



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Impulsinių radarų masyvo taikymas gyvybinių parametrų stebėsenai

Baigiamasis magistro projektas

Vytautas Dailidėnas

Projekto autorius

Doc. dr. Darius Jegelevičius

Vadovas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Impulsinių radarų masyvo taikymas gyvybinių parametru stebėsenai

Baigiamasis magistro projektas

Biomedicininė inžinerija (6211EX002)

Vytautas Dailidėnas

Projekto autorius

(parašas)

(data)

Doc. dr. Darius Jegelevičius

Vadovas

(parašas)

(data)

Prof. Vaidotas Marozas

Recenzentas

(parašas)

(data)

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Vytautas Dailidėnas

Impulsinių radarų masyvo taikymas gyvybinių parametrų stebėsenai

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdamas kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasis Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs ;
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalintas iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Vytautas Dailidėnas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Dailidėnas, Vytautas. Impulsinių radarų masyvo taikymas gyvybinių parametrų stebėsenai. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Darius Jegeravičius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypties grupė): studijų kryptis: Bioinžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: signalų apdorojimas, radarų masyvas, gyvybinių parametrų stebėseną, bekontaktis gyvybinių parametrų stebėjimas, adaptyvus filtras.

Kaunas, 2024. 67p.

Santrauka

Populiarėjant bekontakčiams žmogaus gyvybinių parametrų stebėsenos metodams nemažai dėmesio susilaukia radarų technologija dėl savo naudojimo paprastumo ir dėka tobulėjančių puslaidininkinių gamybos technologijų vis labiau pingančių radarų lustų. Viena iš galimų radarų technologijų pritaikymo galimybių yra jungti keletą radarų į bendrą sistemą – radarų masyvą, kuris išplečia šios technologijos panaudojimo galimybes, kadangi turime du ir daugiau lygiagrečiai laike įrašytų signalų, kurie gali būti panaudojami signalų apdorojimui.

Šiame magistro baigiamajame projekte yra tiriami du skirtingų konfigūracijų radarų masyvai ir jų galimybės registruoti širdies susitraukimus ir kvėpavimą. Taip pat yra siūlomas radaro signalų apdorojimo algoritmas, kurio pagrindinė sudėtinė dalis yra mažiausiųjų vidutinių kvadratų adaptyvusis filtras. Eigoje buvo sukurtas ir radaru gaunamo signalo modelis. Buvo atliekami 5 skirtingi eksperimentai, kuriais siekiama patikrinti radarų masyvų galimybes registruoti žmogaus gyvybinius parametrus skirtingose situacijose. Gauti rezultatai buvo lyginami su jau išbandytų algoritmų matavimo rezultatais. Geriausias rezultatas buvo gautas eksperimento nr.1 metu naudojant „Acconeer“ (Lundas, Švedija) gamintojo penkis A121 radarų modulių, kai gauta kvėpavimo dažnio vidutinė paklaida 0.06 standartinis nuokrypis $\sigma=0.866$ variacijos koeficientas 8,2%, o matuojant širdies susitraukimų dažnį vidutinė paklaida gauta -0.12, standartinis nuokrypis $\sigma=1,141$, variacijos koeficientas 4,3%. Algoritmas pasirodė mažiausiai atsparus nedidelės amplitudės kūno judesiams, kurie turėjo didelę įtaką matavimo tikslumui.

Dailidėnas, Vytautas. Application of Pulse Radar Array for Vital Parameters Monitoring. Master's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Darius Jegerlevičius; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Bioengineering, Engineering Science

Keywords: signal processing, radar array, vital signs monitoring, contactless monitoring.

Kaunas, 2024. 67 pages.

Summary

With the increasing popularity of non-contact methods for monitoring human vital signs, the radar technology is gaining attention due to its ease of use and due to the improvement of semiconductor manufacturing technologies, radar chips are becoming cheaper to manufacture. One of the possible applications of radar technologies is to connect several radars to a common system - a radar array, which expands the possibilities of using this technology by recording 2 and more channel signals, which are parallel in time domain and therefore those signals can be used in signal processing algorithms.

This master's thesis project investigates radar arrays in various configurations and their capabilities for monitoring heart rate and respiration. A radar signal processing algorithm is also proposed, the main component of which is the least mean square adaptive filter. In the process, a model of the signal received by the radars was also created. 5 different experiments were conducted to test the capabilities of radar arrays to register human vital parameters in various situations. The obtained results were compared with the measurement results of already tested algorithms and signal processing methods. The best result was obtained during experiment no. 1 using A121 radar modules manufactured by "Acconeer" (Lund, Sweden). Here the breath rate measurement mean error was 0.06, standard deviation $\sigma=0.866$, coefficient of variation 8,2%. Heart rate measurement mean error was -0.12, standard deviation $\sigma=1,141$, variation coefficient 4,3%. The biggest impact on the signal processing algorithm accuracy was made by small amplitude movements of the test subject.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas	11
1. Literatūros apžvalga	13
1.1. Klinikinė kvėpavimo ir širdies ritmo reikšmė ir jų matavimas	13
1.1.1. Kvėpavimo fiziologija	13
1.1.2. Širdies fiziologija.....	15
1.1.3. Gyvybinių parametrų stebėjimas elektromagnetiniais radarais.....	16
1.1.4. Radarų klasifikacija ir veikimo principas.....	16
1.1.5. Atstumo matavimas radaru.....	16
1.1.6. IQ duomenys	17
1.2. Plačiajuosčiai impulsiniai radarai ir jų masyvai	17
1.2.1. Impulsiniai radarai ir radarų masyvas	17
1.2.2. A111 radaro masyvas	19
1.2.3. A121 radaro masyvas	19
1.2.4. Radaro struktūrinė schema	20
1.3. Pirmo skyriaus apibendrinimas	21
2. Tyrimo metodologija	22
2.1. Radaro signalų modeliavimas.....	22
2.2. Radarų masyvo konfigūracija eksperimentų metu	23
2.3. Bendras signalų apdorojimo algoritmas	24
2.3.1. Bendrojo judesio iš radaro signalų išskyrimas	24
2.3.2. Mažiausiųjų vidutinių kvadratų adaptyvusis filtras.....	25
2.3.3. Atraminų duomenų surinkimas ir apdorojimas	29
2.4. Atlikto matavimo eksperimento eigos aprašymas	32
2.5. Duomenų bazė	34
2.6. Antro skyriaus apibendrinimas	34
3. Rezultatai	35
3.1. Rezultatų pateikimo paaiškinimas	35
3.2. Rezultatai su duomenis, kai tiriamasis sėdi nejudėdamas	35
3.3. Rezultatai su duomenimis kai tiriamasis juda	38
3.4. Rezultatai su duomenimis, kai tiriamasis pasisukęs 30 laipsnių kampu	41
3.1. Rezultatai su duomenimis, kai tiriamasis pasisukęs 30 laipsnių kampu į kitą pusę.....	44
3.2. Rezultatai po fizinio krūvio, tiriamajam sėdint ramiai	47
3.3. Trečio skyriaus apibendrinimas.....	50
4. Diskusija	52
Išvados	55
Priedai	59
1 priedas. Dalinių rezultatų pristatymas konferencijoje	59
2 priedas. A111 Radarų masyvo matavimų rezultatai	60
3 priedas. A121 Radarų masyvo matavimų rezultatai	63
4 priedas. Kiti išvestiniai matavimų rezultatai	66
5 priedas. Pasiūlyto signalų apdorojimo algoritmo bendra schema	67

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Statistiniai eksperimento nr.1 įverčiai	38
2 lentelė. Statistiniai eksperimento nr.2 įverčiai	41
3 lentelė. Statistiniai eksperimento nr.3 įverčiai	44
4 lentelė. Statistiniai eksperimento nr.4 įverčiai	47
5 lentelė. Statistiniai eksperimento nr.5 įverčiai	50
6 lentelė. A111 radarų masyvo matavimų eksperimento nr.1 metu rezultatai	60
7 lentelė. A111 radarų masyvo matavimų eksperimento nr.2 metu rezultatai	60
8 lentelė. A111 radarų masyvo matavimų eksperimento nr.3 metu rezultatai	61
9 lentelė. A111 radarų masyvo matavimų eksperimento nr.4 metu rezultatai	61
10 lentelė. A111 radarų masyvo matavimų eksperimento nr.5 metu rezultatai	62
11 lentelė. A121 radarų masyvo matavimų eksperimento nr.1 metu rezultatai	63
12 lentelė. A121 radarų masyvo matavimų eksperimento nr.2 metu rezultatai	63
13 lentelė. A121 radarų masyvo matavimų eksperimento nr.3 metu rezultatai	64
14 lentelė. A121 radarų masyvo matavimų eksperimento nr.4 metu rezultatai	64
15 lentelė. A121 radarų masyvo matavimų eksperimento nr.5 metu rezultatai	65
16 lentelė. Visų eksperimentų A111 radarų masyvo matavimų absoliutinės paklaidos suvestinė...	66
17 lentelė. Visų eksperimentų A111 radarų masyvo matavimų absoliutinės paklaidos suvestinė...	66

Paveikslų sąrašas

1 pav. Kvėpavimo ciklai (Modifikuota iš [4]).....	13
2 pav. Kvėpavimui svarbios anatomicinės struktūros (Modifikuota iš [5]).....	14
3 pav. Viršuje - kvėpavimo signalas, gautas matuojant krūtinės ląstos poslinkį. Apačioje – spektrinės analizė. (Modifikuota iš [6]).....	14
4 pav. Širdies anatomija (Modifikuota iš [8])	15
5 pav. Sistolinė ir diastolinė fazės	15
6 pav. Sistolinė ir diastolinė fazės (Modifikuota iš [9])	16
7 pav. Impulsinio radaro signalo vaizdas laiko ir dažnių ašyse (Modifikuota iš [29]).....	17
8 pav. Dviejų radarų veikimo pavyzdys [13]	18
9 pav. Gyvybinių parametrų matavimo radarais schema (Modifikuota iš [49])	18
10 pav. A111 radarų masyvo sistema.....	19
11 pav. A121 radarų masyvo sistema.....	20
12 pav. Radaro struktūrinė schema.....	20
13 pav. Kvėpavimo harmoninis signalas, kai nustatytas 10k/min įkvėpimų dažnis, amplitudė 2mm, pradinė fazė 0°	22
14 pav. Širdies pulsacijų signalas, kai nustatytas 60k/min pulsų dažnis.....	22
15 pav. Širdies pulsacijų ir kvėpavimo dedamųjų signalas	23
16 pav. Radaro atstumo kitimo signalo modelis	23
17 pav. Radarų masyvo atstumo kitimo signalų modelis (kairėje), palygintas su realiais radarų gaunamais atstumo kitimo signalais (dešinėje)	23
18 pav. Radarų masyvai naudoti eksperimentų metu	24
19 pav. Apytikslis atvaizdavimas, kaip A111 ir A121 radarų masyvų radarai yra nutaikyti į tiriamojo krūtinę. Skaičiai apskritimuose indikuoja radaro modulio numerį, apskritimai – matuojamus taškus. Kairėje – A111 radarų masyvas, dešinėje A121 radarų masyvas.....	24
20 pav. Bendro judesio signalo išskyrimas iš radaro signalo atskaitų.....	25
21 pav. Radaro A111 masyvo matavimo metu surenkami duomenys (30 sekundžių bendro judesio signalo iškarpa).....	25
22 pav. Bendras signalų apdorojimo algoritmas	26
23 pav. Algoritmo atrinkti dviejų skirtingų radarų signalo spektrai, kurie vėliau bus naudojami adaptyviajame filtre	27
24 pav. Pirmosios algoritmo dalies schema	27
25 pav. Adaptyviojo filtro schema	28
26 pav. Adaptyviajame filtre naudojami signalai ir gautas signalas po filtravimo	29
27 pav. Gautas širdies pulsacijų signalo spektras iš ŠSD apskaičiavimas.....	29
28 pav. Atraminų signalų surinkimo sistema ir sensorių pozicija eksperimento metu	30
29 pav. Atraminio kvėpavimo signalo apdorojimo ir kvėpavimo dažnio skaičiavimo algoritmas. ..	30
30 pav. Atraminio elektrokardiogramos signalo apdorojimo algoritmas	31
31 pav. Atraminų matavimų apdorojimo rezultatų rezultatas	31
32 pav. Tiriamojo pozicija radarų atžvilgiu.....	32
33 pav. Tiriamojo pozicija radarų atžvilgiu.....	33
34 pav. Tiriamojo pozicija radarų atžvilgiu.....	33
35 pav. Eksperimento nr.1 KD matavimo rezultatai atvaizduoti koreliacine kreive. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai	36
36 pav. Eksperimento nr.1 KD matavimo rezultatai atvaizduoti Bland-Altman diagramomis. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai	36
37 pav. Eksperimento nr.1 ŠSD matavimo rezultatai atvaizduoti koreliacine kreive. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai	37

38 pav. Eksperimento nr.1 ŠSD matavimo rezultatai atvaizduoti Bland-Altman diagramomis. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai	37
39 pav. Eksperimento nr.2 KD matavimo rezultatai atvaizduoti koreliacine kreive. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai	39
40 pav. Eksperimento nr.2 KD matavimo rezultatai atvaizduoti Bland-Altman diagramomis. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai	39
41 pav. Eksperimento nr.2 ŠSD matavimo rezultatai atvaizduoti koreliacine kreive. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai	40
42 pav. Eksperimento nr.2 ŠSD matavimo rezultatai atvaizduoti Bland-Altman diagramomis. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai	40
43 pav. Eksperimento nr.3 KD matavimo rezultatai atvaizduoti koreliacine kreive. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai	42
44 pav. Eksperimento nr.3 KD matavimo rezultatai atvaizduoti Bland-Altman diagramomis. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai	42
45 pav. Eksperimento nr.3 ŠSD matavimo rezultatai atvaizduoti koreliacine kreive. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai	43
46 pav. Eksperimento nr.3 ŠSD matavimo rezultatai atvaizduoti Bland-Altman diagramomis. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai.	43
47 pav. Eksperimento nr.4 KD matavimo rezultatai atvaizduoti koreliacine kreive. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai	45
48 pav. Eksperimento nr.4 KD matavimo rezultatai atvaizduoti Bland-Altman diagramomis. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai	45
49 pav. Eksperimento nr.4 ŠSD matavimo rezultatai atvaizduoti koreliacine kreive. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai	46
50 pav. Eksperimento nr.4 ŠSD matavimo rezultatai atvaizduoti Bland-Altman diagramomis. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai	46
51 pav. Eksperimento nr.5 KD matavimo rezultatai atvaizduoti koreliacine kreive. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai	48
52 pav. Eksperimento nr.5 KD matavimo rezultatai atvaizduoti Bland-Altman diagramomis. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai	48
53 pav. Eksperimento nr.4 ŠSD matavimo rezultatai atvaizduoti koreliacine kreive. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai	49
54 pav. Eksperimento nr.5 ŠSD matavimo rezultatai atvaizduoti Bland-Altman diagramomis. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai	49
55 pav. Radarų masyvų KD matavimų absoliutinės paklaidos rezultatai	51
56 pav. Radarų masyvų ŠSD matavimų absoliutinės paklaidos rezultatai.....	51
57 pav. A121 radarų masyvo, radaro nr.5 esančio centre, eksperimento nr.1 metu gautas signalo spektras	52
58 pav. Adaptyvaus filtro eilės ir konvergencijos koeficiento įtakos nufiltruotam signalui palyginimas. Kairėje pusėje filtro eilė $M=100$, konvergencijos koeficientas $\mu=0.01$, dešinėje pusėje $M=1$ $\mu=0.1$	53
59 pav. Adaptyvaus filtro eilės ir konvergencijos koeficiento įtakos nufiltruotam signalui palyginimas. Kairėje pusėje filtro eilė $M=100$, konvergencijos koeficientas $\mu=0.01$, dešinėje pusėje $M=200$ $\mu=0.001$	53
60 pav. Prasto atraminio matavimo EKG pavyzdys.....	54
61 pav. Dalyvavimą konferencijoje patvirtinantis dokumentas	59
62 pav. Pasiūlyto signalų apdorojimo algoritmo bendra schema	67

