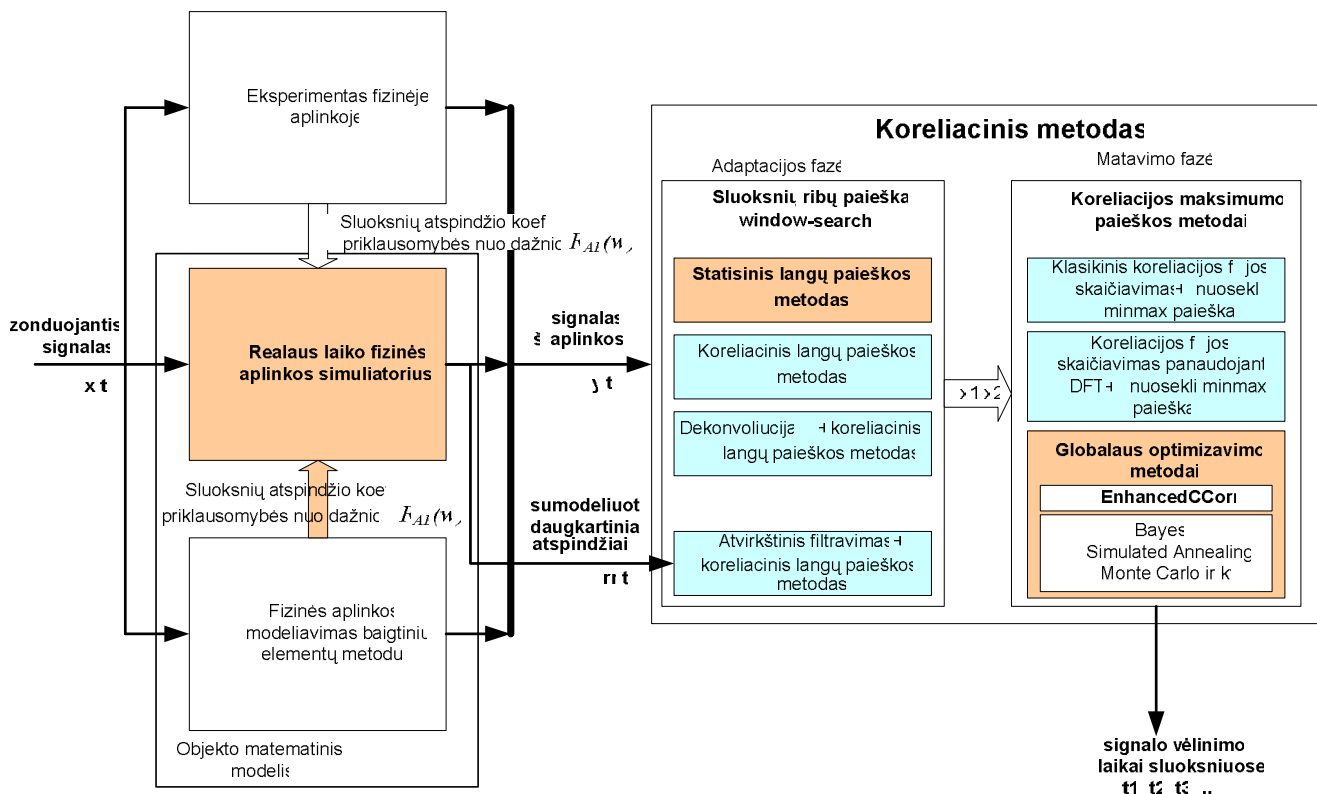
$$\tau_i = w'_i + \tau'_i = w'_i + \arg \max_j r_i(j) = w'_i + \arg \max_j \sum_{n=0}^{N-1} y_{ref}(n) \cdot y(n + j + w'_i). \quad (11)$$

Šios matavimo metodikos vienas iš pagrindinių privalumų be sumažintos skaičiavimų apimties yra tas, kad atskiriant adaptacijos ir matavimo fazes, didžioji skaičiavimų dalis perkeliama į adaptacijos fazę, kurioje skaičiavimų trukmei netaikomi griežti reikalavimai. Pasiūlyta metodika aiškiai atskiria tris koncepcijas-uždavinius (žiūr. paveikslėlį 9):

1. Fizinės aplinkos modeliavimo.
2. Sluoksnių ribų paieškos (adaptacija).
3. Koreliacijos maksimumo paieškos (matavimas).

Ši metodika pateikia kiekvieno uždavinio sprendimui po aibę metodų ir algoritmų. Sistemų analitikas naudodamasis šio metodu realiojo laiko neardančiosios kontrolės sistemos kūrimui, gali pasirinkti metodus kiekvieno uždavinio sprendimui taip, kad būtų patenkinti pagrindiniai RLS keliami reikalavimai: *greitaveika, matavimo tikslumas, savikaina ir gamybos trukmė*.

Šiame darbe siūlomi nauji uždavinių sprendimo metodai (pažymėti storu šriftu rusvame fone 9 pav.), kurie įgalina ženkliai sumažinti skaičiavimų apimtį. Tokie metodai leidžia realizuoti sistemą pigesneje architektūroje, o tai praplečia realiojo laiko neardančiosios kontrolės sistemų taikymo sritį.



9 pav. Realiojo laiko NDT sistemos kūrimo metodika

2.2. Fizinės aplinkos modeliavimas

Tai yra labai svarbus uždavinys, kuris ne tik leidžia pažinti taikymo sritį, bet ir:

- kurti naujus matavimo metodus,
- testuoti kuriamą NDT sistemą,
- sukurti efektyvius daugkartinių atspindžių pašalinimo metodus.

Straipsnyje [3] yra aprašytas šio darbo metu sukurtas realiojo laiko fizinės aplinkos simulatoriaus modelis sistemoje RTSM. Fizinės aplinkos simulatorius turi tokią pačią sąsają kaip ultragarso keitikliai ir realizuojamas kaip atskira sistema. Tokiu būdu galima ištestuoti visas realiojo laiko NDT sistemos grandis neatliekant eksperimentų realioje aplinkoje. Tai ypač paspartina RLS sistemų projektavimo procesą ir sumažina sistemų testavimo kaštus. Šio fizinės aplinkos simulatoriaus pagrindinis privalumas yra tas, kad į simulatorių galima užkrauti fizinės aplinkos parametrų kitimo programą ir jeigu testuojamoje NDT sistemoje įvyksta klaida visada galima gauti diagnostinę seką sukėlusią sutrikimą NDT sistemoje. Tai leidžia tiksliai ir greitai išsiaiškinti sutrikimo priežastis ir pašalinti realiojo laiko programinės arba aparatinės įrangos defektus. Toks realiojo laiko NDT sistemų testavimo ir derinimo būdas iš esmės keičia

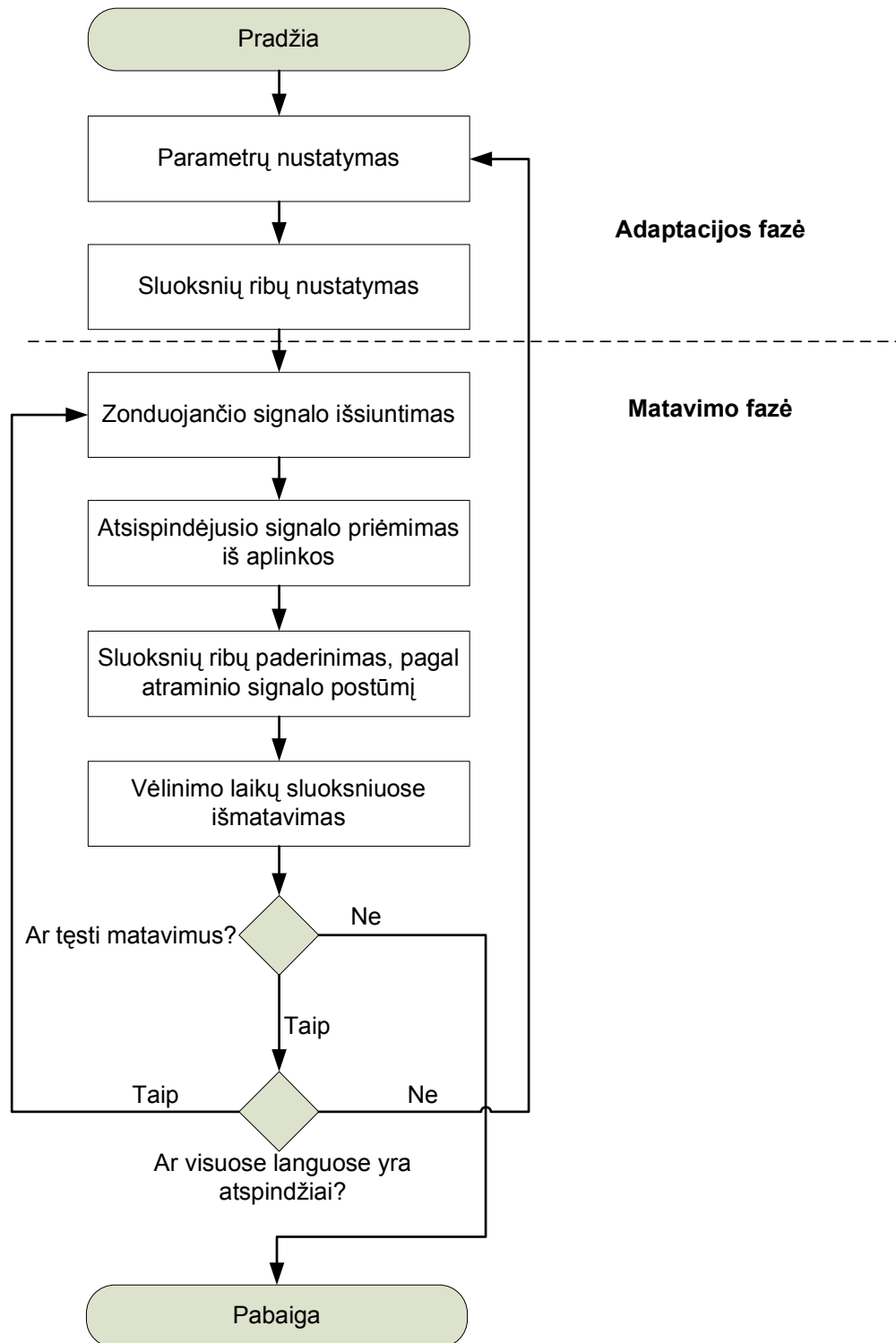
sistemų projektavimo proceso kokybę, ko niekada nebuvo galima pasiekti testuojant sistemą tik realioje fizinėje aplinkoje.

Pasiūlytas realiojo laiko fizinės aplinkos simulatorius naudoja bandinio sluoksnių atspindžio koeficientų dažnines priklausomybes. Šios priklausomybės iki šiol būdavo nustatomos eksperimentiškai kiekvienam bandiniui. Galima sukurti fizinės aplinkos baigtinių elementų modelius, kurie leistų tiksliai modeliuoti fizinę aplinką nenaudojant eksperimentiškai gautų priklausomybių. Modeliavimas baigtinių elementų metodu (BEM) yra sudėtingas procesas skaičiavimo apimties atžvilgiu. Todėl tikslinga pasinaudoti BEM modeliu dažninių medžiagos savybių priklausomybių nustatymui. Gautosios priklausomybės užkraunamos į realiojo laiko fizinės aplinkos simulatorių, tokiu būdu suteikiant galimybę atsisakyti eksperimentinio priklausomybių gavimo iš realios fizinės aplinkos.

Fizinės aplinkos matematinių modelių panaudojimas leidžia panaudoti naujus sluoksnių ribų paieškos metodus. Panaudojant fizinės aplinkos modelius galima sukurti efektyvius daugkartinių atspindžių pašalinimo metodus, kas leidžia tiksliai nustatyti tikrųjų bandinio sluoksnių padėtis.

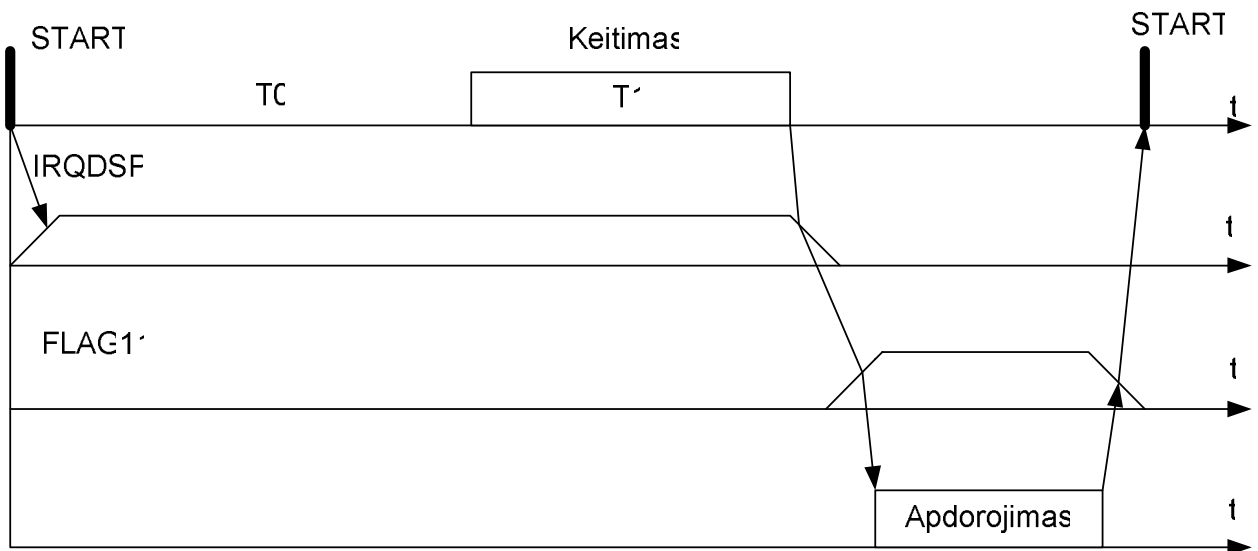
2.3. Realiojo laiko NDT sistemos veikimo algoritmas

Žemiau pateikiamas tipinės realiojo laiko NDT sistemos veikimo algoritmas.



10 pav. Tipinės NDT sistemos veikimo algoritmas

Realiojo laiko neardančiosios kontrolės sistemos darbo ciklas susideda iš dviejų fazių: *adaptacijos* ir *matavimo*. Adaptacijos fazėje yra pasiunčiamas zonduojantis signalas ir iš aplinkos sugrįžusiame signale identifikuojami bandinio sluoksniai ir jų ribos pagal parametrus užduotus iš darbinės stoties. Toliau seka matavimo fazė, kurios metu skenuojamas bandinys ir apskaičiuojami sluoksnių storiai. Jeigu matavimo fazėje bandinys pasislinko už matavimo ribų, sugrįžtama į adaptacijos fazę. Tipinis DSP sistemos matavimo fazės darbo ciklas pateikiamas žemiau:



11 pav. Matavimo fazės darbo ciklas

Matavimo fazėje DSP modulyje esantis realiojo laiko laikrodis kas 1ms sugeneruoja po 1 START impulsą. START impulsas inicijuoja zonduojančio signalo išsiuntimą. Laiko periodo T_0 metu NDT sistema laukia kol zonduojantis impulsas atsispindės nuo terpės-bandinio sandūros. Po periodo T_0 seka atsispindėjusio signalo priėmimo periodas T_1 . A/K keitikliui pabaigus darbą (pasibaigus periodui T_1) duodamas signalas pradėti skaičiavimus DSP procesoriui (sugeneruojamas pertraukimas IRQDSP). Procesoriaus darbo metu signalas FLAG1 laikomas aukštame lygyje, kai FLAG1 lygis krenta sugeneruojamas pertraukimas į darbo stotį tam, kad būtų perduoti skaičiavimo rezultatai.

2.4. Sluoksnių nustatymas slenkančio lango paieškos metodu ir algoritmas

Šiame darbe pristatytas naujas langų paieškos metodas paremtas signalo statistiniais įverčiais, fizine signalo prigimtimi ir globalaus optimizavimo metodais. Šis algoritmas buvo įdiegtas realioje NDT sistemoje ir išbandytas realioje aplinkoje. Tyrimų rezultatai bus pateikti rudens semestro ataskaitoje.

Taikant paprastus koreliacinius metodus daugkartinio atspindžio nuo pirminio atspindžio atskirti praktiškai neįmanoma, nes šių signalų dažninės savybės yra labai panašios. Šiai problemai spręsti buvo panaudoti pirminio atspindžio statistiniai įverčiai tokie kaip dispersija ir vidurkis. Statistiniu metodu taip pat įvertinamos atspindžių fazės panaudojant akustikos dėsnius (banga atsispindėjus nuo mažesnio akustinio impedanso paviršiaus keičia fazę 180° kampu). Statistiniu metodu galima identifikuoti visus atspindžius, paskaičiuoti jiems statistinius įverčius, fazės postūmius ir sudaryti sprendimų medį, kurio pagalba nustatomi atspindžiai labiausiai atitinkantys pirminio atspindžio kriterijus.

2.4.1. Langų paieškos algoritmas

Šiame skyriuje pateikiamas naujo langų paieškos algoritmo aprašas. Šis algoritmas yra pranašesnis už senąjį tuo, kad jis yra mažiau jautrus parametrų reikšmėms ir norint rasti langus signale reikia pakeisti tik vieną parametą.

