



TURINYS

Žymenys ir santrumpos	10
1. Įvadas. Užduoties analizė	11
2. Analogiškų sistemų apžvalga	13
3. Naudojamų metodų apžvalga	15
3.1. HRTF funkcijos	15
3.2. Galvos šešėlis ir pečių aidas	15
3.3. Tarpausinis laiko skirtumas	16
3.4. Tarpausinis garso lygių skirtumas	16
3.5. HRTF metodo panaudojimas	17
3.6. Duplekso teorija	17
3.7. Kambario impulsinis atsakas	21
3.8. Skyriaus apibendrinimas	22
4. Sistemos kūrimas	23
4.1. Sistemos struktūrinė schema	23
4.2. Jutiklių duomenų sintezės filtras	24
4.3. Garso apdorojimo mechanizmas	26
4.4. Galvos sekimo įrenginys	29
4.5. Binauralinio garso efekto mechanizmo algoritmas	31
4.6. KIA generavimas	33
4.7. Sistemos vartotojo sąsaja asmeniniame kompiuteryje	35
4.8. Realios sistemos specifikacija	36
4.9. Skyriaus apibendrinimas	38
5. Sistemos patikra	42
5.1. Galvos sekimo įrenginys	42
5.1.1. Jutiklių duomenų sintezės tikslumo tyrimas	42
5.1.2. Energijos suvartojimo patikra	44
5.2. Garso apdorojimo įrenginio patikra	45
5.2.1. Energijos suvartojimo patikra	46
5.2.2. Garso generavimo tikslumas	48
5.3. Skyriaus apibendrinimas	49
6. Rezultatų apibendrinimas. Išvados	50



7. Literatūros ir informacinių šaltinių sąrašas	51
PRIEDAI	53



Žymenys ir santrumpos

- ATF – anatominė perdavimo funkcija (angl. *Anatomical Transfer Function*).
- COM – RS232 nuoseklusis prievadas.
- HRTF – su galva susijusios perdavimo funkcijos (angl. *Head Related Transfer Function*).
- KIA – kambario impulsinis atsakas (angl. *Room Impulse Response*).
- HRIR – nuo galvos priklausantis impulsinis atsakas (angl. *Head Related Impulse Response*).
- MARG – magnetinis laukas, kampinis pagreitis ir laisvojo kritimo pagreičio vektorius (angl. *Magnetic, Angular Rate, and Gravity*).
- PVA – pradinio vėlinimo atotrūkis (angl. *ITDG – Initial Time Delay Gap*).
- TGLS – tarpausinis garso lygių skirtumas (angl. *Initial Level Difference*).
- TLS – tarpausinis laiko skirtumas (angl. *Interaural Time Difference*).
- USB – universalioji nuoseklioji jungtis (angl. *Universal Serial Bus*).



1. Įvadas. Užduoties analizė

Darbo tema - „Virtualios garso realybės sistema“. Šiuo metu virtuali ir papildytos realybės programinė įranga yra toli pažengusi, tačiau garso generacijai ir toliau naudojamas stereogarsas, kuriuo nėra įmanoma tiksliai atkurti aplinkos garsų.

Šiuo darbu siekiama ištirti galimybes sukurti realiuoju laiku veikiančią sistemą, gebančią generuoti binauralinį garsą priklausomai nuo vartotojo galvos orientacijos ir virtualios aplinkos akustinių parametrų. Sistema yra suskirstyta į tris pagrindines dalis: galvos sekimo įrenginys – seka vartotojo galvos orientaciją; programa asmeniniame kompiuteryje – siunčia virtualios aplinkos duomenis ir garso šaltinio skleidžiamą garsą; garso apdorojimo įrenginys – apjungia informaciją, gautą iš galvos sekimo įrenginio bei asmeninio kompiuterio, ir sugeneruoja binauralinį garsą. Tokia architektūra buvo pasirinkta dėl modulinės struktūros, be to perkėlus garso generavimą į atskirą įrenginį, atlaisvinamas asmeninio kompiuterio centrinis procesorius, todėl virtualiai aplinkai sukurti lieka daugiau asmeninio kompiuterio resursų.

Pradiniai bandymai bus atlikti *Matlab* terpėje, kas leis įsitikinti sistemos įgyvendinimo galimybėmis, bei duos progą patobulinti naudojamus procesus.

Virtualios garso realybės tema buvo pasirinkta dėl savo perspektyvumo, nors binauralinis garsas pradėtas tirti pakankamai seniai, realiai veikiančių įrenginių nėra sukurta. Tema yra aktuali žaidimų ir medicinos pramonei.

Didžiausia sistemos problema slypi HRTF (angl. *Head Related Transfer Function*) panaudojime, kadangi HRTF deriniai turi būti pritaikyti individualiai kiekvienam klausytojui. Tačiau panaudojus papildomus procesus garso generavimo eigoje, pamėginta sumažinti HRTF neigiamą įtaką.

Darbo eigoje bus sukurta pilnai veikianti sistema, gebanti kuo tiksliau atkurti virtualią akustinę aplinką, programinė įranga bus parašyta garso apdorojimo, galvos orientacijos įrenginiams bei asmeniniam kompiuteriui. Taip pat bus suprojektuoti abu naudojami įrenginiai.

Baigiamojo bakalauro darbo sistemos asmeninio kompiuterio programinei įrangai reikalingos mažiausiai 20MB diskinio kaupiklio dalies talpos. Toks atminties kiekis reikalingas norint vartotojo sąsają padaryti patrauklesnę vartotojui, t. y. grafinės iliustracijos, garsai ir kt. Asmeniniame kompiuteryje programinė įranga dirba *Windows 7* operacinėje sistemoje, nes senesnių operacinių sistemų versijų (*XP*, *Vista*) *Microsoft* korporacijos palaikymas bus nutraukiamas artimiausiu metu. [1]

Garso apdorojimo įrenginyje bus naudojama ne mažesnė nei 1.1 USB prievado versija, nes sistema suprojektuota darbui su šia ar aukštesnėmis versijomis. Duomenų perdavimą būtų galima realizuoti ir kitomis sąsajomis, tokiomis kaip RS232 nuosekliuoju prievadu, bet tokiu atveju greitis būtų nepakankamas ir sistema neatitiktų darbo užduotyje nurodyto vėlinimo. Be to, binauralinio garso generavimo sistema yra šiuolaikinė ir labiau taikoma nešiojamiems kompiuteriams, kuriuose nebediegiami RS232 prievadai. Galimybė naudoti RS232 prievadą



įmanoma, bet tokiu atveju tektų papildomai turėti iš USB į COM keitiklio kabelį, kuris taip pat naudoja USB jungtį. Todėl geriausias pasirinkimas spartos atžvilgiu rinktis virtualų COM prievadą per USB jungtį.

Siekiant išlaikyti kuriamos sistemos kuo ilgesnį autonominio veikimo laiką, sistema suprojektuota suvartoti maksimaliai 0,5 A srovės (tiek galvos orientacijos nustatymo įrenginys, tiek garso apdorojimo įrenginys), be to 0,5 A tai didžiausia srovė, kurią pagal specifikaciją gali suteikti USB 1.1 ir USB 2.0 prievadai.

Norint išlaikyti sistemos mobilumą, kurio didžioji dalis priklauso nuo galvos sekimo įrenginio dydžio, buvo pasirinkti pakankamai nedideli pastarojo įrenginio maksimalūs matmenys: $50 \times 100 \times 100$ mm.

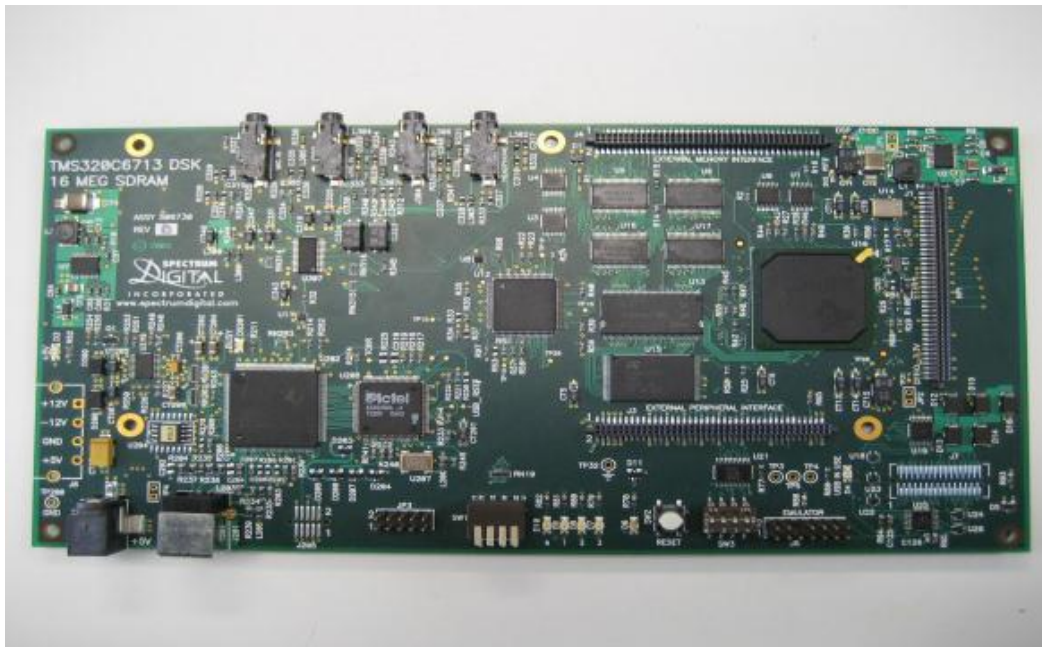
Sistemos veikimas bus vertinamas sugeneruoto binauralinio garso tikslumu (palyginus su įrašytu binauraliniu garsu), bei autonominio veikimo trukme.

2. Analogiškų sistemų apžvalga

Šiame skyriuje bus apžvelgtos analogiškos sistemos: buvę prototipai ir šiuo metu esami rinkoje produktai. Apibendrintai bus aptarti nagrinėjamų sistemų teigiamos ir neigiamos savybės.

Orientacijos sekimo įrenginiai naudojami norint nustatyti lėktuvų trimatę poziciją. Pati *sensor fusion* technologija taip pat jau gana ilgai naudojama aviacijos srityje, norint kur kas tiksliau nustatyti poziciją.

Tokio tipo sistemų pasaulyje yra tik keletas. Projekto tikslas – binauralinio garso generavimas realiu laiku. Vienas iš projektų naudojo *Texas instruments* pagamintą plokštę – C6713 DSK, kuri pavaizduota 2.1 pav. [2]



2.1 pav. C6713 DSK spausdintinė plokštė

Šios plokštės mikrovaldiklis dirba 225 MHz dažniu ir pasiekia 1800 milijonų instrukcijų per sekundę spartą. Taip pat ši plokštė gali atkurti aukštos kokybės 24 bitų skaitmeninį stereogarsą, turi 512 kB *Flash* bei 16 MB SDRAM atminties. JTAG¹ prieinamas per USB jungtį.

Kaip teigia gaminio kūrėjai, jie generuoja binauralinį garsą naudojant specialų stereo filtrą suprogramuotą minėtoje plokštėje. Programinė įranga naudoja HRTF sugeneruotas *Floridos tarptautinio universiteto* asmenų. Dviejų kanalų išėjimui panaudotos 12 *HRTF* funkcijų, kurios taip pat nebuvo sugeneruotos projekto autorių.

Kūrėjų teigimu, rezultatai jų stipriai nestebina – geriausias efektas jaučiamas tik garsui esant už galvos, nes panaudotos HRTF funkcijos nėra pritaikytos jų ausims. Šio įrenginio testavimo akimirką demonstruoja 2.2 pav.

¹JTAG – programavimo ir testavimo jungtis.



3. Naudojamų metodų apžvalga

Šiame skyriuje bus apžvelgti metodai, kuriais remiantis sukurti matematiniai modeliai ir realios sistemos prototipas.

3.1. HRTF funkcijos

HRTF (dar vadinamos ATF) yra porinės funkcijos, kurios nusako atsaką kaip žmogaus ausis priima sklindantį iš taško erdvėje garsą. Panaudojus HRTF porą, skirtą kiekvienai ausiai, galima sintezuoti binauralinį garsą taip sukuriant erdvės pojūtį. Žmogaus smegenys apskaičiuoja garso šaltinio poziciją erdvėje naudojantis: 1) garso užuominomis atkeliavusiomis į kiekvieną ausį (angl. *monoaural cues*), 2) abiejų ausų garso užuominų palyginimu (angl. *difference cues* arba *binaural cues*). Pagrindinės garso užuominos yra: [3,4]

1. Tarpausinis laiko skirtumas (angl. *Interaural Time Difference*).
2. Tarpausinis garso lygių skirtumas (angl. *Interaural Level Difference*).
3. Spektriniai skirtumai (angl. *Spectral cues* arba *Pinae effect*).
4. Galvos šešėlis (angl. *Head Shadow*).
5. Pečių aidas (angl. *Shoulder Echo*).
6. Ankstyvieji atspindžiai (angl. *Early Reflections*).
7. Atgarsiai (angl. *Reverberation*).

HRTF aprašo tik dalį iš aukščiau pateiktų užuominų: TLS ir TGLS.

3.2. Galvos šešėlis ir pečių aidas

Galvos šešėlis (angl. *head shadow*) dar kitaip vadinamas akustiniu šešėliu. Tai sumažėjusios garso amplitudės sritis, kuri atsiranda dėl to, kad galva sugeria dalį garso bangų, o likusiųjų – sumažina amplitudę. Pasiekusi galvą garso banga gali keliauti aplink arba kiaurai galvą, kad pasiektų ausies kriauklę, esančią priešingoje pusėje. Tokiu būdu yra sukuriamas pirminės lokalizacijos filtras. Ausį, esančią šešėlyje, garsas pasiekia maždaug 0,7 ms vėliau, todėl žmogaus smegenys sugeba nustatyti apytiksliai garso sklidimo kryptį. [3,4]

Pečių aidas – tai aidas, atsirandantis garso bangom atsispindėjus nuo klausytojo pečių. Toks aidas tiesiogiai turi mažai lokalizacijos informacijos, tačiau panaudojus jį kartu su galvos šešėliu, didėja galimybė tiksliau nustatyti garso šaltinio poziciją.



3.5. HRTF metodo panaudojimas

Norint panaudoti šį metodą reikia turėti HRTF rinkinį visiems vertikalinių ir horizontalių kampų deriniams. Šiame darbe naudojami Masačiuoseco technologijų instituto (angl. *Massachusetts Institute of Technology*) 1994 metais atlikto projekto *KEMAR* metu gauti universalūs HRTF deriniai.[5]

Turint baigtinio ilgio skaitmeninį garso signalą atliekama diskrečioji sąsuka (angl. *convolution*) pagal 3.1 formulę: [3]

$$(f * g)[n] = \sum_{m=0}^{\infty} f[m] * g[n - m] = \sum_{m=0}^{\infty} f[n - m] * g[m] \quad (3.1)$$

čia f – vieno kanalo baigtinio ilgio daugianaris (angl. *polynomial*), g – atitinkamo kanalo HRTF funkcija (išreikšta daugianariu), n – daugianario narių skaičius.

Šioje formulėje atliekama dviejų daugianarių daugyba, rezultate gauto daugianario koeficientai atitinka originalaus daugianario (f) koeficientų seką po sąsukos, visi likę nežinomi koeficientai yra prilyginami nuliui, kad nekiltų neapibrėžtumas. Šis veiksmas dar žinomas kaip dviejų daugianarių koeficientų *Kauči* daugyba (angl. *Cauchy product*). [3]

Veiksmas atliekamas atskirai dešiniajam ir kairiajam kanalams naudojant tą patį garso signalą su atitinkamai dešiniajai arba kairiajai ausiai skirta HRTF funkcija.

