



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Mykolas KALINAUSKAS

SIGNALŲ APDOROJIMAS GARSO PLOKŠTĖSE
SIGNAL PROCESSING OF THE SOUND CARDS

Magistro baigiamasis darbas

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis
Kompiuterių inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 62401T211
Kompiuterių technologijų specializacija

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Kompiuterių inžinerijos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-....-....

Elektronikos inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Signalų apdorojimas garso plokštėse**

Autorius **Mykolas Kalinauskas**

Vadovas doc. dr. **Vacius Mališauskas**

Kalba

☒ X

lietuvių



užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamas signalų apdorojimas kompiuterių garso plokštėse (KGP). Darbo tikslas – ištirti signalų apdorojimo metodus ir procesus naudojamus KGP. Gautus tyrimo rezultatus panaudoti tobulinant kompiuterių garso plokštes.

Darbe atlikta kompiuterių garso plokštėse apdorojamų garso signalų tipų apžvalga. Ištirti dažnių moduliavimo ir bangų lentelių sintezės metodai. Atliktas KGP procesorių ir filtrų bei signalų apdorojimo juose tyrimas. Nustatyti KGP elementai, ribojantys polifoniją ir garso efektų skaičių. Atliktas eksperimentinis tiesioginės skaitmeninės sintezės (TSS) tyrimas bei kompiuterinis signalų apdorojimo procesų ir garso efektų modeliavimas. Pasiūlyta kartu su jau naudojamais sintezės metodais papildomai naudoti TSS metodą.

Darbą sudaro 10 pagrindinių dalių: įvadas; KGP apdorojami garso signalai; garso signalų apdorojimas KGP; sintezavimas; KGP procesoriai ir filtrai, garso signalų apdorojimas juose; KGP elementų, ribojančių polifoniją ir garso efektų skaičių, nustatymas; garso signalų apdorojimo eksperimentinis tyrimas bei kompiuterinis modeliavimas; darbo rezultatų apibendrinimas ir išvados; pasiūlymai; literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 110 p. teksto be priedų, 86 iliustr., 13 lent., 56 bibliografiniai šaltiniai, 9 darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: garsas, signalas, apdorojimas, metodas, procesas, kompiuterio garso plokštė, KGP, sintezė, sintezatorius, procesorius, modeliavimas, garso efektai, filtras.

Vilniaus Gediminas technical university
Faculty of **Electronics**
Computer Engineering department

ISBN ISSN

Copies No.

Electronics Engineering study programme master's thesis.

Title: Signal processing of the sound cards

Author Mykolas Kalinauskas

Executive doc. dr. Vacius Mališauskas

Thesis language

☒ X

Lithuanian

☐

Foreign (English)

Annotation

The main purpose of the magister's degree work is the following: signal processing of the sound cards. The main purpose of the work is to research what methods and processes computer sound cards (CSC) uses for signal processing. Results of the work can be used for CSC upgrading.

The review of signal's types used in CSC is performed. Research of frequency modulation and wavetable synthesis methods is made. The research of CSC processors, filters and signal processing within them is made. CSC elements limiting number of polyphony and sound effect's are determined. Experimental direct digital synthesis (DDS) research and computer modeling of signal processing is made. Recommendation to use DDS method like supplement for CSC is made.

Structure: introduction; signal's types processed by CSC; signal processing of the sound cards; synthesis; CSC processors, filters and signal processing within them; determination of CSC elements limiting the number of polyphony and sound effect's; the experimental research of sound signal processing and computer modeling, work summation and conclusions; suggestions; references.

Thesis consist of: 110 p. text without extras, 86 pictures, 13 tables, 56 bibliographical entries, 9 appendixes.

Keywords: sound, signal, processing, method, process, computer sound card, CSC, synthesys, synthesizer, processor, modeling, sound effects, filter.

Turinys

ŽYMENYS IR SANTRUMPOS	6
1. ĮVADAS	8
2. KGP APDOROJAMI GARSO SIGNALAI	9
2.1. Analoginiai signalai	9
2.2. Skaitmeniniai signalai	11
2.3. Bangų lentelių signalai	13
3. GARSO SIGNALŲ APDOROJIMAS KGP	17
3.1. Keitimas iš analoginio į skaitmeninį signalą.....	17
3.1.1 Diskretizavimas.....	18
3.1.2 Kvantavimas. Kodavimas	20
3.2. Keitimas iš skaitmeninio į analoginį signalą.....	27
3.2.1 Filtravimas žemųjų dažnių analoginiu filtru	28
3.2.2. Interpoliavimas.....	29
4. SINTEZAVIMAS	34
4.1. Sintezavimas naudojant FM sintezatorius.....	35
4.2. Sintezavimas naudojant bangų lentelių sintezatorius.....	46
4.2.1. Signalų fragmentų pakartojimas	46
4.2.2. Signalų fragmentų paruošimas.....	49
4.3. MIDI sintezatorių ir KGP sąveika.....	52
5. KGP PROCESORIAI IR FILTRAI, GARSO SIGNALŲ APDOROJIMAS JUOSE	56
5.1. KGP procesorių tipai ir jų veikimas.....	57
5.2. Skaitmeniniai filtrai ir jų skaičiavimas	60
5.2.1. Signalų apdorojimas RIR filtrais ir jų skaičiavimas	60
5.2.2. Signalų apdorojimas BIR filtrais ir jų skaičiavimas	62
5.2.3. RIR ir BIR filtrų elementai bei jų funkcijos.....	64
6. KGP ELEMENTŲ, RIBOJANČIŲ POLIFONIJĄ IR GARSO EFEKTŲ SKAIČIŲ, NUSTATYMAS	66
6.1. Polifonija.....	66
6.2. Garso efektai	67
7. GARSO SIGNALŲ APDOROJIMO EKSPERIMENTINIS TYRIMAS BEI KOMPIUTERINIS MODELIAVIMAS	76
7.1. Tiesioginė skaitmeninė sintezė	76

7.2.	<i>Altera</i> maketas DE2, programos algoritmas ir garso signalų sintezės rezultatai.....	80
7.3.	Kompiuterinis garso signalų apdorojimo modeliavimas	86
7.3.1.	Procesų modeliavimas <i>Pure Data</i> programinėje terpėje	86
7.3.2.	Garso efektų modeliavimas <i>Matlab</i> programinėje terpėje.....	90
8.	DARBO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS IR IŠVADOS	101
9.	PASIŪLYMAI	104
	LITERATŪROS SĄRAŠAS	105
	BAIGIAMOJO DARBO PRIEDAI A–I	109
	Priedas A. Straipsnis tarptautinės studentų mokslinės konferencijos Telekomunikacijos ir elektronika 2010 medžiagoje.....	110
	Priedas B. Straipsnis studentų mokslinės konferencijos Telekomunikacijos ir elektronika 2011 medžiagoje	114
	Priedas C. Pranešimo XIII-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje 2010 medžiaga	118
	Priedas D. Pranešimo XIV-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje 2011 medžiaga	124
	Priedas E. Pranešimo tarptautinėje studentų mokslinėje konferencijoje Telekomunikacijos ir elektronika 2010 medžiaga	131
	Priedas F. Pranešimo studentų mokslinėje konferencijoje Telekomunikacijos ir elektronika 2011 medžiaga	137
	Priedas G. Pažymos ir diplomai.....	144
	Priedas H. Eksperimentiniam tyrimui sukurtos <i>Verilog</i> kalba programos kodas	148
	Priedas I. FM sintezavimo principo tyrimui sukurtos <i>Matlab</i> programos kodas	150

ŽYMENYS IR SANTRUMPOS

Žymuo/Santrumpa	Pilnas pavadinimas anglų kalba	Paaiškinimas lietuvių kalba
3D	<i>Three Dimensional</i>	Trimatis, erdvinis
ADSR	<i>Attack-Decay-Sustain-Release</i>	Signalų amplitudės moduliavimo procesas
ASK	–	Analogas-skaitmuo keitiklis
AWG	<i>Arbitrary Waveform Generator</i>	Parenkamos formos signalų generatorius
BIR	–	Begalinė impulsinė reakcija
CPU	<i>Central Processing Unit</i>	Centrinis procesorinis įrenginys
DDS	<i>Direct Digital Synthesis</i>	Tiesioginė skaitmeninė sintezė
DFT	–	Diskreti Furje transformacija
DN	–	Didelio našumo (pvz.: mikroprocesorius)
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>	Greitoji Furje transformacija
FIFO	<i>First In First Out</i>	Technologija, pagal kurią duomenys, pirmi patekę į eilę buferyje, pirmi iš jo ir išeis
FIR (liet. RIR)	<i>Finite Impulse Response</i>	Ribota impulsinė reakcija
FM	<i>Frequency Modulation</i>	Dažnių moduliavimas
FPGA (liet. LPLM)	<i>Field Programmable Gate Array</i>	Lauku programuojama loginė matrica
IR	–	Impulsinė reakcija
IrDA	<i>Infrared Data Association</i>	Infraraudonųjų duomenų asociacija (belaidžio ryšio standartas)
KGP	–	Kompiuterių garso plokštės
LFO	<i>Low-Frequency Oscillators</i>	Žemųjų dažnių generatorius
MAC	<i>Multiply-Accumulator</i>	Daugintuvas-akumuliatorius
MIDI	<i>Musical Instrument Digital Interface</i>	Muzikos instrumentų skaitmeninė sąsaja

MN	–	Mažo našumo (pvz.: mikroprocesorius)
MVKP	–	Mažiausia vidutinė kvadratinė paklaida
PAM	<i>Pulse Amplitude Modulation</i>	Impulsinis amplitudės moduliavimas
PCM (liet. IKM)	<i>Pulse Code Modulation</i>	Impulsinis kodinis moduliavimas
PSG	<i>Programmable Sound Generator</i>	Programuojamas garso generatorius
RLS	–	Realaus laiko sistema
SAK	–	Skaitmuo-analogas keitiklis
SDRAM	<i>Synchronous dynamic random-access memory</i>	Sinchroninė dinaminė atsitiktinės prieigos atmintis
SRAM	<i>Static random-access memory</i>	Statinė atsitiktinės prieigos atmintis
SSA	–	Skaitmeninių signalų apdorojimas
SSP	–	Skaitmeninių signalų procesorius
TSS	–	Tiesioginė skaitmeninė sintezė
USB	<i>Universal Serial Bus</i>	Universalioji nuoseklioji sąsaja/jungtis
VLIW	<i>Very Long Instruction Word</i>	Labai ilgos instrukcijos žodis
WT	<i>Wavetable</i>	Bangų lentelių (sintezatorius)

1. ĮVADAS

Magistro baigiamojo darbo **tema** – signalų apdorojimas garso plokštėse.

Magistro baigiamojo darbo **tikslas** – ištirti, sumodeliuoti ir patobulinti signalų apdorojimo kompiuterių garso plokštėse (KGP) metodus ir procesus.

Magistro baigiamojo darbo **aktualumas** – atlikus signalų apdorojimo kompiuterių garso plokštėse tyrimą, suformuluoti pasiūlymus garso signalų apdorojimo KGP metodams ir procesams patobulinti. Lietuvių kalba paruošti sistematizuotą ir išsamią informaciją, kurios kol kas nepakanka, apie apdorojimo metodus ir procesus.

Magistro baigiamojo darbo **problema** – išsamesnės informacijos apie kompiuterių garso plokštėse taikomus signalų apdorojimo metodus ir procesus stoka.

Magistro baigiamajame darbe **sprendžiami uždaviniai**: atlikti KGP apdorojamų garso signalų apžvalgą. Nustatyti metodus ir procesus, taikomus apdorojant garso signalus. Išnagrinėti signalų diskretizavimą, kvantavimą, kodavimą ir keitimą iš skaitmeninės formos į analoginę KGP keitikliuose. Ištirti signalų apdorojimą KGP procesoriuose ir sintezatoriuose. Išnagrinėti garso signalų apdorojimo procesus KGP filtruose. Nustatyti KGP elementus, ribojančius polifoniją ir garso efektų skaičių. Atlikti signalų apdorojimo metodų ir procesų KGP eksperimentinį tyrimą bei kompiuterinį modeliavimą. Suformuluoti pasiūlymus garso signalų apdorojimo KGP metodams ir procesams patobulinti.

Magistro baigiamojo darbo **rezultatai**: atlikta signalų apdorojimo metodų ir procesų, taikomų asmeninių kompiuterių garso plokštėse, analitinė apžvalga. Ištirtas KGP sintezatorių veikimas, išanalizuoti sintezatoriuose naudojami garso signalų sintezės metodai, atliktas jų tarpusavio palyginimas. Ištirtas KGP procesorių ir filtrų veikimas, išanalizuoti juose naudojami garso signalų apdorojimo metodai, atliktas jų tarpusavio palyginimas. Nustatyti KGP elementai, ribojantys polifoniją ir garso efektų skaičių. Atliktas signalų apdorojimo metodų ir procesų KGP eksperimentinis tyrimas bei kompiuterinis modeliavimas. Suformuluoti pasiūlymai garso signalų apdorojimo KGP metodams ir procesams patobulinti.

Magistro baigiamojo darbo **privalumai, trūkumai ir perspektyvos**: tyrimas leido sužinoti apie KGP taikomus signalų apdorojimo procesus, tačiau trūksta patikimos informacijos apie juos. Norint toliau tobulinti KGP, atliktas tyrimas leis tai atlikti greičiau ir korektiškiau.

2. KGP APDOROJAMI GARSO SIGNALAI

Elektroninė muzika – tai skaitmeniniai ir analoginiai garso signalai su jiems taikomais apdorojimo metodais ir procesais. Šiame skyriuje analizuojama signalų prigimtis, kaip kompiuterio garso plokštė „supranta“ ir interpretuoja joje apdorojamus garso signalus. Skyriuje apibūdinami analoginiai ir skaitmeniniai garso signalai, analizuojama, kaip jie gaunami KGP ir kuo skiriasi.

2.1. Analoginiai signalai

Sakant žodį „analoginis“ omenyje turima ryšio, analogijos tarp signalo perduodamų duomenų gretimais laiko momentais prasmė. Analoginis signalas yra tolidus, o skaitmeninis – diskretus. Pavyzdžiui, mikrofono įėjimo signalas yra oro slėgio pokyčiai, o išėjime gaunami analogiški elektrinio signalo pokyčiai [4, 17].

Analogija tarp fizikinių neelektrinių ir elektrinių reiškinių realizuojama jutiklių dėka. Pavyzdžiui, garsinė slėgio banga, pasiekusi mikrofono membraną, ją virpina ir mikrofono išėjime yra gaunamas elektrinis signalas. Šiame pavyzdyje jutiklis yra mikrofonas.

Kalbant apie analoginius signalus, dažniausiai omenyje turimas elektrinis signalas, nors mechaninės, hidraulinės, optinės ir kitos sistemos taip pat naudoja analoginius signalus. Moksle ir technikoje vietoje žodžio „savybė“ dažnai naudojamas žodis „parametras“. Parametras – tai tokia aplinkos savybė, kuri gali būti išmatuota ir išreikšta skaitine verte.

Pavyzdžiui, judėjimas yra fizikinis reiškinys, apibūdinamas tokiais parametrais, kaip greitis ir pagreitis. Jeigu signalu pasirinkti judėjimą (pastaba: šiame pavyzdyje negalvojama apie tai, ar idėja yra fiziškai realizuojama) ir jį apdoroti, galima gauti duomenis apie greitį ir pagreitį. Analizuojant tokiu būdu gautus duomenis, galima gauti informaciją apie judantį kūną. Dažniausiai pasirenkami signalai yra elektriniai reiškiniai – įtampa ir srovė. Šie analoginiai signalai turi eilę parametrų, kuriuos keičiant perduodami duomenys [4, 17]. Signalų teorijoje dažniausiai naudojami šie parametrai:

- Amplitudė – tai svyruojančio dydžio kitimo matas fizikoje, parodantis dydžio vertės pokytį svyravimų metu. Pavyzdžiui, garso bangos yra atmosferos slėgio svyravimai, garso bangų amplitudės yra proporcingos slėgio pokyčiui vieno svyravimo metu. Jei dydžio pokytis tam tikrame erdvės taške yra vaizduojamas grafiškai, kuomet kintantis dydis vaizduojamas vertikalioje ašyje, o

laikas horizontalioje ašyje, tuomet amplitudė bus vadinama maksimali sviravimo vertė vertikalioje ašyje.

- Periodas – tai vienodais laiko tarpais pasikartojančio proceso trukmė (trumpiausias laikas tarp pasikartojimų). Atvirkštinis dydis dažniui.

- Dažnis – tai fizikinis dydis, rodantis, kiek kartų įvykis pasikartoja per laiko vienetą. Norint apskaičiuoti įvykio dažnį, pasikartojimų skaičius per tam tikrą laiko tarpą dalinamas iš to laiko tarpo trukmės. SI sistemoje dažnis matuojamas hercais (Hz). 1 Hz – tai toks dažnis, kai per 1 sekundę įvyksta 1 svyravimas.

- Fazė – tai kampas, kurį sudaro fizikinį dydį kompleksinėje plokštumoje vaizduojantis vektorius su realiųjų skaičių ašimi. Kuomet kinta kampas tarp kompleksinio dydžio vektoriaus ir realiųjų skaičių ašies, tuomet kinta ir fizikinio dydžio fazė. Fazės sąvoką lengviau suvokti nagrinėjant elementarius pasikartojančius procesus, aprašomus paprastomis sinuso arba kosinuso funkcijomis. Šiuo atveju fazė yra periodinio vyksmo ciklo dalis, atitinkanti tam tikrą dydžio pokytį, įvykusį nuo proceso stebėjimo pradžios. Fazės sąvoka taip pat plačiai naudojama signalų analizėje, nagrinėjant dažnines signalų charakteristikas, gaunamas atlikus signalą aprašančio dydžio Furjė transformaciją.

Realūs garso signalai yra neperiodiniai ir artimi pagal prigimtį bei savybes atsitiktiniams signalams. Todėl jie apibūdinami statistiniais parametrais.

Bet koks realaus pasaulio reiškinyje gali būti signalų šaltiniu. Dauguma signalų, sutinkamų moksle ir technikoje, savo prigimtimi yra tolydūs, t. y., šie signalai yra tolydaus kintamojo funkcijos, kurios įgyja bet kokiais reikšmėmis iš realiųjų dydžių aibės.

Tokius signalus gali apdoroti tolydaus laiko sistema, kad būtų pakeistos jų charakteristikos ar gauta reikalinga informacija [4, 17, 55].

Signalų apdorojimas kompiuterių garso plokštėse apima tokius procesus:

- Signalų stiprinimas (angl. *signal enhancement*),
- Signalų išskyrimas (angl. *signal detection*),
- Duomenų iš signalų gavimas/„ištraukimas“ (angl. *data restoration*),
- Duomenų atkūrimas (angl. *data reconstruction*).

Visi į imtuvą, mūsų atveju kompiuterio garso plokštę, patenkantys signalai stiprinami ir analizuojami, stengiantis gauti signale užkoduotus duomenis. Dėl aplinkos (ryšio kanalo), kuria perduodamas signalas, įtakos, dalis duomenų prarandama arba iškraipoma, todėl reikalingas duomenų prognozavimas bei atkūrimas.

Elektrinių analoginių signalų apdorojimui naudojami tokie elektriniai elementai kaip rezistorius, kondensatorius, indukcinė ritė ir visa eilė puslaidininkinių elementų – diodas, tranzistorius, operacinis stiprintuvas ir t. t. Jų veikimą galima aiškinti pasitelkiant nepriklausomus kintamuosius.

Nepriklausomu kintamuoju gali būti laikas, įtampa ar kitas dydis. Jungiant šiuos elementus, sudaromos elektrinės schemas, kurios realizuoja norimą signalo apdorojimo metodą ir procesą.

Pagrindinės matematinės operacijos, naudojamos kompiuterių garso plokštėse analoginiams signalams apdoroti, yra šios:

- Sudėtis/atimtis,
- Daugyba/dalyba,
- Logaritmavimas/antilogaritmavimas,
- Diferencijavimas/integravimas.

Tokiu būdu šiame poskyryje apžvelgta analoginių signalų prigimtis, jų savybės, nurodyti pagrindiniai procesai ir matematinės operacijos, naudojami jiems apdoroti.

2.2. Skaitmeniniai signalai

Skaitmeniniai signalai yra kvantuoti pagal amplitudę ir atskaitomi diskretiniais laiko momentais. Jie gaunami iš analoginių signalų analoginiu-skaitmeniniu keitikliu (ASK), juos kvantuojant pagal amplitudę ir diskretizuojant pagal laiką. Kartais jie vadinami diskretaus laiko ir diskretinės amplitudės signalais.

Diskretaus laiko signalai yra apibrėžti tik tam tikrais diskretiniais laiko momentais. Jie gali būti gauti iš analoginių signalų, atskaitant jų reikšmes diskretizacijos žingsniu. Iš esmės diskretinis signalas yra skaičių seka ir jos n -toji atskaita, kaip ir pati seka, žymima simboliu $x[n]$. Tokio signalo pavyzdys gali būti reguliarus temperatūros stebėjimas (kas valandą, parą) metrologinėje tarnyboje.

Skaitmeninių signalų apdorojimas turi eilę privalumų, palyginus su analoginių signalų apdorojimu. Iš tokių privalumų galima paminėti šiuos: skaitmeniniai signalai nejautrūs senėjimo procesui, maitinimo įtampos ar temperatūros svyravimams; lengvai programuojami

kompiuterinėmis programomis – apdorojami algoritmais, kurie lengvai keičiami, keičiant programinės įrangos kodą.

Daugelyje sričių dažniau naudojami ir apdorojami skaitmeniniai signalai, o analoginių signalų apdorojimas gali atrodyti jau pasenęs. Tačiau analoginės technikos projektuotojai ir šiandien yra labai paklausūs. Kodėl? Nors daug signalų apdorojimo funkcijų galima realizuoti skaitmeniniu būdu, tačiau toli gražu ne visas [4].

Keičiant analoginius signalus skaitmeniniais, susiduriama su dažnių persidengimo problema, kai, netinkamai pasirinkus diskretizavimo dažnį, atkuriant signalą jo dažniai persidengia ir signalas yra iškraipomas. Keičiant skaitinių reikšmių seką į analoginį signalą, keitiklio kodas-analogas išėjime gaunamas ne tolydus, o „laiptuotas“ analoginis signalas, kurio dažnių spektras yra labai platus, todėl skaitmeninių signalų keitimui į analoginius reikalingas „laiptuotų“ analoginių signalų aukštųjų dažnių filtravimas [4].

Ir vis tik, ar įmanoma tinkama tolydaus laiko signalo analizė, kai jis keičiamas į diskretų, kvantuotą signalą? Į šiuos klausimus atsako skaitmeninio signalų apdorojimo teorija.

Diskretaus laiko sistema – tai bet kokia sistema, kuri diskretų įėjimo signalą paverčia diskrečiu išėjimo signalu.

Pagrindinių sąvokų, sutinkamų skaitmeninio signalų apdorojimo srityje, apibrėžimai:

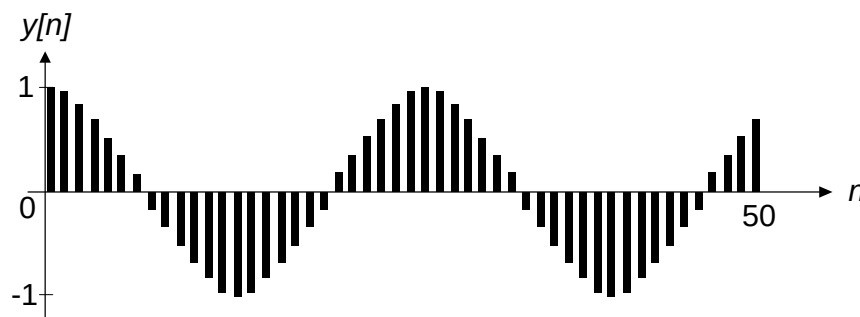
- skaitmeninis signalų apdorojimas yra realaus pasaulio signalų (vaizduojamų skaičių seka) apdorojimas, taikant matematinius metodus, siekiant gauti informaciją arba pakeisti signalų charakteristikas.
- skaitmeninis signalų procesorius (SSP) – tai sistema ar įrenginys, atliekantis skaitmeninio signalų apdorojimo funkcijas.
- realaus laiko signalų apdorojimas – tai toks apdorojimas, kai einamosios įėjimo signalo reikšmės apdorojimo rezultatas išėjime gaunamas iki pasirodant kitai įėjimo signalo reikšmei.
- signalų apdorojimas nerealiu laiku yra toks apdorojimas, kai įėjimo signalų reikšmės kaupiamos, o po to apdorojamos.

Elektronikoje analoginiai signalai apdorojami elektroniniais įrenginiais, pvz.: KGP, kurių atliekamos funkcijos aprašomos diferencialinėmis lygtimis. Pavyzdžiui, bet kuri elektrinė schema, sudaryta iš rezistorių, kondensatorių ir indukcinų ričių, gali būti ištirta taikant grandinių teoriją ir aprašyta diferencialinėmis lygtimis. Tokioje sistemoje, sprendžiant sudarytas diferencialines lygtis, randamos srovės ir įtampos. Skaitmeniniai signalai apdorojami diskrečiojo laiko sistemomis [4].

Kompiuterių garso plokštėse skaitmeninis garso signalų apdorojimas – analizė ir/arba sintezė atliekami apdorojant skaitmeninius garso signalus. Diskretaus laiko signalą galima pateikti kaip analoginio signalo atskaitų seką:

$$x[n-1], x[n], x[n+1], \dots \quad (2.1)$$

Čia n pavadinkime atskaitos numeriu, kuris gali turėti visų sveikų skaičių vertes – tai diskretusis dydis, pvz.: 1, 2, 3, ..., m . Toliau 2.1 pav. parodytas sinusoidės formos signalas, sudarytas iš penkiasdešimties atskaitų.



2.1 pav. Sinuso formos signalas, sudarytas iš 50 atskaitų

KGP sinusiniai signalai yra labai svarbūs garso signalų apdorojimui. Perstumiant vieną iš jų į kairę arba dešinę ordinačių ašies pusę, gaunama kita sinusoidė.

Beveik visa įranga, apdorojanti skaitmeninius garso signalus, pvz.: KGP, veikia tik esant ribotam verčių diapazonui. Pasirinkime, kad šis diapazonas yra nuo -1 iki 1 . Šiuolaikinė skaitmeninė garso apdorojimo programinė įranga naudoja reikšmes po kablelio. Toks signalo atvaizdavimas leistinas, kol apdorojamų signalų atskaitų vertės neviršija aparatinės įrangos leistino ir „suprantamo“ verčių diapazono.

2.3. Bangų lentelių signalai

Ankstesniame poskyryje garso signalai buvo traktuojami tik kaip analoginiai arba, tik kaip skaitmeniniai (diskretaus laiko).

Diskretizavimo dažnis nėra garso signalo kokybės rodiklis. Jis tik apibrėžia, koku dažniu atskiros diskretaus laiko signalo imtys perduodamos į ar iš kompiuterio.

Taigi diskretaus laiko garso signalas yra atskaitų seka. Šios atskaitos gali būti saugomos atmintyje, ir atkuriamos iš jos bet kokia eilės tvarka. Taip sukuriami nauji bangų lentelių signalai. Bangų lentelių garso signalai nėra naujos formos signalai, tai garso signalų atskaitų grupės, išsaugotos kompiuterio garso plokštės atmintyje lentelių pavidalų [14].

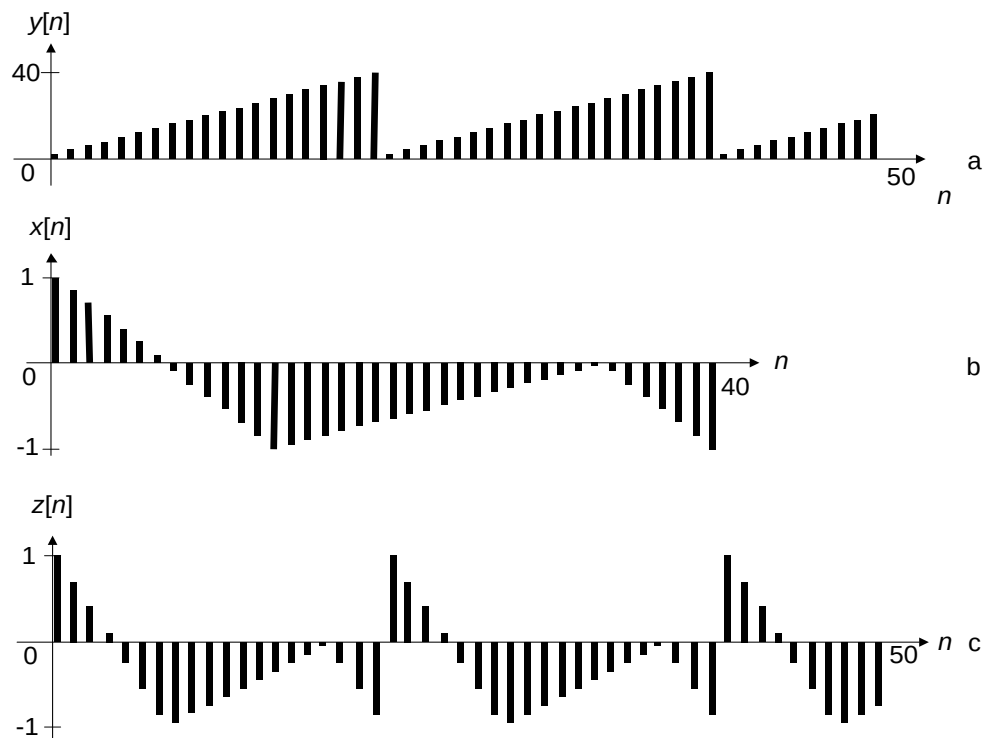
Tarkime, kad KGP atmintyje yra išsaugotas diskretaus laiko garso signalas, sudarytas iš atskaitų sekos $x[n]$, čia $n = 0, \dots, N-1$, o N yra atskaitos sekoje numeris.

Jei įėjime egzistuoja diskretaus laiko garso signalas $y[n]$, galima panaudoti jo atskaitų sekoje numerius, kaip indeksus norint gauti signalo $x[n]$ atskaitų sekoje numerius. 2.2 paveiksle pateikta operacija vadinama bangų lentelių paieška. Jos metu sukuriamas naujas diskretaus laiko garso signalas $z[n]$, kurį galima apskaičiuoti, panaudojus tokią išraišką:

$$z[n] = x[y[n]]. \quad (2.2)$$

Operacijos metu gali iškilti dvi problemos:

- Įėjimo signalo $y[n]$ atskaitų eilėje numeriai gali nepatekti į numatytą diapazoną $0, \dots, N-1$. Tokiu atveju negalima gauti signalo $x[n]$ atskaitų eilėje numerių ir signalas $z[n]$ bus neapibrėžtas.
- Įėjimo signalo $y[n]$ atskaitų eilėje numeriai turi būti sveikieji skaičiai.



2.2 pav. Bangų lentelių paieška: a – $y[n]$ įėjimo signalas, b – $x[n]$ signalas, c – $z[n]$ išėjimo signalas

2.2 paveiksle pateiktas bangų lentelių paieškos pavyzdys. Signalas $z[n]$ sukuriamas suspaudžiant $x[n]$ signalą į signalo $y[n]$ periodą, imant kas antrą jo atskaitą. Signalų $y[n]$ ir $x[n]$ diskretizavimo dažniai turi būti vienodi.

2.2 a pavaizduotas pjūklo formos įėjimo signalas $y[n]$. Šiuo atveju $y[n]$ signalo amplitudė kinta nuo 0 iki 40. Signalas $y[n]$ peržiūri signalo $x[n]$ imtis iš kairės į dešinę – nuo pradinės atskaitos 0 iki paskutinės 39. Procesas kartojasi 50 kartų. Signalo $y[n]$ periodas – dvidešimt atskaitų.

2.2 b paveikslo dalyje atvaizduota signalo $x[n]$ atskaitų seka, sudaryta iš 40 atskaitų, kurios yra sunumeruotos nuo 0 iki 39.

2.2 c paveiksle pateikiamas gautas naujas signalas $z[n]$, sukurtas signalų $x[n]$ ir $y[n]$. Kadangi pjūklo formos signalas $y[n]$ tiesiog perskaito $x[n]$ signalo turinį pastoviu dažniu, tai naujai sukurtas signalas bus periodinis, nors $x[n]$ signalas ir nėra periodinis. Signalo $z[n]$ forma gaunama iš $x[n]$ signalo, o dažnį nustato signalo $y[n]$ periodas.

Taigi kompiuterių garso plokštėse apdorojant garso signalus, dalyvauja abiejų rūšių – analoginiai ir skaitmeniniai signalai. Tačiau pagrindiniai procesai vykdomi su skaitmeniniais garso signalais.

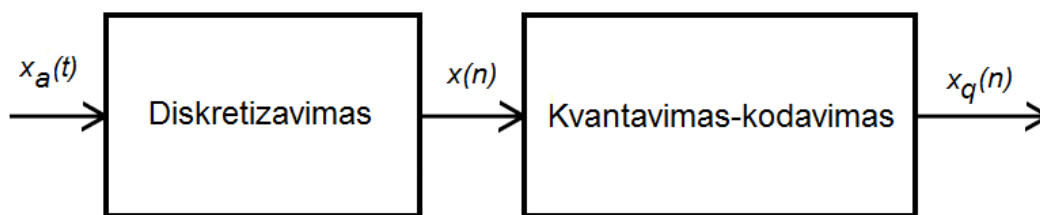
Skyriuje išanalizuota signalų prigimtis, išsiaiškinta, kaip kompiuterio garso plokštė „supranta“ ir interpretuoja joje apdorojamus garso signalus. Skyriuje apibūdinti analoginiai ir skaitmeniniai signalai, išanalizuota, kaip jie gaunami ir kuo skiriasi. Išanalizuota bangų lentelių signalų prigimtis, gavimo principai, išaiškintas bangų lentelių paieškos veikimas. Gautos žinios leidžia atlikti kompiuterių garso plokštėse naudojamų metodų ir procesų signalams apdoroti analizę, apie tai bus rašoma trečiajame skyriuje.

3. GARSO SIGNALŲ APDOROJIMAS KGP

Didėjant kompiuterinės įrangos naudojimui, didėja ir signalų apdorojimo reikalingumas bei svarba. Norint kompiuteriu apdoroti jam suprantamus signalus, analoginiai signalai turi būti verčiami skaitmeniniais, tam panaudojant ASK ir atvirkščiai skaitmeniniai signalai turi būti verčiami analoginiais, tam panaudojant SAK. Pagrindiniai du signalo vertimo iš analoginio į skaitmeninį procesai yra diskretizavimas, kvantavimas-kodavimas, o verčiant skaitmeninius signalus analoginiais taikomas filtravimas žemųjų dažnių filtru ir interpoliavimas [1, 19, 46 – 53].

3.1. Keitimas iš analoginio į skaitmeninį signalą

Keitimą iš analoginio į skaitmeninį signalą galima pavaizduoti kaip dviejų pakopų procesą, kuris schematiškai yra parodytas 3.1 paveiksle.



3.1 pav. Analogas-skaitmuo keitimo proceso schema

Diskretizavimas yra tolydaus laiko signalo keitimas į diskretaus laiko signalą, išrenkant atskaitas iš tolydaus laiko signalo diskrečiais laiko momentais. Periodinio (tolygaus) diskretizavimo atveju, jei $x_a(t)$ yra diskretizatoriaus įėjimo signalas, išėjime gaunamas signalas $x_a(nT) = x(n)$, kur T yra diskretizavimo intervalas [22, 46 – 53].

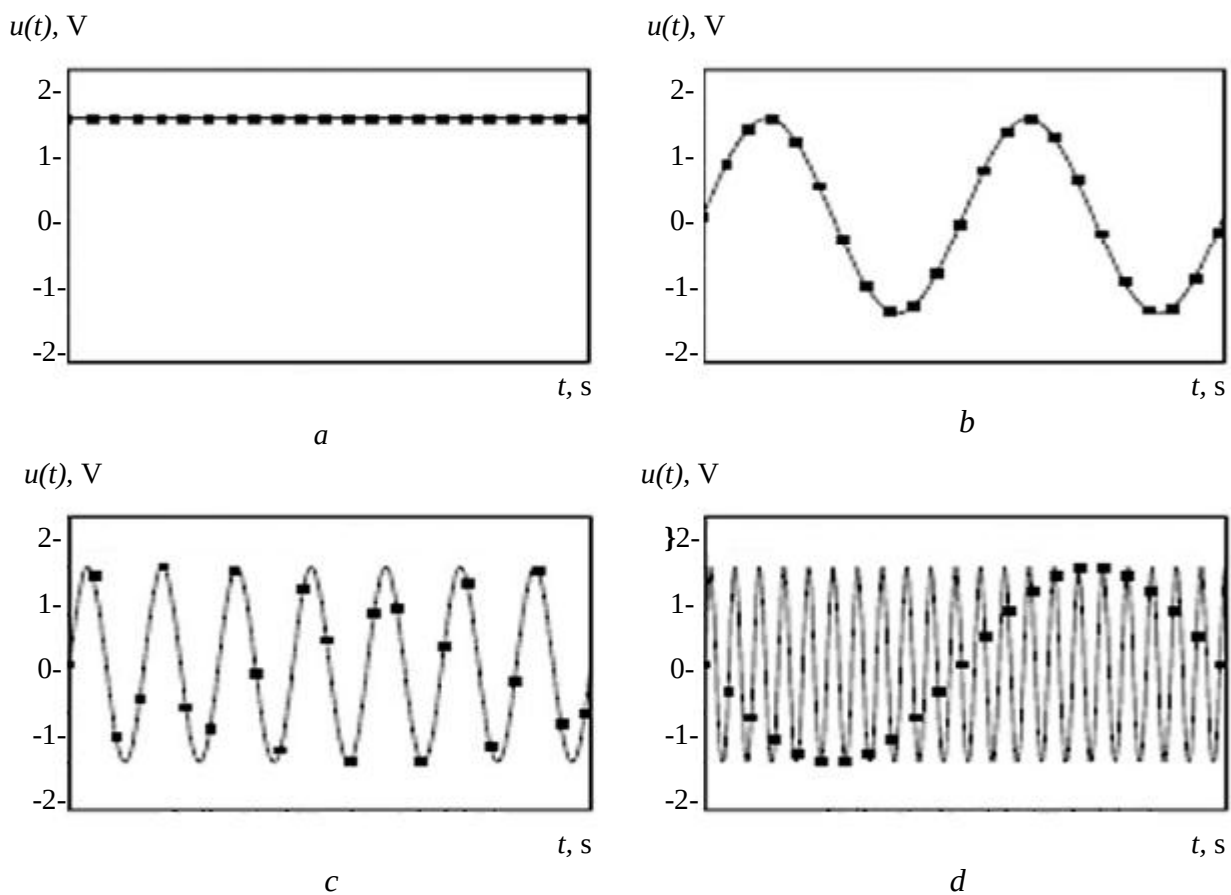
Kvantavimas-kodavimas yra diskretaus laiko su tolydžiom reikšmėm signalo pavertimas diskretaus laiko su diskrečiom reikšmėm (skaitmeniniu) signalu.

Kiekviena signalo atskaitos reikšmė yra pavaizduojama reikšme, parinkta iš baigtinės galimų reikšmių aibės. Kodavimo procese kiekviena diskreti reikšmė yra atvaizduojama n -bitų skaičiumi, kurį galime pažymėti $x_q(n)$. Skirtumas tarp nekvantuoto signalo $x(n)$ ir kvantuoto išėjimo signalo $x_q(n)$ yra vadinamas kvantavimo paklaida [1, 19].

3.1.1. Diskretizavimas

Panagrinėkime, kaip analoginis signalas diskretizuojamas prieš jį kvantuojant. Tarkime, diskretizuojamas analoginis signalas. Jeigu tą signalą galima tiksliai atstatyti iš diskrečių reikšmių, vadinasi diskretizavimas buvo atliktas tinkamai. Keli signalai parodyti 3.2 paveiksle prieš ir po keitimo į diskretųjį signalą. Ištinine linija paveiksle pavaizduotas analoginis signalas ASK įėjime, o stačiakampiais pavaizduotas diskretizuotas signalas, išeinantis iš keitiklio [7].

3.2 a paveiksle pavaizduota nulinio dažnio kosinusoidė. Šiuo atveju sinusoidė sudaryta iš sekos diskrečių atskaitų išdėstytų vienoje tiesėje, todėl ji turi visą informaciją, reikalingą jai visiškai tiksliai atkurti.



3.2 pav. Tinkamo (a, b, c) ir netinkamo (d) diskretizavimo dažnio parinkimo pavyzdžiai, $a - 0,0$ Hz kosinusoidė, $b - 0,09$ diskretizavimo dažnio sinusoidė, $c - 0,31$ diskretizavimo dažnio sinusoidė, $d - 0,95$ diskretizavimo dažnio sinusoidė

3.2 b paveiksle parodytas sinusinis signalas, kurio dažnis yra 0,09 diskretizavimo dažnio. Tai reiškia, kad per 90 sinusoidės periodų diskretizuojant bus atlikta 1000 atskaitų, arba, kitais žodžiais tariant, kiekvienam sinusoidės periodui tenka po 11,1 atskaitų. Šis atvejis sudėtingesnis,

nes sinusoidė negali būti atkurta paprasčiausiai brėžiant tiesę per atskaitų taškus. Ar galima atkurti sinusoidę iš gautų atskaitų? Taip, galima, nes nėra kitos sinusoidės ar jų sumos, kurių reikšmės tiksliai atitiktų diskrečias analizuojamos sinusoidės reikšmes. Šios diskrečios reikšmės atitinka tik tą vieną sinusoidę ir todėl ji gali būti atkurta [3].

3.2 c paveiksle pavaizduota situacija, kai per vieną sinusoidės periodą nustatomos 3,2 diskrečios reikšmės. Šios reikšmės tiek retos, kad sunkiai primena sinusoidės formą. Ar pakanka šių reikšmių atkurti sinusoidę? Taip ir dėl tos pačios priežasties, kaip ir prieš tai buvusiame pavyzdyje.

3.2 d paveiksle per vieną sinusoidės periodą gaunama 1,05 diskrečios reikšmės. Ar šį kartą pakanka duomenų, norint atkurti sinusoidę? Ne, nes tokią reikšmių seką turi ne tik analizuojama sinusoidė, bet ir kitos sinusoidės. Pavyzdžiui, analizuojamą 0,95 diskretizavimo dažnio sinusoidę atitinka ir 0,05 dažnio sinusoidė.

Vadinasi, tos pačios diskrečios reikšmės atitinka dvi skirtingų dažnių sinusoides: viena iš jų turi 0,95 dažnį, o kita – 0,05 diskretizavimo dažnį. Efektas, kai diskretizavimo metu gaunamas žemesnio dažnio signalas, nei originalus signalas, vadinamas dažnių persidengimu. Šiuo atveju diskretizuotas signalas nebeatitinka originalaus analoginio signalo ir jame nėra nieko, kas leistų daryti prielaidą, kad gautas skaitmeninis 0,05 diskretizavimo dažnio signalas iš tikrųjų yra 0,95 dažnio signalas. Vadinasi, pasirinktas diskretizavimo dažnis netinka.

Analoginis laiko signalas diskretizuojamas tinkamai, jeigu išlaikoma visa informacija, reikalinga to signalo atkūrimui. 3.2 paveiksluose a, b ir c parodytas tinkamas diskretizavimo dažnio parinkimas.

Kaip pasirinkti tinkamą diskretizavimo dažnį, nurodo diskretizavimo teorema. Ji dažniausiai vadinama Šenono arba Naikvisto teorema. Ši teorema sako, kad jeigu didžiausias analoginio signalo $x_a(t)$ dažnis, yra $F_{\max}$ ir signalas yra diskretizuotas dažniu $F_d > 2F_{\max}$, tada signalas $x_a(t)$ gali būti tiksliai atstatytas iš jo atskaitų reikšmių.

Iš šios teoremos seka išvada, kad diskretizuojamo signalo spektre negali būti dedamųjų, kurių dažnis didesnis nei pusė diskretizavimo dažnio [3].

Kai analoginį signalą sudarančios dedamosios užima dažnių juostą nuo nulio iki 0,5 diskretizavimo dažnio, tai diskretizuotame signale išlieka visos analoginio signalo komponentės. Kai analoginį signalą sudarančios komponentės užima platesnę dažnių juostą nei 0,5 diskretizavimo dažnio, tai reiškiny, vadinamas dažnių persidengimu, analoginio signalo komponentes, viršijančias 0,5 diskretizavimo dažnio, perkelia į juostą nuo nulio iki 0,5 diskretizavimo dažnio.

Be to, dažnių persidengimo reiškinys ne tik iškreipia atkuriamo signalo spektrą, bet ir pakeičia jo fazę per π , lyginant su diskretizuojamu signalu.

Detaliau panagrinėsime diskretizavimo operaciją ir dažnių persidengimo atsiradimą. Svarbiausia suprasti, kas atsitinka, kai analoginis signalas pakeičiamas diskrečiu, ir kaip gaunama vienareikšmė atitiktis tarp realaus analoginio signalo ir skaičių eilutės kompiuterio atmintyje? Tai svarbu, norint įvesti sąvoką "vienetinių impulsų seka".

Vienetinių impulsų seka – tai tolydaus laiko signalas, pasikartojantis tam tikru pastoviu periodu.

Kiekvieno periodo pradžios momentu toks signalas panašus į stačiakampį impulsą, kurio trukmė lygi nuliui. Tokio signalo fiziškai realizuoti neįmanoma ir jis yra tik teorinė sąvoka.

Kadangi analoginis ir vienetinių impulsų signalai yra tolydaus laiko signalai, tai galima juos palyginti tarpusavyje.

Lieka išspręsti, kaip palyginti vienetinių impulsų signalą su skaitmeniniu signalu. Tai gana paprasta signale užkoduotos informacijos požiūriu.

Jeigu skaitmeninis signalas kompiuterio atmintyje pavaizduotas vienetų ir nulių seka, tai kiekvienas vienetas atitinka vienetinį impulsą. Tai reiškia, kad bet kuris signalas gali būti pavaizduotas laiko arba dažnių ašyse ir diskretizavimo procese atsiranda naujos dažnių komponentės [7].

Dabar reikia atsakyti į klausimą, ar tinkamai parinktas diskretizavimo dažnis. Atsakymas taip, nes naujai atsiradusias aukštesnio dažnio dedamąsias galima nufiltruoti žemųjų dažnių filtru ir taip atkurti originalų signalą.

Netinkamai pasirinktas diskretizavimo dažnis, kai jis yra per mažas. Tokiu atveju pasikartojančių dažnių komponentės priartėja prie originalaus signalo dažnio.

Kadangi nėra būdų atskirti originalaus signalo dažnio komponentių nuo dažnio komponentių, generuojamų diskretizavimo proceso metu, tai informacija apie originalaus signalo spektrą yra prarandama arba negrįžtamai iškraipoma [1].

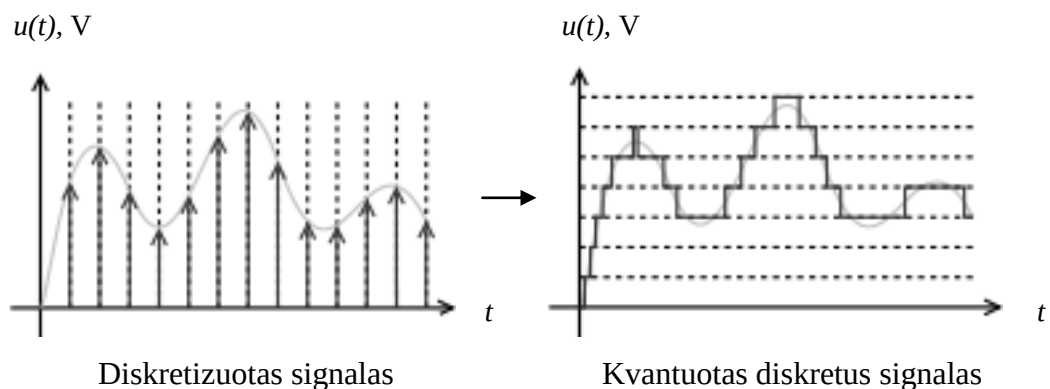
3.1.2. Kvantavimas. Kodavimas

Poskyryje išsamiau nagrinėjami garso signalų kvantavimo ir kodavimo KGP procesai bei metodai. Kaip buvo minėta aukščiau, norint kompiuterio garso plokštėje apdoroti garso signalus skaitmeniniu būdu, tenka susidurti su jų kvantavimo ir kodavimo procesais [6, 15 – 16, 42 – 45].

Kaip anksčiau buvo minėta, kvantuojant diskretizuotą signalą atsiranda kvantavimo triukšmas, bet kaip vyksta pats kvantavimo procesas?

Kvantavimas – tai reikšmių suapvalinimas iki tam tikrų kvantavimo lygių. Kvantavimo lygiai dalina visą kvantuojamo signalo galimų diskrečių reikšmių kitimo diapazoną į galutinį intervalų skaičių – kvantavimo žingsnius. Kvantavimo lygių išsidėstymą sąlygoja kvantavimo skalė. Naudojamos tolygios ir netolygios skalės [7].

Kvantavimo metu, dėl per mažo kvantavimo lygių pasirinkimo, atsiranda iškraipymai. Tokie signalo iškraipymai vadinami kvantavimo triukšmu. Kvantavimo triukšmą galima mažinti, didinant kvantavimo lygių skaičių. Žemiau 3.3 paveiksle grafiškai pateikti kvantavimo operacijos žingsniai.



3.3 pav. Kvantavimo operacijos žingsniai

Kvantavimo lygių skaičius kvantuojant garso signalą parenkamas kuo didesnis. Kvantuotas signalas, skirtingai nuo pradinio analoginio, gali turėti tik galutinį reikšmių skaičių. Tai leidžia pavaizduoti signalą skaičiumi, kuris lygus kvantavimo lygio eilės numeriui kiekvieno diskretizuoto intervalo ribose. Savo ruožtu šį skaičių galima pavaizduoti ženklų ir skaičių kombinacija. Visi ženklai ir taisyklių sistema vadinama kodu. Galutinė kodinių simbolių eilė vadinama kodiniu žodžiu. Kvantuotą signalą galima perkoduoti į kodinių žodžių eilę. Ši operacija vadinama kodavimu.

Kodavimo procesas KGP keitiklyje analogas-skaitmuo kiekvienam kvantavimo lygiui priskiria vienintelį dvejetainį skaičių. Jei egzistuoja m lygių, reikia mažiausiai m skirtingų dvejetainių skaičių. Su b bitų ilgio žodžiu galima sudaryti 2^b skirtingų dvejetainių skaičių. Vadinasi, $2^b \geq m$ arba $b \geq \log_2 m$ [12]. Tokiu būdu bitų, reikalingų koderyje, skaičius b yra mažiausias sveikas skaičius, kuris turi būti didesnis arba lygus $\log_2 m$. Dažniausiai KGP naudojami keitikliai analogas-skaitmuo su $b = 16$ arba mažiau.

Bet kurios kvantuoto signalo reikšmės maksimali paklaida lygi pusei jauniausio bito vertės $1/2 \pm JB$.

Daugeliu atveju kvantavimo įtaka yra ne kas kita, nei kvantavimo triukšmo įnešimas į signalą. Šio triukšmo reikšmės būna pasiskirsčiusios tolydžiai.

Pavyzdžiui, kvantuojant 8 bitų keitikliu, kvantavimo triukšmas sudaro 1/900 visos skalės, kvantuojant 12 bitų keitikliu – 1/14000 visos skalės, tuo tarpu kvantuojant 16 bitų keitikliu triukšmas sudaro 1/227000 visos skalės.

Kadangi kvantavimo paklaida yra triukšmo signalas, tai keitiklio skilčių skaičius nusako tikslumą atkuriant garso signalą KGP. Kvantavimo triukšmas geometriškai prisideda prie analoginiame signale jau esančio triukšmo.

Sudedant du triukšmo signalus jų standartiniai nuokrypiai susideda, todėl bendrą triukšmą kvantuotame signale galima išreikšti formule:

$$\sqrt{K_T^2 + S_T^2} = \dots JB. \quad (3.1)$$

Triukšmo lygis signale po kvantavimo gali išaugti 50 % lyginant su triukšmu, kuris buvo signale iki kvantavimo.

Norint žinoti, kelių bitų ASK reikia, kad triukšmo lygis mažai pakistų, būtina atsakyti į šiuos klausimus: koks triukšmo lygis yra analoginiame signale ir koks maksimalus triukšmo lygis leistinas kvantuotame signale [12].

KGP naudojamas impulsinis kodinis moduliavimas (IKM) (angl. PCM – *Pulse Code Modulation*) – tai analoginio signalo keitimo skaitmeniniu signalu būdas, kai informacija apie analoginio signalo vertes diskrečiais laiko momentais yra perduodama skaitmeninių žodžių pavidalu bitų sraute.

Laikant, kad kiekvienas skaitmeninis žodis – tai dvejetainis skaičius, kuris sudarytas iš n dvejetainių skaitmenų, egzistuoja $M = 2 \cdot n$ skirtingų kodo žodžių, ir kiekvienas kodo žodis reiškia tam tikrą analoginio signalo vertę [12].

Tačiau analoginio signalo vertės gali būti kiek norima artimos viena kitai, todėl nebūtinai sutampa su kodo žodžių vertėmis. Tokiais atvejais naudojamas tas kodo žodis, kurio vertė yra artimiausia tikrajai analoginio signalo vertei. Šis procesas vadinamas kvantavimu.

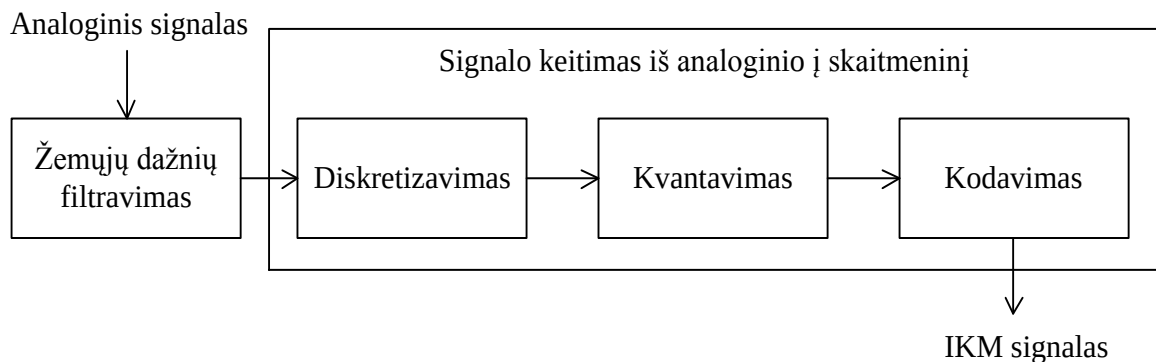
T. y. Kvantavimo metu, tikroji imties vertė pakeičiama artimiausia leistina verte, kurių kiekviena atitinka vieną kodo žodį. Šios vertės vadinamos kvantavimo lygiais.