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

ŠSD – širdies susitraukimų dažnis

KD – Kvėpavimo dažnis

EKG – Elektrokardiograma

ŠKL – širdies ir kraujagyslių ligos

RIR filtras – Ribotos impulsinės reakcijos filtras

Įvadas

Žmogaus kūne vyksta įvairūs kompleksiniai procesai, kurie yra būtini kūno funkcionavimui, gyvybės palaikymui ir aplinkos suvokimui. Vieni procesai užtikrina maistinių medžiagų absorbciją, kiti temperatūros reguliavimą, dujų apykaitą ar bendros homeostazės palaikymą. Žmogui sunegalavus, įvykus traumai ar išsivysčius ūminei būklei, medikai pirmiausia vertina svarbiausius gyvybinius parametrus: širdies ritmą, kvėpavimą, arterinį kraujo spaudimą, deguonies įsisotinimą, kūno temperatūrą, kadangi šie fiziologiniai parametrai atspindi būtiniausius gyvybės palaikymo procesus ir bendrą žmogaus būklę. Šiame darbe dėmesys bus skiriamas kvėpavimo ritmo ir širdies ritmo gyvybiniams parametrų. Kvėpavimas ir širdies darbas – tai procesai, kurie užtikrina ne tik viso kūno audinių aprūpinimą deguonimi, bet svarbiausia - smegenų audinio gyvybingumą. Nutraukus kvėpavimo ir širdies darbo procesą žmogų ištinka klinikinė mirtis, kuri tęsiasi apie 4-6 minutes arba iki tol, kol smegenyse atsiranda negrįžtamų pokyčių. Įvykus negrįžtamiems neuronų žūties procesams smegenyse prasideda biologinės mirties procesas [43, 44]. Tačiau ne vien tik traumų ar ūmių būklių atvejais kvėpavimo ritmas ar širdies ritmas gali būti naudingas parametras organizmo būklės vertinimui. Ramybės būsenos širdies ritmas gali būti širdies ir kraujagyslių sistemos patologijų rizikos indikatorius [45]. Šveicarijos universiteto ligoninės širdies ir kraujagyslių centre atlikto tyrimo rezultatuose matome, jog padidėjęs ramybės būsenos širdies ritmas yra susijęs su padidėjusia širdies ligų tikimybe (tiriamieji kurių širdies susitraukimų dažnis buvo mažiau negu 64 kartus per minutę sirgo širdies ligomis rečiau). Todėl nuolat stebėti širdies susitraukimų dažnį tikrai naudinga, nes tai gali būti ankstyvas širdies ir kraujagyslių ligų indikatorius ar net vienas iš rodiklių nusakant žmogaus gyvenimo trukmę [45]. Širdies ir kraujagyslių ligos išlieka pagrindine mirties priežastimi pasaulyje pagal Pasaulio sveikatos organizacijos duomenis [46]. 2019 metais 17,9 milijono žmonių mirė nuo širdies ir kraujagyslių sistemos ligų. Kalbant apie kvėpavimo ritmą, padažnėjęs kvėpavimo ritmas yra fiziologinis atsakas į stresą [47]. Tyrimai rodo, kad esant stresui ir įtemptam dėmesio sutelkimui kvėpavimo dažnis yra didesnis, lyginant su ramybės būsenoje esančiu kvėpavimo dažniu. Kitas įdomus parametras yra širdies ritmo ir kvėpavimo ritmo kintamumas. Širdies ritmo kintamumas nerodo ypatingos statistinės reikšmės analizuojant signalus dažnių srityje. Tačiau apjungus šį parametru su kvėpavimo dažniu, šis naujas parametras yra geras streso indikatorius [47].

Kvėpavimo ir širdies ritmo matavimui yra sukurta nemažai metodų. Kvėpavimo dažnio nustatymui gali būti naudojami tenzoresistoriniai diržai, kapnometrai, šalia nosies šnervių landų tvirtinami termometrai, dujų analizė, oro drėgmės matavimas [18]. Širdies susitraukimų dažniui matuoti naudojama elektrokardiografija, fotopletizmografija, fonokardiografija, balistokardiografija [9,18]. Galime pastebėti, jog dauguma šių metodų reikalauja bent jau minimalaus kontakto su žmogaus kūnu - reikia dėvėti elektrodus, kaukes, diržus. Tačiau klinikinėje aplinkoje yra pacientų, su kurių oda kontaktas nėra įmanomas arba tai gali sukelti neigiamų pasekmių, pvz.: smarkiai nudegintas didelis kūno plotas, naujagimis pacientas. Taip pat, dėvint elektrodus ar kitą matavimo įrangą pacientui yra sukeliama diskomfortas ir tai gali paveikti matavimo tikslumą, pvz.: miego apnėjos stebėsenos atveju, kai gyvybiniai parametrai turi būti stebimi miego metu, tačiau pacientas dėl ant jo esančios įrangos negali panirti į gilų miegą ir taip būklė liks nepastebėta, kadangi apnėjos epizodai dažniausiai aptinkami REM (angl. - rapid eye movement) miego fazės metu [27]. Todėl yra reikalingas technologinis sprendimas paciento gyvybinius parametrus matuoti bekontakčiu metodu. Šiam tikslui yra naudojama elektromagnetinių radarų technologija.

Radaras – tai elektromagnetinių bangų sensorius gebantis aptikti objektą, nustatyti jo buvimo vietą, įvertinti dydį [11]. Paprastai tariant, tai yra elektromagnetinių bangų principu veikianti sistema, kuri išsiusdama ir priimdama elektromagnetines bangas ir vertindama priimto signalo laikines ir dažnines charakteristikas geba matuoti ankščiau išvardintus parametrus. Kadangi kvėpavimas ir širdies ritmas

atsispindi ne tik elektrinėje širdies veikloje ar iškvėpiamosiose dujose, bet ir mechaniniuose krūtinės ąstos pokyčiuose erdvėje, šie pokyčiai gali būti stebimi radarais. Jau yra tyrimų, kurių išvadose galime pastebėti, kad radarai gali pakankamai tiksliai registruoti žmogaus gyvybinius parametrus [36,37,38,39]. Matuojamas žmogaus krūtinės ąstos poslinkis erdvėje, krūtinės judėjimo greitis, tuomet apdorojus signalus išskiriamas kvėpavimo ir širdies darbo signalas iš kurių apskaičiuojami gyvybiniai parametrai - širdies ritmas arba širdies susitraukimų dažnis (ŠSD) ir kvėpavimo ritmas (KR). Tačiau galime pastebėti vieną panašumą tarp daugumos šių tyrimų - tiriamasis yra ramybės būsenoje, nejuda, stabiliai sėdi ant kėdės. Bet kasdieniniame gyvenime žmogus net ir sėdėdamas ar gulėdamas, visiškoje ramybės būsenoje, nejausdamas ar tiesiog dirbdamas kompiuteriu atlieka natūralius, mažos amplitudės judesius. Šie judesiai turi įtakos bendram matavimo tikslumui ir vienas krūtinės posvyris į priekį signalų apdorojimo algoritme gali būti aptiktas kaip įkvėpimas arba nedidelis kūno sujudėjimas dėl pasukamos galvos gali būti aptiktas kaip širdies dūžis. Vienas iš galimų šios problemos sprendimo būdų yra naudoti ne vieną radaro sensorių, o kelis, t.y. sujungti atskirus radarus į bendrą masyvą. Šiuo atveju yra matuojamas ne vienas konkretus taškas ant žmogaus krūtinės, bet keli taškai. Taip turėsime kelis atraminius matavimus, kurie padės bendrame signale aptikti judesių tendencijas ir eliminuoti, taip padarant mataviną patikimesnį ir ne tokį jautrų žmogaus kūno judesiams.

Magistrinio darbo tikslas:

Ištirti impulsinių radaro masyvų galimybę matuoti žmogaus kvėpavimo ir širdies susitraukimų dažnį ir pasiūlyti algoritmus apdoroti impulsinių radarų masyvo signalus.

Šiam tikslui pasiekti sudaryti šie magistrinio darbo uždaviniai:

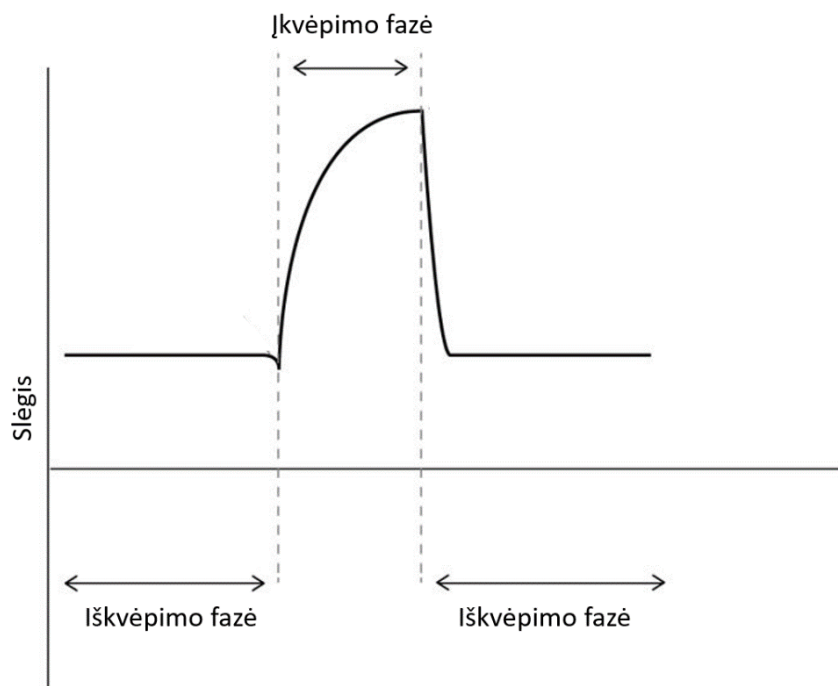
1. Ištirti dviejų konfigūracijų impulsinių radarų masyvo galimybes matuoti žmogaus gyvybinius parametrus;
2. Sukurti impulsinių radarų masyvo signalų modelį;
3. Pasiūlyti signalų apdorojimo algoritmą širdies ritmo ir kvėpavimo ritmo skaičiavimui iš radarų masyvo signalų;

1. Literatūros apžvalga

1.1. Klinikinė kvėpavimo ir širdies ritmo reikšmė ir jų matavimas

1.1.1. Kvėpavimo fiziologija

Kvėpavimas yra sudėtingas ir daug sudedamųjų dalių turintis procesas. Visą šį procesą kontroliuoja smegenys [1], kurios koordinuoja kvėpavimo raumenų judesius smegenų centruose. Pagrindinė priežastis, kodėl šis procesas yra reikalingas žmogaus kūnui — prisotinti kraują deguonimi ir pašalinti anglies dioksidą. Deguonis reikalingas ląstelių metabolizmui, o anglies dioksido pašalinimas iš kraujo yra vienas iš pH reguliavimo mechanizmų.

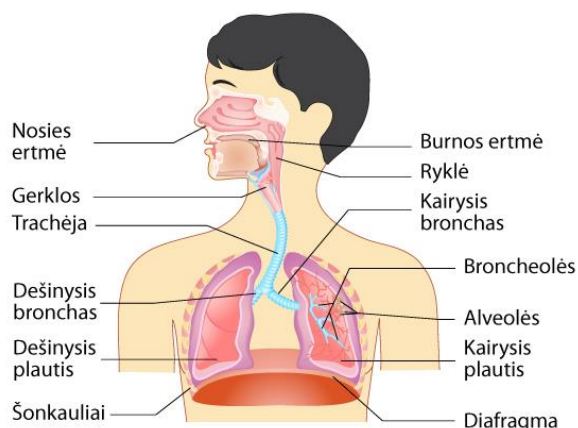


1 pav. Kvėpavimo ciklai (Modifikuota iš [4])

Balansą tarp šių dviejų dujų nuolat stebi ir kvėpavimo sistemą adaptuoja smegenys. Pavyzdžiui, atlikdami fizinius pratimus mes kvėpuojame daug dažniau ir giliau, kadangi reikia aprūpinti deguonimi raumenis. Jeigu šis aprūpinimas neužtikrinamas, aerobinis metabolizmas (procesas, kuomet energijai išlaisvinti naudojamas deguonis) sutrinka, energijos gavyba krenta. Taip pat nepašalinus anglies dioksido, kraujas ima rūgštėti, atsiranda ląstelių pažeidimai ir tai gali nuvesti netgi iki vidaus organų nepakankamumo, o svarbiausia — širdies raumens (miokardo).

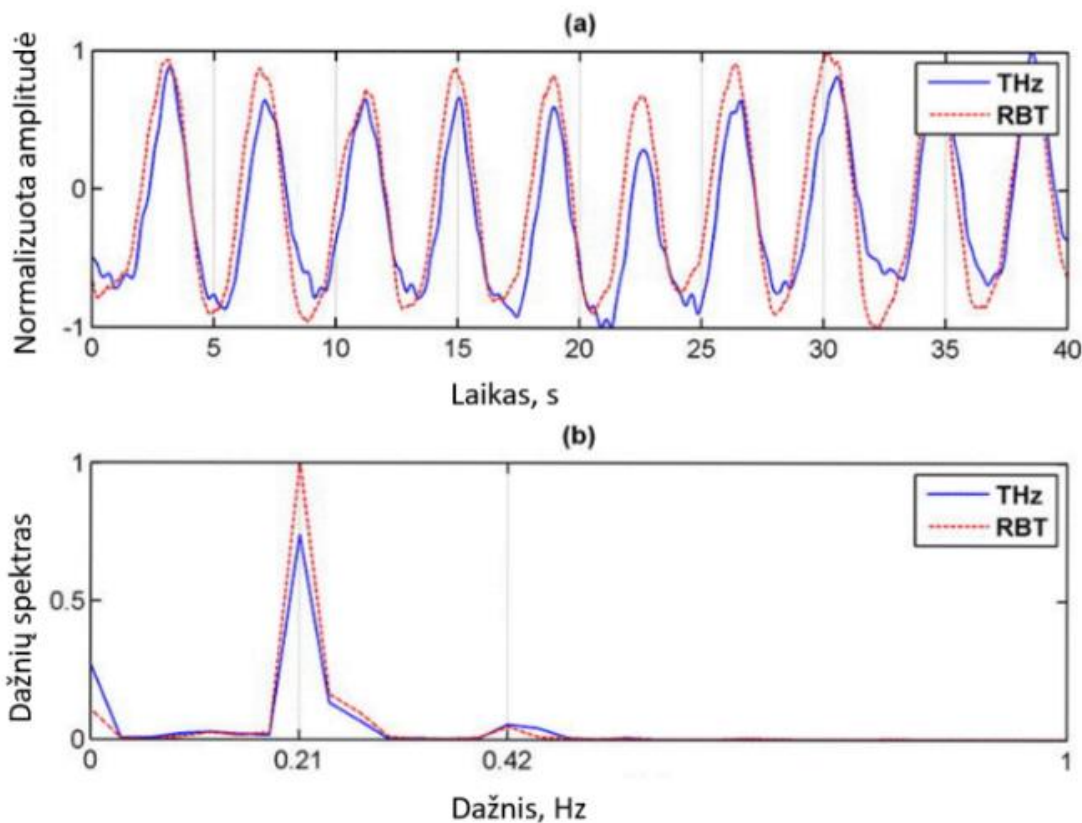
Kad kvėpavimo procesą analizuoti būtų lengviau, galime jį suskirstyti dalimis (1 pav.). Paprastai yra 4 kvėpavimo fazės: įkvėpimas, įkvėpimo pauzė, iškvėpimas, iškvėpimo pauzė. Bet kad analizuoti šį procesą būtų paprasčiau, palikime dvi fazes — įkvėpimo ir iškvėpimo [1]. Įkvėpimo fazėje yra sukuriamas neigiamas slėgis krūtinės ertmėje: susitraukia diafragma, suveikia vidiniai tarpšonkauliniai raumenys, pakyla krūtinės ląsta. Sukurtas neigiamas slėgis vidinėje krūtinės ląstos dalyje sudaro slėgių skirtumą su atmosferoje esančiu slėgiu ir oras per viršutinius kvėpavimo takus ima plūsti į plaučius. Per nosį, burną, antgerklį, ryklę, trachėją keliavęs oras patenka į tankų bronchų ir bronchiolių tinklą, kurių galuose yra viena svarbiausių plaučių sudedamųjų dalių – alveolės. Alveolės yra apraizgytos kraujagyslėmis. Čia įvyksta dujų apsikeitimas — kraujyje esantis anglies dioksidas difunduoja į alveoles, o deguonis, kurio koncentracija ore yra apie 21% difunduoja į kraują ir taip veninis kraujas virsta arteriniu krauju. Arterinis kraujas iš mažojo kraujo rato keliauja į širdį, kur tuomet yra paskirstomas po visą kūną. Iškvėpimo fazėje procesas vyksta atvirkščiai. Norint

ištumti atneštas dujas reikia sukurti teigiamą slėgį plaučiuose. Tai yra padarome atpalaiduojant vidinius tarpšonkaulinius raumenis ir nuleidžiant krūtinės ląstą, diafragma atsipalaiduoja ir išsigaubia taip spausdama plaučius iš pilvinės pusės. Kadangi dabar slėgis plaučiuose yra didesnis negu atmosferoje, plaučiuose esantis oras per viršutinius kvėpavimo takus yra pašalinamas. Šį procesą lengviau įsivaizduoti pažvelgus į žmogaus kūno anatomiją (2 pav.)