Pradiniai duomenys:

$x(1..xlen)$ – signalas iš aplinkos registruotas keitiklyje

Langų paieškos parametrai:

$clevel$ – lango koreliacijos funkcijos maksimumo slenkstinė reikšmė. Surasto lango koreliacijos maksimumo reikšmė turi būti $\geq clevel$;

$minstd$ – signalo lange minimalus vidutinis standartinis nuokrypis. Surasto lango vidutinis standartinis nuokrypis turi būti $\geq minstd$.

Algoritmo derinimo parametrai:

Šie parametrai buvo nustatyti eksperimentiškai ir yra tinkami visiems turimiems dviejų ir trijų sluoksnių vamzdžių pavyzdžiams.

Atraminio signalo paieška:

$ww = 64$ – minimalus lango plotis;

$reflevel = 0.8$ – atraminio signalo normuotas iki 1 slenkstinis lygis;

$stdlevel = 0.7$ – atraminio signalo standartinio nuokrypio segmente $x(a..a+ww)$ normuotas iki 1 slenkstinis lygis.

Rezultatai:

$rpos$ – atraminio signalo lango padėtis

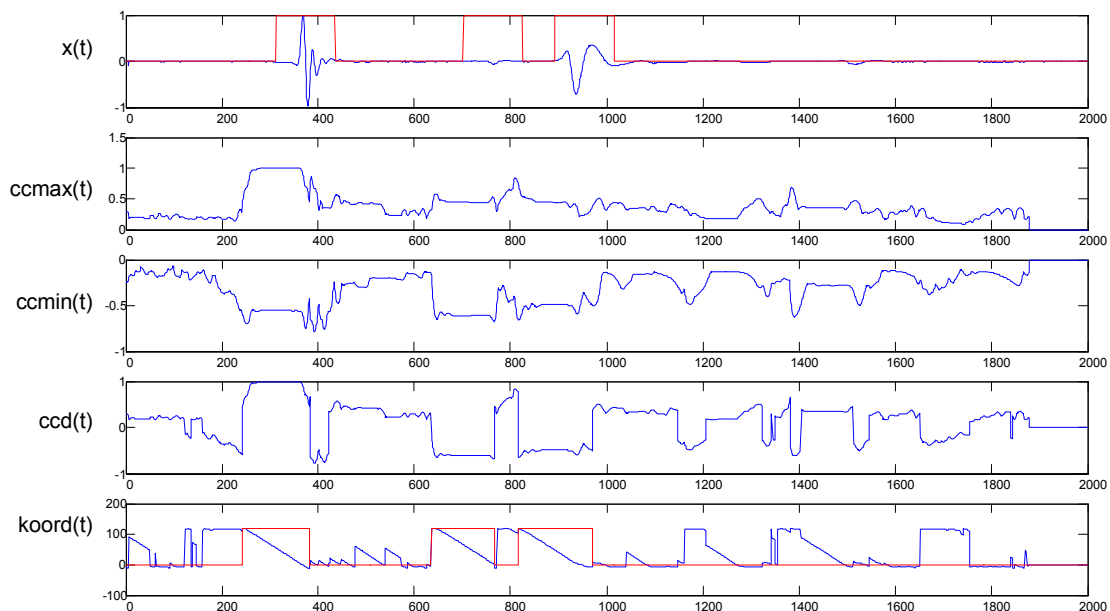
$rlen$ – lango ilgis

$nwin$ – rastų langų kiekis

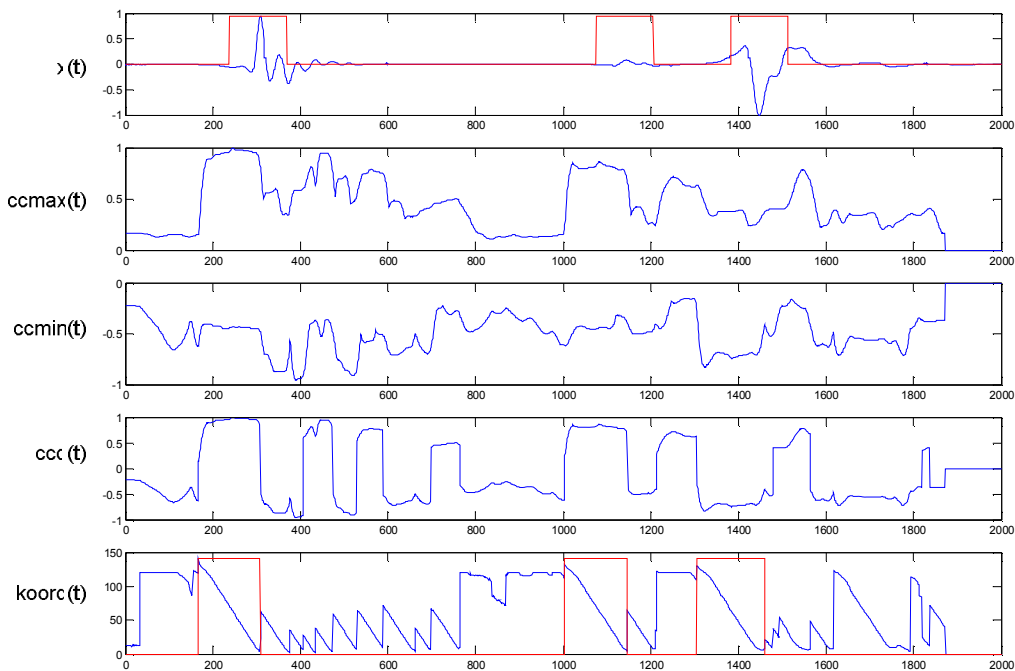
$win(1..nwin)$ – rastų langų padėtys

Žemiau pateikiami langų paieškos algoritmo rezultatai, keletui pavyzdinių vamzdžių:

Signalas su 2 silpnais daugkartiniais atspindžiais:



Signalas su 2 daugkartiniais atspindžiais, iš kurių pirmas labai gerai koreliuojasi su atramininiu signalu:

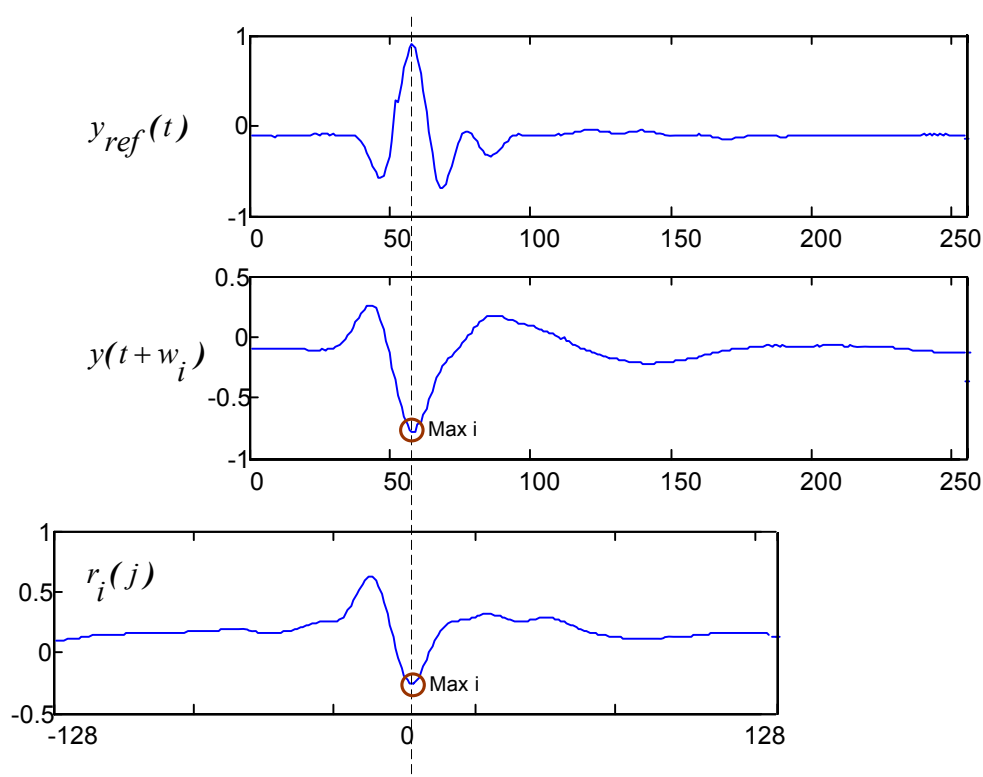


2.5. Koreliacijos maksimumo paieškos lange metodų sudarymas ir tyrimas

Šio uždavinio sprendimo rezultatas yra vėlinimo laikai τ_i ($i > 0$) apskaičiuoti pagal formulę (20).

2.5.1. Koreliacinės funkcijos skaičiavimo ir maksimumo paieškos perrinkimu metodas ir algoritmas

Tai paprasčiausias metodas, kurio esmė yra ta, kad skaičiuojama pilna koreliacinė funkcija lange i ir randama jos maksimali (teigiama arba neigiama) reikšmė. Kaip matyti iš 12 pav., kad koreliacijos funkcija įgyja maksimalią reikšmę tik viename taške, todėl maksimumo paieškai užtenka paprasto reikšmių perrinkimo algoritmo.



12 pav. Koreliacijos funkcijos skaičiavimas ir maksimumo paieška lange i

Koreliacinės funkcijos skaičiavimo apimtis galima sumažinti naudojant greitasias DFT, kaip aprašyta [8, 2]. Šio algoritmo sudėtingumas yra $O(n \log n)$.

2.5.1.1. Skaičiavimo algoritmas

Žemiau pateikiamas koreliacijos maksimumo paieškos metodas, kai koreliacinė funkcija $y(j)$ kiekviename taške skaičiuojama taikant formulę:

$$y(j) = \sum_{i=0}^{N-1} \text{ref}(n) \cdot x(i + j)$$

Pradinės sąlygos: atraminio ir lango signalų ilgiai N sutampa.

Pradiniai duomenys:

$x(1..N)$ – atspindžio sluoksnyje signalas

$\text{ref}(1..N)$ – atraminis signalas

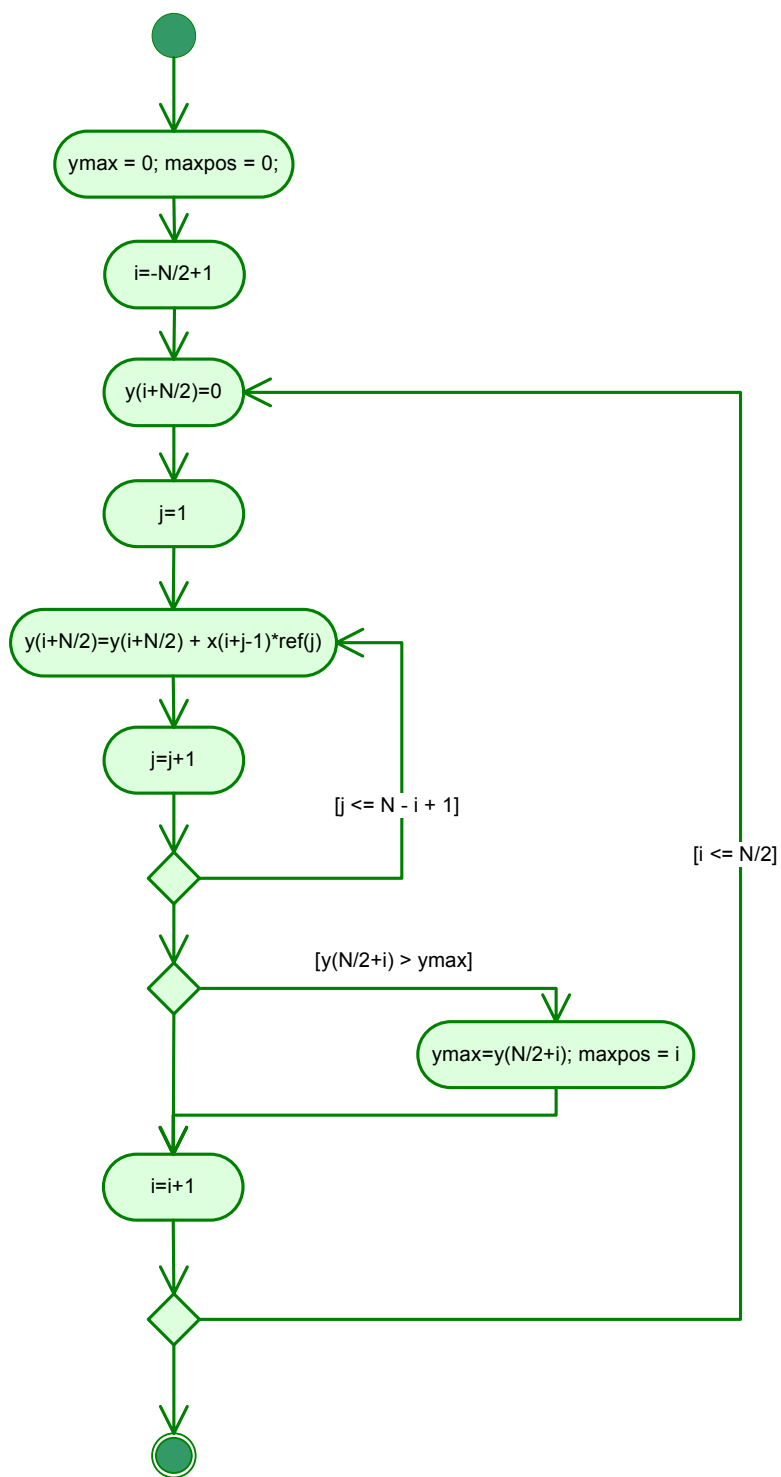
Rezultatai:

$y(1..N)$ – koreliacinė funkcija, čia: $y(1..\lceil N/2 \rceil - 1)$ – neigiami postūmiai, $y(\text{floor}(N/2))$ – teigiami postūmiai $y(\lceil N/2 \rceil + 1..N)$

y_{\max} – koreliacijos funkcijos maksimumo vertė

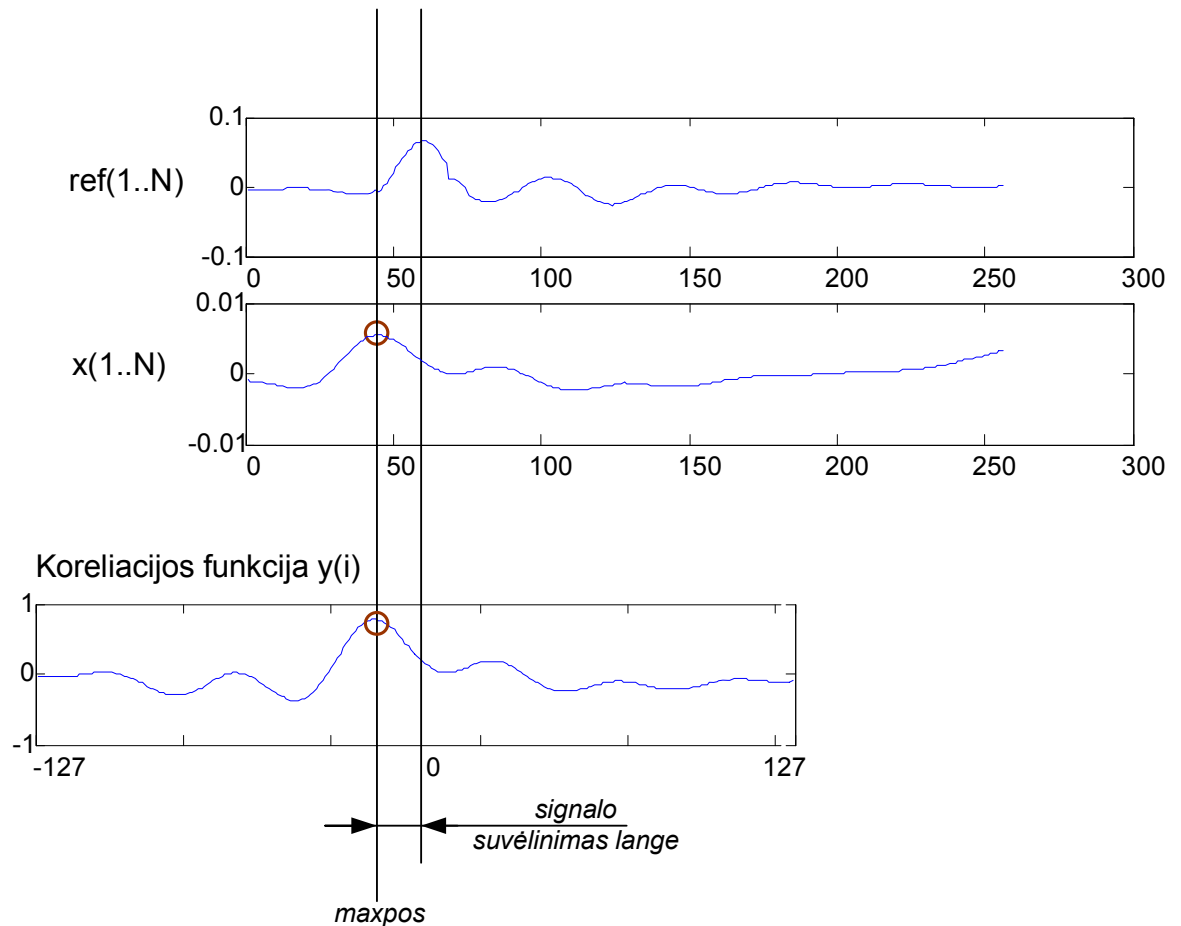
maxpos – koreliacijos funkcijos maksimalią vertę atitinkantis atspindžio poslinkis.