Impulsinis kodinis moduliavimas yra plačiai naudojamas dėl šių priežasčių:

- IKM metu signalus, kurie suformuoti iš įvairių analoginių šaltinių signalų, galima sujungti su duomenų signalais ir perduoti viena greitaėge skaitmenine duomenų sistema, naudojant sutankinimą laike.
- Skaitmeninių sistemų atsparumas triukšmui yra didesnis, lyginant su analoginėmis sistemomis.

Šie impulsinio kodinio moduliavimo pranašumai dažniausiai yra svarbesni už pagrindinį jo trūkumą: IKM signalo dažnių juostos plotis yra žymiai didesnis už atitinkamo analoginio signalo dažnių juostos plotį.

IKM signalas generuojamas trim etapais: diskretizavimas, kvantavimas ir kodavimas. Visą IKM signalo formavimo procesą iliustruoja 3.4 pav.



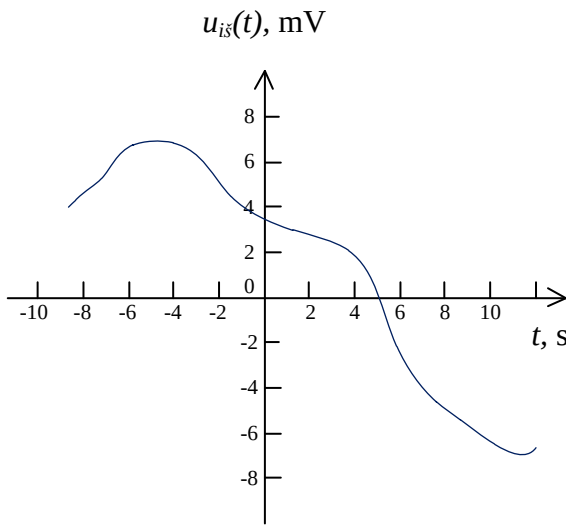
3.4 pav. IKM signalo formavimo procesas

Visų pirma analoginis signalas praleidžiamas per žemųjų dažnių filtrą, siekiant sumažinti PAM (angl. PAM – *Pulse Amplitude Modulation*) signalo iškraipymus dėl spektrų sanklotos efekto. Po to signalas patenka į diskretizatorių, kuris generuoja stačiakampių impulsų pavidalo momentinės imties PAM signalą [12].

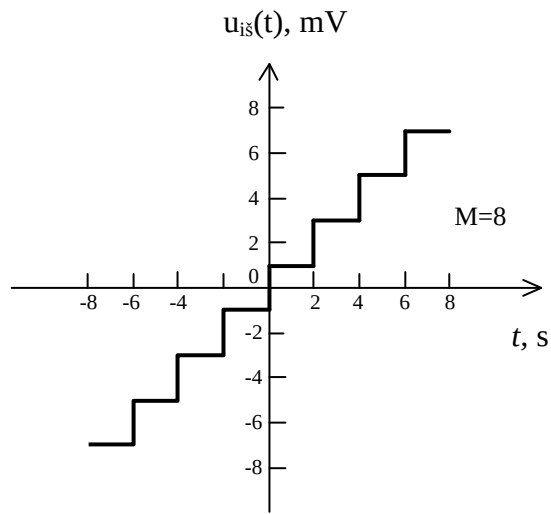
Kvantuojant šis signalas pakeičiamas impulsais, kurių amplitudės atitinka skaitmeninius žodžius. Kvantuotasis PAM signalas perduodamas į koduotuvą, kuris kiekvieną impulsą pakeičia kodinių impulsų seka, t. y., generuoja galutinį PCM signalą [42 – 45].

Pagal IKM signalą atkurtas analoginis signalas visuomet šiek tiek skiriasi nuo pradinio analoginio signalo, nes kvantuoto PAM signalo impulsų vertės šiek tiek skiriasi nuo tikrųjų pradinio signalo verčių atitinkamais laiko momentais. Tai akivaizdu iš 3.5 – 3.7 pav., kurie iliustruoja

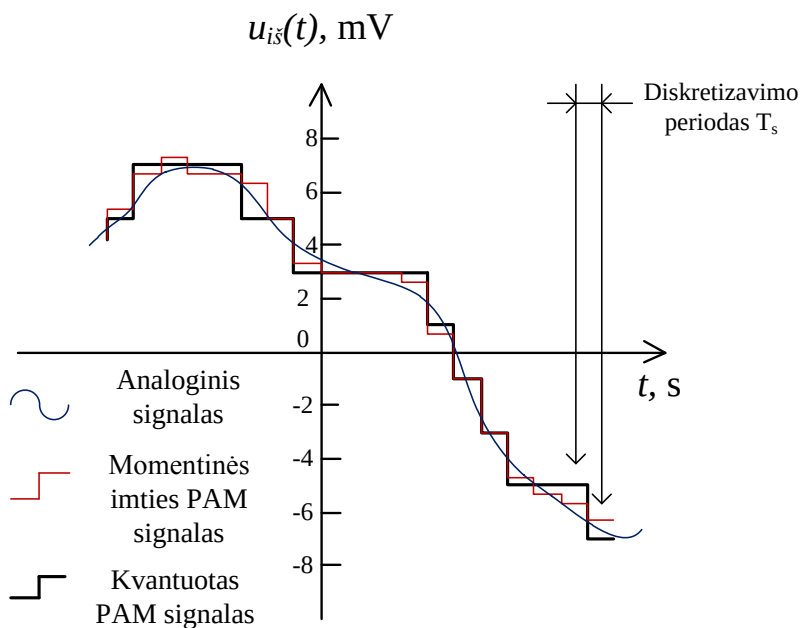
kvantavimo operaciją, kai kvantavimo lygių skaičius $M = 8$. 3.6 paveiksle pavaizduota kvantavimo charakteristika.



3.5 pav. Apdorojamas analoginis signalas



3.6 pav. Tiesinio kvantavimo charakteristika



3.7 pav. Pradinis analoginis signalas, momentinės imties PAM signalas ir kvantuotas PAM signalas

Intervalas tarp gretimų charakteristikos “laiptelių” vadinamas kvantavimo žingsniu (pvz., 3.6 paveiksle kvantavimo žingsnis 2 V). Dėl tokios charakteristikos tolydusis įėjimo signalas pakeičiamas laiptuotu signalu, parodytu 3.7 paveiksle. Dėl kvantavimo atsiranda kvantavimo triukšmas arba paklaidos signalas, kurį nusako pradinio momentinės imties PAM signalo ir jau kvantuoto išėjimo signalo skirtumas [12]. Kvantavimo triukšmas – tai apvalinimo paklaida.

Šios paklaidos didžiausia vertė yra lygi pusei mažiausio išėjimo įtampos pokyčio (3.5 pav. šis pokytis yra 2 V, todėl kvantavimo paklaida neviršija ± 1 V). PCM signalas gaunamas iš kvantuoto PAM signalo, užkoduojant kiekvieno impulso amplitudę skaitmeninio žodžio pavidalu.

Praktikoje naudojami įvairūs kodai. Pvz., 3.1 lentelėje pateiktas trijų bitų Grėjaus kodas aštuonių kvantavimo lygių atveju (4 teigiami lygiai ir 4 priešingi lygiai). Kaip matome, priešingi lygiai vaizduojami papildomuoju kodu, t. y.:

- ženklą nusako pirmasis (kairysis) bitas,
- kiekvieną kodo žodį galima gauti iš priešingą lygį nusakančio žodžio, pakeitus visus vienetus nuliais, o nulius – vienetais (įskaitant ženklo bitą), ir pridėjus vienetą (neįskaitant ženklo bito).

Grėjaus kodo privalumas yra tas, kad, dėl kanalo triukšmo pasikeitus bet kuriam dvejetainio žodžio bitui, išskyrus ženklo bitą, kvantuotojo PAM signalo vertė virsta gretima to paties ženklo verte, t. y., paklaida yra mažiausia.

3.1 lentelė. Trijų bitų Grėjaus kodas (kvantavimo lygių skaičius $M=8$)

Kvantavimo lygis (V)	+7	+5	+3	+1	–1	–3	–5	–7
Kodo žodis	110	111	101	100	000	011	001	010

Bendruoju atveju PCM signalą gali sudaryti ir kito pagrindo (ne dvejetainiai) skaitmeniniai žodžiai, t. y., signalas gali būti ne dvilygis, o daugialygis. Daugialygių signalų dažnių juostos plotis žymiai mažesnis negu dvilygių, tačiau jų generavimui reikalinga žymiai sudėtingesnė aparatūra.

Egzistuoja du veiksniai, sąlygojantys triukšmą analoginiame informaciniame signale PCM sistemoje:

- Kvantavimo triukšmas, kurį sąlygoja baigtinė kvantavimo žingsnio vertė.
- Bitų klaidos PCM signale.

Bitų klaidas sąlygoja kanalo triukšmas ir netinkamas signalo filtravimas, dėl kurio gali pasireikšti tarpženklinė interferencija.

Iš viso skiriamos keturios kvantavimo triukšmo rūšys: perkrovos triukšmas, atsitiktinis triukšmas, grūdėtasis triukšmas ir lygio neapibrėžtumo triukšmas.

Perkrovos triukšmas (angl. *overload noise*) atsiranda tada, kai kvantuojamas įėjimo signalas išeina už kvantavimo intervalo ribų, kurioms apskaičiuotas kvantavimo įrenginys. Tuomet

analoginio signalo dalis, išeinanti už intervalo ribų, yra “nupjaunama”, ir PCM sistemos išėjime atkurtasis analoginis signalas turi plokščius maksimumus [42 – 45].

Atsitiktinį triukšmą (angl. *random noise*) sukelia atsitiktinės kvantavimo paklaidos PCM sistemoje normaliomis veikimo sąlygomis, kai įėjimo signalo ribinės vertės sutampa su ribiniais kvantavimo lygiais arba yra tik nežymiai mažesnės už juos. Garso signalė atsitiktinis triukšmas pasireiškia nuolatiniu šnypštumu, panašiu į baltąjį triukšmą. Jeigu įėjimo signalo amplitudė yra tik kelis kartus didesnė už kvantavimo žingsnį, tuomet kvantavimo paklaidos nustoja būti atsitiktinės. Garso signalė toks kvantavimo triukšmas pasireiškia šiurkščiu garsu, panašiu į byrančio žvyro garsą. Toks triukšmas vadinamas grūdėtuju triukšmu (angl. *granular noise*).

Grūdėtąjį triukšmą galima paversti atsitiktiniu (ir tuo pačiu sumažinti jo galią), didinant kvantavimo lygių skaičių M . Tačiau tuomet reikėtų didinti ir bitų spartą, t. y., signalo juostos plotį. Kitas būdas sumažinti grūdėtąjį triukšmą yra netiesinis kvantavimas.

Ketvirtasis kvantavimo triukšmo tipas yra lygio neapibrėžtumo triukšmas (angl. *quantization noise*).

Toks triukšmas pasireiškia tuomet, kai įėjimo signalas yra beveik pastovus, o jo vertė artima vertikaliam “laipteliui” kvantavimo charakteristikoje (3.6 paveikslas).

Šiomis sąlygomis kvantuotų išėjimo impulsų amplitudės gali osciliuoti tarp dviejų kaimyninių kvantavimo lygių.

Šio tipo triukšmo galima išvengti, naudojant tokį kvantavimo būdą, kurio charakteristika neturi vertikalios laiptelio ties “pastoviosiomis” įėjimo signalo vertėmis.

Pvz., vertikaliojo laiptelio neturi būti kvantavimo charakteristikos pradžioje, kad lygio neapibrėžtumo triukšmo nebūtų, kai įėjime nėra jokio signalo (t. y., kai signalas yra nulinis).

Garso signalai su didesne tikimybe įgyja artimas nuliui vertes, negu vertes, kurios artimos ribinėms kvantavimo vertėms.

Siekiant sumažinti grūdėtąjį triukšmą tokiuose signaluose, kvantavimo žingsnis sumažinamas mažoms įėjimo signalo amplitudės reikšmėms ir padidinamas didelėms įėjimo signalo amplitudės reikšmėms.

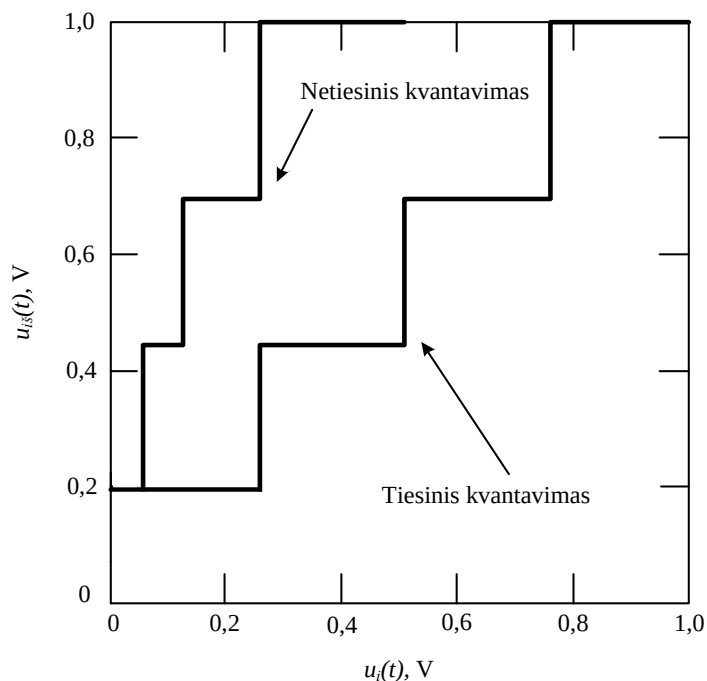
Toks kvantavimo būdas vadinamas netiesiniu kvantavimu. Netiesinio kvantavimo charakteristikos pavyzdys pateiktas 3.8 paveiksle.

Netiesinis kvantavimas gali būti realizuotas, iš pradžių praleidus analoginį signalą per netiesinį stiprintuvą, o po to – per PCM grandinę, kuri naudoja tiesinį kvantavimą.

Siekiant, kad mažas signalo amplitudės reikšmės atitiktų daugiau kvantavimo lygių, o didelės amplitudės reikšmės atitiktų mažiau kvantavimo lygių, tokio stiprintuvo stiprinimo

koeficientas turi būti didesnis už vienetą, esant mažoms įėjimo signalo amplitudės reikšmėms, ir mažesnis už vienetą, esant didelėms įėjimo signalo amplitudės reikšmėms.

Toks netiesinis signalo stiprinimas vadinamas jo spūda, o netiesinio stiprintuvo išėjimo signalo priklausomybė nuo įėjimo įtampos vadinama spūdos charakteristika.



3.8 pav. Tiesinio ir netiesinio kvantavimo charakteristikos

Poskyryje išnagrinėti kvantavimo ir kodavimo procesai, akivaizdu, kad kvantavimo metu atsiradusį kvantavimo triukšmą reikia mažinti, nes nuo to priklauso, kaip tiksliai bus atkurtas apdorojamas garso signalas.

KGP garso signalai ne tik keičiami iš vienos jų formos į kitą, bet ir apdorojami, siekiant sukurti garso efektus. Tam naudojami skaitmeniniai signalų filtrai, kurie aptariami kituose skyriuose.

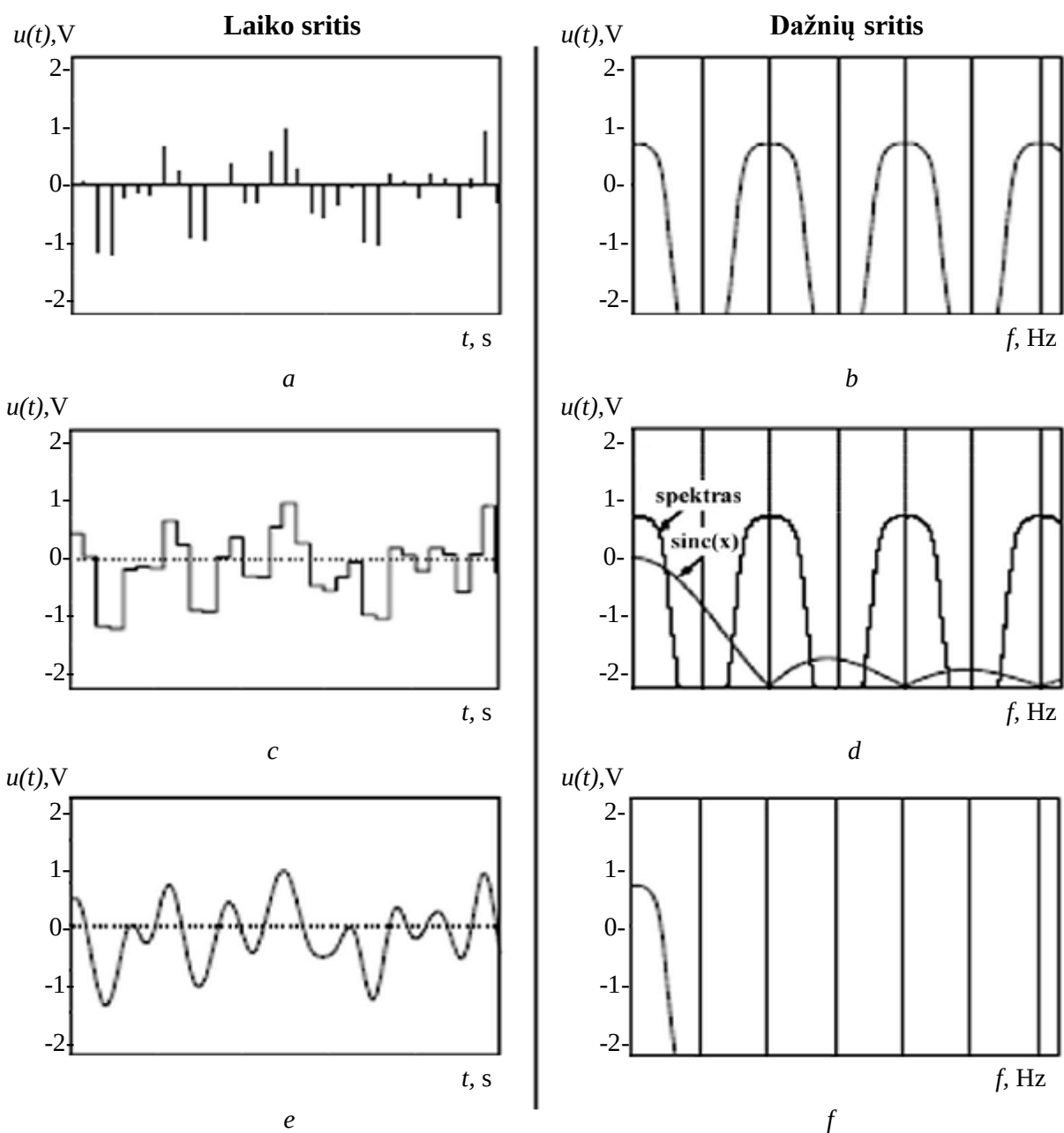
3.2. Keitimas iš skaitmeninio į analoginį signalą

Teoriškai paprasčiausias būdas skaitmeninio signalo keitimui į analoginį signalą – skaityti duomenis iš kompiuterio atminties ir versti juos tam tikros amplitudės elektrinių impulsų seka (3.9 pav. a) [1, 22, 46 – 53].

Tokio signalo spektras parodytas 3.9 paveiksle b.

3.2.1. Filtravimas žemųjų dažnių analoginiu filtru

Analoginis signalas gali būti atkurtas filtruojant tokią impulsų seką žemųjų dažnių filtru, kurio atkirtos dažnis lygus pusei diskretizavimo dažnio (3.9 pav.). Nors tai matematiniu požiūriu pats tinkamiausias būdas, tačiau fiziškai neįmanoma generuoti nulinės trukmės vienetinių impulsų [1, 46 – 53].



3.9 pav. Skaitmeninio signalo keitimas analoginiu signalu. a – impulsų seką, b – impulsų sekos spektras, c – SAK signalas, d – spektras ir $\text{sinc}(x)$ funkcija, e – atkurtas analoginis signalas, f – atkurto signalo spektras

Visi SAK išėjime laiko einamąją reikšmę tol, kol pasirodys nauja skaitinė reikšmė įėjime. Tai vadinama nulinės eilės užlaikymu [9, 11, 13].

Skaitmuo-analogas keitiklio išėjime gaunamas laiptuotas analoginis signalas (3.9 pav. c), kurio spektras atitinka impulsų sekos ir matematinės funkcijos $\text{sinc}(x)$ sandaugą (3.9 pav. d). Atkuriant analoginį signalą (3.9 pav. e), laiptuotas analoginis signalas filtruojamas žemųjų dažnių filtru. Atkurto analoginio signalo spektras parodytas (3.9 pav. f).

Žemųjų dažnių analoginis filtras atlieka dvi funkcijas:

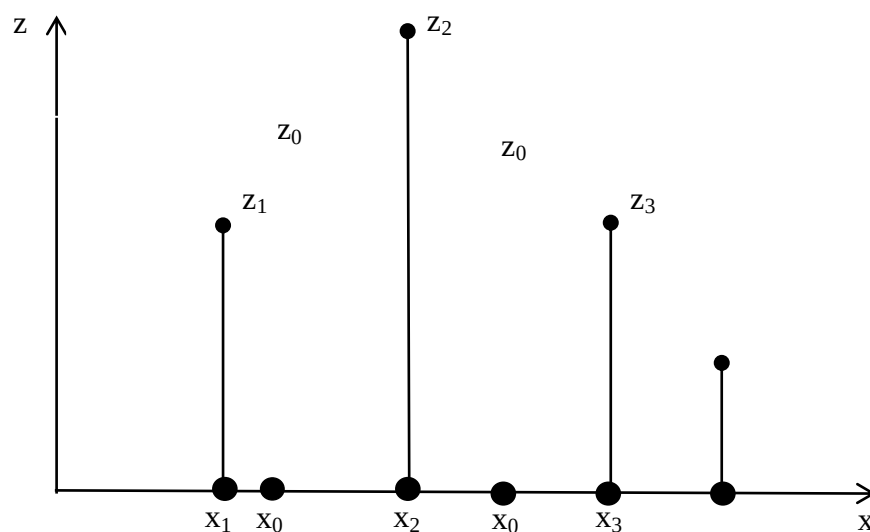
- nufiltruoja visus dažnius, aukštesnius už pusę diskretizavimo dažnio,
- perdavimo juostoje stiprina tas dažnio komponentes, kurios buvo nuslopintos.

Taip pat analoginis signalas gali būti atkurtas, pritaikius interpoliavimo metodus. Jie bus aptarti kitame poskyryje.

3.2.2. Interpoliavimas

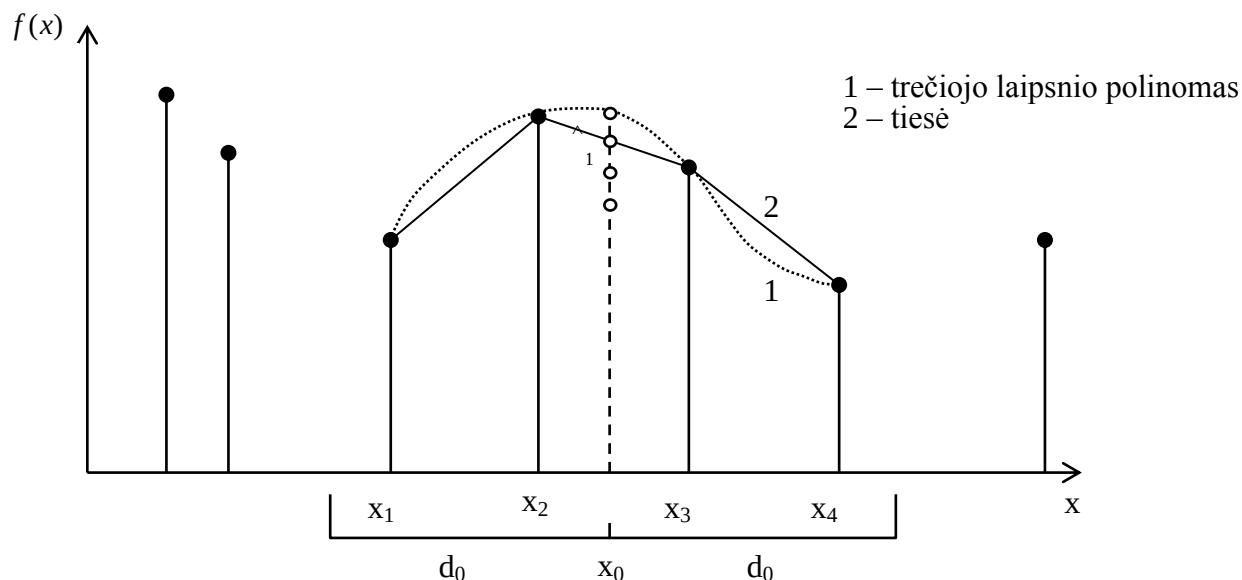
Keičiant skaitmeninius signalus analoginiais KGP taip pat taikomas interpoliavimo procesas [9, 11, 13, 54].

Šiame poskyryje bus nagrinėjami interpoliavimo procesai, kuriuos galima pritaikyti keičiant signalus iš skaitmeninės į analoginę jų formą. Žemiau pateikti trys interpoliavimo metodai.



3.10 pav. Interpoliavimo uždavinio pavyzdys

Interpoliavimo principai trumpai gali būti apsakomi 3.10 paveiksle pateikiamu pavyzdžiu. Logiška manyti, kad jeigu taškas x'_0 yra atstumo tarp x_2 ir x_3 viduryje, tai ir jį atitinkanti z'_0 reikšmė bus $0,5 \cdot (z_2 + z_3)$, o z_0 bus artimesnė z_1 nei z_2 , kadangi x_0 yra arčiau x_1 nei x_2 . Naudojant skirtingus interpoliavimo būdus, skirtingai įtakojamas signalų atkurimas.



3.11 pav. Tiesinio ir polinominio interpoliavimo įtaka gaunamiems rezultatams

Nežinomos taško reikšmės suradimui dažniausiai naudojamos tik artimiausių taškų reikšmės [54]. 3.11 paveiksle pateikiama įvairių interpoliavimo schemų įtaka gaunamiems rezultatams.

Pavyzdžiui, 3.11 paveiksle interpoliavime dalyvauja taškai, nutolę nuo x_0 ne daugiau, kaip per atstumą d_0 . Naudojant tiesinį interpoliavimą, atkurtas signalas kamputas, tuo tarpu naudojant polinominį interpoliavimą kampuotumo nelieta.

Tikrasis, tačiau nežinomas paviršius yra aprašomas funkcija $f(x)$, o interpoliavimo metu gaunama funkcija – $\hat{f}(x)$.

Polinominis interpoliavimas

Pagrindinė polinominio interpoliavimo formulė yra:

$$\hat{f}(x) = \sum_{i=0}^v c_i x^i. \quad (3.2)$$

čia c_i yra polinomo koeficientai, o v – polinomo laipsnis. Pirmojo laipsnio polinomo išraiška paprasta:

$$\hat{f}(x) = c_0 + c_1 x. \quad (3.3)$$

Jei operuojama duomenimis, turinčiais x ir y koordinates, bendroji formulė įgauna pavidalą:

$$\hat{f}(x, y) = \sum_{i=0}^v \sum_{j=0}^{\mu} c_{ij} x^i y^j. \quad (3.4)$$

čia μ – antrojo polinomo laipsnis. Atitinkamai pirmojo ir antrojo laipsnio polinomų:

$$\hat{f}(x, y) = c_0 + c_{10}x + c_{01}y. \quad (3.5)$$

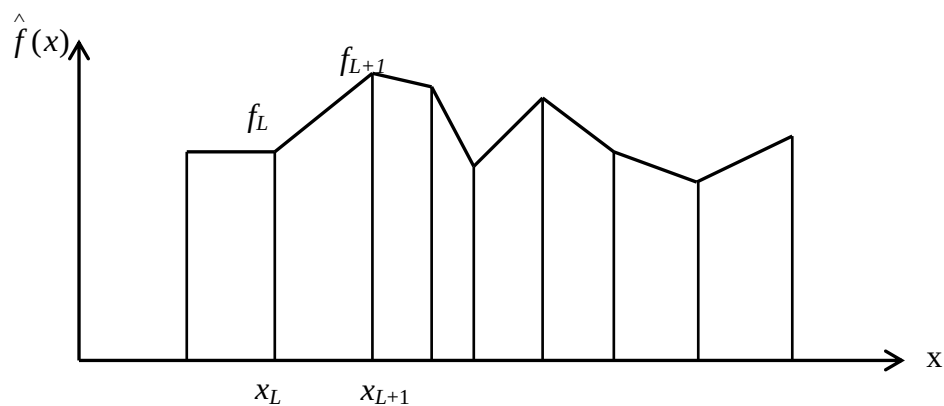
$$\hat{f}(x, y) = c_0 + c_{10}x + c_{01}y + c_{20}x^2 + c_{11}xy + c_{02}y^2. \quad (3.6)$$

Gali būti problematiška apskaičiuoti polinomą, jei turim labai daug duomenų.

Praktiniais tikslais naudojami paviršiai, apskaičiuojami siekiant minimizuoti skirtumus tarp pradinių ir sumodeliuotų reikšmių.

Tiesinis interpoliavimas

Tiesinis interpoliavimas – tai zoninis pirmojo laipsnio polinomo interpoliavimas, kur jungtys tarp gretimų zonų sutampa su duomenų taško padėtimi 3.12 pav.



3.12 pav. Tiesinio interpoliavimo pavyzdys

Interpoliavimo formulė zonoje $[x_L, x_{L+1}]$ yra:

$$\hat{f}(x) = f_L - \left(\frac{f_{L+1} - f_L}{x_{L+1} - x_L} x_L \right) + \left(\frac{f_{L+1} - f_L}{x_{L+1} - x_L} x \right). \quad (3.7)$$

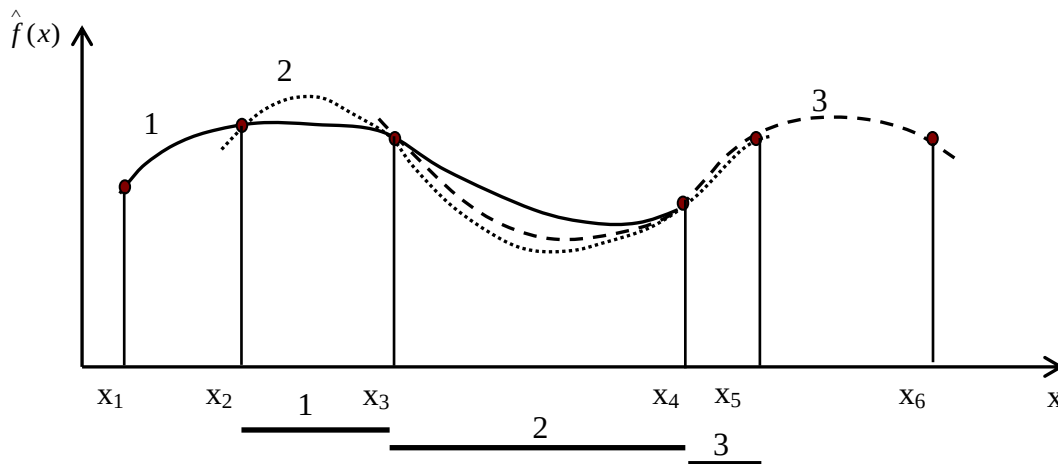
Tai vienas iš paprasčiausių interpoliavimo būdų, ir, ko gero, dėl to plačiai naudojamas. Šiuo atveju nekreipiamas dėmesys į interpoliuojamo rodiklio elgseną tarp duomenų taškų.

Jei nepakanka duomenų taškų tankio, tai tiesinis interpoliavimas pateikia geresnius rezultatus, nei aukštesnio laipsnio polinomi.

Tiesinis interpoliavimas tinka, esant staigiems šuoliams bei netaisyklingai išdėstytiems duomenų taškams [54].

Gaunama laužyta kreivė gali būti vėliau filtruojama, siekiant gauti sklandesnį reiškinių atvaizdavimą.

Kubinis interpoliavimas



3.13 pav. Zoninės trečiojo laipsnio polinomo interpoliacijos pavyzdys

1, 2 ir 3 numeriais pažymėtos tiesės pavaizduoja kaip skirsis interpoliavimo rezultatai jei interpoliavimas bus pradėtas skirtingose zonose.

Antrojo laipsnio polinomi leidžia tik vieną tiesės išlenkimą. Zoninė kubinė arba trečiojo laipsnio polinomo interpoliacija (3.13 pav.) leidžia išvengti problemų, susijusių su aukštesniojo laipsnio polinomų sudėtingumu, bet gauti sklandesnius ir tikslesnius paviršius nei tiesinės interpoliacijos metodais [54].

Norint sudaryti trečiojo laipsnio polinomo kreivę, būtina turėti 4 taškus. Jungtys tarp zonų sutampa su duomenų taškais.

Siekiant išvengti staigių šuolių tarp zonų, interpoliavimo rezultatui formuoti galima naudoti tik centrinės kreivių dalis arba apskaičiuoti persidengiančių kreivių vidurkius. Jei ieškomas paviršius x, y, z koordinačių erdvėje ir pradiniai taškai išdėstyti netaisyklingai, pirmiausia tikslinga generuoti taisyklingą kvadratų tinklą, nustatyti paviršiaus reikšmes jo mazguose ir po to interpoliuoti jau kvadrato viduje.

Skyriuje buvo aptarti procesai, vykstantys, keičiant analoginį signalą skaitmeniniu ir atvirkščiai. Pagrindiniai procesai, kuriuos būtina pritaikyti signalų keitimo iš vienos jų formos į kitą metu – diskretizavimas, kvantavimas, kodavimas ir interpoliavimas.

Tai kertiniai procesai, taikomi apdorojant signalus kompiuterių garso plokštėse, tačiau yra ir kiti procesai, apie kuriuos bus kalbama vėliau.

4. SINTEZAVIMAS

Skyriaus tikslas yra trumpai pateikti sintetatorių vystymosi istoriją bei aptarti dažniausiai šiuo metu naudojamus KGP sintetatorių tipus. Išnagrinėti dažnio moduliavimu (angl. *Frequency Modulation* – FM) pagrįsto sintetatoriaus veikimą. Ištirti bangų lentelių sintetatorių veikimą ir poveikį signalams bei metodus, skirtus mažinti sintetatoriaus atmintį. Ištirti išorinių MIDI sintetatorių ryšį su KGP. Išanalizuoti MIDI mikrovaldiklio, esančio KGP viduje paskirtį ir veikimą [34].

1981 m. pradėti gaminti kompanijos IBM asmeniniai kompiuteriai sugebėjo skleisti tik vienintelį, visiems gerai pažįstamą garsą – "beep". Tuo tarpu kituose asmeniniuose kompiuteriuose, kurie dažniausiai būdavo skirti žaidimams, jau nuo 1978 metų buvo montuojami programuojamieji garsų generatoriai (angl. *Programmable Sound Generator* – PSG). Šie kompiuterių elementai dažniausiai turėjo tik kelis nepriklausomus garso kanalus imituoti garsams. Jie galėjo generuoti įvairiausius garsus, pvz., ginklų šūvius, sprogimus, variklio gaudesį. Kompiuteriai būdavo jungiami prie televizorių, kurių ekranuose rodomus vaizdus lydėdavo muzika bei kiti garsai.

Pirmasis profesionalus asmeninis kompiuteris, turintis standartinę garso įrangą, buvo *Apple* kompanijos kompiuteris "Macintosh". Šios serijos kompiuteriai buvo pradėti gaminti 1984 metais. Jau kitais, 1985 metais kompanija *Commodore* pradėjo gaminti kompiuterius su tuo metu labai gerą grafiką bei muziką užtikrinančiais procesoriais. Tokie kompiuteriai buvo vadinami "Amiga". Kiek vėliau kompanija *Atari* sukūrė kompiuterius "Atari ST" su MIDI (angl. *Musical Instrument Digital Interface*) sąsaja.

Garso plokštės IBM kompiuteriuose pasirodė tik 1991 metais, o daugialypei terpei (angl. *Multimedia*) skirti IBM kompiuteriai paplito, kai labai atpigo kompaktinių diskų grotuvai bei garso plokštės [34].

Garso plokštė yra daugiafunkcinis įtaisas, atkuriantis skaitmeninių garso įrašų bei MIDI bylas, sumaišantis kelių šaltinių analoginius signalus, sintezuojantis įvairius garso efektus (aidėjimą, erdvinį garsą ir t. t.), stiprinantis analoginį signalą bei keičiantis jo dažnines savybes, analoginį signalą paverčiantis skaitmeniniu ir atvirkščiai.

Pirmuosiuose kompiuteriuose garso signalai buvo sintezuojami vadinamuoju FM (angl. *Frequency Modulation*) metodu, moduliuojant virpesių dažnį. Tokiu būdu gaunami sudėtingi virpesiai, imituojantys tam tikrų muzikos instrumentų kuriamus garso signalus.

Maždaug prieš penkiolika metų brangesnėse garso plokštėse buvo pradėti naudoti daug tobulesni bangų lentelių (WT) sintetatoriai, kurie sintezuoja garsus iš atmintyje saugomų trumpų

natūralių garso fragmentų. Tokių sintezatorių kuriami garsai yra artimesni natūraliems garsams. Kaip taisyklė, instrumento garsui sintezuoti pakanka dviejų, trijų atmintyje saugomų trumpų jo skambesio įrašų, pvz., garso atsiradimo ir nusistovėjusio garso. Instrumento grojimas sintezuojamas kartojant garsą, keičiant jo toną [34]. Kai kuriose KGP būna abiejų tipų FM ir WT sintezatoriai.

Sintezatoriaus atkuriamų instrumentų natūralumas priklauso nuo garso fragmentų įrašytų KGP kokybės, jų parinkimo bei apdorojimo. Kuo didesnis įrašyto garso signalo diskretizavimo dažnis (jis gali siekti net 192 kHz) ir daugiau kvantavimo lygių (dažniausiai 16 – 20 bitų), tuo tiksliau bus įrašytas ir atkurtas garsas. Kokybiškam skaitmeniniam garso įrašui saugoti reikia gana talpios atmintinės.

Pvz., kompaktinio disko kokybės garso, kurio diskretizavimo dažnis yra 44,1 kHz, o kvantavimas 16 bitų (65536 lygių), vienos minutės įrašui reikia apie 5 megabaitų atminties. Todėl gerų garso plokščių atmintinės talpa siekia nuo kelių iki kelių dešimčių megabaitų. Daugumoje garso plokščių saugomo garso fragmentui skiriama 14 arba 12 bitų, tuo tarpu pigiausiose – 8 bitai.

Pačiose naujausiose garso plokštėse diegiami garsų sintezatoriai, kurie modeliuoja virpesių atsiradimo ir kitimo procesus (angl. *Physical Modelling*). Tokiems sintezatoriams nereikia talpios atmintinės, bet reikia sudėtingų ir labai sparčių garso procesorių, kurie spėtų realiu laiku sintezuoti instrumentų kuriamus virpesius. Šie sintezatoriai pranašesni tuo, kad, grojant MIDI instrumentu, galima keisti daugiau jo parametrų [34].

Šiuolaikinėse garso plokštėse visi sintezatoriai dažniausiai yra garso procesoriumi vadinamoje mikroschemoje.

4.1. Sintezavimas naudojant FM sintezatorius

Poskyryje pateikiamas matematinis dažnio moduliavimo modelis. Analizuojamas sintezatoriaus veikimas ir poveikis signalams.

FM sintezės metodas pagrįstas vieno periodinio moduliavimo signalo naudojimu, siekiant moduluoti nešlio dažnį. Jeigu moduliavimo signalas patenka į girdimojo garso dažnių diapazoną, tai smarkiai pasikeičia nešlio garso tembras. FM sintezatorių ypatybė – nešlio ir moduliavimo signalo dažniai yra gana artimi ir girdimojo garso dažnių diapazone [14, 23 – 31].

Kiekvienam atskiram FM sintezatoriaus garso signalui sintezuoti reikia, kad būtų panaudoti mažiausiai du signalų generatoriai. Jie dažnai dar vadinami operatoriais. Skirtingi FM sintezės panaudojimo variantai suteikia skirtingas operatorių valdymo ir konfigūravimo galimybes.

Tobulesni FM sintezatoriai gali naudoti nuo 4 iki 6 operatorių vienam garsui sintezuoti, taip pat tokių sintezatorių operatoriai leidžia keisti signalo kilimo ir nusistovėjimo greitį bei lygį [8].

Pirmieji FM sintezatoriai buvo analoginiai, šiuolaikiniai modernūs FM sintezatoriai įgyvendinami skaitmeniniu būdu.

Kaip jau minėta, dažnio moduliavimo principas sudėtingas. Norint tirti dažnio moduliavimo principą pirmiausia reikia išnagrinėti jo matematinį modelį. Tarkime, nešlys yra kosinusoidės formos virpesys. Tokį virpesį galima aprašyti kaip funkciją, priklausančią nuo laiko:

$$x_n(t) = A_{mn} \cos(\omega_n t + \Theta_n), \quad (4.1)$$

čia A_{mn} – nešlio amplitudė, ω_n – kampinis dažnis ir Θ_n – pradinė fazė.

Tegul moduliavimo signalas būna sinusoidės formos. Jį galima aprašyti tokia išraiška:

$$y(t) = A_{mm} \sin(\Omega_m t + \Theta_m), \quad (4.2)$$

čia A_{mm} – moduliavimo signalo amplitudė, Ω – dažnis ir Θ_m – pradinė fazė.

Visą dažnio moduliavimo sintezės veikimą galima aprašyti tokia išraiška:

$$z_s(t) = A_{mn} \cos(\omega_n t + \beta \cdot \sin \Omega_m t + \Theta_{mn}), \quad (4.3)$$

Dažnio moduliavime naudojamas moduliavimo indeksas, kurio vertę galima gauti pasinaudojus tokia išraiška:

$$\beta = \frac{\Delta \omega_{n \max}}{\Omega_{m \max}}, \quad (4.4)$$

čia $\Delta \omega_{n \max}$ – didžiausias dažnio nuokrypis, $\Omega_{m \max}$ – didžiausias perduodamo signalo spektro dažnis.

FM sintezės metu sukuriama šalutinės garso signalo dedamosios (harmonikos) panaudojant moduliavimo signalą, kuris keičia nešlio dažnį [14].

Harmonikos išsidėsčiusios simetriškai nuo nešlio dažnio į abi puses per atstumą, kartotinį nešlio dažniui (4.2 pav.). Harmonikų dažnius nesudėtinga apskaičiuoti.

Pažymėkime nešlio dažnį f_n , o moduliavimo signalo dažnį – f_m . Teigiamų šalutinių harmonikų dažnius galima rasti pagal tokia išraišką:

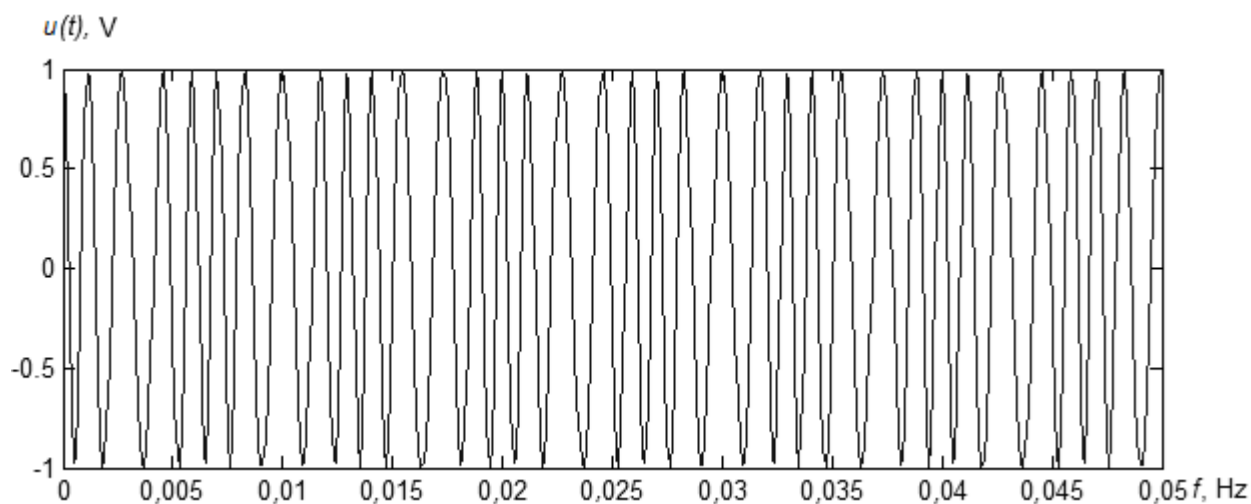
$$f_h = f_n \pm k \cdot f_m, \quad (4.5)$$

čia $k=1, 2, 3, \dots$ – sveikas skaičius.

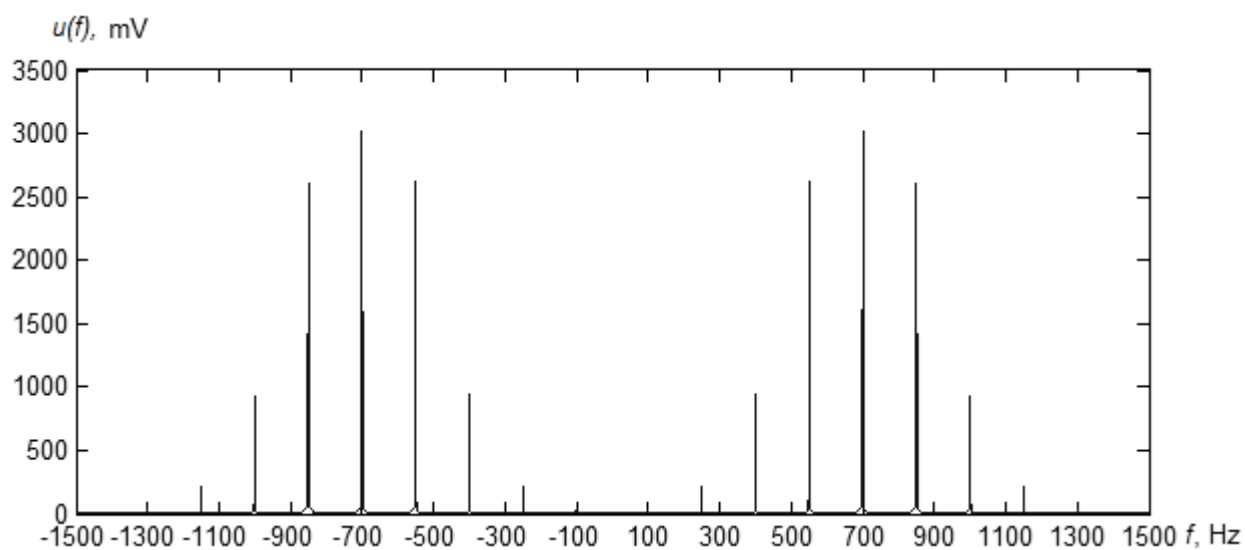
4.1 lentelėje pateikti pradiniai 4.1 ir 4.2 paveiksluose pateiktų oscilogramos ir spektro duomenys.

4.1 lentelė. Pradiniai 4.1 ir 4.2 paveiksluose pateiktų oscilogramos ir spektro duomenys

Nešlio dažnis, Hz	700
Moduliavimo signalo dažnis, Hz	150
Diskretizavimo dažnis, Hz	10000
Moduliavimo indeksas	2500
Signalų amplitudė, V	1



4.1 pav. Moduliuoto dažnio signalo su šalutinėmis harmonikomis oscilograma, kai mod. indeksas $\beta = 2500$



4.2 pav. Moduliuoto dažnio signalo su šalutinėmis harmonikomis spektras

4.2 lentelėje pateiktos 4.2 paveiksle pateikto spektro vertės.

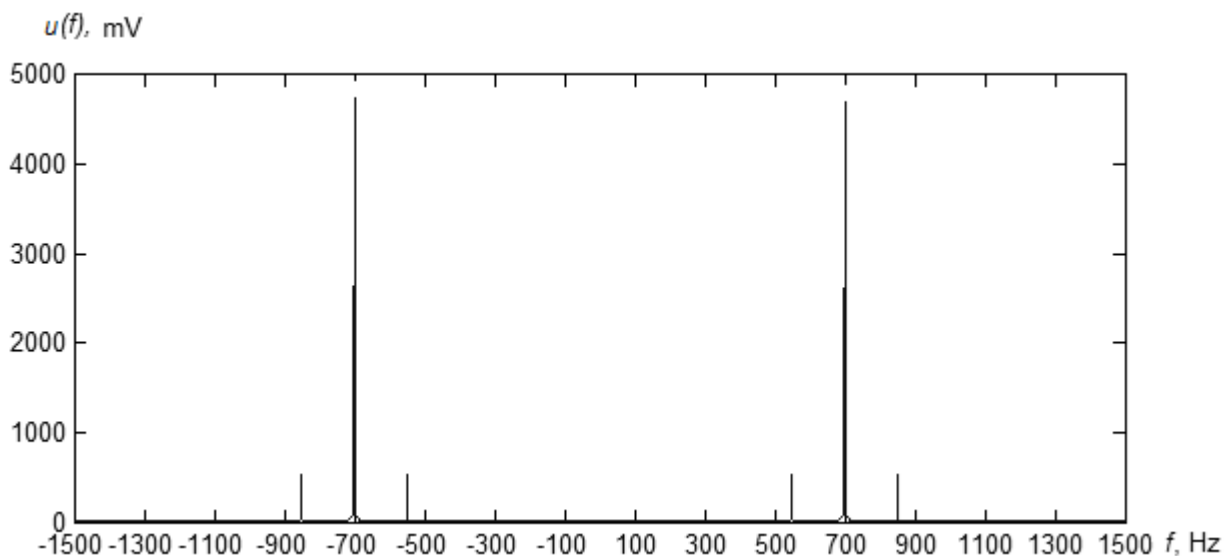
4.2 lentelė. 4.2 paveiksle pateikto spektro vertės

Dažnis, Hz	Vertė, mV
± 1150	211,6
± 1000	930,5
± 850	2608
± 700	3009
± 550	2623
± 400	945,9
± 250	216,3
± 100	37,91

Didėjant moduliavimo indeksui β atsiranda daugiau šaltinių harmonikų. 4.3 – 4.5 paveiksluose pateikti signalų spektrai, gauti *Matlab* programa esant skirtingam moduliavimo indeksui. 4.3 lentelėje pateikti 4.3 – 4.5 paveiksluose pateiktų spektrų duomenys.

4.3 lentelė. Pradiniai 4.3 – 4.5 paveiksluose pateiktų spektrų duomenys

Nešlio dažnis, Hz	700
Moduliavimo signalo dažnis, Hz	150
Diskretizavimo dažnis, Hz	10000
Moduliavimo indeksas	400, 4000, 8000
Signalų amplitudė, V	1

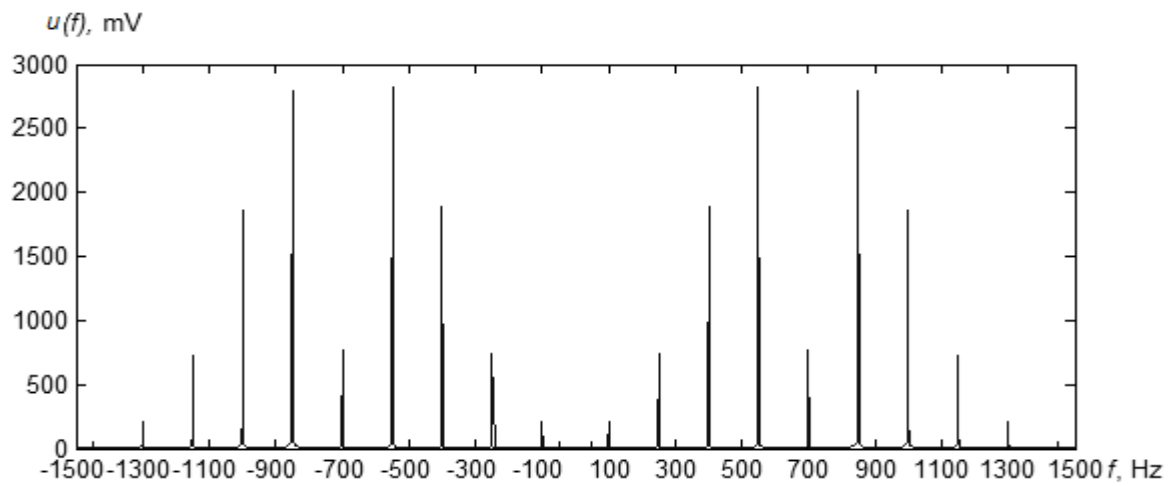


4.3 pav. Moduliuoto dažnio signalo spektras, kai moduliavimo indeksas $\beta = 400$

4.4 lentelėje pateiktos 4.3 paveiksle pateikto spektro vertės.