2 pav. Kvėpavimui svarbios anatominės struktūros (Modifikuota iš [5])

Visas kvėpavimo procesas vyksta 12-16 kartų per minutę arba 0,3-0,34Hz dažniu. Kvėpavimo procesas gali būti stebimas ir stebint mechaninius krūtinės ląstos pakilimus ir nusileidimus, kadangi kaip jau žinome tarpšonkauliniai raumenys kilnoja šonkaulius ir krūtinės ląstą kvėpavimo proceso metu. Kvėpavimo proceso metu statmenasis (aukštyn – žemyn) krūtinės ląstos poslinkis gali būti iki 5mm, šonkaulinio lanko išsiplėtimas į šonus yra galimas iki 2mm (3 pav.).

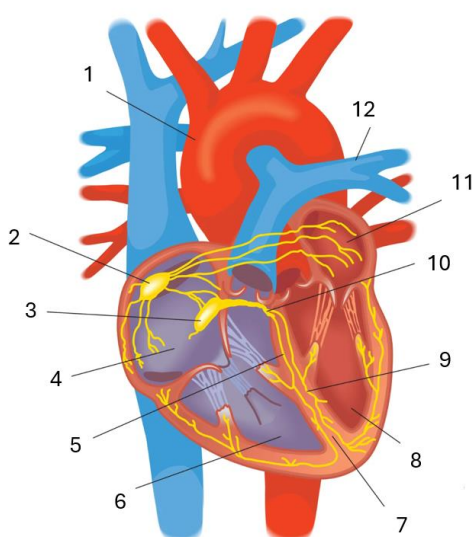


3 pav. Viršuje - kvėpavimo signalas, gautas matuojant krūtinės ląstos poslinkį. Apačioje – spektrinės analizė. (Modifikuota iš [6])

1.1.2. Širdies fiziologija

Širdies ritmas yra turbūt pagrindinis gyvybinis parametras. Žmogus neturintis jokios širdies veiklos yra laikomas kliniškai mirusiu. Todėl labai svarbu suprasti širdies veikimo fiziologiją ir kaip tai veikia kitas fiziologines sistemas.

Širdies veiklą lengviausia paaiškinti analizuojant elektrokardiogramą (EKG). EKG registruojami trys teigiami (P, R, T) ir du (Q, S) neigiami danteliai. P dantelis rodo elektrinio impulso atsiradimą sinusiniame mazge ir jo plitimą prieširdžiuose, R dantelis registruoja skilvelių sudirginimą, T dantelis – skilvelių miokardo ląstelių repoliarizaciją (atsipalaidavimą). Registruojamas PQ intervalas rodo laiką, per kurį sujaudinimas iš sinusinio mazgo išplinta į prieširdžius ir pasiekia atrioventrikulinį mazgą. Normaliai tai užtrunka iki 0,2 s. QRS kompleksas atitinka skilvelių sudirginimą (susitraukimą) ir trunka iki 0,1 s. ST intervalas registruoja miokardo baigiamąją repoliarizaciją ir tai trunka 0,3 s, T-P intervalas yra diastolės laikas.

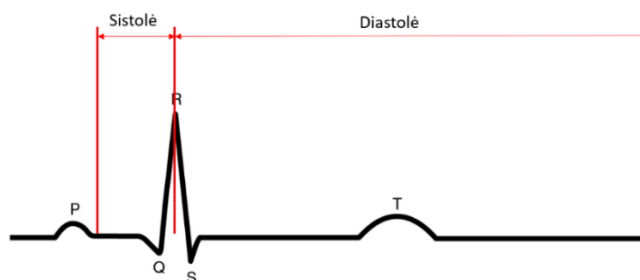


Žmogaus širdies sandara:

1. Aorta
2. Sinusinis mazgas
3. Atrioventrikulinis mazgas
4. Dešinysis prieširdis
5. Dešinė Hiso pluošto koja
6. Dešinys skilvelis
7. Pertvara
8. Kairysis skilvelis
9. Kairė Hiso pluošto koja
10. Atrioventrikulinis Hiso mazgas
11. Kairys prieširdis
12. Plautinė arterija

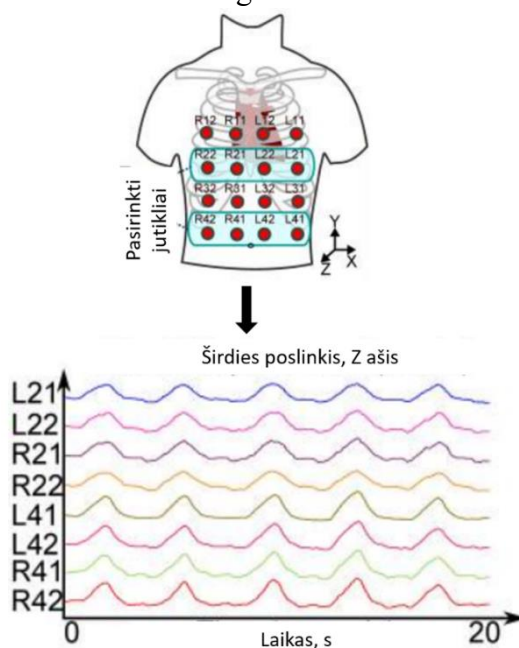
4 pav. Širdies anatomija (Modifikuota iš [8])

Kad būtų paprasčiau analizuoti padalinkime visą EKG į du ciklus. Kiekvieną ciklą sudaro staigus susitraukimas – sistolė, kuri yra darbo fazė, ir ilgas atsipalaidavimas – diastolė – poilsio fazė (5 pav). Diastolės trukmė sąlygoja pulso greitį. Sveika širdis ramybėje susitraukia (plaka) 60-80 k./min (1-1,34Hz), naktį – rečiau; vaiko – visada dažniau. Plakimas greitėja dirbant, sportuojant, karščiuojant, susijaudinus. Per parą širdis sutvinksi apie 100 000 kartų. Per sistolę, susitraukiant širdies raumeniui, iš dešiniojo skilvelio veninis kraujas plūsta į plautinį kamieną, o iš kairio arterinis – į aortą. Per diastolę į skilvelius vėl priplūsta kraujo (arterinio iš plaučių ir veninio iš viso organizmo). Per minutę širdis išstumia apie 4-8 litrus kraujo.



5 pav. Sistolinė ir diastolinė fazės

Kadangi širdis yra už krūtinės ląstos ir su ja liečiasi, širdies darbas, kaip ir kvėpavimas, atsispindi krūtinės ląstos mechaniniuose poslinkiuose. Šie poslinkai yra daug mažesni negu kvėpavimo atveju – tai yra tik 0,2-0,5mm. Šie poslinkiai buvo užregistruoti kitais metodais [9].



6 pav. Sistolinė ir diastolinė fazės (Modifikuota iš [9])

Šie judesiai krūtinės ląstoje toliau bus vadinami širdies pulsacijomis. Ramybės būsenoje juos pajauti pačiam žmogui yra sudėtinga, tačiau po intensyvaus fizinio krūvio galime šias pulsacijas pajauti geriau.

1.1.3. Gyvybinių parametrų stebėjimas elektromagnetiniais radarais

1.1.4. Radarų klasifikacija ir veikimo principas

Radaras (angl. Radio Detection and Ranging) – tai elektromagnetinis sensorius, kuris pasitelkdamas radijo bangas gali aptikti, nustatyti objektų buvimo vietą, sekti judėjimą ir atpažinti objektus įvairiais atstumais [2]. Pagrindinis veikimo principas pagrįstas elektromagnetinių bangų atsispindėjimu nuo objektų. Radaras per siųstuvą išsiunčia elektromagnetines bangas ir šios atsispindėjusios nuo objektų, grįžta į radaro imtuvą. Pagal tai, kaip pakitusios nuo išsiųstųjų bangų grįžo elektromagnetinės bangos, signalų apdorojimo pagalba galima nusakyti objekto buvimą ar nebuvimą, tikslią vietą, judėjimo greitį, kai kuriais atvejais net ir dydį ar formą.

Radarai pagal savo parametrus gali būti skirstomi į skirtingas grupes. Pavyzdžiui, pagal savo darbo režimus (nuolatinės bangos arba impulsiniai), naudojimo sritį (civiliniai arba kariniai), bangų diapazoną (VHF, UHF, MW, milimeter wave).

1.1.5. Atstumo matavimas radaru

Matavimo metu radaras išspinduliuoja trumpą elektromagnetinių bangų impulsą [2]. Šio impulso kryptis priklauso nuo radaro antenos — ji gali būti kryptinė, omnidirekcinė, parabolinė ir pan. Elektromagnetinis impulsas sklinda erdve šviesos greičiu iki kol sutinka kliūtį, nuo kurios impulsas atsispindi. Dalis šios energijos išsisklaido, tačiau dalis šios energijos sugrįžta radro kryptimi ir šis impulsas yra priimamas imtuvo antena. Paprasčiausias metodas išmatuoti atstumą yra oscilografu. Oscilografo įėjimai turėtų būti prijungti prie siųstuvo ir imtuvo antenų. Ištransliavus elektromagnetinį

impulsą jis matysis oscilografo ekrane ir tai bus pirmasis impulsas. Atsispindėjęs nuo objekto impulsas bus priimtas imtuve ir oscilografe pasimatys antrasis impulsas. Žinodami laiką tarp šių dviejų impulsų galime pasitelkti (1) formulę:

$$R = \frac{c_0 \cdot t}{2} \quad (1)$$

Čia R - apskaičiuotas atstumas iki objekto, c_0 – šviesos greitis ($3 \cdot 10^8 m / s$), t – išmatuotas laiko tarpas tarp impulsų. Kaip matome, atstumas skaičiuojamas pagal parasčiausią atstumo radimo formulę, sudauginus greitį ir laiką, bet yra padalinamas iš dviejų, kadangi impulsas nukeliavo iki objekto ir atgal.

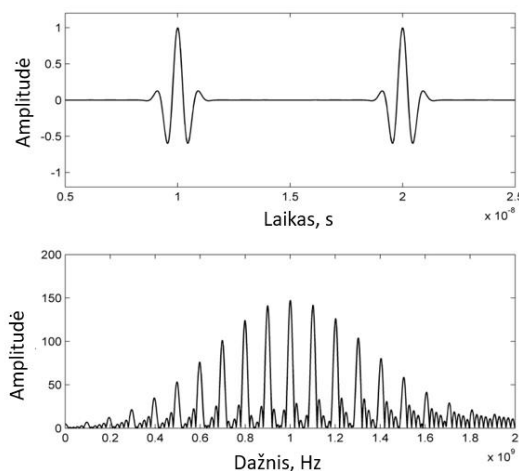
1.1.6. IQ duomenys

Radarai turi specifinį duomenų tipą, vadinamą IQ duomenimis. Du signalai, kurių fazių skirtumas yra 90 laipsnių yra vadinami angl. “in-quadrature” [3]. Q signalas yra sinusoidė, I signalas yra kosinusoidė. Jei keisime šių dviejų signalų fazę pagal tam tikrą laiko funkciją, gausime fazinę arba dažninę moduliaciją. Kadangi galime pakankamai tiksliai nustatyti fazių skirtumą tarp šių dviejų signalų, galime pakankamai tiksliai išskaičiuoti ir atstumą.

1.2. Plačiajuosčiai impulsiniai radarai ir jų masyvai

1.2.1. Impulsiniai radarai ir radarų masyvas

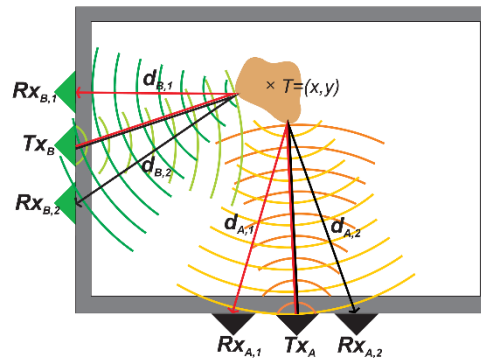
Impulsiniai radarai (angl. UWB – ultra wide band) – tai yra viena iš radaro rūšių, kurių pagrindinis skiriamasis bruožas yra tas, kad elektromagnetinės bangos yra spinduliuojamos ne nuolatos, o impulsais. Iš signalų teorijos prisimename, jog impulsai susideda iš daug dažninių dedamųjų dedamųjų, todėl yra gaunama plati dažnių juosta (10 pav.).



7 pav. Impulsinio radaro signalo vaizdas laiko ir dažnių ašyse (Modifikuota iš [29])

Platesnis dažnių diapazonas lemia didesnę atstumo matavimo rezoliuciją [29]. Taip trumpesniais impulsais išspinduliuotas signalas turi didesnę išspinduliuotą galią, ko pasekoje gaunamas geresnis signalas-triukšmas santykis. Dar vienas šių radarų privalumas yra tas, kad radaro siųstuvas neprivalo būti įjungtas visą laiką, tarp impulsų jis yra išjungiamas, taip taupant energiją.

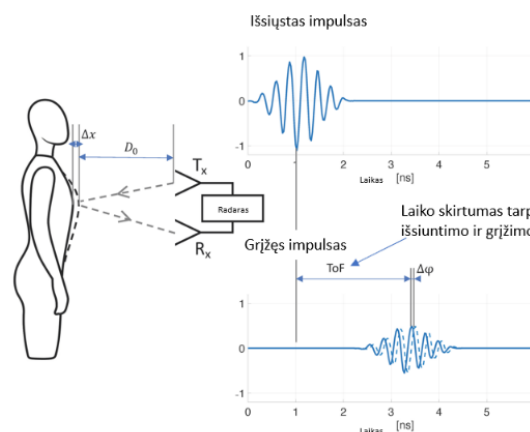
Kad gautume geriausios kokybės signalą matavimams atlikti, radaro spindulys turi būti nukreiptas tiksliai į matuojamą objektą, kitaip gauta signalo kokybė gali sutrukdyti gerai išmatuoti atstumą. Kas nutinka, jei norime matuoti nekeičiant radaro spindulio krypties? Tuomet galime naudoti kelis radarus, nukreiptus į bendrą matavimo zoną, tačiau jie nėra sukonzentruoti į vieną tašką, o „dengia“ visą matavimo zoną atskiruose taškuose. Todėl mums patampa nebesvarbu, kokia yra tiksli objekto padėtis, suminis fazės kitimo signalas gautas iš kelių radarų leis pamatuoti atstumą net ir jei visi radaro spinduliai nebus idealiai pozicionuoti.



8 pav. Dviejų radarų veikimo pavyzdys [13]

Kitas privalumas naudojant kelis radarus, yra tai, jog jei matuojamas objektas turi nepageidaujamą judesio dedamųjų, jos gali būti atimamos iš bendro signalo ir taip pagerinama galutinio signalo kokybė. 12 paveikslėlyje matome radarų masyvo pavyzdį. Matome 4 radarus sudėtus į 2 eilių ir 2 stulpelių masyvą. Šių radarų spinduliai nėra sukonzentruoti į vieną erdvės tašką. Vienas iš radarų yra nukreiptas 15 laipsnių nuo centro į viršų, kitas 30 laipsnių į šoną, trečias 15 laipsnių žemyn, ir vienas radaras yra nukreiptas tiesia kryptimi.

Apžvelgdami žmogaus fiziologines funkcijas pastebėjome, kad kvėpavimas ir širdies ritmas atsispindi mechaniniuose krūtinės ląstos poslinkiuose [49]. Kadangi radaras geba nustatyti atstumą iki objekto, pastoviai stebėdami atstumą nuo krūtinės ląstos iki radaro, iš gauto fazės kitimo signalo galime išskirti širdies ritmo ir kvėpavimo ritmo dedamąsias.