Žemiau pateikiama algoritmo UML veiklos diagrama:



13 pav. Koreliacijos paieškos perrinkimu algoritmas

Žemiau pateikta algoritmo iliustracija, kai lango plotis yra $N=256$ ir atspindys savo lange yra pasislinkęs lange į kairę atraminio signalo atžvilgiu (neigiamas poslinkis).



14 pav. Koreliacijos paieškos perrinkimu algoritmo darbo iliustracija

Bendru atveju šiam algoritmui reikia atlikti pilną koreliacijos funkcijos reikšmių perrinkimą, todėl šio algoritmo sudėtingumas $O(n^2)$.

Jeigu lango plotis $N=256$ (kaip pateikta iliustracijoje aukščiau), tai reikės atlikti:

$N*N= 65536$ sandaugos operacijų +

$N*N= 65536$ sumavimo operacijų

Viso: 131072 aritmetinių operacijų

2.5.2. Globalaus optimizavimo metodų panaudojimas koreliacijos maksimumui rasti

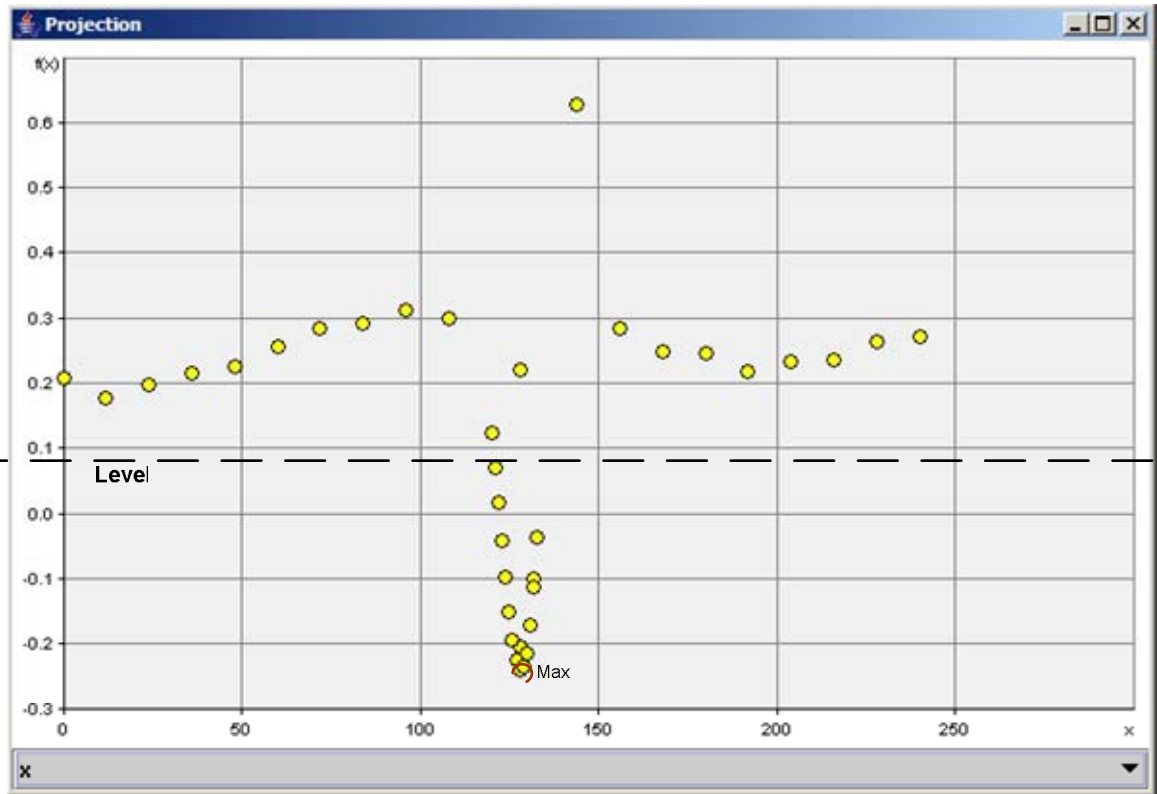
Kiekviename lange koreliacijos funkcija $r_i(j)$ gali būti laikoma kaip tikslo funkcija, kurią reikia minimizuoti/maksimizuoti. Šiam tikslui pasiekti galima naudoti globalaus optimizavimo metodus [9, 10, 11]. Buvo sudarytos (pavasario semestro metu) šių metodų realizacijos Java kalboje GMJ paketo kontekste, o rudens semestre bus atliktas išsamus metodų palyginimas. Atlikus pirminę metodų analizę pastebėta, kad:

- galima kelis ar net dešimtis kartų sumažinti skaičiavimų apimtį lyginant su pilno perrinkimo metodais;
- sumažėjusi skaičiavimų apimtis įtakoja skaičiavimų tikslumą – reikalingas rezultatų patikrinimo etapas, kas padidina skaičiavimų apimtį;
- „Simulated Annealing (SA)“ metodas yra paprastas ir lengvai realizuojamas bet kurioje architektūroje, tačiau jo konvergavimo greitis labai priklauso nuo parametrų. Tam tikslui buvo sudaryta SA metodo parametrų optimizavimo programa, kas pagerino metodo konvergavimą.

Tyrimo metu buvo sudarytas efektyvus maksimumo paieškos metodas *EnhancedCCorr*. Šis metodas susideda iš dviejų fazių:

- apytikslė maksimumo paieška
- maksimumo tikslinimas

Apytikslės paieškos fazėje vykdomas koreliacijos funkcijos skaičiavimas adaptyvaus žingsnelio principu. Šio principo esmė yra ta, kad koreliacijos funkcija yra skaičiuojama didesniu žingsneliu tik tada kai jos reikšmė pasiekia slenkstinę ribą *Level*. Žemiau pateikiama šio metodo iliustracija:



15 pav. Koreliacijos funkcijos skaičiavimas adaptyviu žingsneliu

Šis skaičiavimo algoritmas dar labiau paspartinamas koreliacijos funkcijos reikšmę $r_i(j)$ skaičiuojant apytiksliai, naudojant aproksimaciją:

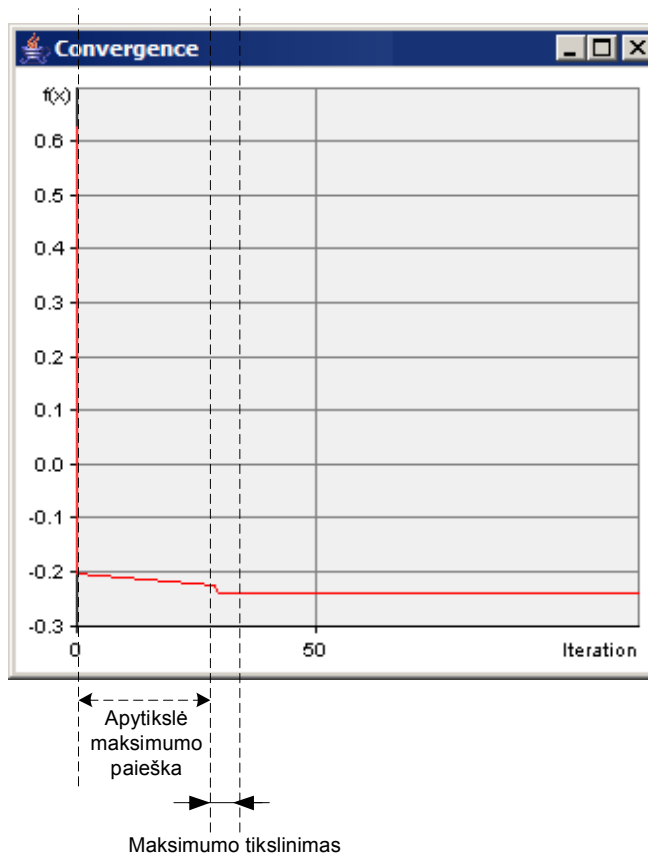
$$r_i(j) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot y(n + j + w_i) \approx \tilde{r}_i(j) = \frac{K}{N} \sum_{n=0}^{\frac{N-1}{K}} x(n) \cdot y(n + K \cdot j + w_i) \quad (11),$$

čia K – parametras nurodantis koreliacijos skaičiavimo žingsnelį.

Darbo metu pastebėta, kad koreliacijos vieno taško skaičiavimo apimtis galima sumažinti net iki 8 kartų, o visoje apytikslio skaičiavimo fazėje galima sumažinti skaičiavimų apimtį iki 160 kartų lyginant su pilnu koreliacinės funkcijos skaičiavimo metodu.

Maksimumo tikslinimo fazėje vykdomas tikslus koreliacinės funkcijos skaičiavimas apytikslio maksimumo aplinkoje ir tokiu būdu randamas patikslintas koreliacinės funkcijos maksimumo taškas.

Žemiau pateikiama *EnhancedCCorr* metodo konvergavimo iliustracija:



16 pav. *EnhancedCCorr* metodo konvergavimas

2.5.2.1. Koreliacinės funkcijos maksimumo paieškos *EnhancedCCorr* metodu algoritmas

Pagal *EnhancedCCorr* metodą, algoritmo darbas skiriamas į dvi fazes: apytikslės paieškos ir maksimumo tikslinimo.

Apytikslės paieškos metu skaičiuojami koreliacijos funkcijos apytiksliai įverčiai grubiu žingsneliu $NStepJ$. Kai koreliacinės funkcijos įvertis viršija slenkstinę ribą $JumpLevel$, pradedama skaičiuoti smulkesniu žingsneliu $NStepS$. Viso proceso metu sekamas maksimalų koreliacijos įvertį atitinkantis poslinkis $k1min$. Baigus paiešką $k1min$ rodytų į apytikslę koreliacijos maksimumo padėtį.

Maksimumo tikslinimo etape vykdomas tikslus koreliacinės funkcijos skaičiavimas taško $k1min$ zonoje ($k1min - MaxWW/2$, $k1min + MaxWW/2$) ir nustatoma patikslinta maksimumo pozicija $k2max$.

Pradinės sąlygos: atraminio ir lango signalų ilgiai N sutampa.

Pradiniai duomenys:

$x(1..N)$ – atspindžio sluoksnyje signalas

$ref(1..N)$ – atraminis signalas

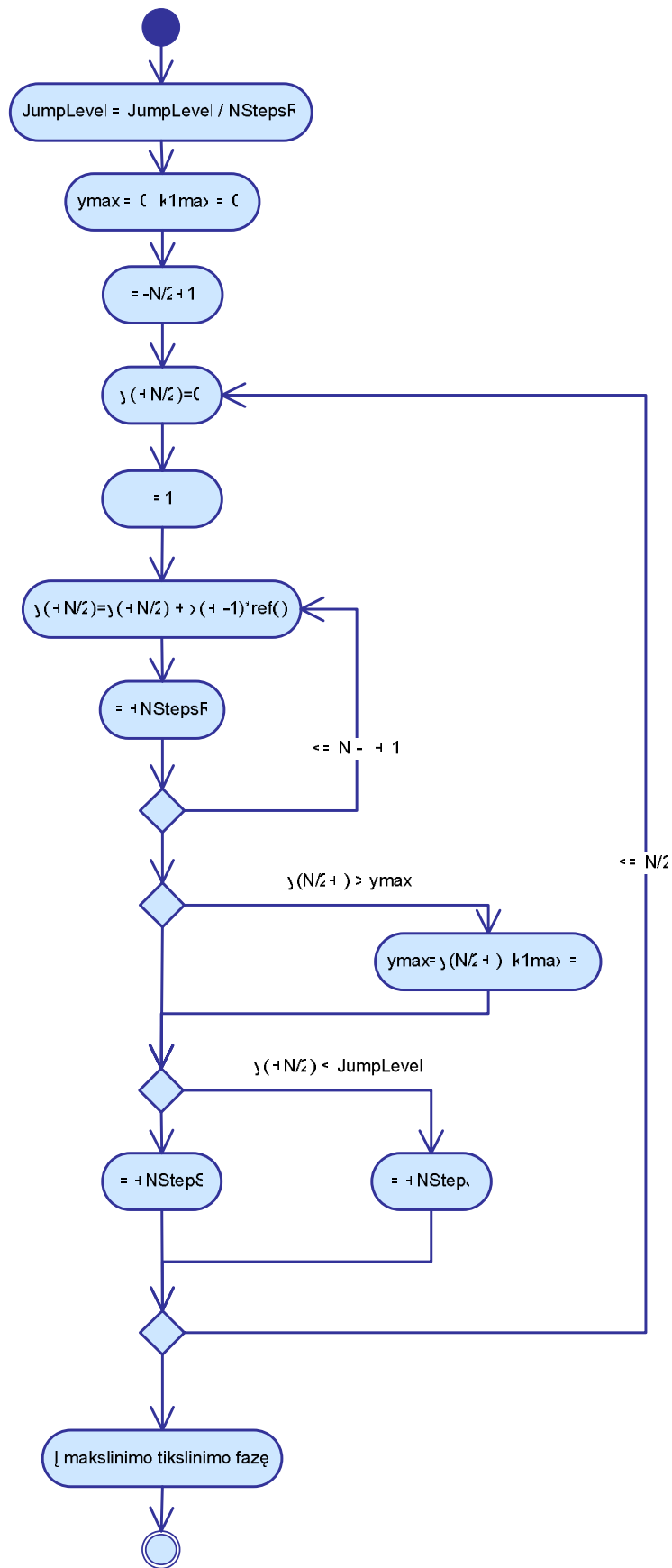
Rezultatai:

$y(1..N)$ – surasti (ne visi!) koreliacinės funkcijos įverčiai, čia: $y(1..\lceil N/2 \rceil - 1)$ – neigiami postūmiai, $y(\text{floor}(N/2))$ – teigiami postūmiai $y(\lceil N/2 \rceil + 1..N)$

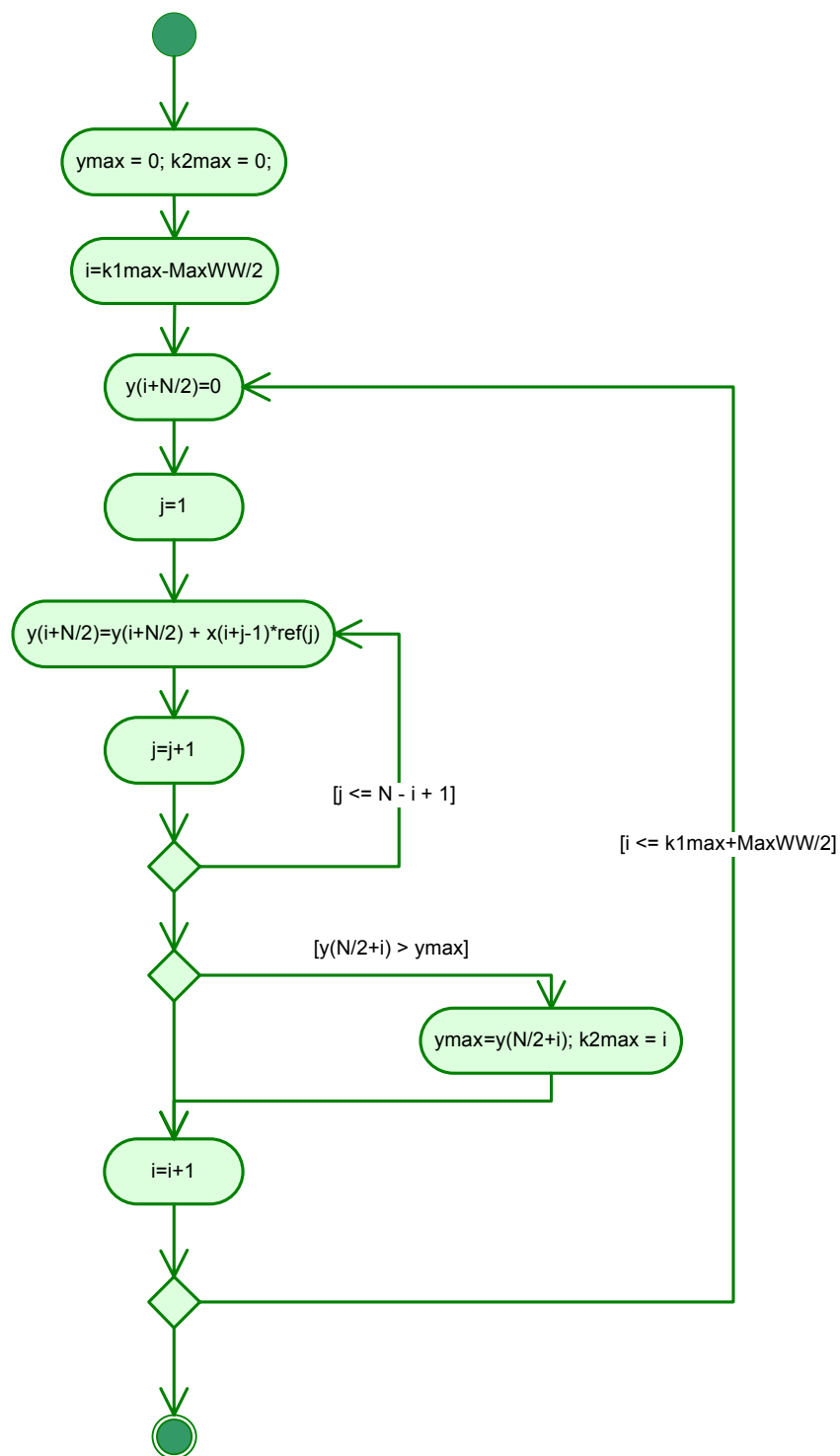
y_{\max} – koreliacijos funkcijos maksimumo vertė

\max_{pos} – koreliacijos funkcijos maksimalią vertę atitinkantis atspindžio poslinkis.