3.6. Duplekso teorija

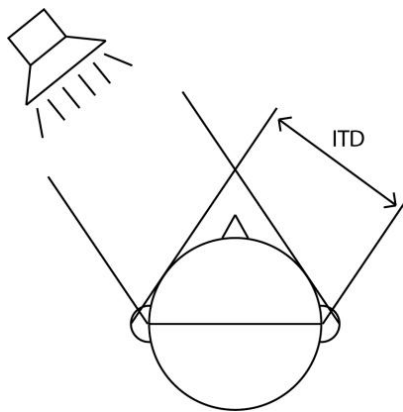
Duplekso teorija, pateikta Lordo Reilėjaus (Lord Rayleigh), pateikia paaiškinimus apie žmogaus galimybę lokalizuoti garsus pagal laiko skirtumą TLS tarp garsų, patenkančių į kiekvieną ausį ir taip pat skirtingo garso lygio TGLS patekimą į ausis. Bet iki šiol išlieka klausimas, ar šie skirtumai yra pastebimi.

Duplekso teorija teigia, kad TLS naudojamas žemo dažnio garso šaltinio lokalizacijai, o TGLS – aukšto dažnio. Kadangi natūralus garsas sudarytas ne tik iš žemo dažnio komponentų, bet ir aukšto dažnio, tai klausos sistema turės panaudoti abi metodikas, norint tiksliai nustatyti garso šaltinio vietą. Šios dupleksinės sistemos rezultatas – ji gali generuoti „garso lokalizacijos užuominų mainų“ arba „laiko intensyvumo mainų“ dirgiklius ausinėse. Pastarosiose TLS, nukreiptas į kairiąją ausinių pusę kompensuoja TGLS, kuris nukreiptas į dešiniąją ausinių dalį, todėl garsas suvokiamas lyg sklistų iš vidurio. Duplekso teorija negali iki galo paaiškinti kryptingo girdėjimo, o taip pat išlieka priekinio-galinio garso šaltinio padėties girdimumo problema. Taip pat ši teorija apima tik horizontaliąją garso šaltinio lokalizaciją aplink galvą. Dar vienas teorijos netikslumas – lokalizacijos paaiškinime neatsižvelgiama į ausies kriauklės formą.

1938 m. Vudvortas atliko eksperimentą, kuriame iš pilnavidurio rutulio buvo sumodeliuota žmogaus galva. Su šiuo modeliu buvo matuojami TLS kaip kampo su vertikalia plokštuma funkcija skirtingiems dažniams. Šiame galvos modelyje tarpas tarp dviejų ausų buvo 22–23 cm. Pirminiai šio eksperimento rezultatai parodė, kad didžiausias laiko tarpas, per kurį garsas

patenka iš vienos ausies į kitą, buvo apie 660 μ s, kai garso šaltinis buvo padėtas lygiai 90° kampu vertikalaus plokštumos atžvilgiu. Šis laiko tarpas susidaro, kai garso bangos dažnis siekia 1500 Hz. Rezultatai parodė, jog sklindant garsui, kurio dažnis mažesnis nei 1500 Hz bangos ilgis yra didesnis negu 660ms laiko tarpo. Taigi rezultatai parodo, jog tarp garso bangų, patenkančių į ausis, atsiranda fazių skirtumas ir tai sukuria akustinės lokalizacijos užuominas. Garso dažniui artėjant prie 1500 Hz, garso bangos ilgis yra panašus į natūralų garso vėlavimą. Dėl galvos dydžio ir tarpo tarp ausų yra sumažėjęs fazių skirtumas, taigi iš karto atsiranda lokalizacijos paklaida. Garso dažniui esant didesniai nei 1500 Hz, garso bangos ilgis tampa mažesnis nei atstumas tarp ausų, tuomet atsiranda „galvos šešėlis“ ir GLS suteikia garso lokalizacijos užuominų.

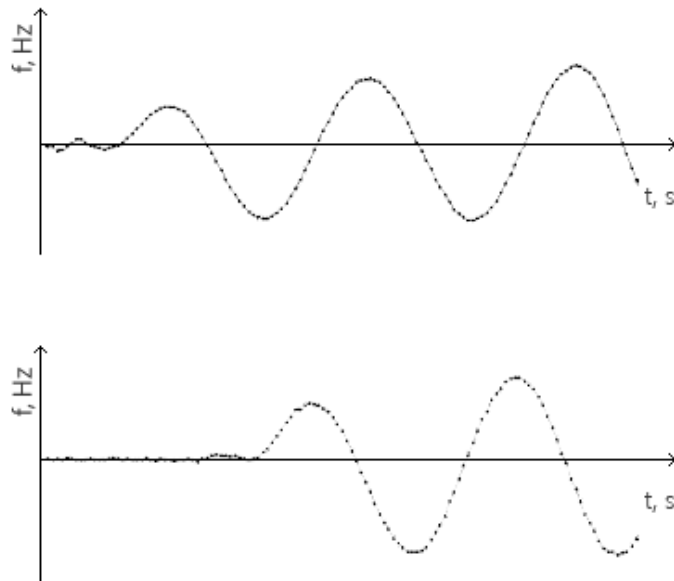
Feddersenas atliko eksperimentus (1957 m.), kuriais jis matavo, kaip kinta TLS, keičiant garsiakalbio kampą aplink galvą su vertikaliąja plokštuma, esant skirtingiems dažniams. Bet jo eksperimentai skyrėsi nuo Vudvorto tuo, kad Feddersenas atliko tyrimus su realiais žmonėmis, o ne su galvos modeliais. Šio eksperimento rezultatai sutapo su Vudvorto gautais rezultatais. Tyrimo rezultatai taip pat parodė, kad nėra jokio TLS skirtumo tarp dviejų garso šaltinio pozicijų – kai garso šaltinis yra priešais galvą (0°) ir už galvos (180°). Tokių rezultatų paaiškinimas – garso šaltinio atstumas iki ausų yra vienodas abiem atvejais. Laiko skirtumas keičiasi tik garso šaltiniui keliaujant aplink galvą. Šiuo eksperimentu įrodyta, kad didžiausias laiko skirtumas yra 660 μ s ir jis gaunamas, garso šaltinį padėjus šalia ausies kriauklės.



3.2 pav. Tarpausinis laiko skirtumas)

Iš 3.2 pav. matoma, jog kelias nuo garso šaltinio iki kiekvienos ausies yra skirtingas. Garso kelias iki kairės ausies yra didesnis, nei kelias iki dešinės ausies. Šis garso kelių skirtumas, perkeltas į lauko ašį, nusako tarpausinį laiko skirtumą TLS. TLS yra dominuojanti garso šaltinio lokalizacijos užuomina dažniams iki 1.5 kHz (imtina). Visiems kitiems dažniams, didesniems nei 1,5 kHz dominuojanti užuomina yra tarpausinis garso lygio skirtumas TGLS. Tarpausinis garsio lygio skirtumas atsiranda dėl taip vadinamojo „galvos šešėlio“. Jis atsiranda tik prie aukštesnių dažnių, kuomet garso bangos nebesukelia difrakcijos aplink galvą, taip sukurdamas galvos šešėlį, kuris panašus į šešėlį, susidarantį krentant šviesos bangoms link galvos.

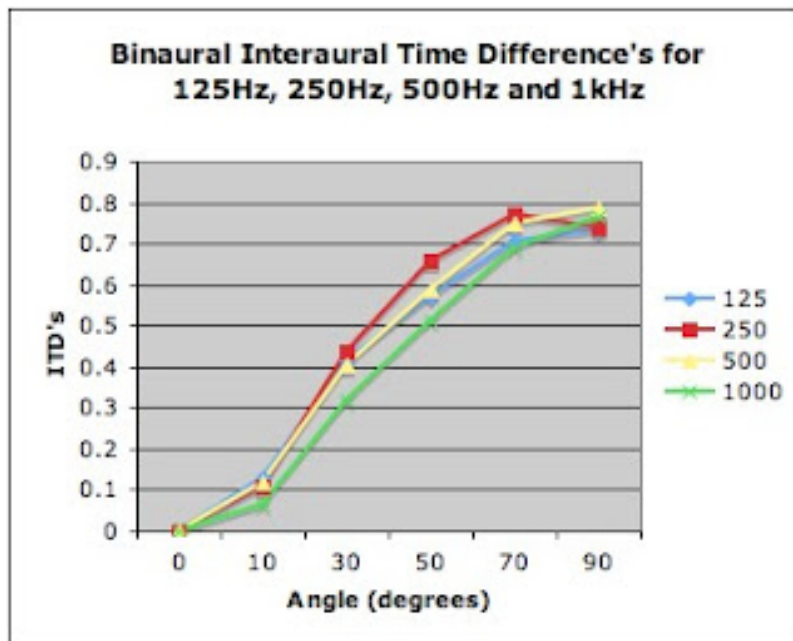
Norint įrodyti Lordo Reilėjaus teoriją, buvo atliktas eksperimentas, kuriame garso šaltinį ir manekeno galvą skyrė 1,75 m. Eksperimentas atliktas beaidėje aplinkoje. Jį atliko Levisas Skotas Diamondas (Lewis Scott Diamond). Naudojant skirtingo dažnio – 125 kHz, 250 kHz, 500 kHz ir 1000 kHz programa *Csound* sugeneruotus garsus, kai garso signalo šaltinis buvo padėtas skirtingais kampais – 0° , 10° , 30° , 50° , 70° , 90° , pavyko įrodyti šią teoriją. 3.6 pav. pavaizduota 100 kHz dažnio grynojo tono oscilograma.



3.3 pav. 100 kHz grynojo tono gauto manekeno galvoje oscilograma (viršuje – kairioji ausis, apačioje – dešinioji)

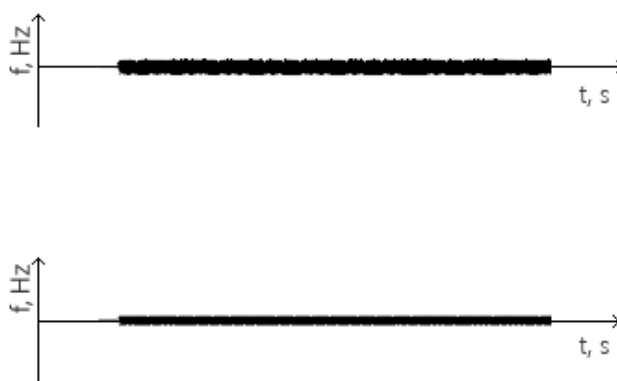
3.3 pav. matomi grafikai atvaizduoja manekeno galvoje esančių mikrofonų parodymus, esant garso šaltinio skleidžiamam garsui, kurio dažnis siekė 1000 kHz ir atstumas iki jo – apie 1,75 m. Viršutinėje paveikslėlio dalyje – kairiosios ausies mikrofono oscilograma, apatinėje dalyje – dešinėsios. Iš paveikslėlio matome, jog tarp abiejų mikrofonų oscilogramose susidaro fazių skirtumas, taip pat apatinėje paveikslėlio dalyje matomas atsiradęs laiko vėlavimas lyginant su kairiosios ausies mikrofono grafiku. Signalų tarpausinis laiko skirtumas siekė 0,735 ms, ir tai yra didžiausias pasiekiamas laiko skirtumas, nes manekeno galvos priekinė dalis buvo statmena garso signalo šaltiniui. 3.4 pav. pavaizduoti tarpausinio laiko skirtumo priklausomybių nuo skirtingo dažnio garso bangų grafikai.

0,735 ms laiko skirtumas gali būti per didelis tarpausiniam laiko skirtumui, nes „maksimalus tarpausinis laiko skirtumas gali siekti tik 0,66 ms standartiniam žmogaus galvos dydžiui“. Taip teigiama 5-tame „*Computational Auditory Scene Analysis*“ knygos skyriuje pavadinimu „Binauralinio garso lokalizacija“. Knygos autoriai – DeLiang Wang ir Guy J. Brown. Kiti šaltiniai teigia, jog 90° kampo garso šaltinio padėtis prieš manekeno galvą gali sukurti 0,7 ms tarpausinį laiko skirtumą. Pastarasis straipsnis – „Binauralinė klausia“ autoriaus dr. Ruth Y. Litovsky parašytas 2008 m. Šis straipsnis parodo, jog skirtumai tarp vidutinių žmogaus galvų



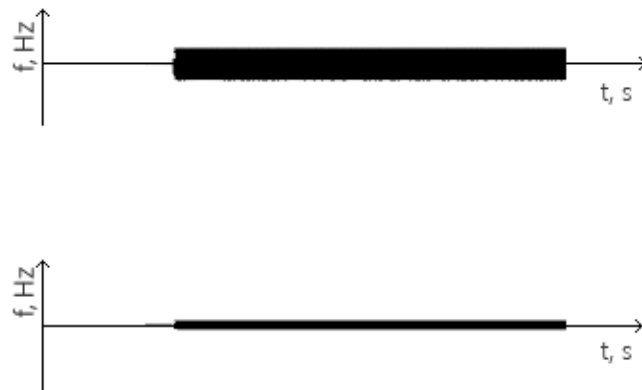
3.4 pav. Tarpausinio laiko skirtumo priklausomybė nuo garso kritimo kampo

dydžių sudaro maksimalaus tarpausinio laiko skirtumo vertės netikrumus. Jei ši vertė tampa per didelė, tai reiškia, kad mikrofonus reikia įdėti giliau į manekeno galvą, taip sumažinamas atstumas tarp abiejų mikrofonų. 3.3 ir 3.6 pav. pavaizduotos oscilogramos, kuriose atsispindi kairiojo ir dešiniojo kanalų garso lygių skirtumai.



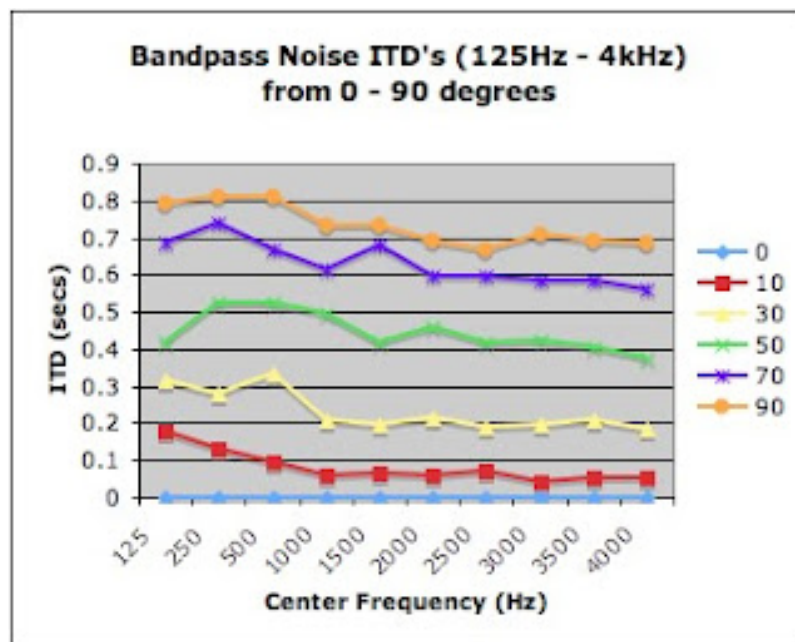
3.5 pav. Tarpausinis garso lygio skirtumas esant 125 kHz dažniui, kai garso šaltinio kampas manekeno galvos atžvilgiu siekia 90°

Iš 3.5 ir 3.6 pav. matome, jog lyginant du skirtingo dažnio garsus (125 kHz ir 1000 kHz), kai garso bangos kritimo kampas siekia 90° , susidaro tarpausinio garso lygių skirtumas. Kaip ir buvo minėta, esant aukštesniems nei 1,5 kHz dažniams, tarpausinis laiko skirtumas tampa labai mažas ir tuomet dominuoja tarpausinis garso lygių skirtumas. Fizikinis šio fenomeno paaiškinimas būtų toks, kad esant aukštesniems dažniams, garso bangos sutankėja ir jų galimybė



3.6 pav. Tarpausinis garso lygio skirtumas esant 1 MHz dažniui, kai garso šaltinio kampas manekeno galvos atžvilgiu siekia 90°

persilenkti aplink galvą stipriai sumažėja. Esant skirtingiems objektų dydžiams ir skirtingiems garso bangų dažniams, išlieka difrakcinė priklausomybė, bet šiuo atveju tai negalioja, nes naudojama standartinė vidutinio žmogaus galvos dydžio manekeno galva. Išlieka minimalūs skirtumai, nes kiekvieno žmogaus galva turi savo unikalią formą ir dydį. Šis aspektas sukuria skirtingą šešėlinį dažnį, bet šis skirtumas yra nykstamai mažas.