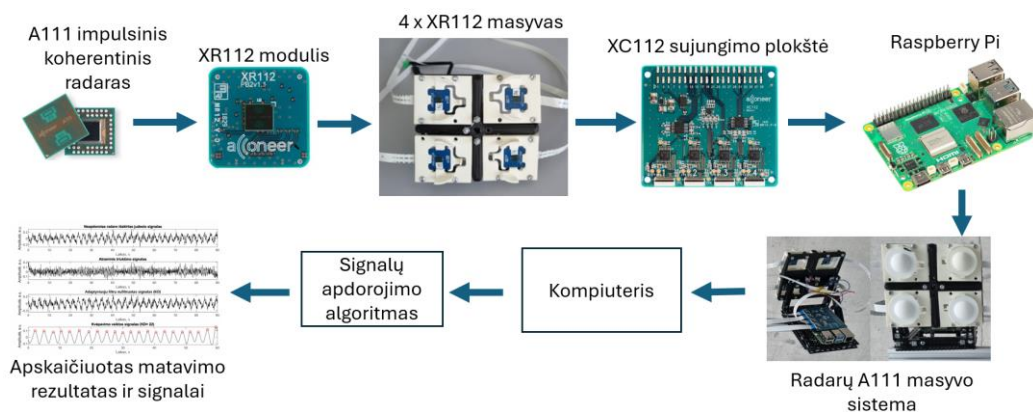


9 pav. Gyvybinių parametrų matavimo radarais schema (Modifikuota iš [49])

Kaip ir matome 12 pav. schemeje, išspinduliuotas radaro impulsas atsispindi nuo krūtinės ląstos ir grįžta į imtuvo anteną, kur suformuoja atspindžio impulsą. Išmatavę vėlinimo laiką nuo išsiųsto signalo pradžios iki priimto signalo pradžios, padauginę iš šviesos greičio ir padalinę iš dviejų gausime atstumą.

1.2.2. A111 radaro masyvas

Radaras A111 yra vienas iš Acconeer kompanijos („Acconeer“, Lundas, Švedija) siūlomų impulsinių koherentinių radarų. Radaro lustas yra pakankamai nedidelis - 29mm², pasižymi mažu energijos suvartojimu, geba atlikti matavimus iki 12 metrų atstumu, kurių absoliuti paklaida yra milimetrų eilės, reliatyvioji paklaida yra mikrometrų eilės.



10 pav. A111 radarų masyvo sistema

Pagrindiniai radaro parametrai yra [42]:

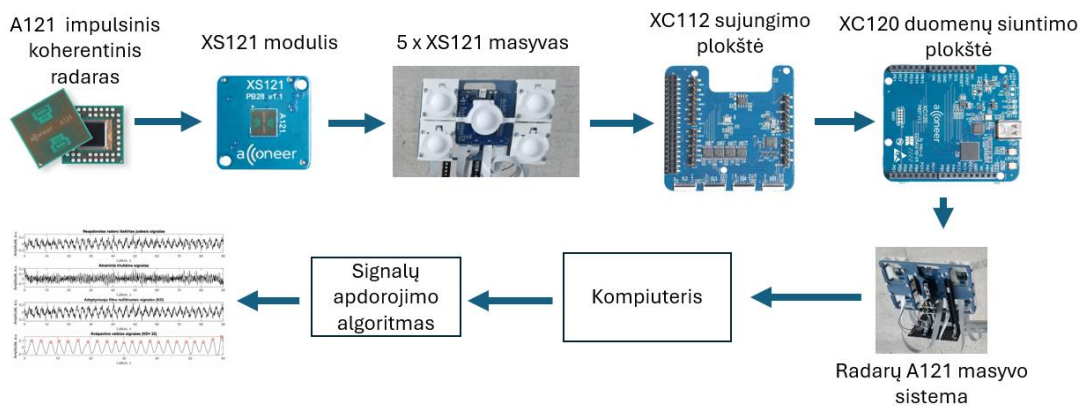
1. Išspinduliuojamo impulso dažnis 57-60GHz
2. Pusės galios pluošto plotis 65 H plokštumoje ir 53 E plokštumoje
3. Tame pačiame luste turime GHz eilės impulsų generatorių, siųstuvą ir imtuvą, maitinimo grandinės sudedamąsias dalis.
4. Maitinimo įtampa 1,8V
5. Lusto matmenys 5.5mmx5.4mmx0.88mm
6. Diskretizavimo dažnis 30Hz

A111 radarų moduliai sumontuoti XR112 moduluose, kurie pasinaudojant XC112 sujungimo plokštė yra sujungiami į sistemą. Duomenų surinkimui ir perdavimui yra naudojamas „Raspberry Pi 3B“ („Raspberry Pi Foundation“, D.Britanija) mikrokompiuteris, kuris perduoda duomenis į kompiuterį.

1.2.3. A121 radaro masyvas

Antrasis šiame darbe naudojamas radarų masyvas naudoja 5 A121 radarų modulius. A121 taip pat yra Acconeer gamintojo sukurtas impulsinis koherentinis radaras. Tai yra patobulinta A111 radaro versija. Pagrindiniai skirtumai nuo A111 yra, kad A121 radaras geba matuoti jau ir 20 metrų atstumu. Žinoma, tai priklausys ir nuo pačio objekto savybių atspindint išspinduliuotą elektromagnetinę bangą, tačiau matavimo atstumo padidėjimas lyginant su A111 leidžia dar plačiau pritaikyti šį radarą. Pagrindiniai A121 radaro parametrai yra [41]:

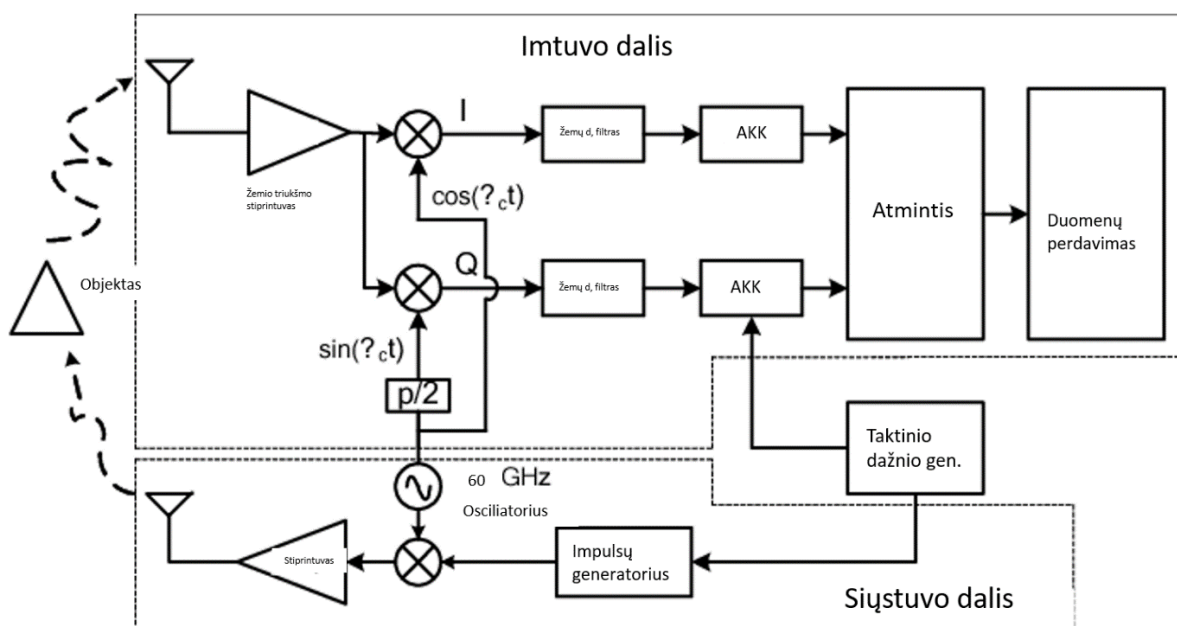
1. Išspinduliuojamo impulso dažnis 57-60GHz
2. Pusės galios pluošto plotis 65 H plokštumoje ir 53 E plokštumoje
3. Tame pačiame luste turime GHz eilės impulsų generatorių, siųstuvą ir imtuvą, maitinimo grandinės sudedamąsias dalis.
4. Maitinimo įtampa 1,8V
5. Lusto matmenys 5.5mmx5.4mmx0.88mm
6. Diskretizavimo dažnis 30Hz



11 pav. A121 radarų masyvo sistema

A121 yra paruoštas naudoti XS121 moduluose, kuris yra skirtas patogiai sujungti kelis radarų modulius į sujungimo plokštę XC112, kurioje, taip pat yra integruotas dar vienas radaras A121. Todėl šiame radarų masyve naudojami 5 A121 radarai, kas sudaro galimybes iširti ir kaip rezultatus įtakoja turimas didesnis radarų skaičius masyve kiekis, išdėstymas erdvėje atliekant matavimus ir didesnis matavimo plotas. Duomenų perdavimas vyksta pasitelkiant XC120 plokštę, kuri serijine USB komunikacija perduoda duomenis į kompiuterį, kur vėliau jie bus apdoroti pasiūlytu signalų apdorojimo algoritmu.

1.2.4. Radaro struktūrinė schema



12 pav. Radaro struktūrinė schema

Radaro struktūrinę schemą galime matyti paveiksle. Radaro struktūra susideda iš dviejų pagrindinių dalių – siųstuvo dalies ir imtuvo dalies.

Kad geriau suprastume jos veikimą, matavimo procesą išskaidome į atskirus žingsnius:

1. Signalo generavimas prasideda 60GHz osciliatoriuje. Čia sugeneruojama 60 GHz sinusoidė. Ši sinusoidė tuomet yra paduodama į moduliatorių.

2. Prie modulatoriaus prijungtas impulsų generatorius, kuris taktinio dažnio generatoriaus užduotu dažniu generuoja impulsus ir atidaro modulatoriaus išėjimą ir taip pat greit uždarydamas. Taip sugeneruojamas pagrindinis impulsas.
3. Tuomet šis impulsas patenka į stiprintuvą, kuriame yra sustiprinamas.
4. Sustiprintas impulsas patenka į anteną, kurioje elektrinis signalas verčiamas elektromagnetinėmis bangomis ir yra išspinduliuojamas į aplinką.
5. Atsispindėjęs nuo aplinkoje esančio objekto, elektromagnetinis impulsas grįžta į imtuvo anteną.
6. Antenoje elektromagnetinės bangos verčiamos į elektrinį signalą, kuris tuomet patenka į žemo triukšmo stiprintuvą. Žemo triukšmo stiprintuvas reikalingas tam, kad gautą signalą kuo mažiau užterštume nereikalingais triukšmais ir apsunkintume naudingų parametrų išskyrimą.
7. Pradedami generuoti IQ duomenys.
8. Šie duomenys perleidžiami per žemų dažnių filtrą, norint pašalinti nereikalingą aukšto dažnio triukšmą ir palikti tik naudingas dažnines dedamąsias.
9. Signalas yra diskretizuojamas naudojant analogas-kodas keitiklius.
10. Tuomet vykdomas duomenų perdavimas tolimesniam apdorojimui. Duomenys išsaugomi atmintyje arba perduodami tiesiogiai į laikmeną.

Toliau radaro signalai apdorojami pasinaudojant diskretinių signalų apdorojimo metodais. Svarbu žinoti, jog radaro matavimus gali įtakoti ne tik vidiniai įrangos elementai bet ir išoriniai veiksniai. Žinome, jų efektas gali būti sumažintas arba pašalintas filtruojant ir kitaip apdorojant signalus, tačiau ne viskas gali būti pašalinta ar išfiltruota nepakeičiant signalo morfologijos.

1.3. Pirmo skyriaus apibendrinimas

Kvėpavimo dažnis ir širdies susitraukimų dažnis yra vieni svarbiausių žmogaus gyvybinių parametrų. Šie parametrai matuojami visuose sveikatos apsaugos lygiuose. Šiems parametrams matuoti yra sukurtas ne vienas metodas ir technologija, tačiau dažnu atveju matavimui reikalingas kontaktas su žmogaus kūnu. Tai gali sukelti nepatogumų stebint šiuos parametrus ilgesniame laiko intervale, taip pat dažnu atveju reikalingos įrangos tvirtinimas prie žmogaus kūno užima laiko. Todėl vis labiau populiarėja įvairūs bekontakčiai žmogaus gyvybinių parametrų matavimo metodai. Radarai – tai viena iš tobulėjančių ir pingančių technologijų kvėpavimo ir širdies susitraukimų dažnių matavimui ir turinčių potencialo tiek klinikiniam tiek ambulatoriniam pritaikymui. Šiame darbe buvo naudojami impulsiniai koherentiniai (kurių išspinduliuojamo signalo ir priimamo signalo fazės žinomos) radarai, sujungti į radarų sistemą, kurią vadiname radarų masyvu. Šie GHz dažnių juostos radarų masyvai puikiai tinka itin nedideliems mechaniniams žmogaus kūno poslinkiams registruoti. Kadangi tiek kvėpavimas atsispindi krūtinės ląstos pasikėlimuose, tiek mechaninė širdies veikla atsispindi širdies pulsacijose, stebėdami šiuos poslinkius laike galime apskaičiuoti žmogaus KD ir ŠSD.

2. Tyrimo metodologija

2.1. Radaro signalų modeliavimas

Buvo sukurtas radaro signalo modelis. Remiantis [37] šaltiniu, atspindėtas mikrobangų signalas gali būti modeliuojamas remiantis (2) lygtimi:

$$S(t, \tau) = \sum_{n=1}^K p_n(t, \tau) + p_v(t, \tau) \quad (2)$$

Kur $p_n(t, \tau)$ – mechaninis krūtinės ląstos judėjimas, pulsavimas. $p_v(t, \tau)$ – tai kiti liekamieji arba pašaliniai kūno judesiai kurie užteršia mūsų naudingąjį signalą. Kadangi radaru matuojame atstumą, mums aktualus atstumo kitimo radaro atžvilgiu, signalas. Patys gyvybinių parametrų judesiai yra sudaryti iš skirtingų dažnių harmoninių svyravimų, jie gali būti modeliuojami kaip suma sinusoidinių signalų. Kvėpavimo ritmas gali būti modeliuojamas kaip sinusoidinis svyravimas aplink 0 judėjimo tašką, o širdies ritmo signalas gali būti modeliuojamas kaip pulsuojantis ir į 0 judėjimo tašką grįžtantis signalas. Todėl krūtinės judesiai gali būti modeliuojami (3) lygtimi:

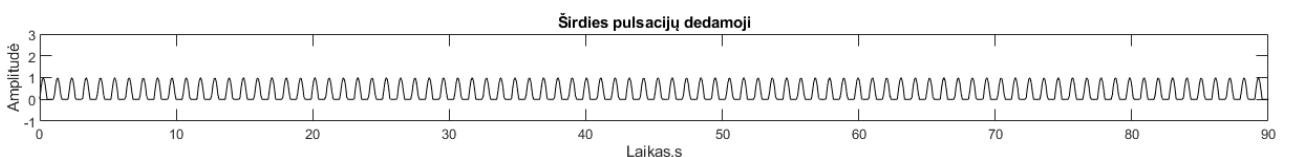
$$\tau_{krūtinės} = \tau_1 + \sum_i a_h^i \rho_h(t) + \sum_i a_b^j \sin(jf_b t + \varphi_b) \quad (3)$$

Kur τ_1 yra atstumas nuo radaro iki krūtinės, kuris modeliuojamame signale atsispindės kaip nuolatinės dedamosios elementas, f_b – kvėpavimo ritmo dažnis, φ_b – kvėpavimo signalą modeliuojančios sinusoidės fazė. $\rho_h(t)$ yra pulso dedamoji, modeliuojanti širdies pulsacijas. a_h^i ir a_b^j yra kvėpavimo signalą ir širdies pulsacijų signalą modeliuojančių funkcijų amplitudės. Kuriamame radarų atstumo kitimo signalo modelyje kvėpavimo metu esantiems krūtinės judesiams modeliuoti buvo pasirinkta sinusoidė, remiantis [37] šaltinio duomenimis (13 pav.).



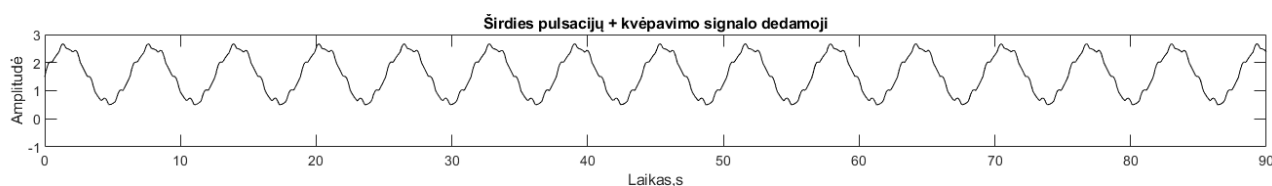
13 pav. Kvėpavimo harmoninis signalas, kai nustatytas 10k/min įkvėpimų dažnis, amplitudė 2mm, pradinė fazė 0°

Širdies pulsacijų krūtinės judesiams modeliuoti pasirinkti pulsai, kurie gauti imant teigiamus sinusoidinio signalo pusperiodžius (14 pav.).