Žemiau pateikiama algoritmo UML veiklos diagrama:



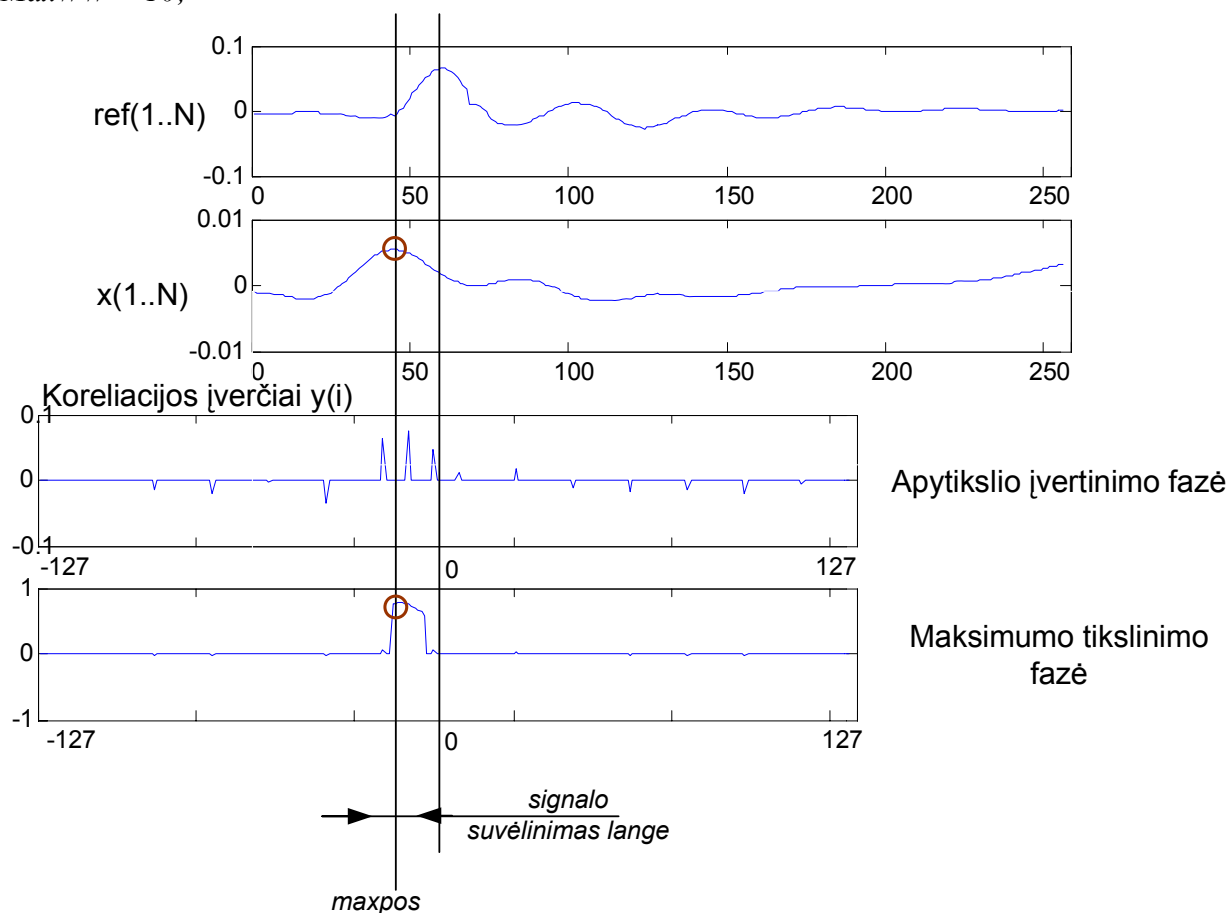
17 pav. Koreliacijos maksimumo paieškos *EnhancedCCorr* algoritmo iliustracija – apytikslė paieška



18 pav. Koreliacijos maksimumo paieškos *EnhancedCCorr* algoritmo iliustracija – maksimumo tikslinimas

Žemiau pateikiama algoritmo darbo iliustracija, kai nustatyti tokie parametrai:

$NStepJ = 10;$
 $NStepS = 8;$
 $NStepR = 10;$
 $Level = 0.3;$
 $MaxWW = 10;$



19 pav. Koreliacijos maksimumo paieškos *EnhancedCCorr* algoritmo darbo iliustracija

Jeigu lango plotis $N=256$ (kaip pateikta iliustracijoje aukščiau), tai reikės atlikti:

Apytikslis įvertinimo fazė:

$(N/(NStepJ + NStepR) + 3) * N / NStepR = 410$ sandaugos operacijų +
 $(N/(NStepJ + NStepR) + 3) * N / NStepR = 410$ sumavimo operacijų +

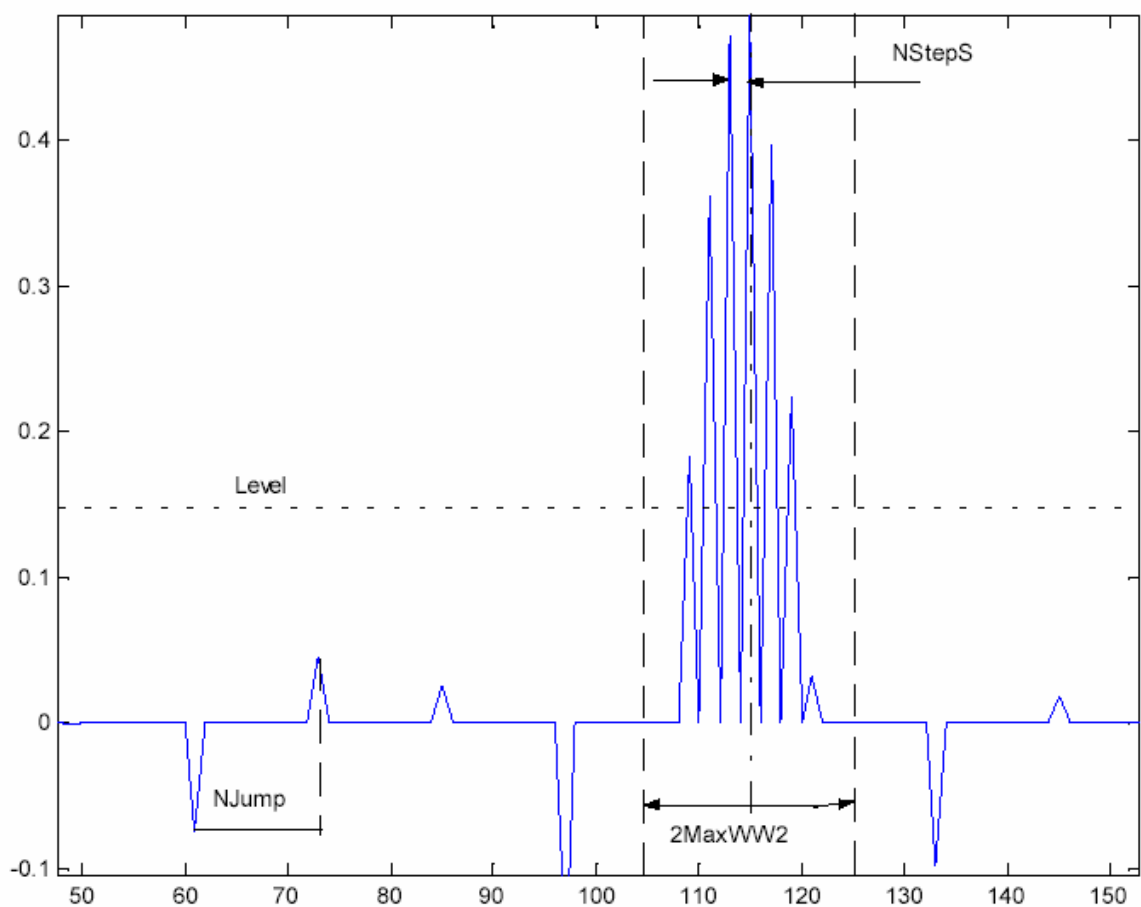
Maksimumo tikslinimo fazė:

$MaxWW * N = 2500$ sandaugos operacijų +
 $MaxWW * N = 2500$ sandaugos operacijų sumavimo operacijų

Viso: 5820 aritmetinių operacijų

Naudojant *EnhancedCCorr* metodą reikėjo atlikti 5820 aritmetinių operacijų, kai tuo tarpu naudojant klasikinį perrinkimo metodą teko atlikti 131072 aritmetinių operacijų. Šis metodas yra labai efektyvus vykdymo laiko atžvilgiu, tačiau jo tikslumas labai priklauso nuo parametrų. Tam tikslui buvo sudaryta Java programa (<http://ifko.ktu.lt/~vkaza/CorrOpt>), kuri panaudoja klasikinius optimizavimo metodus ir suranda optimalius vykdymo ir tikslumo atžvilgiu parametrus.

Taip pat buvo atlikta eilė eksperimentų ir sudaryta parametrų parinkimo metodika, kuri leidžia gauti parametrų rinkinį, su kuriais algoritmas duoda tikslius rezultatus per palyginti trumpą vykdymo laiką. Žemiau pateikiamas parametrų prasmės iliustracija:



20 pav. Koreliacijos maksimumo paieškos *EnhancedCCorr* algoritmo parametrų iliustracija

Parametrus *JumpLevel* ir *NStepJ* reikia stengtis parinkti taip, kad žemiau slenkstinio lygio *JumpLevel* būtų visi koreliacijos lapeliai išskyrus maksimumo lapelį. Beto *NStepJ* reikia parinkti taip, kad algoritmas visada pataikytų į didžiausiąjį koreliacijos lapelį. Rekomenduojama, kad *NStepJ* būtų lygus didžiausio lapelio pločiui lygyje *JumpLevel*.

Parametrą *MaxWW* rekomenduojama imti: $MaxWW \geq NStepS$.

3. Praktinė metodų realizacija

3.1. Eksperimentinio tyrimo metodika

Šių eksperimentų tikslas yra įdiegti sluoksnių storio matavimo algoritmus į realias skaičiavimo architektūras ir atlikti jų spartos ir tikslumo matavimus. Darbo metu buvo atliktas bazinių signalų apdorojimo algoritmų efektyvumo įvertinimas Java virtualiuose mašinos. Šio darbo rezultatai buvo paskelbti straipsnyje ir padarytas pranešimas tarptautinėje konferencijoje GSPx 2004 (straipsnis pridedamas priede 3). Tyrimai parodė, kad daugeliu atvejų C kalboje realizuoti algoritmai dirba sparčiau nei jų atitinkamos Java realizacijos. Todėl, šiame darbe atliekamas sluoksnių storio matavimo algoritmų, realizuotų ANSI C kalboje, efektyvumo įvertinimas:

- 1) skirtingose aparatinėse platformose
- 2) atliekamas skaičiavimo metodų tikslumo įvertinimas ir palyginimas Texas Instruments TMS320C6711 DSP platformoje[].

3.1.1. Eksperimento priemonės

3.1.1.1. ARM platforma

Ši Compulab firmos sukurta platforma [30, 31] susideda iš dviejų modulių:

- ARMCORE-GX – tai procesoriaus modulis su operatyvine ir flash atmintine
- ARMBASE – tai pagrindinė sistemos plokštė su periferiniais įvesties/išvesties įrenginiais.

Žemiau pateikiama trumpa platformos santrauka:

Procesorius:	Intel XScale PXA255 CPU
Taktinis dažnis	400 MHz
Spartinančioji atmintinė:	16 KB instrukcijoms + 8 KB duomenims
Vidinė magistralė:	100MHz, 32 bitai
Išorinė magistralė:	Iki 100MHz, 16 bitų
Adresuojama atmintis:	128MB
Atmintinė:	64 MB SDRAM 32 MB Flash
Procesoriaus architektūra:	32 bitų RISC 32 bitų ALU

	Vienas 32x32 kaupiančios daugybos įtaisas (MAC) 16 32 bitų registų Fiksuoto taško aritmetika
Operacinė sistema (OS):	ARM Linux
OS branduolio versija:	Linux 2.4.26
Kompiliatorius:	GNU C kroskompiliatorius 2.95
Kompiliatoriaus vėliavėlės:	-O3 -funroll-loops

3.1.1.2. Analog Devices Blackfin platforma

Tai Analog Devices firmos Blackfin BF533 procesoriaus pagrindu sukurtas kompiuteris vienoje plokštėje [32]. Žemiau pateikiama trumpa platformos santrauka:

Procesorius:	ADSP-BF533 Blackfin procesorius
Taktinis dažnis	400 MHz
Spartinančioji atmintinė:	16 KB instrukcijoms + 32 KB duomenims
Vidinė magistralė:	133MHz, 32 bitai
Išorinė magistralė:	Iki 133MHz, 16 bitų
Adresuojama atmintis:	128MB
Atmintinė:	128 MB PC133 SDRAM 4 MB Flash
Procesoriaus architektūra:	32 bitų RISC 2x40 bitų ALU 2x40 bitų daugybos įtaimai 2x40 bitų akumulatoriai 2x 40 bitų 16x16 kaupiančios daugybos įtaimai (MAC) 16x32 bitų registų Fiksuoto taško aritmetika
Operacinė sistema (OS):	uClinux
OS branduolio versija:	Linux 2.6.3
Kompiliatorius:	GNU C kroskompiliatorius 3.4.1

Kompiliatoriaus vėliavėlės:	-O3 –funroll-loops
------------------------------------	--------------------

3.1.1.3. Texas Instruments TMS320C6711 DSK platforma

Tai platforma pagrįsta Texas Instruments firmos sukurtu moderniu skaitmeninių signalų apdorojimo procesoriumi TMS320C6711. Šios platformos santrauka:

Procesorius:	TMS320C6711 DSP procesorius
Taktinis dažnis	150 MHz
Spartinančioji atmintinė:	L1 4 KB instrukcijoms + L1 4 KB duomenims L2 64KB
Vidinė magistralė:	100 MHz, 32 bitai
Išorinė magistralė:	Iki 100 MHz, 24 bitų
Adresuojama atmintis:	1024MB
Atmintinė:	16 MB SDRAM 128 KB Flash
Procesoriaus architektūra:	VleociTI™ VLIW architektūra 8 instrukcijos per 1 ciklą 8 nepriklausomi funkciniai įtaisai: 4 slankaus taško ALU 2 fiksuoto taško ALU 2x16 bitų daugybos įtaisai 32x32 bitų registrai 2 operaciniai įrenginiai Slankaus taško aritmetika
Operacinė sistema (OS):	RTDX
Kompiliatorius:	Texas Instruments Code Composer Studio v2
Kompiliatoriaus vėliavėlės:	-O3 Loops unrolling

3.1.1.4. Athlon64 platforma

Tai asmeninis kompiuteris susidedantis iš:

- ASUS A8N-SLI pagrindinės plokštės
- AMD Athlon64 3200+ procesoriaus

Žemiau pateikiama trumpa platformos santrauka:

Procesorius:	AMD Athlon64 3200+
Taktinis dažnis	2200 MHz
Spartinančioji atmintinė:	64 KB L1 instrukcijoms 64 KB L1 duomenims Asociatyvinė 16 krypčių 512 KB L2 su pažangia šakojimusi prognoze
Išorinė magistralė:	800 MHz, 3.2 GB/s
Adresuojama atmintis:	4096 MB
Atmintinė:	1024 MB Dual Channel DDR400 74 GB WD Raptor HDD
Procesoriaus architektūra:	AMD64 instrukcijų plėtinys SSE, SSE2, MMX™, AMD 3dNow!™ 16x64 bitų registrų 16x128 bitų SSE/SSE2 registrų Slankaus taško aritmetika
Operacinė sistema (OS):	Windows XP SP2, Cygwin Unix aplinka
Kompiliatorius:	Cygwin GCC 3.4.1
Kompiliatoriaus vėliavėlės:	--O3 –funroll-loops

3.1.1.5. Pentium 4M platforma

Tai nešiojamas kompiuteris su Intel Centrino platforma. Žemiau pateikiama trumpa platformos santrauka:

Procesorius:	Intel Pentium 4M
Taktinis dažnis	1400 MHz
Spartinančioji atmintinė:	1 MB L2
Išorinė magistralė:	400 MHz
Adresuojama atmintis:	1024 MB
Atmintinė:	512 MB DDR266

	80 GB TOSHIBA 16M Cache HDD
Procesoriaus architektūra:	IA-32 bitų architektūra SSE, SSE2, MMX™ 8x32 bitų registrų 8x64 bitų SSE/SSE2 registrų Slankaus taško aritmetika
Operacinė sistema (OS):	Windows XP SP2, Cygwin Unix aplinka
Kompiliatorius:	Cygwin GCC 3.4.1
Kompiliatoriaus vėliavėlės:	--O3 -funroll-loops

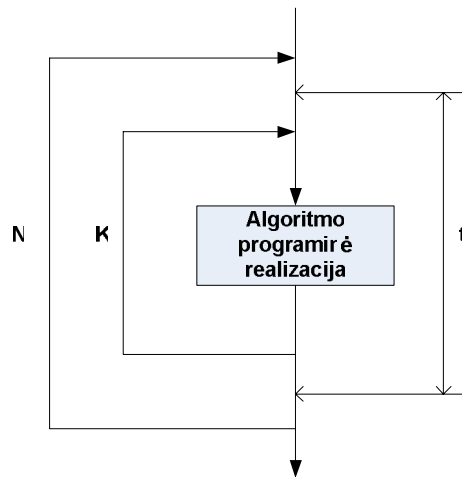
3.1.2. Spartos matavimo metodas

Algoritmų realizacijos vykdymo spartą galima matuoti dviem būdais:

- skaičiuoti procesoriaus ciklus
- matuoti algoritmo vykdymo trukmę

Pirmuoju būdu reikia skaičiuoti procesoriaus ciklų kiekį vykdant algoritmo realizaciją. Toks matavimo metodas yra labai tikslus. Tačiau jo esminis trūkumas yra tai, kad skirtingose eksperimentinėse platformose reikia naudoti skirtingas ciklų matavimo priemones. Be to tokias priemones turi ne visos testavimo platformos.