3.7 pav. Tarpausinio laiko skirtumo priklausomybė nuo dažnio esant skirtingiems garso bangos kritimo kampams (0°–90°)

3.7. Kambario impulsinis atsakas

Kambario impulsinis atsakas KIA – tai yra laiko domeno signalas, parodantis dažnių pasiskirstymą ir amplitudės mažėjimą. Naudojant KIA daroma prielaida, jog kambario erdvės



matematinis modelis yra stabili ir linijinė, laikui bėgant nekintanti sistema.

KIA inkapsuliuoja šiuos parametrus: [6]

1. Garso signalo vėlinimą (angl. *propagation delay*) – atstumas laike, kurį garsas nukeliauja nuo garso šaltinio iki klausytojo.
2. Tiesioginį garsą (angl. *direct sound*) – tiesioginis garsas atitinka maksimumą, kuris nusako trumpiausią atstumą nuo garso šaltinio iki klausytojo.
3. Ankstyvuosius atspindžius (angl. *early reflections*) – pirmos eilės (dažniausiai atspindį nuo grindų arba lubų), antrosios ir kitų eilių atspindžius.
4. Aido liekamąją dalį (angl. *reverberation tail*) – tai stochastinė aido dalis, kurioje yra didelis atspindžių kiekis, kuris nebegali būti suskirstytas į ankstyvuosius atspindžius.
5. Pradinio vėlinimo atotrūkis – tai laikas tarp į klausytojo klausos sistemą atvykusio tiesioginio garso ir pirmojo ankstyvojo atspindžio (dažniausiai atsispindėjusio ne nuo grindų). Norint išvengti papildomų skaičiavimų paprastas signalo vėlinimas yra panaudojamas PVA imituoti.

Šiame darbe yra panaudotas supaprastintas KIA modelis, darant prielaidą jog garso bangą sudaro baigtinis skaičius spindulių, sklindančių tiesia linija visomis kryptimis. Ši prielaida yra klaidinga, tačiau tokiu būdu yra gerokai sumažinamas skaičiavimų kiekis, kas savo ruožtu leidžia taikyti KIA modelį realiuoju laiku veikiančiame įrenginyje neturinčiame ypač didelių skaičiavimo galimybių. Priešingu atveju nepriėmus anksčiau minėtos prielaidos KIA generavimas tampa labai sudėtingas ir negali būti taikomas realaus laiko binauralinio garso generavimui.

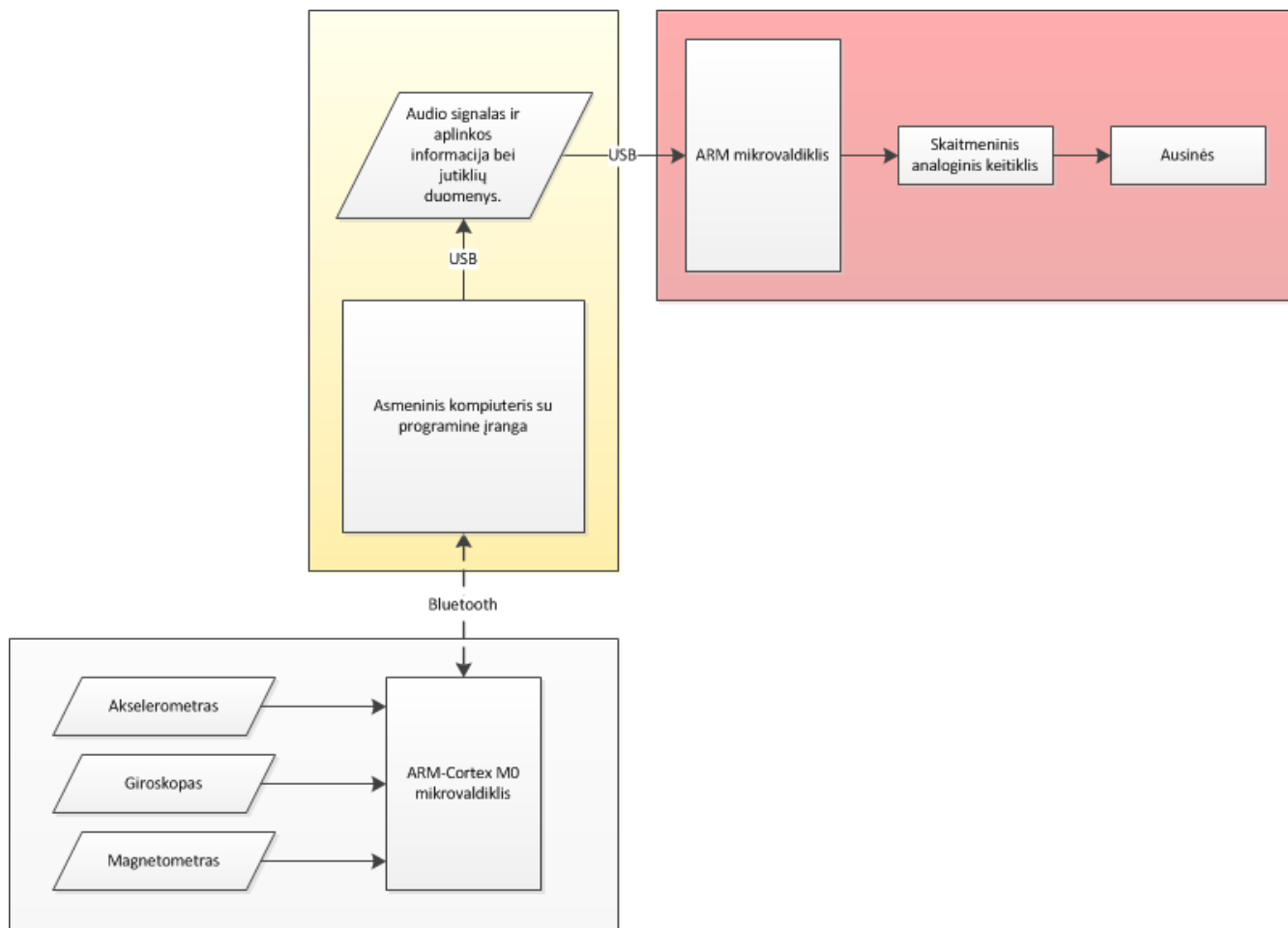
3.8. Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje buvo paminėti pagrindiniai metodai, susiję su binauraliniu garsu. Minimaliam binauraliniam efektui gauti pakanka tik HRTF filtrų, bet kaip patvirtina atlikti bandymai – šis efektas nėra labai įtikinantis ir natūralus. Tačiau jei prieš panaudojant HRTF funkcijas garso signale yra užkoduojama kambario akustinė informacija, binauralinio garso efektas tampa panašesnis į realiam pasaulyje susidarančius garsus. Darbo metu sukurta garso apdorojimo sistema išnaudoja šiame skyriuje aprašytus metodus sukuriant pakankamai įtikinantį binauralinį efektą.

4. Sistemos kūrimas

Šiame skyriuje bus aptartas sistemos kūrimas, bendra struktūros apžvalga bei aprašyti naudojami algoritmai. Pagrindinis dėmesys bus skirtas galvos orientacijos įrenginio jutiklių duomenų suliejimo algoritmų bei garso binauralinio garso generavimo metodų aprašymui.

4.1. Sistemos struktūrinė schema

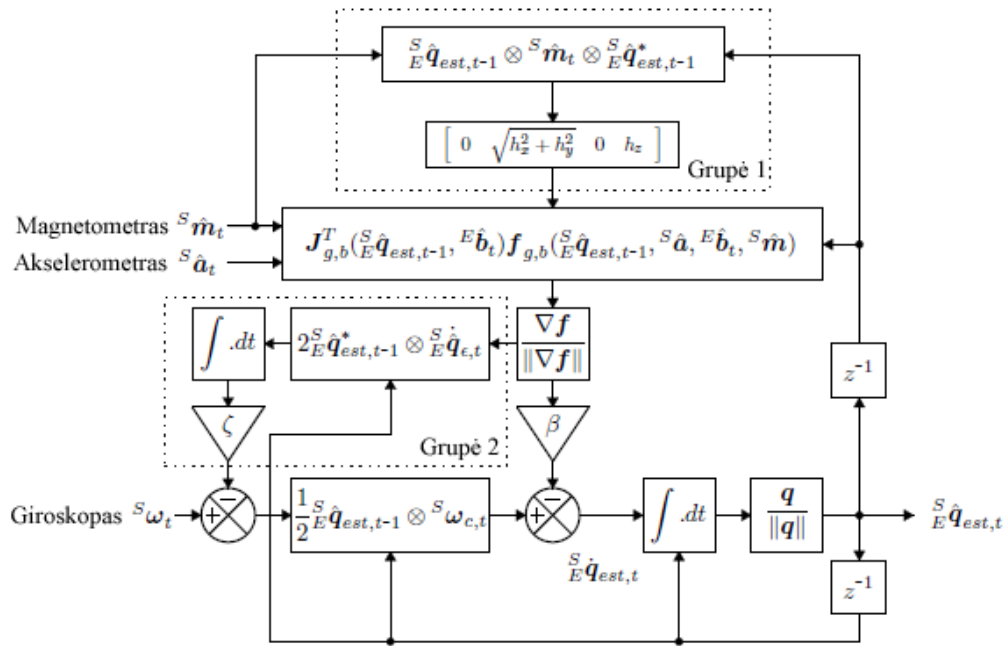


4.1 pav. Sistemos struktūrinė schema

4.1 pav. pavaizduota sistemos struktūrinė schema, kurią sudaro trys dalys:

- galvos sekimo įrenginys,
- garso apdorojimo įrenginys,
- asmeninis kompiuteris su specializuota programine įranga.

Galvos sekimo įrenginys skirtas sekti vartotojo galvos orientacijai erdvėje, tam, kad sistemai suteikti generuojamo garso priklausomybę nuo galvos orientacijos. Ši priklausomybė yra



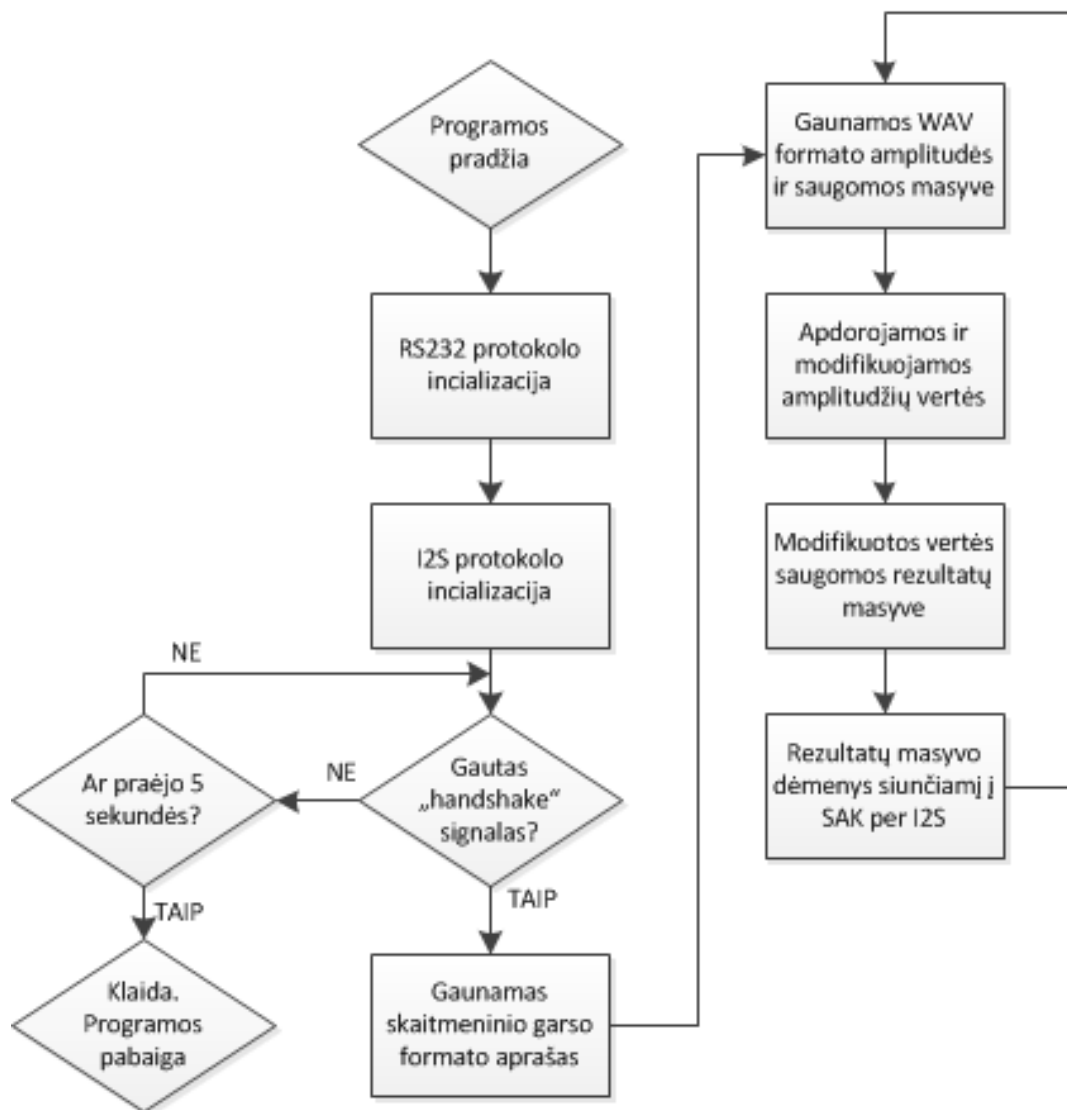
4.3 pav. Madgwick filtro schema

Bendra filtro schema pavaizduota 4.3 pav. Kur ${}^S\hat{m}_t$ magnetometro duomenys, ${}^S\hat{a}_t$ – akcelerometro, ${}^S\hat{\omega}_t$ – giroskopo parodymai. 4.3 pav. parodo pilnąjį *Madgwick* filtrą MARG sistemai. 1 grupė skirta pašalinti magnetometro magnetinius triukšmus (angl. *Magnetic distortion*), 2 grupė skirta pasinaudojant akcelerometro ir magnetometro duomenimis sumažinti giroskopo dreifą. Tokiu būdu filtras įgauna magnetometro triukšmo ir giroskopo dreifo kompensavimo savybes. Filtro rezultatas – ${}^S\hat{q}_{est,t}$ tai yra pilna objekto orientacija žemės atžvilgiu išreikšta kvaternionu. [12]

4.3. Garso apdorojimo mechanizmas

Garso apdorojimo įrenginio programinę įrangą sudaro dvi dalys – programinė įranga asmeniniame kompiuteryje bei programinė įranga, esanti pačiame garso apdorojimo įrenginyje. Norint įgyvendinti aparatinio lygmens garso išvestį, visų pirma, reikia skaitmeninio garso duomenų bei aparatinės įrangos, skirtos skaitmeninį garsą paversti į analoginį (SAK – skaitmeninis analoginis keitiklis). Skaitmeninio garso informacija bei duomenys siunčiami naudojant RS232 protokolą. Šių duomenų šaltinis – asmeninis kompiuteris su savo programine įranga. Skaitmeninio garso duomenų siuntimui į SAK naudojamas I2S protokolas. Dažniausiai protokolas naudojamas sujungus tam tikro formato dekoderius ir skaitmeninius-analoginius keitiklius tarpusavyje. Protokolo fizinis lygmuo susideda iš trijų linijų – valdančioji bitų perdavimo dažnio, kanalo pasirinkimo bei duomenų perdavimo. Duomenys šiuo protokolu siunčiami sinchroniniu būdu. T. y. duomenys nuskaitomi tik esant aukštam valdančiosios bitų perdavimo linijos įtampos lygiui. Kanalo parinkimas (kairiojo ar dešiniojo) vyksta keičiant kanalo parinkimo linijos

įtampos lygį. Šis keitimas privalo būti atliktas prieš perduodant paskutinį esamojo kanalo duomenų bitą. 4.4 pav. pavaizduota sukurta garso apdorojimo įrenginio programos algoritmo blokinė diagrama.