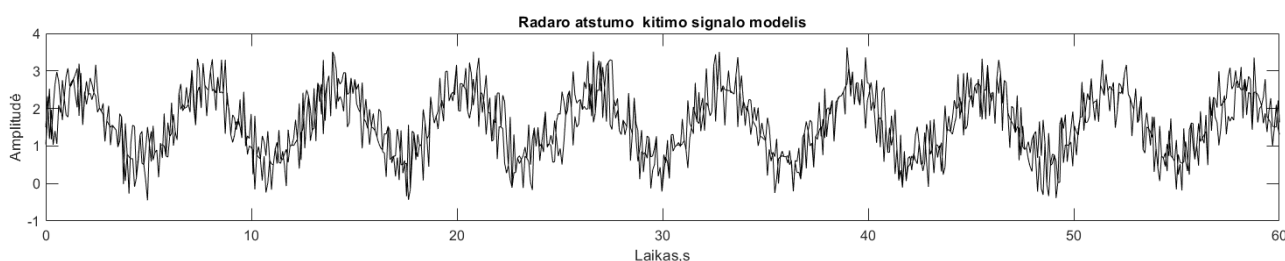
14 pav. Širdies pulsacijų signalas, kai nustatytas 60k/min pulsų dažnis

Šie signalai sudėti, pagal (3) formulę, taip pat pasirinktas τ_1 atstumas nuo radaro iki krūtinės 1,5m. sudėjus šiuos signalus gautas 15 paveikslėlyje pavaizduotas signalas.

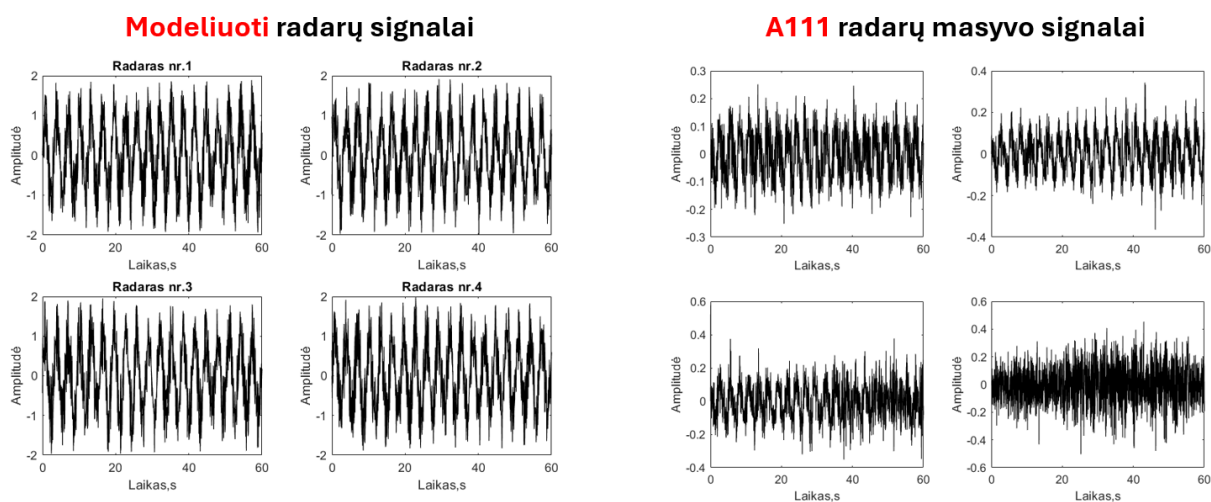


15 pav. Širdies pulsacijų ir kvėpavimo dedamųjų signalas

Prie 15 paveikslėlyje pavaizduoto signalo, norint modelyje įvertinti kūno judesius, radaro integriniame grandyne esančių stiprintuvų triukšmą, šiluminį triukšmą, prie signalo buvo pridėta Gauso normaliojo pasiskirstymo triukšmo dedamoji. Taip pat galime modeliuoti ir radarų masyvo signalus kartodami šį modelį tiek kartų kiek radarų masyve yra radarų. Galutinis sumodeliuotas signalas pavaizduotas 16 paveikslėlyje, modelio palyginimas su realiais radarų masyvo gaunamais signalais atvaizduotas 17 paveikslėlyje.



16 pav. Radarų atstumo kitimo signalo modelis

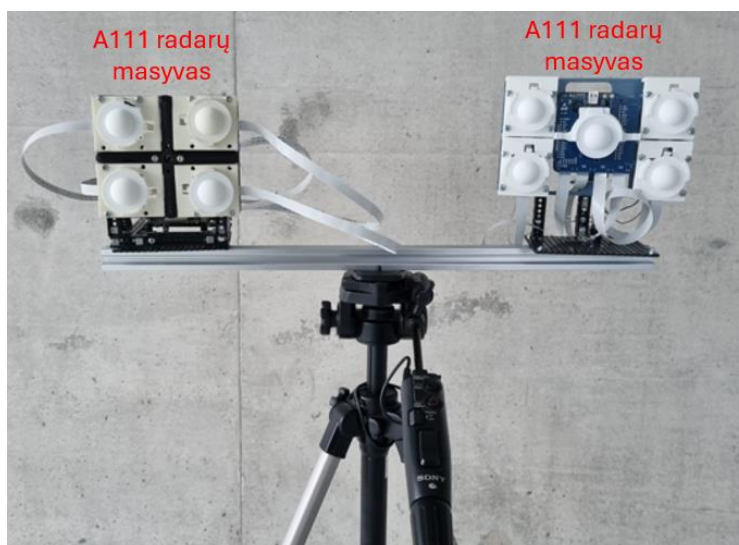


17 pav. Radarų masyvo atstumo kitimo signalų modelis (kairėje), palygintas su realiais radarų gaunamais atstumo kitimo signalais (dešinėje)

2.2. Radarų masyvo konfigūracija eksperimentų metu

Eksperimento metu buvo naudojami du radarų masyvai sudaryti iš skirtingo skaičiaus radarų ir skirtingų radarų modulių. Buvo naudoti A121 ir A111 („Acconeer“, Lundas, Švedija) radarų moduliai. A111 radarų masyvą sudaro keturi moduliai, A121 radarų masyvą sudaro 5 moduliai. Abu

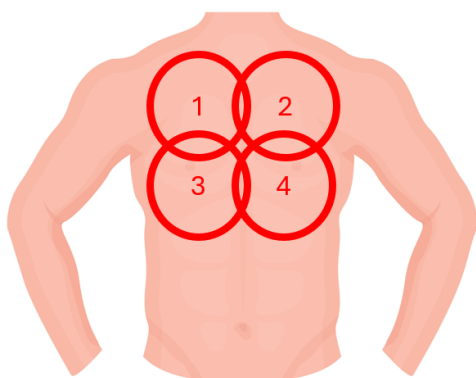
šie radarai priskiriami impulsinių koherentinių radarų grupei. Radarų masyvai pritvirtinti prie aliuminio profilio. Pats radarų masyvo tvirtinimas yra atspausdintas pasinaudojant 3D spausdinimo technologija. Kad eksperimentų metu turėtume galimybę reguliuoti aukštį ir posvirį, kas leidžia mums tiksliai nutaikyti radarus į tiriamojo krūtinę, buvo pasirinkta radarus montuoti ant trikojo fotoaparato stovo (18 pav.).



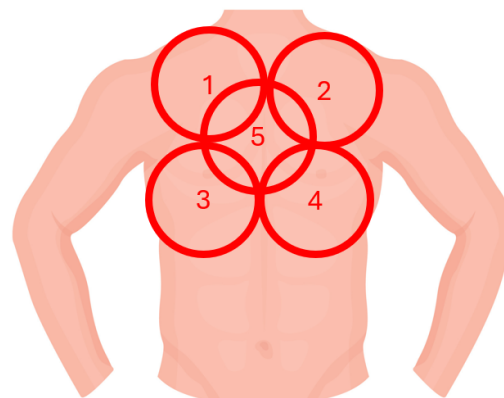
18 pav. Radarų masyvai naudoti eksperimentų metu

Radarų moduliai masyve yra sumontuoti skirtingais pasvirimo kampais, kad matuojamas plotas užimtų kuo didesnę plotą ant tiriamojo kūtinės, taip pat, kad matavimas būtų atliekamas keliuose taškuose. Taip galėsime pasirinkti geriausios kokybės signalą apdorojimui, kitus galbūt panaudoti signalų apdorojimui. Taip bus išnaudojamas radarų masyvo privalumas, kad turime ne vieną matuojamą tašką ir papildomus duomenis galime panaudoti signalų apdorojimo algoritme (19 pav.).

A111 radarų masyvo matuojami taškai



A121 radarų masyvo matuojami taškai



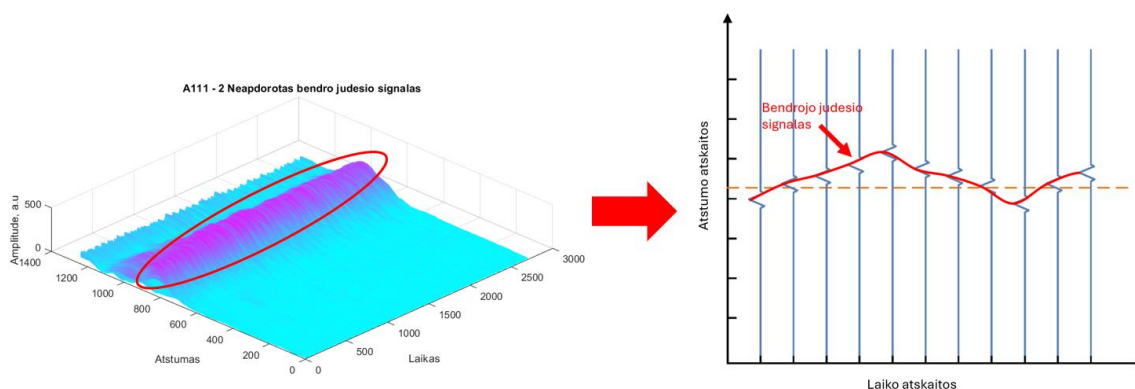
19 pav. Apytikslis atvaizdavimas, kaip A111 ir A121 radarų masyvų radarai yra nutaikyti į tiriamojo krūtinę. Skaičiai apskritimuose indikuoja radaro modulio numerį, apskritimai – matuojamus taškus. Kairėje – A111 radarų masyvas, dešinėje A121 radarų masyvas

2.3. Bendras signalų apdorojimo algoritmas

2.3.1. Bendrojo judesio iš radaro signalų išskyrimas

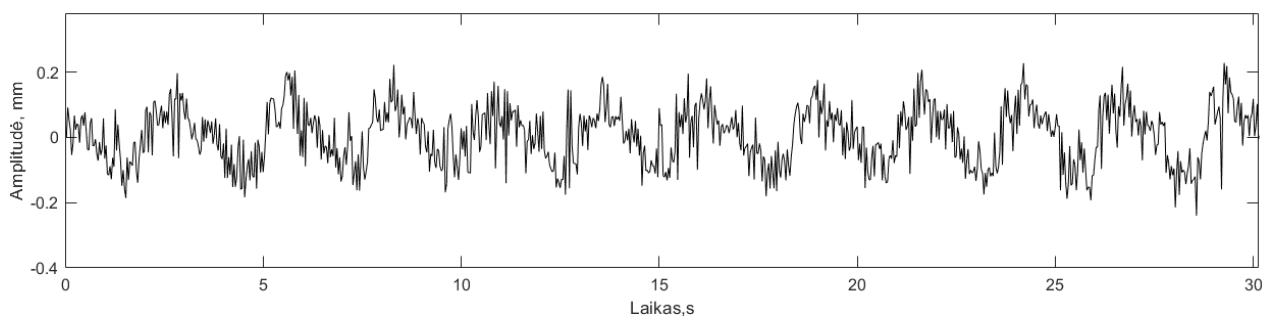
Matavimo metu iš radarų masyvo yra gaunamas duomenų paketas kuriame yra jau ankstesniuose skyriuose aprašyti IQ duomenys, kurie fazių skirtumo laikine išraiška atspindi išmatuotą atstumą.

Kadangi turime 30 kadrų per sekundę įrašymo dažnį, turime 30 atstumo atskaitų per sekundę. Vienoje atstumo atskaitoje turi atskirus išmatuotus mažesnius atstumo atskaitos taškus, kurie savo amplitude rodo atsispindėjusį signalą. Jei priešais radaro masyvą nėra jokio objekto x atstume, atsispindėjusio signalo amplitudė bus maža, o jei bangos sklidimo kelyje yra elektromagnetines bangas atspindintis objektas, turėsime ir didelę atsispindėjusio signalo amplitudę. Tokiu principu yra formuojama 2D matrica, kurios eilutės yra po kiekvieno radaro išsiųsto impulso atėjusio atspindžio signalo atskaitos laike („greitasis laikas“), nusakančios atstumo atskaitas (žinant elektromagnetinių bangų sklidimo greitį), stulpeliai yra laikas („lėtasis laikas“, diskretiškai nusakomas radaro impulsų pasikartojimo periodu), o reikšmės esančios stulpeliuose ir eilutėse – atsispindėjusio signalo amplitudė (20 pav.).



20 pav. Bendro judesio signalo išskyrimas iš radaro signalo atskaitų

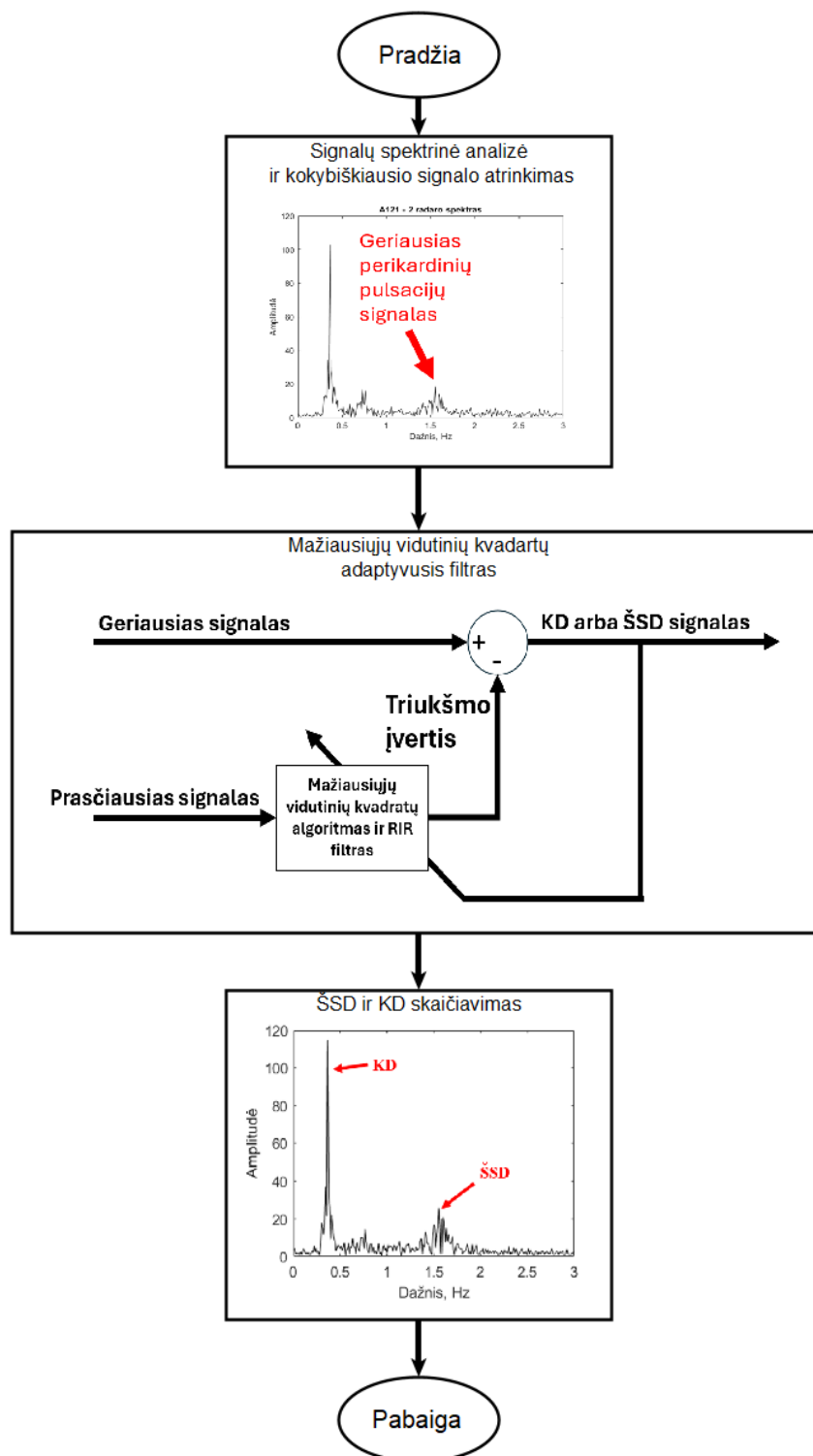
Buvo panaudotas radarų modulių gamintojo „Acconeer“ algoritmas [48], kuris išskiria bendrąjį judesio signalą, t.y. atstumo kitimo signalą radaro atžvilgiu šis signalas bus toliau apdorojamas ir filtruojamas siekiant išskirti kvėpavimo bei širdies pulsacijų signalus ir iš jų apskaičiuoti ŠSD ir KD. Šio signalo pavyzdys pateiktas 21 pav.