4.4 lentelė. 4.3 paveiksle pateikto spektro vertės

Dažnis, Hz	Vertė, mV
± 850	519,6
± 700	4905
± 550	522,4
± 400	29,37

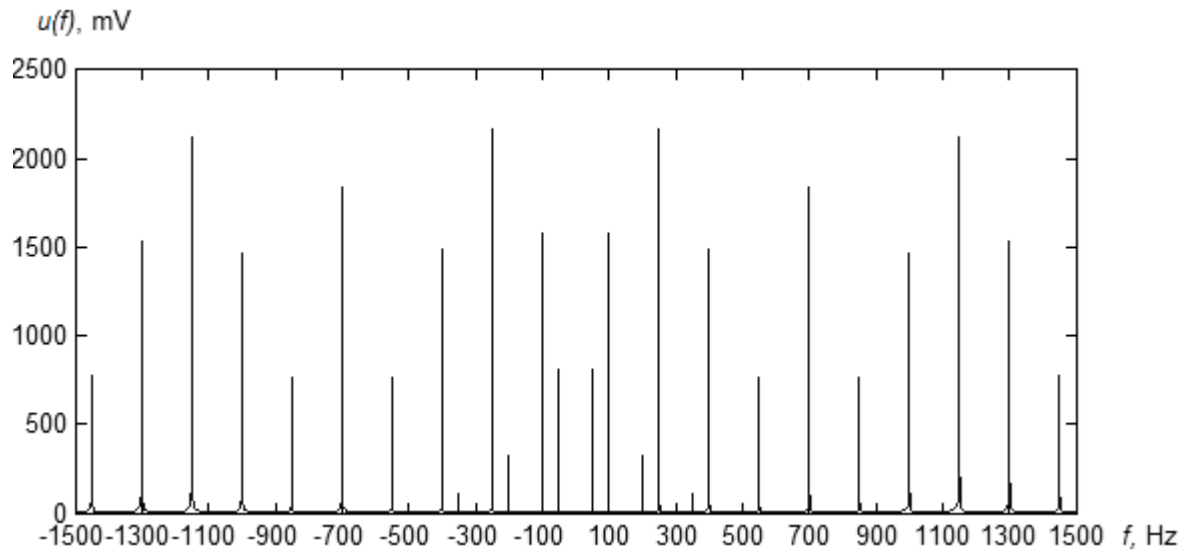


4.4 pav. Moduliuoto dažnio signalo spektras, kai moduliavimo indeksas $\beta = 4000$

4.5 lentelėje pateiktos 4.4 paveiksle pateikto spektro vertės.

4.5 lentelė. 4.4 paveiksle pateikto spektro vertės

Dažnis, Hz	Vertė, mV
± 1450	43,81
± 1300	203
± 1150	728
± 1000	1866
± 850	2798
± 700	765,7
± 550	2814
± 400	1893
± 250	743,6
± 100	211,1
± 50	45,42



4.5 pav. Moduliuoto dažnio signalo spektras, kai moduliavimo indeksas $\beta = 8000$

4.6 lentelėje pateiktos 4.5 paveiksle pateikto spektro vertės.

4.6 lentelė. 4.5 paveiksle pateikto spektro vertės

Dažnis, Hz	Vertė, mV
± 1500	779,9
± 1300	1537
± 1150	2126
± 1000	1466
± 850	758,1
± 700	1834
± 550	767
± 400	1484
± 350	104,9
± 250	2168
± 200	324,2
± 100	1582
± 50	808,1

Galimi trys skirtingi santykiai tarp nešlio ir moduliavimo signalo dažnių, nuo kurių priklauso sintezuojamų garsų rūšys.

Jeigu nešlio ir moduliavimo signalo dažniai sutampa (4.7 lentelė), visos šalutinės harmonikos bus kartotinės nešlio dažniui.

Jeigu dažnių skirtumai tarp harmonikų yra tokio dydžio, kokio dažnio yra nešlys, žemiausio dažnio harmonika bus nulinio dažnio. Dar žemesnio dažnio harmonikos turėtų būti nešlio neigiamo dažnio.

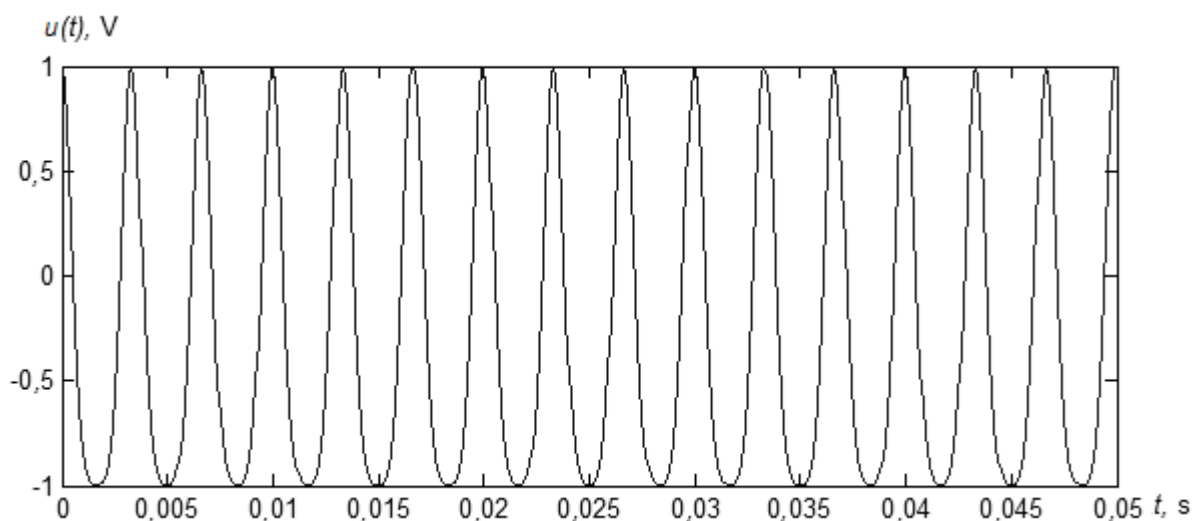
Sintezatoriuose, naudojant tokį dažnio moduliavimo būdą, harmonikos yra reguliarios t. y. jų atsiradimas ir kitimas yra nuspėjamas.

4.6 ir 4.7 paveiksluose pateiktos signalų oscilogramos ir spektrai gauti, kai nešlio ir moduliavimo signalai sutampa.

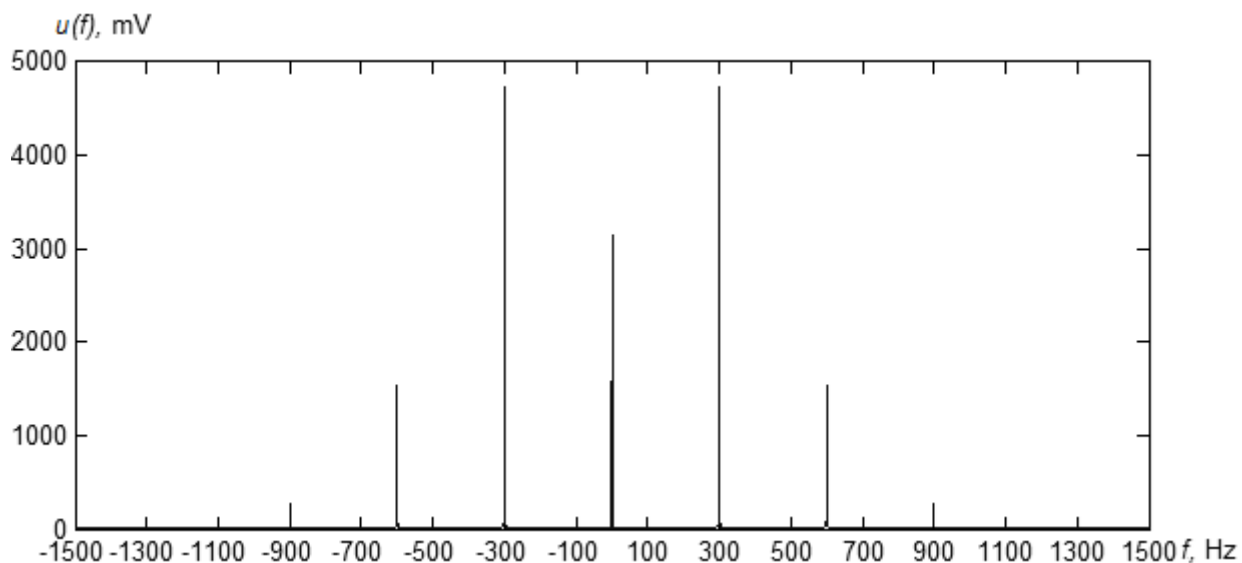
4.7 lentelėje pateikti pradiniai 4.6 ir 4.7 paveiksluose pateiktų oscilogramos ir spektro duomenys.

4.7 lentelė. Pradiniai 4.6 – 4.7 paveiksluose pateiktos oscilogramos ir spektro duomenys

Nešlio dažnis, Hz	300
Moduliavimo signalo dažnis, Hz	300
Diskretizavimo dažnis, Hz	10000
Moduliavimo indeksas	2500
Signalų amplitudė, V	1



4.6 pav. Moduluoto dažnio signalo oscilograma, kai nešlio ir moduliavimo signalo dažniai sutampa



4.7 pav. Moduliuoto dažnio signalo spektras, kai nešlio ir moduliavimo signalo dažniai sutampa

4.8 lentelėje pateiktos 4.7 paveiksle pateikto spektro vertės.

4.8 lentelė. 4.7 paveiksle pateikto spektro vertės

Dažnis, Hz	Vertė, mV
0	3138
± 300	4723
± 600	1532
± 900	264,3

Tarkime, kad nešlio dažnis yra 400 Hz, o moduliavimo signalo 900 Hz, tai dažnių skirtumas tarp harmonikų bus 100 Hz dažnio skirtumas, nes pridėjus prie neigiamo nešlio dažnio (–400 Hz) moduliavimo signalo dažnį, gausime 100 Hz skirtumą tarp gretimų harmonikų (4.9 pav.).

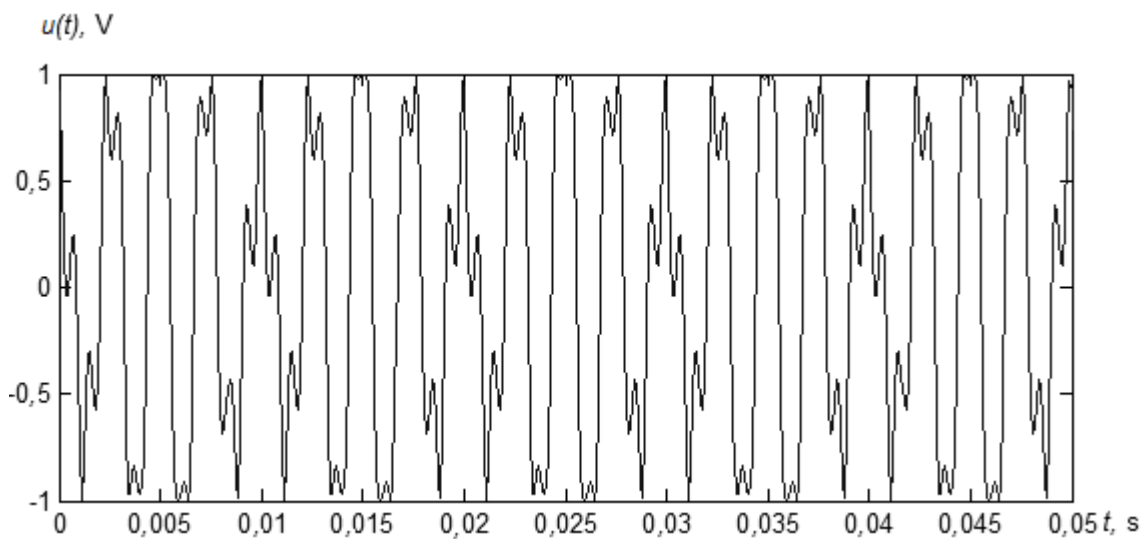
Jeigu nešlys yra aukšto dažnio, esant mažam moduliavimo indeksui, sintezuotas garsas bus aukšto dažnio. Nešlio dažnis visada žinomas.

Jeigu nešlio dažnis yra mažas, sintezuotas garsas skambės taip tarsi būtų prarastos harmonikos, o esančios atsirastų poromis.

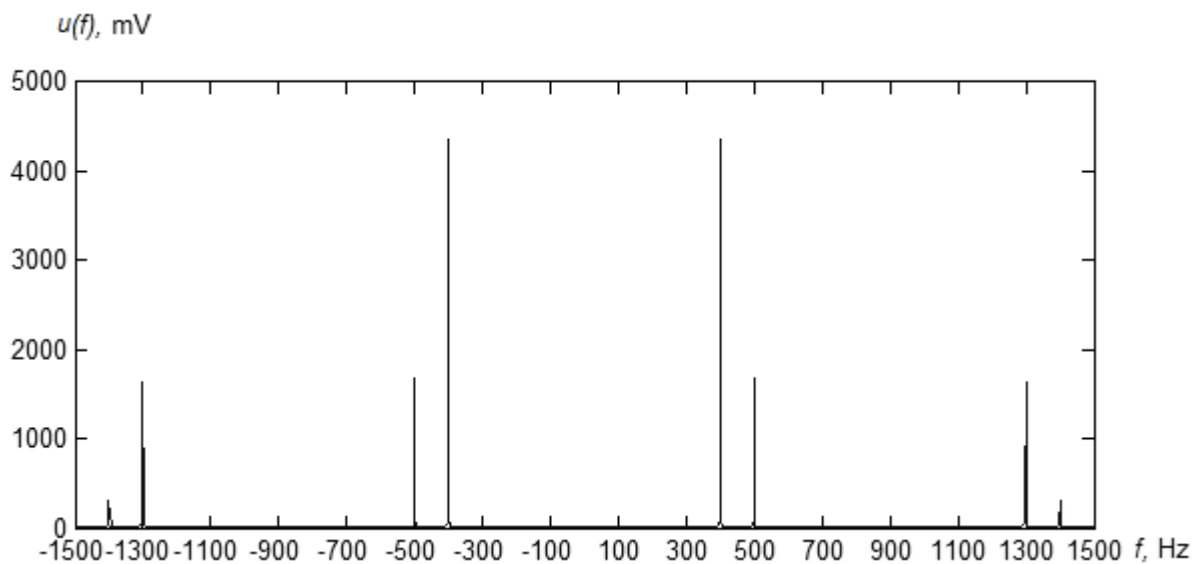
Esant mažam moduliavimo indeksui išryškės du skirtingi girdimi dažniai, didėjant moduliavimo indeksui išryškės aukštesniojo dažnio dedamoji. 4.9 lentelėje pateikti pradiniai 4.8 ir 4.9 paveiksluose pateiktų oscilogramos ir spektro duomenys.

4.9 lentelė. Pradiniai 4.8 – 4.9 paveiksluose pateiktos oscilogramos ir spektro duomenys

Nešlio dažnis, Hz	400
Moduliavimo signalo dažnis, Hz	900
Diskretizavimo dažnis, Hz	10000
Moduliavimo indeksas, Hz	8000
Signalų amplitudė, V	1



4.8 pav. Moduluoto dažnio signalo oscilograma, kai moduliavimo signalo dažnis yra didesnis už nešlio dažnį



4.9 pav. Moduluoto dažnio signalo spektras, kai moduliavimo signalo dažnis yra didesnis už nešlio dažnį

4.10 lentelėje pateiktos 4.9 paveiksle pateikto spektro vertės.

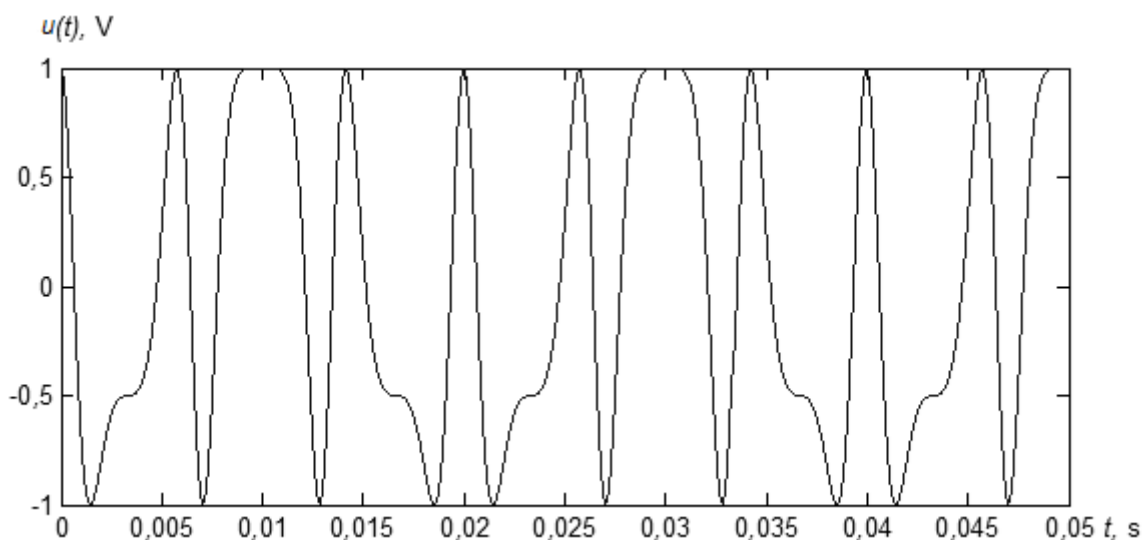
4.10 lentelė. 4.9 paveiksle pateikto spektro vertės

Dažnis, Hz	Vertė, mV
± 1400	295,9
± 1300	1634
± 500	1674
± 400	4367

Jeigu nešlio ir moduliavimo signalo dažniai yra artimi, sintezuotame garse atsirastų „plakimo“ efektas, atitinkantis nešlio ir moduliavimo signalo dažnių skirtumą (4.11 pav.). Tarkime jeigu nešlio dažnis yra 200 Hz, o moduliavimo signalo 150 Hz atsirastų tokios harmonikų poros: 50 ir 100 Hz, 200 ir 250 Hz, 350 Hz, 400 Hz ir t. t. 4.11 lentelėje pateikti pradiniai 4.10 ir 4.11 paveiksluose pateiktų oscilogramos ir spektro duomenys.

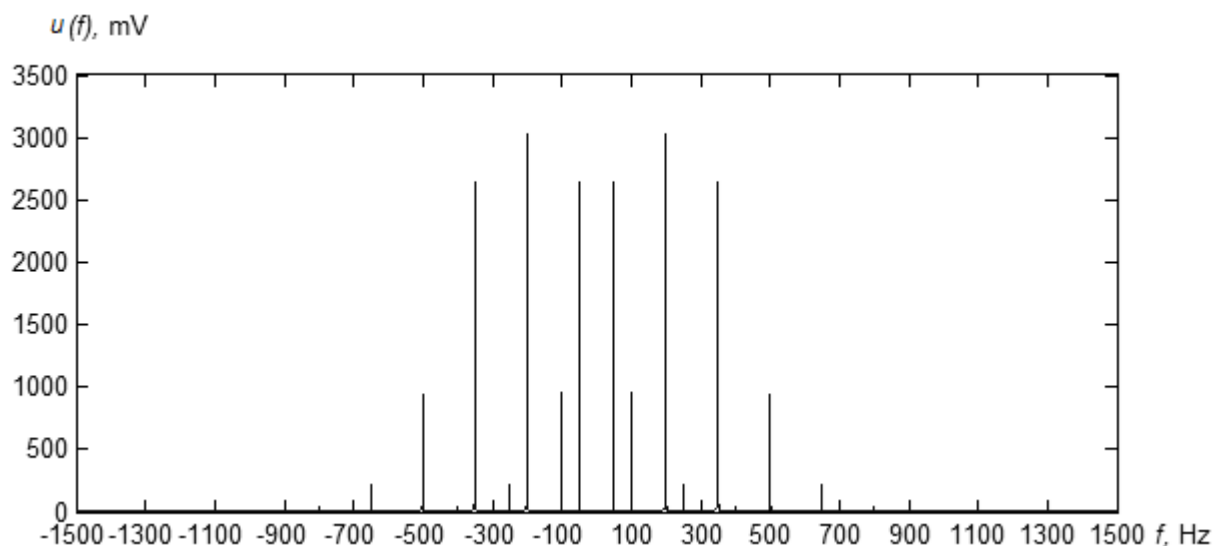
4.11 lentelė. Pradiniai 4.10 – 4.11 paveiksluose pateiktos oscilogramos ir spektro duomenys

Nešlio dažnis, Hz	200
Moduliavimo signalo dažnis, Hz	150
Diskretizavimo dažnis, Hz	10000
Moduliavimo indeksas	2500
Signalų amplitudė, V	1



4.10 pav. Moduluoto dažnio signalo oscilograma, kai nešlio ir moduliavimo signalo dažniai artimi vienas kitam

4.10 ir 4.11 paveiksluose pateiktos signalų oscilogramos ir spektrai gauti, kai nešlio ir moduliavimo signalai artimi vienas kitam.



4.11 pav. Moduluoto dažnio signalo spektras, kai nešlio ir moduliavimo signalo dažniai artimi vienas kitam

4.12 lentelėje pateiktos 4.11 paveiksle pateikto spektro vertės.

4.12 lentelė. 4.11 paveiksle pateikto spektro vertės

Dažnis, Hz	Vertė, mV
±800	36,17
±650	215,7
±500	943,2
±400	35,53
±350	2634
±250	217,2
±200	3030
±100	949,2
±50	2637

Taigi FM sintezatoriai kompiuterių garso plokštėse naudingi tuo, kad galima dinamiškai keisti sintezuojamo garso tembrą ir kurti gamtoje neegzistuojančius garsus. Tam nenaudojama atmintis, kurioje būtų saugomi garsų fragmentai. Tačiau efektingam FM sintezatoriaus veikimui reikalingas spartus procesorius, kuris galėtų realiu laiku vykdyti moduliavimą.

Poskyryje išnagrinėtas dažnio moduliavimu pagrįsto sintezatoriaus veikimas. Pateiktas ir paaiškintas matematinis dažnio moduliavimo modelis. Sukurta *Matlab* programinėje terpėje veikianti programa, skirta dažnių moduliavimo principu veikiančiai sintezei. Programos kodas pateiktas priede I. Išanalizuotas FM sintezatoriaus veikimas ir jo poveikis signalams KGP. FM sintezatoriai KGP rečiau naudojami dėl sudėtingumo.

FM sintezė labai naudinga kuriant naujus, gamtoje neegzistuojančius, sudėtingus garsus, tačiau, jeigu garsas jau egzistuoja ir sintezės tikslas yra tik jį atkurti, geriau KGP naudoti bangų lentelių sintezės metodą.

4.2. Sintezavimas naudojant bangų lentelių sintezatorius

Bangų lentelių sintezatoriai KGP saugo aukštos kokybės garso signalų fragmentus skaitmenine forma ir prireikus KGP gali juos sintezuoti ir atkurti [23 – 31].

Tokiu principu veikiantys sintezatoriai naudoja daug specialių metodų (signalų fragmentų pakartojimas, amplitudės moduliavimas, matematinis interpoliavimas, skaitmeninis filtravimas, signalų dažnių pakeitimas), siekiant sumažinti fragmentų saugomų KGP atmintyje dydį arba padidinti garso signalų fragmentų skaičių [14].

Šiuo metu dauguma aukštos klasės KGP ir išorinių sintezatorių naudoja bangų lentelių metodą. Kai reikia sintezuoti signalus, sintezatorius paima iš savo atminties vieną ar kelis garso signalų fragmentus ir juos komponuoja tarpusavyje arba pritaiko įvairius signalų fragmentų apdorojimo metodus. Dažniausiai taikomas fragmentų pakartojimo metodas. Plačiau apie jį kalbama 4.2.1 poskyryje.

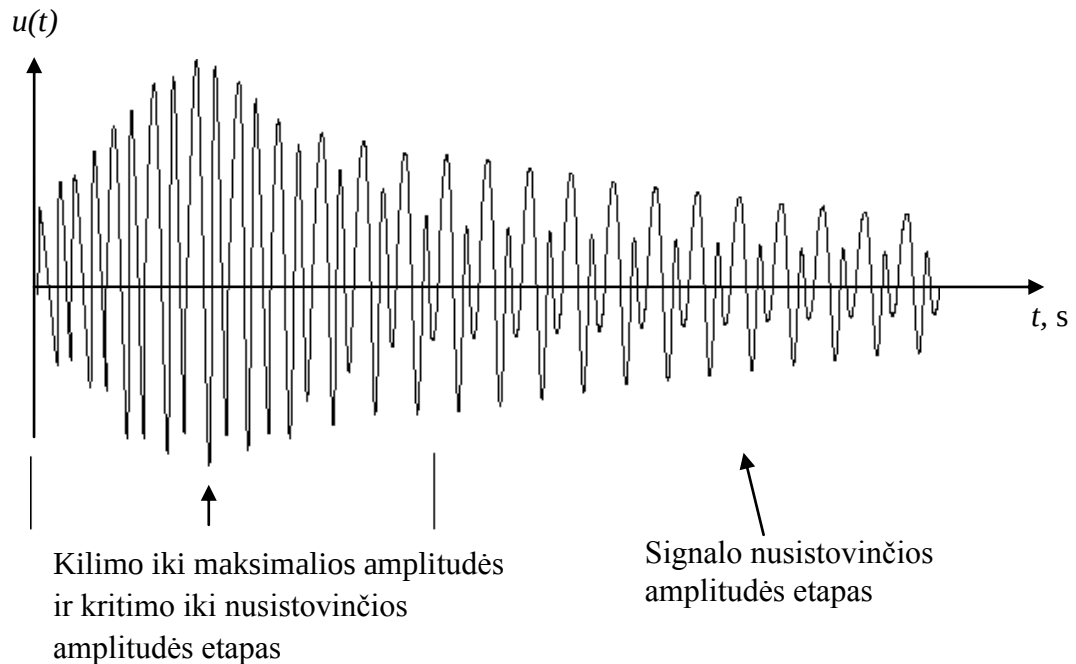
4.2.1. Signalų fragmentų pakartojimas

Vienas iš pagrindinių ir dažniausiai taikomų metodų, norint sumažinti fragmentų dydį, bangų lentelių sintezatoriuose yra signalų fragmentų pakartojimas.

Signalų sintezės laikas yra sudarytas iš dviejų pagrindinių etapų: laiko, per kurį signalas pasiekia maksimalios amplitudės vertę (atakos laikas – angl. *Attack*), ir nusistovinės amplitudės (amplitudės palaikymo – angl. *Sustain*) laiko [23 – 31, 40].

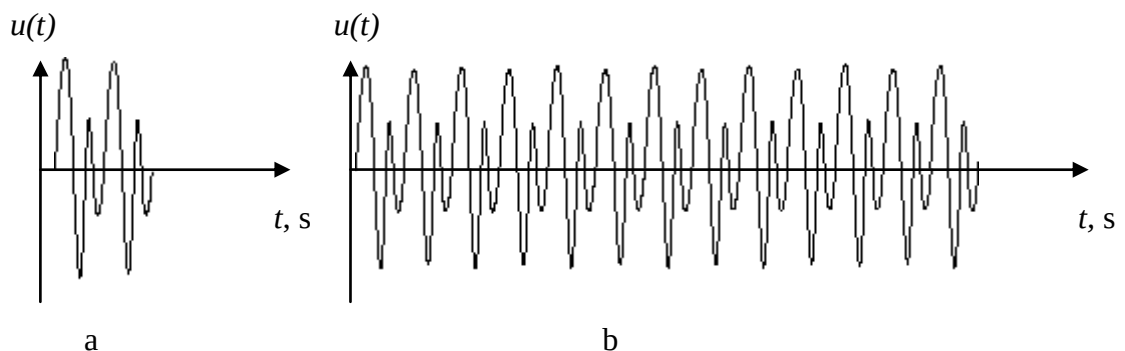
4.12 pav. parodytas signalas su išskirtais sintezės etapais. Pirmasis sintezės etapas – tai pradinės signalo dalies formavimo laikas, kurio metu signalo amplitudė ir spektras labai greitai kinta laike. Antrojo etapo metu sintezuojamas nusistovinės amplitudės signalas, kurio amplitudė

ir spektras mažai kinta laike. Viso antrojo etapo metu garso signalo amplitudė mažėja pastoviu greičiu [14, 40]. Tokio signalo pavyzdį galima būtų vadinti idealiu sintezuojamo signalo modeliu. Realų muzikos instrumentų signaluose tiek spektras, tiek ir amplitudė nors nedaug, tačiau nuolat kinta net nusistovėjusios amplitudės etape.



4.12 pav. Signalas su išskirtais kilimo iki maksimalios ir kritimo iki nusistovėjusios amplitudės bei nusistovėjusios amplitudės etapais

4.13 paveiksle a pavaizduotas signalo fragmentas, sudarytas iš dviejų nusistovėjusios amplitudės signalo, pateikto 4.12 paveiksle, periodų. 4.13 paveiksle b pateiktas signalas, sintezuotas pakartojant anksčiau pateikto signalo fragmentą.

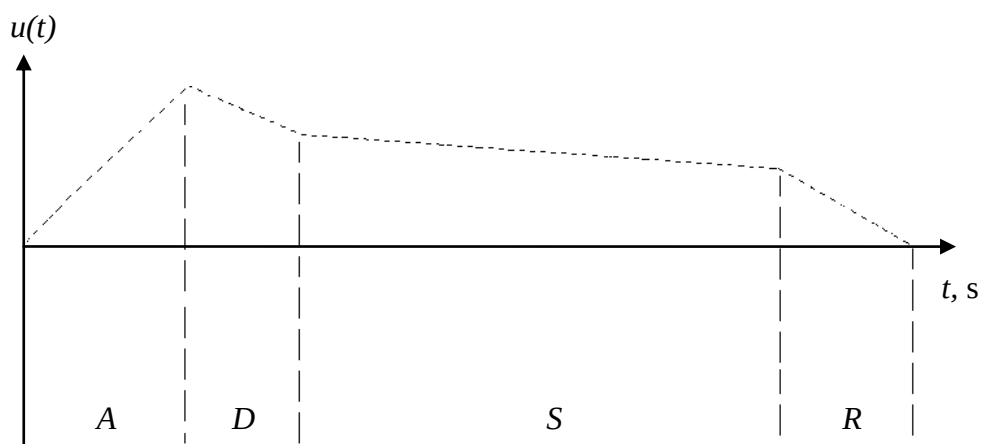


4.13 pav. Dviejų periodų signalo fragmentas (a), signalas, sintezuotas pakartojant fragmentą a (b)

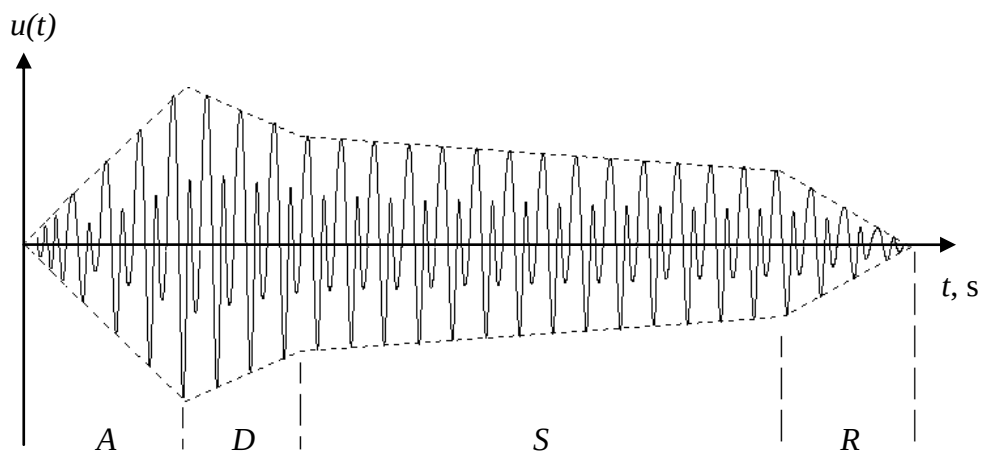
Bangų lentelių metodas lyginant su FM, suteikia galimybę labai sumažinti naudojamos atminties dydį. Tam KGP sintezatoriaus atmintyje saugomi trumpi signalo nusistovėjusios

amplitudės etape fragmentai, kuriuos sintetizatorius gali pakartoti vieną po kito, sukurdamas norimos trukmės garso signalą. Jeigu signalo fragmentas buvo paimtas iš pakankamai stabilią amplitudę ir beveik nekintantį spektrą turinčios dalies (nusistovėjusios amplitudės signalo etapas), tai naujai sintezuotas signalas bus beveik toks pats, kaip visa nusistovėjusi signalo dalis iš originalaus, nesintezuoto signalo. Norint suteikti naujai sintezuotam signalui reikiamą formą, papildomai keičiama jo amplitudė. Signalų amplitudės moduliavimo procesą galima pateikti modelio, sudaryto iš keturių etapų pavidalu. Jis dar vadinamas ADSR (angl. *Attack-Decay-Sustain-Release*) modeliu.

4.14 paveiksle pavaizduotas ADSR modelis. 4.15 paveiksle pateikiamas signalo pavyzdys, gautas 4.13 paveiksle b pavaizduotam signalui pritaikius amplitudės moduliavimą pagal ADSR modelį [23 – 31, 40].



4.14 pav. ADSR modelis, sudarytas iš keturių etapų: A (*Attack* – ataka), D (*Decay* – slopimas), S (*Sustain* – palaikymas) ir R (*Release* – galutinis slopimas)



4.15 pav. Signalų pavyzdys, gautas 4.13 paveiksle b pavaizduotam signalui pritaikius amplitudės moduliavimą pagal ADSR modelį

Tipinis KGP bangų lentelių sintetizatorius savo atmintyje saugo tik *A* ir *S* etapuose moduluotas signalo dalis.

Amplitudės moduliavimas naudojamas siekiant sukurti signalo gaubtinę, kurią vėliau galima pritaikyti išsaugotiems signalo fragmentams jų atkūrimo metu.

Taigi atkuriant norimo muzikos instrumento ar garso signalą, iš pradžių atkuriamas signalo fragmentas, gautas *A* ir *D* etapų metu.

Signalio trukmę nustato fiksuotas fragmento pakartojimų skaičius, kuris skirtingiems instrumentams ar garsams yra iš anksto numatytas.

Signalui perėjus į nusistovinės amplitudės etapą *S*, jo fragmentas, gautas šiame etape, taip pat yra pakartojamas, kol pereina į galutinį atkūrimo etapą *R*, kuriame yra visiškai nuslopinamas.

Tokiu principu yra kuriama reikalinga signalo forma. Toks sintezės metodas leidžia sutaupyti KGP sintetizatoriui daug atminties, tačiau ne visi signalai gali būti išskaidyti į anksčiau minėtus keturis etapus.

Metodo negalima taikyti, kai originalūs signalai yra labai mažos trukmės.

Šių signalų charakteristikos dinamiškai kinta viso signalo atkūrimo metu ir yra beveik neįmanoma išskirti *A*, *D*, *S* ir *R* etapų.

Tokie gali būti mušamųjų instrumentų garso signalai. Todėl bangų lentelių sintetizatoriuose jie yra saugomi vieno fragmento pavidalu ir jiems netaikomas pakartojimo metodas.

4.2.2. Signalų fragmentų paruošimas

Yra nemažai signalų fragmentų paruošimo metodų, reikalingų paruošti signalų fragmentus KGP bangų lentelių sintetizatoriui atkurti. Keli metodai buvo paminėti ankstesniame poskyryje, kalbant apie fragmentų pakartojimą ir keturių etapų signale išskyrimą [23 – 31].

Fragmentų paruošimas reikalingas pritaikant juos ir pakartojimo procesui. Jeigu signalų fragmentų pradžios amplitudė bei forma labai smarkiai skiriasi nuo amplitudės ir formos fragmentų pabaigoje, atkuriant signalus ir naudojant fragmentų pakartojimą bus girdimas trūkčiojimas. Taip pat fragmentų paruošimas reikalingas siekiant sumažinti ne tik KGP sintetizatoriuje naudojamos atminties dydį, bet ir signalų kvantavimo triukšmus. Dažniausiai tam naudojamas signalų fragmentų dinaminio diapazono suspaudimas [14].

Signalų fragmentų dinaminio diapazono ir saugomų fragmentų dydžio suspaudimas

Signalų fragmentų dinaminis diapazonas – tai santykis tarp signalų fragmentų maksimalios ir minimalios amplitudės reikšmių. Signalų amplitudės ir kvantavimo triukšmų santykis, kuris priklauso nuo to, kokia yra signalo fragmento amplitudė ir kiek bitų skiriama vienam signalo fragmentui užkoduoti.

Daugumos akustinių muzikos instrumentų garso signalai pasiekia maksimalią amplitudę labai greitai. Pasiekus maksimumą, signalo amplitudė palaipsniui mažėja.

Žmogaus ausis dinamiškai prisitaiko prie girdimojo garso amplitudės.

Kai signalo amplitudė yra maksimali ir naudojamas labai mažas bitų skaičius garso signalo fragmentui užkoduoti, triukšmas, atsiradęs dėl kvantavimo procesų, yra nepastebimas.

Tačiau, signalo amplitudei slopstant, jis pasidaro labiau girdimas.

To galima išvengti, naudojant didesnę bitų skaičių signalo fragmentui koduoti, tačiau tokiu atveju KGP sintezatoriuje bus labiau išnaudojama atmintis.

Garso signalų fragmentams galima naudoti suspaudimo procesus. Jie sumažina signalų fragmentų, saugomų KGP sintezatoriaus atmintyje, dydį.

Atkūrimo metu vyksta glaudinimui atvirkščias išplėtimo procesas, kurio metu atkuriamas signalo fragmentų dydis.

Tokiems procesams galima priskirti ir signalų pakartojimo metodą.

Dažnių pakeitimas

Siekiant sumažinti didelės atminties reikalavimus KGP sintezatoriams, bangų lentelių sintezatoriuose naudojamas dažnių pakeitimo metodas, kuris leidžia sukurti kelis skirtingus fragmentus iš vieno garso fragmento. Jeigu sintezatoriaus atmintyje saugomas muzikinio instrumento garso fragmentas, atitinkantis *mi* natos garsą, tai, pritaikius dažnių pakeitimo metodą, šį garso fragmentą galima panaudoti sintezuojant *re* arba *fa* natų garsus.

Dažnių pakeitimo metodas realizuojamas atkuriant saugomus garso fragmentus skirtingu greičiu. Pvz., jeigu į KGP bangų lentelių sintezatoriaus atmintyje esantį garso fragmentą kreipiamasi kas sekundę, bus atkuriamas tam tikro dažnio garso signalas, tačiau, jeigu kreipimosi intervalą sumažinti (padidinti dažnį), t. y., į fragmentą bus kreipiamasi kas pusę sekundės, atkuriamojo signalo fragmento dažnis padvigubės. Taigi didinant arba mažinant fragmentų pakartojimo dažnį, galima gauti skirtingo tono garsus.

Kai signalo fragmentų atkūrimo metu yra keičiamas jų atkūrimo dažnis, šiek tiek pakinta ir garso tembras. Tembro pokytis yra mažiau pastebimas, kai dažnis pakinta nežymiai.

Vibrato, tremolo ir LFO

KGP sintezatoriai naudojami ne tik atkurti konkretiems garsams, bet ir sukurti garso efektams. *Vibrato* ir *tremolo* – du garso efektai, kuriuos galima išgirsti muzikantams grojant instrumentais. *Vibrato* efektas – garso signalui pritaikytas žemųjų dažnių moduliavimas, o *tremolo* efektas – garso signalui pritaikytas amplitudės moduliavimas.

Šie efektai KGP sintezatoriuose sukuriama naudojant žemųjų dažnių generatorius LFO (ang. *Low-Frequency Oscillators*), kurie moduliuoja nešlio signalo dažnį arba amplitudę.

Vibrato ir *tremolo* efektai yra linkę sustiprėti, kai atkuriamas signalas pasiekia nusistovėjusios amplitudės etapą. KGP sintezatoriuose tai įgyvendinama panaudojant amplitudės moduliavimą kartu su LFO. Pvz., atkuriant fleitos skleidžiamą garsą *vibrato* efektas pasireiškia netrukus po garso pradžios, o *tremolo* efektas palaipsniui ryškėja viso signalo atkūrimo metu iki pabaigos.

Signalų „sluoksniavimas“

KGP bangų lentelių sintezatorius naudoja ir „sluoksniavimo“ metodą. „Sluoksniavimo“ metodas skirtas sintezuoti vienam garso signalui.

Metodo esmė – sintezuojant garsą naudojamas ne vienas, o keli garso signalų fragmentai. Sintezuojamas signalas sudaromas iš kelių skirtingų fragmentų, pritaikant visus anksčiau paminėtus apdorojimo metodus.

Šis metodas suteikia galimybę sintezuoti sudėtingus garso signalus bei padidinti skirtingų muzikos instrumentų skaičių iš riboto signalų fragmentų rinkinio.

Sluoksniuotų signalų panaudojimas apriboja fragmentų panaudojimą garso atkūrimo metu, nes tuo pačiu metu negalima kreiptis į jau naudojamus garso signalų fragmentus, norint sintezuoti dar vieną garso signalą.

Skaitmeninis filtravimas žemųjų dažnių filtru

Sintezuojant garso signalą dėl įvairių priežasčių (kvantavimo, dažnių pakeitimo procesų ir t. t.) atsiranda triukšmai. Tam KGP bangų lentelių sintezatoriuose taikomas skaitmeninis garso signalų filtravimas [23 – 31].

Jį galima pritaikyti, siekiant pagerinti sintezuojamojo garso kokybę. Pvz., grojant realiu instrumentu, tegul tai būna pianinas, garso skambesys priklauso nuo to, kaip smarkiai yra

paspaudžiamas pianino klavišas. KGP bangų lentelių sintezatoriai tokį garso atkūrimo efektą gali įgyvendinti keliais būdais.

Pirmasis, jau minėtas, būdas yra naudoti kelis garso fragmentus ir juos atkurti skirtingais greičiais, t. y., pritaikyti dažnių pakeitimą ir „sluoksniavimą“. Antrasis būdas yra naudoti skaitmeninį žemųjų dažnių filtravimą.

Toks skaitmeninis filtras pakeičia sintezuojamojo signalo dažnių spektrą ir efektyviai atkuria akustinių instrumentų garsų tembrą. [23 – 31].

KGP bangų lentelių sintezatoriai naudoja daug skirtingų metodų ir procesų, kurie leidžia sintezuoti tiek paprastus, tiek ir labai sudėtingus garso signalus.

Pagrindinė problema, išskylanti sintezės metu, yra triukšmai, atsirandantys dėl kvantavimo ir dažnių pakeitimo procesų.

Daug dėmesio skiriama bangų lentelių sintezatoriuose naudojamu garso fragmentų dydžio mažinimui. Akivaizdu, kad didesnės atminties panaudojimas padidina sintezatorių galimybes, tačiau didesnė atmintis reiškia padidėjusias sintezatorių kainas.

Daugumos KGP gamintojų tikslas yra kurti ne tik labai sudėtingus ir daug galimybių turinčius, bet ir laisvai rinkoje prieinamus produktus. Todėl tenka įvertinti visus poreikius, atitinkamai derinant sintezatorių sudėtingumą, galimybes ir jų realizavimo kainą.

Lyginant KGP FM ir bangų lentelių sintezatorius matoma, kad FM sintezatoriams reikalingas spartesnis procesorius nei bangų lentelių sintezatoriams. Tačiau FM sintezė leidžia sintezuoti visiškai naujus ir labai sudėtingus garso signalus.

Bangų lentelių sintezatoriai nereikalauja galingų ir sparčių procesorių, tačiau, norint padidinti sintezuojamųjų garsų skaičių ir sudėtingumą, gali tekti naudoti didesnę ir brangesnę sintezatoriaus atmintį.

Šiuo metu bangų lentelių sintezatoriai naudojami KGP plačiau nei FM sintezatoriai, nes jų veikimo principas paprastesnis.

4.3. MIDI sintezatorių ir KGP sąveika

MIDI sintezatorius dažniausiai suprantamas kaip išorinis įrenginys, sintezuojantis muzikinius garso signalus. Tačiau jis gali būti naudojamas kartu su KGP [32, 36].

Išorinis sintezatorius siunčia į KGP MIDI mikrovaldiklį komandas (instrukcijas), kurias garso plokštė interpretuoja ir sintezuoja reikalingus garsus.

MIDI (angl. *the Musical Instrument Digital Interface*) yra muzikos instrumentų skaitmeninė sąsaja.

MIDI mikrovaldiklio sąsaja sujungia išorinį MIDI sintezatorių su asmeninio kompiuterio garso plokšte.

MIDI mikrovaldiklis siunčia komandas tik 8 bitų ilgio žodžiais. Šie žodžiai turi visą reikalingą informaciją, kurios reikia KGP, norint sintezuoti pasirinktą garsą, instrumento tipą, garso tono aukštį, trukmę, virpesių slopinimą ir t. t.

Kiekvienas išorinio sintezatoriaus kanalas atitinka skirtingus instrumentus arba balsus.

Kiekvienoje MIDI komandoje gali būti iki 8 bitų duomenų apie instrumento tipą, natą, garso trukmę.

Tam, kad tą pačią MIDI sintezatoriaus komandą visų kompiuterių garso plokštės suprastų vienodai, jos turi būti suderintos su MIDI standartu, nurodančiu numerius kanalų, kuriais turi būti perduodami garsų signalai.

Egzistuoja trys pagrindiniai standartai: *General MIDI*, *General Standart* ir *Extended General*, kurie skiriasi papildomų komadų skaičiumi.

Daugelis garso plokščių yra suderinamos ir su gana plačiai paplitusiu *Roland* kompanijos standartu GS (angl. *General Synthesizer*), kuris nurodo, kaip tvarkyti papildomų garsų sintezavimą.

MIDI komandomis galima tuo pačiu metu valdyti iki 64 garsų signalus ir imituoti visą orkestrą.

MIDI mikrovaldiklio sąsaja yra pusiau dvi kryptė (angl. *half duplex*) ir perduoda 8 bitų komandų srautą dviem kryptimis iš eilės.

Šio srauto greitis 31,25 (+/- 1 %) kilobodų (simbolių kiekis, išsiųstas per sekundę). Tačiau jis yra nepastovus, nes simbolis ar bodas gali turėti vieną ar daugiau bitų [32, 36].

Kaip anksčiau buvo minėta, išorinis MIDI sintezatorius iš tikrųjų nesiunčia muzikinių garso signalų, tik labai paprastas komandas, į kurias reaguoja jas gaunanti KGP.

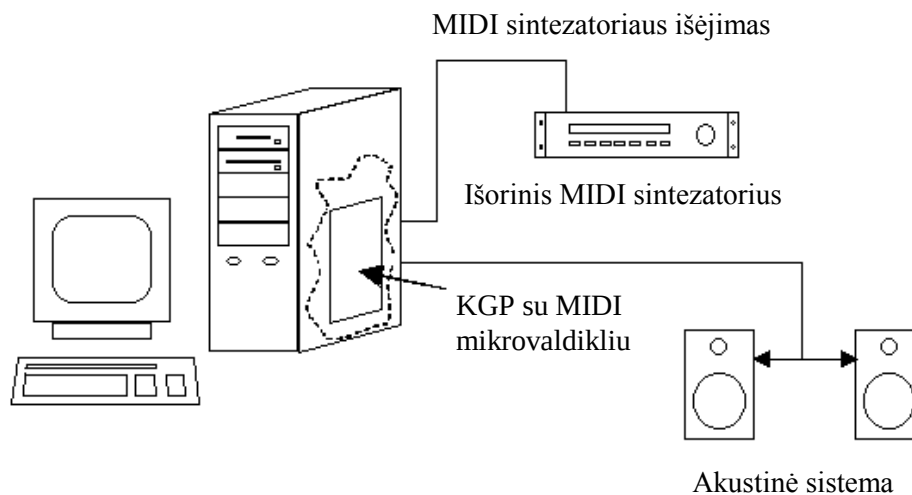
KGP sujungimui su išoriniu MIDI sintezatoriumi naudojami ekranuoti vytos poros kabeliai.

Tačiau KGP gali turėti ir vadinamąją „MIDI – THRU“ jungtį. Joje išorinio sintezatoriaus įėjimas ir išėjimas yra vienoje jungtyje ir naudojamas vienas kabelis, kuris sujungia KGP su MIDI išorinio sintezatoriaus išėjimu (4.16 pav).

KGP „kalbantis“ per MIDI sąsają su išoriniu MIDI sintezatoriumi, abu įrenginiai gali būti elektriškai izoliuoti, naudojant optinius izoliatorius, kurie yra reikalingi norint užtikrinti saugumą ir išvengti pašalinių trukdžių.

Tai svarbu tiek garso šaltinio (MIDI sintezatoriaus), tiek kompiuterio garso plokštės įrangos dalims.

Tam reikalingas specialus kabelis. Tačiau daugeliui KGP jis nepridedamas kaip standartinis priedas.



4.16 pav. Kompiuteris su MIDI sistema

Aptarkime MIDI sintetatoriaus, prijungto prie KGP per išorinio MIDI mikrovaldiklio sąsają, valdymą.

Kai sintetatoriaus klaviatūros klavišas paspaustas, MIDI kabeliu siunčiama komanda liepianti priėmimo įrenginiui (šiuo atveju KGP) sintezuoti komandoje nurodytą garsą.

MIDI komandas galima suskirstyti į balso (angl. *voice*) ir būsenos (angl. *mode*) [32].

Iš MIDI sintetatoriaus siunčiamos balso komandos sudarytos iš trijų elementų:

- būsenos baido – informacijos apie įvykio tipą (šiuo atveju paspaustą klaviatūros klavišą „ON”).
- simbolio numerio, kuris apibūdina paspaustą klavišą ir jėgą, su kuria tai buvo padaryta. Priėmimo įrenginys sintezuos garsą tol, kol gaus komandą („OFF”), kad klaviatūros klavišas jau nepaspaustas.
- greičio reikšmės – kuri apibūdina koku greičiu paspaudžiamas klaviatūros klavišas.

Priklausomai nuo to, balso ar būsenos yra siunčiamos, KGP sintetizatorius reaguos skirtingai. Pvz., fortepijono garsai bus atkuriami garsiau, kai MIDI sintetatoriaus klavišas paspaudžiamas staigiau. Profesionalūs sintetizatoriai dažnai turi įdiegtas papildomų garsų bibliotekas.

Taigi MIDI sintetizatorius, lyginant su dviem anksčiau aptartais FM ir WT sintetizatoriais, nesaugo savo atmintyje garso signalų fragmentų ir nesintezuoja jų realiu laiku, o perduoda juos komandų pavidalu į KGP.

KGP gali atkurti tik jai žinomus, iš anksto instrukcijomis aprašytus garso signalus. Lyginant su FM ir bangų lentelių sintezatoriais, išorinis MIDI sintezatorius yra sparčiausias, tačiau turi mažiausiai galimybių, nes siunčia tik komandas, o pačią sintezę dažniausiai vykdo KGP bangų lentelių sintezatorius. MIDI sintezatorius gali veikti ir autonomiškai, jeigu jame įdiegtas WT sintezatorius.

Skyriuje aptarta sintezatorių vystymosi istorija ir jų pagrindiniai tipai, naudojami KGP. Šiuo metu asmeninių kompiuterių garso plokštėse naudojami FM ir bangų lentelių sintezatoriai bei MIDI mikrovaldiklio sąsaja. Detaliai išnagrinėta FM sintezė. Išnagrinėtas bangų lentelių sintezės metodas. Ištirtas bangų lentelių sintezatoriaus veikimas ir jo poveikis signalams. Šiuo metu bangų lentelių sintezatoriai yra plačiausiai naudojami KGP [36].

Šie sintezatoriai spartesni ir paprastesni negu FM sintezatoriai. Tačiau tyrimo metu buvo išsiaiškinta pagrindinė tokių sintezatorių problema – atminties dydis, reikalingas saugoti garso fragmentams. Atmintis, kurioje yra saugomi garso signalų fragmentai, yra brangi.

Norint sumažinti atminties dydį, reikia naudoti naujus būdus, kurie leistų mažinti signalų fragmentų dydžius, neprarandant jų kokybės ir skaičiaus.

Galima teigti, kad bangų lentelių sintezatorius galima tobulinti, siekiant pašalinti anksčiau minėtą problemą.

Taip pat išnagrinėtas išorinio MIDI sintezatoriaus veikimas ir ryšys su KGP. Išorinis MIDI sintezatorius nėra KGP dalis, tačiau gali veikti kartu su KGP papildomo KGP mikrovaldiklio ir kabelio, jungiančio išorinį MIDI sintezatorių su KGP, dėka. Ištirta MIDI mikrovaldiklio paskirtis ir veikimas. Deja, MIDI sintezatorius neatsiejamas nuo vidinio bangų lentelių sintezatoriaus, esančio asmeninio kompiuterio garso plokštėje.

5. KGP PROCESORIAI IR FILTRAI, GARSO SIGNALŲ APDOROJIMAS JUOSE

Skyriuje nagrinėjami KGP procesoriai ir filtrai, garso signalų apdorojimas juose. [23 – 31].

Skaitmeninis signalų apdorojimas (SSA) yra mokslo ir technikos sritis, kuri šiuo metu labai intensyviai vystosi. Taip yra dėl kompiuterinės technikos išsivystymo ir jos plataus taikymo įvairiose gyvenimo srityse. Kol kompiuterinė technika buvo nepakankamai išsivysčiusi, signalų apdorojimo uždaviniai buvo sprendžiami, naudojant analogines grandines ir sistemas. Vėliau daugelį signalų apdorojimo uždavinių pasidarė spresti patogiau, panaudojant skaitmeninę techniką.

Skaitmeninė technika yra universalesnė, nes tas pats kompiuteris tinka daugelio signalų apdorojimo uždaviniams spresti, belieka tik jį atitinkamai užprogramuoti. Tačiau analoginių signalų skaitmeninis apdorojimas turi ir kelis trūkumus.

Analoginių signalų apdorojimas, sudarytas iš diskretizavimo ir kvantavimo procesų, sukelia iškraipymus, kurie neleidžia iš kvantuotų imčių atstatyti originalų analoginį signalą. Šiuos iškraipymus galima sumažinti, parenkant didesnę diskretizavimo dažnį ir kvantavimo tikslumą. Be to, analoginių signalų apdorojimo teorija netinka skaitmeniniam signalų apdorojimui dėl diskretinės skaitmeninių signalų prigimties [15 – 16]. Apdorojant signalus naudojama sistemos sąvoka.

Sistema gali būti apibrėžta kaip fizinis įrenginys, kuris atlieka veiksmus su signalu. Kai praleidžiame signalą per sistemą, sakome, kad apdorojame signalą. Tiriamu atveju sistema yra kompiuterio garso plokštė. Operacijos, atliekamos su signalu, yra vadinamos signalų apdorojimu.

Kompiuterių garso plokštėse signalai dauguma atvejų apdorojami skaitmeniniu būdu. Skaitmeninio signalų apdorojimo atveju patogiau išplėsti sistemos apibrėžimą taip, kad į jį įeitų ne tik fiziniai įrenginiai, bet ir operacijų su signalais programos. Šiuo atveju operacijos, atliekamos su signalais, sudaromos iš kelių matematinių operacijų, kurios aprašomos kompiuterio programoje. Tokiu būdu programa yra sistemos realizavimas, pavyzdžiui, kompiuterio garso plokštėje.