4.4 pav. Garso apdorojimo įrenginio programos algoritmo blokinė diagrama

Kaip matoma iš 4.4 pav., programos algoritmas prasideda nuo RS232 bei I2S protokolų inicializacijos. STM32F407-VGT, kaip ir 8 bitų AVR mikrovaldiklis, turi aparatinio lygmens RS232 protokolą. Pastarajame naudojamas 8N1 standartas – 8 duomenų perdavimo bitai, 1 pradžios bitas, 1 sustojimo bitas ir jokie lyginumo bitai. Skaitmeninio garso duomenų perdavimui naudojamas I2S protokolą. Pasirinktas 32 bitų mikrovaldiklis turi aparatinio lygmens I2S protokolą. Taigi, norint įgalinti protokolą, reikia įrašyti tam tikras vertes į atitinkamus registrus programiškai. Toliau programos algoritme seka „handshake“ signalas. Tai tam tikras sutartinis „pasisveikinimo“ signalas siunčiamas RS232 protokolu asmeniniam kompiuteriui. Jeigu gaunamas teigiamas atsakymas, tuomet algoritmas tęsiamas. Jei negaunamas joks at-



sakymas, tikrinama ar praėjo 5 sekundės nuo „pasisveikinimo“ signalo išsiuntimo. Praėjus minėtam laikui registruojama programos algoritmo klaida ir programa yra užbaigiama. Jei 5 sekundės nepraėjo, tuomet toliau laukiamas atsakymas. Kai sulaukiamas „pasisveikinimo“ patvirtinimas, programos algoritmas tęsiamas toliau. Tolimesnė programos eiga – gaunamas skaitmeninio garso duomenų aprašas. Pavyzdžiui, 16 bitų duomenys vienam kanalui, 44,1 kHz diskretizavimo dažnis. Gavus šį aprašą, sukonfigūruojamos garso išvesties funkcijos pagal gautą formatą. Toliau programa pereina prie begalinio ciklo, kuriame vyksta visos likusios operacijos galutiniam garso išvedimui į ausines. Visų pirma, per RS232 sąsają gaunamos WAV⁴ failo amplitudžių vertės. Sekančiame žingsnyje vyksta visos apdorojimo bei modifikavimo, pagal esamą žmogaus galvos orientaciją, operacijos. *Matlab* kodo fragmente 4.5 pateiktas pavyzdys, kaip sąsukos būdu yra kodifikuojamas garisas. Visos modifikuotos amplitudžių vertės paruošiamos galutiniam panaudojimui ir saugomos rezultatų masyve. Vertės iš rezultatų masyvo paeiliui siunčiamos į skaitmeninį-analoginį keitiklį I2S protokolui.

```
1) % vertikalus kampas tarp klausytojo ir garso šaltinio
2) elevation = 0;

3) % Horizontalus kampas tarp klausytojo ir garso šaltinio
4) angle = 45;

5) %pagrindinis garsas
6) filename = 'StarWars1.wav';

7) %nuskaitomas pagrindinis mono garsas
8) [Y FS BTS] = wavread(filename);

9) if mod(length(Y), step_cnt) > 0
10) ts = Y;
11) Y = zeros(floor(length(Y)/step_cnt+1)*(step_cnt), 1);
12) for i = 1:length(ts)
13)     Y(i) = ts(i);
14) end
15) end

16) % Apskaiciuojamas KIA
17) [h]=rir(44100, [1 1 1], 15, 0.2, [10 10 2], [5 5 0.1]);
```

4.5 pav. Sąsukos taikymas garso apdorojimo įrenginyje. *Matlab* kodo fragmentas

⁴WAV (angl. *Waveform Audio File Format*) – neglaudintas audio bylos formatas.



```
18) % nurodomas kelias ir formatas iki HRTF deriniu
19) pt = sprintf('elev%d/%s', elevation, angle);

20) % Abu masyvai uzpildomi nuliais
21) chR = zeros(length(Y), 1);
22) chL = zeros(length(Y), 1);

23) % Nuskaitomi HRTF deriniai
24) ptL = sprintf('%sL.wav', pt);
25) [hYL hFSL yBTS�] = wavread(ptL);
26) ptR = sprintf('%sR.wav', pt);
27) [hYR hFSR yBTSR] = wavread(ptR);

28) % KIA filtras
29) dataL = conv(hYL, h(:, 1));
30) dataR = conv(hYR, h(:, 2));

31) % HRTF filtras
32) dataL = conv(hYL, Y);
33) dataR = conv(hYR, Y);

34) % Dvieju kanalu suliejimas
35) S = zeros(length(chL), 2);
36) S(:, 1) = dataL;
37) S(:, 2) = dataR;
38) wavplay(S, FS, 'async');
```

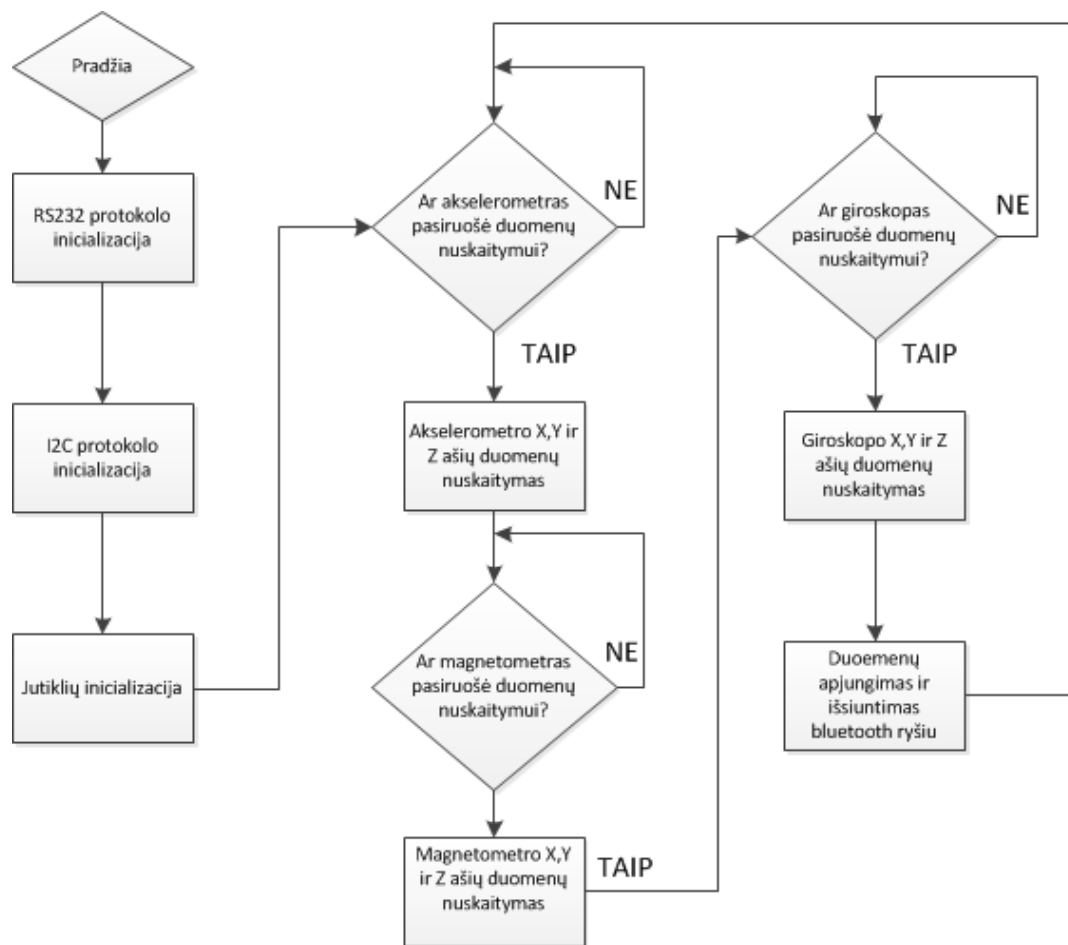
4.6 pav. Sąsukos taikymas garso apdorojimo įrenginyje. *Matlab* kodo fragmentas

4.4. Galvos sekimo įrenginys

Šiame poskyryje aptariamas galvos sekimo įrenginio programos algoritmas. 4.7 pav. pa-
vaizduota algoritmo blokinė schema.

Kaip matome iš 4.7 pav., programos kodo pradžioje vyksta kintamųjų sukūrimas bei naudo-
jamų įėjimų išėjimų nustatymas. Kadangi naudojamų jutiklių duomenų perdavimo standartinis
protokolas yra I2C⁵, todėl reikia įgyvendinti I2C protokolo nustatymo mikrovaldiklyje operaci-
jas. Pasirinktas mikrovaldiklis *Atmel Atmega8* savyje turi aparatinio lygio I2C valdymo bloką.
Pagal specifikacinį AVR mikrovaldiklio aprašą, norint įgalinti I2C protokolą, reikia nustatyti
duomenų perdavimo dažnį. Pasirinktas dažnis – 400 kHz. Tolimesnis programos kodas – tai
jutiklių pradinių parametrų nustatymas. Norint panaudoti *bluetooth* duomenų perdavimo ryšį,
naudojamas UART protokolas. *Atmega8* mikrovaldiklis taip pat turi aparatinio lygio UART
protokolo bloką. Taigi tinkamam pastarojo veikimui, reikia jį įgalinti programiškai kaip ir I2C
protokolą. Pasirinkta duomenų perdavimo sparta – 57 600 bitų per sekundę.

⁵I2C - (angl. *Inter-Integrated Circuit*) – tai Philips korporacijos sukurtas komunikavimo protokolas naudo-
jamas žemo greičio įrenginiams sujungti su įterptinėmis sistemomis arba kompiuterių pagrindinėmis plokštėmis.



4.7 pav. Galvos sekimo įrenginio programos algoritmo blokinė diagrama

Giroskopo L3G4200D pradiniai nustatymai:

- Energijos taupymo režimo išjungimas. T. y. jutiklio įjungimas.
- Nustatomi standartiniai registrų nustatymai.

Magnetometro LSM303DLH pradiniai nustatymai:

- Parenkamas duomenų atnaujinimo dažnis – 75 Hz.
- Parenkamas $\pm 2,5$ Gausų jėgimo diapazonas.
- Parenkamas nenutrūkstantis duomenų atnaujinimas.

Akcelerometro LSM303DLH pradiniai nustatymai:

- Parenkamas 1000 Hz duomenų atnaujinimo dažnis
- Išjungiamas energijos taupymo veikimo režimas.

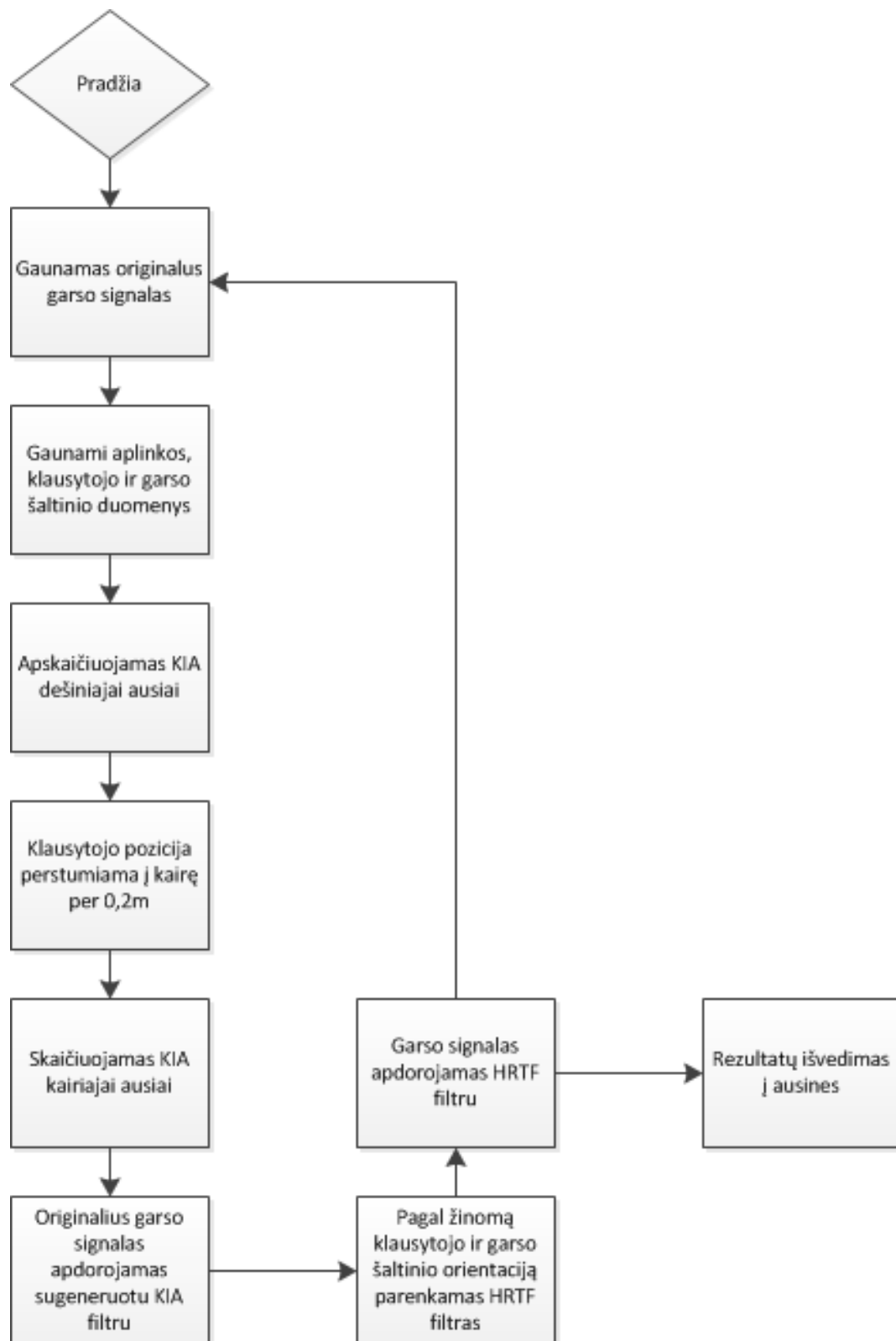


- Išjungiamas vidinis duomenų filtras.
- Nustatomas duomenų eiliškumas 8 bitų registruose.