Pasirinktas antrasis būdas yra algoritmo realizacijos trukmės matavimas. Šis metodas yra paprastas ir jam realizuoti pakanka standartinių operacinės sistemos priemonių. Pagrindinis tokio metodo trūkumas yra tas, kad matavimo tikslumas priklauso nuo naudojamų kompiliatorių, operacinės sistemos ir pačios aparatinės įrangos architektūros. Tačiau visos darbe naudojamos testavimo platformos gali matuoti laiką 1 ms tikslumu. Tokio matavimo tikslumo pakanka ilgų procesų trukmei matuoti, tačiau daugelis matuojamų procesų yra žymiai trumpesni nei 1 ms. Ši problema yra sprendžiama matuojamą algoritmą vykdant K kartų ir skaičiuojant bendrą vykdymo laiką t (matavimo schema pateikta 21 pav.).



21 pav. Algoritmo realizacijos vykdymo trukmės matavimo schema

Atliekama N eksperimentų, naudojant N skirtingų lango pločių. Kiekvieno eksperimento metu algoritmo realizacija yra vykdoma K kartų ir fiksuojama bendra vykdymo trukmė t . Tuomet vidutinė vykdymo trukmė bus:

$$t_{vid} = \frac{t}{K}. \quad (21)$$

Matuojama algoritmo realizacija vykdoma ne mažiau 2 sekundžių ir fiksuojamas jo įvykdymų kiekis K . Žemiau pateikiamas vykdymo spartos įvertinimo algoritmas:

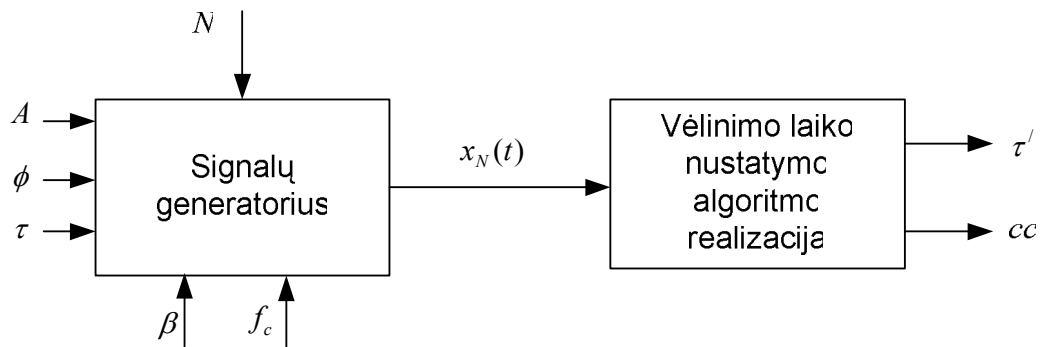
1. $K = 0$
2. $t_{start} = \text{realus_laikas_ms}()$
3. Įvykdyti matuojamo algoritmo realizaciją 1 kartą
4. $t_{stop} = \text{realus_laikas_ms}()$
5. $K = K + 1$
6. Jei $t_{stop} - t_{start} < 2s$, vykdyti nuo 3 žingsnio
7. $t_{vid} = (t_{stop} - t_{start}) / K$

3.1.3. Tikslumo matavimo metodas

Vėlinimo laiko lange nustatymo algoritmų skaičiavimo tikslumas tiriamas šiais atvejais:

- išmatuoto signalo postūmio laike įtaka vėlinimo laiko tikslumui,
- išmatuoto signalo postūmio laike įtaka koreliacijos funkcijos maksimumo vertei,
- baltojo triukšmo amplitudės ir signalo postūmio įtaka vėlinimo laiko ir koreliacijos maksimumo tikslumui.

Vėlinimo laiko nustatymo algoritmo tikslumo matavimo schema pateikta 22 paveiksle.



22 pav. Algoritmo tikslumo matavimo schema

Čia naudojamas signalų generatorius, kuris pagal užduotus parametrus generuoja Gauso atspindį $x(t)$, pagal formulę:

$$x_N(t) = \beta e^{-\alpha(t-\tau)^2} \cos(2\pi f_c(t-\tau) + \phi) + A \xi(t). \quad (22)$$

Čia α - dažnių juostos pločio faktorius, τ - atspindžio pasirodymo laikas, f_c - centrinis dažnis, ϕ - fazė, β - amplitudė, $A \xi(t)$ - baltas triukšmas su A amplitude. Atliekant tikslumo matavimus, signalų generatorius sugeneruoja N signalų $x_N(t)$ su skirtingais vėlinimo laikais τ . Šie signalai vienas po kito perduodami vėlinimo laiko nustatymo algoritmui, kuris apskaičiuoja išmatuotąją vėlinimo reikšmę τ' . Tuomet galima apskaičiuoti vėlinimo laiko matavimo santykinę paklaidą esant signalo poslinkiui τ :

$$\sigma(\tau) = \frac{|\tau' - \tau|}{\tau}. \quad (23)$$

Tada vidutinė santykinė paklaida suskaičiuojama pagal formulę:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{N} \sum_{\tau=0}^{N-1} \sigma(\tau). \quad (24)$$

Analogiškai randamos ir koreliacijos maksimumo vertės paklaidos. Žemiau pateikiamas matavimo tikslumo įvertinimo algoritmas:

Algoritmas realizuotas DSP TI 6711:

1. $\tau = 0$
2. Sugeneruoti signalą $x(t)$ suvėlintą per laiką τ
3. Įvykdyti matuojamo algoritmo realizaciją 1 kartą išsaugant išmatuotą laiką τ_i ir koreliacijos maksimumo vertę cc_i .

Paklaidų apskaičiavimas realizuotas Matlab(x priedas):

4. $\sigma(\tau) = \text{abs}(\tau - \tau_i) / \tau$
5. $\bar{\sigma} = \bar{\sigma} + \sigma(\tau)$
6. $\bar{\sigma}_{cc} = \bar{\sigma}_{cc} + cc_i$
7. $\tau = \tau + 1$
8. Jei $\tau < N$, vykdyti 2 žingsnį
9. $\bar{\sigma} = \bar{\sigma} / N$
10. $\bar{\sigma}_{cc} = \bar{\sigma}_{cc} / N$

Siekiant įvertinti triukšmo įtaką skaičiavimo tikslumui, eksperimentas pakartojamas su skirtingomis triukšmo signalo A amplitudės reikšmėmis.

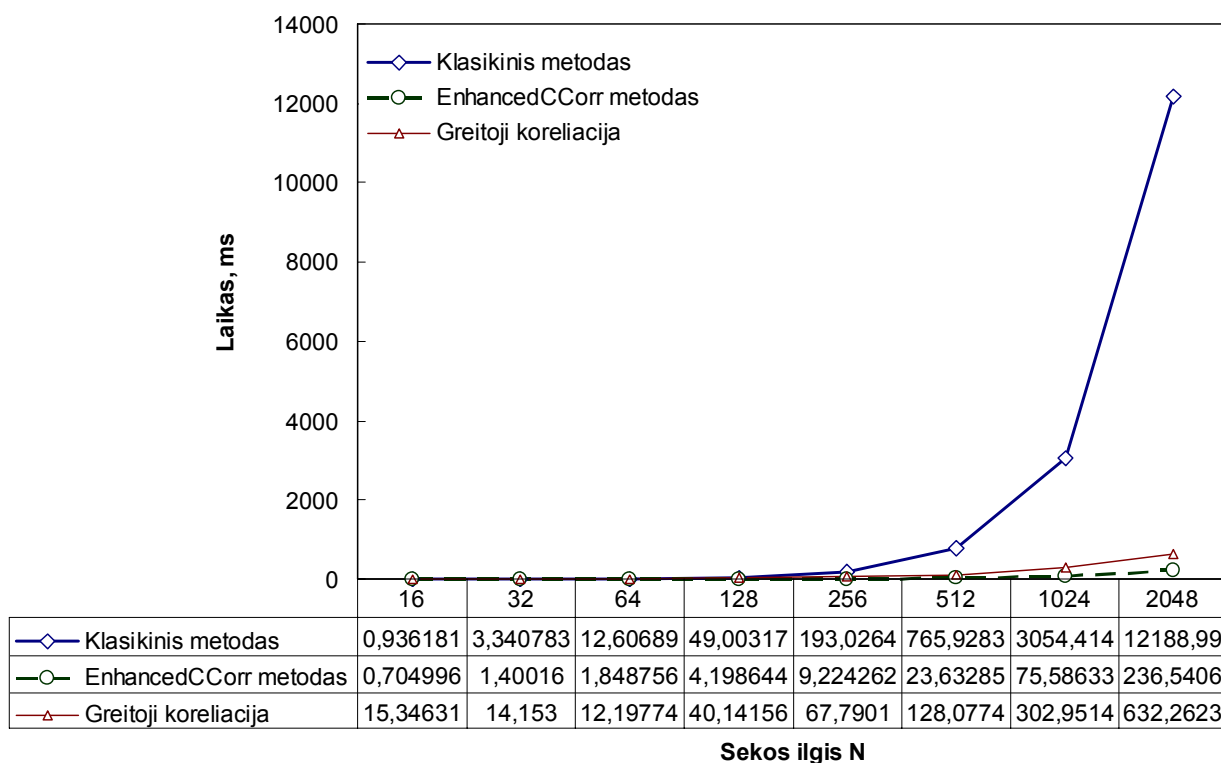
3.2. Algoritmų efektyvumo įvertinimas

3.2.1. Algoritmų spartos įvertinimas

Pagal 3.1.2 skyriuje aprašytą spartos įvertinimo metodiką buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai skirtinguose architektūrose, aprašytose 3.1.1 skyriuje. Eksperimentai buvo atlikti prie šių lango ilgių N : 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048. Darbo metu buvo tiriama šių metodų sparta:

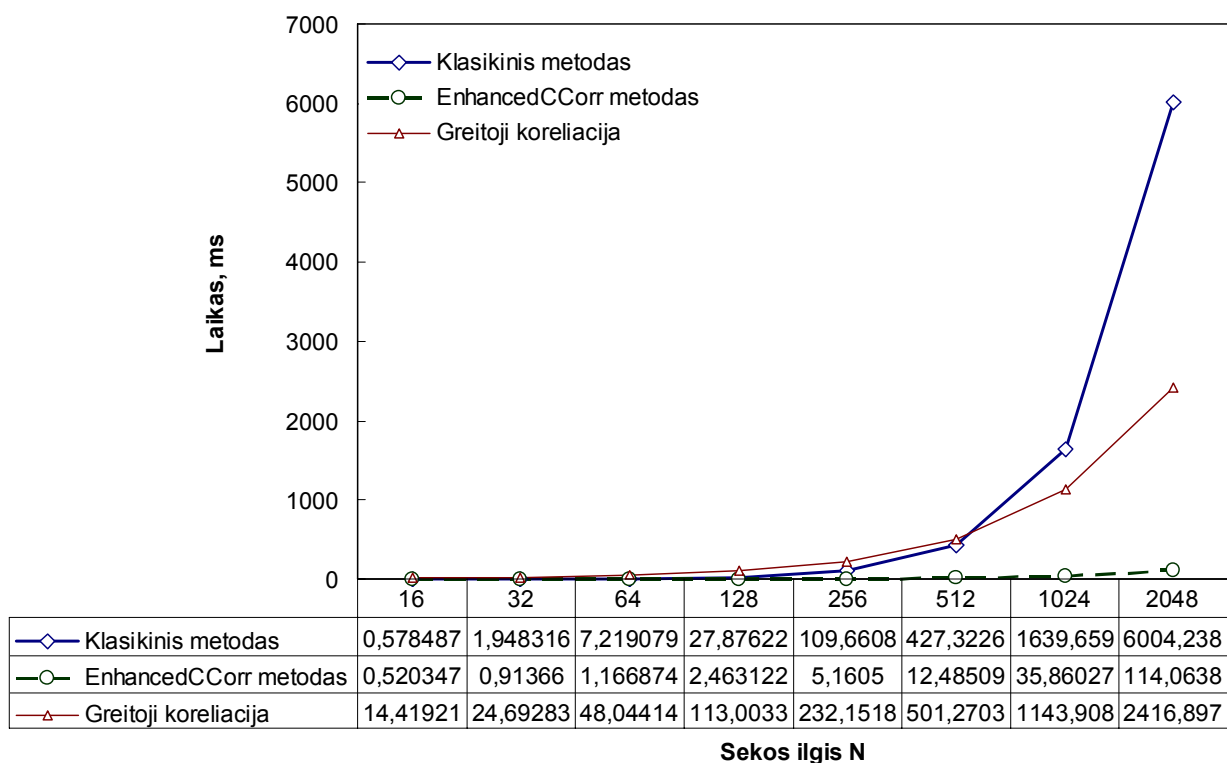
- Klasikinis metodas – tai koreliacijos skaičiavimo ir maksimumo paieškos perrinkimu metodas, kuris yra aprašytas 2.5.1 skyriuje.
- EnhancedCCorr – tai autoriaus pasiūlytas globalaus optimizavimo metodas, aprašytas 2.5.2 skyriuje.
- Greitoji koreliacija – tai logaritminio sudėtingumo greitosios Furje transformacijomis paremtas koreliacinės funkcijos skaičiavimo algoritmas, aprašytas [26].

Gauti matavimo rezultatai pateikiami 23 - 27 paveiksluose.



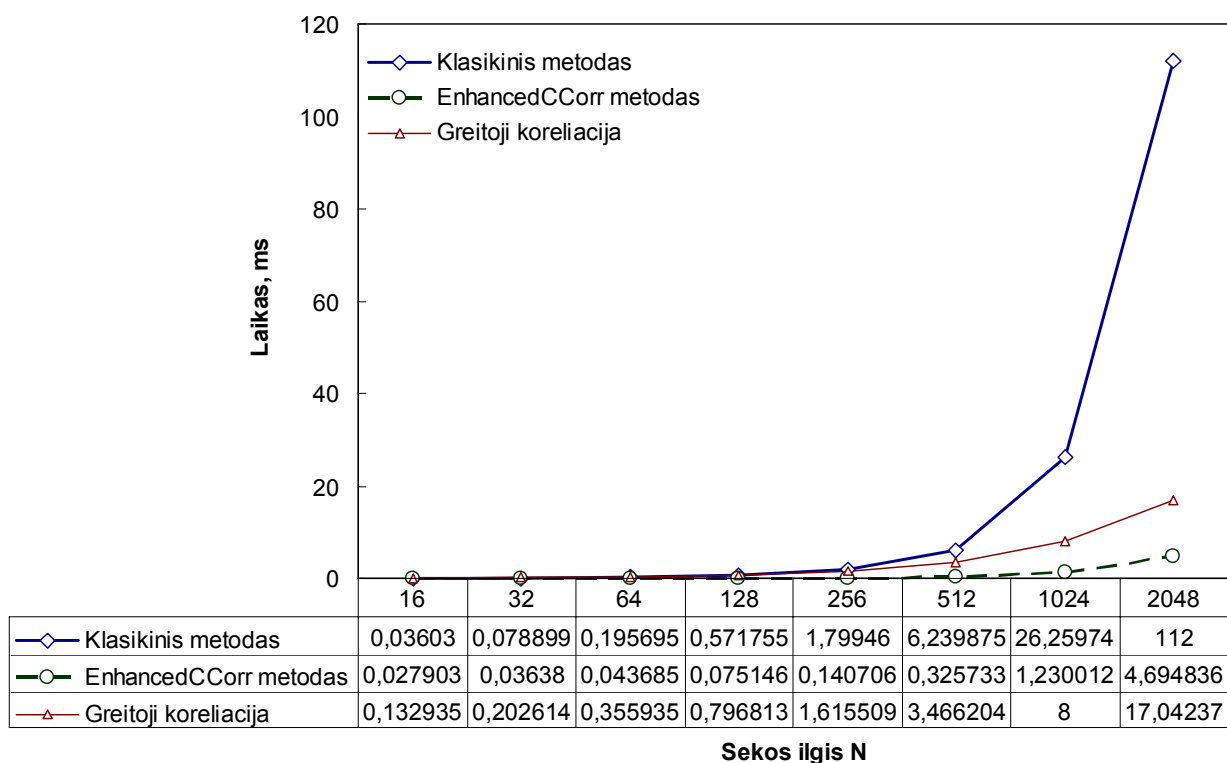
23 pav. Algoritmų efektyvumo palyginimas ARM PXA-255 architektūroje (trumpesnis laikas – greitesnė realizacija)

Kaip matyti 23 paveiksle, klasikinis skaičiavimo metodas trunka 193 ms, kai sekos ilgis yra 256. Tuo tarpu greitoji koreliacija trunka 67 ms, o siūlomas *EnhancedCCorr* metodas ją aplenkia 7 kartus. Reikia pastebėti, kad esant labai mažiems sekų ilgiams greitoji koreliacija skaičiuojama lėčiausiai iš visų algoritmų. Taip yra dėl papildomų operacijų su slankaus taško kompleksiniais skaičiais, kurioms vykdyti nėra įtaisų ARM architektūros procesoriuose.