SSA gali būti atliktas naudojant skaitmeninę techninę įrangą, kuri yra sukonstruota taip, kad atliktų tam tikrus norimus veiksmus. Bendru atveju sistema gali būti realizuota derinant skaitmeninę techninę ir programinę įrangą. Sistemos atliekami veiksmai gali būti apibrėžti matematiškai [6].

Dauguma signalų, sutinkamų moksle ir technikoje, savo prigimtimi yra analoginiai, t. y. šie signalai yra tolydaus kintamojo funkcijos ir įgyja reikšmes iš tolydaus diapazono. Tokie signalai gali būti apdoroti analogine sistema, kad būtų pakeistos jų charakteristikos ar gauta reikalinga informacija.

Skaitmeninis signalų apdorojimas įgalina alternatyviai apdoroti analoginius signalus. Kad būtų atliktas skaitmeninis apdorojimas, tarp analoginio signalo ir skaitmeninio procesoriaus yra reikalingas interfeisas (ryšio įrenginys), kuris vadinamas keitikliu analogas-skaičius (A/S).

Skaitmeninių signalų procesoriumi gali būti kompiuteris arba mikroprocesorius, kuris yra programuojamas, kad su įėjimo signalu atliktų pageidaujamas operacijas. Taip pat tai gali būti neprogramuojamas skaitmeninis procesorius, kuris yra sukonstruotas atlikti tam tikrą nekeičiamą veiksmų seką su įėjimo signalu [15 – 16].

Kompiuterių garso plokštėse skaitmeninis signalų apdorojimas vyksta KGP procesoriuose, apie kuriuos rašoma žemiau.

5.1. KGP procesorių tipai ir jų veikimas

Poskyryje nagrinėjami KGP procesorių tipai ir jų veikimas. Norint nagrinėti jų veikimą, reikia išsiaiškinti, kokie tai įrenginiai [41].

KGP procesorius yra jau anksčiau minėtas skaitmeninių signalų procesorius (SSP).

SSP – specialios paskirties centrinis procesorinis įrenginys, vykdomas instrukcijų sekas, skirtas atlikti postūmio, sudėties, dalybos, daugybos ir kt. operacijas, dažnai naudojamas signalų apdorojimo procesuose.

SSP yra skirti signalų apdorojimo uždaviniams spręsti. SSP galima klasifikuoti į mažo našumo (MN) ir didelio našumo (DN). MN SSP pavyzdžiu gali būti *Texas Instruments TMS320C54x* šeima, o prie DN galima priskirti *ADI TigerSharc* ir *TI TMS320C6xxx* šeimų atstovus. DN SSP vykdo net po kelias sudėtingas komandas vienu metu. SSP architektūros yra orientuotos į matematinių skaitmeninio signalų apdorojimo algoritmų vykdymą [41].

Populiariausias iš jų yra rekursija (angl. *Convolution*), naudojama, pavyzdžiui, ir RIR ribotos impulsinės reakcijos filtruose (liet. RIR) (angl. FIR – *Finite Impulse Response*):

$$y(n) = \sum_{i=0}^N h_i * x(n-i) = h_0 * x(n) + h_1 * x(n-1) + \dots + h_N * x(n-N), \quad (5.1)$$

čia $y(n)$ – signalas RIR išėjime, $x(n)$ – diskretizuotas ir kvantuotas įvesties signalas RIR įėjime, h_i – skaitmeninio filtro koeficientai, N – filtro eilė, n – takto (iteracijos) numeris.

Realizuojant tokį filtravimą tenka atlikti n daugybos ir gautų rezultatų sumavimo arba akumuliacijos operacijų.

Tokiu atveju SSP yra komponuojami su aparatiniais daugintuvais-akumulatoriais (angl. MAC – *Multiply-Accumulator*), realizuojančiais daugybą ir sumavimą per vieną sinchronizavimo taktą.

Daugelis SSP gamintojų tam naudoja Harwardo architektūrą, atmintį dalindami į dvi dalis (komandų ir duomenų) su atskiromis magistralėmis kiekvienai iš jų.

Atminties adresavimui yra naudojamos atitinkamos aparatinės priemonės – adresų generatoriai. Pastarieji funkcionuoja lygiagrečiai su SSP procesoriumi ir atpalaiduoja jį nuo atminties adreso formavimo [15 – 16, 41].

SSP algoritmai yra gana šabloniški. RIR filtro atveju koeficientų masyvas perrenkamas nuo pirmojo iki paskutinio elemento.

SSP šiam atvejui naudoja netiesioginį registrinį adresavimo su postinkrementavimu būdą. Būtent jis leidžia efektyviai cikliška kreiptis į nuosekliai adresuojamas sritis, realizuojant taip vadinamą žiedinį adresavimo būdą (angl. *Circular Addressing*). Šis būdas yra labai patogus formuojant FIFO (angl. *First In First Out*) buferius ir vėlinimo linijas RIR filtrams.

Dar viena būdinga SSP savybė yra dvejetainis-inversinis adresavimas, naudojamas greitosios Furje transformacijos (angl. FFT – *Fast Fourier Transform*) skaičiavimams. Dauguma MN SSP naudoja tam tikru (dažniausiai 16-os ir 32-jų) bitų skaičiumi apriboto fiksuoto kabelio aritmetiką (angl. *Saturation Arithmetic*), o DN SSP gali realizuoti ne tik fiksuoto (sutinkami 20, 24 ir 32-jų bitų variantai), bet ir slankaus kabelio operacijas.

Pirmuoju atveju, jeigu rezultatas viršija maksimalią ribą, jam priskiriama maksimali galima reikšmė. Jeigu rezultatas yra mažesnis už minimalią reikšmę, jam yra priskiriama minimali galima reikšmė.

MN SSP vartoja mažiau galios ir yra pigesni už DN, todėl dažniau naudojami įrenginiuose, kurių kaina yra svarbi.

SSP naudojami akumulatoriai paprastai yra didesnio skilčių skaičiaus, norint išvengti rezultatų perpildymo. Papildomai numatytos priemonės skaičių apvalinimui, normavimui ir postūmiui.

Dauguma SSP turi efektyvias priemones ciklams realizuoti. Tam yra numatytos specialios ciklų ir pakartojimų operacijos [41].

SSP komandų sąrašai sudaryti taip, kad patenkintų du tikslus, t. y., kad pasiektų maksimalią skaičiavimo spartą ir sumažintų reikalingą atminties apimtį.

Pirmojo tikslo siekiama lygiagretinant veiksmus, antrojo – darant trumpas komandas, mažinant bitų, reikalingų komandos kodui dekoduoti, skaičių.

Dažnai SSP turi nedidelį registrų skaičių, juose atskiri bitai yra naudojami tam tikroms procesoriaus operacijoms (pvz., apvalinimo) valdyti.

Apibendrinus galima pasakyti, kad MN SSP turi gana sudėtingą, specializuotą ir nereguliarių komandų sąrašą. Juose yra naudojamos kelios atminčių sritys, kelios, joms skirtos, adresų-duomenų magistralės, specialios aparatinės priemonės matematinėms operacijoms ir atminčiai adresuoti.

Dėl to kai kurių SSP C kalbos kompiliatoriai nėra pakankamai efektyvūs ir dažnai, ypač kompiuterių garso plokščių atveju, tenka naudoti programavimą Asemblerio kalba.

DN SSP paprastai atlieka kelias operacijas per vieną taktą, naudodami konvejerius (angl. *Multi-Issue Architecture*). Šių SSP komandos yra gana paprastos, artimos RISC (angl. *Reduced Instruction Set Computer*) komandoms.

Kadangi jų architektūra gana reguliari, tai ir kompiliatoriai yra efektyvūs. Tokių SSP pavyzdžiu yra TI šeima TMS320C62x.

Tai VLIW (angl. *Very Long Instruction Word*) architektūros procesoriai (rinkai pateikti 1996 m.), kuriuose yra pasiektas ryškus žingsnis efektyvumo didinimo link. Vėliau šiuo keliu pasekė ir kiti SSP gamintojai – ADI bei *Freescale* [41].

Šiuo atveju yra atliekama nuo keturių iki aštuonių operacijų per taktą, o Asemblerio programuotojas (arba C kompiliatorius) turi nurodyti, kokios operacijos turi būti vykdomos lygiagrečiai.

VLIW SSP yra naudojamas 32-jų bitų komandų formatas, nes čia tenka nurodyti, koks funkcinis mazgas (jų skaičius gali siekti aštuonis) turės įvykdyti šią operaciją. Šiuo atveju galima adresuoti ir didesnę registrų skaičių.

VLIW komandų sąrašas yra paprastesnis ir reguliaresnis, su jomis yra patogiau atlikti registrines operacijas, realizuoti įvairesnius adresavimo metodus, lyginant su MN SSP.

Dėl šių priežasčių yra paprasčiau programuoti Asemblerio kalba, nors C kompiliatorius yra paprastesnis ir efektyvesnis.

Bet kadangi jo komandos yra paprastos, jų kiekis programoje išauga ir pareikalauja didesnio atminties kiekio, o tokio SSP kaina išauga, todėl išauga ir garso plokštės kaina.

Kai kurie DN SSP naudoja ne tik 32-jų, bet ir 16-os bitų komandas. Toks mišrus būdas gali būti naudingas siekiant kompromiso tarp našumo ir atminties dydžio [41].

KGP plokštėje svarbią vietą užima ne tik procesorius, bet ir skaitmeniniai filtrai, o tiksliau – juose vykstantys garso signalų apdorojimo procesai.

5.2. Skaitmeniniai filtrai ir jų skaičiavimas

Jau daugelį metų skaitmeninis filtravimas yra dažniausiai naudojama skaitmeninio signalų apdorojimo operacija realaus laiko sistemose.

Skaitmeniniai filtrai yra daugelio realaus laiko sistemų (RLS) sudėtinės dalys. Pavyzdžiui, mobiliajame telefone yra atliekamas balso signalų filtravimas. Kompiuterių garso plokštėse atliekamas balso ir kitų garso signalų filtravimas [2, 42 – 45].

Filtravimas yra viena iš pagrindinių skaitmeninių signalų apdorojimo operacijų. Filtras – tai, įtaisas kuris, remdamasis konkrečiu kriterijumi, bando atskirti tam tikras signalo dalis.

Yra du pagrindiniai skaitmeninių filtrų tipai: ribotos impulsinės reakcijos ir begalinės impulsinės reakcijos (BIR).

Projektuojant abiejų tipų filtrus galima išskirti du bendrus etapus: *aproksimavimas*, kai norima perdavimo funkcija yra aproksimuojama galima perdavimo funkcija, ir *realizavimas*, kai perdavimo funkcija yra realizuojama „geležyje“ arba programiniu būdu [15 – 16].

Aproksimavimo dalis filtro projektavime gali būti padalinta į keturis nuoseklius žingsnius, kurie yra kartojami kelis kartus, kol gaunamos reikalingos filtro charakteristikos:

- Pasirenkama norima ideali perdavimo charakteristika, paprastai dažnių srityje;
- Pasirenkama leidžiama filtrų klasė (pvz., RIR filtras);
- Pasirenkamas aproksimavimo kokybės kriterijus;
- Sukuriamas metodas, kuris įgalina rasti „geriausią“ aproksimavimą leistinų filtrų klasėje pagal pasirinktą kriterijų.

Praktikoje dažniausiai naudojami du aproksimavimo paklaidos matai: mažiausia vidutinė kvadratinė paklaida (MVKP) ir Čebyševio paklaida.

Mažiausia vidutinė kvadratinė paklaida yra svarbi, nes paklaidos dydis yra vertinamas pagal signalo galią arba energiją.

Čebyševio paklaida turi svarbią fizikinę prasmę, nes ji rodo maksimalų skirtumą tarp to, kas norima, ir to, kas gaunama [2]. Kitame poskyryje aptarsime RIR ir BIR filtrų savybes, jų skaičiavimo procesus.

5.2.1. Signalų apdorojimas RIR filtrais ir jų skaičiavimas

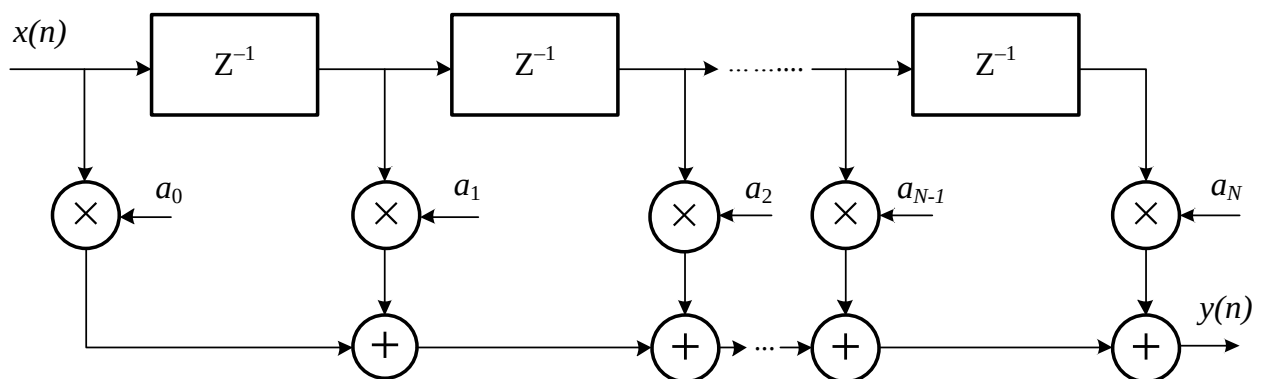
Poskyryje nagrinėjamas signalų apdorojimas RIR filtrais, jų matematinis skaičiavimas.

RIR filtro impulsinės reakcijos (IR) diskreti Furje transformacija (DFT) duoda tolygiai išsidėsčiusias dažninės charakteristikos atskaitas. Tai siūlo paprastą filtro skaičiavimo metodiką. Pasirenkama ideali perdavimo charakteristika, ji diskretizuojama ir, atlikus atvirkštinę DFT, gaunama filtro impulsinė reakcija [2, 38].

Šis metodas yra vadinamas dažnio diskretizavimu. Taip apskaičiuoto filtro dažninė charakteristika tiksliai interpoliuos norimas idealios perdavimo charakteristikos atskaitas. Pagrindinis šio metodo trūkumas yra tas, kad negalima valdyti dažninės charakteristikos tarp užduotų atskaitų.

Antrasis skaičiavimo metodas – paimti gerokai daugiau dažninės charakteristikos atskaitų, negu filtro ilgis. Tada gauta dažninė charakteristika neis per visas užduotas atskaitas, bet galima surasti tokį filtrą, kurio dažninė charakteristika turės mažiausią šių atskaitų aproksimavimo vidutinę kvadratinę paklaidą.

N eilės RIR filtro struktūrinė schema pateikta 5.1 paveiksle.



5.1 pav. RIR filtro struktūrinė schema

RIR filtro išėjimo signalas $y(n)$ yra paskutinė $N+1$ filtro įėjimo signalų kombinacija. Kiekvienas iš $N+1$ signalų yra padauginamas iš tam tikro koeficiento a_i :

$$y(n) = a_0 x(n) + a_1 x(n-1) + a_2 x(n-2) + \dots + a_{N-1} x(n-N+1) + a_N x(n-N), \quad (5.2)$$

čia $y(n)$ – išfiltruotas signalas, $x(n)$ – įėjimo signalas, N – filtro eilė, a_i – koeficientai, n – takto (iteracijos) numeris. Sutrumpintai signalo perdavimo charakteristiką išėjime galima užrašyti taip:

$$y(n) = \sum_{i=0}^N a_i x(n-i). \quad (5.3)$$

Filtro įėjimo signalas $x(n)$ yra reikšmių seka, gauta diskretizavus analoginį signalą. Diskretizavimas atliekamas tam tikru periodu:

$$T_d = \frac{1}{f_d}, \quad (5.4)$$

čia T_d – signalo diskretizavimo periodas, f_d – diskretizavimo dažnis.

Tai reiškia, kad T_d laiko tarpais į filtro įėjimą paduodama viena diskretizuoto signalo reikšmė, o filtro išėjime gaunama viena išfiltruoto signalo diskretinė reikšmė. RIR filtro struktūrinėje schemoje pavaizduoti Z^{-1} komponentai yra vėlinimo elementai, kurie atlieka signalo vėlinimą, lygų diskretizavimo periodui T_d .

5.2.2. Signalų apdorojimas BIR filtrais ir jų skaičiavimas

Poskyryje nagrinėjamas signalų apdorojimas BIR filtrais, jų matematinis skaičiavimas [2, 38]. Begalinės impulsinės reakcijos skaitmeniniai filtrai yra pati bendriausia tiesinio skaitmeninio signalų apdorojimo sistema [5]. Jos kiekviena išėjimo atskaita randama pagal lygtį:

$$y(n) = \sum_{k=1}^N a_k y(n-k) + \sum_{m=0}^M b_m x(n-m), \quad (5.5)$$

čia priimta, kad a_k ir b_m yra filtro koeficientai, kurie nepriklauso nuo n – iteracijos numerio, k ir m – koeficiento numeris, N ir M – filtro eilės numeris. RIR filtras yra dalinis BIR filtro atvejis, kai $N=0$ ir skaičiavime naudojamos tik buvusios įėjimo atskaitos. Taigi, filtro skaičiavimo uždavinys yra surasti tokius filtro koeficientus a_k ir b_m , kurie geriausiai aproksimuoja norimą signalą (dažniausiai dažnių srityje).

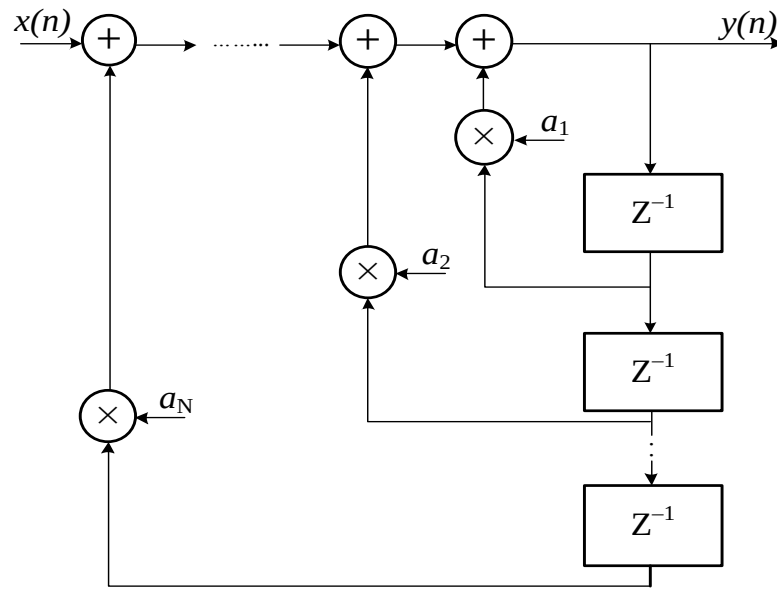
Skaitmeninis BIR filtras yra analoginio RLC ar aktyvaus RC filtrų analogas. Vienas iš BIR filtrų skaičiavimo metodų pradedamas skaičiavimu analoginio filtro-prototipo, kuris vėliau transformuojamas į ekvivalentišką skaitmeninį filtrą. BIR filtrų privalumas yra tas, kad jie

daug efektyvesni už RIR filtrus, nes BIR filtrai dažniausiai patenkina reikalavimus filtrui, būdami gerokai mažesnės eilės negu RIR filtrai [20]. BIR filtrų trūkumai yra stabilumo užtikrinimo problema ir kvantavimo efektai, fazinės charakteristikos netiesiškumas bei sudėtingesni skaičiavimo algoritmai. Daugelį BIR filtrų gerųjų ir blogųjų savybių nulemia juose egzistuojantis grįžtamasis ryšys. Tas grįžtamasis buvusių išėjimo atskaitų ryšys gali padaryti filtrą nestabiliu arba sustiprinti kvantavimo efektą, bet būtent jis ir duoda begalinę filtro impulsinę reakciją [5].

BIR filtrą galima aprašyti trim būdais:

- Impulsinė reakcija, kuri yra pagrindinė laikinė charakteristika, apibrėžianti ryšį tarp įėjimo ir išėjimo signalų laike.
- Amplitudės ir fazės charakteristikomis, kurios apibrėžia ryšį dažnių ašyje tarp tiesinės invariantinės sistemos įėjimo ir išėjimo signalų.
- Nulių ir polių kompleksinėje plokštumoje išdėstymu, kuris aprašo sistemos perdavimo funkciją.

BIR filtro struktūrinė schema parodyta 5.2 paveiksle.



5.2 pav. BIR filtro struktūrinė schema

Naudojant žymėjimus, analogiškus RIR filtrų atveju, BIR filtro išėjimo signalą $y(n)$ galima aprašyti tokia lygtimi:

$$y(n) = x(n) + a_1 y(n-1) + a_2 y(n-2) + \dots + a_{N-1} y(n-N-1) + a_N y(n-N), \quad (5.6)$$

čia $y(n)$ – išfiltruotas signalas, $x(n)$ – įėjimo signalas, a_i – koeficientai, n – takto (iteracijos) numeris.

Sutrumpintai signalo perdavimo charakteristiką išėjime galima užrašyti taip:

$$y(n) = x(n) + \sum_{i=1}^N a_i y(n-i). \quad (5.7)$$

BIR filtrai dažniausiai naudojami kartu su RIR filtrais, sudarant įvairias jų tarpusavio kombinacijas.

Kitame poskyryje aptariami RIR ir BIR filtrų elementai bei funkcijos.

5.2.3. RIR ir BIR filtrų elementai bei jų funkcijos

RIR ir BIR filtrai sudaryti iš keturių elementų: sumatoriaus, daugintuvo, vėlinimo bei konstantos elementų (5.1, 5.2 pav.) [20 – 21, 38]. Kiekvienas elementas skirtas atlikti tam tikrai funkcijai.

- **Sumatorius** (+) skirtas sumuoti į jo įėjimus paduodamoms reikšmėms. Sumavimo funkciją galima užrašyti taip:

$$y(k) = \sum_{i=1}^N a_i(k), \quad (5.8)$$

čia $y(k)$ – sumatoriaus išėjimo signalo reikšmė k -tojo takto metu, $a_i(k)$ – sumatoriaus i -tojo įėjimo reikšmė k -tojo takto metu, N – sumatoriaus įėjimų skaičius, k – proceso taktas (iteracija).

- **Daugintuvas** (×) sudaugina du ar daugiau signalus, paduodamus į jo įėjimus. Dauginimo funkcija yra tokia:

$$y(k) = \prod_{i=1}^N a_i(k), \quad (5.9)$$

čia $y(k)$ – signalo daugintuvo išėjimo reikšmė k -tojo takto metu, $a_i(k)$ – signalo daugintuvo i -tojo įėjimo reikšmė k -tojo takto metu, N – daugintuvo įėjimų kiekis, k – proceso taktas (iteracija).

- **Vėlinimo elementas (Z^{-1})** skirtas signalams vėlinti. Signalai vėlinami nurodytą skaičių iteracijų:

$$y(k) = x(k - N), \quad (5.10)$$

čia $y(k)$ – vėlinimo elemento išėjimo reikšmė k -tojo takto metu, $x(k - N)$ – užvėlinti signalai, N – vėlinimo iteracijų skaičius, k – proceso taktas (iteracija).

- **Konstantos elementas (a)** skirtas koeficientų reikšmėms saugoti. Šio elemento išėjime, nepriklausomai nuo iteracijos numerio, visuomet būna konstanta:

$$y(k) = a = const, \quad (5.11)$$

čia $y(k)$ – konstantos elemento išėjimo reikšmė k -tojo takto metu, a – konstanta.

Taigi, norint sudaryti skaitmeninio filtro modelį, reikia aprašyti aukščiau minėtus elementus, atliekančius (5.8 – 5.11) formulėmis nurodytas funkcijas.

Skyriuje išnagrinėtas signalų apdorojimas KGP procesoriuose. Išnagrinėti KGP procesorių tipai ir jų veikimas. Taip pat išnagrinėti du skaitmeninių filtrų tipai: ribotos impulsinės reakcijos ir begalinės impulsinės reakcijos [5, 21]. Išanalizuoti matematiniai šių filtrų apskaičiavimo metodai bei filtrų elementų funkcijos.

Kadangi kai kurie SSP naudoja ne tik 32-jų, bet ir 16-os bitų komandas, mišrus jų panaudojimo būdas gali būti naudingas siekiant kompromiso tarp našumo ir atminties dydžio.

Išnagrinėjus KGP procesorių ir filtrų veikimą bei signalų apdorojimo procesus juose, galima nustatyti, kokie elementai ir kaip riboja garso efektų skaičių ir polifoniją kompiuterio garso plokštėje. Tai aptariama kitame skyriuje.

6. KGP ELEMENTŲ, RIBOJANČIŲ POLIFONIJĄ IR GARSO EFEKTŲ SKAIČIŲ, NUSTATYMAS

Skyriuje nagrinėjama, kokie elementai ir kaip riboja polifoniją bei garso efektų skaičių KGP. Analizuojama, kaip kuriami dažniausiai KGP naudojami garso efektai.

6.1. Polifonija

Labai svarbus terminas, susijęs su kompiuterių garso plokštėmis, yra polifonija. Polifonija nurodo kiek skirtingų balsų arba garsų vienu metu gali atkurti garso plokštės sintezatorius, nepriklausomai nuo garso plokštėje esančių kanalų skaičiaus [34].

Kartais terminas balsas ir kanalas panaudojami sukeičiant jų reikšmes, nurodant polifoninių balsų arba garso plokštės kanalų skaičių.

Pavyzdžiui, daugelis pirmųjų garso plokščių galėjo atkurti tris balsus, tačiau turėjo tik vieną garso kanalą (vienas mono išėjimas), kuriame būdavo sumaišomi visi trys balsai. Vėliau atsiradusių garso plokščių *AdLib* sintezatorius turėjo 9 balsų polifoniją ir vieną monofoninį garso kanalą.

Ilgą laiką garso plokštės turėjo 9 arba 16 polifoninių balsų, kurie dažniausiai buvo naudojami *MIDI* muzikiniams garsams atkurti.

Dažnai garso plokščių galimybės nėra pilnai išnaudojamos. Naudojamas tik vienas monofoninis ar du stereofoniniai kanalai. Norint atkurti daugiau negu vieną garso signalą, dažniausiai naudojamas programinis kanalų sujungimas, esant fiksuotam diskretizavimo dažniui [34].

Pigesnės garso plokštės, integruotos į kompiuterio sisteminę plokštę ir atitinkančios *AC'97* standartą, vis dar veikia tokiu principu.

Tokios garso plokštės gali turėti daugiau negu du garso kanalus, tačiau jose nėra aparatinės polifonijos. Taigi tiek garso efektai, tiek *MIDI* garsų sintezavimas atliekami programiniu būdu.

Šiuo metu gaminamos ir naudojamos kompiuterių garso plokštės polifoninius balsus atkuria aparatiškai, nepriklausomai nuo garso plokštėje esančių garso išėjimo kanalų skaičiaus.

Atsiradus skaitmeniniam garso signalų atkūrimui, kuris suteikė daugiau galimybių negu garso signalų sintezė, kompiuterių garso plokštės nebenaudoja SAK su tiek kanalų, kiek yra balsų.

Vietoje to naudojamas aparatinis balsų sujungimas ir efektų kūrimas (skaitmeninis filtravimas, signalo perkėlimas iš laiko į dažnių sritį ir atvirkščiai) kompiuterių garso plokščių SSP.

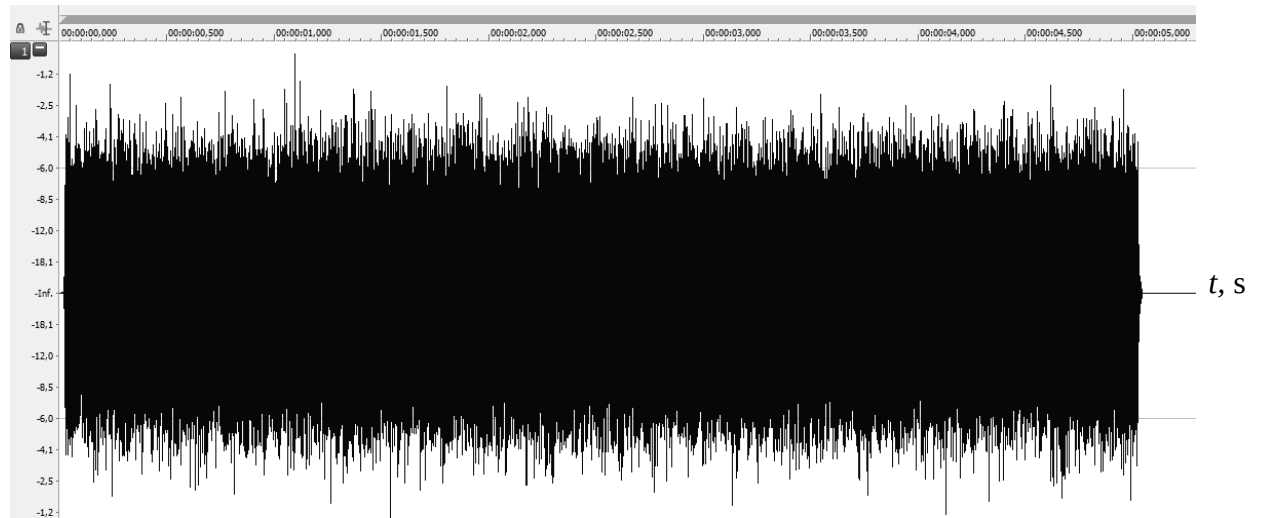
Paskutinis garso signalų atkūrimo etapas vykdomas išoriniame SAK, esant žymiai mažesniai garso išėjimo kanalų, negu atkuriamų balsų skaičiui (pvz., 8 kanalais, naudojamais 7.1 erdviniam garsui atkurti, gali būti atkurti 32, 64 ar net 128 balsai).

6.2. Garso efektai

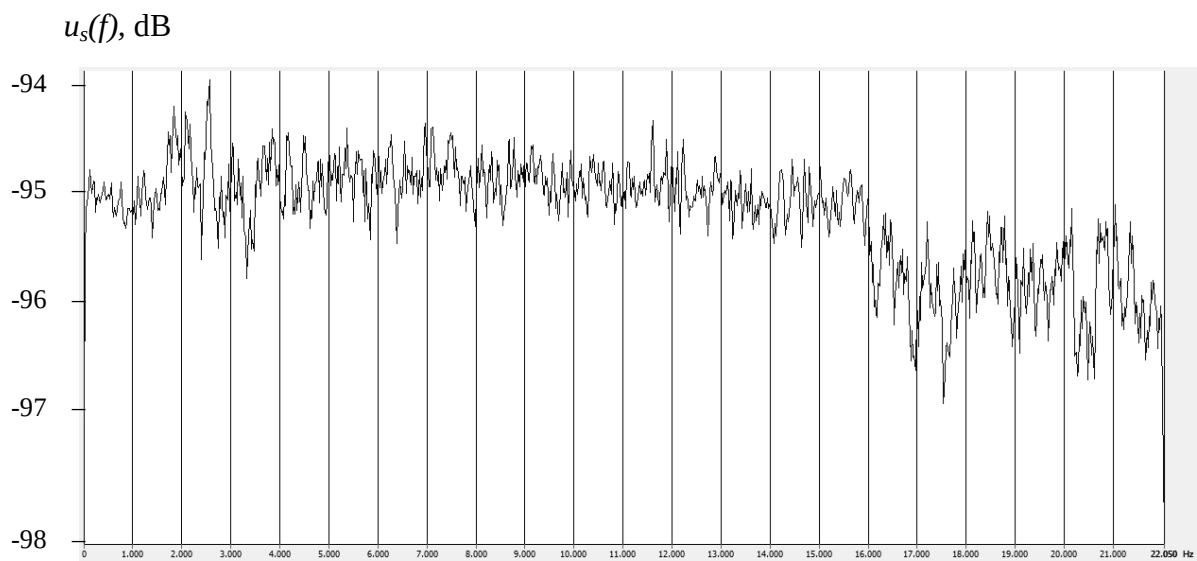
KGP svarbų vaidmenį atlieka garso efektai. Garso efektai atsiranda dirbtinai sukuriant, pakeičiant garso signalus. Garso efektai gali būti kuriami tiek KGP procesoriaus, tiek garso plokštėje esančio sintezatoriaus. Dažniausiai garso efektams kurti panaudojami analoginiai arba skaitmeniniai filtrai, kurie gali būti KGP procesoriaus viduje arba įdiegti, kaip atskiri filtrai. Šiuolaikinėse garso plokštėse naudojami skaitmeniniai filtrai, nes jie suteikia daugiau signalų apdorojimo galimybių, negu analoginiai jų atitikmenys [34]. Dažniausiai kompiuterių garso plokštėse susiduriama su tokiais garso efektais:

- **Echo** (liet. aidas) – norint sukurti aidmo efektą, keli vėlininti signalai pridedami prie originalaus garso signalo. Signalai turi būti vėlinami ne mažiau kaip 50 milisekundžių. Aido efektas gali būti sukuriamas analoginiu bei skaitmeniniu būdais. Kai didelis vėlintų garso signalų skaičius sujungiamas į kelių sekundžių trukmės signalą, gaunamas aidėjimo efektas, kuris dažnai dar vadinamas reverberacija.
- 6.1 – 6.2 paveiksluose pateikti originali baltojo triukšmo signalo oscilograma ir spektras.

$u_s(t)$, dB

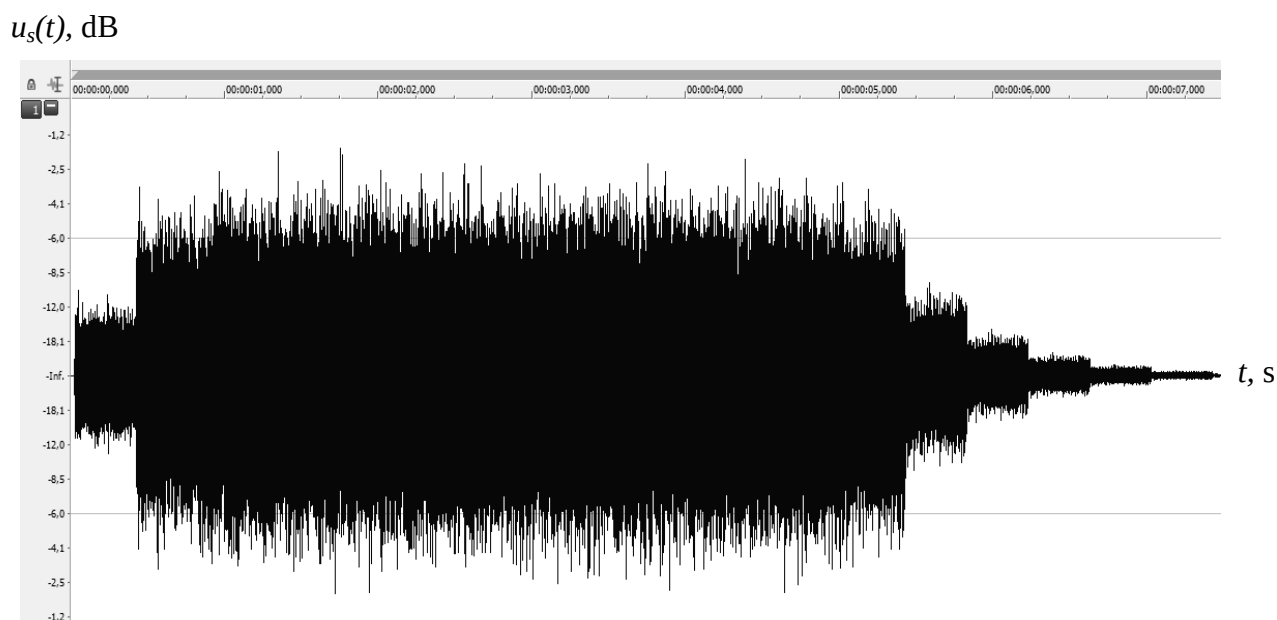


6.1 pav. Originalaus baltojo triukšmo signalo oscilograma (signalio trukmė ~5 s)

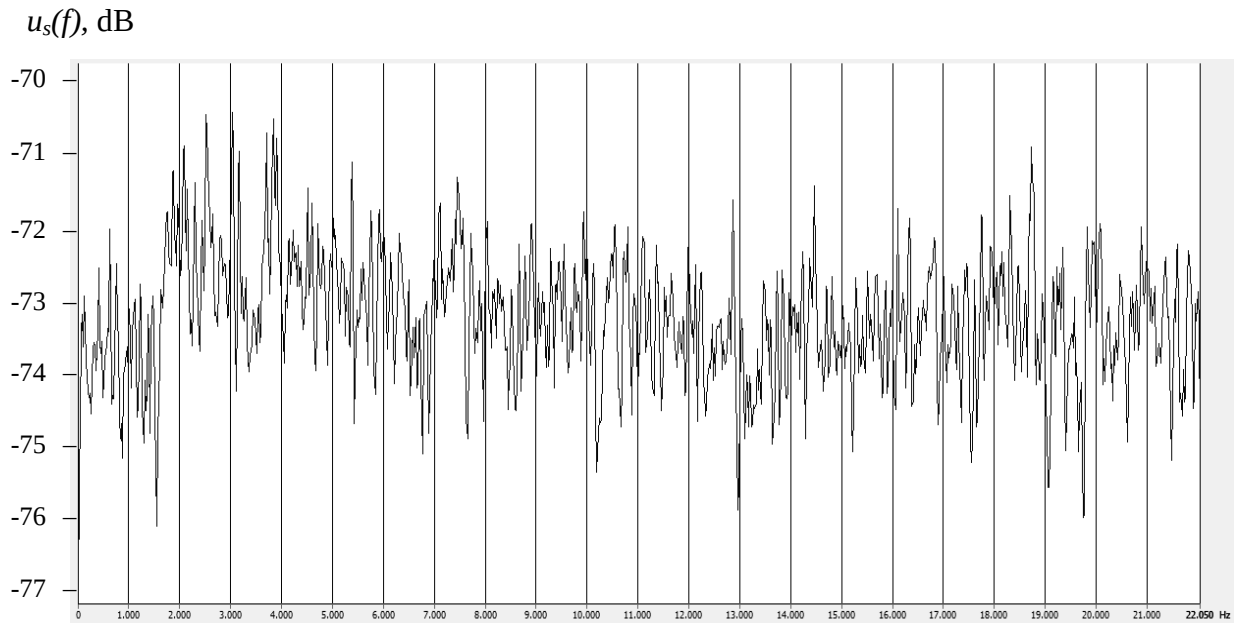


6.2 pav. Originalaus baltojo triukšmo signalo spektras

6.3 – 6.4 paveiksluose pateikti baltojo triukšmo signalo, kurio spektro charakteristikos yra artimiausios garso signalo spektrui, oscilograma ir spektras, gauti panaudojus programą *Sony Sound Forge 10* ir pritaikius *Echo* efektą.



6.3 pav. Baltojo triukšmo signalo, pritaikius *Echo* efektą, oscilograma (signalu trukmė ~7 s)



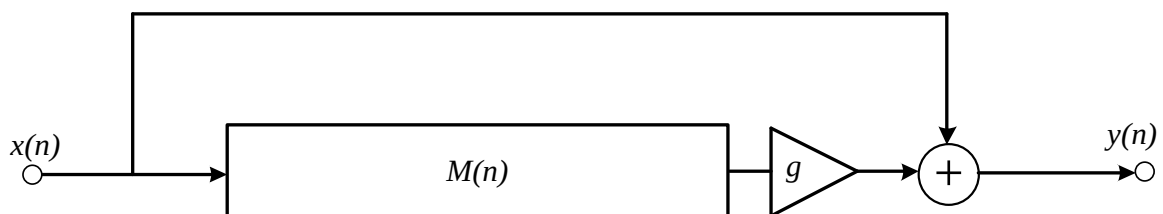
6.4 pav. Baltojo triukšmo signalo, pritaikius *Echo* efektą, spektras

- **Flanger** – norint sukurti *Flanger* garso efektą, vėlintas signalas pridedamas prie originalaus signalo su pastoviai kintančia vėlinimo trukme, dažniausiai mažesne negu 10 milisekundžių (6.5 pav.). Šis garso efektas sukuriamas naudojant SSP.

Anksčiau toks garso efektas būdavo gaunamas rankiniu būdu, lygiagrečiai atkuriant du vienodus garso signalus, vieną iš jų vėlinant mygtuko grotuve paspaudimu [33, 35]. Matematiškai tokį efektą galima aprašyti lygtimi:

$$y(n) = x(n) + gx(n - M(n)),$$

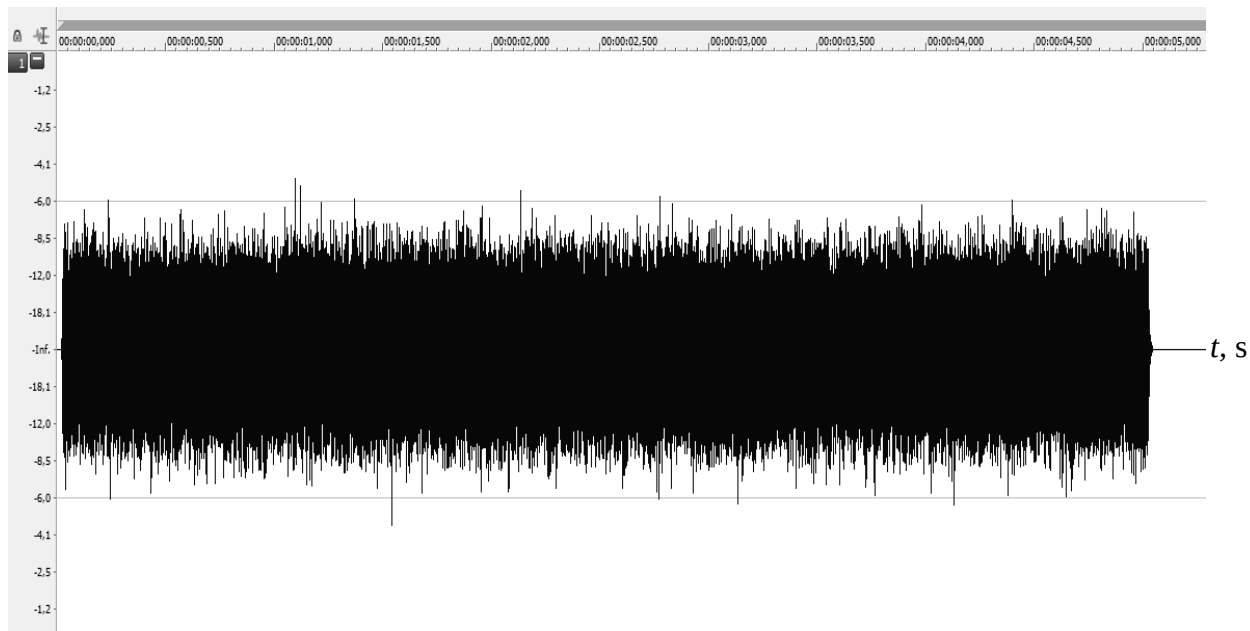
čia $x(n)$ – įėjimo signalo amplitudė laiko momentu $n = 0, 1, 2, \dots$, $y(n)$ – išėjimo signalas, g – efekto „gylis“, $M(n)$ – vėlinimo trukmė laiko momentu n , kintanti pagal sinuso dėsnį.



6.5 pav. *Flanger* efekto realizavimo schema

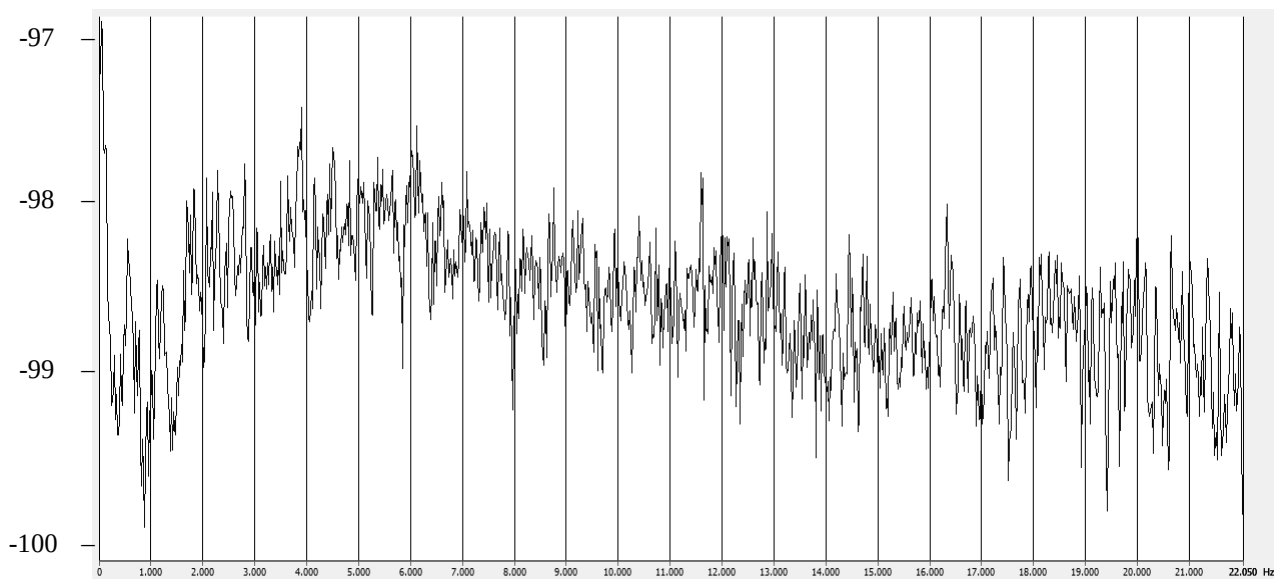
6.6 – 6.7 paveiksluose pateikti baltojo triukšmo signalo oscilograma ir spektras, gauti panaudojus programą *Sony Sound Forge 10* ir pritaikius *Flanger* efektą.

$u_s(t)$, dB



6.6 pav. Baltojo triukšmo signalo, pritaikius *Flanger* efektą, oscilograma (signalu trukmė ~5 s)

$u_s(f)$, dB

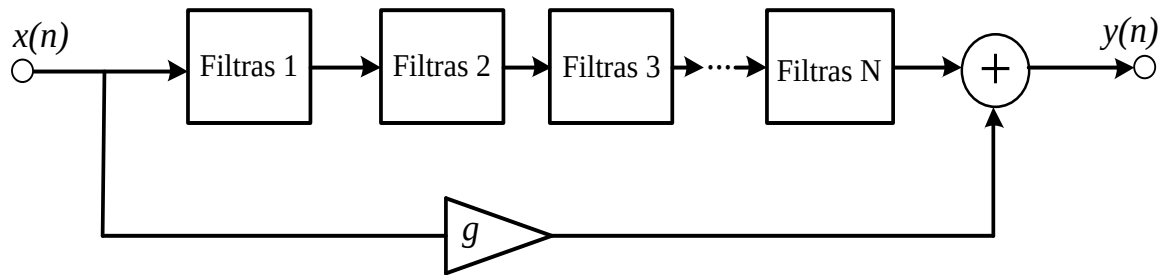


6.7 pav. Baltojo triukšmo signalo, pritaikius *Flanger* efektą, spektras

- **Phaser** – efektas, sukuriamas išskaidant garso signalą į kelias dalis. Pirmoji signalo dalis apdorojama filtru, sukuriant joje fazės postūmį.

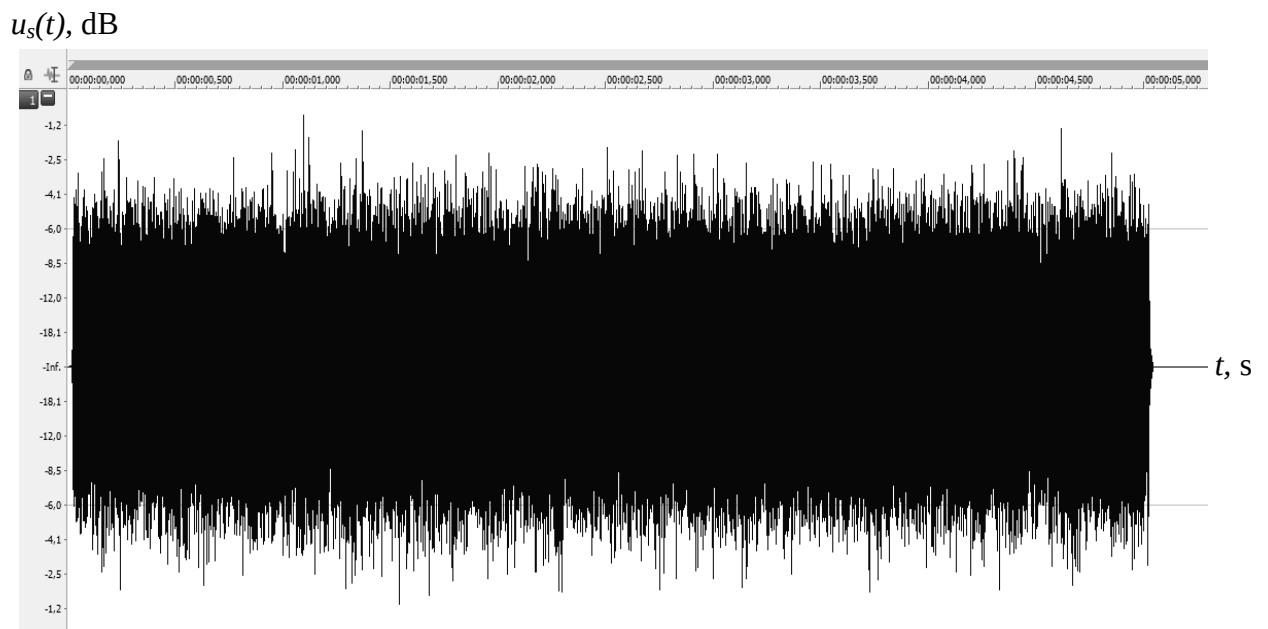
Po filtravimo pirmoji signalo dalis sudedama su nefiltruota antrąja dalimi.

6.8 paveiksle pateikta *Phaser* efekto realizavimo schema.

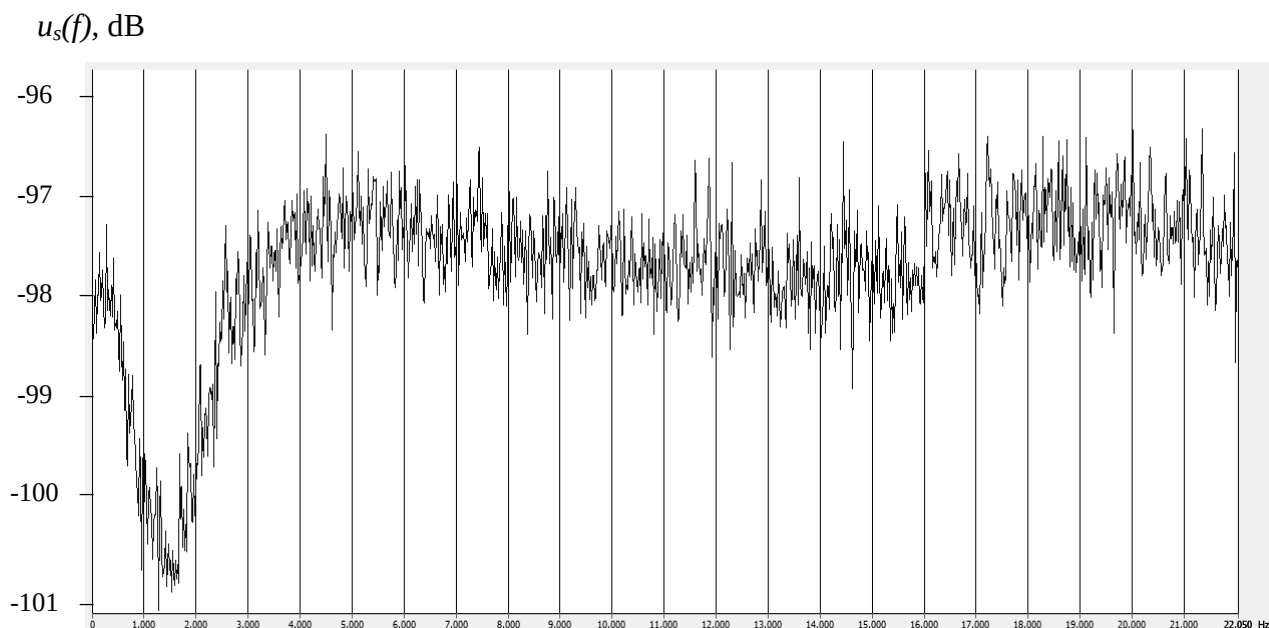


6.8 pav. *Phaser* efekto realizavimo schema

6.9 – 6.10 paveiksluose pateikti baltojo triukšmo signalo oscilograma ir spektras, gauti panaudojus programą *Sony Sound Forge 10* ir pritaikius *Phaser* efektą.