Atlikus jutiklių parametrų nustatymus, programos algoritmas pereina prie begalinio ciklo jutiklių duomenų nuskaitymui ir persiuntimui per *bluetooth* ryšį. Duomenys nuskaitymi iš kiekvieno jutiklio šia eilės tvarka: akcelerometro, magnetometro bei giroskopo duomenų nuskaitymas. Prieš kiekvieno jutiklio duomenų nuskaitymą yra laukiamas patvirtinimas, jog jutiklis yra pasirengęs perduoti duomenis. Todėl tikslaus duomenų atnaujinimo dažnio nustatyti neįmanoma, nes kiekvieną ciklo iteraciją jutiklių pasirengimas perduoti duomenis gali skirtis. Per kiekvieną begalinio ciklo iteraciją nuskaitytos visos 3 jutiklių ašys – X, Y, Z. Kadangi pastarieji yra padidinto tikslumo (12 bitų), tai nuskaityti duomenis 8 bitų mikrovaldiklio I2C protokolu, šiuos duomenis reikia apdoroti. Taip yra todėl, kad tiek jutiklių, tiek mikrovaldiklio registrai yra 8 bitų, bei I2C protokolas perduoda tik 8 bitus duomenų vienos užklauskos metu. Duomenų sujungimas šiuo atveju, tai tiesiog 8 aukščiausiųjų bitų perstūmimas į kairę lyginant su žemiausiais 8 bitais. Taip gaunamas 12 bitų tikslumas. Visi jutiklių duomenys po vienos ciklo iteracijos apjungiami į vieną *string* formato eilutę ir išsiunčiami *bluetooth* ryšiu, naudojant UART protokolą.

4.5. Binauralinio garso efekto mechanizmo algoritmas

Sukurtą mechanizmą binauraliniam garsui generuoti iliustruoja 4.8 pav. Kaip matoma iš pateiktos schemos, pirmasis žingsnis turint originalaus garso duomenis yra apskaičiuoti KIA abiem ausims. Pagal gautą KIA rezultatą sąsukos veiksmu modifikuojamas originalus garsas. Įvykdžius šį žingsnį vieno kanalo garsas tampa dvikanaliu. Toliau yra apskaičiuojamas kampas tarp klausytojo ir garso šaltinio ir parenkamas atitinkamas HRTF filtras. KIA garso modifikavimo žingsnyje gautas tarpinis garso signalas sujungiamas su parinktu HRTF filtru. Po šio žingsnio gaunamas binauralinis garso signalas.



4.8 pav. Galvos sekimo įrenginio programos algoritmo blokinė diagrama

4.6. KIA generavimas

Žemiau yra pateikta *Matlab* funkcija generuoti kambario impulsiniam atsakui pasinaudojus skyriuje 3. aprašyta teorine dalimi bei 3.7. poskyryje išsakytomis prielaidomis. Pasinaudojant Stepheno G. McGoverno straipsnyje „A Model for Room Acoustics“ aprašytais formulėmis galima sukurti paprastą kambario impulsinio atsako filtrą. 4.3 formulė padeda rasti virtualaus šaltinio (garso atspindžio) poziciją x ašyje. [14, 15, 16]

$$x_i = (-1)^i x_S + \left[i + \frac{1 - (-1)^i}{2} \right] x_r, \quad (4.3)$$

čia x_S – tikrojo garso šaltinio x koordinatė, x_r – kambario ilgis, i – virtualaus garso šaltinio (atspindžio) eilės numeris. Atėmus iš virtualaus šaltinio x koordinatės klausytojo taško x koordinatę, galima rasti atstumą x ašyje tarp klausytojo ir virtualaus šaltinio. Tai aprašo formulė 4.4, toliau sekančios formulės 4.5 ir 4.6 aprašo atstumą tarp klausytojo ir garso šaltinio y ir z ašyse atitinkamai:

$$x_i = (-1)^i x_S + \left[i + \frac{1 - (-1)^i}{2} \right] x_r - x_m, \quad (4.4)$$

$$x_i = (-1)^i x_S + \left[i + \frac{1 - (-1)^i}{2} \right] y_r - y_m, \quad (4.5)$$

$$x_i = (-1)^i x_S + \left[i + \frac{1 - (-1)^i}{2} \right] z_r - z_m. \quad (4.6)$$

Rasti pilną atstumą kiekvienam virtualiam garso šaltiniui galima pasinaudojus Pitagoro teorema 4.7.

$$d_{ijk} = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}. \quad (4.7)$$

Toliau norint rasti kambario impulsinį atsaką reikia išsivesti vieneto impulsinio atsako funkciją (angl. *unit impulse response function*). Padalinus 4.7 formulę iš garso greičio ore gaunamas virtualaus garso šaltinio impulsinis atsakas 4.8.

$$u_{ijk}(t) = \frac{d_{ijk}}{c}. \quad (4.8)$$

čia t – laikas, d_{ijk} – atstumas gautas iš 4.7 formulės, c – garso greitis (340.29 m/s), $\frac{d_{ijk}}{c}$ – efektinis kiekvieno atspindžio laiko skirtumas. Pasinaudojus 4.8 formule išsivedama ieškomą funkciją 4.9.

$$a_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{jeigu } u_{ijk} = 0 \\ 0 & \text{priešingu atveju} \end{cases} \quad (4.9)$$

Šiame žingsnyje gaunama aibė atspindžių, kurioje kiekvienas atspindys turi impulsą lygu 1, kai $u_{ijk} = 0$. Tikrasis garso bangos impulsas mažėja priklausomai nuo atstumo tarp šaltinio ir kliūčių pakeliui. Sekantys žingsniai ištaiso šią problemą. Garso impulsas yra atvirkščiai proporcingas atstumui tarp garso šaltinio ir klausytojo 4.10.

$$b_{ijk} \sim \frac{1}{d_{ijk}}. \quad (4.10)$$

Kitas svarbus parametras yra garso atspindžio atsispindėjimų skaičius. Jei visų sienų atspindžių koeficientai vienodi, galima paimti atspindžio koeficientą r_w keliant laipsniu n , kur n yra bendras atspindžių skaičius, gauname $n = |i| + |j| + |k|$. Taigi atsispindėjimų skaičiui apskaičiuoti taikytina formulė 4.11:

$$r_{ijk} = r_w^{|i|+|j|+|k|}. \quad (4.11)$$

Kad gauti pilnąjį signalo impulsą, reikia sudauginti 4.10 ir 4.11 formules, taip gaunama formulė:

$$e_{ijk} = b_{ijk}r_{ijk}. \quad (4.12)$$

Paskutinis žingsnis kambario impulsinio atsako skaičiavime – sumavimas pagal 4.13 formulę: [6]

$$h(t) = \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-n}^n \sum_{k=-n}^n a_{ijk}e_{ijk}. \quad (4.13)$$

Pateiktas *Matlab* paketo išeities kodo fragmentas 4.9 skirtas generuoti šiame poskyryje aprašytą kambario impulsinį atsaką.



```
1) function [h]=rir(fs, mic, n, r, rm, src)

2) %RIR    Room Impulse Response (kambario impulsinis atsakas).

3) %      [h] = RIR(FS, MIC, N, R, RM, SRC) Paprastas kambario impusinio atsako
4) %      skaiciavimas
5) %
6) %
7) %
8) %      FS = diskretizacijos daznis.
9) %      MIC = mikrofono koordinates isreikstos paprastu vektoriu x,y,z
10) %      N = atspindziu skaicius (2*N+1)^3.
11) %      R = kambario sienu atspindzio koeficientas -1<R<1.
12) %      RM = kambario dydis isreikstas paprastu vektoriu.
13) %      SRC = Garso saltinio koordinates isreikstos x,y,z vektoriumi.
14) %
15) %
16) %      DEMESIO:
17) %      1) Visi atstumai matuojami metrais.

18) nn=[-n:1:n]; % sekos indeksai
19) rms=nn+0.5-0.5*(-1).^nn; % dalis 4.4,4.5,ir 4.6 formules
20) srcs=(-1).^nn; % dalis 4.4,4.5,ir 4.6 formules

21) xi=[srcs*src(1)+rms*rm(1)-mic(1)]; % pagal 4.4 formule
22) yj=[srcs*src(2)+rms*rm(2)-mic(2)]; % pagal 4.5 formule
23) zk=[srcs*src(3)+rms*rm(3)-mic(3)]; % pagal 4.6 formule

24) [i,j,k]=meshgrid(xi,yj,zk); % vektoriu pertvarkymas i 3D matricas
25) d=sqrt(i.^2+j.^2+k.^2); % pagal 4.7 formule
26) time=round(fs*d/343)+1; % pagal 4.8 formule

27) [e,f,g]=meshgrid(nn, nn, nn); % vektoriu pertvarkymas i 3D matricas
28) c=r.^(abs(e)+abs(f)+abs(g)); % Pagal 4.11 formule
29) e=c./d; % Pagal 4.12 formule

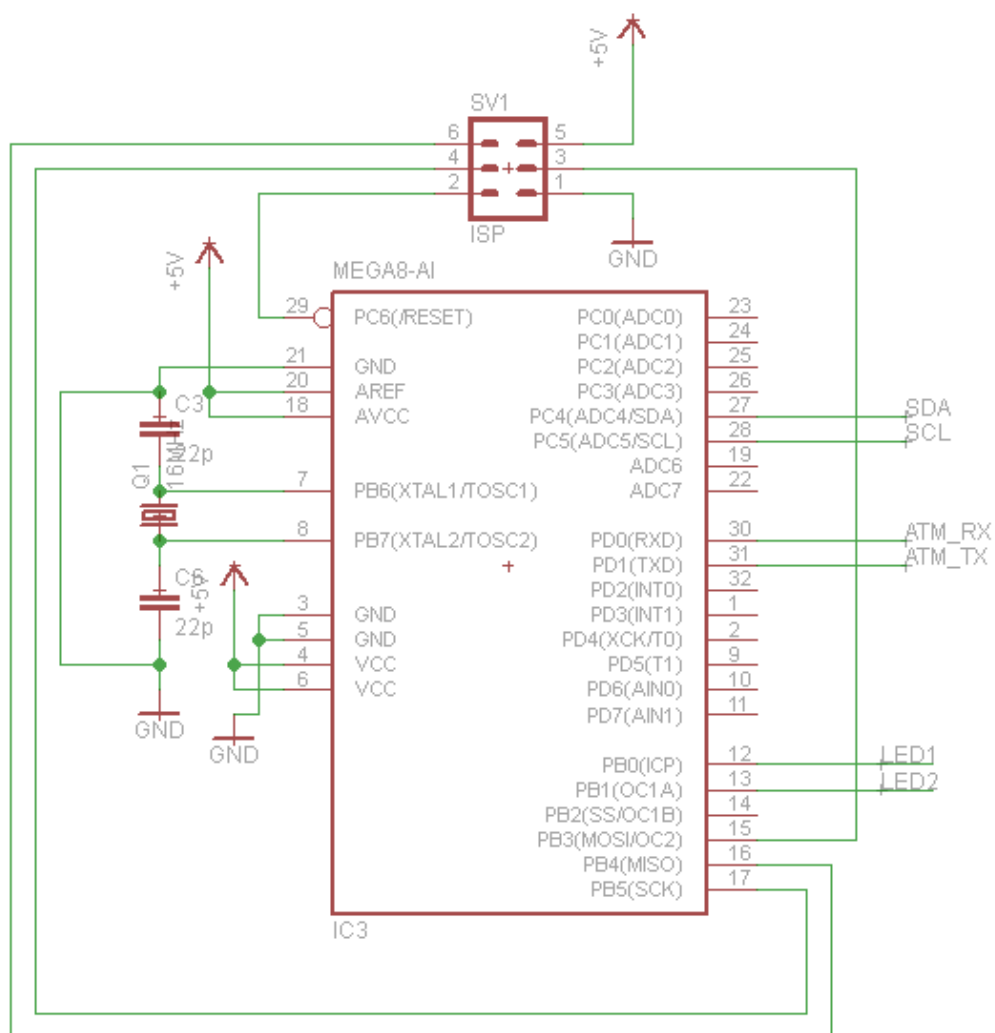
30) h=full(sparse(time(:),1,e(:))); % Pagal 4.14 formule
```

4.9 pav. KIA generavimo *Matlab* funkcija

4.7. Sistemos vartotojo sąsaja asmeniniame kompiuteryje

Kadangi sistema pritaikyta asmeniniam kompiuteriui, ji privalo turėti grafinę vartotojo sąsaja. Pagrindinė vartotojo sąsajos užduotis – surinkti galvos sekimo įrenginio duomenis ir juos kartu su garso šaltinio informacija išsiųsti į garso apdorojimo įrenginį tolimesniam apdorojimui. Šiai užduočiai įgyvendinti buvo pasirinkta C# programavimo kalba ir *Microsoft Visual Studio 2010* programavimo aplinka.

Kaip matoma iš 4.10 pav., vartotojo sąsaja yra pakankamai minimalistinė ir lengvai per-



4.11 pav. Galvos sekimo įrenginio elektrinės principinės schemos mikrovaldiklio dalis

ATM_RX ir *ATM_TX* naudojami kaip RS232 sąsaja su *bluetooth* moduliu. SDA ir SCL – I2C sąsaja su jutiklių spausdintine plokšte.

4.12 pav. matome galvos orientacijos sekimo įrenginio siųstuvinę-imtuvinę dalį, kurią sudaro *bluetooth* modulis BTM-222, Šmito trigeris bei įtampų daliklis R5-R6. Pats BTM-222 modulis veikia per RS232 sąsają, todėl juo naudotis gana paprasta. Šmito trigeris čia naudojamas dėl tos pačios priežasties, kaip ir įtampų daliklis – suderinti skirtingus loginių įtampų lygius. Kadangi mikrovaldiklis veikia naudojant 5 V maitinimą, o *bluetooth* modulis – 3,3 V, taigi norint šiems dviem įrenginiams keistis duomenimis, reikalinga suderinti skirtingus įtampų lygius. Kai duomenys siunčiami iš mikrovaldiklio (su 5 V loginiais lygiais), tai 3,3 V loginį lygį užtikrina įtampų daliklis R5-R6. Duomenims keliaujant priešinga linkme, įtampų lygių suderinamumą užtikrina Šmito trigeris.

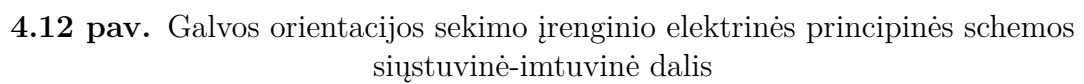
4.13 pav. matoma galvos orientacijos sekimo įrenginio maitinimo šaltinio elektrinė principinė schema. Ji susideda iš dviejų įtampos stabilizatorių: LM1117MPX-5.0 bei LM1117IMP-3.3. Abu stabilizatoriai stabilizuoja įėjimo įtampą atitinkamai – 5 V ir 3,3 V. Neprikaištingam jų veikimui reikalingi filtro kondensatoriai jungiami lygiagrečiai su neigiamu šaltinio poliumi tiek prieš, reguliatorius tiek už jų. Įtampos stabilumas ypatingai svarbus žinant, jog mikrovaldiklis dirba gana aukštu dažniu – 16 MHz. Kaip ir buvo minėta anksčiau, 5 V maitinimo įtampa naudojama mikrovaldiklio daliai, o 3,3 V – *bluetooth* moduliui.