24 pav. Algoritmų efektyvumo palyginimas Analog Devices Blackfin BF-533 architektūroje (trumpesnis laikas – greitesnė realizacija)

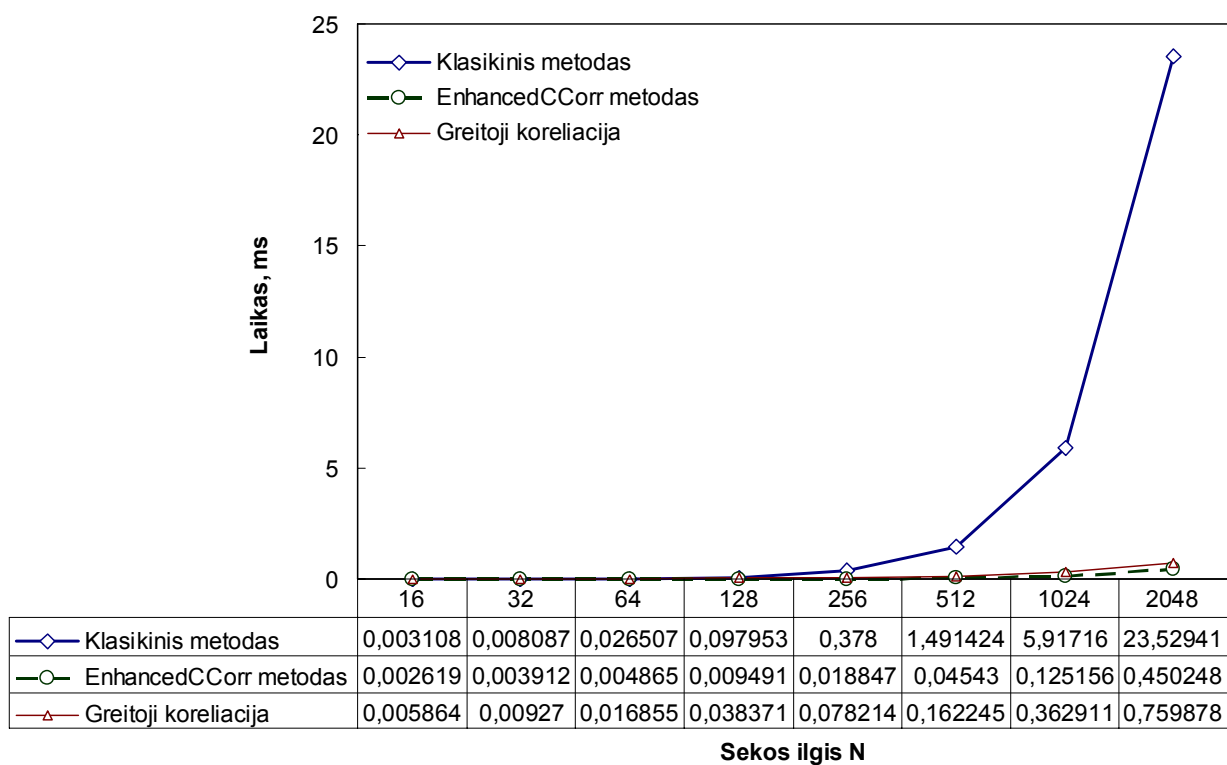
Atlikus eksperimentus su Blackfin platforma, buvo gauti įdomūs rezultatai (24 pav.). Dėl signalų procesoriuje esančių dviejų kaupiančios daugybos įtaisų (*MAC*) ir optimizuojančio kompiliatoriaus klasikinis ir *EnhancedCCorr* algoritmai veikia dvigubai greičiau nei ARM architektūroje. Tuo tarpu greitoji koreliacija čia dirba efektyviau už klasikinę tik esant dideliems 1024-2048 sekų ilgiams. Tokie rezultatai galėjo būti gauti dėl to, kad Blackfin C kalbos kompiliatorius neišnaudoja procesoriaus architektūros optimizuodamas greitosios koreliacijos algoritmą.



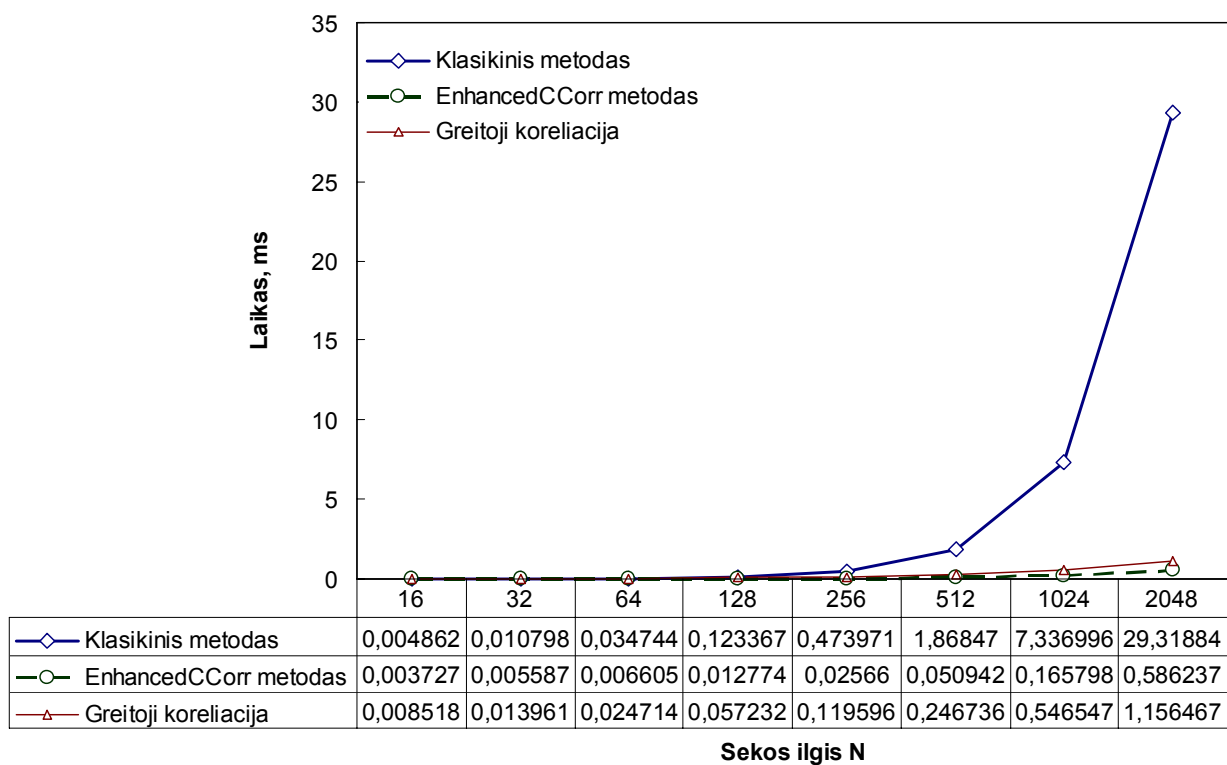
25 pav. Algoritmų efektyvumo palyginimas Texas Instruments TMS320C6711GFN architektūroje (trumpesnis laikas – greitesnė realizacija)

Atlikus eksperimentus su Texas Instruments TMS320C6711GFN DSK platforma, buvo gauti rezultatai, kurie pateikti 25 paveiksle. Čia tendencija išlieka panaši kaip ir kitose platformose: *EnhancedCCorr* metodas yra greitesnis už likusius esant bet kokiam sekos ilgiui. Reikia pastebėti, kad TMS320C6711 yra modernios architektūros skaitmeninių signalų apdorojimo procesorius, turintis daug fiksuoto ir slankaus taško aritmetinių įtaisų. Todėl šiame procesoriuje, dėl jo architektūros ir optimizuojančio C kompiliatoriaus, algoritmai vykdomi 30-50 kartų greičiau nei ARM ir Blackfin architektūros procesoriuose.

Darbo metu buvo atlikti eksperimentai ir su standartiniais šiuolaikiniais kompiuteriais, dėl juose esančių galingų, daug įtaisų turinčių, dirbančių net 20 kartų didesniu taktiniu dažniu procesorių. Žemiau, paveiksluose 26, 27 pateikti eksperimentų rezultatai gauti su AMD Athlon64 ir Pentium 4M platformomis.



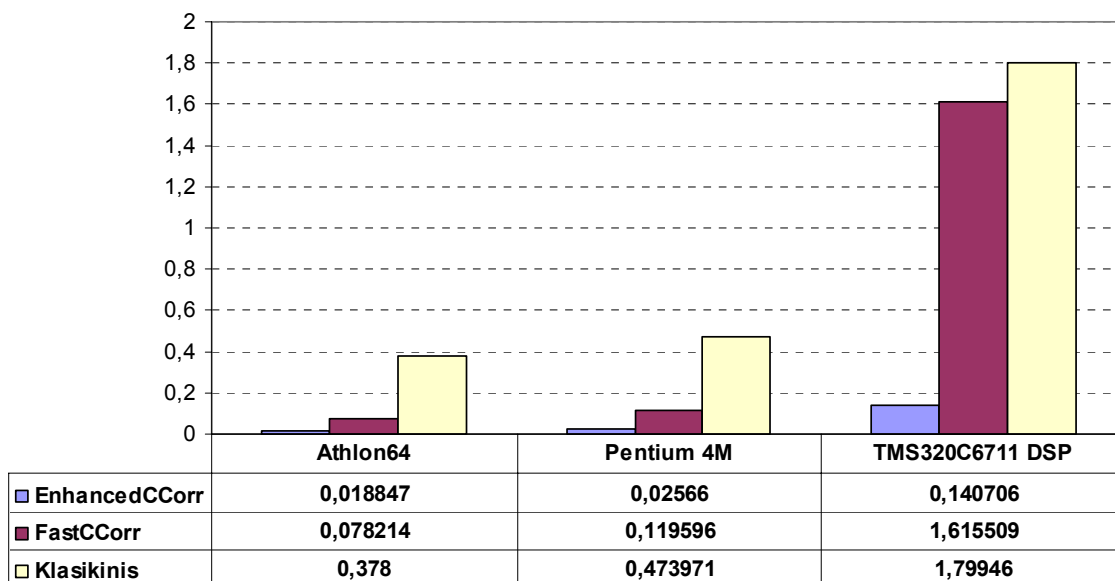
26 pav. Algoritmų efektyvumo palyginimas AMD Athlon64 architektūroje (trumpesnis laikas – greitesnė realizacija)



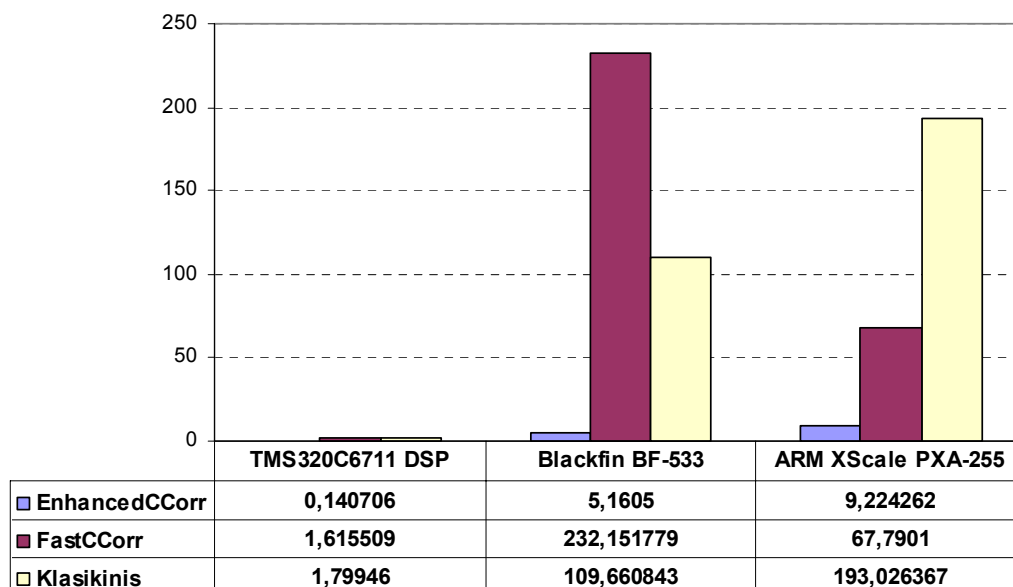
27 pav. Algoritmų efektyvumo palyginimas Intel Pentium 4M architektūroje (trumpesnis laikas – greitesnė realizacija)

Kaip matyti paveiksluose 26, 27 net personaliniuose kompiuteriuose algoritmų efektyvumo tendencijos išlieka tokios pačios kaip ir įterptinėse bei DSP platformose. Tačiau personalinių kompiuterių platformoms būdingi aukšti procesoriaus taktiniai dažniai, todėl čia algoritmai vykdomi iki 4 kartų greičiau nei Texas Instruments TMS320C6711 platformoje.

Žemiau pateikiami apibendrinti algoritmų spartos įvertinimo rezultatai, esant pasirinktam lango pločiui N=256.



28 pav. Algoritmų efektyvumo palyginimas personalinių kompiuterių ir DSP platformose (trumpesnis laikas – greitesnė realizacija)

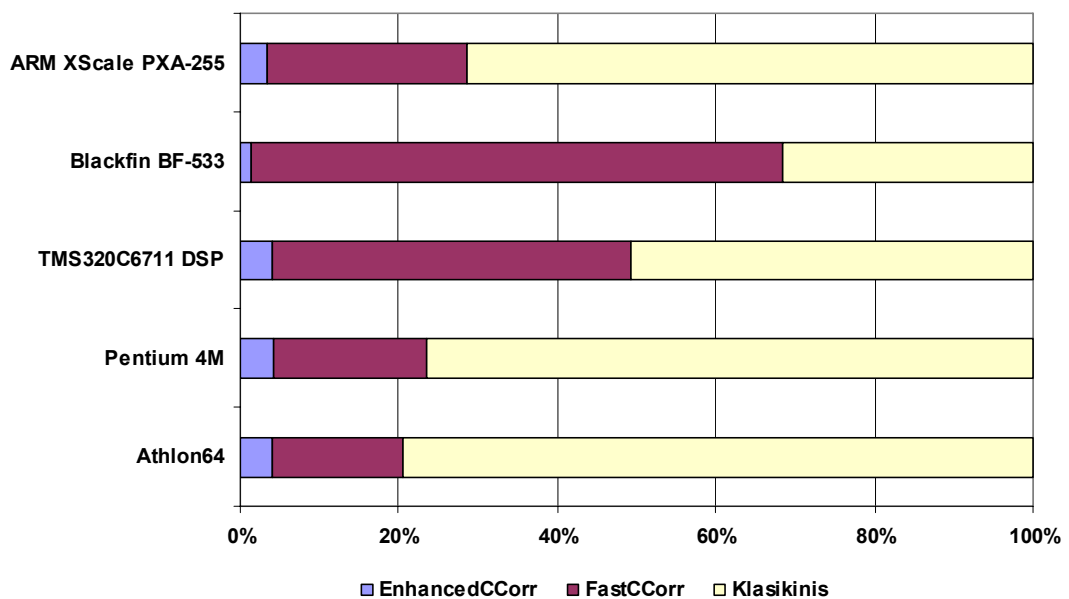


29 pav. Algoritmų efektyvumo palyginimas įterptinėse ir DSP platformose (trumpesnis laikas – greitesnė realizacija)

Iš apibendrintų algoritmų efektyvumo rezultatų (pav. 28, 29) matyti, kad šiuolaikiniai personaliniai kompiuteriai gali išspręsti sluoksnių storio matavimo uždavinį sparčiau nei modernūs įterptiniai ir signalų apdorojimo procesoriai. Tačiau, dėl savo didelių gabaritų ir energijos suvartojimo personaliniai kompiuteriai nėra tinkami naudoti įterptinėse sistemose bei šie kompiuteriai nėra pritaikyti eksploatacijai industrinėmis sąlygomis, kur yra nepalankus klimatas. Be to nors personaliniai kompiuteriai pasižymi labai didele sparta, jų praktinis panaudojimas dažnai yra neįmanomas, dėl jų nedeterminuotos reakcijos į įvykius laiko. Praktinės ultragarsinės neardančiosios kontrolės sistemose procesai turi būti valdomi nanosekundžių tikslumu, ko neužtikina personaliniai kompiuteriai.

Šio darbo rezultatai dar kartą patvirtina tai, kad algoritmo vykdymo spartą labiausiai įtakoja ne procesoriaus taktinis dažnis, o platformos architektūros ypatybės ir jas optimaliai išnaudojantys kompiliatoriai. Pavyzdžiui, Texas Instruments TMS320C6711 DSP taktinis dažnis yra 15 kartų žemesnis nei AMD Athlon64 procesoriaus, tačiau DSP architektūroje klasikiniai algoritmai dirba tik 5 kartus lėčiau.

Naudojant absoliučius laiko dydžius yra sunku lyginti algoritmus tarpusavyje pagal jų efektyvumą skirtingose platformose. Todėl, žemiau pateikiami apibendrinti rezultatai, kur pateikiamas santykinis algoritmų efektyvumas kiekvienoje platformoje išreikštas procentais.