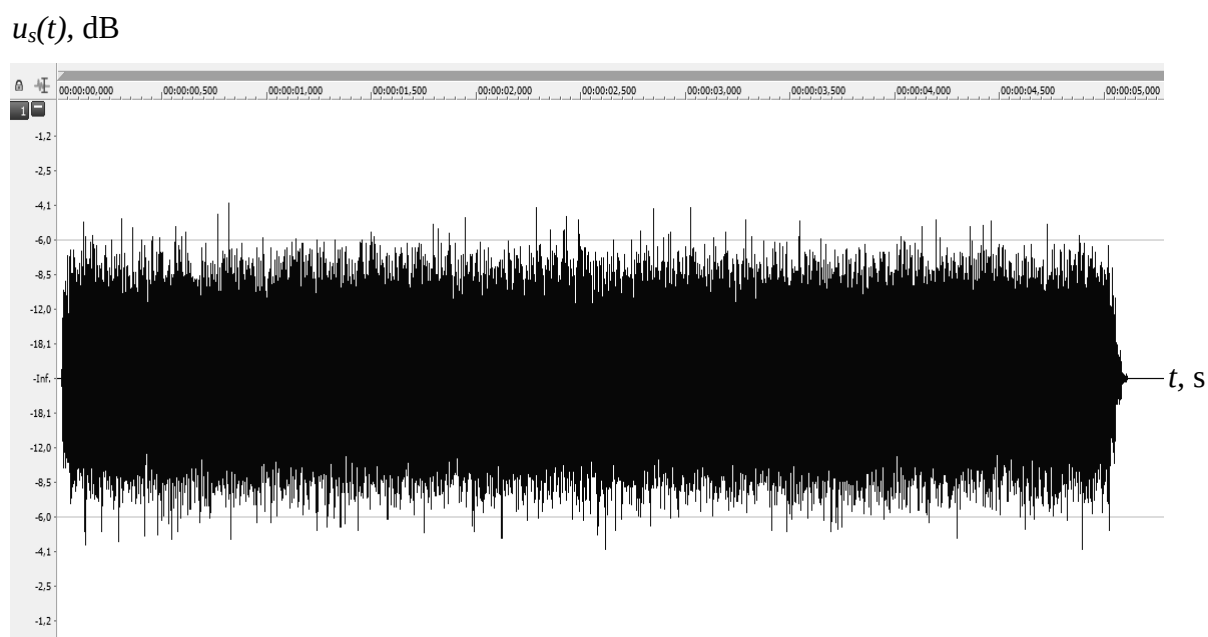
6.9 pav. Baltojo triukšmo signalo, pritaikius *Phaser* efektą, oscilograma (signalu trukmė ~5 s)



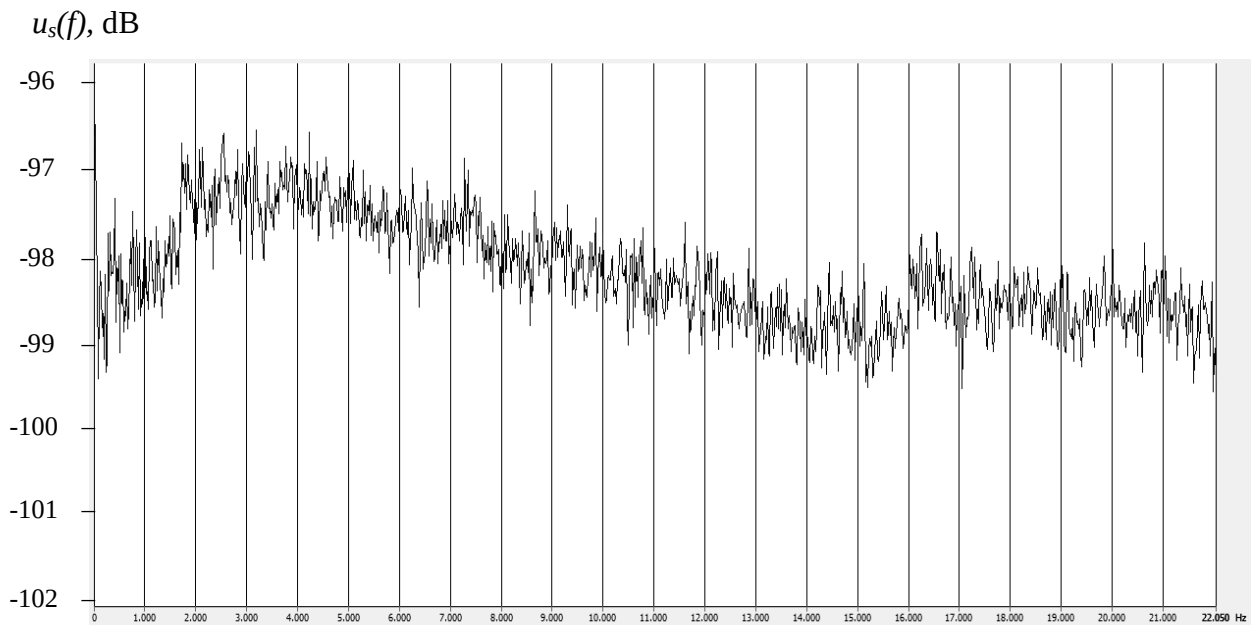
6.10 pav. Baltojo triukšmo signalo, pritaikius *Phaser* efektą, spektras

- **Chorus** – efektas sukuriamas prie originalaus garso signalo pridedant pastovios vėlinimo trukmės garso signalą. Vėlinimo trukmė turi būti labai maža, kad nesusidarytų aido efektas, tačiau ne mažesnė negu 5 milisekundės.

Jeigu vėlinimo trukmė bus per trumpa, susidarys *flanger* garso efektas. 6.11 – 6.12 paveiksluose pateikti baltojo triukšmo signalo oscilograma ir spektras, gauti panaudojus programą *Sony Sound Forge 10* ir pritaikius *Chorus* efektą [33, 35].



6.11 pav. Baltojo triukšmo signalo, pritaikius *Chorus* efektą, oscilograma (signalio trukmė ~5 s)



6.12 pav. Baltojo triukšmo signalo, pritaikius *Chorus* efektą, spektras

- **Equalization** – suvienodinimo efektas, dažniau naudojamas „ekvalaizerio“ pavadinimu. Skirtingų garso signalo dažnių lygiai sumažinami arba padidinami, siekiant išgauti norimas signalo spektro charakteristikas.

Suvienodinimas leidžia suderinti garso signalus, pašalinti nepageidaujamus triukšmus iš įrašyto garso signalo. Gerokai sumažinus kai kuriuos signalo dažnių lygius, galima gauti labai neįprastus garsus.

- **Filtering** – filtravimas. Auksčiau minėtas vienas iš signalo filtravimo būdų yra „ekvalaizeris“. Signalų skirtingų dažnių dedamosios gali būti išryškintos arba pašalintos, naudojant žemųjų dažnių, aukštųjų dažnių arba juostinius dažnių filtrus.

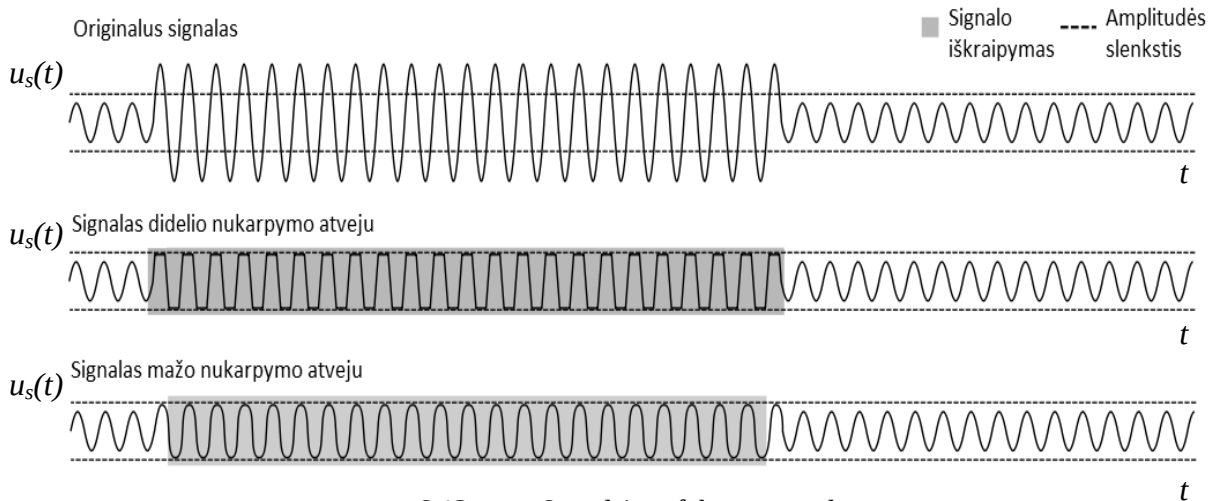
Juostiniu dažnių filtru apdorojant žmogaus balso signalus, galima gauti traškančio telefoninio pokalbio efektą, nes telefonijoje naudojami juostiniai dažnių filtrai.

- **Overdrive** – efektas naudojamas sukurti iškraipytiems garsams, kaip roboto balsas arba garsas pokalbio tarp pilotų, skrendančių lėktuve.

Šis efektas nukarpo signalus, kai jie viršija maksimalias leistinas ribas.

Skaitmeniniu būdu apdorojant signalą sistema, turinčia 16 bitų, maksimali galima signalo amplitudės reikšmė lygi 3,2768 V.

Jeigu signalo apdorojimo metu amplitudė padvigubinama ir iš 3,2 V tampa 6,4 V, signalo amplitudė, viršijanti leistiną maksimalią reikšmę, bus sumažinta iki šios reikšmės. 6.13 paveiksle pateiktas *Overdrive* efekto veikimo pavyzdys.

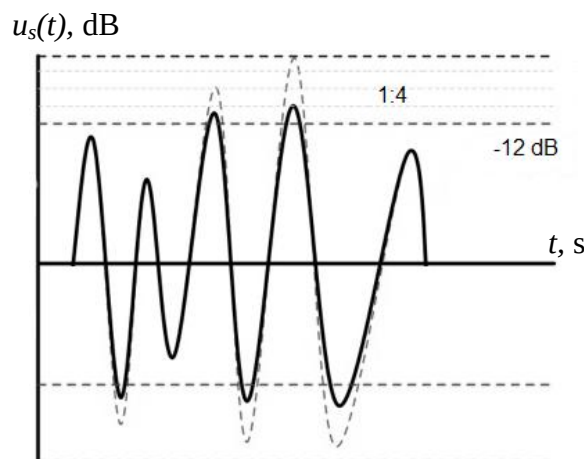


6.13 pav. Overdrive efekto pavyzdys

- **Time stretch** – ištempimo laike efektas pakeičia garso signalo atkūrimo greitį nekeičiant signalo atkūrimo dažnio, pridėdamas arba nukirpdamas signalo dalį.
- **Compression** – glaudinimo efektas. Glaudinimo arba „kompresijos“ efektas naudojamas norint pakeisti garso signalo dinaminį diapazoną. Glaudinimo metu, signalo amplitudės vertėms viršijus leistinas ribas, signalo lygis didinamas arba mažinamas. Kiek bus pakeistas signalo lygis, priklauso nuo iš anksto nustatyto santykio.

Santykis nurodo, kiek turi pasikeisti signalo lygis išėjime priklausomai nuo to, kiek signalo lygis viršija leistinas ribas įėjime.

Pavyzdžiui, santykis 1:4 parodo, kad signalui įėjime viršijus leistiną -12 dB ribą 1 dB, signalo išėjime lygis padidės 4 dB virš leistinos ribos (6.14 pav.).



6.14 pav. Compression efekto pavyzdys

- **3D garso efektai** – tai efektų grupė, skirta pakeisti dviejų garsiakalbių arba porinių ausinių sukuriamą stereoeftą erdvinio garso efektu.

Dažniausiai šie efektai susiję su signalo išskaidymu į kelias dalis ir jų atkūrimu skirtingais garso kanalais. Taip pat išskirtos signalo dalys gali būti pastumtos faze arba pakeista jų amplitudė.

Paprasčiausias būdas, leidžiantis išplėsti stereoefekto galimybes, yra pridėti prie kairiuoju garso kanalu atkuriamo signalo garso signalą iš dešiniojo kanalo, tačiau invertavus jo fazę bei pakeitus amplitudę [33, 35].

3 skyriuje buvo išsiaiškinta, kad daugumoje šiuolaikinių garso plokščių ASK jau integruoti į patį KGP procesorių, todėl beveik visas garso plokštės funkcijas gali atlikti vienas KGP procesorius.

Tačiau filtrų veikimo spartą ir galimybes taip pat nulemia KGP procesoriaus sparta ir galimybės, nes dauguma filtrų ar filtravimo operacijų taip pat realizuojami KGP procesoriuje.

Todėl galima daryti prielaidą, kad garso efektų skaičių ir polifoniją riboja filtrų sparta ir juose taikomi signalų apdorojimo metodai, taip pat sintezatorių veikimo sparta, sintezavimo metodai ir naudojamos atminties dydis juose.

Kadangi moderniose KGP visi šie elementai sujungti į vieną KGP procesorių, galima teigti, kad polifoniją ir garso efektų skaičių riboja KGP procesoriaus sparta, atminties dydis ir palaikomos signalų apdorojimo funkcijos bei metodai.

Skyriuje buvo pateikti dešimties dažniausiai naudojamų garso efektų aprašymai. Paaiškintas kelių iš jų matematinis modelis ir veikimas. Pateiktos keturių garso efektų (*echo*, *flanger*, *phaser* ir *chorus*) oscilogramos ir spektrai, gauti *Sony Sound Forge 10* garso signalų apdorojimo programa. Siekiant įsitikinti ir palyginti teorinį ir realų garso efektų poveikį garso signalams, kitame skyriuje garso efektai bus modeliuojami programinėse terpėse *Pure Data* ir *Matlab*.

7. GARSO SIGNALŲ APDOROJIMO EKSPERIMENTINIS TYRIMAS BEI KOMPIUTERINIS MODELIAVIMAS

Skyriuje nagrinėjamas tiesioginės skaitmeninės sintezės metodas ir jo realizavimas *Altera* DE2 makete bei kompiuterinis garso signalų apdorojimo ir efektų modeliavimas.

JAV įsikūrusios kompanijos *Altera* mokomosiuose maketuose DE2 įdiegtas ir naudojamas tiesioginės skaitmeninės sintezės (TSS) metodas. Jis yra panašus į WT metodą, nes TSS metode taip pat naudojamos bangų lentelės. Tačiau jose saugomi ne garsų fragmentai, o tik skaitmeniniu pavidalu sinusinio signalo momentinės reikšmės, kurioms įsiminti, taikant TSS metodą, atmintis turėtų būti žymiai mažesnė [56].

Skyriuje tiriama, kaip veikia, kokius privalumus ir trūkumus turi TSS metodas, lyginant su WT garso signalų sintezės metodu, ir ar tikslinga KGP naudoti TSS metodą.

7.1. Tiesioginė skaitmeninė sintezė

Tiesioginės skaitmeninės sintezės (angl. *Direct Digital Synthesis* – DDS) metodą sukūrė JAV, Teksase įsikūrusi *National Instruments* kompanija.

TSS metodas skirtas sintezuoti įvairių dažnių ir formų signalus, keičiant dvejetainio skaitiklio (fazės sumatoriaus) skaičiavimo žingsnį.

Šis metodas dažnai taikomas moderniuose parenkamos formos signalų generatoriuose (angl. *Arbitrary Waveform Generator* – AWG). AWG sintezuoja signalus iš generatoriaus atminties bangų lentelėje saugomų sinusinio signalo momentinių reikšmių.

Signalų momentinėms reikšmėms parinkti iš bangų lentelės ir joms panaudoti, sintezuojant naujus signalus, taikomas dvejetainis skaitiklis.

Sintezuojamųjų signalų dažnis priklauso nuo dvejetainio skaitiklio skaičiavimo žingsnio. Jis nulemia, kas kelinta signalo momentinė reikšmė parenkama iš bangų lentelės [39, 46, 56].

Jeigu skaičiavimo žingsnis mažas, naudojamas didelis atmintyje saugomų signalo momentinių reikšmių skaičius iš bangų lentelės ir sintezuojamųjų signalų dažnis yra mažas.

Naudojant didelį dvejetainio skaitiklio skaičiavimo žingsnį, naudojamas mažas atmintyje saugomų signalo momentinių reikšmių iš bangų lentelės skaičius ir sintezuojamųjų signalų dažnis yra didelis.

Be to, vartotojas, keisdamas atmintyje saugomas signalo momentines reikšmes, gali parinkti sintezuojamųjų signalų formą.

Dvejetainis skaitiklis, naudojant didelį skaičiavimo žingsnį, parenka ne visas saugomas signalo momentines reikšmes.

Todėl siekiant, kad sintezuojamieji signalai neprarastų reikiamos formos, tarpinės signalų reikšmės interpoliuojamos. Generatoriai, naudojantys TSS metodą, interpoliuodami ištempia signalus taip, kad jie užpildytų visą turimą atmintį [39, 46, 56].

TSS metodu veikiančių sintezatorių galima pavaizduoti struktūrine schema (7.1 pav.), sudaryta iš keturių pagrindinių dalių: taktinio generatoriaus, dvejetainio skaitiklio, bangų lentelės ir skaitmeninio-analoginio keitiklio (SAK).



7.1 pav. TSS sintezatoriaus struktūrinė schema

Svarbi TSS sintezatoriaus struktūrinės schemos dalis yra dvejetainis skaitiklis. Pavyzdžiui, gali būti naudojamas 16 bitų dvejetainis skaitiklis, kurio maksimalus reikšmių skaičius iki konkretaus bito imtinai

**Dvejetainio skaitiklio maksimalus reikšmių
skaičius iki konkretaus bito imtinai**

32768	16384	8192	4096	2048	1024	512	256	128	64	32	16	8	4	2	1
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

Dvejetainio skaitiklio bito eilės numeris

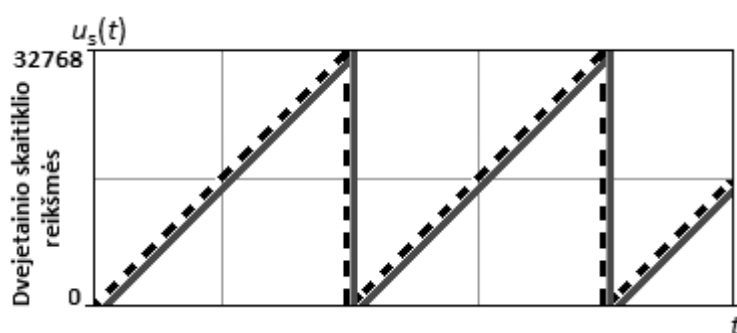
7.2 pav. 16 bitų dvejetainio skaitiklio maksimalus reikšmių skaičius iki konkretaus bito imtinai

Sintezuojant signalus dvejetainio skaitiklio reikšmės naudojamos kaip adresai bangų lentelėje.

Skaitiklis, skaičiuodamas iš eilės nurodo, kokios saugomos signalo momentinės reikšmės turi būti parinktos iš bangų lentelės.

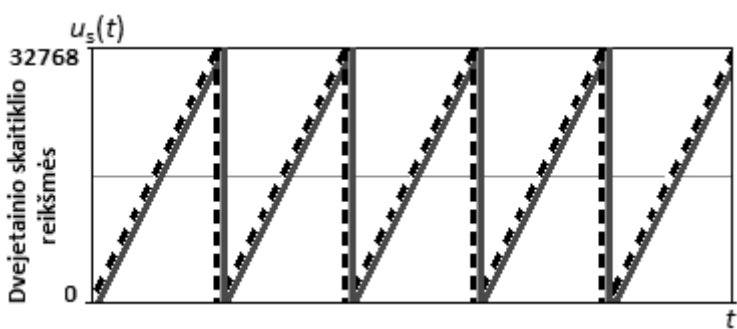
Pasiekus maksimalią skaitiklio reikšmę, skaičiavimas pradedamas iš naujo – tai įprastinis dvejetainių skaitiklių veikimo principas [39, 46, 56].

Dvejetainio skaitiklio veikimą iliustruoja 7.3 paveiksle matomi skaitiklio reikšmių ir sintezuotojo signalo kitimo laiko atžvilgiu pjūklo formos dėsniai. Jie gaunami, kai signalas sintezuojamas paduodant skaitiklio reikšmes tiesiog į SAK.



7.3 pav. Dvejetainio skaitiklio reikšmių (— —) ir sintezuotojo signalo (—) kitimo laiko atžvilgiu pjūklo formos dėsniai

Padvigubinus skaičiavimo žingsnį, skaitiklio reikšmių ir sintezuotojo signalo kitimo laiko atžvilgiu pjūklo formos dėsnių dažnis padidėja dvigubai, nes parenkama kas antra skaitiklio reikšmė (7.4 pav.).



7.4 pav. Dvejetainio skaitiklio reikšmių (— —) ir sintezuotojo signalo (—) kitimo laiko atžvilgiu pjūklo formos dėsniai, 2 kartus padidinus skaičiavimo žingsnį

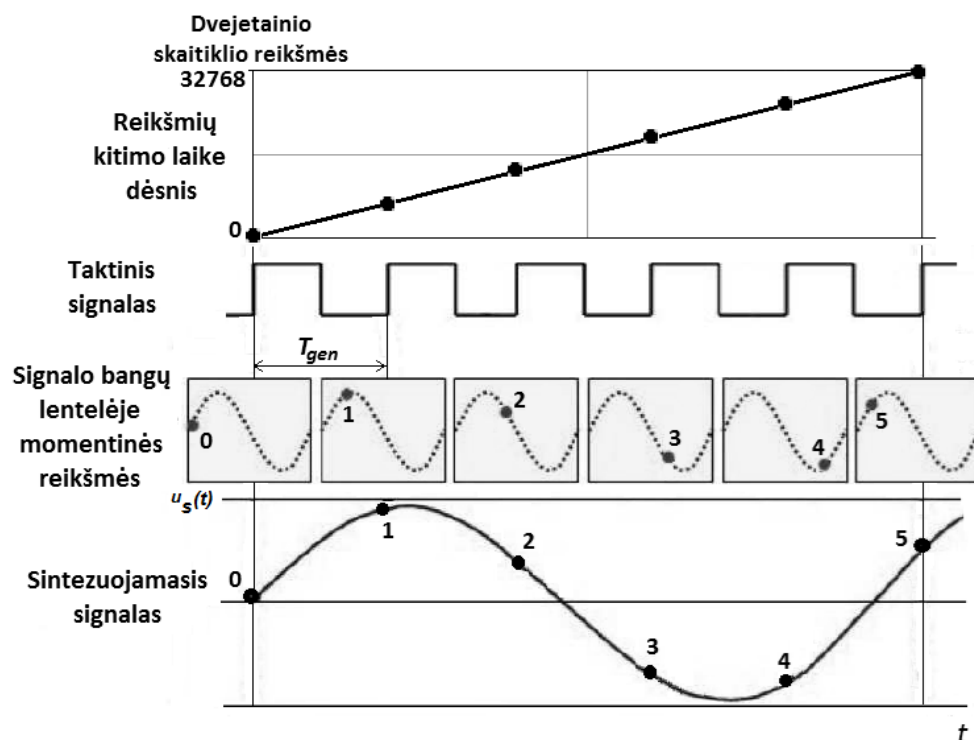
Taigi keičiant dvejetainio skaitiklio skaičiavimo žingsnį, galima keisti sintezuojamųjų signalų dažnį.

Naudojant TSS sintezatoriuje 16 bitų dvejetainį skaitiklį, sintezuojamųjų signalų dažnį f galima apskaičiuoti pagal tokią išraišką:

$$f = \frac{\Delta \cdot f_{gen}}{2^{16}}, \text{ čia } 0 \leq \Delta < 2^{16}, \quad (7.1)$$

čia Δ – dvejetainio skaitiklio skaičiavimo žingsnis, 2^{16} – maksimalus skaitiklio reikšmių skaičius, f_{gen} – sintezatoriaus taktinio generatoriaus dažnis.

7.5 paveiksle pateikiamas pavyzdys, kaip TSS metodu sintezuojamas sinusinės formos signalas.



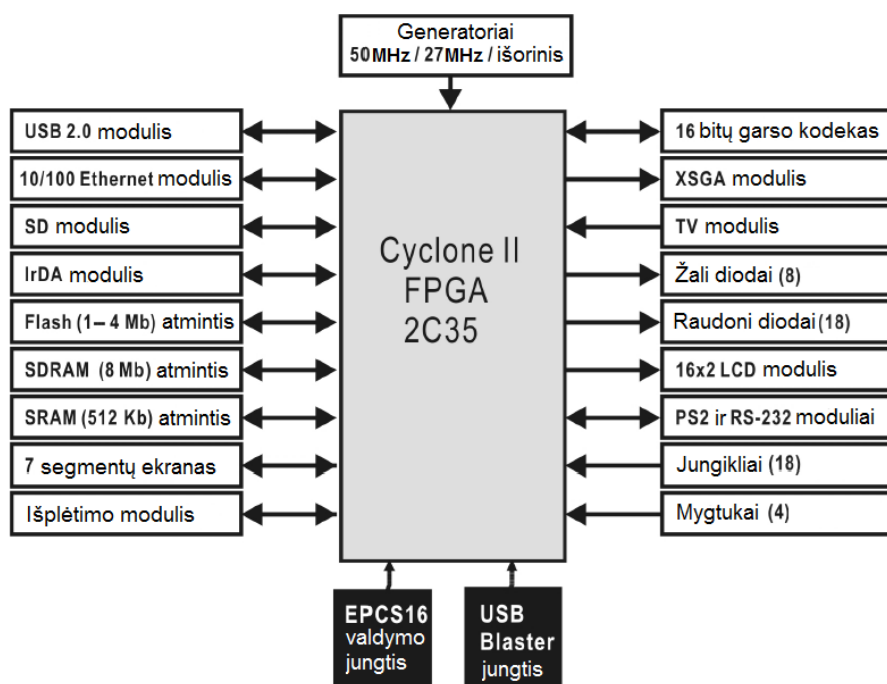
7.5 pav. Sinusinės formos signalo sintezė

Čia matoma, kaip per kiekvieną taktinio generatoriaus signalo periodą iš bangų lentelės parenkamos saugomos sinusinio signalo momentinės reikšmės [39, 46, 56].

Nuo to, koks bus dvejetainio skaitiklio skaičiavimo žingsnis, priklauso, kas kelinta saugoma signalo momentinė reikšmė bus parinkta ir koks bus sintezuojamojo signalo dažnis.

7.2. Altera maketas DE2, programos algoritmas ir garso signalų sintezės rezultatai

Altera maketas DE2 yra sudarytas iš aparatinės ir programinės įrangų rinkinio. Makete įdiegtas komercinėje elektronikoje plačiai naudojamas *Cyclone II* lustas (7.6 pav.), kurį galima perkonfigūruoti pagal kuriamo objekto specifikacijos reikalavimus.



7.6 pav. Altera maketo DE2 struktūrinė schema

Cyclone II – tai SRAM atmintį naudojanti lauku programuojama loginė matrica LPLM (angl. *Field Programmable Gate Array* – FPGA), viena iš įterptinių sistemų rūšių, turinti 475 įvesties/išvesties kontaktus.

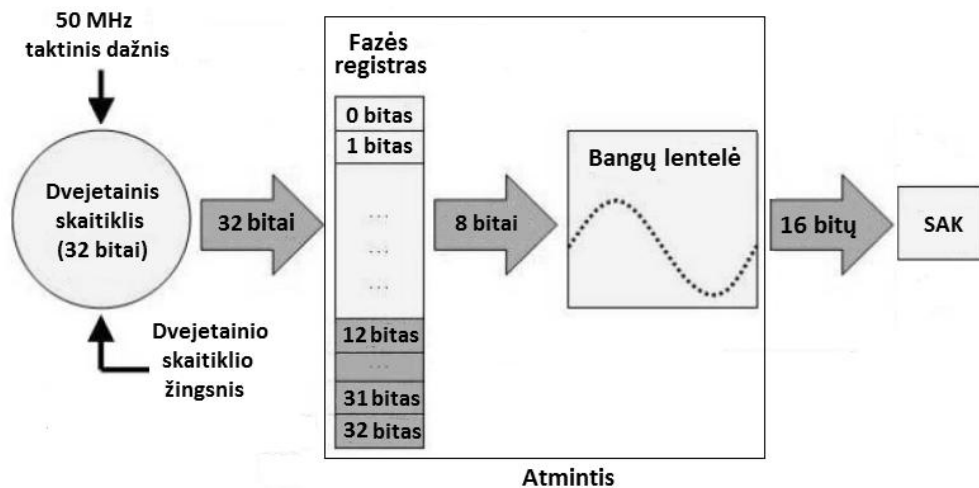
Altera mokomasis maketas DE2 siūlo didelį galimybių rinkinį. 7.6 paveiksle matoma, kad maketas turi garso ir vaizdo signalų atkūrimo galimybes bei daug kitų funkcijų.

Šiame makete realizuoto TSS sintezatoriaus struktūrinė schema ir veikimas šiek tiek skiriasi nuo 7.1 paveikslo schemos ir veikimo.

Altera makete DE2 yra 50 ir 27 MHz dažnių taktiniai generatoriai, vietoje 16 bitų panaudoti 32 bitų dvejetainis skaitiklis ir fazės registras, 8 bitų bangų lentelė ir 16 bitų SAK (garso kodekas) (7.6, 7.7 pav.).

Maketui programuoti ir konfigūruoti naudojamas *Altera* programinis paketas *Quartus II*. Jis atpažįsta VHDL ir *Verilog* programavimo kalbomis parašytus tekstus.

Norint panaudoti *Altera* makete DE2 realizuotą TSS metodą, reikia sukurti programą, kuri veiktų pagal 7.7 paveiksle pateiktą garso signalų sintezės schemą.



7.7 pav. Garso signalų sintezės *Altera* makete DE2 schema

7.8 paveiksle pateikiamas sukurtos programos *Verilog* kalba algoritmas, naudojamas garso signalams sintezuoti [56].

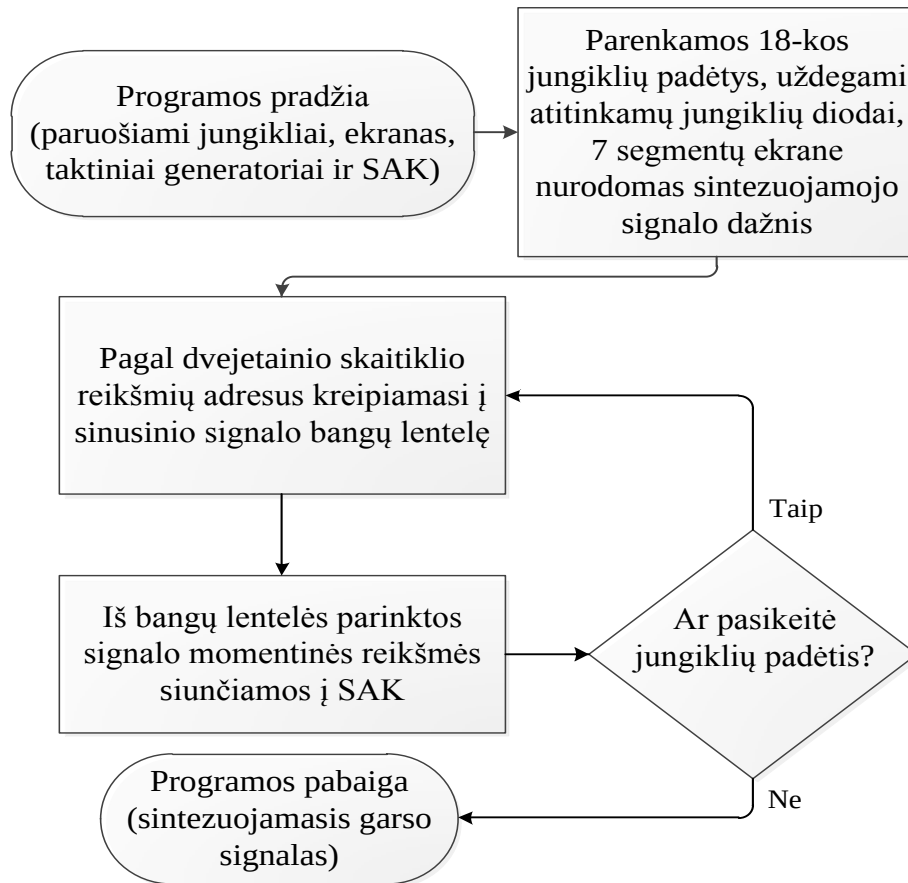
Matoma, kad pradžioje paruošiami *Altera* maketo DE2 jungikliai, ekranas, taktiniai generatoriai ir SAK. Vartotojas parenka 18-kos jungiklių padėtis, kurios nustato norimo sintezuoti garso signalo dažnį.

Atitinkamai parenkant dvejetainio skaitiklio žingsnį, užsidega parinktų jungiklių šviesos diodai. Septynių segmentų ekrane nurodomas sintezuojamojo signalo dažnis [46, 56].

Toliau pagal dvejetainio skaitiklio reikšmių adresus kreipiamasi į sinusinio signalo bangų lentelę. Iš parinktų signalo momentinių reikšmių formuojamas skaitmeninis signalas.

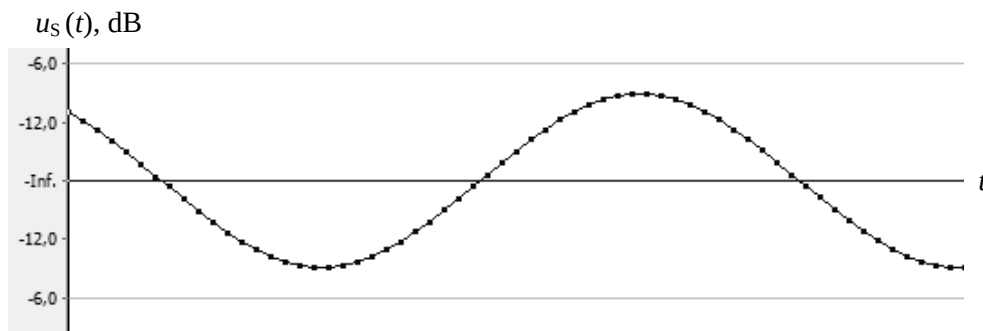
Jis siunčiamas į SAK.

Sintezuojamasis garso signalas nuolatos atkuriamas maketo išėjime tol, kol nebus pakeista jungiklių padėtis.



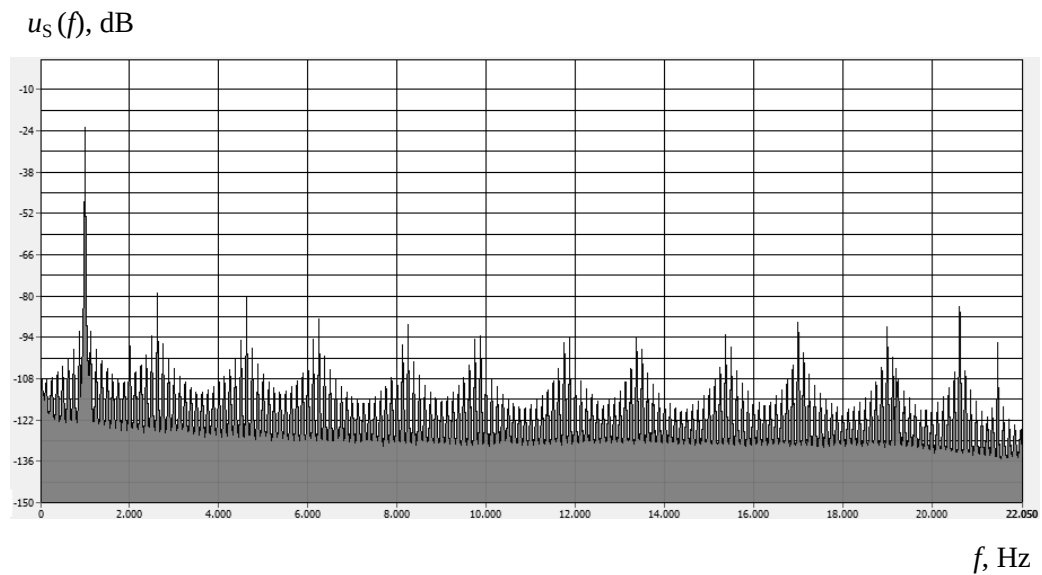
7.8 pav. Sukurtos programos algoritmas

Makete įdiegtas 44,1 kHz diskretizavimo dažnį naudojantis garso kodekas. Šiuo dažniu gaunamos 7.9, 7.11, 7.13, 7.15 paveiksluose pateiktų sintezuotųjų 1, 5, 10 ir 22 kHz dažnių garso signalų momentinės reikšmės.



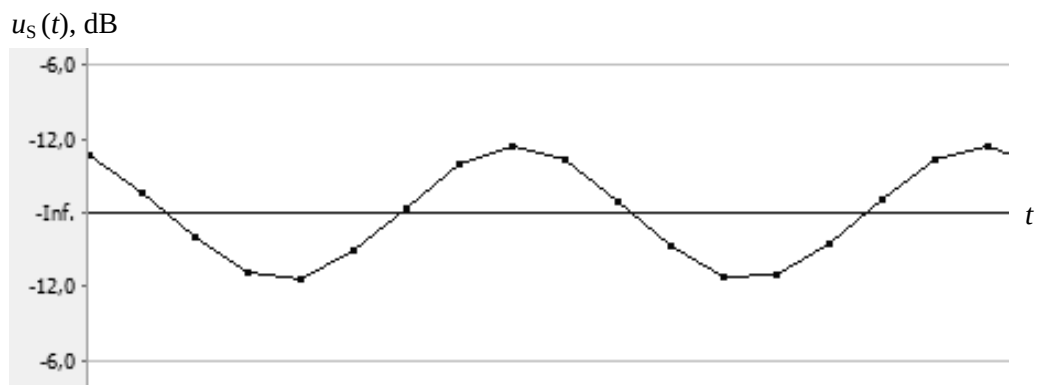
7.9 pav. Sintezuotasis 1 kHz dažnio garso signalas

7.10 paveiksle pateiktas sintezuotojo 1 kHz dažnio garso signalų spektras.

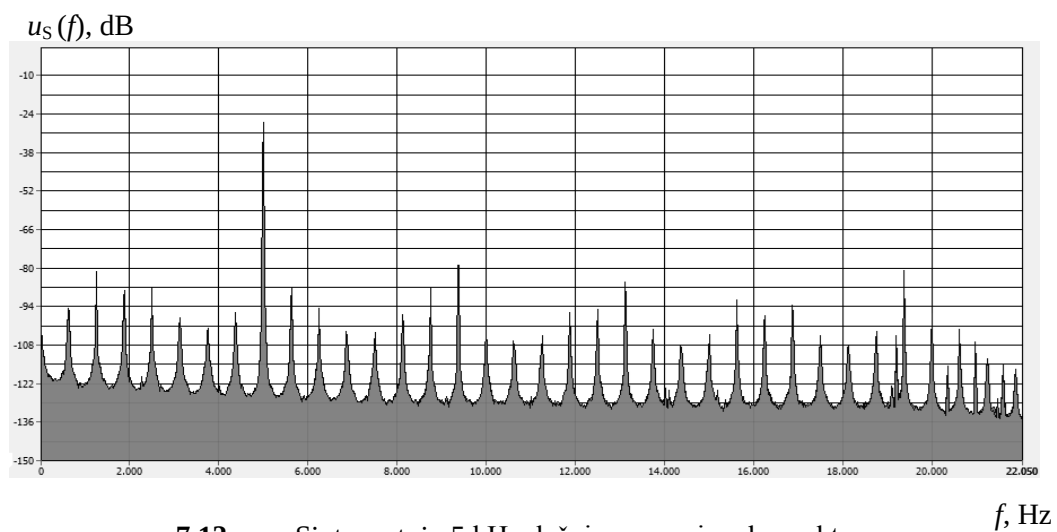


7.10 pav. Sintezuotojo 1 kHz dažnio garso signalo spektras

Maketu sintezuojant 1 kHz dažnio garso signalą, sintezuojamas 1,002 kHz dažnio signalas. Dažnio nuokrypis pastebimas sintezuojant ir 5, 10, 22 kHz dažnių garso signalus. 7.12 paveiksle pateiktas sintezuotojo 5 kHz dažnio garso signalo spektras.



7.11 pav. Sintezuotasis 5 kHz dažnio garso signalas



7.12 pav. Sintezuotojo 5 kHz dažnio garso signalo spektras

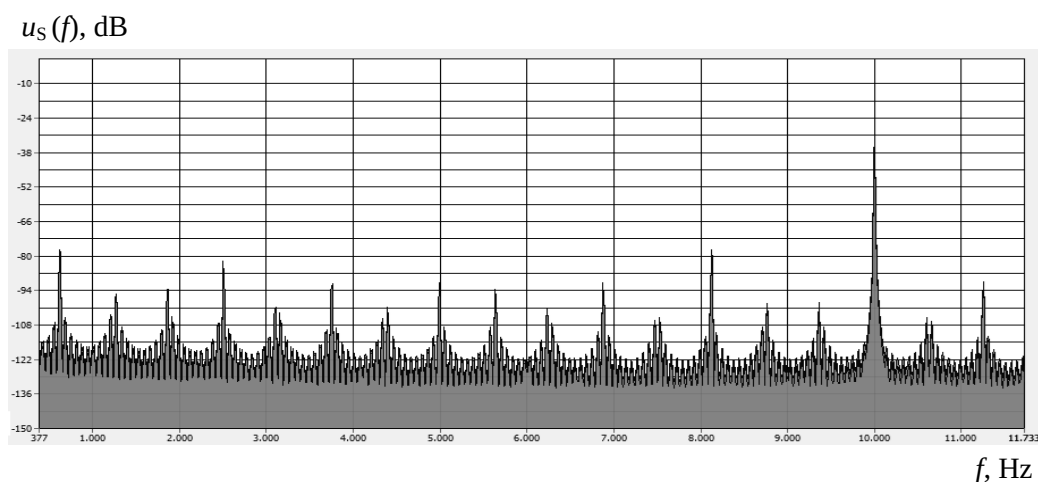
Didėjant sintezuojamųjų garso signalų dažniui, jų amplitudė mažėja ir forma keičiasi. 7.13 ir 7.15 paveiksluose matoma, kad 10 ir 22 kHz dažnių signalų oscilogramos yra laužytos.

Taip nutinka, kai skaitiklis, parinkdamas signalo momentines reikšmes iš bangų lentelės, praleidžia jų per daug ir reikšmių nebeužtenka tiksliai garso signalų sintezei.



7.13 pav. Sintezuotasis 10 kHz dažnio garso signalas

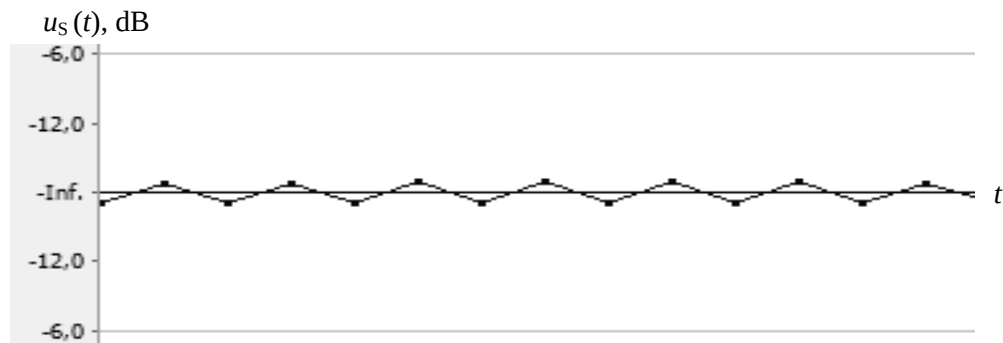
7.14 paveiksle pateiktas sintezuotojo 10 kHz dažnio garso signalo spektras.



7.14 pav. Sintezuotojo 10 kHz dažnio garso signalo spektras

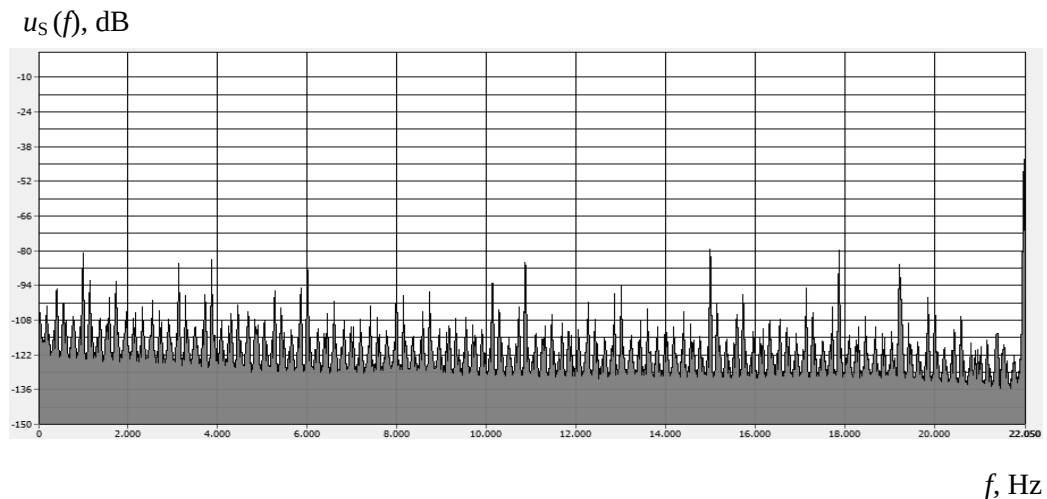
Dėl to signalų spektruose atsiranda šoninės harmonikos ir pakinta sintezuojamųjų garsų tembrai.

Šių TSS trūkumų galima išvengti, didinant bangų lentelėje saugomų sinusinio signalo momentinių reikšmių skaičių.



7.15 pav. Sintezuotasis 22 kHz dažnio garso signalas

7.16 paveiksle pateiktas sintezuotojo 22 kHz dažnio garso signalo spektras.



7.16 pav. Sintezuotojo 22 kHz dažnio garso signalo spektras

Šiame tyrime buvo panaudotos $2^8 = 256$ reikšmės, taigi tik 8 iš galimų 32 bitų.

Pagrindinis TSS metodo trūkumas – sudėtingas bangų lentelių sudarymas. Tam reikia iš anksto žinoti, kokios formos turės būti sintezuojamasis signalas.

Tyrimo metu buvo nustatyta, kad TSS metodas naudoja tik ~7 kB atminties saugoti sinusinio signalo momentinėms reikšmėms.

Tai žymiai mažiau, lyginant su atminties dydžiu, reikalingu saugoti natūralių garsų fragmentams WT metodu – 125 kB 1 fragmentui, ~8 MB įprastiems 64 fragmentams.

Todėl TSS metodą galima taikyti KGP kaip WT metodo papildinį, palyginti mažai padidinant atmintį [56].

7.3. Kompiuterinis garso signalų apdorojimo modeliavimas

Norint ištirti signalų apdorojimo ir garso efektų kūrimo procesus, reikia tiesiogiai tirti kompiuterių garso plokštes. Toks tyrimas nėra labai naudingas, nes realiu metu KGP išėjime signalas nuolatos kinta, o kai kuriuos apdorojimo procesus ištirti neįmanoma. Taip pat skirtingos garso plokštės gali turėti skirtingus garso efektus. Todėl, kaip alternatyva, pasirinktas tyrimas naudojant modeliavimą.

Poskyryje nagrinėjamas atliktas kompiuterinis garso signalų apdorojimo ir efektų modeliavimas, taikant *Pure Data* ir *Matlab* programines terpes. Pateikti gauti modeliavimo rezultatai ir jų interpretavimas [18, 37 – 38].

7.3.1. Procesų modeliavimas *Pure Data* programinėje terpėje

PD (*angl. Pure Data*) – tai vizualaus programavimo kalba ir programavimo terpė, sukurta 1990 metais Miller'io Puckette. Ši programavimo kalba skirta kurti interaktyviai kompiuterinei muzikai ir multimedijos darbams. Nors šios kalbos bei programinės įrangos jai kūrėjas yra M. Puckette, tačiau ji yra atvirojo kodo, laisvai platinama ir prie jos tobulinimo prisideda didelis skaičius programuotojų ir išradėjų iš viso pasaulio. PD yra vienas iš duomenų srauto programavimo kalbų pavyzdžių. Daugumoje SSA programų egzistuoja du duomenų perdavimo dažniai: garso signalų diskretizavimo dažnis, dažniausiai 44,1 kHz, ir valdymo dažnis, lygus 1 duomenų bloko 64 imtims. PD naudoja 4 pagrindinius tekstinių objektų tipus, skirtus PD programavimo terpei: žinutes, objektus, daleles ir komentarus.

Dalelės yra pagrindinis duomenų vienetas, sudarytas iš slankaus kablelio skaičių, simbolių ar rodyklių duomenų struktūrose. PD programavimo terpėje visi skaičiai saugomi 32 bitų slankaus kablelio reikšmių pavidalu.

Žinutės sudaromos iš vienos ar kelių dalelių, kuria valdymo instrukcijas duomenų objektams. Specialaus tipo žinutė be turinio, vadinama „*bang*“, skirta inicializuoti įvykiams ir duomenų perdavimui, panašiai kaip mygtuko paspaudimas.

Objektus gali sudaryti platus reikšmių ir kintamųjų diapazonas: matematiniai ir loginiai operatoriai, bitų reikšmės, specializuotos garso signalų dažnio reikšmės, kuriuos galima rasti kiekvienoje programavimo kalboje.

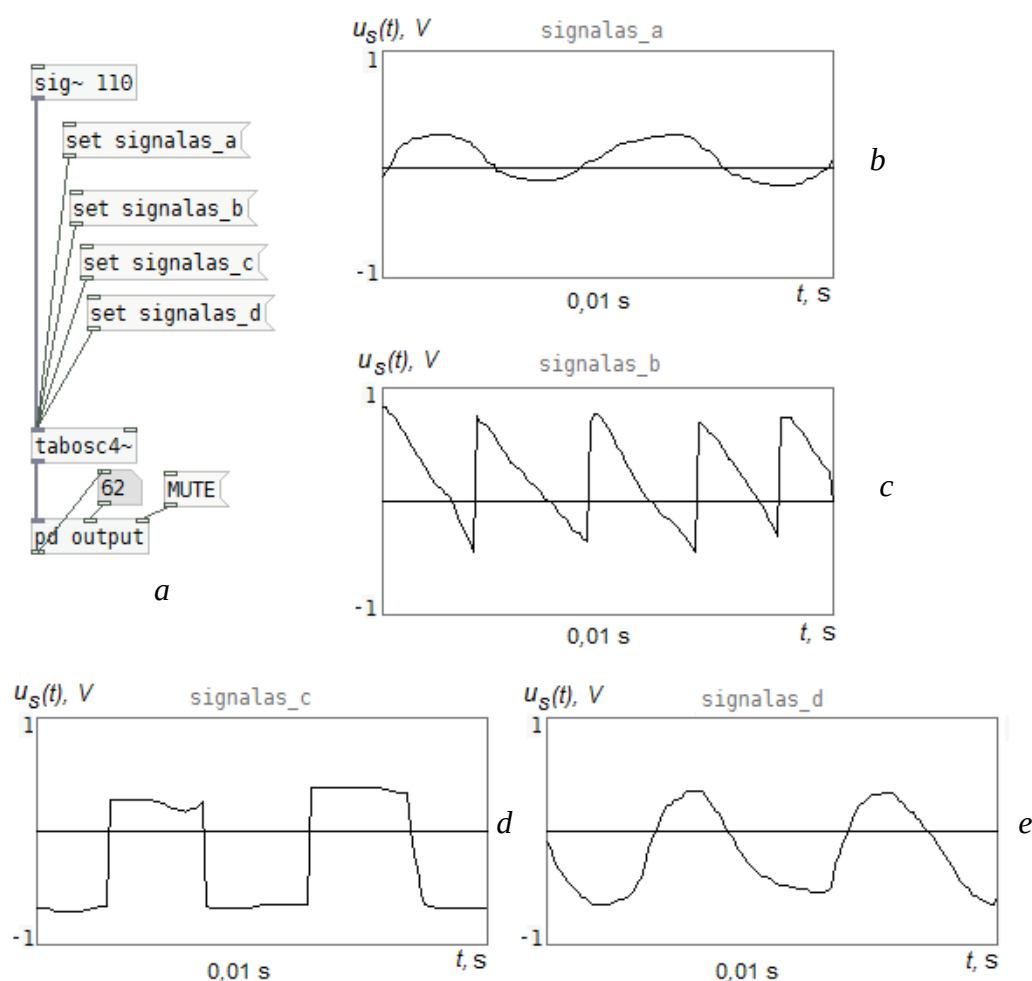
Specializuota reikšmė (~) skirta panaudoti SSA objektams ir funkcijoms tokioms kaip bangų lentelės signalų generatorius, greitoji Furje transformacija ar standartiniai signalų filtrai.

Apdorojami duomenys gali būti įkeliami iš išorinių bylų, skaitomi tiesiogiai iš kompiuterio garso plokštės, MIDI sąsajos, USB jungties, interneto arba generuojami realiu laiku ir saugomi duomenų lentelėse. Įkelti duomenys gali būti skaitomi ir panaudojami kaip garso signalai arba valdymo duomenys.

Komentaras – teksto ar simbolių tipo duomenų objektas, skirtas pateikti projektuotojo komentarams ar paaiškinimams, programinėje terpėje.

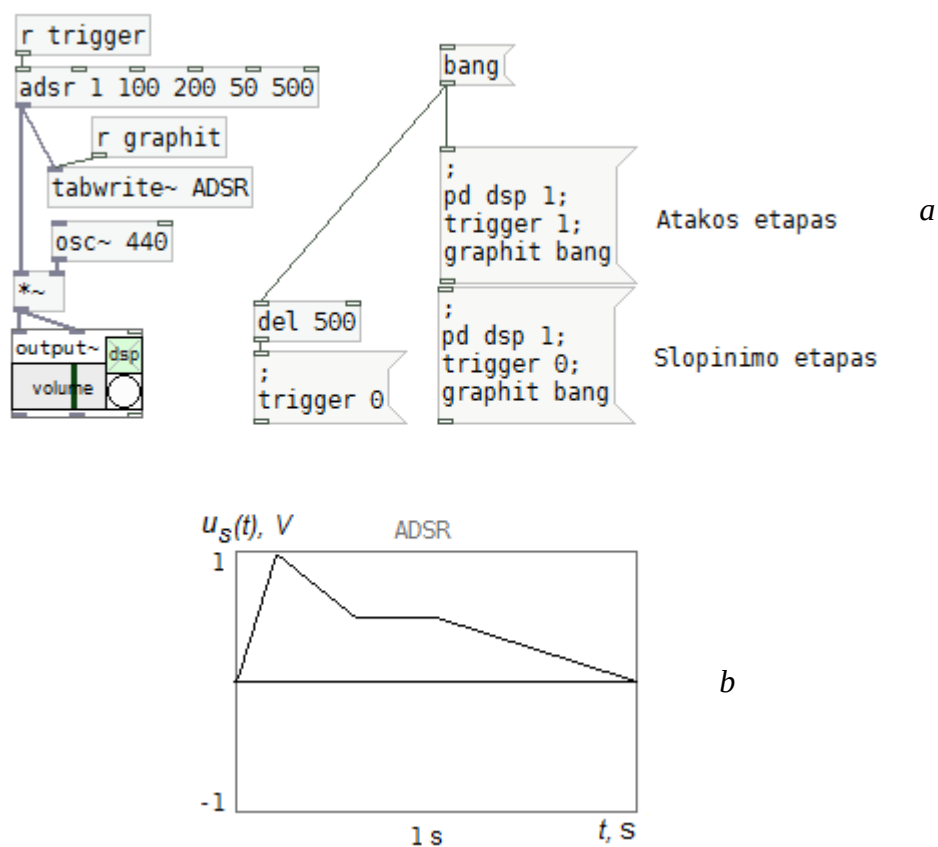
Žemiau pateikiami *Pure Data* (PD) programinėje terpėje modeliuotų procesų rezultatai.