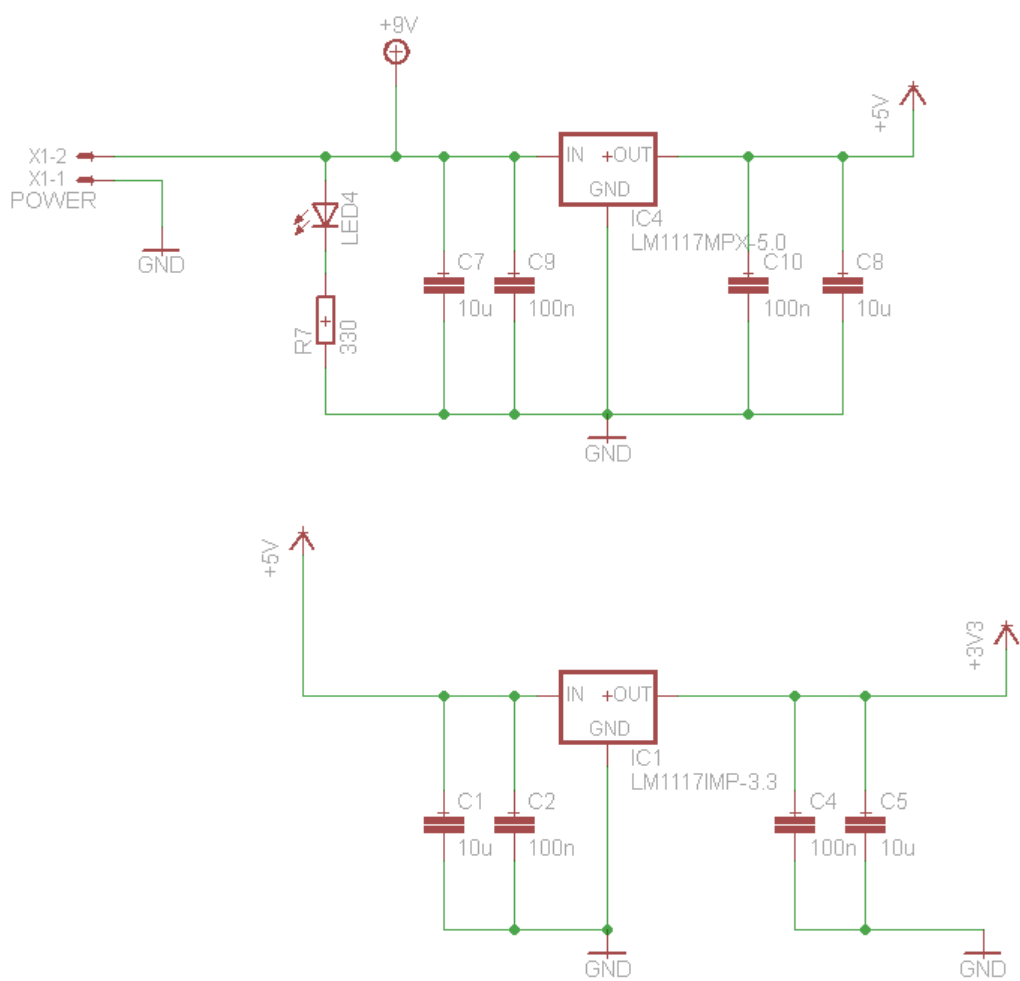
4.14 pav. pavaizduotos schemos dalyje matomos fizinės išvesties-įvesties jungtys bei Šmito triggerio mikroschemos nepanaudotų kojelių pajungimas į žemę. Pastarasis veiksmas atliekamas, nes taip pataria specifikacinis mikroschemos aprašas. POLOLU EXT jungtis atsako už mikrovaldiklio ir jutiklinės plokščių sujungimą I2C sąsaja, bei užtikrina 5 V maitinimo įtampą jutiklinei spausdintinei plokštei. RX ir TX jungtys – tai trumpikliai, kurie leidžia pasirinkti dvejopą plokštės veikimą – išorinė RS232 sąsaja, skirta klaidų tikrinimui ir *bluetooth* modulio konfigūravimui. Antras veikimo būdas – mikrovaldiklio tiesioginė sąsaja su *bluetooth* moduliu. Ir paskutinė jungtis – EXT. CONFIG yra skirta vienam iš RS-232 sąsajos veikimo būdų.

4.9. Skyriaus apibendrinimas

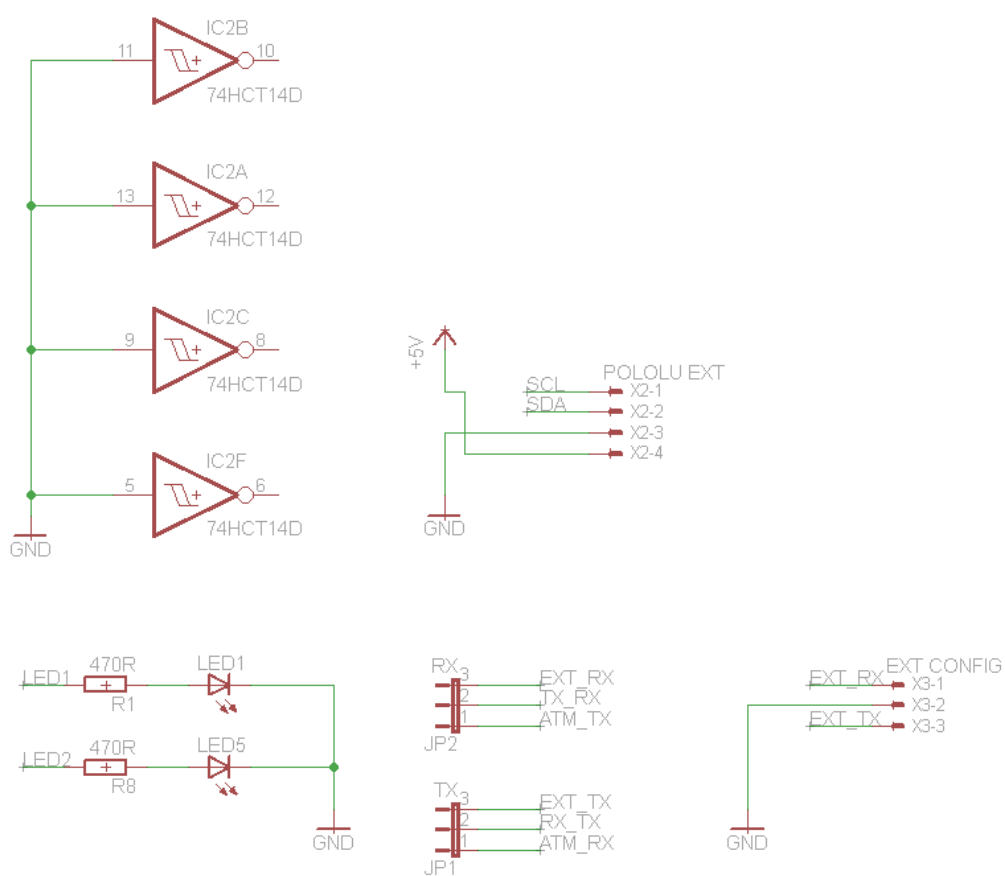
Šiame skyriuje buvo pateiktas ir aprašytas sistemos veikimas. Pateiktos struktūrinės schemos, trumpai aprašytas *Matlab* terpėje sukurtas išeities kodas koncepcijai patikrinti. Skyriuje 4.8. aprašyta sistemos schemotechnika, pademonstruotos ir paaiškintos darbo metu sukurtos plokštės. Visos plokštės su asmeniniu kompiuteriu bendrauja naudojantis RS232 protokolą. Jis buvo pasirinktas dėl savo paprasto bei greito įgyvendinimo. Sistemoje naudojami jutikliai su mikrovaldikliu sujungti per I2C šyną, veikiančia 400 MHz sparta.

Reikia paminėti, jog pateiktose schemose vis dar yra nedidelių netikslumų, kurie netrikdo bendro sistemos darbo, tačiau juos ištaisius galima pasiekti geresnius našumo rezultatus.

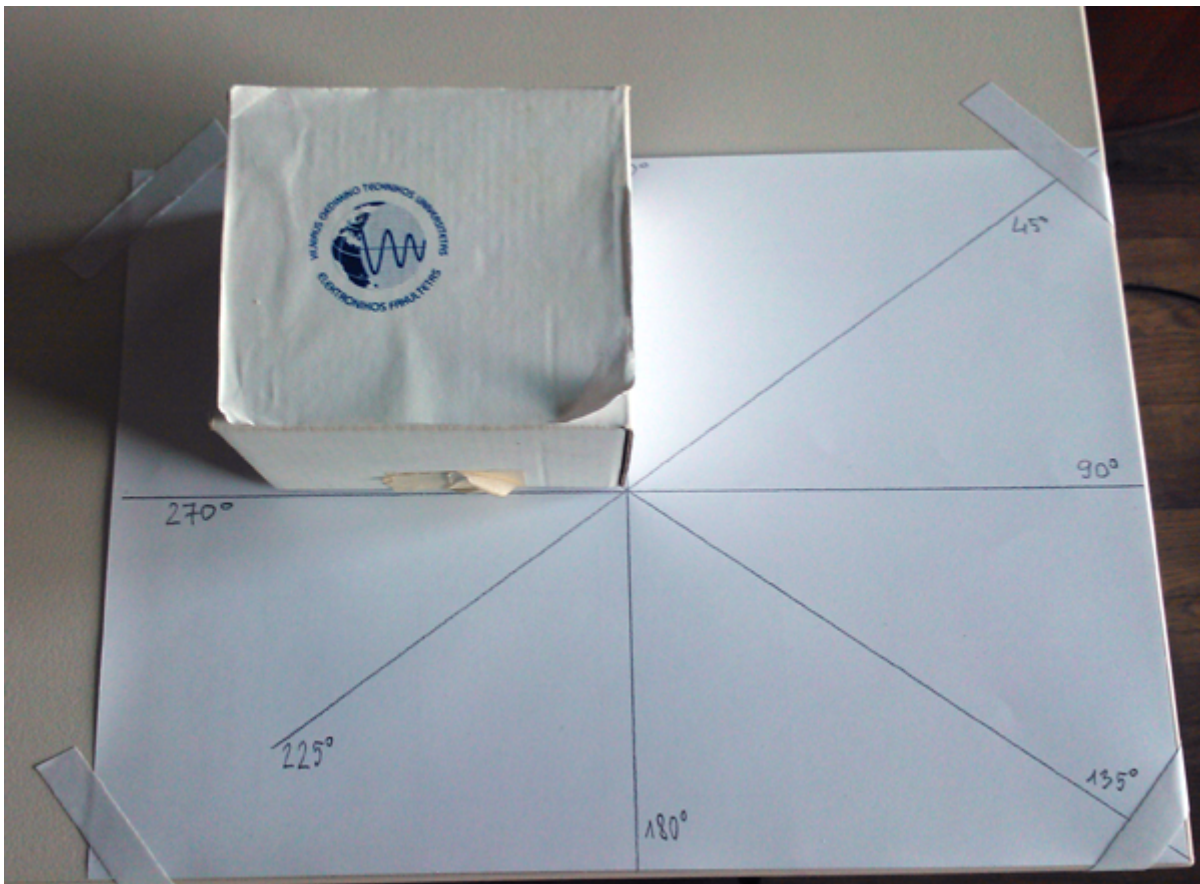




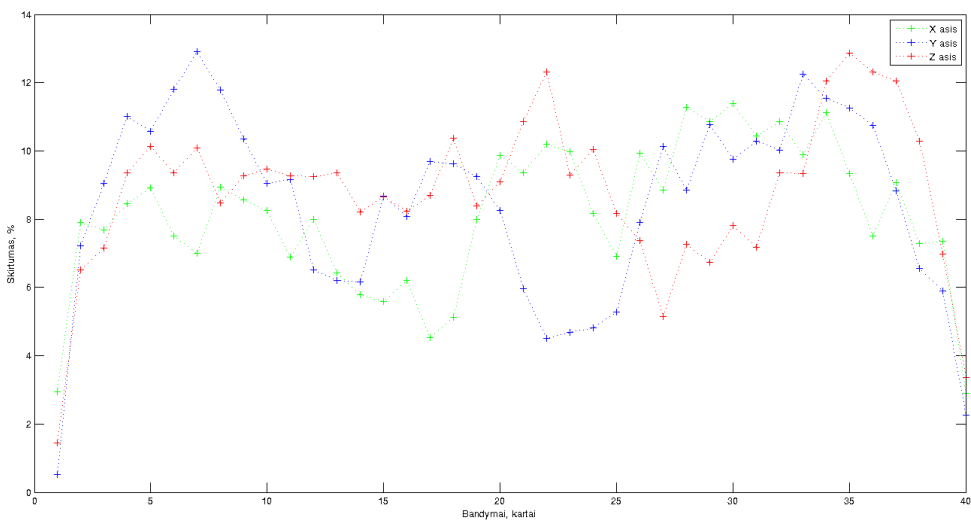
4.13 pav. Galvos orientacijos sekimo įrenginio elektrinės principinės schemos maitinimo įtampos stabilizavimo dalis



4.14 pav. Galvos orientacijos sekimo įrenginio elektrinės principinės schemos fizinių sąsajų dalis



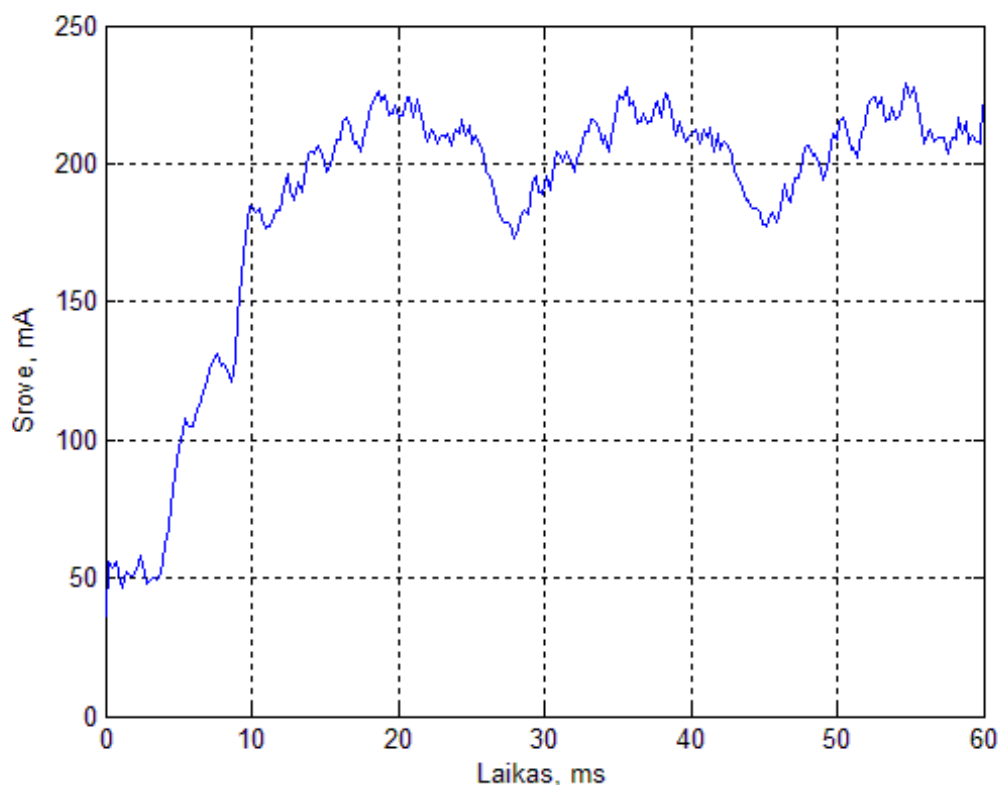
5.2 pav. Galvos orientacijos sekimo įrenginio testas