21 pav. Radaro A111 masyvo matavimo metu surenkami duomenys (30 sekundžių bendro judesio signalo iškarpa)

2.3.2. Mažiausiųjų vidutinių kvadratų adaptyvusis filtras

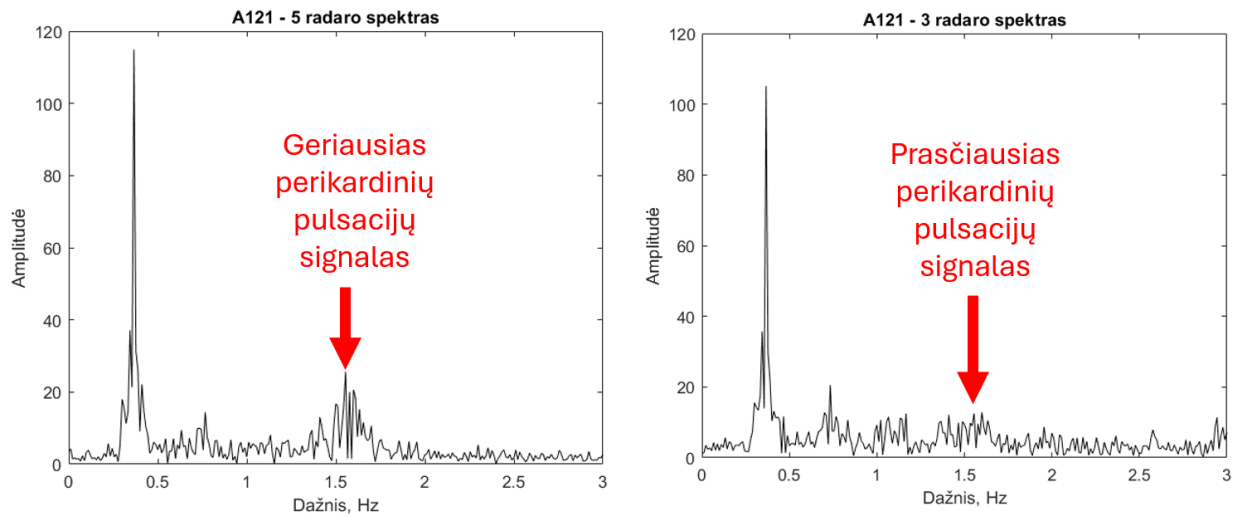
Tolimesniam radaro signalų apdorojimui buvo pasirinktas mažiausiųjų vidutinių kvadratų adaptyvusis filtras, darant prielaidą, kad užregistruotame radaro signale esantys triukšmai neturi pastovių dažniųjų ir laikinių charakteristikų – jos kinta laike. Algoritmo pagrindinis tikslas yra iš bendro judesio arba bendro atstumo kitimo signalo išfiltruoti du signalus – kvėpavimo metu esantį žemo dažnio krūtinės ląstos judesį ir širdies pulsacijų judesį. Išfiltravę šiuos signalus galėsime apskaičiuoti KD ir ŠSD. Kad būtų paprasčiau paaiškinti pasiūlytą radaro signalų apdorojimo algoritmą, jį galime suskirstyti į 3 dalis (22 pav.).



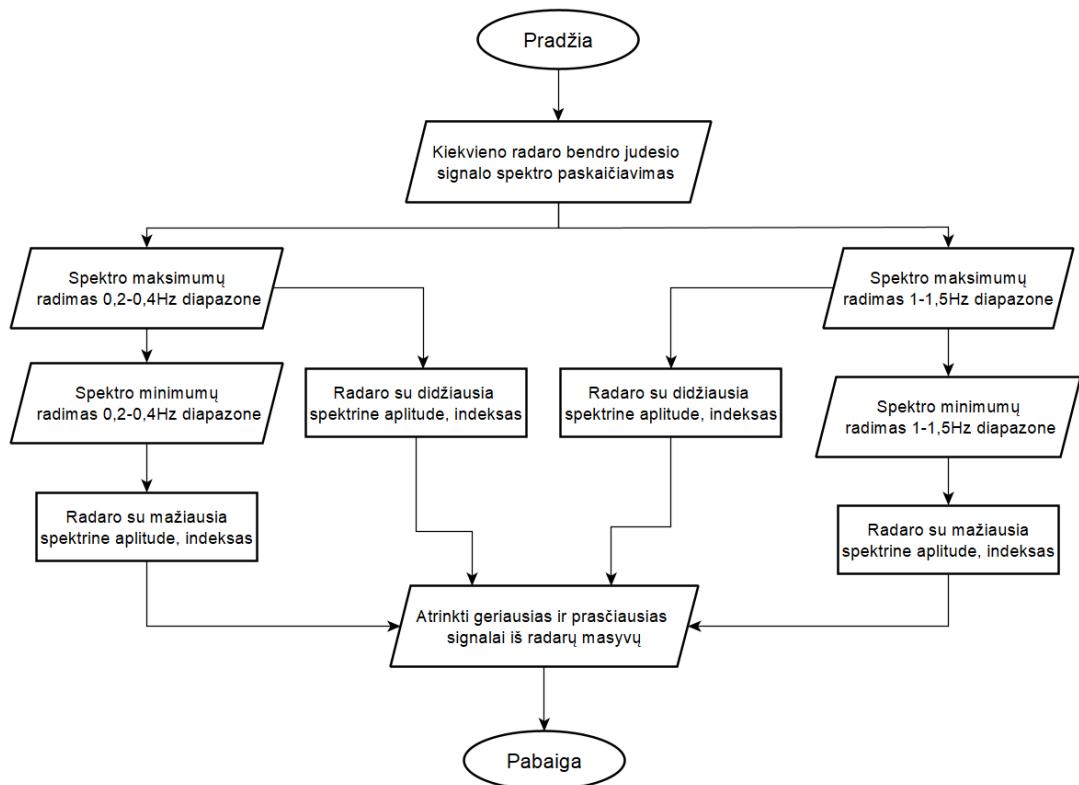
22 pav. Bendras signalų apdorojimo algoritmas

Algoritmo paaiškinimui supaprastinti, bus paaiškintas ŠSD apskaičiavimas. KD apskaičiavimui algoritmas yra analogiškas, skiriasi tik naudingo signalo išskyrimo dažnių diapazonai, kurie atitinkamai buvo pritaikyti KD apskaičiavimui. 1 algoritmo dalyje, kurią pavadiname signalų spektrine analize ir kokybiškiausio signalo atrinkimu, pasinaudodami radarų masyvo teikiamu privalumu, kad duomenys yra renkami nuo skirtingų tiriamojo krūtinės taškų vienu metu, t.y. lygiagrečiai laike, išsirenkame du signalus kurie bus naudojami tolimesniam apdorojimui. Pagrindinis kriterijus pagal kurį buvo pasirinkti signalai tai yra didžiausias matomas atstumo pokytis širdies

susitraukimų dažnio diapazone. Tai buvo atlikta apskaičiuojant kiekvieno radaro greitąją Furje transformaciją ir spektre 1-1.5 Hz diapazone išrenkant didžiausios amplitudės signalą, kuris yra iš vieno radaro esančio naudojamame radarų masyve (23 pav.). Šios algoritmo dalies schema yra pavaizduota 24 paveikslėlyje.



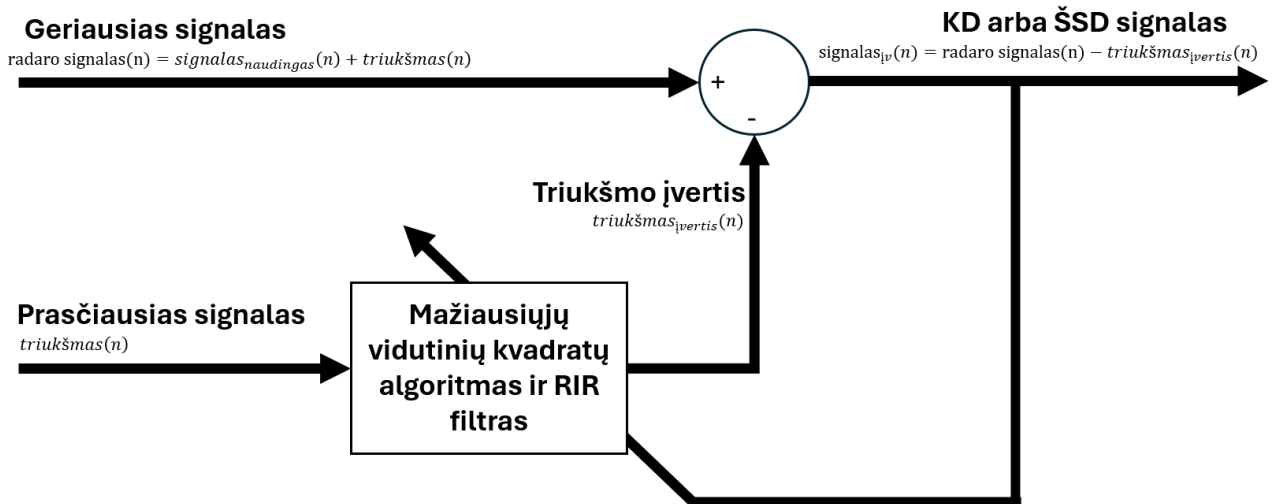
23 pav. Algoritmo atrinkti dviejų skirtingų radarų signalo spektrai, kurie vėliau bus naudojami adaptyviajame filtre



24 pav. Pirmosios algoritmo dalies schema

Dabar turime atrinktus du signalus – naudingąjį signalą, kuriame širdies pulsacijos geriausiai atsispindi užregistruotame signale, antrąjį – triukšmo signalą, kuriame širdies pulsacijos yra matomas prasčiausiai, tačiau darome prielaidą, kad jame yra užregistruoti įvairūs kiti judesio artefaktai, kurie taip pat yra ir mūsų atrinktame geriausiame širdies pulsacijų signale ir apsunkina jo filtravimą

įprastais filtrais. Šie du signalai siunčiami į 2 algoritmo dalį – mažiausiųjų vidutinių kvadratų adaptyvųjį filtrą. Du pagrindiniai šio filtro parametrai – filtro eilė ir konvergencijos (arba adaptacijos) koeficientas – buvo nustatyti eksperimentiškai, t.y. pakartotinai vykdant algoritmą ir keičiant adaptyvaus filtro parametrus taip, jog gautas apskaičiuotas ŠSD būtų kuo artimesnis išmatuotajam atraminiu metodu. Buvo pasirinkti adaptyvaus filtro koeficientai $M=100$, $\mu=0.01$, kadangi su šiais koeficientais buvo gaunami tiksliausi rezultatai.



25 pav. Adaptiviojo filtro schema

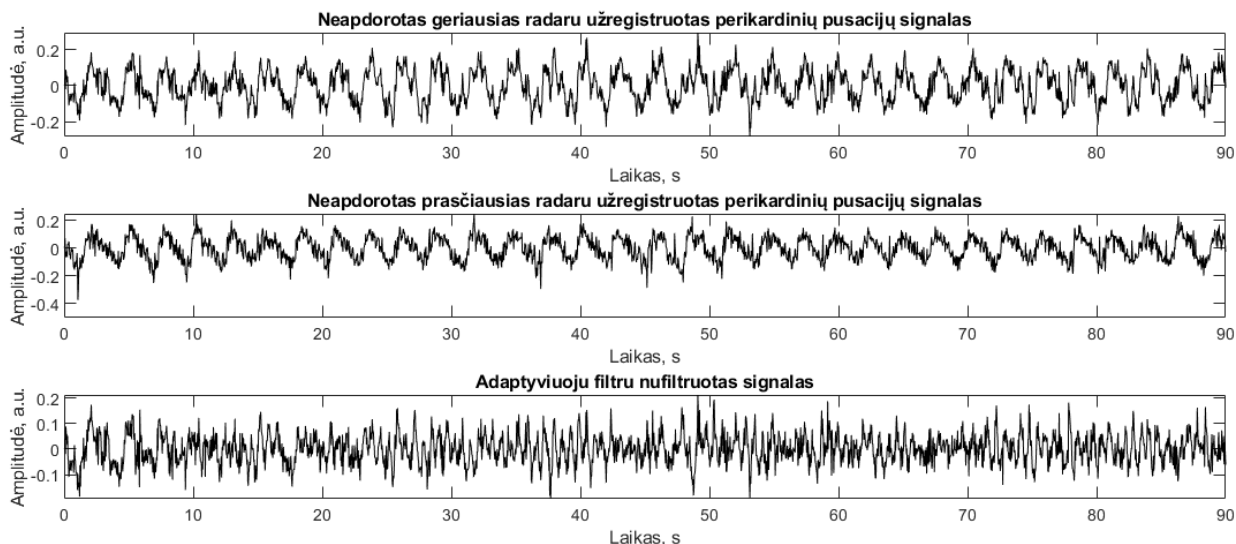
Mažiausiųjų vidutinių kvadratų algoritmas parenka ribotos impulsinės reakcijos (RIR) filtro koeficientus, iteraciniu būdu skaičiuodamas klaidos funkcijos gradientą. Tai yra vadinama greičiausio nusileidimo metodu (4 formulė):

$$x_{n+1} = x_n - \mu \frac{dJ}{dx} \quad (4)$$

Kur x_{n+1} yra naujasis ribotos impulsinės reakcijos filtro koeficientas naujai signalo atskaitai, x_n – esamas filtro koeficientas, μ – konvergencijos koeficientas, $\frac{dJ}{dx}$ – klaidos funkcijos gradientas. Jeigu klaidos funkcijos gradientas gaunamas neigiamas, naujas RIR koeficientas yra didinamas, jei gradientas yra teigiamas, koeficientas yra mažinamas. Taip šis algoritmas adaptuojasi prie kintančių triukšmų. „MatLab“ programiniame pakete filtro koeficientų atnaujinimas vyksta (5) formule:

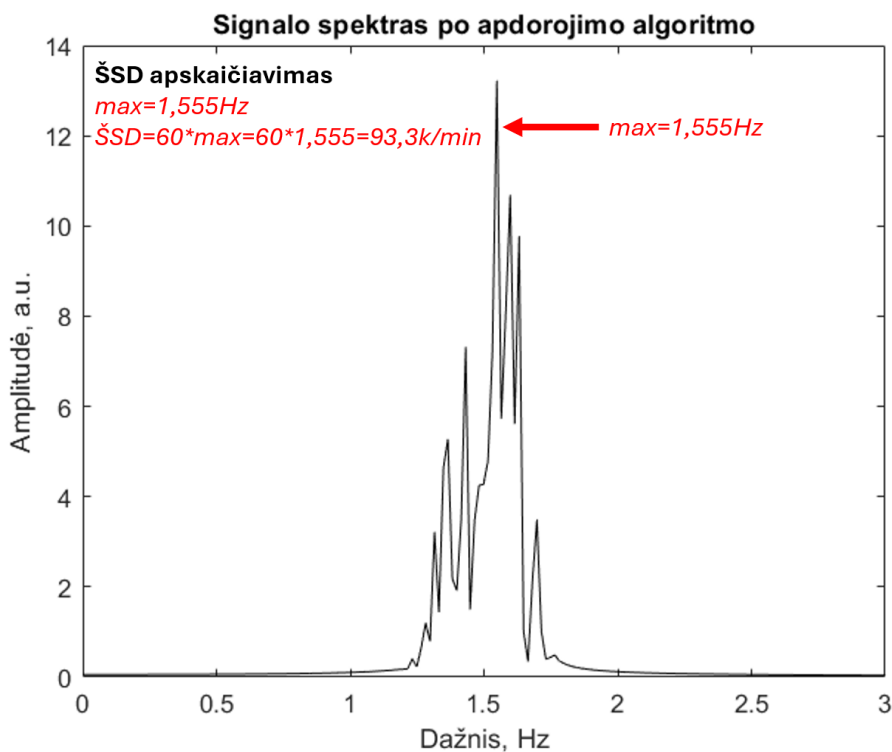
$$x_{n+1} = x_n + 2 \cdot \mu \cdot sig_{iv(n)} \cdot tr_{sig(n)} \quad (5)$$

Kur x_{n+1} yra naujasis ribotos impulsinės reakcijos filtro koeficientas naujai signalo atskaitai, x_n – esamas filtro koeficientas, μ – konvergencijos koeficientas, sig_{iv} – po RIR filtro nufiltruoto triukšmo signalo ir radaro signalo skirtumas, tr_{sig} – triukšmo signalo atskaita. Signalas buvo filtruojamas ir gautas apdorotas širdies pulsacijų signalo rezultatas matomas 25 paveikslėlyje, apačioje.