7.17 paveiksle pateikiamas modelis, vaizduojantis, kaip atkuriami bangų lentelės atmintyje esantys skirtingi garsų fragmentai. Modelyje pasirenkant vieną iš keturių operacijos set variantų (set signalas_a, set signalas_b, set signalas_c, set signalas_d), atkuriamas pasirinktas atmintyje saugomas signalas [33, 35, 38].



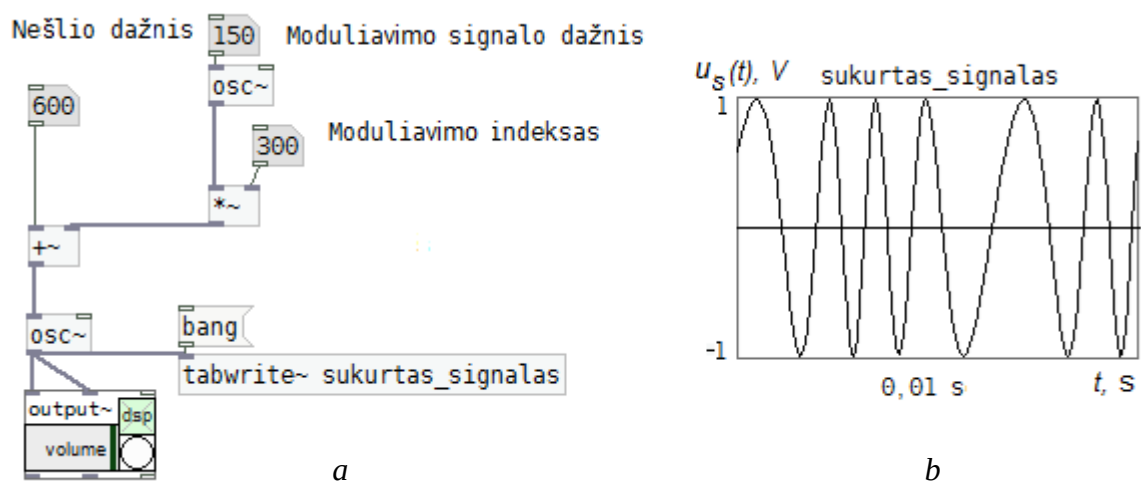
7.17 pav. PD programinėje terpėje sumodeliuotas bangų lentelių atmintyje esančių fragmentų atkūrimo principas: *a* – valdymo modelis, *b* – signalo a oscilograma, *c* – signalo b oscilograma, *d* – signalo c oscilograma, *e* – signalo d oscilograma

7.18 paveiksle pateikiamas signalo amplitudės moduliavimo ADSR procesas, naudojamas bangų lentelių sintezatoriuose apdorojant garsų fragmentus.



7.18 pav. PD programinėje terpėje sumodeliuotas signalo amplitudės moduliavimo ADSR procesas: *a* – valdymo modelis, *b* – signalo oscilograma

7.19 paveiksle pateiktas klasikinės FM sintezės metodo modelis.

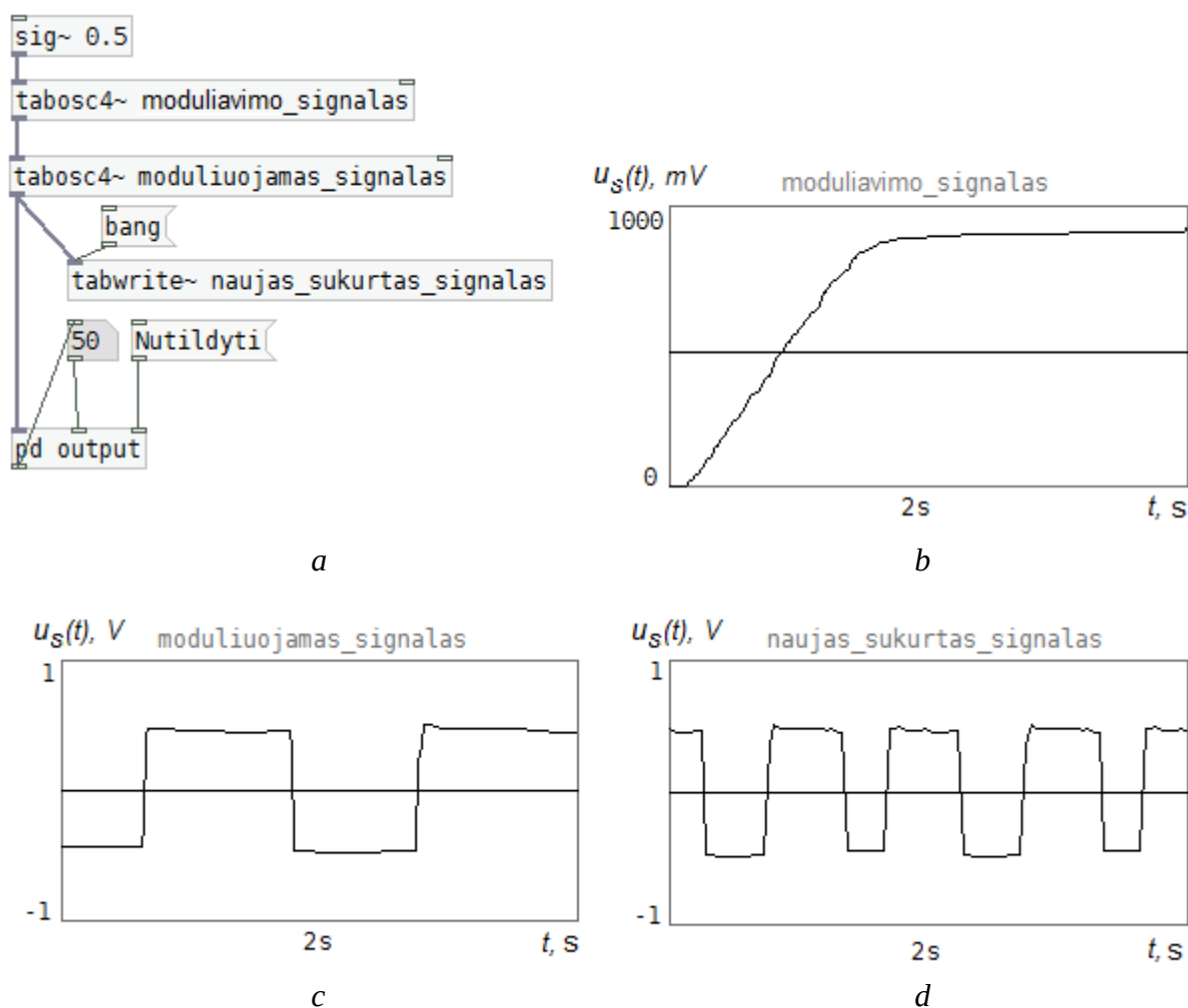


7.19 pav. PD programinėje terpėje sumodeliuota FM sintezė: *a* – valdymo modelis, *b* – signalo oscilograma

Nustačius nešlio dažnį apytiksliai 400 Hz, moduliavimo dažnį tarp 5 ir 10 Hz bei moduliavimo indekso vertę tarp 0 ir 400, girdimas sinusinės bangos su jai pritaikytu *Vibrato* efektu garso signalas.

Norint sukurti moduliuotą FM sintezės garso signalą, reikia visas tris nešlio dažnio, moduliavimo dažnio ir moduliavimo indekso reikšmes reikia nustatyti šimtų ribose.

7.19 paveiksle nešlio dažnis pasirinktas 600 Hz, moduliavimo dažnis 150 Hz ir moduliavimo indekso vertė 300.



7.20 pav. PD programinėje terpėje sumodeliuotas dažnio moduliavimo amplitudės modelis: *a* – valdymo modelis, *b* – moduliavimo signalo oscilograma, *c* – moduliuojamo signalo oscilograma, *d* – naujai sukurtos signalo oscilograma

7.20 paveiksle pateikiamas modelis, iliustruojantis, kaip vieno garso fragmento amplitudės vertės moduliuoja kito garso fragmento dažnį.

Moduliavimo signalo amplitudė kinta nuo 0 iki 1000 mV ir skaitoma 0,5 Hz dažniu. Skirtingu laiku moduliuojamo signalo dažnis kinta.

7.3.2. Garso efektų modeliavimas *Matlab* programinėje terpėje

Matlab programinėje terpėje buvo atliktas dešimties garso efektų (*Shelving*, *Wah-Wah*, *Vibrato*, *Flanger*, *Tremolo*, *Compression*, *Overdrive*, *Fuzz*, *Panning*, *Echo*) modeliavimas [10, 18, 37]. Pateiktos sumodeliuotų efektų oscilogramos ir spektrai.

Shelving efektas stiprina/slopina garso signalo žemų arba aukštų dažnių dedamąsias visame signale. *Shelving* garso efektą galima realizuoti pirmosios eilės filtru, kurį galima aprašyti perdavimo funkcijos pavidalu:

$$H(z) = 1 + \frac{H_0}{2} (1 \pm A(z)), \quad (7.2)$$

čia H_0 – pirmosios eilės filtro dalinė perdavimo funkcija, $A(z)$ – perdavimo funkcijos nuliai:

$$A(z) = \frac{Z^{-1} + a_{B/C}}{1 + a_{B/C} Z^{-1}}, \quad (7.3)$$

čia Z^{-1} – vėlinimo elementas, a_B – signalo dedamųjų stiprinimo reikšmė kartais, a_C – signalo dedamųjų slopinimo reikšmė kartais. Stiprinimo ir slopinimo reikšmėms randami pagal išraiškas:

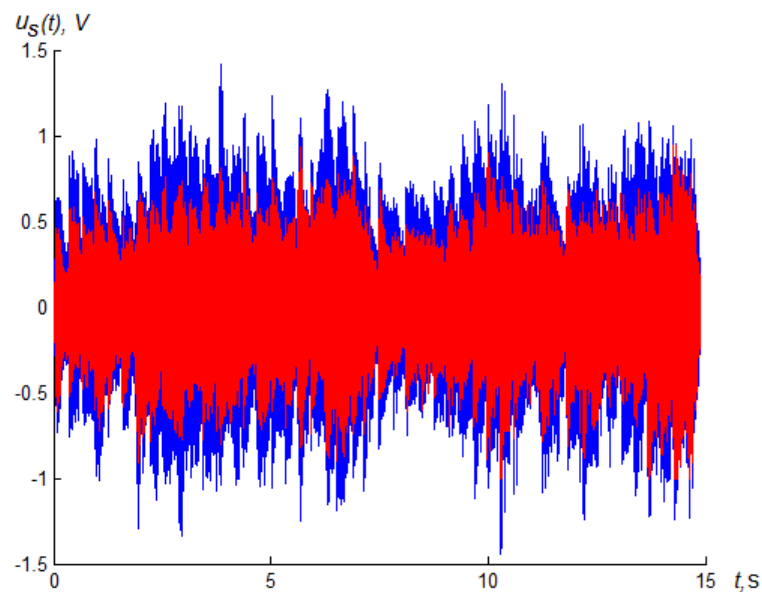
$$a_B = \frac{\tan(2\pi f_c / f_s) - 1}{\tan(2\pi f_c / f_s) + 1}, \quad (7.4)$$

$$a_C = \frac{\tan(2\pi f_c / f_s) - V_0}{\tan(2\pi f_c / f_s) + V_0}. \quad (7.5)$$

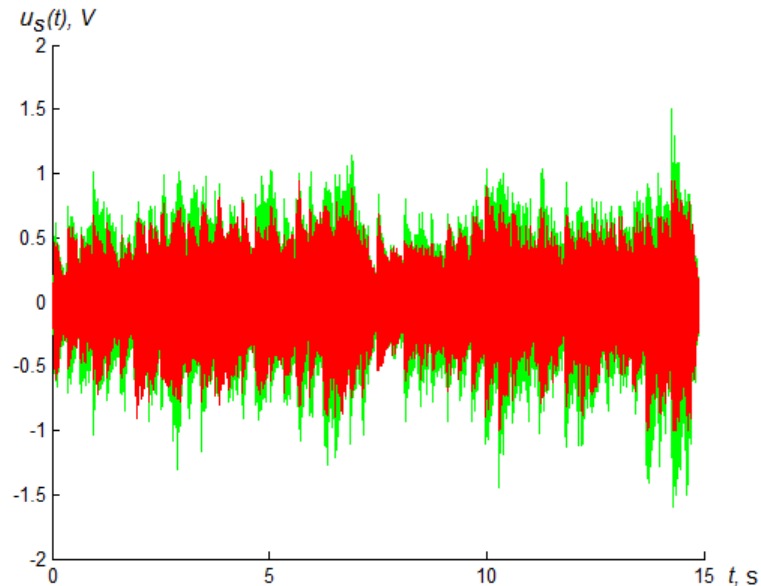
čia f_c – centrinis signalo dažnis, f_s – signalo diskretizavimo dažnis V_0 – signalo įtampa filtro įėjime. Signalų stiprinimą G dB galima keisti pagal tokią išraišką:

$$G = 20 \lg V_0 \quad (7.6)$$

Pagal (7.2 – 7.6) išraiškas buvo sumodeliuotas *Shelving* efekto poveikis garso signalui, kurio oscilogramos pateiktos 7.21 ir 7.22 paveiksluose.

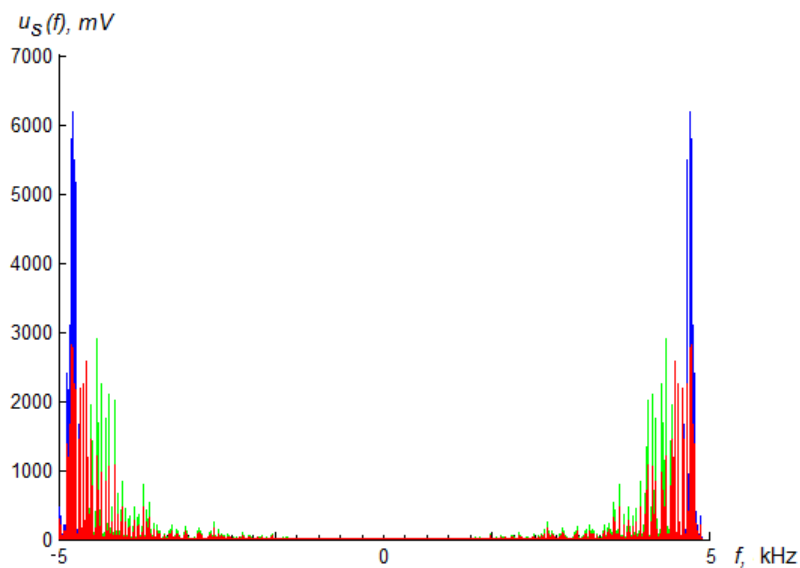


7.21 pav. Originalaus garso signalo – raudona spalva ir *Shelving* garso efekto paveikto žemuose dažniuose signalo – mėlyna spalva, oscilogramos



7.22 pav. Originalaus garso signalo – raudona spalva ir *Shelving* garso efekto paveikto aukštuose dažniuose signalo – žalia spalva, oscilogramos

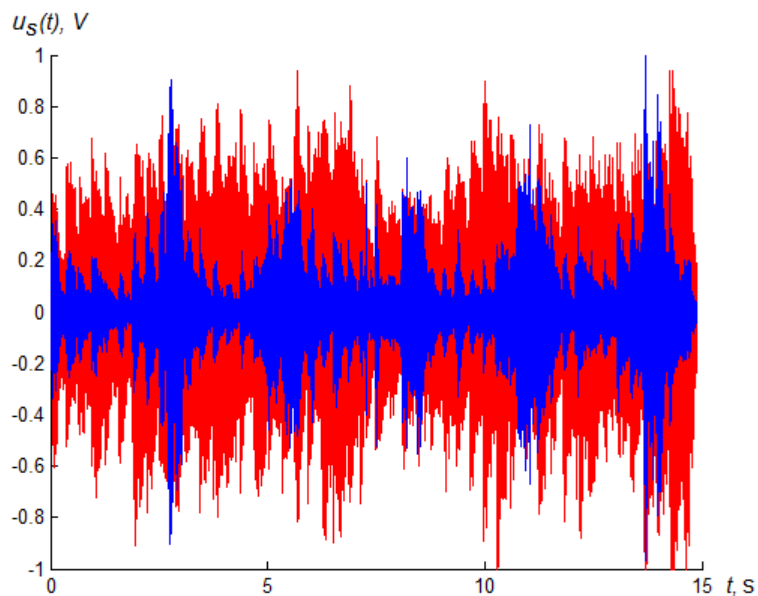
Iš 7.23 paveiksle pateiktų spektrų įsitikiname, kad *Shelving* efektas, atitinkamai parinkus stiprinimą ir nukirtimo dažnius, sustiprina žemų arba aukštų dažnių dedamąsias visame garso signalu [10].



7.23 pav. Originalaus garso signalo – raudona spalva, *Shelving* garso efekto paveikto žemuose dažniuose signalo – žalia spalva ir aukštuose dažniuose – mėlyna spalva, spektrai

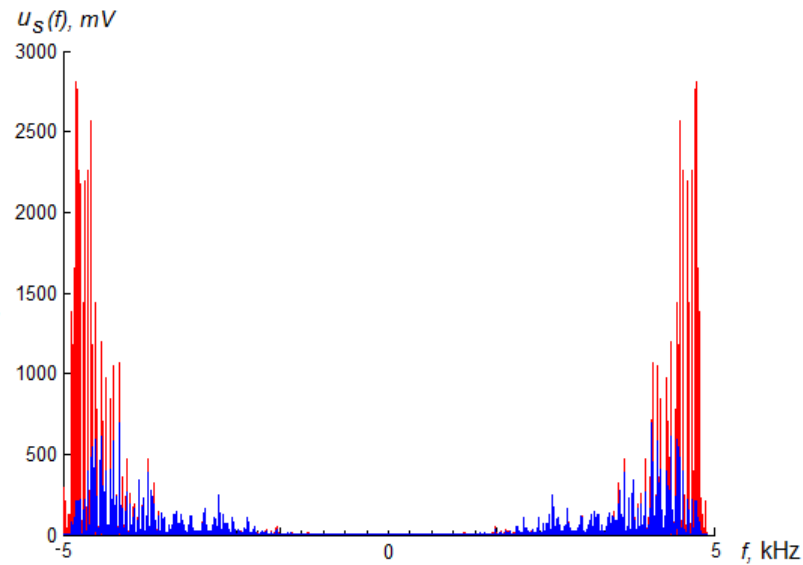
Wah-wah garso efektas (7.24 pav.) iškraipo originalų garso signalą, sustiprindamas jo žemų ir aukštų dažnių ruožus.

Sukuriamas garsas, panašus į žmogaus tariamą „ua“. *Wah-wah* garso efektui sukurti naudojamas plačiajuostis filtras su laike kintančiu centriniu dažniu ir siaura praleidžiamųjų dažnių juosta. Centrinis signalo dažnis keičiamas, sukuriant trikampio formos moduliavimo signalą.



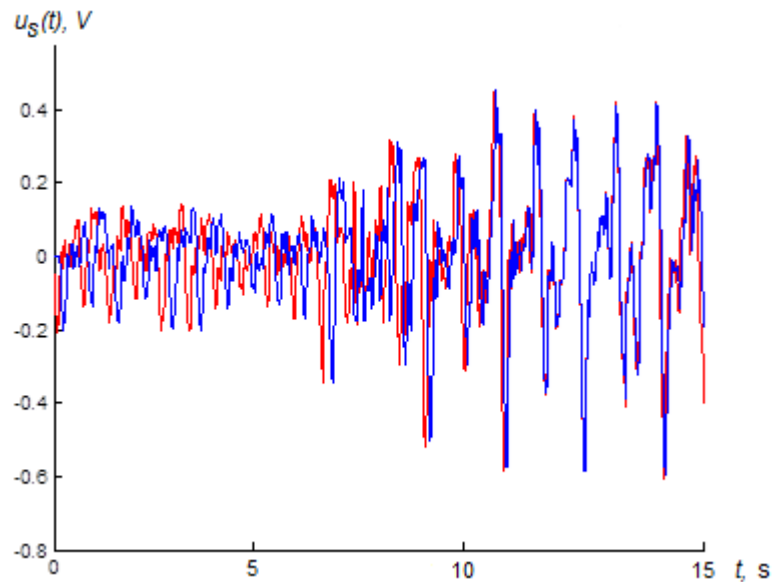
7.24 pav. Originalaus garso signalo – raudona spalva ir *Wah-wah* garso efekto paveikto signalo – mėlyna spalva, oscilogramos

7.25 paveiksle pateikti originalaus ir *Wah-wah* garso efekto paveikto signalų spektrai.



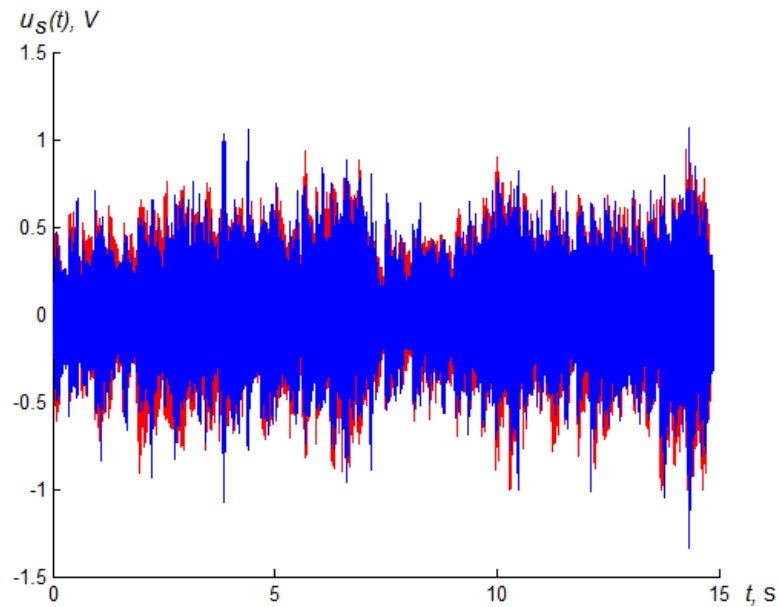
7.25 pav. Originalaus garso signalo – raudona spalva ir *Wah-wah* garso efekto paveikto signalo – mėlyna spalva, spektrai

Vibrato garso efektas (7.26 pav.) keičia garso signalo vėlinimo trukmę.



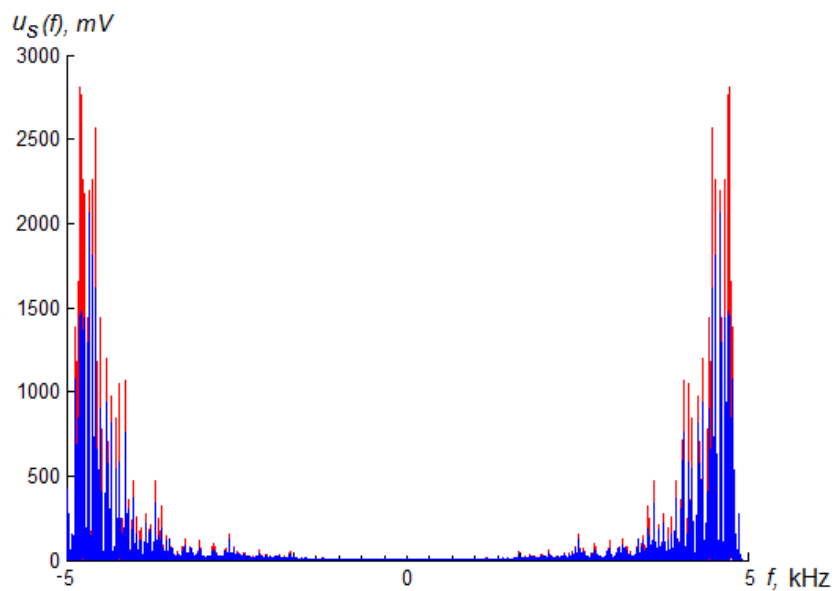
7.26 pav. Originalaus garso signalo – raudona spalva ir *Vibrato* garso efekto paveikto signalo – mėlyna spalva, oscilogramos

Flanger garso efektas (7.27 pav.) yra sukuriamas, kai prie originalaus garso signalo prijungiama vėlinta jo paties kopija. Vėlinimo laikas nuolatosis kinta.



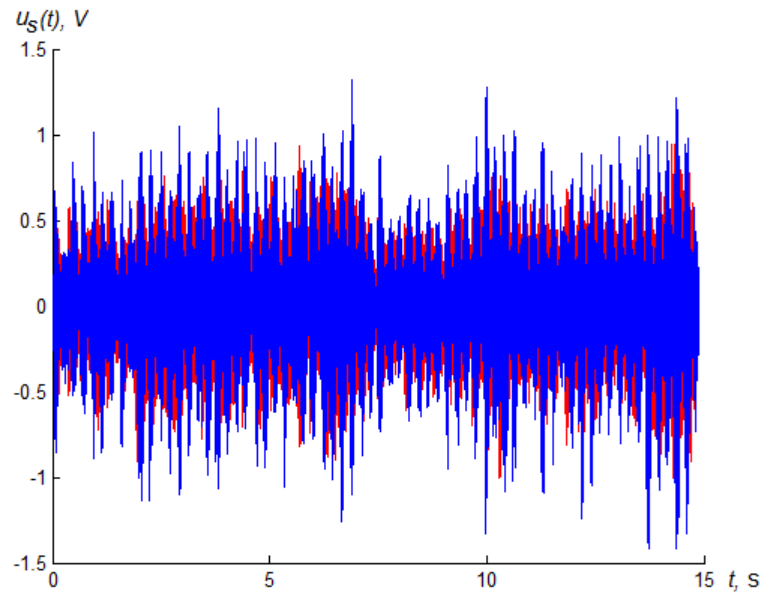
7.27 pav. Originalaus garso signalo – raudona spalva ir *Flanger* garso efekto paveikto signalo – mėlyna spalva, oscilogramos

7.28 paveiksle pateikti originalaus ir *Flanger* garso efekto paveikto signalų spektrai.



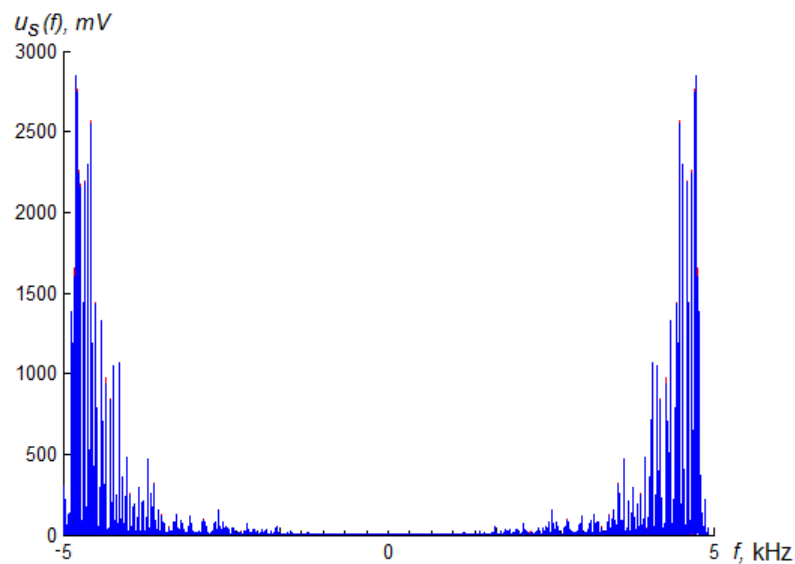
7.28 pav. Originalaus garso signalo – raudona spalva ir *Flanger* garso efekto paveikto signalo – mėlyna spalva, spektrai

Tremolo garso efektas (7.29 pav.) sukuriamas keičiant garso signalo garsį. Tam naudojamas amplitudės moduliavimas.



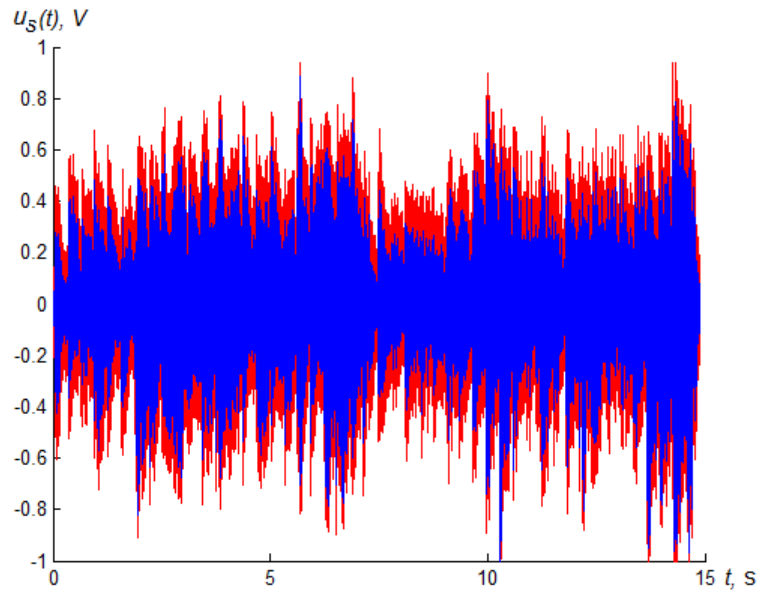
7.29 pav. Originalaus garso signalo – raudona spalva ir *Tremolo* garso efekto paveikto signalo – mėlyna spalva, oscilogramos

7.30 paveiksle pateikti originalaus ir *Tremolo* garso efekto paveikto signalų spektrai.



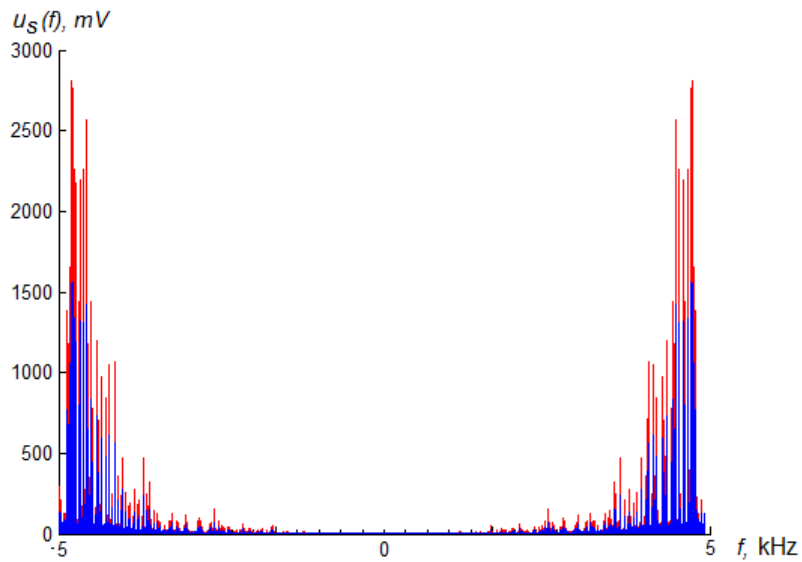
7.30 pav. Originalaus garso signalo – raudona spalva ir *Tremolo* garso efekto paveikto signalo – mėlyna spalva, spektrai

Compression garso efektas (7.31 pav.) sukuriamas suvienodinant garso signalą, t. y. pagarsinant tylas ir pritildant garsias signalo dedamąsias.



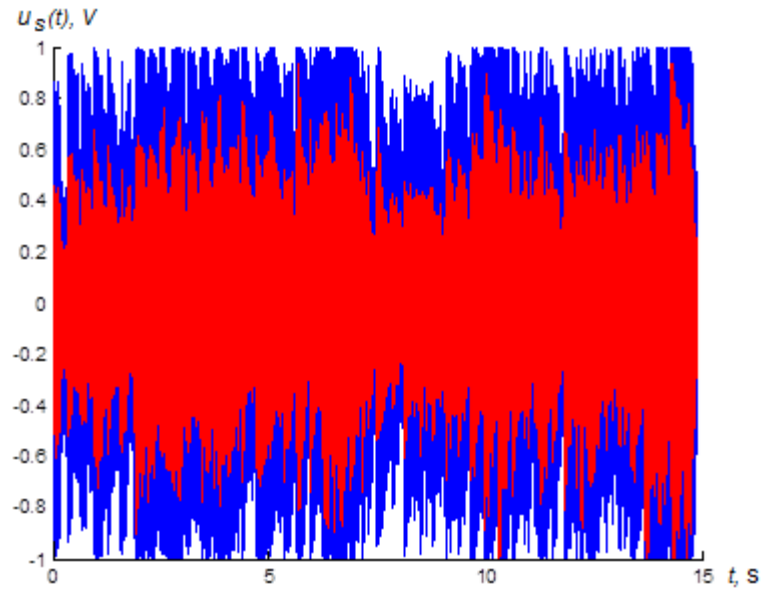
7.31 pav. Originalaus garso signalo – raudona spalva ir *Compression* garso efekto paveikto signalo – mėlyna spalva, oscilogramos

7.32 paveiksle pateikti originalaus ir *Compression* garso efekto paveikto signalų spektrai.



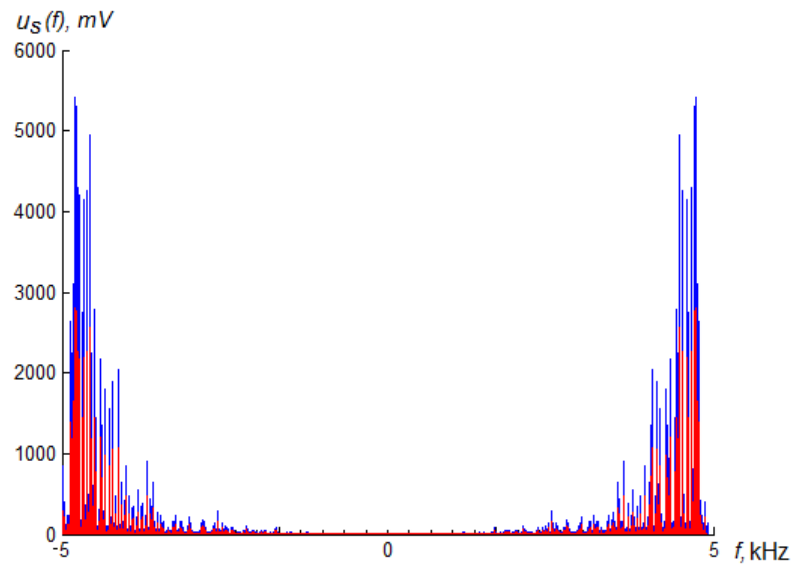
7.32 pav. Originalaus garso signalo – raudona spalva ir *Compression* garso efekto paveikto signalo – mėlyna spalva, spektrai

Overdrive ir *Fuzz* garso efektai (7.33 – 7.35 pav.) sukuriama sustiprinant garso signalą, t. y. padidinant jo amplitudę.



7.33 pav. Originalaus garso signalo – raudona spalva ir *Overdrive* garso efekto paveikto signalo – mėlyna spalva, oscilogramos

7.34 paveiksle pateikti originalaus ir *Overdrive* garso efekto paveikto signalų spektrai.

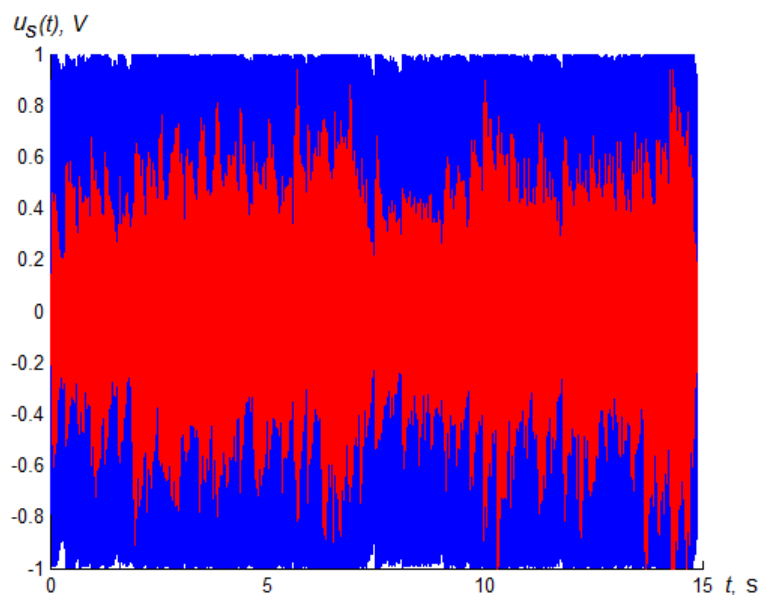


7.34 pav. Originalaus garso signalo – raudona spalva ir *Overdrive* garso efekto paveikto signalo – mėlyna spalva, spektrai

Fuzz garso efektą galima aprašyti netiesinės eksponentinės funkcijos pavidalu:

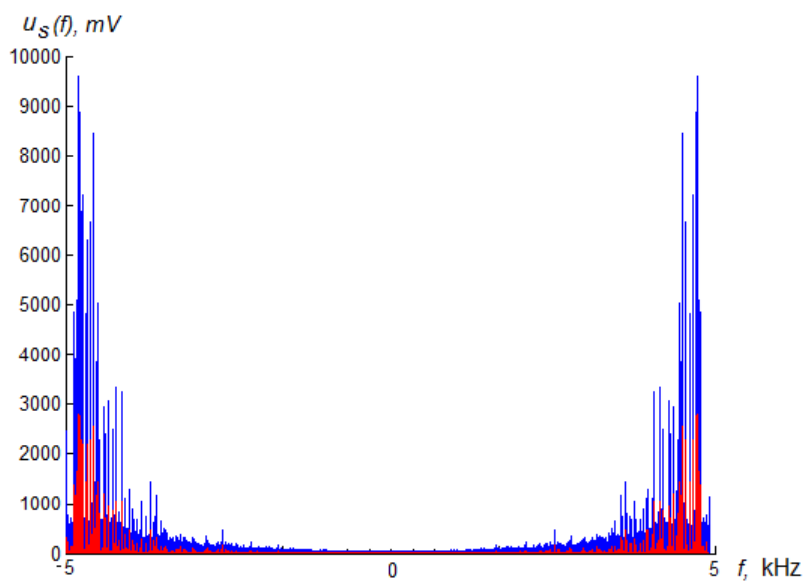
$$f(x) = \frac{x}{|x|} \left(1 - e^{-\frac{ax^2}{|x|}} \right). \quad (7.8)$$

čia $f(x)$ – Fuzz garso efektą realizuojančio filtro funkcija, x – funkcijos argumentas, a – signalo stiprinimo koeficientas, naudojamas keisti garso efekto intensyvumui.



7.35 pav. Originalaus garso signalo – raudona spalva ir Fuzz garso efekto paveikto signalo – mėlyna spalva, oscilogramos

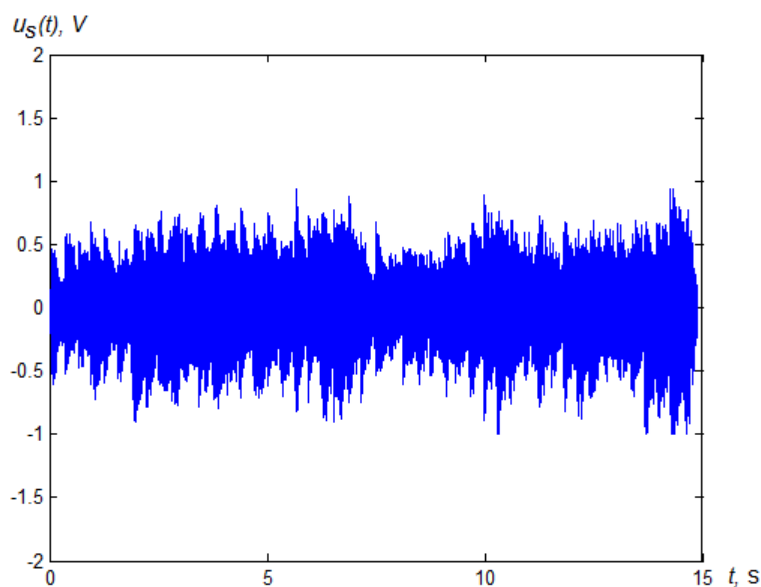
7.36 paveiksle pateikti originalaus ir Fuzz garso efekto paveikto signalų spektrai.



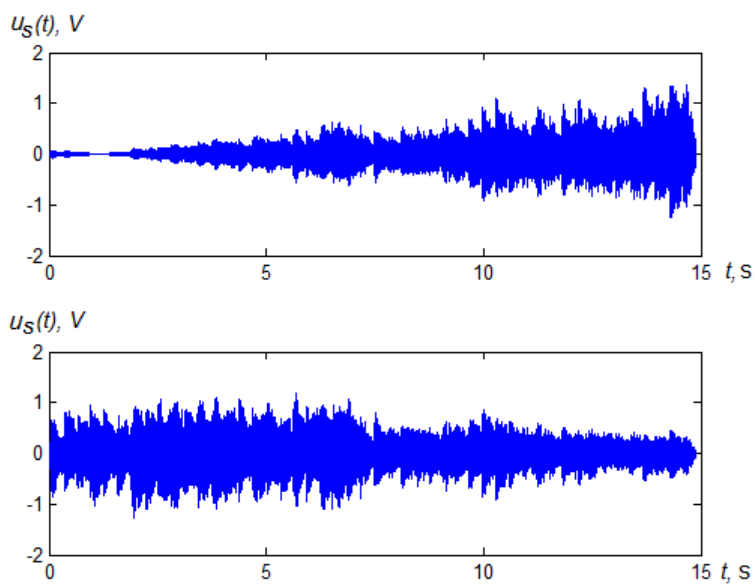
7.36 pav. Originalaus garso signalo – raudona spalva ir Fuzz garso efekto paveikto signalo – mėlyna spalva, spektrai

Panning garso efektas (7.37 – 7.38 pav.) sukuria signalo „šokinėjimo“ iš vieno stereokanalo į kitą pojūtį – vienam tylant, kitas garsėja. Efektas sukuriamas skirtinguose kanaluose palaipsniui sustiprinant ir nuslopinant skirtingas signalo dalis.

7.37 paveiksle pateikta originalaus garso signalo oscilograma.

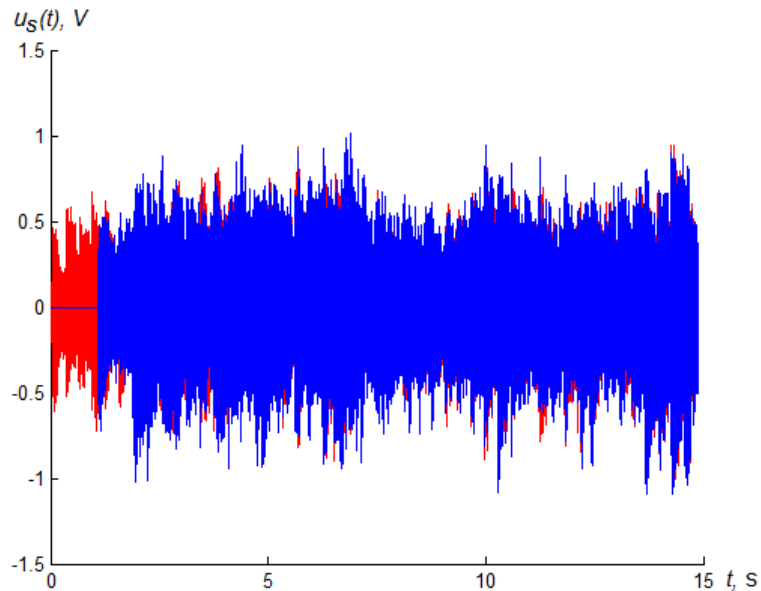


7.37 pav. Originalaus garso signalo oscilograma



7.38 pav. *Panning* garso efekto – kairiajam ir dešiniajam kanalams oscilogramos

Echo garso efektas (7.39 pav.) sukuriamas vėlinant visą garso signalą. Tokiu būdu atsiranda aido pajūtis.



7.39 pav. Originalaus garso signalo – raudona spalva ir *Echo* garso efekto paveikto signalo – mėlyna spalva, oscilogramos

Modeliuojant *Pure Data* programinėje terpėje galima buvo įsitikinti, kad ankstesniuose skyriuose pateikti sintezės metodai veikia būtent taip, kaip tai buvo aiškinama.

Skyriuje išnagrinėtas TSS metodas, išanalizuoti eksperimentinio TSS metodo tyrimo metu gauti rezultatai. Taikant TSS metodą, KGP atmintis turėtų būti žymiai mažesnė negu WT sintezės atveju. Pagrindinis šio metodo trūkumas – sudėtingas bangų lentelių sudarymas. Taip pat išnagrinėtas kompiuterinis keturių signalų apdorojimo procesų ir dešimties garso efektų modeliavimas, taikant *Pure Data* ir *Matlab* programines terpes. Pateikti gauti modeliavimo rezultatai ir jų interpretavimas.

Modeliavimas atliktas *Pure Data* programinėje terpėje leido reliu metu analizuoti garso signalų apdorojimo procesus vykstančius KGP.

Garso efektų modeliavimas *Matlab* programinėje terpėje leido ištirti garso efektų realizavimo mechanizmus. Buvo nustatyta, kad dažniausiai naudojamus garso efektus galima realizuoti naudojant pirmosios ar antrosios eilės filtrais. Taigi kombinuojant paprastus filtras galima sukurti sudėtingesnius garso efektus.

8. DARBO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS IR IŠVADOS

Magistro baigiamajame darbe:

1. Išanalizuota garso signalų prigimtis, išsiaiškinta, kaip kompiuterio garso plokštė „supranta“ ir interpretuoja joje apdorojamus garso signalus. Apibūdinti analoginiai ir skaitmeniniai (diskretaus laiko) signalai, išanalizuota, kaip jie gaunami ir kuo skiriasi. Pateikti svarbiausi analoginių ir skaitmeninių (diskretaus laiko) signalų parametrai. Išanalizuota bangų lentelių signalų prigimtis, gavimo principai, išaiškintas bangų lentelių paieškos veikimas.

Nustatyta, kad: pasinaudojus gautomis žiniomis galima atlikti kompiuterių garso plokštėse naudojamų metodų ir procesų signalams apdoroti analizę.

2. Aptarti procesai, vykstantys keičiant analoginį signalą skaitmeniniu ir atvirkščiai. Išnagrinėtas garso signalų kvantavimas ir kodavimas ASK bei galimi kvantavimo triukšmo tipai ir jų atsiradimo priežastys. Apžvelgti ir palyginti trys interpoliavimo metodai, kuriuos galima taikyti keičiant skaitmeninius signalus analoginiais.

Nustatyta, kad: pagrindiniai procesai, kuriuos būtina taikyti signalų vertimo iš vienos jų formos į kitą metu yra diskretizavimas, kvantavimas-kodavimas ir interpoliavimas.

3. Atliktas kompiuterių garso plokštėse naudojamų sintezatorių tyrimas. Pateikta trumpa kompiuterių garso plokščių ir jose taikomų sintezatorių vystymosi istorija. Išnagrinėti KGP taikomų sintezatorių tipai.

3.1. Darbe išnagrinėtas dažnių moduliavimo sintezės principas ir jo poveikis garso signalams kompiuterių garso plokštėse. Išnagrinėtas FM sintezės matematinis modelis. Ištirtas FM sintezatoriaus veikimas. Pateikti teoriniai sintezės ir sintezatoriaus veikimo pavyzdžiai. Sukurta *Matlab* terpėje veikianti programa, skirta dažnių moduliavimui tirti.

Nustatyta, kad: dažniausiai naudojami dažnių moduliavimo FM arba bangų lentelių WT sintezatoriai, kai kuriose KGP galima aptikti abiejų tipų sintezatorius.

3.2. Ištirtas bangų lentelių sintezės principas. Išnagrinėtas bangų lentelių sintezatoriaus veikimas ir galimybės. Aptarti pagrindiniai sintezatoriuje taikomi metodai ir procesai, skirti jo galimybėms didinti ir naudojamų garso fragmentų dydžiui mažinti.

Nustatyta, kad: bangų lentelių sintezatoriai spartesni ir paprastesni negu FM sintezatoriai. Tačiau tyrimo metu buvo išsiaiškinta pagrindinė tokių sintezatorių problema – nemažas saugomų garso fragmentų dydis. Norint sumažinti jų dydį, reikia naudoti naujus metodus ir technologijas, kurios leistų jį mažinti, neprarandant jų kokybės ir skaičiaus.

Tačiau atminties didinimas suteikia galimybę sintezuoti daugiau naujų ir sudėtingų signalų. Taigi bangų lentelių sintezatorių tobulinimas sudaro problemų.

3.3. Išanalizuotas išorinio MIDI sintezatoriaus veikimas, KGP MIDI mikrovaldiklio paskirtis. Paaiškintas MIDI sintezatoriaus komandų formavimo bei veikimo principas.

4. Atliktas kompiuterių garso plokštėse naudojamų procesorių, filtrų bei signalų apdorojimo juose, tyrimas.

4.1. Išnagrinėti signalų apdorojimo procesai KGP procesoriuose. Palyginti mažo ir didelio našumo KGP procesoriai, išanalizuoti juose realizuojami apdorojimo metodai ir matematinės procedūros.

4.2. Išnagrinėtas signalų apdorojimas KGP filtruose. Palyginti dviejų rūšių skaitmeniniai filtrai – RIR ir BIR. Išnagrinėti RIR ir BIR filtrų skaičiavimai ir veikimo principai. Išanalizuoti RIR ir BIR filtrų komponentai, jų paskirtis apdorojant garso signalus KGP.

Nustatyta, kad: daugumoje šiuolaikinių garso plokščių signalų keitikliai, sintezatoriai ir garso signalų filtrai realizuoti KGP procesoriuje, todėl visas garso plokštės funkcijas gali atlikti vienas KGP procesorius.

5. Išnagrinėta, nuo ko priklauso polifonija (balsų skaičius) kompiuterio garso plokštėje. Išnagrinėti pagrindiniai garso efektų tipai ir kelių iš jų matematinės išraiškos. Nustatyti KGP elementai, ribojantys polifoniją ir garso efektų skaičių.

Nustatyta, kad: polifoniją ir garso efektų skaičių riboja filtrų veikimo sparta bei juose taikomi signalų apdorojimo metodai, taip pat sintezatorių veikimo sparta, sintezavimo metodai ir naudojamos atminties dydis. Kadangi moderniose KGP visi šie elementai sujungti į vieną KGP procesorių, galima teigti, kad polifoniją ir garso efektų skaičių riboja KGP procesoriaus sparta, palaikomos signalų apdorojimo funkcijos bei metodai ir atminties dydis.

6. Atliktas eksperimentinis tiesioginės skaitmeninės sintezės tyrimas. Išnagrinėtas šios sintezės veikimo principas ir jo realizavimas *Altera* DE2 makete.

Nustatyta, kad: šis sintezės metodas yra panašus į WT metodą, nes TSS metode taip pat naudojamos bangų lentelės. Jose saugomi ne garsų fragmentai, o tik skaitmeniniu pavidalu sinusinio signalo momentinės reikšmės, kurioms saugoti, taikant TSS metodą, atmintis turėtų būti žymiai mažesnė. Pagrindinis TSS metodo trūkumas – sudėtingas bangų lentelių sudarymas. Tam reikia iš anksto žinoti, kokios formos turės būti sintezuojamasis signalas.

7. Atliktas kompiuterinis keturių signalų apdorojimo procesų ir dešimties garso efektų modeliavimas, taikant *Pure Data* ir *Matlab* programines terpes. Pateikti modeliavimo rezultatai ir jų interpretavimas.

Nustatyta, kad: dažniausiai naudojamus garso efektus galima realizuoti naudojant pirmosios ar antrosios eilės filtrais. Taigi kombinuojant paprastus filtrus galima sukurti sudėtingesnius garso efektus. Todėl galima naudoti mažesnio našumo KGP procesorius.

8. Perskaityti keturi, su magistro baigiamuoju darbu susiję, pranešimai konferencijose, po du Kaune ir Vilniuje. Publikuoti du straipsniai Kauno konferencijų medžiagoje kompiuterių garso plokščių tyrimo ir eksperimentinės garso signalų sintezės temomis.

9. PASIŪLYMAI

Magistro baigiamojo darbo tyrimo metu buvo nustatyta, kad TSS metodas naudoja tik ~7 kB atminties saugoti sinusinio signalo momentinėms reikšmėms. Tai žymiai mažiau, lyginant su atminties dydžiu, reikalingu saugoti natūralių garsų fragmentams bangų lentelių metodu – 125 kB 1 fragmentui, ~8 MB įprastiems 64 fragmentams. Todėl TSS metodą galima taikyti KGP kaip WT metodo papildinį, palyginti mažai padidinant atmintį.

Taip pat, atlikus garso efektų modeliavimą, galima teigti, kad dauguma garso efektų sukuriami manipuliuojant signalo amplitudę ir vėlinimą, tačiau sudėtingesniems efektams būtinas ir filtrų taikymas. Norint gauti labai sudėtingus garso efektus, reikia naudoti sudėtingus filtrus arba, norint to išvengti, galima kombinuoti kelis paprastus filtrus. Atliktas garso efektų modeliavimas *Matlab* programinėje terpėje tai patvirtino. Anksčiau buvo minėta, kad kompiuterių garso plokščių galimybės riboja KGP procesorių sparta ir galimybės naudoti sudėtingas signalų apdorojimo operacijas. Tačiau įsitikinus, kad sudėtingus garso efektus galima sukurti naudojant kombinuotus, iš kelių paprastų filtrų sudarytus, filtrus, KGP procesoriaus tobulinimas tampa nereikalingas. Todėl KGP galima naudoti palyginti mažo našumo procesorius.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. *ADC and DAC Glossary* [interaktyvus] [žiūrėta 2011 04 12]. Prieiga per internetą: <http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/641>.
2. Alan V. O., Ronald W. S., John R. B. *Discrete-Time Signal Processing*. Prentice Hall, 1998. 870 p.
3. *An Introduction to Delta Sigma Converters* [interaktyvus] [žiūrėta 2010 03 10]. Prieiga per internetą: <http://www.beis.de/Elektronik/DeltaSigma/DeltaSigma.html>.
4. *Analog Versa Digital Signals* [interaktyvus] [žiūrėta 2011 05 10]. Prieiga per internetą: <http://cbdd.wsu.edu/kewlcontent/cdoutput/TR502/page8.htm>.
5. Artur K., Izzet K. *DSP System Design: Complexity Reduced IIR Filter Implementation for Practical Applications*. Kluwer Academic Publishers, 2003. 246 p.
6. Ashfaq K. *Digital Signal Processing Fundamentals*. Charles River, 2004. 391 p.
7. *Audio Signal Processing Basics* [interaktyvus] [žiūrėta 2010 10 06]. Prieiga per internetą: <http://www.cs.tut.fi/sgn/arg/intro/basics.html>.
8. Ballora M. *Essentials of Music Technology*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2003. 248 p.
9. Bernard M., Peter G., John T. *Digital Signal Processing – Concepts and Applications*. Palgrave Macmillan, 2002. 408 p.
10. Bimal K., Lin K. Y., Hari C. K. *Computational Number Theory & Digital Signal Processing*. CRC Press, 1994. 330 p.
11. Boaz P. *A Course in Digital Signal Processing*. Wiley, 1996. 632 p.
12. Bosi M., Richard E. G. *Introduction to Digital Audio Coding and Standards*, 2003. 458 p.
13. Charles A. S. *Digital Signal Processing: A Hands – on Approach*. McGraw-Hill, 2003. 288 p.
14. Dodge C., Jerse T. *Computer Music: Synthesis, Composition and Performance*. Schirmer. New York, 1985. 480 p.
15. Doug S. *Digital Signal Processing Technology: Essentials of the Communications Revolution*. American Radio Relay League, 2001. 236 p.
16. Dunn J. *Measurement Techniques for Digital Audio*, 2003. 329 p.