30 pav. Santykinis algoritmų efektyvumo palyginimas, % (mažesnis – geresnis)

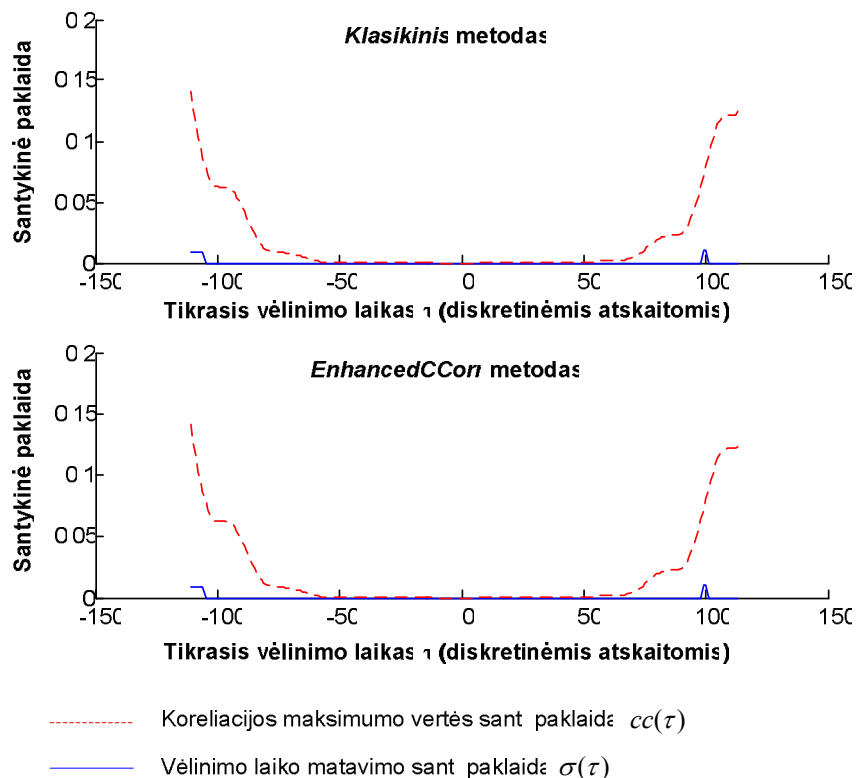
Iš paveiksle 30 pateiktų rezultatų matyti, kad pasiūlytas *EnhancedCCorr* metodas yra sparčiausias visose platformose. Nors Blackfin BF-533 platforma užima priešpaskutinę vietą pagal algoritmų vykdymo

spartą, tačiau pasiūlyto *EnhancedCCorr* algoritmo panaudojimas šioje platformoje yra pats efektyviausias: šio metodo santykis su lėčiausiu metodu - 2%, yra pats mažiausias iš visų platformų.

3.2.2. Algoritmų tikslumo įvertinimas

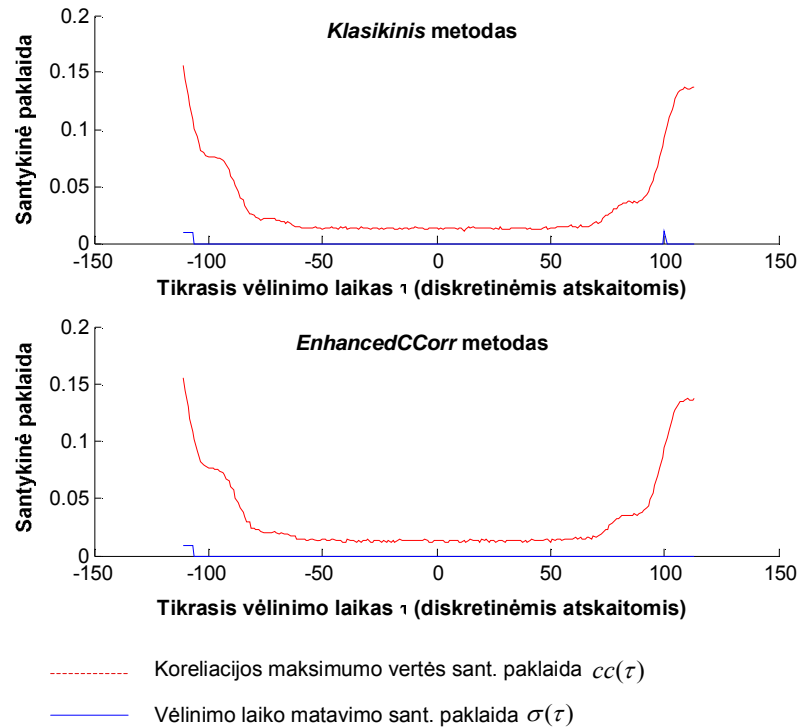
Atlikus algoritmų vykdymo spartos eksperimentinius tyrimus, buvo nustatyta, kad tik Texas Instruments TMS320C6711 platforma tenkina šiame darbe realiojo laiko sistemai keliamus reikalavimus. Šis procesorius išmatuoja vieno sluoksnio storį per 140 us, todėl per vieną matavimo ciklą galima išmatuoti iki 8 sluoksnių struktūrą. Dėl šių priežasčių, matavimo algoritmų tikslumas eksperimentiškai buvo vertinamas tik TMS320C6711 platformoje. Be to eksperimentui buvo pasirinkti du kraštutiniai algoritmai: lėčiausias – klasikinis koreliacijos maksimumo skaičiavimas perrinkimu, ir greičiausias – pasiūlytas *EnhancedCCorr* algoritmas.

Pagal 3.2.2 skyriuje aprašytą tikslumo įvertinimo metodiką atliktų eksperimentų rezultatai pateikiami paveiksluose 31-36.

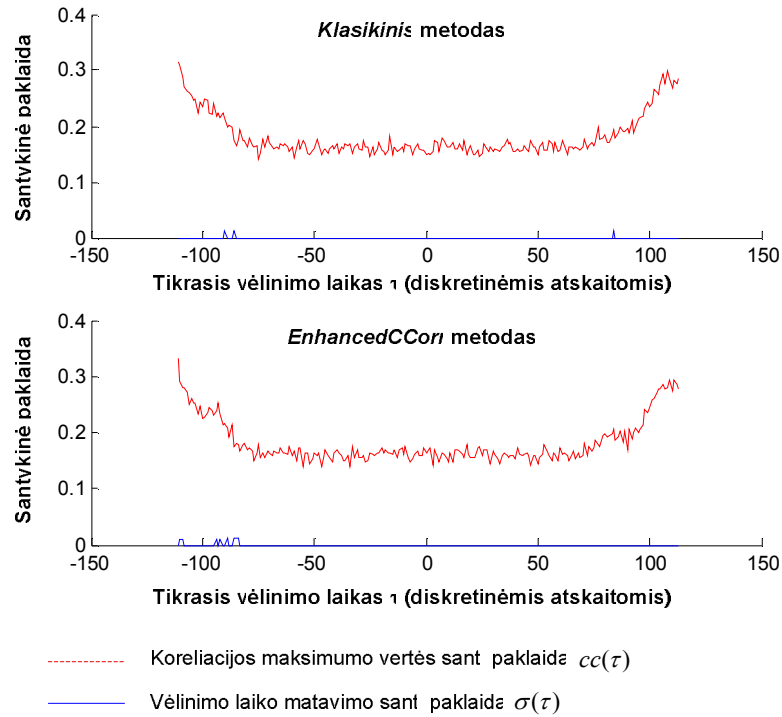


31 pav. Matavimo santykinų paklaidų priklausomybė nuo signalo vėlinimo laiko lange

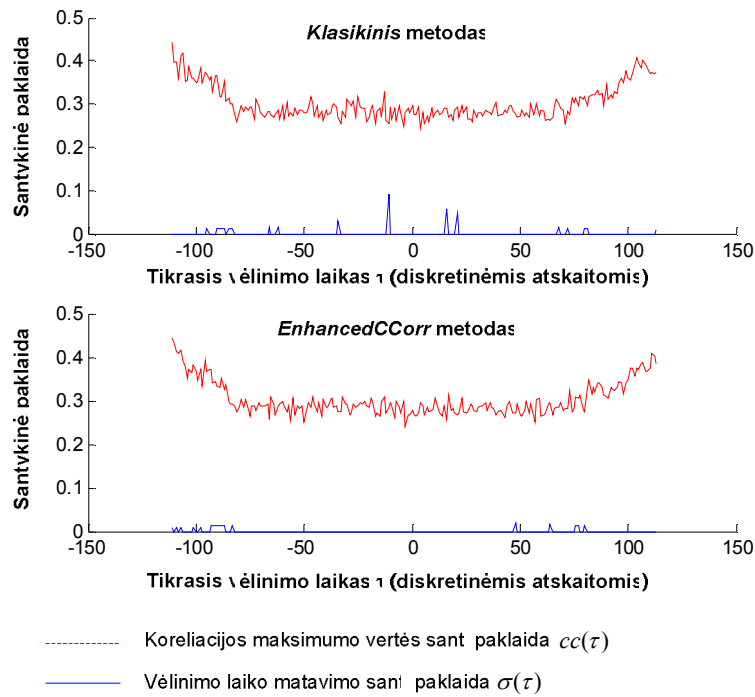
Kaip matyti 31 paveiksle santykinė vėlinimo laiko paklaida $\sigma(\tau)$ praktiškai nepriklauso nuo tikrojo signalo vėlinimo laiko. Tuo tarpu, kai didėja signalo vėlinimo laikas, santykinė koreliacijos maksimumo vertės paklaida $cc(\tau)$ auga iki 15%. Jeigu matuojamos medžiagos sluoksnių vėlinimo laikas svyruoja intervale $[-70; 70]$, koreliacijos maksimumo vertės paklaida praktiškai lygi 0.



32 pav. Matavimo santykinų paklaidų priklausomybė nuo signalo vėlinimo laiko lange, kai triukšmo ir signalo santykis=0.1



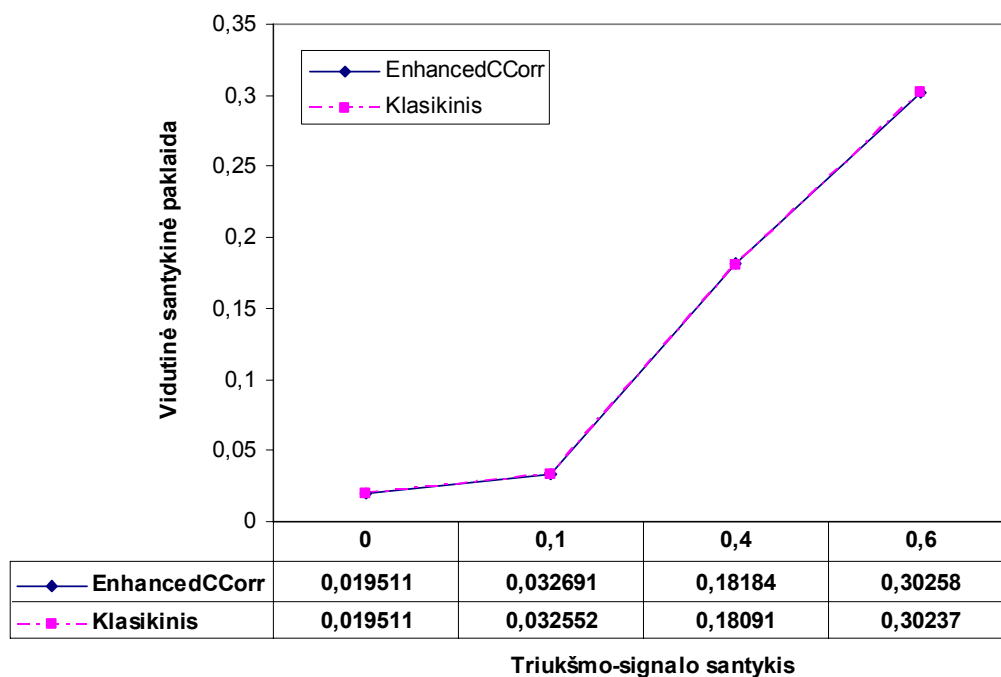
33 pav. Matavimo santykinų paklaidų priklausomybė nuo signalo vėlinimo laiko lange, kai triukšmo ir signalo santykis=0.4



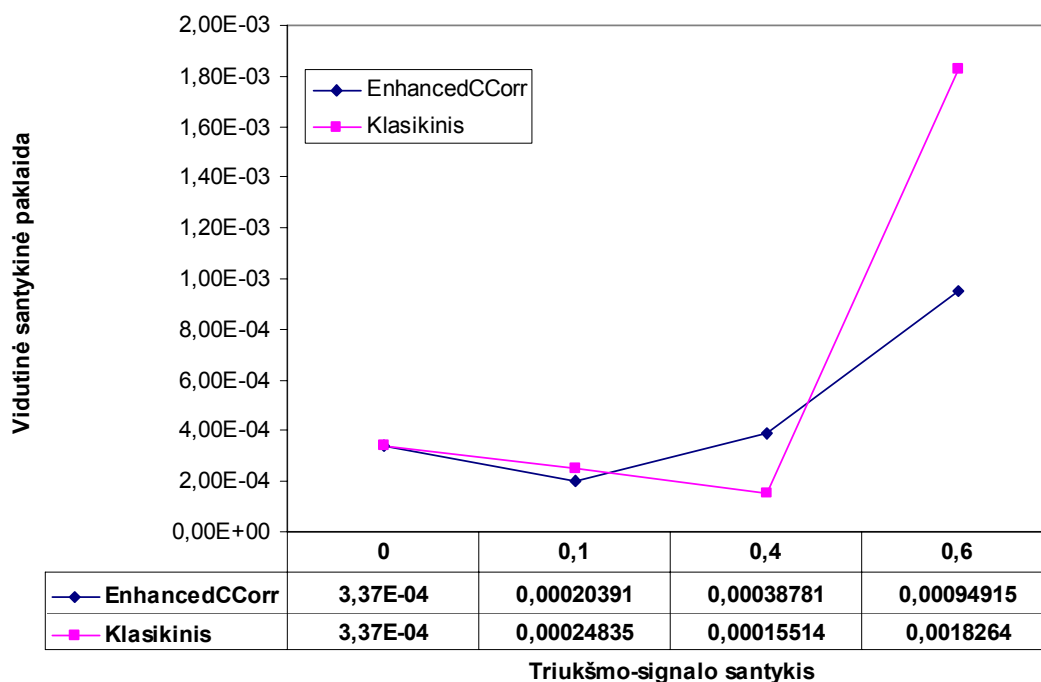
34 pav. Matavimo santykinų paklaidų priklausomybė nuo signalo vėlinimo laiko lange, kai triukšmo ir signalo santykis=0.6

Paveiksluose 32, 33, 34 pateiktos santykinių matavimo paklaidų priklausomybės nuo signalo vėlinimo laiko, kai matuojamas signalas yra su skirtingo lygio (0.1, 0.4, 0.6) baltais triukšmais. Iš eksperimentinių rezultatų matyti, kad gaunamos mažiausios paklaidos, kai matuojamos medžiagos sluoksnių vėlinimo laikas yra intervale [-70; 70].

Paveiksluose 35, 36 pateiktos vidutinių santykinių matavimo paklaidų priklausomybės nuo triukšmo signalo lygio.



35 pav. Vėlinimo laiko matavimo vidutinės santykinės paklaidos priklausomybė nuo triukšmo ir signalo santykio



36 pav. Koreliacijos maksimumo vertės vidutinės santykinės paklaidos priklausomybė nuo triukšmo ir signalo santykio

Paveiksle 35 matyti, kad augant triukšmo-signalų santykiui, didėja ir vidutinė santykinė koreliacijos maksimumo vertės paklaida. Ši paklaida įgyja maksimalę vertę 0.303, kai triukšmo-signalų santykis yra 0.6. Koreliacijos maksimumo vertė neįeina į sluoksnio storio skaičiavimo išraišką (2), todėl ji neturi įtakos sluoksnio storio matavimo tikslumui. Tačiau šios paklaidos dydis lemia slenkstinio koreliacijos vertės parametro reikšmės viršutinę ribą (ne daugiau 0.69), kuri naudojama langų paieškos ir matavimo algoritmuose.

Pirmos tikslumo klasės matavimo prietaisams didžiausia leidžiama santykinė paklaida yra 0.1%. Paveiksle 36 matyti, kad *EnhancedCCorr* algoritmo vidutinė santykinė vėlinimo laiko matavimo paklaida yra labai maža – nesiekia 0.04%.