26 pav. Adaptiviam filtru naudojami signalai ir gautas signalas po filtravimo

Tuomet yra pereinama prie 3 algoritmo dalies – ŠSD skaičiavimo. Šiam tikslui, yra atliekama gauto širdies pulsacijų signalo Furjė transformacija ir gaunamas šio signalo spektras, kuriame surandama didžiausia spektrinė dedamoji. Jos dažnis padauginamas iš 60 ir taip gaunamas ŠSD kartais per minutę (27 pav.).



27 pav. Gauto širdies pulsacijų signalo spektras iš ŠSD apskaičiavimas

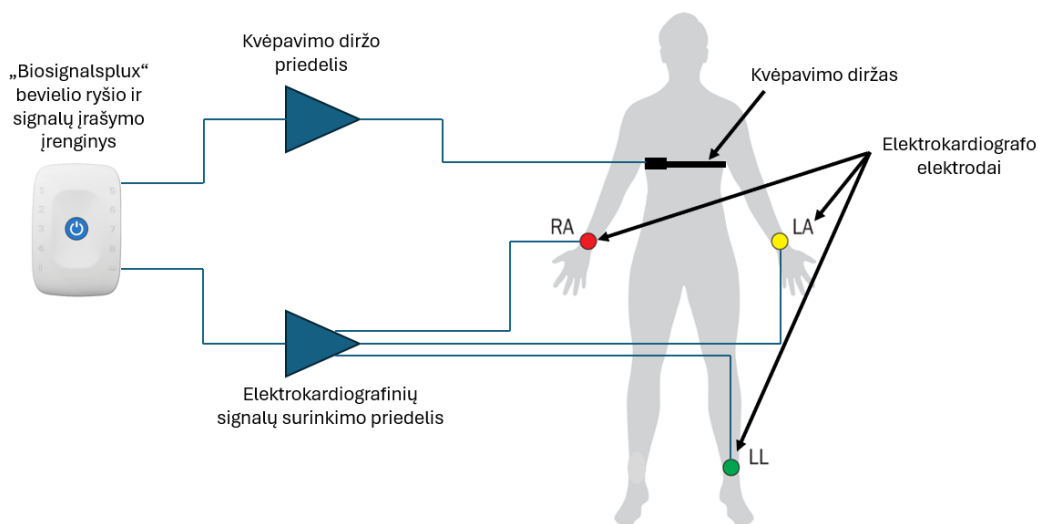
Bendra algoritmo schema su visomis dalimis pateikta 5 priede.

2.3.3. Atraminė duomenų surinkimas ir apdorojimas

Atraminiai duomenys buvo surinkti pasinaudojant įrenginiu „biosignalsplux“ („Plux“, Lisabona, Portugalija). „biosignalsplux“ yra biomedicinių signalų surinkimo ir įrašymo įrenginys, kuris fizinės

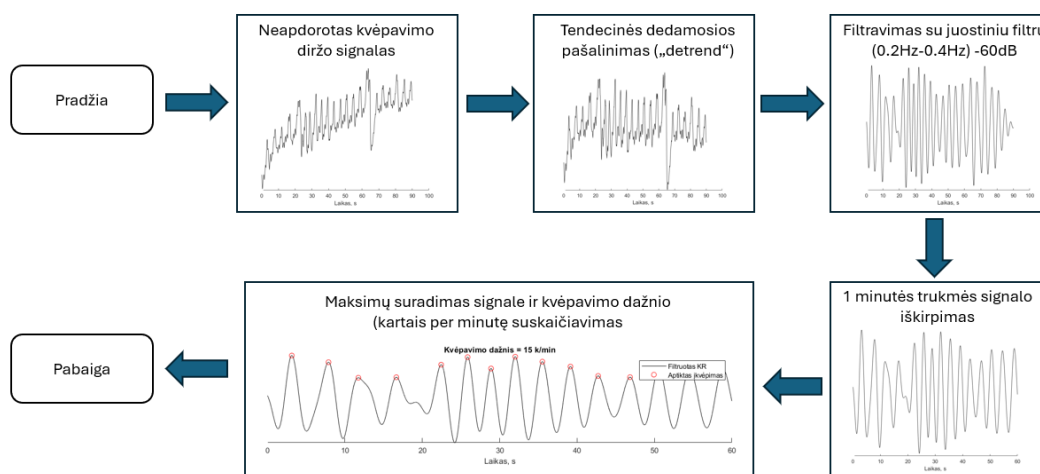
ir programinės įrangos pagalba geba registruoti, įrašyti ir įrenginiui pritaikyta programine įranga atvaizduoti biomedicininis signalus.

Šio tyrimo metu buvo pasinaudota elektrokardiogramos įrašymo galimybe, taip pat buvo panaudotas kvėpavimo diržas. Eksperimento metu buvo įrašinėjama 2-oji elektrokardiogramos derivacija naudojant tris elektrokardiogramos įrašymo elektrodus, o kvėpavimo diržas buvo uždėtas tiriamajam ant krūtinės ties horizontalia krūtinės vidurio linija (28 pav.).



28 pav. Atraminų signalų surinkimo sistema ir sensorių pozicija eksperimento metu

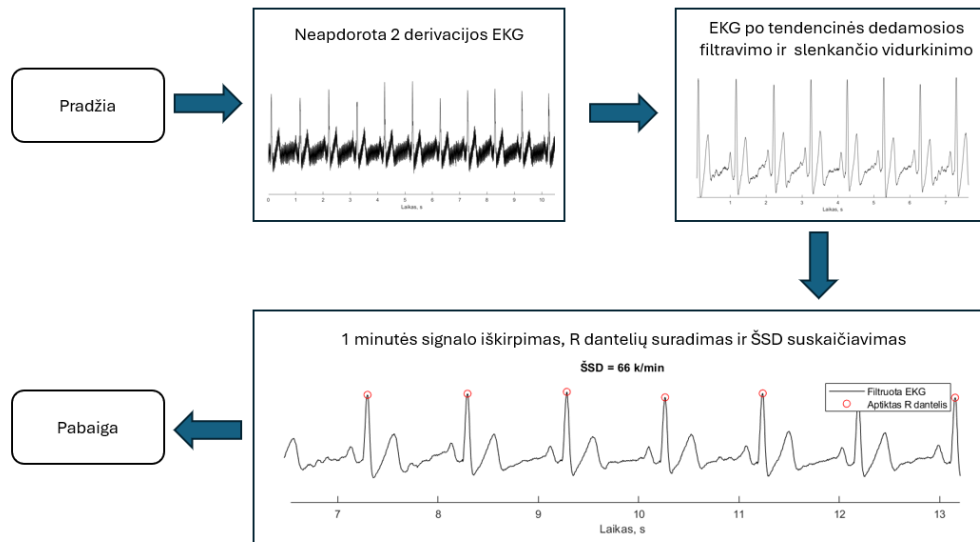
Signalai buvo registruojami bevieliu ryšiu ir įrašomi į kompiuterį. Tai buvo padaryta naudojant specialiai šiam tikslui pritaikytą „Python“ kalba parašytą duomenų surinkimo algoritmą. Duomenys surašomi į H5 struktūros failą. H5 faile struktūriškai duomenys padalinti į dvi grupes: elektrokardiogramą ir kvėpavimo signalą. Taip pat nuskaičius grupės metaduomenis yra nuskaitomi ir diskretizavimo dažnis bei signalų grupės pavadinimas. Šie duomenys buvo apdorojami „MatLab“ paketu pasitelkiant atskirus algoritmus kvėpavimo ir elektrokardiogramos signalų apdorojimui. Kvėpavimo signalo apdorojimo algoritmas yra pateikiamas 29 paveiksle.



29 pav. Atraminio kvėpavimo signalo apdorojimo ir kvėpavimo dažnio skaičiavimo algoritmas.

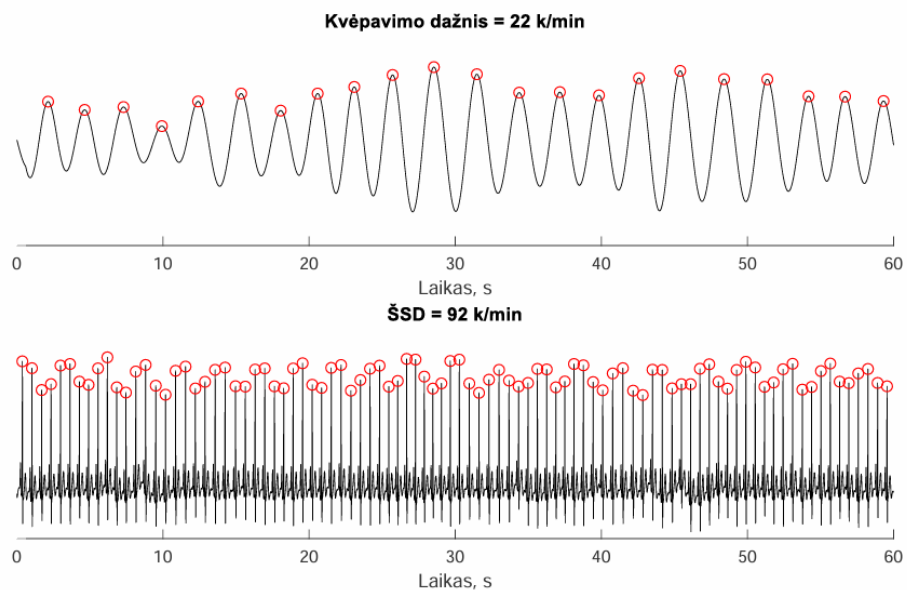
Nuskaitytas kvėpavimo signalas pirmiausia apdorojamas „MatLab“ paketo funkcija „detrend“ siekiant pašalinti žemo dažnio dedamąją signalė, kurį matome 21 paveiksle. Toliau signalas yra filtruojamas juostiniu filtru, kurio užtvariniai dažniai yra 0,2-0,4Hz. Šis dažnių diapazonas buvo

pasirinktas remiantis normaliu ramybės būsenoje esančio žmogaus kvėpavimo dažniu. Ne diapazone esančių dažnių slopinimas -60dB. Atlikus filtravimą juostiniu filtru, iš gauto signalo yra iškerpama 1 minutės signalo atkarpa, kuri tuomet yra perduodama į „MatLab“ paketo funkciją „findpeaks“. Šios funkcijos pagalba yra surandami signale esantys maksimumai, kurie reiškia kvėpavimus ir krūtinės pakilimą, kvėpavimo diržo ištempimą. Suskaičiavus šių maksimumų skaičių per minutę gausime kvėpavimo dažnį per minutę.



30 pav. Atraminio elektrokardiogramos signalo apdorojimo algoritmas

Antrasis eksperimento metu įrašytas atraminis signalas buvo elektrokardiograma. Ją nuskaitytus iš ankščiau aptarto rezultatų failo „MatLab“ paketu atliekamas 21 paveikslėlyje iliustruotas signalų apdorojimas. Pirmiausia elektrokardiograma yra apdorojama „detrend“ siekiant pašalinti žemo dažnio dedamąją. Siekiant sumažinti signale matomą mažos amplitudės triukšmą, kuris gali būti ir stiprintuvo įvestas triukšmas, kontakto triukšmas, buvo pasitelktas slenkančio vidurkinio filtras, kuris vidurkino kiekvieną diskretinio signalo reikšmę esančią atraminio signalo matricijoje. Atraminio signalo apdorojimo rezultatas atvaizduotas 31 paveiksle.

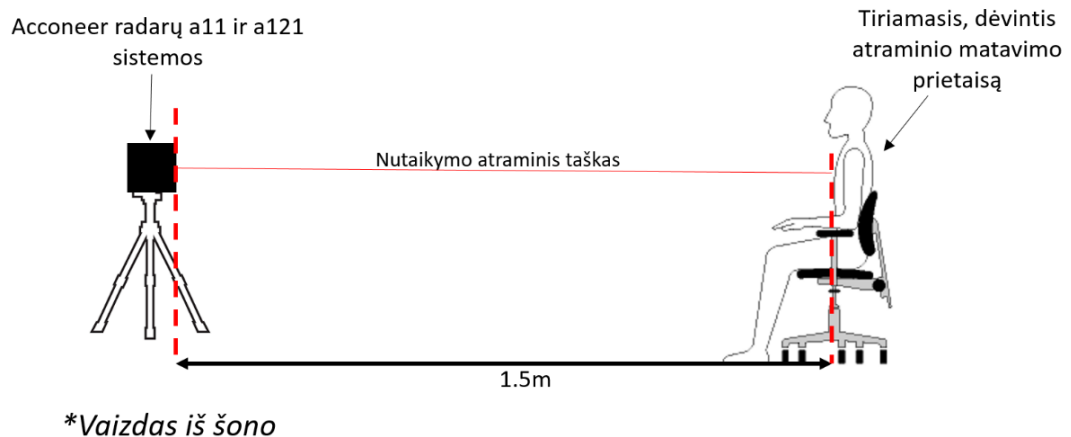


31 pav. Atraminio matavimų apdorojimo rezultatų rezultatas

2.4. Atlikto matavimo eksperimento eigos aprašymas

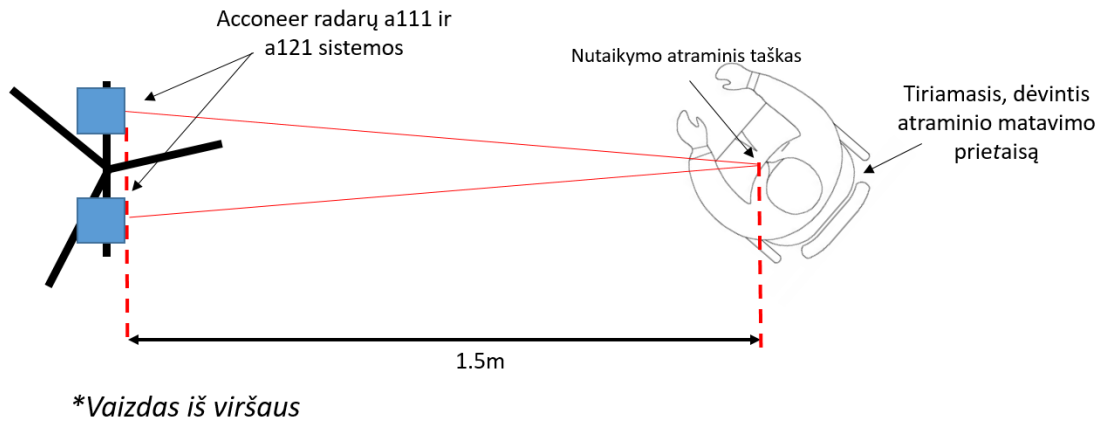
Eksperimentų atlikimo sklandumui ir struktūrizavimui užtikrinti buvo sudarytas eksperimento eigos planas. Juo vadovaujantis buvo atliekami matavimai su 17 tiriamųjų. Eksperimentas buvo atliekamas šia tvarka:

1. Tiriamajam uždedami „biosignalsplux“ įrenginio EKG matavimo elektrodai, kvėpavimo dažnio matavimo diržas.
2. Tiriamasis pasodinamas 1.5m priešais A121 5 radarų ir A111 4 radarų masyvus sumontuotus ant trikojo stovo (32 pav.). Nutaikymo atraminis taškas yra nustatomas taip, jog taikymosi atraminio taško matomos šviesos diodo taškelis šviestų į tiriamojo krūtinės centrą.