17. Elsea P. *Analog Recording of Sound* [interaktyvus] [žiūrėta 2010 06 14]. Prieiga per internetą: http://artsites.ucsc.edu/EMS/music/tech_background/TE-19/teces_19.html.
18. Gaydecki P. *Foundations of Digital Signal Processing: Theory, Algorithms and Hardware Design*. Institution of Electrical Engineers, 2004. 462 p.
19. Gražulevičius G. *Kompiuterių garso sistemų tyrimas ir taikymas*: daktaro disertacija. Vilnius, 2004.
20. Hari K. G. *Digital Signal Processing Algorithms*. CRC Press, 1998. 637 p.
21. Henrique S. M. *Signal Processing with Lapped Transforms*. Artech House Publishers, 1992. 380 p.
22. *How Analog and Digital Recording Works* [interaktyvus] [žiūrėta 2011 07 01]. Prieiga per internetą: <http://communication.howstuffworks.com/analog-digital.htm>.
23. Ifeachor E. C., Jervis B W. *Digital Signal Processing: A Practical Approach*, 2002. 960 p.
24. *Introduction to Computer Music: Volume One* [interaktyvus] [žiūrėta 2011 05 10]. Prieiga per internetą: <http://www.indiana.edu/~emusic/etext/toc.shtml>.
25. James D. B. *Digital Signal Processing Demystified*. Newnes, 1997. 232 p.
26. James H. M., Ronald W. S., Mark A. Y. *Signal Processing First*. Prentice Hall, 2003. 489 p.
27. John G. *A Self-Study Guide for Digital Signal Processing*. Prentice Hall, 2003. 224 p.
28. John G. P., Dimitris M. *Digital Signal Processing – Principles, Algorithms and Applications*. Pearson, 1995. 1016 p.
29. Joyce V. V. *Fundamentals of Digital Signal Processing*. Prentice Hall, 2001. 810 p.
30. Jonathan Y. S. *Digital Signal Processing a Computer Science Perspective*. Wiley, 2000. 856 p.
31. Jonathan M. B., Martin T. *Digital Signal Processing: Mathematical and Computational Methods, Software Development and Applications*. Horwood, 2003. 757 p.
32. Joseph R. *MIDI – A Comprehensive Introduction. A – R Editions*, 1992. 865 p.
33. Lesurf J. *Information and Measurement, 2nd Edition (Series in Measurement Science and Technology)*, 2007. 295 p.
34. Mališauskas V. *Garso technika*: mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2005. 152 p.
35. Metzler B. *The Audio Measurement Handbook*, 2005. 178 p.
36. *MIDI and Music Synthesis* [interaktyvus] [žiūrėta 2011 05 10]. Prieiga per internetą: http://www.midi.org/aboutmidi/tut_midimusicynth.php.

37. Navakauskas D, Serackis A. *Skaitmeninis signalų apdorojimas taikant MATLAB*. Vilnius: Technika, 2008. 400 p.
38. Paul A.L., Wolfgang F. *Introductory Digital Signal Processing with Computer Applications*. John Wiley & Sons, 1998. 494 p.
39. Puckette M. *Theory and Techniques of Electronic Music*. 316 p.
40. Richard G. L. *Understanding Digital Signal Processing*. Prentice Hall, 2004. 688 p.
41. Sen M. K., Woon-Seng G. *Digital Signal Processors: Architectures, Implementations and Applications*. Prentice Hall, 2004. 624 p.
42. Smith W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing* [interaktyvus] [žiūrėta 2010 08 18]. Prieiga per internetą: <http://www.dspguide.com/pdfbook.htm>.
43. Steven W. S. *Digital Signal Processing – A Practical Guide for Engineers and Scientists*. Newnes, 2002. 650 p.
44. *The Data Conversion Handbook* [interaktyvus] [žiūrėta 2010 08 12]. Prieiga per internetą: www.analog.com/library/analogDialogue/archives/39-6/data_conversion_handbook.html.
45. *Understanding Analog to Digital Converter Specifications* [interaktyvus] [žiūrėta 2011 03 25]. Prieiga per internetą: <http://www.embedded.com/columns/technicalinsights/60403334>.
46. *Understanding Direct Digital Synthesis (DDS)*. National Instruments [interaktyvus]. [žiūrėta 2011 05 12]. Prieiga per internetą: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/5516>.
47. Vijay M., Douglas B. W. *The Digital Signal Processing*. CRC Press, 1997. 1776 p.
48. Watkinson J. *An Introduction to Digital Audio*, 1994. 419 p.
49. *What is an Analog Signal?* [interaktyvus] [žiūrėta 2011 02 10]. Prieiga per internetą: <http://www.wisegeek.com/what-is-an-analog-signal.htm>.
50. Wikipedia. *Analog to Digital Converter*. [interaktyvus] [žiūrėta 2010 03 14]. Prieiga per internetą: http://en.wikipedia.org/wiki/Analog-to-digital_converter.
51. Wikipedia. *Digital Audio* [interaktyvus] [žiūrėta 2011 05 10]. Prieiga per internetą: http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_audio.
52. Wikipedia. *Digital Signal Processing* [interaktyvus] [žiūrėta 2011 04 19]. Prieiga per internetą: http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_signal_processing.
53. Wikipedia. *Digital to Analog* [interaktyvus] [žiūrėta 2010 05 09]. Prieiga per internetą: http://en.wikipedia.org/wiki/Digital-to-analog_converter.
54. Wikipedia. *Interpolation* [interaktyvus] [žiūrėta 2010 02 10]. Prieiga per internetą: <http://en.wikipedia.org/wiki/Interpolation>.

Magistro baigiamojo darbo autoriaus publikacijos:

55. Kalinauskas M. Vadovas Mališauskas V. Kompiuterių garso plokščių tyrimas. Telekomunikacijos ir elektronika 2010: tarptautinės studentų mokslinės konferencijos programa ir pranešimų medžiaga. Kaunas: Technologija, 2010. p. 36 – 39.

56. Kalinauskas M. Vadovas Mališauskas V. Eksperimentinis garso signalų sintezės tyrimas. Telekomunikacijos ir elektronika 2011: studentų mokslinės konferencijos programa ir pranešimų medžiaga. Kaunas: Technologija, 2011. p. 53 – 56.

BAIGIAMOJO DARBO PRIEDAI A–I

Priedas A. Straipsnis tarptautinės studentų mokslinės konferencijos Telekomunikacijos ir elektronika 2010 medžiagoje.

Priedas B. Straipsnis studentų mokslinės konferencijos Telekomunikacijos ir elektronika 2011 medžiagoje.

Priedas C. Pranešimo XIII-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje 2010 medžiaga.

Priedas D. Pranešimo XIV-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje 2011 medžiaga.

Priedas E. Pranešimo tarptautinėje studentų mokslinėje konferencijoje Telekomunikacijos ir elektronika 2010 medžiaga.

Priedas F. Pranešimo studentų mokslinėje konferencijoje Telekomunikacijos ir elektronika 2011 medžiaga.

Priedas G. Pažymos ir diplomai.

Priedas H. Eksperimentiniam tyrimui sukurtos *Verilog* kalba programos kodas.

Priedas I. FM sintezavimo principo tyrimui sukurtos *Matlab* programos kodas.

Kompiuterių garso plokščių tyrimas

M. Kalinauskas, KTfm-09 gr. Vadovas doc. dr. V. Mališauskas

VG TU, Elektronikos fakultetas, Kompiuterių inžinerijos katedra,

Naujarduko g. 41, LT-03227, Vilnius, Lietuva, tel: +370 60563758; e-paštas: mykolas.kalinauskas@el.vgtu.lt

Ivadas

Kompiuterių garso plokščių (KGP) pagrindinė paskirtis yra analoginių ir skaitmeninių garso signalų priėmimas iš šaltinių, apdorojimas ir pateikimas akustinėms sistemoms garsui atkurti. Istorškai KGP buvo sukurtos gerokai vėliau už vaizdo plokštes. Tačiau multimedijos populiarumas paspartino kompiuterių garso plokščių raidą ir padidėjusi konkurencija tarp gamintojų padarė šią aparatinę įrangą sudėtingesne ir pigesne. Dabartinės KGP ne tik puikiai atkuria multimedijos programų ir žaidimų garso signalus. Vartotojai, naudodami KGP, gali kompiuteriu groti kompaktines garso plokšteles, įrašinėti ir redaguoti skaitmeninius garso signalus, mokytis groti, net kurti muziką ir spausdinti natas.

Nežiūrint į tai, apie KGP struktūras ir veikimą žinoma nepakankamai, nes konkuruojantys tarpusavyje gamintojai jas slepia. Kiekvienos konkrečios kompiuterių garso plokštės struktūrinė schema yra savita, nors visos jos turi tam tikrus blokus, kurie atlieka vienus arba kitus garso signalų apdorojimo veiksmus, sudarančius KGP funkcijų esmę.

Šio darbo tikslas – rasti ir ištirti kompiuterių garso plokščių struktūrines schemas, sudaryti apibendrintą KGP struktūrinę schemą.

Darbo aktualumas – ištyrus kompiuterių garso plokštes, apibendrintas jų struktūras ir veikimą, galima atkurti tikslesnes ir išsamesnes konkrečių KGP struktūrines schemas, numatyti jų tobulinimo ir specializuoto taikymo kryptis. Lietuvių kalba paruošti apie KGP sistematizuotą informaciją, kurios kol kas nepakanka.

Problema – išsamios ir patikimos informacijos apie kompiuterių garso plokščių struktūras ir veikimą stoka.

Darbe sprendžiami uždaviniai: apžvelgti KGP standartus, rasti ir ištirti kompiuterių garso plokščių struktūras, nustatyti pagrindinių blokų paskirtis, sudaryti apibendrintą KGP struktūrinę schemą.

Kompiuterių garso plokščių standartai

Čia trumpai aptarsime kompiuterių garso plokščių standartus, visų pirma susijusius su KGP struktūra [1].

Aparatūrinės įrangos firmos *AdLib* garso plokščių konfigūracija buvo pirmas svarbiausias standartas kompiuterių garso plokščių srityje.

Greta garso signalų pateikimo kompiuterių garso plokštės naudojamos kaip CD-ROM, DVD-ROM ir kt. grotuvų sąsajos, palaikančios firmų *Sony*, *Mitsumi*,

Panasonic ir kt. jungtis bei populiarius SCSI ir IDE/EIDE standartus.

Šiuo požiūriu labai svarbi yra korporacijos *Intel* paskelbta AC'97 (angl. *Audio Codec*'97) specifikacija [3].

Pirmoji specifikacijos AC'97 versija buvo išleista 1997 m. pradžioje (AC'97 v1.0). Ji apibrėžė reikalavimus skaitmeninei garso plokščių sąsajai ir architektūrai, garso signalų įvesties bei išvesties įrenginiams.

Šioje specifikacijoje nurodyti elektrinių sąsajų įtampų lygmenys ir vėlinimo laikai, fiziniai sąsajų parametrai.

Aprašytas nuoseklosios sąsajos protokolas, reikalavimai įtampoms mikrofoniiniame įėjime.

Nurodyti svarbiausi linijinių įėjimų/išėjimų bei papildomų (AUX) įėjimų/išėjimų parametrai. Pateikti skaitmeninei sąsajai S/PDIF keliami reikalavimai.

Vėliau išleista versija AC'97 v2.3 (2002 m.) [3].

Korporacijos *Intel* sukurtos naujos specifikacijos [8] yra nesuderinamos su specifikacija AC'97. Tai pagerintos garso kokybės kodavimo/iškodavimo įrenginiui (angl. *High Definition Audio Codec*) skirtos specifikacijos.

Kompiuterių garso plokščių struktūrinės schemas

Žemiau trumpai aptarsime cituojamoje literatūroje rastas tris kompiuterių garso plokščių struktūrines schemas ir pagrindinius jų blokus.

Panagrinėkime 1 paveiksle pateiktos pirmosios gana detalios KGP struktūrinės schemas blokų paskirtis.

Skaitmeninio įrašymo/atkūrimo blokas, dar vadinamas skaitmeniniu kanalu arba garso plokštės traktu (tarptautinis pavadinimas – *coder/decoder, codec*), yra sudarytas iš trijų pagrindinių dalių: 1) sujungtos tarpusavyje skaitmuo-analogas/analogas-skaitmuo keitiklių (SAK/ASK) poros, 2) programuojamojo imčių norminimo generatoriaus (ING), 3) maišiklio.

SAK/ASK atlieka pakeitimus skaitmuo-analogas ir analogas-skaitmuo programinio perdavimo režime arba per tiesioginio kreipimosi į atmintį modulį (angl. *Direct Memory Access* – DMA).

SAK/ASK sudaro mazgas, atliekantis būtent skaitmeninius-analoginius pakeitimus, ir valdymo mazgas. Nuo naudojamo SAK/ASK kokybės labai priklauso garso signalų skaitmeninio apdorojimo ir atkūrimo kokybė [4].

Ji taip pat priklauso nuo analoginių įėjimo ir išėjimo stiprintuvų kokybės bei darbo režimų.

Programuojamasis imčių norminimo generatorius kuria sinchronizavimo impulsus ir yra kontroliuojamas kompiuterio. Paprastai šių impulsų dažnis yra standartinio

garso signalų diskretizavimo dažnio 44,1 kHz kartotinis dydis, nors gali būti ir bet koks didesnis už 5 kHz dažnis.

Maišiklis atlieka kompiuterio garso plokštėje naudojamų analoginių signalų lygių reguliavimą, komutavimą ir maišymą. Į maišiklio sudėtį įeina pradiniai, tarpiniai ir išėjimo garso signalų stiprintuvai.

Skaitmeninio įrašymo/atkūrimo bloko konfigūraciją bei veikimo pagrindus aprašo aukščiau minėta specifikacija AC'97 [3].

Sintezatoriaus bloko pagrindą sudaro dažnių moduliacija (angl. *Frequency Modulation* – FM) paremtos sintezės mikroschemos (OPL2 arba OPL3) arba bangų-lentelinės (angl. *Wave Table* – WT) sintezės mikroschemos, arba ir tos, ir kitos.

Sintezatoriaus bloką (FM, daugumoje kompiuterių garso plokščių – WT) valdo tvarkyklė – programinė MIDI realizacija, arba nuosavas procesorius – aparatinė įrangos realizacija. Beveik visi FM sintezatoriai yra tarpusavyje suderinami, skirtingi WT sintezatoriai – nesuderinami.

Skaitmeninių signalų procesoriuje (SSP, angl. *Digital Signal Processor* – DSP) vyksta garso signalų apdorojimas. Skaitmeninių signalų procesorius – tai specializuotas spartus procesorius, naudojamas sudėtingam skaitmeninių garso signalų apdorojimui realiaame laike.

Skaitmeninių signalų procesoriuje realizuojami *Reverb/Chorus* tipo ir pan. efektai, o taip pat kiti garso signalų apdorojimo būdai – glaudinimas, kalbos atpažinimas/sintezė, patalpų akustikos modeliavimas ir pan.

Dažnai kompiuterių garso plokštėse *Sound Blaster* naudojamas firmos *Creative Labs* skaitmeninių signalų procesorius, sudarytas iš pagerinto signalų procesoriaus ir *Creative* signalų procesoriaus.

Tokiu atveju galimi papildomi garso signalų glaudinimo būdai, padidinamas glaudinimo greitis, paspartinami ir pagerinami kalbos atpažinimo procesai.

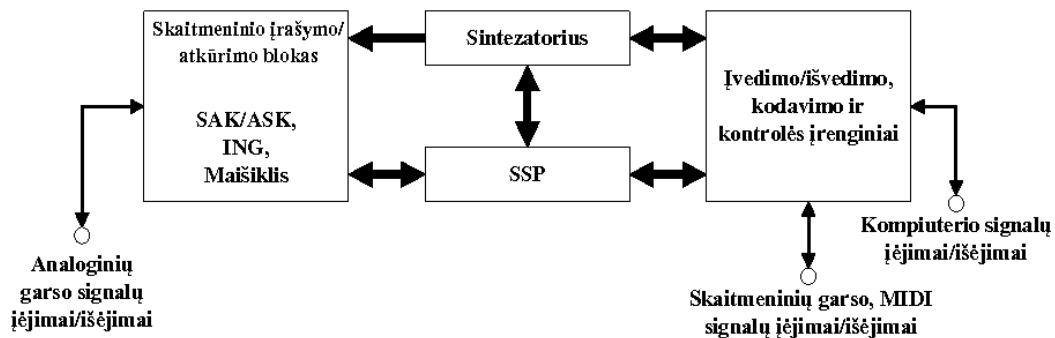
Kompiuterių garso plokštėse taikomi įvairūs garso signalų **įvedimo/išvedimo, kodavimo ir kontrolės įrenginiai**, naudojami, jeigu reikia, garso srautui pakeisti į tam tikrą pavidalą ir perduoti kitiems įrenginiams. Išvardinsime kelis iš jų:

- daugumoje KGP naudojamas vienas arba keli tiesioginio atminties pasiekimo kanalai skaitmeniniam garsui iš kitos aparatinės įrangos skaityti/įrašyti. Garso plokštės, palaikančios įrašymo ir skaitymo vienu metu (pilnojo duplexo) režimą, turi du tokius kanalus.
- tiesioginis skaitmeninio garso signalo išėjimas, realizuojamas per optinę ar koaksialinę S/PDIF jungtį, skirtą skaitmeniniams garso signalams perduoti [1, 2].

1 paveiksle jungtis „Analoginių garso signalų įėjimai“ reiškia įvairius įėjimus signalų šaltiniams prijungti: linijinį – grotuvams, mikrofoninį ir kitus įėjimus; „Analoginių garso signalų išėjimai“ – linijinį išėjimą ausinėms arba aktyviosioms akustinėms sistemoms, galios išėjimą – pasyviosioms akustinėms sistemoms prijungti.

Skaitmeniniai garso signalai įeina arba išeina iš/į CD-ROM grotuvą, S/PDIF jungtį ir kt. Taip pat į KGP gali patekti, būti apdoroti ir išeiti MIDI signalai.

Su pagrindine kompiuterio plokštė ryšys palaikomas per PCI jungtį, tam gali būti perduodami, pvz., valdantys kompiuterio signalai.



1 pav. Pirmoji kompiuterių garso plokščių struktūrinė schema [1]

Toliau pateikiamos ir aptariamios dar dvi literatūroje rastos kompiuterių garso plokščių struktūrinės schemos (2, 3 pav.) [1, 4, 8, 9].

2 paveiksle parodyti analoginių signalų mikrofoninis ir linijinis įėjimai bei linijinis išėjimas.

Šio paveikslo schemos įėjimuose ir išėjimuose naudojami stiprintuvai, skirti signalams, ypač mikrofono, stiprinti. Į analoginius įėjimus patekę signalai siunčiami į maišiklį, iš kurio perduodami į ASK.

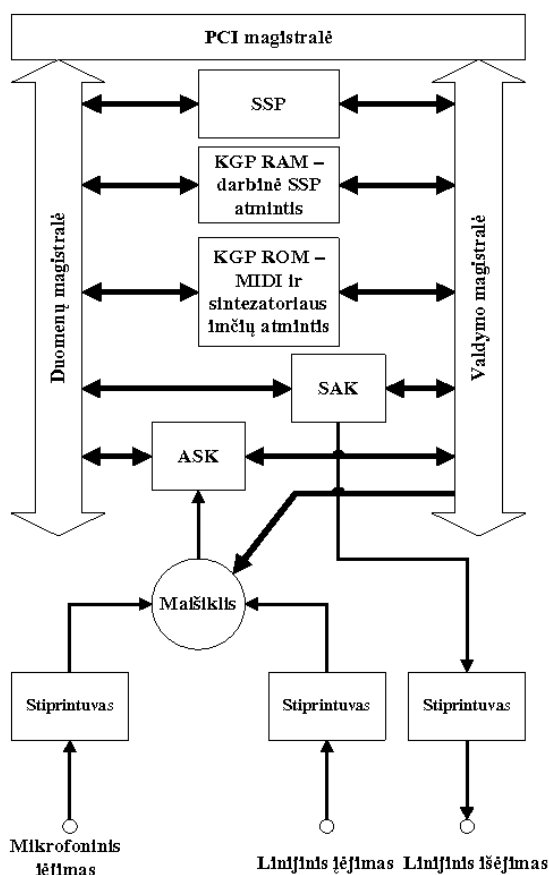
Į linijinį išėjimą signalai patenka per analoginį stiprintuvą tiesiai iš SAK, nenaudojant maišiklio. KGP garso signalų srautas sklinda duomenų magistrale, o visi apdorojimo procesą valdantys signalai sklinda valdymo

magistrale. Abi magistralės sujungtos su kompiuterio pagrindine PCI magistrale.

Garso plokštės laisvosios kreipties (operatyvioji) atmintis (angl. *Random Access Memory* – RAM) ir pastovioji atmintis (angl. *Read Only Memory* – ROM) siunčia bei gauna duomenis iš duomenų magistralės, atsiradus atitinkamiems signalams iš valdymo magistralės.

Taip pat veikia ir garso skaitmeninių signalų procesorius (SSP).

Kompiuterių garso plokščių RAM naudojama kaip darbinė SSP atmintis, o ROM saugomi MIDI ir bangų-lentelinio sintezatoriaus, kuris 2 paveikslo struktūrinėje schemoje neparodytas, garšų įrašai – imtys.



2 pav. Antroji kompiuterių garso plokščių su nuosekliąja sąsaja struktūrinė schema [8, 9]

Paprastai garso sistemos su nuosekliąja sąsaja būna sudarytos iš dviejų pagrindinių dalių – analoginės ir skaitmeninės.

3 paveiksle pavaizduotos KGP schemos analoginę dalį sudaro: SAK, ASK, multiplekseris, maišiklis, trys garsio reguliatoriai, dvi įėjimo ir viena išėjimo grandinė.

SAK ir ASK apdoroja analoginius ir skaitmeninius garso signalus, todėl šią keitiklių porą galima priskirti ir analoginei, ir skaitmeninei daliai.

Tokiu atveju KGP struktūrinės schemos skaitmeninę dalį sudaro SAK, ASK, AC-link sąsaja ir skaitmeninis mikrovaldiklis (DC'97).

AC-link yra specifikaciją AC'97 atitinkanti specializuota skaitmeninė sąsaja, kuri jungia skaitmeninį mikrovaldiklį su SAK ir ASK. Ši sąsaja suteikia galimybę dvikrypčiam duomenų perdavimui iš ir į KGP.

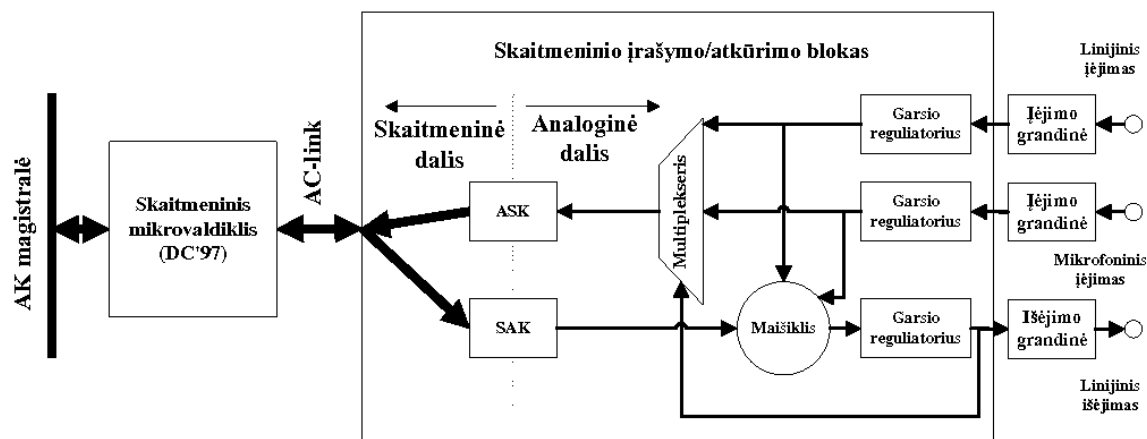
Skaitmeninis mikrovaldiklis valdo duomenų perdavimą iš KGP į asmeninio kompiuterio (AK) magistralę ir iš jos į kompiuterio garso plokštę.

1 paveiksle parodyta gana daug svarbių KGP struktūrinės schemos blokų, tačiau įėjimai ir išėjimai labai nekonkrečiai bei neišskirti SAK/ASK, ING ir maišiklio blokai, kurie iš esmės turi būti atskiri.

2 paveikslo schemoje daugiau dėmesio skiriama duomenų judėjimui kompiuterio garso plokštėje, yra išskirti maišiklio, SAK bei ASK, RAM, ROM ir SSP blokai, bet nėra ING, sintetatoriaus, mikrovaldiklio, garsio reguliatorių blokų.

3 paveikslo schemoje ir darbe [4] daugiausia dėmesio skiriama SAK ir ASK, gana detalai parodyta kompiuterio garso plokštės analoginė dalis, bet beveik nenagrinėjama skaitmeninė dalis, trūksta būtinų SSP ir sintetatoriaus blokų, skaitmeninių ir MIDI įėjimų bei išėjimų.

Taigi visos trys literatūroje rastos KGP struktūrinės schemos yra nepilnos.



3 pav. Trečioji kompiuterių garso plokščių su nuosekliąja sąsaja struktūrinė schema [4]

Apibendrinta kompiuterių garso plokščių struktūra

Ištyrus literatūroje rastas KGP struktūrinės schemas, buvo sudaryta apibendrinta kompiuterių garso plokščių struktūrinė schema, pateikta 4 paveiksle.

Ši schema sudaryta KGP su nuosekliąja sąsaja ir išskirtais sintetatoriaus bei SAK/ASK blokais.

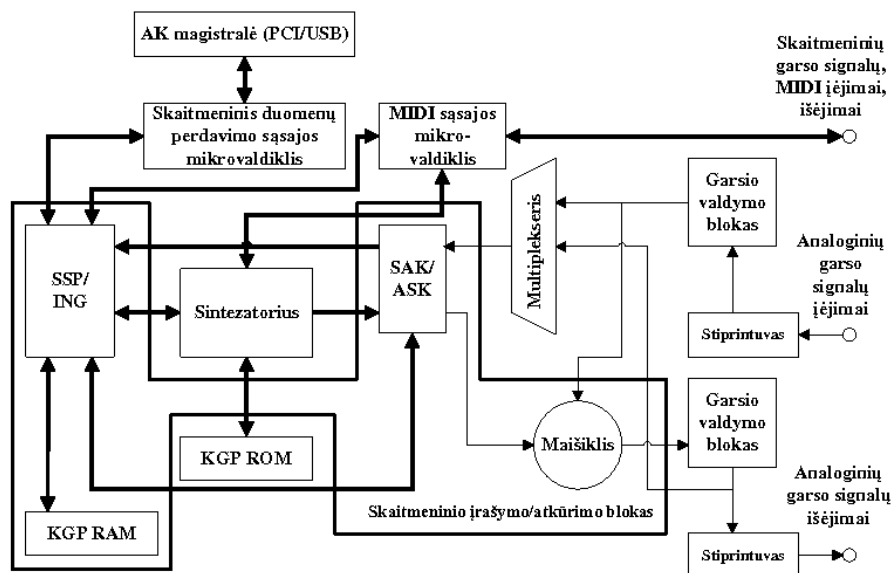
Dabar dauguma garso plokščių gamintojų stengiasi visus blokus sutalpinti viename SSP bloke.

Tokiu atveju KGP apibendrintos struktūrinės schemos sudarymas netektų prasmės, nes tai būtų SSP struktūrinė schema.

Kompiuterių garso plokščių apibendrinta struktūrinė schema yra sudaryta iš garso skaitmeninių signalų

procesoriaus (SSP) su integruotu jame imčių norminimo generatoriumi (SSP/ING blokas), sintetatoriaus, kuris turi išorinę pastoviąją KGP ROM atmintį, KGP RAM laisvosios kreipties (operatyviosios) atminties, SAK/ASK poros, MIDI sąsajos mikrovaldiklio, skaitmeninio

duomenų perdavimo sąsajos mikrovaldiklio (PCI arba USB sąsajos mikrovaldiklio, prie kurių prijungta garso plokštė), multiplexerio ir maišiklio (skirtų garso signalams sudėti), analoginių garso valdymo blokų ir signalų stiprintuvų.



4 pav. Apibendrinta kompiuterių garso plokščių struktūrinė schema [1]

SSP/ING blokas valdo sintetatoriaus ir MIDI sąsajos mikrovaldiklio veikimą, o darbinę informaciją saugo KGP RAM atmintyje. KGP ROM atmintyje saugomi sintetatoriaus signalai.

Visi įeinantys ir išeinantys analoginiai garso signalai yra stiprinami stiprintuvuose.

Įeinantys garso signalai multiplexuojami su išeinančiais multiplexeryje, o išeinantys sumaišomi su įeinančiais maišiklyje. Taigi egzistuoja grįžtamasis ryšys, nustatantis atkuriamų garsų garso lygį pagal įrašomų signalų lygį.

Išvados

1. Kompiuterių garso plokštės labai plačiai naudojamos, tačiau jų tyrimas išlieka aktualus, nes KGP struktūra nėra pakankamai išnagrinėta.

2. Ištirtos trys literatūroje rastos kompiuterių garso plokščių struktūrinės schemos.

3. Sudaryta ir išanalizuota apibendrinta KGP struktūrinė schema.

Literatūra

1. Kalinauskas M. Kompiuterių garso plokščių tyrimas: Bakalauro baigiamasis darbas. Vilnius, VGTU, 2009. – P. 81.
2. Mališauskas V. Garso technika: mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2005. – P. 152.
3. Berkeley Electronics Support Group. EECS. Audio Codec 97. Revision 2.3 Revision 1.0 April, 2002. [interaktyvus] 2010. Prieiga per Internetą: <http://inst.eecs.berkeley.edu/~cs150/Documents/ac97_r23.pdf>

4. Gražulevičius G. Kompiuterių garso sistemų tyrimas ir taikymas: Daktaro disertacija. Vilnius, 2004. – P. 122.
5. Baškys A. Mikrokompiuteriai. Laboratorinių darbų užduotys ir metodikos nurodymai. Vilnius. Technika, 2006. – P. 164.
6. Устройство ПК: Системный блок – Звуковая карта. [interaktyvus] 2010. Prieiga per Internetą: <<http://gdpk.narod.ru/blok/sound.html>>
7. DIY Audio & Video. [interaktyvus], 2010. Prieiga per Internetą: <<http://www.diyaudioandvideo.com/>>
8. Realtek. 2+2 Channel High Definition Audio Codec Datasheet Rev. 1.3. 2008. – P. 80.
9. Intel. High Definition Audio Specification Revision 1.0. 2004. – P. 174.
10. Savell T. C. The EMU10K1 Digital Audio Processor. Joint Emu/Creative Technology Center, 1999. IEEE. – P. 10.
11. Hoge S. FX8010-A DSP Chip Architecture for Audio Effects. Joint Emu/Creative Technology Center. – P. 4.
12. Integrated Mixed-Signal Solutions. Product Data Sheet STAC9708/11 Multi-Channel AC97 Codec with Multi-Codec Option Ver. 2.0. 2001. – P. 52.
13. Texas Instruments Incorporated. 16-Bit Stereo digital-to-analog converter with USB Interface. 2007. – P. 17.

Abstract

M. Kalinauskas. Computer sound cards research

Most computer sound cards have different structures but main structure for all sound cards are the same. Research operation of the sound card standards, elements and blocks is done to better understand how the sound cards structure effects it's performance. Analysis of three known computer sound cards structures is made. The revised structure of the computer sound card was created.

TELECOMMUNICATIONS AND ELECTRONICS 2011

TELEKOMUNIKACIJOS IR ELEKTRONIKA 2011

Eksperimentinis garso signalų sintezės tyrimas

Mykolas Kalinauskas, KTfm-09 gr. Vadovas doc. dr. V. Mališauskas

VG TU, Elektronikos fakultetas

Įvadas

Čia palyginami 3 garso signalų sintezės metodai. 2 iš jų taikomi kompiuterių garso plokštėse (KGP).

Pirmosiose KGP garso signalai buvo sintezuojami dažnių moduliavimo (angl. Frequency Modulation – FM) metodu, moduliuojant nešlio virpesių dažnį. Tokiu būdu gaunami sudėtingi virpesiai, apytikriai imituojantys tam tikro muzikos instrumento kuriamus garsus. Pagrindinis šio metodo privalumas – galimybė sintezuoti natūralioje gamtoje neegzistuojančius garsus. Jo trūkumas yra sudėtingumas, nes natūralių garsų sintezei reikalingas tikslus nešlio ir moduliuojančio signalų dažnių bei moduliacijos indekso parinkimas.

Maždaug prieš penkiolika metų brangesnėse garso plokštėse buvo pradėti naudoti daug tobulesnį bangų lentelių (angl. Wavetable – WT) sintezatoriai. Jie sintezuoja garso signalus iš KGP atminties bangų lentelėse saugomų trumpų, natūralių garsų fragmentų. WT sintezatorių kuriami garsai yra artimesni natūraliems garsams, lyginant su FM metodu sintezuojamais garsais. Šiuo metu dauguma vidutinės ir aukštos klasės KGP bei išorinių sintezatorių naudoja 64 garso fragmentų bangų lenteles ir WT metodą [1, 2]. Tačiau, norint sintezuoti daugiau įvairių garsų, reikalinga didelė KGP atmintis natūralių garsų fragmentams saugoti.

Todėl iškyla aktualus klausimas, ar galima KGP panaudoti naują garso signalų sintezės metodą, kuris pašalintų WT metodo trūkumus.

JAV įsikūrusios kompanijos Altera mokomuosiuose maketuose DE2 įdiegtas ir naudojamas tiesioginės skaitmeninės sintezės (TSS) metodas. Jis yra panašus į WT metodą, nes TSS metode taip pat naudojamos bangų lentelės. Tačiau jose saugomi ne garsų fragmentai, o tik sinusinio signalo momentinės reikšmės skaitmeniniu pavidalu. Todėl atmintis, reikalinga jų saugojimui, TSS metodo atveju turėtų būti žymiai mažesnė.

Šio darbo tikslas yra ištirti, kaip veikia, kokius privalumus ir trūkumus turi TSS metodas, lyginant su WT garso signalų sintezės metodu, ir ar tikslinga KGP naudoti TSS metodą.

Straipsnyje aptariamas ir eksperimentiškai tiriamas TSS metodas, realizuotas Altera makete DE2 pjūklo ir sinusinės formos garso signalams sintezuoti.

Tiesioginė skaitmeninė sintezė

Tiesioginės skaitmeninės sintezės (angl. Direct Digital Synthesis – DDS) metodą sukūrė JAV, Teksase įsikūrusi National Instruments kompanija.

TSS metodas skirtas sintezuoti įvairių dažnių ir formų signalus, keičiant dvejetainio skaitiklio (fazės sumatoriaus) skaičiavimo žingsnį.

Šis metodas dažnai taikomas moderniuose parenkamos formos signalų generatoriuose (angl. Arbitrary Waveform Generator – AWG).

AWG sintezuoja signalus iš generatoriaus atminties bangų lentelėje saugomų sinusinio signalo momentinių reikšmių.

Signalų momentinėms reikšmėms parinkti iš bangų lentelės ir joms panaudoti, sintezuojant naujus signalus, taikomas dvejetainis skaitiklis [3].

Sintezuojamųjų signalų dažnis priklauso nuo dvejetainio skaitiklio skaičiavimo žingsnio.

Skaitiklio skaičiavimo žingsnis nulemia, kas kelinta signalo momentinė reikšmė parenkama iš bangų lentelės.

Jeigu skaičiavimo žingsnis mažas, naudojamas didelis atmintyje saugomų signalo momentinių reikšmių skaičius iš bangų lentelės ir sintezuojamųjų signalų dažnis yra mažas.

Naudojant didelį dvejetainio skaitiklio skaičiavimo žingsnį, naudojamas mažas atmintyje saugomų signalo momentinių reikšmių iš bangų lentelės skaičius ir sintezuojamųjų signalų dažnis yra didelis.

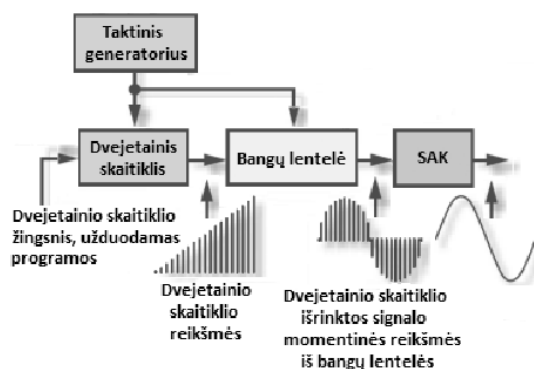
Be to, vartotojas, keisdamas atmintyje saugomas signalo momentines reikšmes, gali parinkti sintezuojamųjų signalų formą.

Dvejetainis skaitiklis, naudojant didelį skaičiavimo žingsnį, parenka ne visas saugomas signalo momentines reikšmes.

Todėl siekiant, kad sintezuojamieji signalai neprarastų reikiamos formos, tarpinės signalų reikšmės interpoliuojamos.

Generatoriai, naudojantys TSS metodą, interpoliuodami ištempia signalus taip, kad jie užpildytų visą turimą atmintį.

TSS metodu veikiantį sintezatorių galima pavaizduoti struktūriniu schema (1 pav.), sudaryta iš keturių pagrindinių dalių: taktinio generatoriaus, dvejetainio skaitiklio, bangų lentelės ir skaitmeninio-analoginio keitiklio (SAK).



1 pav. TSS sintetatoriaus struktūrinė schema

Svarbi TSS sintetatoriaus struktūrinės schemos dalis yra dvejetainis skaitiklis. Pavyzdžiui, gali būti naudojamas 16 bitų dvejetainis skaitiklis, kurio maksimalus reikšmių skaičius iki konkretaus bito imtinai nurodytas 2 paveiksle.

Dvejetainio skaitiklio maksimalus reikšmių
skaičius iki konkretaus bito imtinai

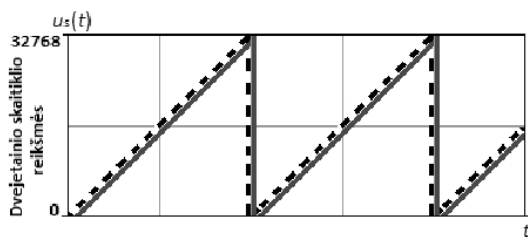
32768	16384	8192	4096	2048	1024	512	256	128	64	32	16	8	4	2	1
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

Dvejetainio skaitiklio bito eilės numeris

2 pav. 16 bitų dvejetainio skaitiklio maksimalus reikšmių skaičius iki konkretaus bito imtinai

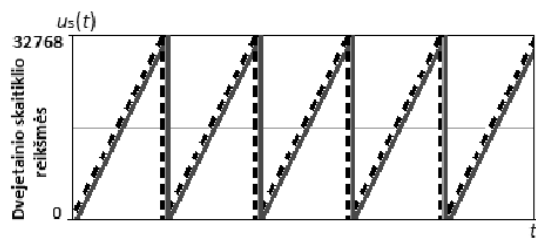
Sintezuojant signalus dvejetainio skaitiklio reikšmės naudojamos kaip adresai bangų lentelėje. Skaitiklis, skaičiuodamas iš eilės nurodo, kokios saugomos signalo momentinės reikšmės turi būti parinktos iš bangų lentelės. Pasiekus maksimalią skaitiklio reikšmę, skaičiavimas pradedamas iš naujo – tai įprastinis dvejetainių skaitiklių veikimo principas.

Dvejetainio skaitiklio veikimą iliustruoja 3 paveiksle matomi skaitiklio reikšmių ir sintezuotojo signalo kitimo laike pjūklo formos dėsniai. Jie gaunami, kai signalas sintezuojamas paduodant skaitiklio reikšmes tiesiog į SAK.



3 pav. Dvejetainio skaitiklio reikšmių (—) ir sintezuotojo signalo (—) kitimo laike pjūklo formos dėsniai

Padvigubinus skaičiavimo žingsnį, skaitiklio reikšmių ir sintezuotojo signalo kitimo laike pjūklo formos dėsnių dažnis padidėja dvigubai, nes parenkama kas antra skaitiklio reikšmė (4 pav.).



4 pav. Dvejetainio skaitiklio reikšmių (—) ir sintezuotojo signalo (—) kitimo laike pjūklo formos dėsniai, 2 kartus padidinus skaičiavimo žingsnį

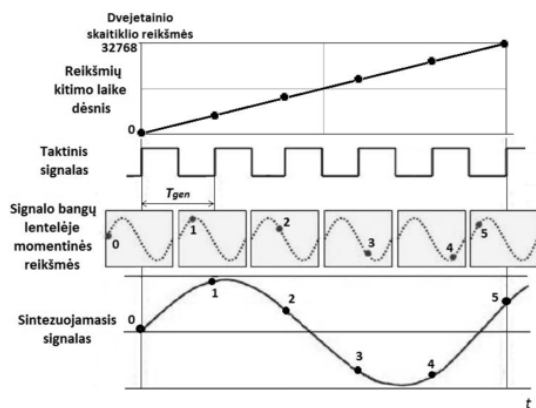
Taigi keičiant dvejetainio skaitiklio skaičiavimo žingsnį, galima keisti sintezuojamųjų signalų dažnį.

Naudojant TSS sintetoriuje 16 bitų dvejetainį skaitiklį, sintezuojamųjų signalų dažnį f galima apskaičiuoti pagal tokią išraišką:

$$f = \frac{\Delta \cdot f_{\text{gen}}}{2^{16}}, \text{ čia } 0 \leq \Delta < 2^{16},$$

Δ – dvejetainio skaitiklio skaičiavimo žingsnis, 2^{16} – maksimalus skaitiklio reikšmių skaičius, f_{gen} – sintetatoriaus taktinio generatoriaus dažnis.

5 paveiksle pateikiamas pavyzdys, kaip TSS metodu sintezuojamas sinusinės formos signalas.

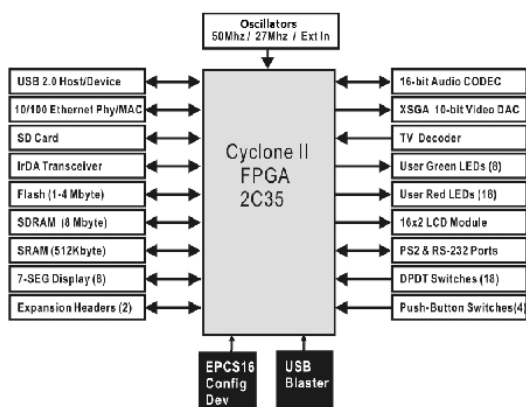


5 pav. Sinusinės formos signalo sintezė

Čia matoma, kaip per kiekvieną taktinio generatoriaus signalo periodą iš bangų lentelės parenkamos saugomos sinusinio signalo momentinės reikšmės. Nuo to, koks bus dvejetainio skaitiklio skaičiavimo žingsnis, priklauso, kas kelinta saugoma signalo momentinė reikšmė bus parinkta ir koks bus sintezuojamojo signalo dažnis.

Altera maketas DE2, programos algoritmas ir garso signalų sintezės rezultatai

Altera maketas DE2 sudarytas iš aparatinės ir programinės įrangų rinkinio. Makete įdiegtas komercinėje elektronikoje plačiai naudojamas Cyclone II lustas (6 pav.), kurį galima perkonfigūruoti pagal kuriamo objekto specifikacijos reikalavimus.



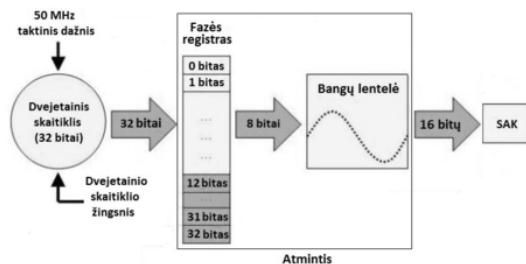
6 pav. Altera maketo DE2 struktūrinė schema [3]

Cyclone II – tai SRAM atmintį naudojanti lauko programuojama loginė matrica LPLM (angl. Field Programmable Gate Array – FPGA), viena iš įterptinių sistemų rūšių, turinti 475 įvesties/išvesties kontaktus.

Altera mokomasis maketas DE2 siūlo didelį galimybių rinkinį. 6 paveiksle matoma, kad maketas turi garso ir vaizdo signalų atkūrimo galimybes bei daug kitų funkcijų. Šiame makete realizuoto TSS sintetatoriaus struktūrinė schema ir veikimas šiek tiek skiriasi nuo 1 paveikslėlio schemos ir veikimo.

Altera makete DE2 yra 50 ir 27 MHz dažnių taktiniai generatoriai, vietoje 16 bitų panaudoti 32 bitų dvejetainiai skaitikliai ir fazės registras, 8 bitų bangų lentelė ir 16 bitų SAK (garso kodekas) (6, 7 pav.) [3].

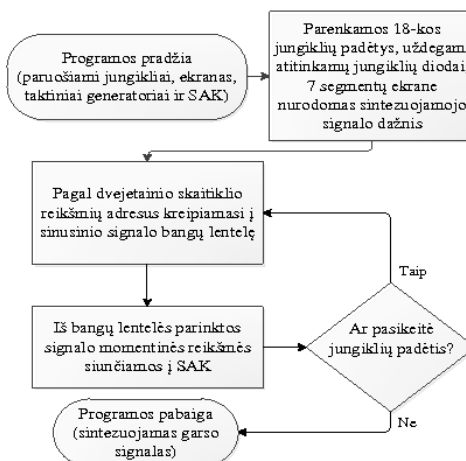
Maketui programuoti ir konfigūruoti naudojamas Altera programinis paketas Quartus II. Jis apazįsta VHDL ir Verilog programavimo kalbomis parašytus tekstus [3]. Norint panaudoti Altera makete DE2 realizuotą TSS metodą, reikia sukurti programą, kuri veiktų pagal 7 paveiksle pateiktą garso signalų sintezės schemą.



7 pav. Garso signalų sintezės Altera makete DE2 schema

8 paveiksle pateikiamas mūsų sukurto programos Verilog kalba algoritmas, naudojamas garso signalų sintezei.

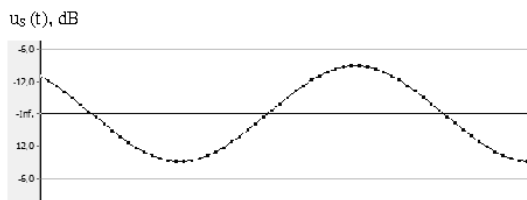
Matoma, kad pradžioje paruošiami Altera maketo DE2 jungikliai, ekranas, taktiniai generatoriai ir SAK. Vartotojas parenka 18-kos jungiklių padėtis, kurios nustato norimo sintezuoti garso signalo dažnį.



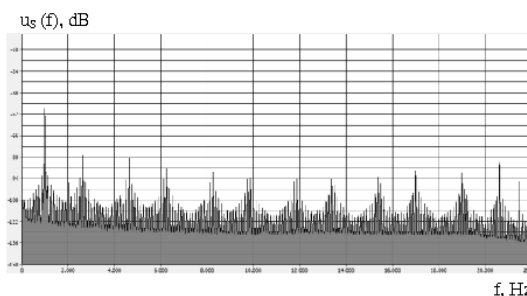
8 pav. Sukurtos programos algoritmas

Atitinkamai parenkant dvejetainio skaitiklio žingsnį, užsidega parinktų jungiklių šviesos diodai. Septynių segmentų ekrane nurodomas sintezuojamo signalo dažnis.

Toliau pagal dvejetainio skaitiklio reikšmių adresus kreipiamasi į sinusinio signalo bangų lentelę. Iš parinktų signalo momentinių reikšmių formuojamas skaitmeninis signalas. Jis siunčiamas į SAK. Sintezuojamasis garso signalas pastoviai atkuriamas maketo išėjime tol, kol nebus pakeista jungiklių padėtis. Makete įdiegtas 44,1 kHz diskretizavimo dažnį naudojantis garso kodekas. Šiuo dažniu gaunamos 9, 11, 13, 15 paveiksluose pateiktų sintezuotųjų 1, 5, 10 ir 22 kHz dažnių garso signalų momentinės reikšmės.

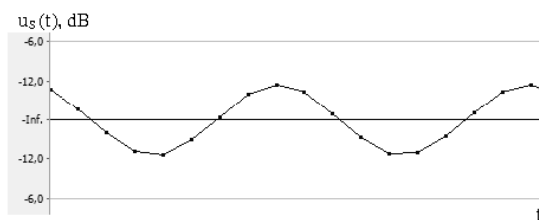


9 pav. Sintezuotasis 1 kHz dažnio garso signalas

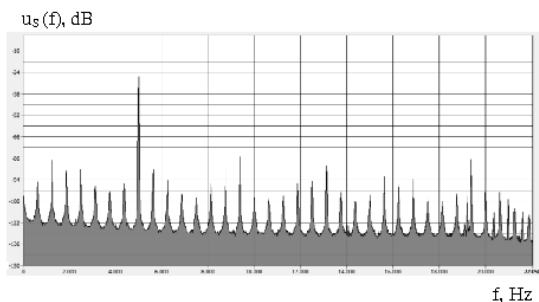


10 pav. Sintezuotojo 1 kHz dažnio garso signalo spektras

Maketu sintezuojant 1 kHz dažnio garso signalą, sintezuojamas 1,002 kHz dažnio signalas. Dažnio nuokrypis pastebimas sintezuojant ir 5, 10, 22 kHz dažnių garso signalus.

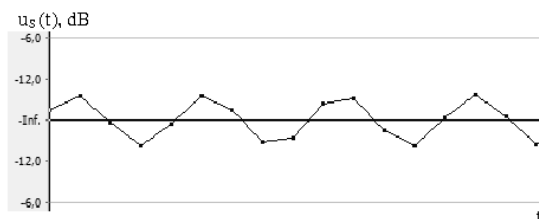


11 pav. Sintezuotasis 5 kHz dažnio garso signalas

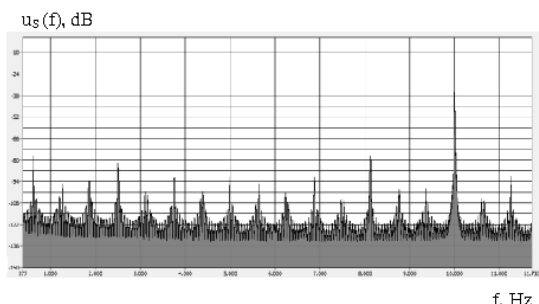


12 pav. Sintezuotojo 5 kHz dažnio garso signalo spektras

Didėjant sintezuojamųjų garso signalų dažniui, jų amplitudė mažėja ir forma keičiasi. 13 ir 15 paveiksluose matoma, kad 10 ir 22 kHz dažnių signalų oscilogramos yra laužytos. Taip nutinka, kai skaitiklis, parinkdamas signalo momentines reikšmes iš bangų lentelės, praleidžia jų per daug ir reikšmių nebeužtenka tiksliai garso signalų sintezei.



13 pav. Sintezuotasis 10 kHz dažnio garso signalas

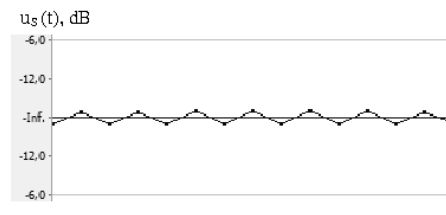


14 pav. Sintezuotojo 10 kHz dažnio garso signalo spektras

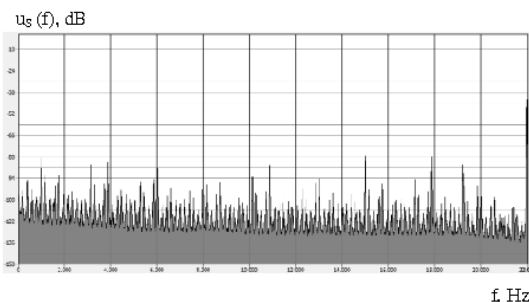
Dėl to signalų spektruose atsiranda šoninės harmonikos ir pakinta sintezuojamųjų garsų tembrai. Šių TSS trūkumų galima išvengti, didinant bangų lentelėje saugomų sinusinio signalo momentinių reikšmių skaičių.

Šiame darbe buvo panaudotos $2^8 = 256$ reikšmės, taigi tik 8 iš galimų 32 bitų.

Pagrindinis TSS metodo trūkumas – sudėtingas bangų lentelių sudarymas. Tam reikia iš anksto žinoti,



15 pav. Sintezuotasis 22 kHz dažnio garso signalas



16 pav. Sintezuotojo 22 kHz dažnio garso signalo spektras

kokios formos turės būti sintezuojamasis signalas.

Tyrimo metu buvo nustatyta, kad TSS metodas naudoja tik ~7 kB atminties saugoti sinusinio signalo momentinėms reikšmėms. Tai žymiai mažiau, lyginant su atminties dydžiu, reikalingu saugoti natūralių garsų fragmentams WT metodu – 125 kB 1 fragmentui, ~8 MB įprastiems 64 fragmentams.

Todėl TSS metodą galima taikyti KGP kaip WT metodo papildinį, palyginti mažai padidinant atmintį.

Išvados

Darbe detalai ištirti TSS metodas, jo realizacija Altera makete DE2 ir jų veikimas.