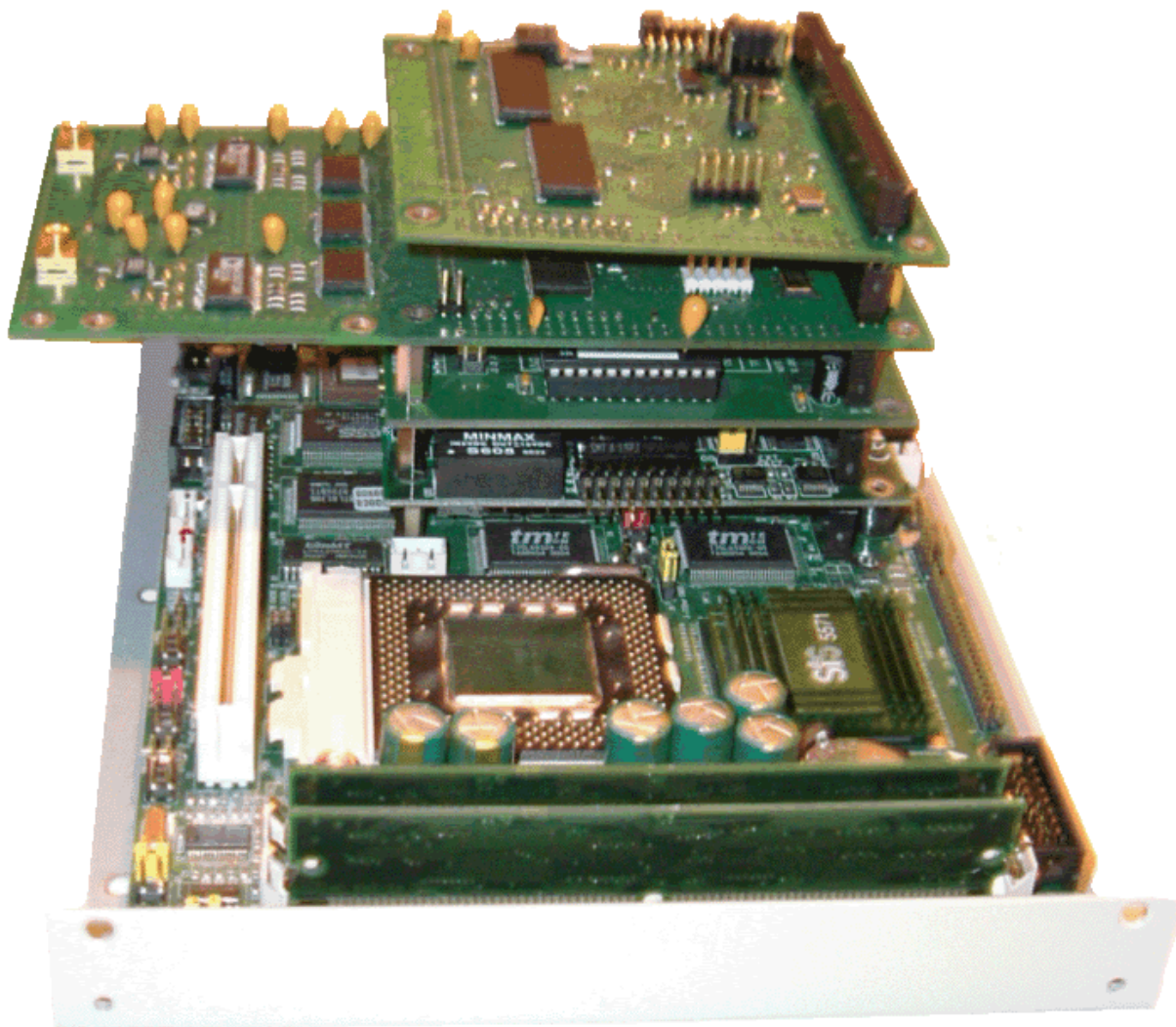
Išvada: atlikus algoritmų spartos eksperimentinius tyrimus, buvo nustatyta, kad pasiūlytas *EnhancedCCorr* metodas yra efektyviausias vykdymo laiko atžvilgiu. Išsamūs algoritmų matavimo tikslumo tyrimai parodė, kad *EnhancedCCorr* metodas savo tikslumu nenusileidžia klasikiniams koreliacijos skaičiavimo metodams, o tam tikrais atvejais net juos lenkia. *EnhancedCCorr* metodas yra atsparus triukšmams ir efektyviausiai dirba, kai matuojamo signalo vėlinimo laikas atskaitomis svyruoja intervale [-70;70], o triukšmo ir signalo santykis neviršija 0.4. *EnhancedCCorr* metodas yra tinkamas pirmos tikslumo klasės daugiasluoksnės medžiagos struktūros matavimams kurti.

3.3. Ultragarstinės NKS sistemos praktinė realizacija

Šio darbo rezultatai buvo panaudoti kuriant seriją praktinių sistemų, kurios buvo realizuotos Kompiuterių katedros Signalų apdorojimo laboratorijoje ir K. Baršausko Ultragarso mokslo institute. Šiame skyriuje aprašoma praktinė ultragarstinės NKS signalų apdorojimo sistemos realizacija, kuri buvo įdiegta užsienio kompanijoje Plast Adviser.

Sukurta signalų apdorojimo sistema (pav. 37) susideda iš šių komponentų:

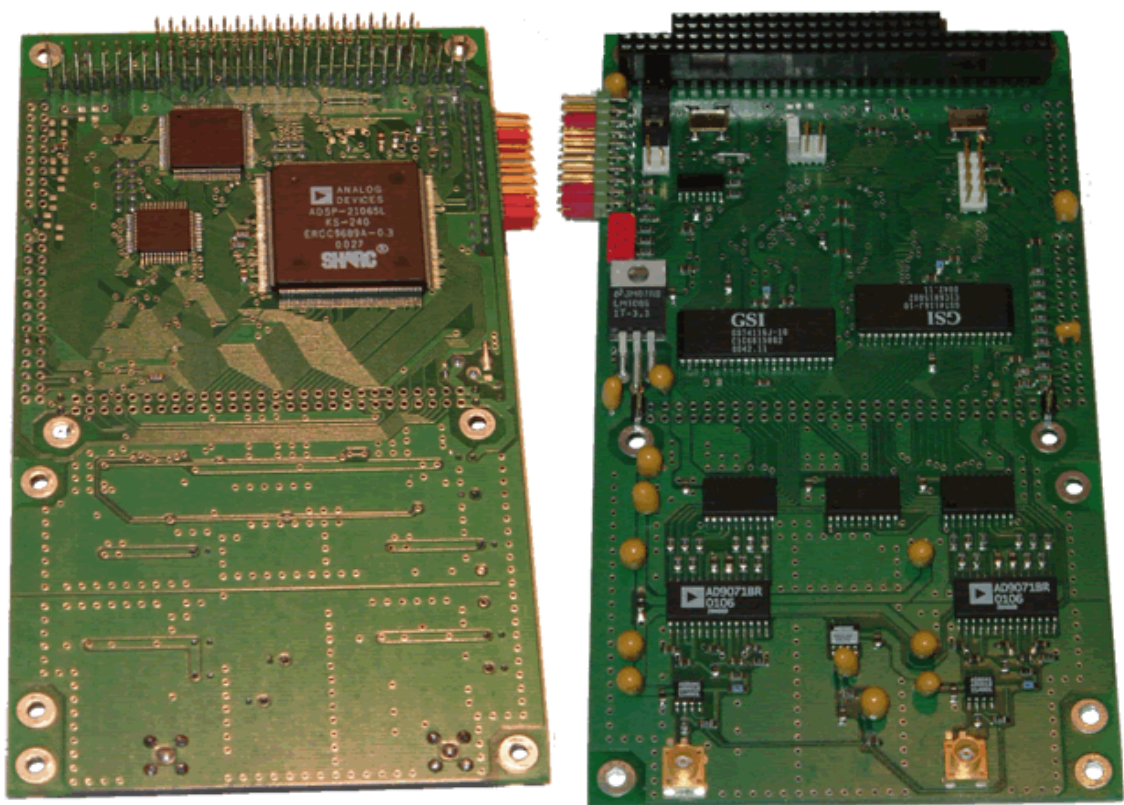
- industrinio kompiuterio su PC104 standarto magistrale
- PC104 flash atmintinės modulio
- PC104 signalų apdorojimo procesoriaus ir dviejų kanalų analogas/kodas keitiklių modulio
- PC104 signalų apdorojimo modulio



37 pav. Realiojo laiko sluoksnių storio matavimo proceso valdymo ir signalų apdorojimo blokas

Pagrindinės sistemos charakteristikos:

- sistemos matavimo ciklas - 1 ms, matuojamų sluoksnių kiekis - 4
- industrinis slankaus taško Analog Devices signalų apdorojimo procesorius ADSP-21065L
- vidinis instrukcijos ciklas - 15.6 ns
- prieigos prie išorinės magistralės ciklas - 31 ns
- aukštos kokybės ir didelės spartos duomenų įvedimo blokas: du 100 MSPS po 12 skilčių keitikliai su DMA kanalu
- dvikanalis 2x512KB statinės atmintinės modulis
- sparti vietinė sistemos mini-magistralė
- industrinė PC104 magistralė
- didelės spartos nuosekli sąsaja
- dvikryptis 6 bitų konfigūruojamas portas



38 pav. Skaitmeninio signalų apdorojimo procesoriaus ir duomenų įvedimo modulis

Šios sistemos signalų apdorojimo modulyje buvo įdiegti šiame darbe sukurti *EnhancedCCorr* ir langų paieškos algoritmai, kurie sudaro galimybę matuoti iki 4 sluoksnių medžiagos struktūrą.

IŠVADOS

Darbe atliktas medžiagų sluoksnių struktūros nustatymo ir sluoksnių storių skaičiavimo sistemos sudarymas ir tyrimas. Darbe gauti rezultatai:

1. Atlikus žinomų metodų analizę, nustatyta, kad šiuose metoduose priklausomybė tarp parametrų ir signalų erdvės yra netiesinė, nėra vienareikšmio sprendinio, todėl reikia spręsti daugiadimensinio optimizavimo uždavinį ir jam išspręsti naudojami iteraciniai algoritmai, pasižymintys lėtu konvergavimo greičiu, dėl to šie algoritmai netinkami realizuoti kritines realiojo laiko sistemas.
2. Nustatyta, kad klasikiniai koreliaciniai metodai reikalauja imlių skaičiavimų ir dirba lėtai.
3. Nustatyta, kad iteraciniai metodai naudojami žinomose sistemose yra netinkami realaus laiko medžiagų sluoksnių struktūrų nustatymo ir sluoksnių storio matavimo sistemų kūrimui.
4. Darbe pasiūlytas ir sudarytas zonduojančio ir atsispindėjusio signalų sklidimo matematinis modelis, kurio pagrindu sudaryta koreliacijos taikymo dalimis metodika medžiagos struktūros sluoksnių nustatymui.
5. Sukurtas sluoksnių nustatymo slenkančio lango paieškos metodas ir algoritmas, kuris skiriasi nuo žinomų metodų ir algoritmų tuo, kad jam reikia dvigubai mažiau parametrų, langų paieška yra tikslesnė, šis algoritmas nustato daugkartinius atspindžius ir juos efektyviai pašalina.
6. Darbe sukurtas koreliacijos funkcijos maksimumo paieškos globalaus optimizavimo metodas ir algoritmas, kuris lyginant su klasikiniiais metodais pasižymi didesne skaičiavimo sparta ir paprasta realizacija.
7. Atlikta praktinė klasikinių ir darbe pasiūlytų metodų bei algoritmų realizacija, pasiūlyta eksperimentinio tyrimo metodika, parinktos skirtingų architektūrų priemonės, sudaryti spartos ir tikslumo matavimo metodai, kurių pagrindu realizuotos matavimo programos, penkioms platformoms.
8. Atlikus algoritmų spartos eksperimentinius tyrimus, nustatyta, kad pasiūlytas koreliacijos funkcijos maksimumo paieškos *EnhancedCCorr* metodas yra efektyviausias vykdymo laiko atžvilgiu. Išsamūs algoritmų matavimo tikslumo tyrimai parodė, kad metodas *EnhancedCCorr* savo tikslumu nenusileidžia klasikiniams koreliacijos skaičiavimo metodams, o tam tikrais atvejais net juos lenkia. Metodas *EnhancedCCorr* yra atsparus triukšmams ir efektyviausiai dirba, kai matuojamo signalo vėlinimo laikas atskaitomis svyruoja intervale $[-70;70]$, o triukšmo ir signalo santykis neviršija 0.4. Metodas *EnhancedCCorr* yra tinkamas pirmos tikslumo klasės daugiasluoksnių medžiagų struktūrų matuokliams kurti.

9. Tyrimų rezultatai paskelbti 4 straipsniuose (2 užsienio leidiniuose), pristatyti pranešimuose tarptautinėje konferencijoje GSPx 2004 JAV, doktorantų ir magistrantų konferencijoje, 2005 m. Šio darbo rezultatai buvo panaudoti kuriant praktines ultragarsines neardančiosios kontrolės sistemas, kurios buvo realizuotos Kompiuterių katedros Signalų apdorojimo laboratorijoje ir K. Baršausko Ultragarso mokslo institute. Sukurtos sistemos perduotos ir įdiegtos užsienio kompanijose Flonidan GAS Division, ir Plast Adviser Inc.

LITERATŪRA

- [1] **Kurihara Y., Makazawa K., Ohashi K., Momeo S., and Numazaki K.** Development of Multi-Layer Plastic Fuel Tanks for Nissan Research Vehicle – II. *SAE Technical Paper Series*, vol. 0148-7191, 1987, p. 100-112.
- [2] **Fukuhara K., Hara M., Matsuura N., and Watanabe H.** Development of Plastic Fuel Tank Using Modified Multi-Layer Blow Molding *SAE Technical Paper Series*, 1990.
- [3] **Knights M.** On-line PET Bottle Thickness Gauging Brings Responsive Process Control. *Plastic Technology*, 2001, p. 32-33.
- [4] **Nulman N., Mozarkewich G., Khaykin B.** Ultrasonic Thickness Gauge for Multi-layer Plastic Fuel Tanks. *Proc. ANTEC '99*, 1999, p. 1017-1019.
- [5] **Leisk G.G., and Saigal A.** Digital Computer Algorithms to Calculate Ultrasonic Wave Speeds. *Materials Evaluation*, 1996, p. 840-843.
- [6] **Takeshita S., Taki S., and Matsushige K.** Applications of two-dimensional spectroscopy to nondestructive inspection. *Materials Evaluation*, 1990, p.1473-1479.
- [7] **Croce R., Calmon P. and Paradis L.** Modeling of propagation and echo formation in a multilayered structure. *Ultrasonics*, vol. 38, 2000, p. 537-541.
- [8] **Zala C.A.** High Resolution Inversion of Ultrasonic Traces. *IEEE Trans. Ultras., Ferroel. Freq. Control*, vol. 39, n. 4, 1992, p. 458-463.
- [9] **Schmerr L.W., Jr.** Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation. A Modeling Approach. *Plenum Press*, NY, 1998.
- [10] **Zhu C. and Kinra V.K.** A Time-Domain technique for Ultrasonic NDE of Thin Layered Media. *Review of Progress in QNDE*, vol. 13, 1994, p. 165-172
- [11] **Demirli R. and Saniie J.** Model-Based Estimation of Ultrasonic Echoes Part I: Analysis and Algorithms. *IEEE Trans. Ultras., Ferroel. Freq. Control*, vol. 48, n. 3, 2001, p. 787-811.
- [12] **Abbate A.** Ultrasonic signal processing algorithms for the characterization of thin multilayers. Prieiga per internetą: <http://www.ndt.net/article/ecndt02/176/176.htm>. [2005-03-09]
- [13] **Freemantle R. J., Challis R. E., White J.D.H.** A z-transform technique for thin-layer reverberation cancellation applied to ultrasonic NDT of adhered structures. *Advanced Techniques for Collection and Interpretation of NDT Data (Digest No. 1994/102)*.
- [14] **Nelder J. A. and Mead R.** A simplex method for function minimization. *Computer J.*, vol. 7, p. 308-313, 1967.

- [15] **Chong K. P. and Zak S. H.** An Introduction to Optimization. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [16] **Demirli R. and Saniie J.** Modeling and parameter estimation of ultrasonic backscattered echoes. *Rev. Progress Quantitative Nondestructive Eval. Conf. Proc.*, vol. 15, 1995.
- [17] **Kayl S. M.** Fundamentals of Statistical Signal Processing. *Prentice Hall*, 1993.
- [18] **Lazaro J. C.** Noise Reduction in Ultrasonic NDT using Discrete Wavelet Transform Processing. *2002 IEEE Ultrasonics Symposium, 2002*, p. 777-780.
- [19] **Kazanavičius E., Mikuckas A., Mikuckienė I., Kazanavičius V.** Noisy signal processing in real time DSP systems. *Ultragarsas. ISSN 1392-2114. 2003, nr. 1(46), p. 31-36*
- [20] **Kazanavičius E.** Signalų apdorojimo sistemos. *Kunas. Technologija*, 2004.
- [21] **Kazanavičius E., Liutkevičius A., Dusevičius V., Kazanavičius V.** Real Time System Modeling and Analysis. *Ultragarsas. ISSN 1392-2114. 2004, nr. 2(51), p. 49-54*
- [22] **Cornwell, T. J.** Can CLEAN be Improved? VLA Scientific Memorandum No. 141, March 1982.
- [23] **Narayan R. and Nityananda R.** Maximum Entropy Restoration in Astronomy. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 24, p. 127-170, 1986.
- [24] **Freemantle R. J., Challis R. E., White J.D.H.** A z-transform technique for thin-layer reverberation cancellation applied to ultrasonic NDT of adhered structures. *Advanced Techniques for Collection and Interpretation of NDT Data (Digest No. 1994/102)*.
- [25] **Freemantle R. J., Challis R. E.** Ultrasonic compression wave NDT of adhesively bonded automotive structures. *NDTnet - May 1997, Vol.2 No.05*
- [26] **Kazanavičius E., Venteris R.** Implementation of DSP algorithms for ultrasonic measurement applications. *Ultragarsas Nr. 2(32). 1999, p. 32-35*
- [27] **Cohn H., Fielding M.** Simulated annealing: Searching for an optimal temperature schedule. *SIAM J. Optim.*, 9:779-802, 1999.
- [28] **Diaconis P.** Bayesian numerical analysis. *Statistical Decision Theory and Related Topics*, pages 163-175. Springer Verlag, 1988.
- [29] **Mockus, J.** A Set of Examples of Global and Discrete Optimization: Application of Bayesian Heuristic Approach. *Kluwer Academic Publishers. ISBN 0-7923-6359-0*.
- [30] Prieiga per internetą: <http://www.compulab.co.il/armcore-gx.htm> [2005-03-09]
- [31] Prieiga per internetą: <http://www.bdti.com/procsum/pxa255.htm> [2005-03-09]
- [32] Prieiga per internetą: <http://www.analog.com/en/epHSPProd/0,,BF533-STAMP,00.html> [2005-03-09]