5.3 pav. Galvos orientacijos sekimo įrenginio paklaidų grafikas

5.1.2. Energijos suvartojimo patikra

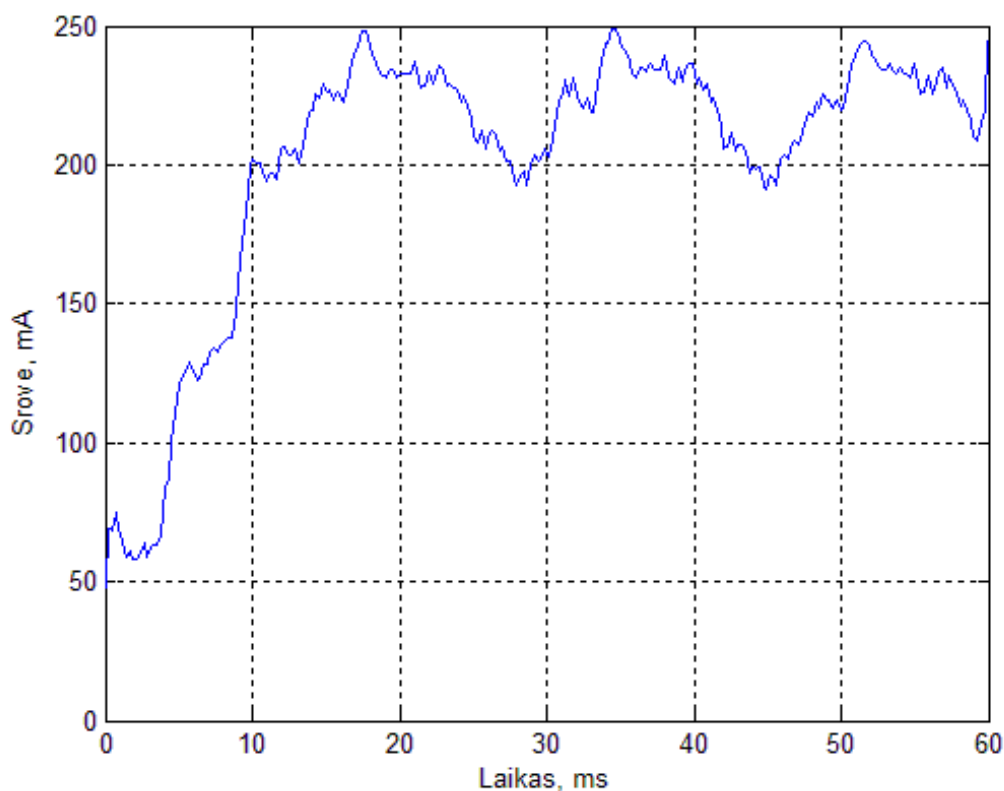
Patikra buvo atliekama naudojant skaitmeninį oscilografą. Matavimai buvo atliekami įrenginių įjungimo metu du kartus – šalto paleidimo metu bei po 5 minučių įrenginių veiklos. Toks pasirinkimas grindžiamas elektros energijos suvartojimo padidėjimu pakilus darbinei temperatūrai. 5.4 pav. matoma galvos orientacijos sekimo įrenginio elektros srovės suvartojimo priklausomybė nuo laiko šalto paleidimo metu. Kaip ir buvo minėta, matavimai atlikti naudojant skaitmeninį oscilografą. Srovės oscilogramų duomenys, pasirinkta raiška, transformuoti į skaitinių reikšmių lentelę. Šios vertės toliau buvo panaudotos *Matlab* programos terpėje braižant srovės suvartojimo laikines priklausomybes.



5.4 pav. Galvos orientacijos sekimo įrenginio vartojamos elektros srovės priklausomybė nuo laiko šalto paleidimo metu

Kaip matome iš 5.4 pav., įrenginio paleidimo metu srovė kyla nuo 50 mA iki 170 mA. Tuo metu vyksta mikrovaldiklio, *bluetooth* modulio kitos periferijos įgalinimas. Tolimesnis srovės suvartojimo svyravimas atsiranda dėl jautiklių duomenų nuskaitymo ir išsiuntimo per *bluetooth* ryšį naudojant RS232 prievadą. Maksimalus srovės suvartojimas siekia apie 230 mA. Tai yra gana didelė reikšmė, žinant, kad įrenginys yra mobilus ir jo pagrindinis maitinimo šaltinis yra 9 V baterija. Didžiąją dalį srovės suvartoja *bluetooth* modulis ir įtampos stabilizatoriai. Pagal specifikacinį aprašą, *bluetooth* modulio vidutinis srovės suvartojimas siekia net 114 mA. Tai yra net pusė maksimalios suvartojamos elektros srovės. Taigi norint sumažinti bendrą energi-

jos suvartojimą, reikia kiek įmanoma mažinti duomenų atnaujinimo dažnį ir naudoti energijos taupymo režimus. Taip pat didelę dalį energijos suvartojimo sudaro įtampos stabilizatoriai. Ant 5 V įtampos stabilizatoriaus atsiranda 4 V įtampos kritimas. Visas šis kritimas išspinduliuojamas šilumine energija į aplinką. Taip prarandamas didelis kiekis elektros energijos. Tai yra visiškai neefektyvu, bet taisytina. Vienas iš būdų – sumažinti elektros energijos maitinimo šaltinio įtampą. Dar vienas įtampos kritimas atsiranda ant 3,3 V įtampos stabilizatoriaus. Kadangi jis jungiamas jau po 5 V įtampos reguliatoriaus, tai atsiradęs kritimas tesiekia 1.7 V. Šioje vietoje sutaupyti energijos neišeina. Vienintelė išeitis – naudoti 3,3 V įtampa maitinamą mikrovaldiklį. 5.5 pav. matome galvos orientacijos sekimo įrenginio elektros srovės suvartojimo priklausomybę nuo laiko įjungimo metu, bet po 5 minučių nuo įrenginio veiklos pradžios.



5.5 pav. Galvos orientacijos sekimo įrenginio vartojamos elektros srovės priklausomybė nuo laiko, po 5 minučių darbo

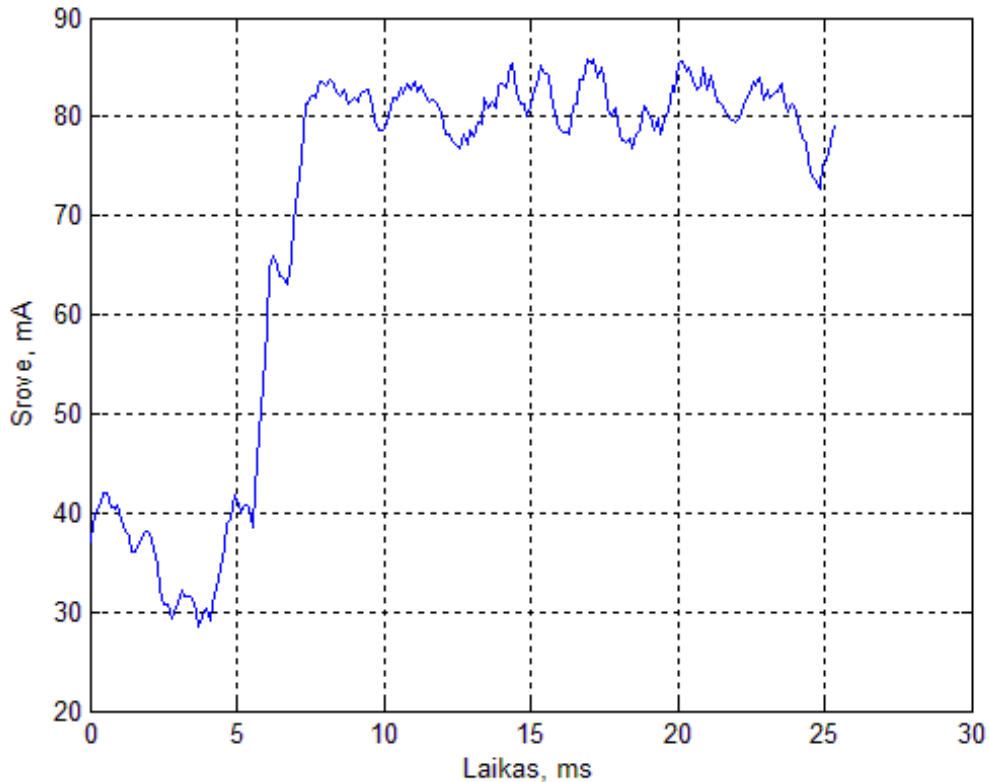
Kaip matoma iš 5.5 pav., elektros srovės suvartojimas įrenginio įjungimo metu, bet po 5 minučių darbo padidėja. Taip yra todėl, kad galvos orientacijos sekimo įrenginio temperatūra po 5 minučių darbo šiek tiek pakyla. Srovės suvartojimo padidėjimas siekia maždaug 20 mA.

5.2. Garso apdorojimo įrenginio patikra

Šis poskyris skirtas apibendrinti garso apdorojimo įrenginio veikimą bei jo charakteristikas.

5.2.1. Energijos suvartojimo patikra

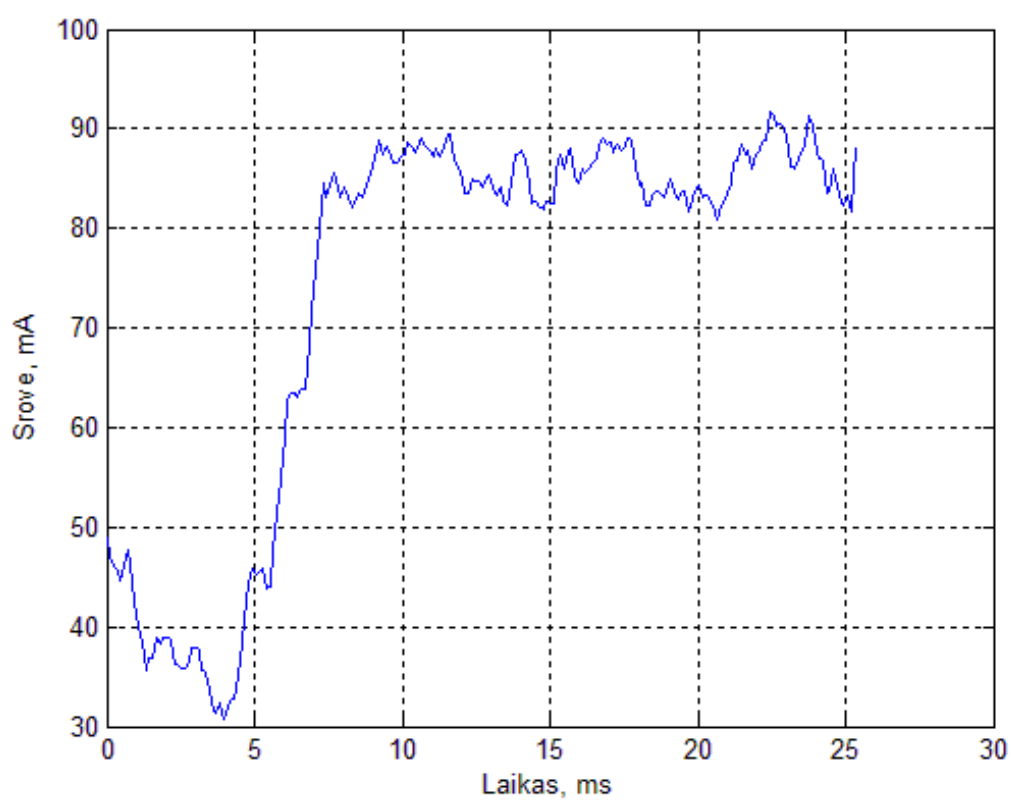
5.6 pav. pavaizduota garso apdorojimo įrenginio srovės suvartojimo priklausomybė nuo laiko šalto paleidimo metu.



5.6 pav. Garso apdorojimo įrenginio vartojamos elektros srovės priklausomybė nuo laiko šalto paleidimo metu

Kaip matome iš 5.6 pav. maksimalus elektros srovės suvartojimas siekia iki 85 mA. Didžiąją dalį šios srovės suvartojimo sudaro įtampos stabilizatorius. Likusias dalis – mikrovaldiklis ir skaitmeninis-analoginis keitiklis. 5.7 pav. pavaizduota srovės suvartojimo priklausomybė nuo laiko įjungimo metu, po 5 minučių įrenginio darbo.

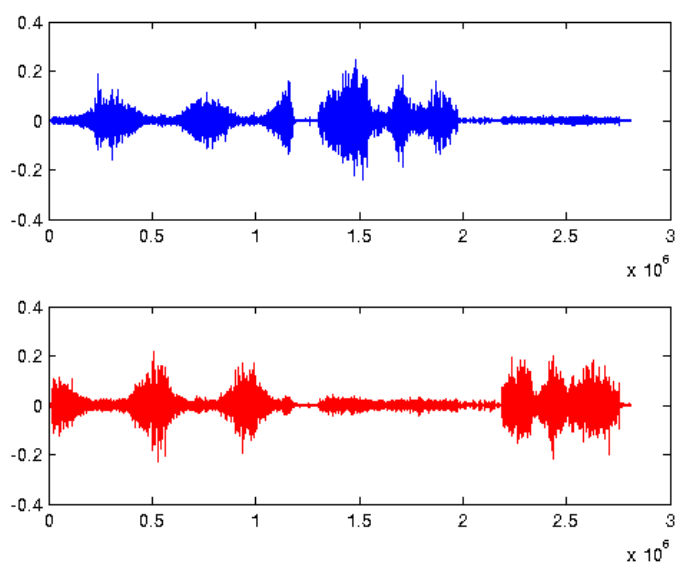
Kaip matome iš 5.7 pav., garso apdorojimo įrenginio srovės suvartojimas, po 5 minučių įrenginio darbo padidėja tik apie 5 mA. Taip yra todėl, kad įtaisas yra geriau suprojektuotas ir neatsiranda nereikalingų įtampos kritimų, o tuo pačiu ir energijos išsklaidymo šilumos pavidalu. Taip pat čia nėra duomenų perdavimo modulio BTM222, kuris suvartoja nemažai elektros energijos.