Sukurti algoritmas ir programa, sintezuoti bei ištirti 1, 5, 10 ir 22 kHz dažnių garso signalai.

Išryškinti TSS metodo trūkumai, kurių dalies galima išvengti, didinant bangų lentelėje saugomų sinusinio signalo momentinių reikšmių skaičių.

Nustatyta, kad TSS metodas naudoja žymiai mažiau atminties, palyginti su WT metodu. TSS metodą galima taikyti kompiuterių garso plokštėse kaip WT metodo papildinį.

Literatūra

1. Puckette M. Theory and Techniques of Electronic Music. World Scientific Publishing Company, 2005. 348 p.
2. Ballora M. Essentials of Music Technology. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2003. 248 p.
3. Understanding Direct Digital Synthesis (DDS). National Instruments [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011.01.26], prieiga per internetą: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/5516>.

Abstract

Mykolas Kalinauskas. The experimental sound synthesis research

The article represents DDS synthesis method which can be used to improve computer sound card's principles of operation.

XIII-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija

Signalų apdorojimas kompiuterių garso plokštėse

Mykolas Kalinauskas

Darbo vadovas

doc. dr. Vacius Mališauskas

Vilnius
2010 03 19

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



Turinys

- Įvadas.
- Kompiuterių garso plokštėse (KGP) apdorojami garso signalai.
- Bangų lentelių paieška.
- KGP struktūrinė schema.
- Procesai, taikomi kompiuterių garso plokštėse apdorojant garso signalus.
- Išvados.

2/11



Ivadas

2010.03.19
11:20:00

- Darbo **tikslas** – ištirti garso signalų apdorojimą asmeninių kompiuterių garso plokštėse (KGP), remiantis turima struktūrine schema. 3/11
- Darbo **aktualumas** – ištyrus garso signalų apdorojimą, galima geriau suprasti, kokie procesai naudojami kompiuterių garso plokštėse. Lietuvių kalba paruošti sistematizuotą ir išsamią informaciją apie apdorojimo procesus, kurios kol kas nepakanka.
- Darbo **problema** – išsamios informacijos apie garso plokštėse taikomus signalų apdorojimo procesus stoka.
- Sprendžiami **uždaviniai** – apžvelgti apdorojamų signalų tipus. Naudojant KGP struktūrinę schemą išnagrinėti kompiuterių garso plokštėse taikomus signalų apdorojimo procesus.

XIII-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija
M. Kalinauskas mykolas.kalinauskas@el.vgtu.lt

Vilnius
2010 03 19

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



Kompiuterių garso plokštėse apdorojami garso signalai (1)

2010.03.19
11:20:00

Kompiuterio garso plokštėje „suprantamus“ ir apdorojamus garso signalus galima suskirstyti į tris grupes: 4/11

- Analoginiai garso signalai.
- Skaitmeniniai garso signalai. Nejautrūs senėjimo procesui, maitinimo įtampos ar temperatūros svyravimams.
- „Bangų-lenteliniai“ garso signalai. Saugomi kompiuterio garso plokštės sintezatoriuje.

XIII-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija
M. Kalinauskas mykolas.kalinauskas@el.vgtu.lt

Vilnius
2010 03 19

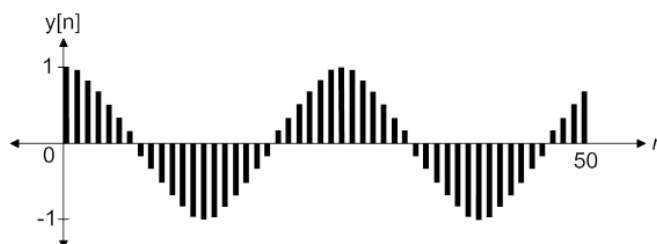
KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



Skaitmeninį signalą galima pateikti kaip analoginio signalo atskaitų seką:

$$x[n-1], x[n], x[n+1], \dots$$

Sinusoidės formos signalas, sudarytas iš penkiasdešimtys atskaitų



Bangų lentelių paieška (1)

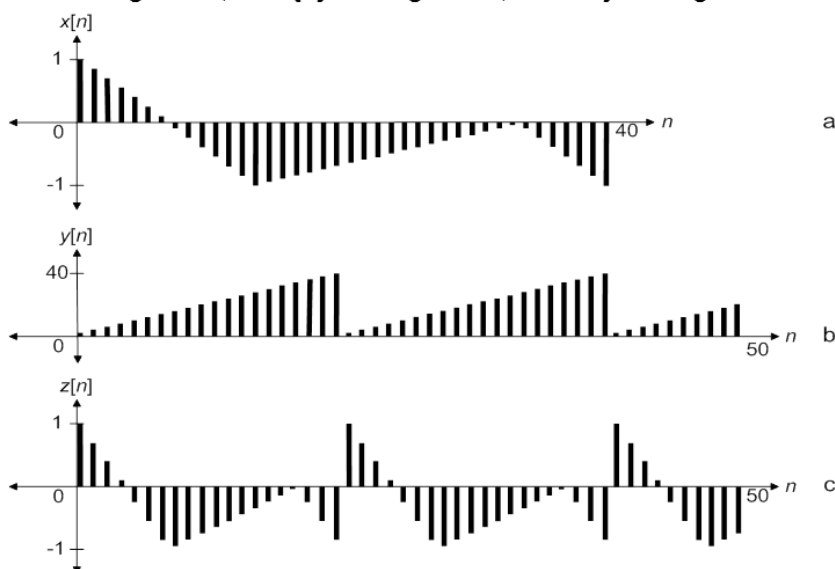
- Jei įėjime egzistuoja signalas $y[n]$, galima panaudoti jo atskaitų vertes, kaip indeksus norint gauti $x[n]$ signalo atskaitų vertes.
- „Bangų-lentelinės“ paieškos metu sukuriamas naujas signalas, kurį galima apskaičiuoti, panaudojus tokią išraišką:

$$z[n] = x[y[n]].$$

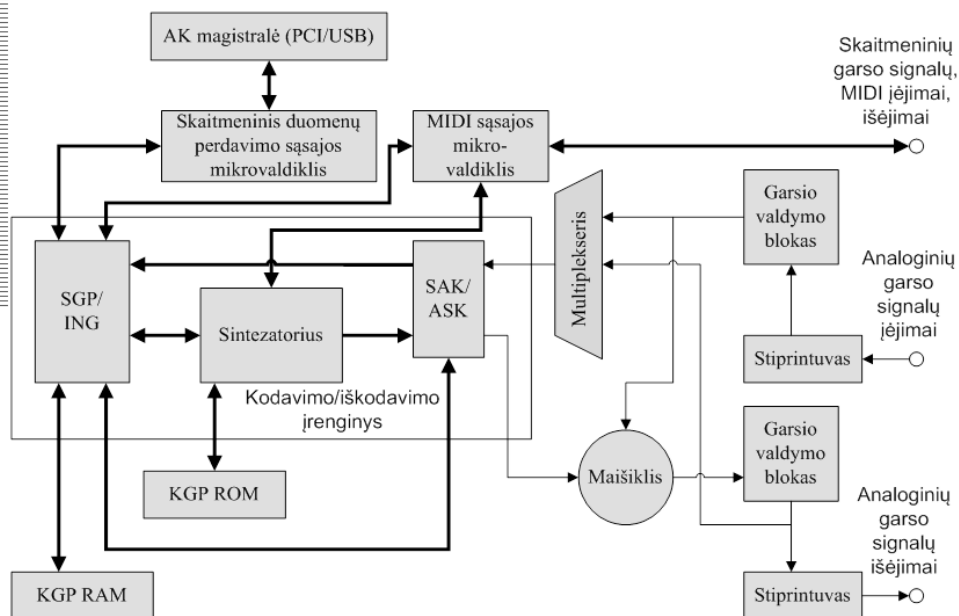


Bangų lentelių paieška (2)

a – signalas, b – įėjimo signalas, c – išėjimo signalas



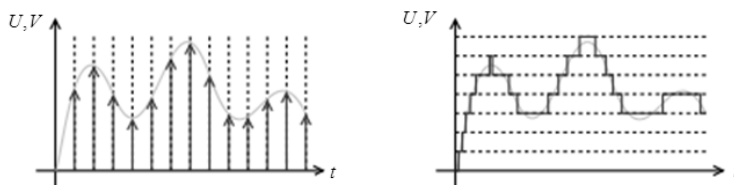
KGP struktūrinė schema



Procesai, taikomi kompiuterių garso plokštėse apdorojant garso signalus

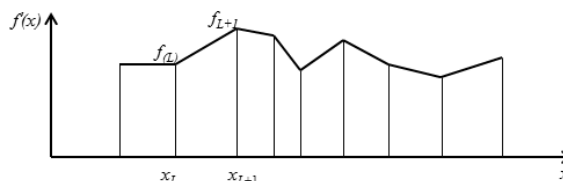
Keitimas iš analoginio į skaitmeninį signalą:

- Diskretizavimas.
- Kvantavimas-kodavimas.



Keitimas iš skaitmeninio į analoginį signalą:

- Žemųjų dažnių analoginis filtravimas.
- Interpoliavimas.



Išvados

- Pateikti 3 tipai garso signalų, apdorojamų kompiuterio garso plokštėse.
- Skaitmeniniai signalai gali būti pateikti kaip analoginių signalų atskaitų seka, kuri yra saugoma bangų lentelių signalų pavidalu KGP sintezatoriuje.
- Paaiškintas bangų lentelių paieškos veikimo principo pavyzdys.
- Nagrinėjant sudarytą KGP struktūrą akivaizdu, kad garso plokštėje vykdomi procesai reikalingi pakeisti analoginį signalą skaitmeniniu (diskretizavimas, kvantavimas-kodavimas) ir atvirkščiai (žemųjų dažnių analoginis filtravimas, interpoliavimas).
- Išnagrinėta tik maža dalis procesų, ateityje siekiama išsiaiškinti atskiruose KGP elementuose taikomus garso signalų apdorojimo procesus.



AČIŲ UŽ DĖMESĮ. PRAŠAU KLAUSTI

XIII-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija
M. Kalinauskas mykolas.kalinauskas@el.vgtu.lt

Vilnius
2010 03 19

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



XIV-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija
„Elektronika ir elektrotechnika”

Tiesioginės skaitmeninės sintezės tyrimas

Mgr. Mykolas Kalinauskas
Vadovas doc. dr. Vacius Mališauskas

Vilnius
2011 03 18

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



Pranešimo turinys

2/13

- Įvadas.
- Tiesioginė skaitmeninė sintezė (TSS).
- TSS sintezatoriaus struktūrinė schema.
- Skaitiklio reikšmių ir sintezuotojo signalo kitimo dėsniai.
- Sinusinės formos signalo sintezė.
- Garso signalų sintezės *Altera* makete DE2 schema.
- Sukurtos programos algoritmas.
- Sintezuotieji garso signalai ir jų spektrai.
- Apibendrinimas.



- Darbo tikslas:
 - Iširti, kaip veikia, kokius trūkumus ir privalumus turi tiesioginės skaitmeninės sintezės metodas.
- Aktualumas:
 - Tyrimo rezultatus panaudoti kompiuterių garso plokštėse (KGP).
- Problema:
 - KGP atminties dydis.



Tiesioginė skaitmeninė sintezė (TSS)

- Tiesioginės skaitmeninės sintezės metodą sukūrė JAV, Teksase įsikūrusi *National Instruments* kompanija.
- TSS metodas skirtas sintezuoti įvairių dažnių ir formų signalams, keičiant dvejetainio skaitiklio (fazės sumatoriaus) skaičiavimo žingsnį.
- Signalai sintezuojami iš sintezatoriaus atminties bangų lentelėje saugomų sinusinio signalo momentinių reikšmių. Jas parenka dvejetainis skaitiklis.



TSS sintezatoriaus struktūrinė schema

5/13



Tiesioginės skaitmeninės sintezės tyrimas

M. Kalinauskas mykolas.kalinauskas@el.vgtu.lt

Vilnius

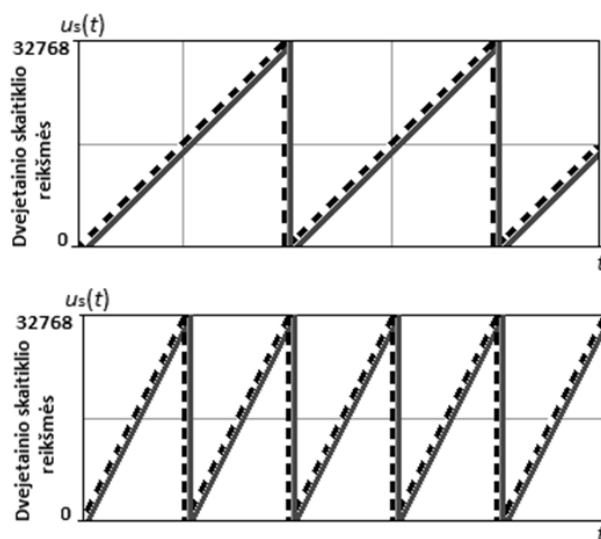
2011 03 18

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



Skaitiklio reikšmių ir sintezuotojo signalo kitimo dėsniai

6/13



2 kartus padidinus skaičiavimo žingsnį

Tiesioginės skaitmeninės sintezės tyrimas

M. Kalinauskas mykolas.kalinauskas@el.vgtu.lt

Vilnius

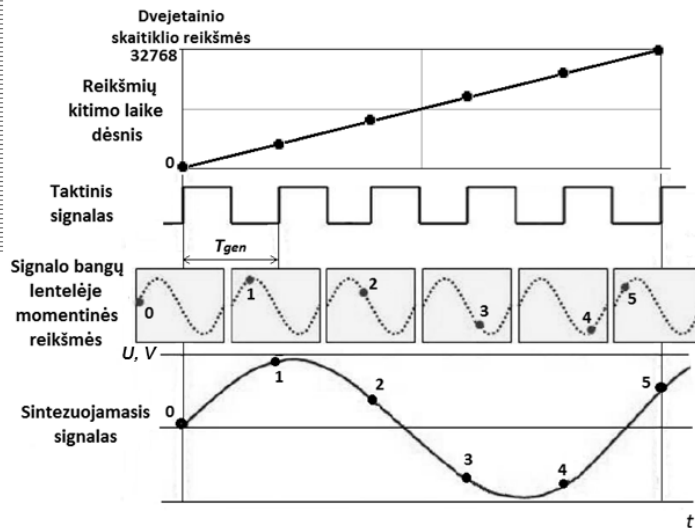
2011 03 18

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



Sinusinės formos signalo sintezė

7/13



Sintezuojamųjų signalų dažnis

$$f = \frac{\Delta \cdot f_{gen}}{2^{16}},$$

$$0 \leq \Delta < 2^{16},$$

Δ – dvejetainio skaitiklio skaičiavimo žingsnis,
 2^{16} – maksimalus skaitiklio reikšmių skaičius,
 f_{gen} – sintetatoriaus taktinio generatoriaus dažnis.

Tiesioginės skaitmeninės sintezės tyrimas
 M. Kalinauskas mykolas.kalinauskas@el.vgtu.lt

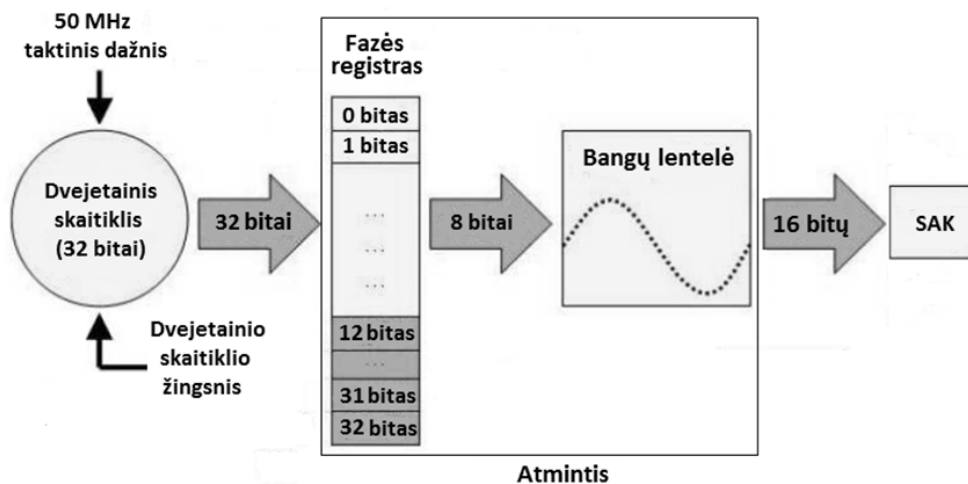
Vilnius
 2011 03 18

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
 ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
 VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



Garso signalų sintezės makete DE2 schema

8/13



Tiesioginės skaitmeninės sintezės tyrimas
 M. Kalinauskas mykolas.kalinauskas@el.vgtu.lt

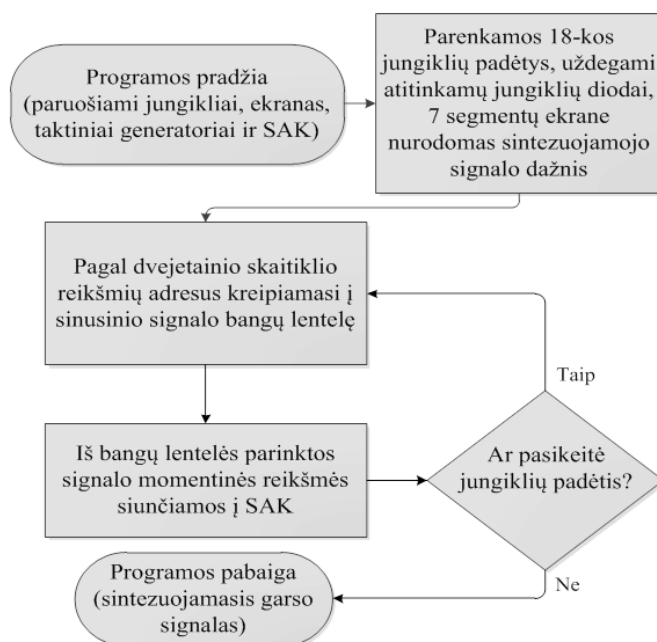
Vilnius
 2011 03 18

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
 ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
 VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



Sukurtos programos algoritmas

9/13



Tiesioginės skaitmeninės sintezės tyrimas

M. Kalinauskas mykolas.kalinauskas@el.vgtu.lt

Vilnius

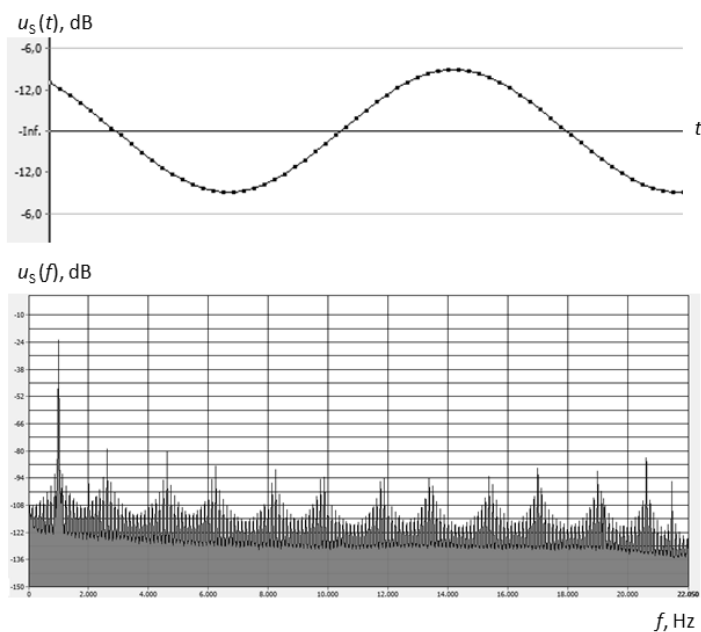
2011 03 18

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



Sintezuotasis 1 kHz garso signalas ir jo spektras

10/13



Tiesioginės skaitmeninės sintezės tyrimas

M. Kalinauskas mykolas.kalinauskas@el.vgtu.lt

Vilnius

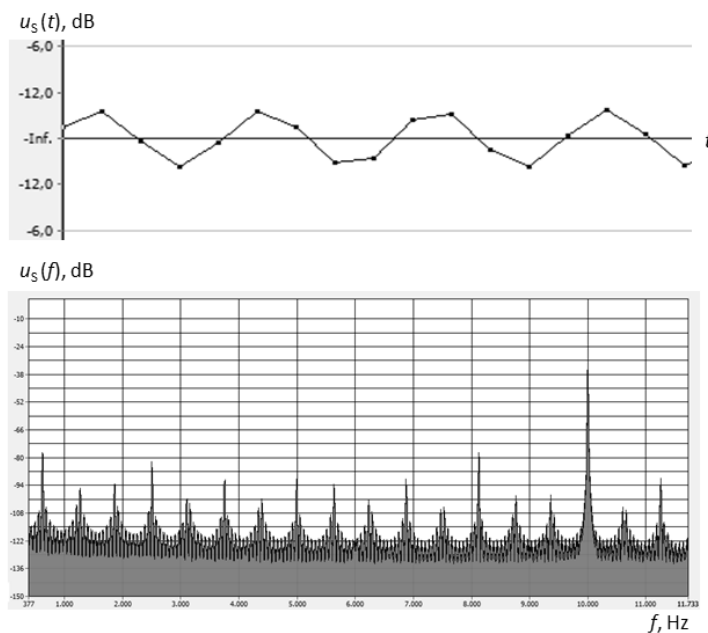
2011 03 18

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



Sintezuotasis 10 kHz garso signalas ir jo spektras

11/13



Tiesioginės skaitmeninės sintezės tyrimas

M. Kalinauskas

mykolas.kalinauskas@el.vgtu.lt

Vilnius

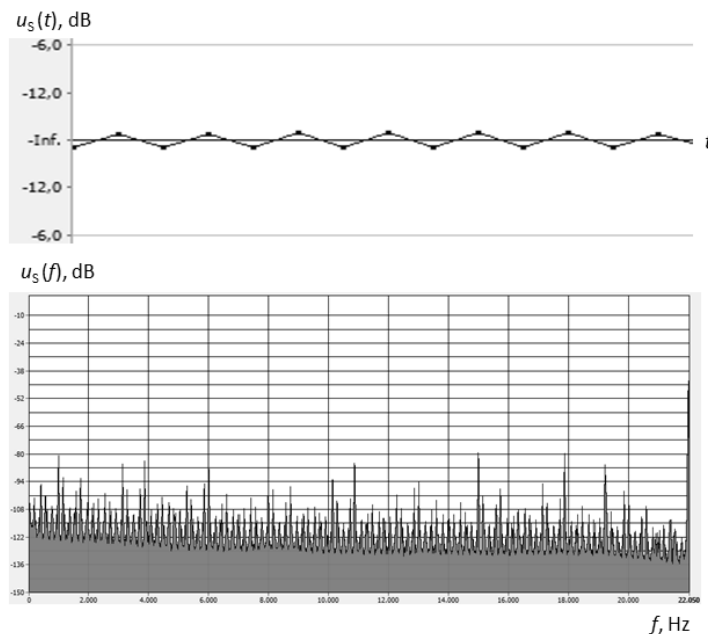
2011 03 18

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



Sintezuotasis 22 kHz garso signalas ir jo spektras

12/13



Tiesioginės skaitmeninės sintezės tyrimas

M. Kalinauskas

mykolas.kalinauskas@el.vgtu.lt

Vilnius

2011 03 18

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



- Darbe detaliai ištirti: TSS metodas, jo realizacija *Altera* makete DE2 ir jų veikimas.
- Sukurti algoritmas ir programa, sintezuoti bei ištirti 1, 10 ir 22 kHz dažnių garso signalai.
- Išryškinti TSS metodo trūkumai, kurių dalies galima išvengti, didinant bangų lentelėje saugomų sinusinio signalo momentinių reikšmių skaičių.
- TSS metodui reikia 7 kB atminties saugoti 1 signalo momentinėms vertėms, lyginant su bangų lentelių (WT) metodu: 125 kB reikia 1 ir 7,8 MB – 64 garso fragmentams.



Tarptautinė studentų mokslinė konferencija
Telekomunikacijos ir elektronika 2010

Kompiuterių garso plokščių (KGP) tyrimas

Mykolas Kalinauskas

Darbo vadovas
doc. dr. Vacius Mališauskas

Kaunas
2010 04 01

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



Turinys

2/12

- Įvadas.
- KGP struktūrinės schemos.
- Apibendrinta KGP struktūrinė schema.
- KGP apdorojami garso signalai.
- Garso signalų apdorojimas KGP.
- Rezultatai.

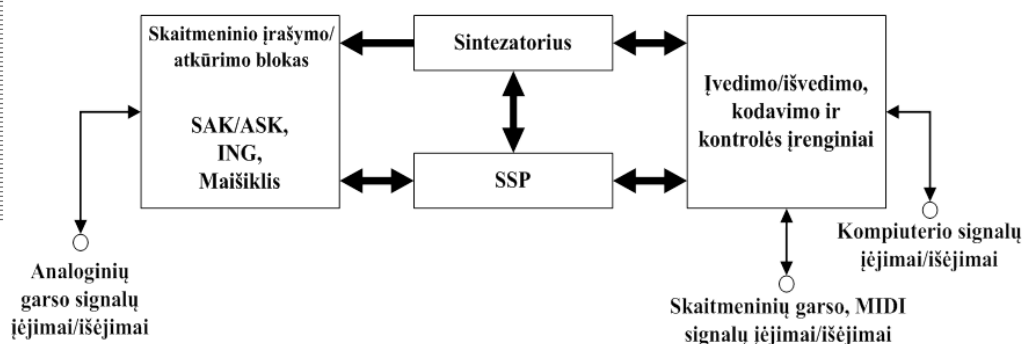


Įvadas

- Darbo **tikslas** – rasti ir ištirti kompiuterių garso plokščių struktūrinės schemas, sudaryti apibendrintą KGP struktūrinę schemą, ištirti garso signalų apdorojimą jose.
- **Aktualumas** – svarbu paruošti sistematizuotą ir išsamią informaciją, kurios nepakanka, apie KGP struktūrinės schemas ir garso signalų apdorojimą jose.
- Darbo **problema** – informacijos apie KGP struktūras ir garso signalų apdorojimą jose stoka.
- Sprendžiami **uždaviniai** – apibendrintos KGP struktūrinės schemas sudarymas. KGP garso signalų ir jų apdorojimo procesų tyrimo sistematizavimas.



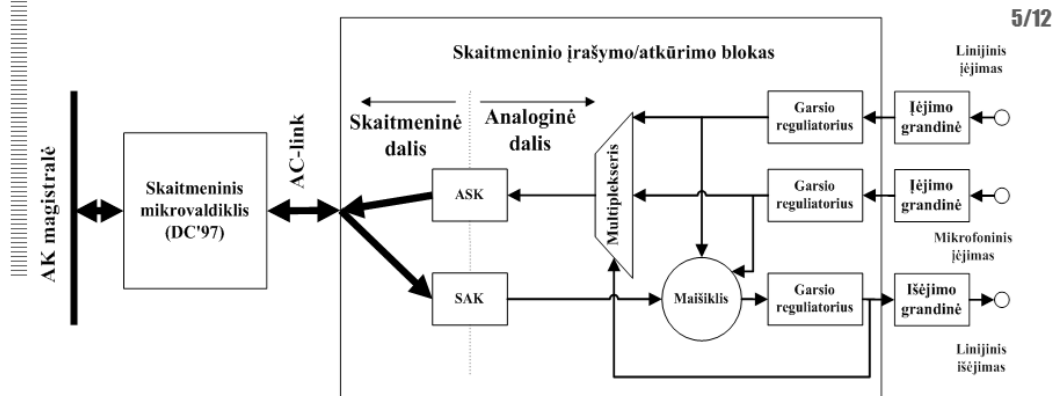
KGP struktūrinės schemas (1)



- įėjimai ir išėjimai labai nekonkretūs,
- neišskirti SAK/ASK, ING ir Maišiklio blokai.



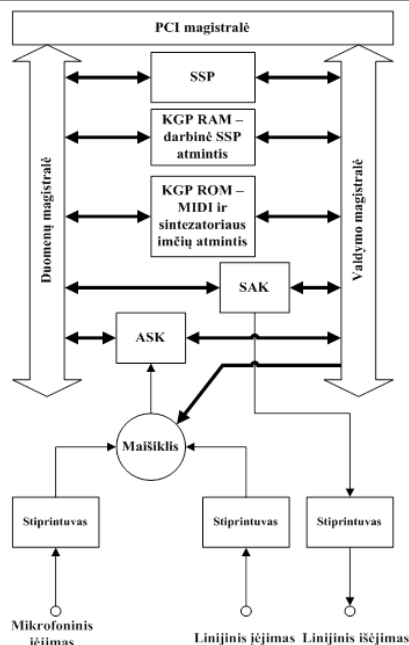
KGP struktūrinės schemos (2)



- visas dėmesys skirtas SAK ir ASK.
- nenagrinėjama skaitmeninė dalis, trūksta SSP ir sintezatoriaus blokų, skaitmeninių ir MIDI įėjimų bei išėjimų.



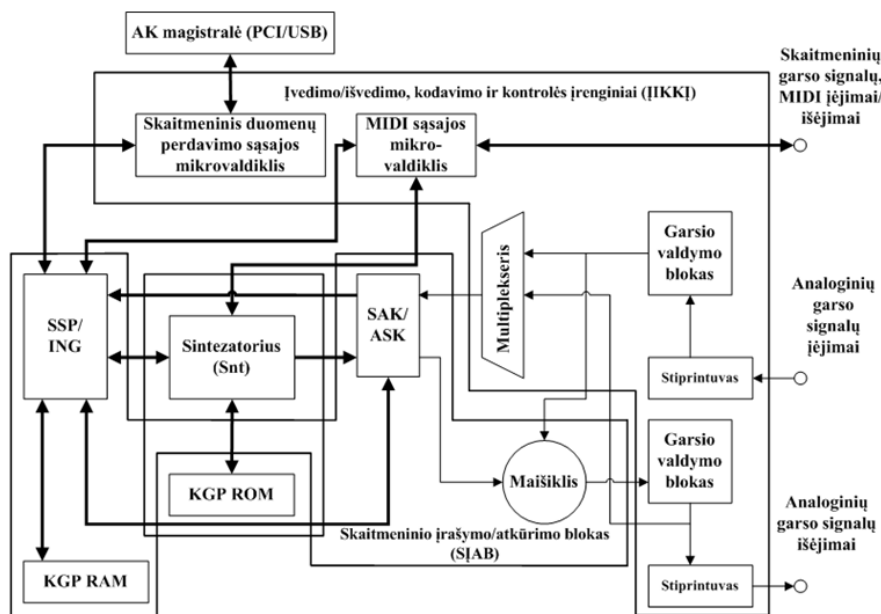
KGP struktūrinės schemos (3)



- visas dėmesys skirtas duomenų judėjimui KGP.
- nėra ING, sintezatoriaus, mikrovaldiklių, garsio reguliatorių blokų.



Apibendrinta KGP struktūrinė schema



KGP apdorojami garso signalai

- Analoginiai garso signalai:
 - Išoriniai – elektriniai,
 - Vidiniai – elektriniai.
- Skaitmeniniai garso signalai:
 - Išoriniai (įėjimų, išėjimų): elektriniai, optiniai;
 - Vidiniai – elektriniai: vienodo ir skirtingo skiltiškumo.
- Sintezatorių garso signalai (skaitmeniniai – elektriniai):
 - Išoriniai (įėjimų, išėjimų) – MIDI;
 - Vidiniai: dažnių moduliacijos (FM), bangų-lenteliniai (WT).



Garso signalų apdorojimas KGP (1)

9/12

Skaitmeninių signalų apdorojimas SSP:

- Transformavimas;
- Transkodavimas;
- Filtravimas;
- Glaudinimas;
- Efektų kūrimas;
- Kalbos atpažinimas/sintezė;
- Patalpų akustikos modeliavimas ir kt.



Garso signalų apdorojimas KGP (2)

10/12

Skaitmeninių signalų apdorojimas Snt:

- Sintezė;
- Transformavimas;
- Polifonija.

Skaitmeninių ir analoginių signalų apdorojimas [IKK].

Keitimas iš skaitmeninių į analoginius signalus SAK.

Keitimas iš analoginių į skaitmeninius signalus ASK.



Rezultatai

11/12

- Iširtos trys kompiuterių garso plokščių struktūrinės schemos.
- Sudaryta apibendrinta KGP struktūrinė schema.
- Jos pagrindu išskirtos 3 apdorojamų garso signalų grupės, kiekvienoje po 2 pogrupes.
- Sistematuoti KGP garso signalų apdorojimo procesai.
- Sukurta KGP garso signalų ir jų apdorojimo procesų tyrimo sistema.

Telekomunikacijos ir elektronika 2010

M. Kalinauskas

mykolas.kalinauskas@el.vgtu.lt

Kaunas

2010 04 01

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



12/12

AČIŪ UŽ DĖMESĮ.

Telekomunikacijos ir elektronika 2010

M. Kalinauskas

mykolas.kalinauskas@el.vgtu.lt

Kaunas

2010 04 01

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



Studentų mokslinė konferencija
Telekomunikacijos ir elektronika 2011

Eksperimentinis garso signalų sintezės tyrimas

Mgr. Mykolas Kalinauskas
Vadovas doc. dr. Vacius Mališauskas

Kaunas
2011 04 07

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



Pranešimo turinys

2/13

- Įvadas.
- KGP naudojami garso signalų sintezės metodai.
- Tiesioginė skaitmeninė sintezė (TSS).
- TSS sintezatoriaus struktūrinė schema.
- Sinusinės formos signalo sintezė.
- Garso signalų sintezės *Altera* makete DE2 schema.
- Sukurtos programos algoritmas.
- Sintezuoti garso signalai ir jų spektrai.
- Apibendrinimas.



- Darbo tikslas:
 - Iširti, kaip veikia, kokius trūkumus ir privalumus turi tiesioginės skaitmeninės sintezės metodas. Palyginti jį su kompiuterių garso plokštėse (KGP) jau naudojamais metodais.
- Aktualumas:
 - Tyrimo rezultatus panaudoti KGP.
- Problema:
 - KGP atminties dydis.



KGP naudojami garso signalų sintezės metodai

- Dažnių moduliavimo metodas (FM).
 - Privalumas – galimybė sintezuoti natūralioje gamtoje neegzistuojančius garsus.
 - Trūkumas – reikalingas tikslus nešlio ir moduluojančio signalų dažnių bei moduliacijos indekso parinkimas.
- Bangų lentelių metodas (WT).
 - Privalumas – sintezuojami garsai yra artimesni natūraliems garsams.
 - Trūkumas – reikalinga didelė KGP atmintis natūralių garsų fragmentams saugoti.



Tiesioginė skaitmeninė sintezė (TSS)

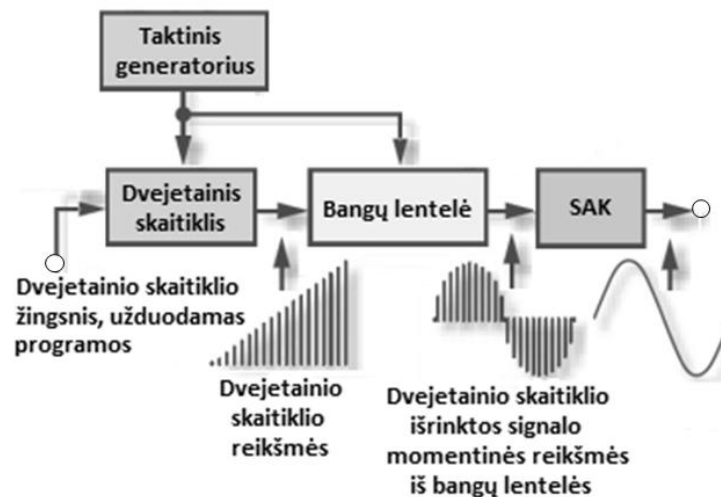
5/13

- Tiesioginės skaitmeninės sintezės metodą sukūrė JAV, Teksase įsikūrusi *National Instruments* kompanija.
- TSS metodas skirtas sintezuoti įvairių dažnių ir formų signalams, keičiant dvejetainio skaitiklio (fazės sumatoriaus) skaičiavimo žingsnį.
- Signalai sintezuojami iš sintezatoriaus atminties bangų lentelėje saugomų sinusinio signalo momentinių reikšmių. Jas parenka dvejetainis skaitiklis.



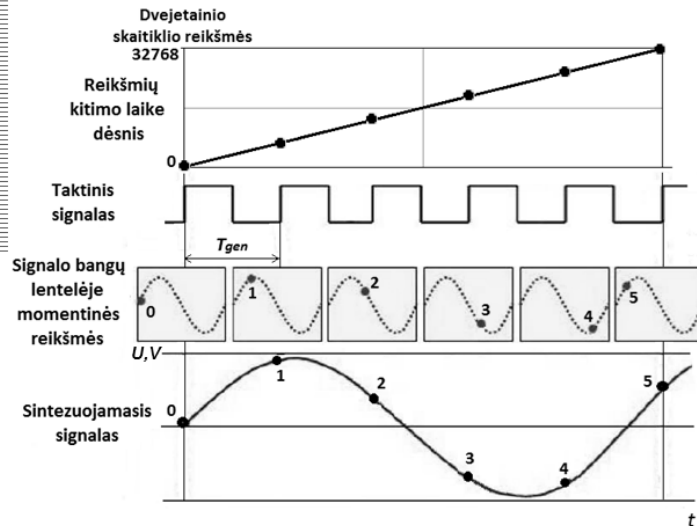
TSS sintezatoriaus struktūrinė schema

6/13



Sinusinės formos signalo sintezė

7/13



Sintezuojamųjų signalų dažnis

$$f = \frac{\Delta \cdot f_{gen}}{2^{16}},$$

$$0 \leq \Delta < 2^{16},$$

Δ – dvejetainio skaitiklio skaičiavimo žingsnis,
 2^{16} – maksimalus skaitiklio reikšmių skaičius,
 f_{gen} – sintezatoriaus taktinio generatoriaus dažnis.

Eksperimentinis garso signalų sintezės tyrimas
 M. Kalinauskas mykolas.kalinauskas@el.vgtu.lt

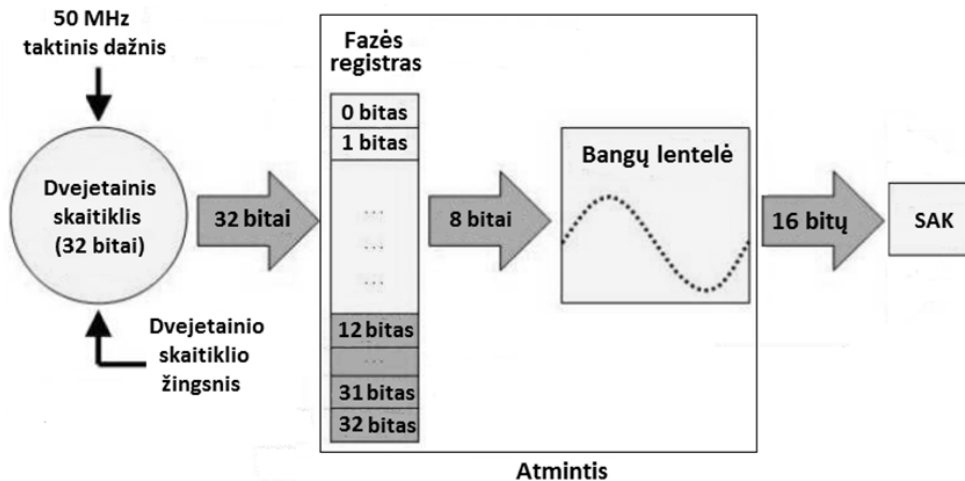
Kaunas
 2011 04 07

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
 ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
 VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



Garso signalų sintezės makete DE2 schema

8/13



Eksperimentinis garso signalų sintezės tyrimas
 M. Kalinauskas mykolas.kalinauskas@el.vgtu.lt

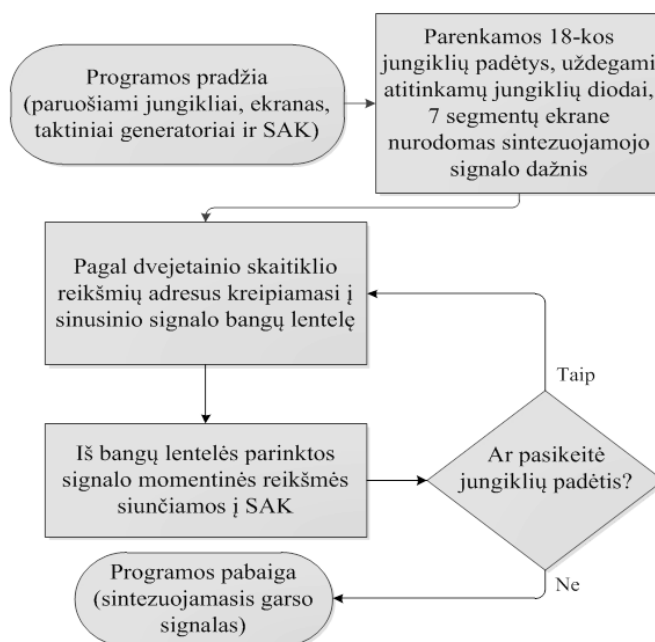
Kaunas
 2011 04 07

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
 ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
 VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



Sukurtos programos algoritmas

9/13



Eksperimentinis garso signalų sintezės tyrimas
M. Kalinauskas mykolas.kalinauskas@el.vgtu.lt

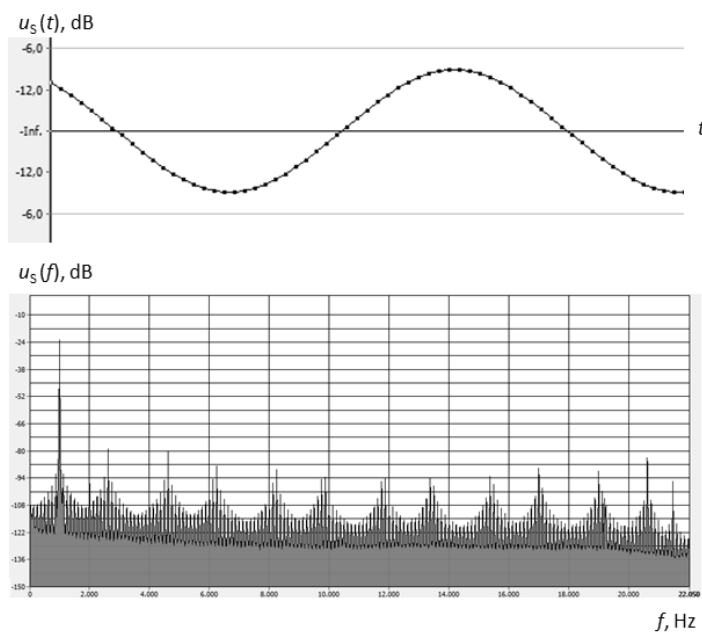
Kaunas
2011 04 07

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



Sintezuotasis 1 kHz garso signalas ir jo spektras

10/13



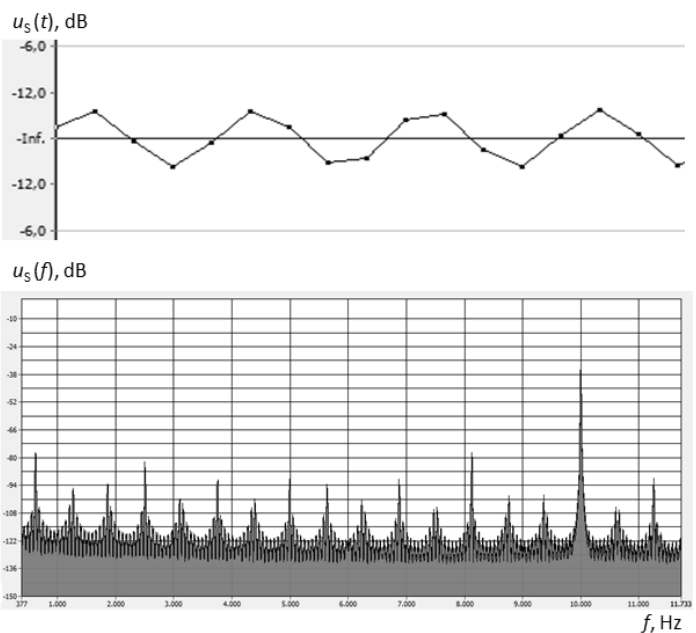
Eksperimentinis garso signalų sintezės tyrimas
M. Kalinauskas mykolas.kalinauskas@el.vgtu.lt

Kaunas
2011 04 07

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



Sintezuotasis 10 kHz garso signalas ir jo spektras



11/13

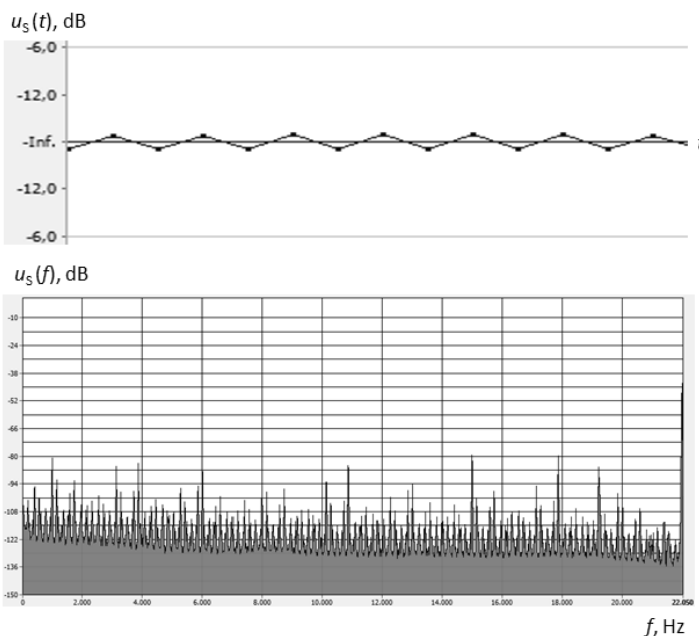
Eksperimentinis garso signalų sintezės tyrimas
M. Kalinauskas mykolas.kalinauskas@el.vgtu.lt

Kaunas
2011 04 07

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



Sintezuotasis 22 kHz garso signalas ir jo spektras



12/13

Eksperimentinis garso signalų sintezės tyrimas
M. Kalinauskas mykolas.kalinauskas@el.vgtu.lt

Kaunas
2011 04 07

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS



- Darbe detaliai ištirti: TSS metodas, jo realizacija *Altera* makete DE2 ir jų veikimas.
- Sukurti algoritmas ir programa, sintezuoti bei ištirti 1, 10 ir 22 kHz dažnių garso signalai.
- Išryškinti TSS metodo trūkumai, kurių dalies galima išvengti, didinant bangų lentelėje saugomų sinusinio signalo momentinių reikšmių skaičių.
- TSS metodui reikia 7 kB atminties saugoti 1 signalo momentinėms vertėms, lyginant su bangų lentelių (WT) metodu: 128 kB reikia 1 garso fragmentui ir 8 MB – 64 garso fragmentams.



Priedas G. Pažymos ir diplomai





XIII-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija
„MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“
ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA

PAŽYMA

Mykolas Kalinauskas

*Sistemų inžinerijos, kompiuterių technologijų ir Signalų
technologijų jungtinėje sekcijoje perskaitė pranešimą*

***Signalų apdorojimas kompiuterių
garso plokštėse***

Mokslo komiteto pirmininkas

prof. habil. dr. Romanas Martavičius

Sekcijos pirmininkas

dr. Artūras Serackis

2010 m. kovo mėn. 19 d.
Vilnius



GYEInternational
PROFESINIS KARTAVIS LAIKASU LITVANIJA 2008



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Telekomunikacijų ir elektronikos fakultetas

DIPLOMAS

Mykolas Kalinauskas

Parengė ir perskaitė pranešimą studentų mokslinėje konferencijoje

TELEKOMUNIKACIJOS IR ELEKTRONIKA - 2011

Tema: Eksperimentinis garso signalų sintezės tyrimas

Prof. Algimantas Valinevičius

Organizacinio komiteto pirmininkas

Telekomunikacijų ir elektronikos fakulteto dekanas

K a u n a s, 2011 m. balandžio 07 d.





KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Telekomunikacijų ir elektronikos fakultetas

DIPLOMAS

Mykolas Kalinauskas

*Parengė ir perskaitė pranešimą tarptautinėje studentų mokslinėje
konferencijoje*

TELEKOMUNIKACIJOS IR ELEKTRONIKA - 2010

Tema: „Kompiuterių garso plokščių tyrimas“

Prof. Algimantas Valinevičius 
Organizacinio komiteto pirmininkas
Telekomunikacijų ir elektronikos fakulteto dekanas

K a u n a s, 2010 m. balandžio 01 d.

Priedas H. Eksperimentiniam tyrimui sukurtos Verilog kalba programos kodas

```
1. module audio3(
2. // Taktinis dažnis
3. input CLOCK_50,
4. input CLOCK_27,
5. // Jungikliai
6. input [17:0] SW,
7. // 7 segmentų indikatorius
8. output [6:0] HEX0, HEX1, HEX2, HEX3, HEX4, HEX5, HEX6, HEX7,
9. // Diodai
10. output [8:0] LEDG,
11. output [17:0] LEDR,
12. // I2C
13. inout I2C_SDAT,
14. output I2C_SCLK,
15. // Garso kodekas
16. output/*inout*/ AUD_ADCLRCK,
17. input AUD_ADCDAT,
18. output/*inout*/ AUD_DACLK,
19. output AUD_DACDAT,
20. inout AUD_BCLK,
21. output AUD_XCK,);
22. assign GPIO_0 = 36'hzzzzzzzz;
23. assign GPIO_1 = 36'hzzzzzzzz;
24. wire [6:0] myclock;
25. wire RST;
26. assign RST = KEY[0];
27. wire DLY_RST;
28. Reset_Delay r0(.iCLK(CLOCK_50),.oRESET(DLY_RST));
29. // Jungiklių priskirimas raudoniems diodams
30. assign LEDR = SW;
31. // Žalių diodų išjungimas
32. assign LEDG = 0;
33. // 7 segmentų indikatoriaus išjungimas
34. parameter BLANK = 7'h7f;
35. assign HEX5 = BLANK;
36. assign HEX6 = BLANK;
37. assign HEX7 = BLANK;
38. hex_7seg d4(SW[17:16],HEX4);
39. hex_7seg d3(SW[15:12],HEX3);
40. hex_7seg d2(SW[11:8],HEX2);
41. hex_7seg d1(SW[7:4],HEX1);
42. hex_7seg d0(SW[3:0],HEX0);
43. assign TD_RESET = 1'b1; //Aktyvuojamas 27 MHz taktinis generatorius
44. VGA_Audio_PLL p1 (
45. .areset(~DLY_RST),
46. .inclk0(CLOCK_27),
47. .c0(VGA_CTRL_CLK),
```

```

48. .c1(AUD_CTRL_CLK),
49. .c2(VGA_CLK));
50. I2C_AV_Config u3(
51. .iCLK(CLOCK_50),
52. .iRST_N(KEY[0]),
53. .I2C_SCLK(I2C_SCLK),
54. .I2C_SDAT(I2C_SDAT));
55. Assign AUD_ADCLRCK = AUD_DACLRC;
56. Assign AUD_XCK = AUD_CTRL_CLK;
57. audio_clock u4(
58. .oAUD_BCK(AUD_BCLK),
59. .oAUD_LRCK(AUD_DACLRC),
60. .iCLK_18_4(AUD_CTRL_CLK),
61. .iRST_N(DLY_RST));
62. audio_converter u5(
63. .AUD_BCK(AUD_BCLK),
64. .AUD_LRCK(AUD_DACLRC),
65. .AUD_ADCDAT(AUD_ADCDAT),
66. .AUD_DATA(AUD_DACDAT),
67. .iRST_N(DLY_RST),
68. .AUD_outL(audio_outL),
69. .AUD_outR(audio_outR),
70. .AUD_inL(audio_inL),
71. .AUD_inR(audio_inR));
72. wire [15:0] audio_inL, audio_inR;
73. wire [15:0] audio_outL, audio_outR;
74. wire [15:0] signal;
75. //Skaitmeninės sintezės dažnio parinkimas
76. //Naudojami jungikliai dažnio parinkimui
77. wire [31:0] dds_incr;
78. wire [31:0] freq =
SW[3:0]+10*SW[7:4]+100*SW[11:8]+1000*SW[15:12]+10000*SW[17:16];
79. assign dds_incr = freq * 91626 ; //91626 = 2^32/46875 so SW is in Hz
80. reg [31:0] dds_phase;
81. always @(negedge AUD_DACLRC or negedge DLY_RST)
82. if (!DLY_RST) dds_phase <= 0;
83. else dds_phase <= dds_phase + dds_incr;
84. wire [7:0] index = dds_phase[31:24];
85. sine_table sig1(
86. .index(index),
87. .signal(audio_outR));
88. assign audio_outL = 15'h0000;
89. endmodule

```


Priedas I. FM sintezavimo principo tyrimui sukurtos *Matlab* programos kodas

```
1  function fm()
2  clc
3  close all
4  clear all
5  Fm = 900;
6  Fc = 400;
7  Fs = 10000 ;
8  A = 1; B = 6000; C =0;
9  d = 1 ;
10 t = linspace(0, d, d*Fs +1);
11 m = .5*cos(2*pi*Fm*t);
12 s = fmmmod(m, A , B , C , Fc , Fs);
13 tfplot(s, Fs, 'U(t)', 'Dažniu moduluoto signalo oscilograma ir spektras');
14 fprintf('Atkuriamas garso signalas \n');
15 sound(m, Fs);
16 function s= fmmmod(m, A , B , C , fc , fs)
17 t= linspace(0, (length(m)-1)/fs, length(m));
18 s_int = cumsum(m) / fs;
19 s = A*cos(2*pi*fc*t + B*s_int + C);
20 function tfplot(s, fs, name, plottitle)
21 t = linspace(0, (length(s)-1) / fs, length(s));
22 f = linspace(-fs/2, fs/2, length(s));
23 s_f = fft(s);
24 figure;
25 subplot(2,1,1); plot(t, s);
26 xlabel('t, s');ylabel(sprintf('U(t)', name));
27 title(plottitle);
28 subplot(2,1,2); plot(f, fftshift(abs(s_f)));
29 xlabel('f, Hz'); ylabel(sprintf('U(f)', name));
```