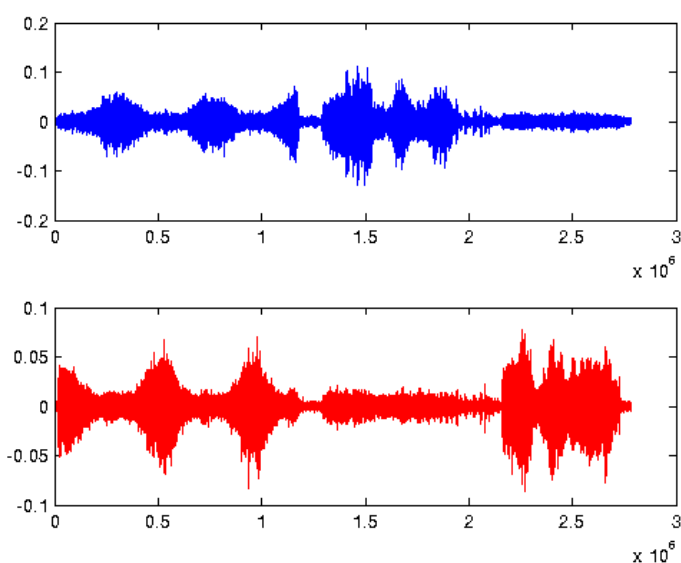
5.7 pav. Garso apdorojimo įrenginio vartojamos elektros srovės priklausomybė nuo laiko, po 5 minučių darbo

5.2.2. Garso generavimo tikslumas

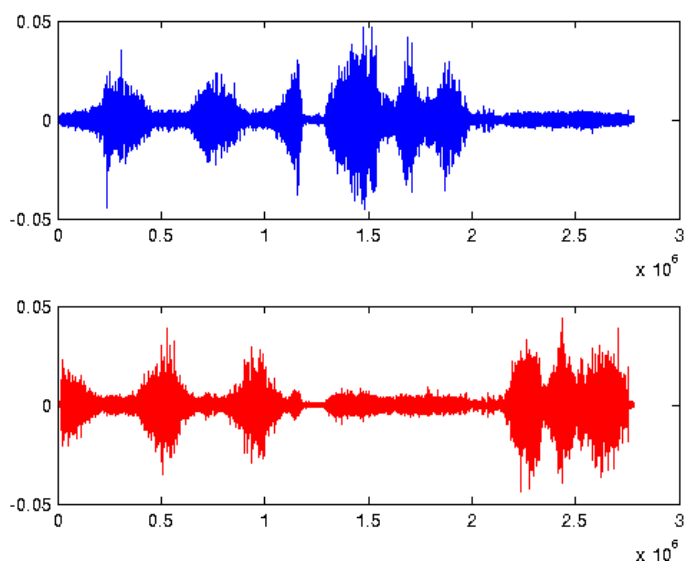
Kaip buvo minėta įvade, vienas svarbiausių sistemos vertinimo kriterijų – sugeneruoto binauralinio garso tikslumas. Jis vertinamas palyginus tikrąjį ir sugeneruotą binauralinį garsą. „Matchbox Rattle” buvo paimtas, kaip tikrasis binauralinio garso įrašas. 5.8 pav. iliustruoja 1,03 s. originalaus garso, tuo tarpu 5.9 pav. demonstruoja darbo metu sistemos sugeneruotą binauralinio įrašo fragmentą.



5.8 pav. „Matchbox Rattle” garso takelio fragmentas



5.9 pav. Sugeneruoto garso takelio fragmentas



5.10 pav. Garso takelių skirtumas

5.10 pav. iliustruoja garso takelių skirtumą. Kaip matome, maksimalus skirtumas yra 0,5 dB. Skirtumas, galimai, atsirado dėl originalaus garso takelio glaudinimo (nes originalaus binauralinio įrašo WAV byla buvo gauta ją konvertavus iš MP3 bylos), taip pat skirtumą sukuria neatitikimai tarp darbo metu aprašyto virtualaus kambario ir įrašymo metu buvusio tikrojo kambario parametrų.

Kartu su generavimo tikslumu buvo matuojamas ir garso vėlinimas. Palyginus 5.8 pav. su 5.9 pav. galima pastebėti tam tikrą generuoto garso vėlavimą, kuris sudaro 2,3 ms. Tai pilnai atitinka darbo užduotyje nurodytą maksimalų 0,3 s garso vėlinimą.

5.3. Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje buvo aptarti pagrindiniai sistemos parametrai ir savybės. Bandymų metu sistema parodė labai gerą veikimą, kuris pilnai atitinka darbo užduotyje nurodytus parametrus: bendras sistemos vėlinimas sudaro 2,3 ms; galvos sekimo įrenginio paklaida neviršija 15%; sistemos maksimalus elektros srovės suvartojimas tesiekia tik apie 340 mA. Esamos sistemos parametrai vertinami labai gerai. Bendras sistemos darbo algoritmas gali būti patobulintas, kas leistų dar labiau sumažinti suvartojamą srovę, galvos sekimo įrenginio paklaidą bei vėlinimą.

6. Rezultatų apibendrinimas. Išvados

Bakalaurinio darbo metu ištirta galimybė realiuoju laiku generuoti binauralinį garsą priklausomai nuo vartotojo galvos orientacijos. Kompiuterinių simuliacijų eigoje nustatyta, jog tokia sistema gali būti sukurta. Tuo remiantis, buvo sukurtas sistemos prototipas, pilnai atitinkantis visus darbo pradžioje iškeltus reikalavimus. Sistema yra tobulingina, tačiau pilnai atlieka visas užsibrėžtas funkcijas.

Sistemos patikros metu nustatytas patenkinamas generavimo tikslumas – galvos sekimo įrenginio paklaida neviršija 15%; generuojamas binauralinis garsas praktiškai tiksliai atkartoja eksperimentinį garsą. Bendras garso vėlinimas siekia ne daugiau nei 2,3 ms.

Galvos sekimo įrenginyje naudojamas mažos galios *bluetooth* siųstuvas – imtuvas, bet įrenginys atitinka, priimtą pagal Europos Bendrijos Tarybos direktyvą 89/336/EEB, Elektromagnetinio suderinamumo techninį reglamentą (EMS reglamentas).

Garso apdorojimo įrenginio terminės savybės yra geresnės lyginant su galvos orientacijos sekimo įrenginiu. Tai įtakoja mikrovaldiklis ir periferija, kuri maitinama 3,3 V elektros įtampa, todėl įtaisas yra ganėtinai ekonomiškesnis ir mažiau kaista.

Kol kas visos sistemos elektroninė dalis yra tik prototipo stadijoje, todėl visi atlikti matavimai yra preliminarūs ir ateityje gali keistis. Visos sistemos maksimalus elektros srovės suvartojimas tesiekia tik apie 340 mA, o tai atitinka užduoties reikalavimus (500 mA). Esamą srovės suvartojimą dar galima sumažinti anksčiau minėtais būdais 5.1.2 ir 5.2.1 poskyriuose, bet tai yra ateities planai ir šiuo metu tai nėra ypatingai aktualu, norint įrodyti ir pademonstruoti sistemos veikimą.

Visi darbo užduotyje iškelti uždaviniai buvo sėkmingai išspręsti ir įgyvendinti. Nors sukurtas algoritmas veikia pakankamai gerai, tačiau kaip buvo minėta anksčiau – yra tobulintinas.

Gautus rezultatus galima pagerinti, tam sukūrus tobulesnį binauralinio garso generavimo algoritmą, atsižvelgus į didesnę aplinkos parametrų bei paderinų naudojamas HRTF funkcijas konkrečiam klausytojui. Iš viso darbo metu buvo panaudoti 504 universalūs HRTF deriniai. Norint išgauti pačius geriausius rezultatus reikėtų panaudoti 32400 personalizuotų HRTF derinių.

Taip pat, patogesniam vartojimui, reikėtų galvos sekimo įrenginį dar labiau sumažinti, nors dabartinis svoris bei dydis yra patogūs naudojimui. Kompaktiškesnis įrenginys suteiktų dar daugiau laisvės vartotojui.

Darbe panaudotos priemonės lūkesčius pateisino iš dalies. Kaip ir buvo galima tikėtis, universalūs HRTF deriniai netinka kiekvienam vartotojui. Bandymų metu, maždaug 17 % dalyvių prisipažino, jog binauralinio garso efektas buvo sunkiai juntamas. Tai įtakojo panaudoti universalūs HRTF funkcijų deriniai.



7. Literatūros ir informacinių šaltinių sąrašas

1. <http://windows.microsoft.com/en-us/windows/products/lifecycle>
2. http://www.tele.ucl.ac.be/digicom/bhatnagar/asee_HRTF.pdf
3. B. C. J. Moore, An Introduction to the Psychology of Hearing, 5th edition, Elsevier Academic Press, London, UK, 2004.
4. Jyri Huopaniemi and Matti Karjalainen, HRTF Filter design based on auditory criteria, Proceedings of Nordic Acoustical Meeting, Helsinki, Helsinki University of Technology, Finland. balandis 1996.
5. Internetas, “<http://sound.media.mit.edu/KEMAR.html>”, rugpjūčio 2006.
6. J. Merimaa and V. Pulkki, Spatial Impulse Response Rendering I: Analysis and Synthesis, J. Audio Eng. Soc., vol. 53, no. 12, pp. 1115-1127, 2005.
7. D.R. Begault. 3D sound for virtual reality and multimedia. Academic Press. 1994. Massachusetts Institute of Technology,
8. K. Raghunath Rao and Jezekiel Ben-Arie, Optimal Head Related Transfer Functions for Hearing and Monaural Localization in Elevation: A Signal Processing Design Perspective, University of Illinois at Chicago, rugpjūtis 2000.
9. DeLiang Wang and Guy J. Brown, Computational Auditory Scene Analysis, John Wiley & Sons, Inc., 2005
10. J. L. Marins, Xiaoping Yun, E. R. Bachmann, R. B. McGhee, and M. J. Zyda. An extended
11. Kalman filter for quaternion-based orientation estimation using marg sensors. In Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, volume 4, spalio 29 - lapkričio 3, 2001.
12. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays, Sebastian O.H. Madgwick, balandžio 30, 2010
13. New method for extracting the quaternion from a rotation matrix, Itzhack Y Bar-Itzhack, AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, 23(6):1085-1087, lapkritis-gruodis 2000.
14. Image Method for Efficiently Simulating Small Room Acoustics, J. Allen and D. Berkley, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 65, no. 4, puslapiai. 943-950, 1979.



15. Algorithmic representation of the ray tracing technique, A. Kulowski, Applied Acoustics, vol. 18, no. 6, puslapiai 449-469, 1985.
16. Finite-difference time-domain simulation of low-frequency room acoustic problems, D. Botteldoore, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 98, no. 6, puslapiai. 3302-3308, 1995.



PRIEDAI

- 1 priedas. Demonstracinė programa ir jos pirminis tekstas
- 2 priedas. Eksperimentinės patikros rezultatai
- 3 priedas. Sistemos struktūrinės schemas
- 4 priedas. Programos algoritmas



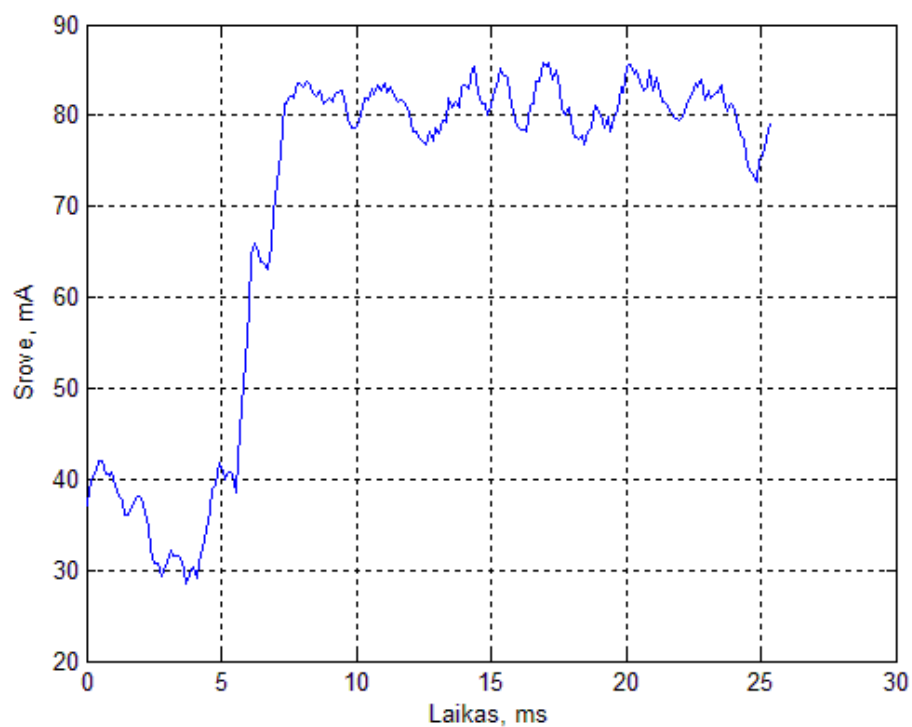
```
1 int main(void)
2 {
3     int
4     Status, // dabartine sistemos busena
5     TimeElapsed, // kintamajame saugomas laikas iki klaidos
6     WaveSampleRate; // diskretizavimo daznis
7 char WaveFormat; // WAV bylos formatas
8 WavData SoundData; // Duomenu struktura gautai informacijai laikyti
9
10 // Ivyksta UART (RS232) inicializacija
11 // Nustatymai: 38400 8n1
12 UartInit(UART_BAUD_RATE);
13
14 // I2S synos inicializacija
15 // Nustatymai: 400MHz
16 I2S_InitHardware();
17
18 // Pradedamas sistemis laikmatis, jei jis pasieks 5 s sistema nustos dirbti
19 // ir pereis i klaidos rezima
20 StartTimerMS();
21
22 // Pirmasis ciklas, rysiui su kompiuteriu uzmegzti
23 while(1)
24 {
25     // Jei per UART sasaja atejo laukta pasisveikinimo zinute
26     if(UARTGetString()=="START\n")
27     {
28         // sistemos busena nustatoma kaip pasiruosusi darbui ir ciklas
29         // yra uzbaigiamas
30         Status=PREPARED;
31         break;
32     }
33     else
34     {
35         // gaunama dabartine laikmacio reiksme
36         TimeElapsed=GetTimeMS();
37         // jei po paleidimo praejo 5 s
38         if(TimeElapsed>5000)
39         {
40             // nustatoma klaidos busena ir iseinama is ciklo
41             Status=ERROR_STATE;
42             break;
43         }
44     }
45 }
46 StopTimerMS();
```



```
1  while(1)
2  {
3      // jei klaidos busena – isvedam duomenis atgal i UART'a
4      // ir baigiame programa
5      if(Status==ERROR_STATE)
6      {
7          UartPuts("Error getting handshake!\r\nStopping!\r\n");
8          break;
9      }
10     // jei busena teisinga, tesiam darba, nuskaitant pagrindine
11     // WAV bylos informacija ir keiciame busena i "darbas"
12     if(Status==PREPARED)
13     {
14         WaveFormat=GetWaveFormat();
15         WaveSampleRate=GetWaveSampleRate();
16         Status=WORKING;
17     }
18     // jei busena – "darbas"
19     if(Status==WORKING)
20     {
21         // gauname duomenu paketa su informacija apie garso saltinio
22         // pozicija, davikliu duomenimis ir garso takeliu.
23         // duomenis irasome i struktura.
24         SoundData = GetPacket(NUMBER_OF_SAMPLES);
25
26         // su gautu duomenu paketu atliekame garso pakeitimus,
27         // pagal pozicija pasirenkame HRTF derini, atliekame KIA
28         // skaiciavima sasukos budu suliejame viska su gautu garso
29         // takeliu ir graziname nauja struktura
30         SoundData = CalculateSoundChange(SoundData);
31
32         // siunciamo duomenis i SAK.
33         // kadangi SoundData strukturoje garso takelio kanalu duomenis
34         // saugomi atskirai, o i SAK reikia nusiusti jau viena duomenu
35         // masyva, tad naudojame savo pasirasyta funkcija MixChannels,
36         // kuri atgal grazina viena duomenu masyva
37         // NUMBER_OF_SAMPLES * 2 ilgio
38         UpdateDAC(MixChannels(SoundData), WaveFormat, WaveSampleRate);
39     }
40 }
41
42 return 0;
43 }
```


Energijos suvartojimas

Galvos sekimo įrenginys.



Garso aprodavimo įrenginys