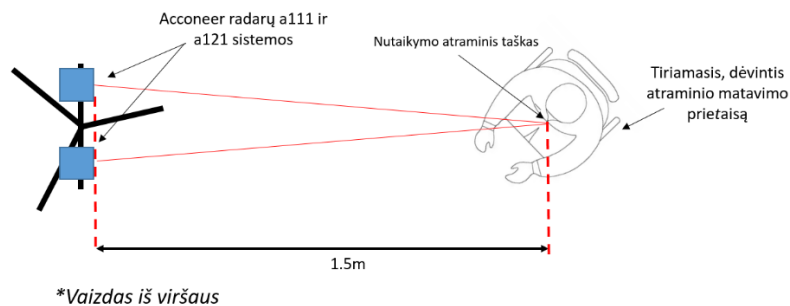
32 pav. Tiriamojo pozicija radarų atžvilgiu

3. Tiriamasis instruktuojamas sėdėti tiesiai priešais radarų sistemas, ramybės būsenoje, naudojantis kėdės atlošu (32 pav.)
4. Atliekamas 90 sekundžių trukmės signalų įrašymas tiriamajam sėdint ramybės būsenoje.
5. Tiriamojo paprašoma atitraukti nugarą nuo kėdės atlošo ir juo nesinaudoti, tiriamasis instruktuojamas matavimo metu daryti nedidelės amplitudės judesius (sukinėti kėdėje, dairytis, šiek tiek judinti kūną)
6. Atliekamas 90 sekundžių signalų įrašymas tiriamajam sėdint nesinaudojant kėdės atlošu ir atliekant minimalius judesius.
7. Tiriamasis pasisuka į dešinę savo pusę, kad jo krūtinė radaro atžvilgių būtų apie 30 laipsnių kampą, kūnas pilnai atsiremia į kėdės atlošą (33 pav.)



33 pav. Tiriamojo pozicija radarų atžvilgiu

9. Atliekamas 90 sekundžių signalų įrašymas tiriamajam sėdint 30 laipsnių kampu pasisukus į dešinę.
10. Tiriamasis grįžta į tiesią padėtį ir pasisuka į kairę savo pusę, kad jo krūtinė radaro atžvilgiu būtų apie 30 laipsnių kampu, kūnas pilnai atsiremia į kėdės atlošą (34 pav.)



34 pav. Tiriamojo pozicija radarų atžvilgiu

11. Atliekamas 90 sekundžių signalų įrašymas tiriamajam sėdint 30 laipsnių kampu pasisukus į kairę.
12. Tiriamasis instruktuojamas nulipti ir užlipti laiptais į 4 aukštą, tuomet pasodinamas priešais matuojančius radarus tiesiai, naudojasi kėdės atlošu (32 pav.).
13. Atliekamas 90 sekundžių signalų įrašymas tiriamajam sėdint ramybės būsenoje.

Įvykdžius šį planą, iš viso atlikti 5 skirtingi eksperimentai:

1. Eksperimentas nr.1. Tiriamasis sėdi ant kėdės ramybės būsenoje, stengiasi nejudėti, atsisukęs statmenai radarų masyvams.
2. Eksperimentas nr.2. Tiriamasis sėdi ant kėdės, atlieka minimalius kūno judesius, atsisukęs statmenai radarų masyvams.
3. Eksperimentas nr.3 Tiriamasis sėdi ant kėdės, ramybės būsenoje, pasisukęs kaire puse į radarų masyvą.
4. Eksperimentas nr.4. Tiriamasis sėdi ant kėdės, ramybės būsenoje, pasisukęs dešine puse į radarų masyvą.

5. Eksperimentas nr.5. Prieš atliekant matavimą tiriamasis atlieka fizinę užduotį. Tuomet matavimas atliekamas tiriamajam sėdint ant kėdės ramybės būsenoje, atsisukus statmenai radarų masyvams.

Šiais eksperimentų pavadinimais ir numeriais remsimės rezultatų skyriuje analizuodami matavimų rezultatus.

2.5. Duomenų bazė

Šio tyrimo metu matavimai buvo atlikti su darbuotojais bei studentais dirbančiais Kauno technologijos universiteto biomedicininės inžinerijos institute. Buvo pasirinkta 18 tiriamųjų (14 vyrų, 4 moterys) kurių vidutinis amžius 31.05 metų, vidutinis svoris 79.14kg, vidutinis ūgis 1,789m. Tiriamieji neturėjo jokių gretutinių širdies ir kraujagyslių, kvėpavimo takų ligų. Matavimai buvo atlikti uždaroje laboratorijoje, nedalyvaujant pašaliniais asmenimis, išskyrus tiriamąjį ir prie matavimo įrangos dirbantį ir matavimo duomenis renkantį studentą. Apdorojant eksperimentų rezultatus buvo atmestas vieno tiriamojo duomenų paketas dėl neatitikimo suplanuotam eksperimento protokolui.

2.6. Antro skyriaus apibendrinimas

Eksperimentams atlikti buvo pasirinkti „Acconeer“ gamintojo A111 ir A121 impulsinių koherentinių radarų moduliai, kurie pasižymi dideliu tikslumu matuojant atstumą - gaunama milimetrų eilės absoliutinė paklaida. Dėl šios savybės jie tinka matuoti nedidelius mechaninius poslinkius žmogaus kūne jam kvėpuojant ir judant krūtinės ląstai, taip pat širdies pulsacijų stebėsenai. Sudarius eksperimento protokolą, buvo atliekami 90s trukmės įrašai 5 skirtingose situacijose siekiant nustatyti, kokią įtaką matavimo rezultatams turi tiriamojo padėtis, judesiai, skirtingas KD ir ŠSD po fizinio krūvio. Rezultatai surinkti iš 17 tiriamųjų. Šie rezultatai buvo apdoroti pasiūlytu signalų apdorojimo algoritmu, kuris atrenka geriausią radaro masyvo užregistruotą signalą analizuodamas signalo spektrą ir apdorodamas jį pasiūlytu algoritmu, kurio viena iš pagrindinių dalių yra mažiausiųjų vidutinių kvadratų adaptyvusis filtras. Eksperimentų metu taip pat buvo matuojamas atraminis KD ir ŠSD signalas, kuris toliau bus laikomas tikruoju tiriamojo KD ir ŠSD ir bus naudojamas analizuoti radarų masyvais užregistruotus signalus.

3. Rezultatai

3.1. Rezultatų pateikimo paaiškinimas

Rezultatams atvaizduoti ir interpretuoti pasirinktos koreliacinės kreivės ir Bland-Altman diagramos, kurios buvo nubraižytos pasinaudojant jau sukurta funkcija „MatLab“ programiniame pakete [15]. Taip pat buvo pasitelkti statistiniai įverčiai, kurie leis objektyviau interpretuoti rezultatus, analizuoti matavimų paklaidas bei rasti priežastinius ryšius. Šie įverčiai pateikti lentelėse prie kiekvieno eksperimento kartu su grafiniu rezultatų aprašymu.

r^2 – determinacijos koeficientas. Šis įvertis leidžia kiekybiškai įvertinti, kaip aproksimuota kreivė atitinka atvaizduotus duomenų taškus. Galimos šio įverčio vertės yra tarp 0 ir 1. Kuo arčiau 1 yra r^2 reikmė, tuo geriau aproksimuota kreivė atitinka duomenų taškus.

SSE – kvadratinės paklaidos suma (angl. „sum of square error“), yra įvertis kuris leidžia kiekybiškai įvertinti, kiek nepaaiškintosios variacijos lieka po funkcijos aproksimavimo. Kuo didesnis šis įvertis, tuo daugiau variacijos liko neapibrėžta aproksimuota kreive.

RPC – atsikartojamumo koeficientas (angl. „reproducibility coefficient“) yra įvertis, kuris rodo didžiausią skirtumą, kuris labiausiai tikėtinas. Jis apskaičiuojamas standartinį nuokrypį padauginus iš 2.77. Kuo mažesnis šis įvertis, tuo didžiausias įmanomas skirtumas yra mažesnis ir matavimas yra tikslesnis.

CV – variacijos koeficientas (angl. „coefficient of variation“). Jis leidžia vertinti matavimo variaciją vidurkio atžvilgiu. Kuo mažesnis yra variacijos koeficientas, tuo mažesnė yra matavimo variacija ir tuo jis artimesnis vidurkiui.

95% pasikliautinis intervalas (angl. „confidence interval“) – tai yra intervalas, kuris apibrėžia matavimo tikslumą bet kartu ir atsikartojamumą. Žinodami 95% pasikliautinąjį intervalą galime būti 95% tikri, kad matavimai pateks į šio intervalo rėžius. Kuo mažesnis skirtumas tarp šio intervalo viršutinio ir apatinio rėžių, tuo radarų masyvų matavimas yra tikslesnis ir artimesnis tikrajam KD arba ŠSD.

Vidutinė paklaida – vidutinis skirtumas tarp tikrojo ir išmatuoto KD arba ŠSD. Kuo mažesnis šis įvertis, tuo mažesnius skirtumus turime tarp tikrojo ir radarų masyvais išmatuoto KD arba ŠSD.

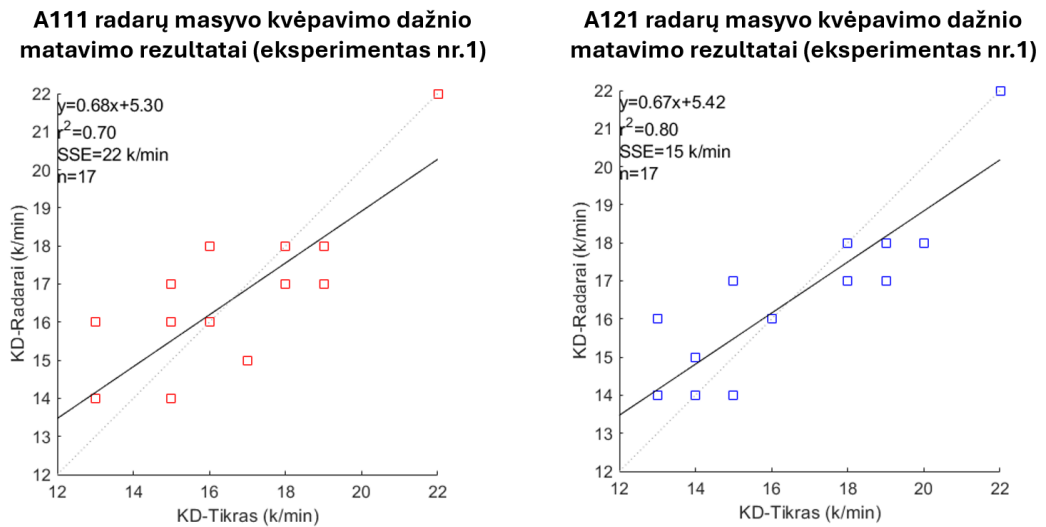
Pearson koreliacijos koeficientas – kiekybinė išraiška, paaiškinanti kaip du matavimai koreliuoja tiesine priklausomybe tarpusavyje. Galimos vertės yra nuo -1 iki 1. Šiuo atveju svarbesnis intervalas yra nuo 0 iki 1. Kuo arčiau 1 yra koreliacijos koeficientas, tuo stipresnė linijinė priklausomybė.

Kai kurie statistiniai įverčiai yra pateikti kartu su grafiniais rezultatų atvaizdavimais. Koreliacijos kreivių grafikuose punktyrine linija pažymėta ideali linijinė priklausomybė $y=x$, juoda linija pažymėta aproksimuota kreivė. Bland – Altman diagramose pažymėtas pasikliautinis intervalas bei vidutinė paklaida.

3.2. Rezultatai su duomenis, kai tiriamasis sėdi nejudėdamas

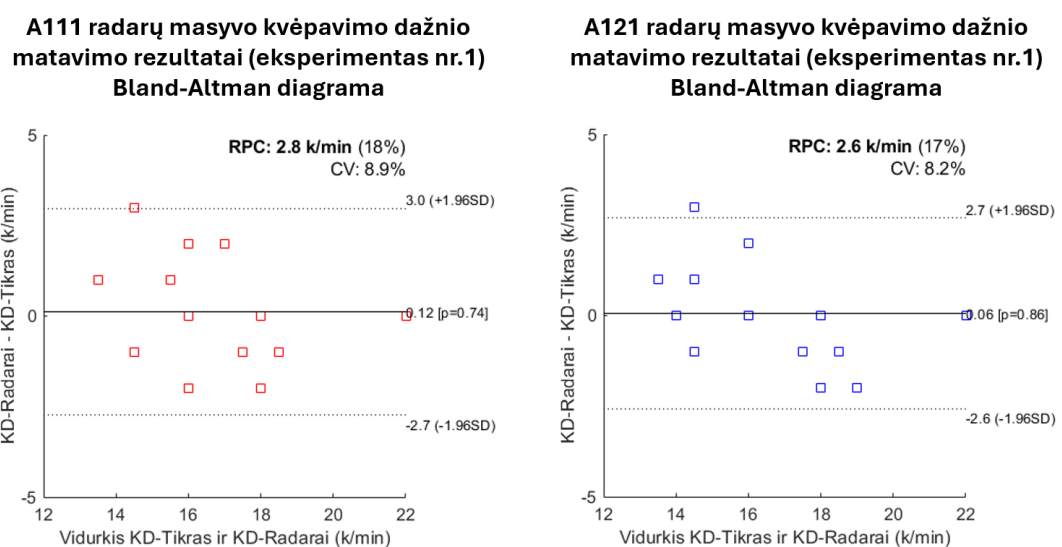
Šio eksperimento metu tiriamasis sėdėjo ramiai ir nejudėjo, nedarė jokių pašalinių judesių ir buvo instrukuotas kvėpuoti ramiai, tokiu tempu, koks jam yra priimtinas. Matavimai buvo atlikti su A111 ir A121 radarų masyvais. Radarų masyvų signalai buvo apdoroti 2.3.2 skyriuje aprašytu signalų

apdoravimo algoritmu. Atraminio įrenginio signalai buvo apdoroti 2.3.3 skyriuje aprašytu signalų apdoravimo algoritmu. Eksperimento rezultatai atvaizduoti 35, 36, 37, 38 paveikslėliuose bei 1 lentelėje.



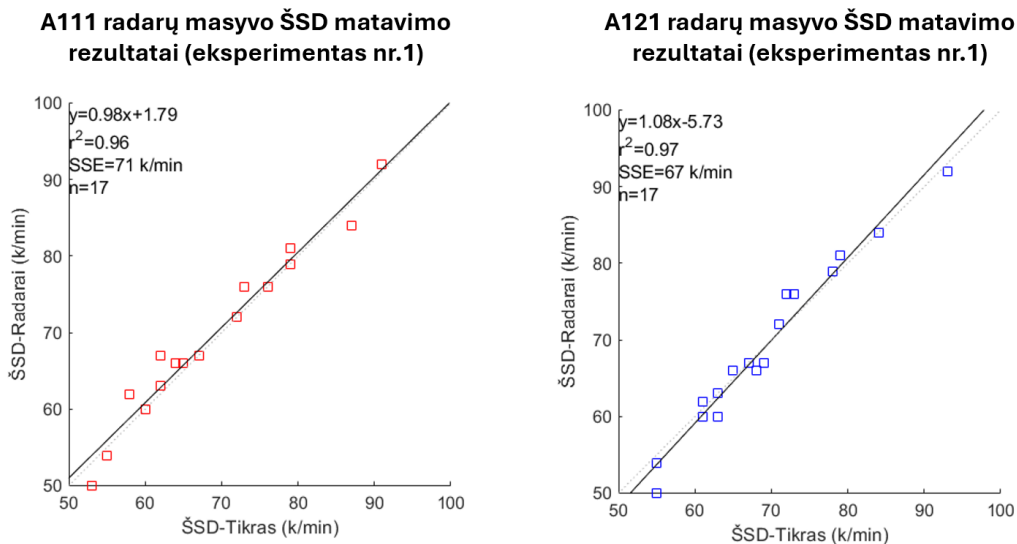
35 pav. Eksperimento nr.1 KD matavimo rezultatai atvaizduoti koreliacine kreive. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai

35 paveikslėlyje matome eksperimento nr.1 kairėje A111 ir dešinėje A121 radarų masyvų matavimo rezultatus atvaizduotus koreliacinėmis kreivėmis. Stebėdami A111 ir A121 matavimo rezultatus, galime pastebėti, kad abiem atvejais turime teigiamą tendenciją – todėl matavimai koreliuoja teigiama kryptimi. Taip pat vizualiai lygindami abiejų radarų matavimo rezultatų išsibarstymą galime pastebėti, kad A121 radarų masyvo atveju taškai yra mažiau išsibarstę ir yra artimesni $y=x$ priklausomybei, apskaičiuotas Pearson koreliacijos koeficientas $r=0,8951$ taip pat rodo stiprią linijinę priklausomybę. Šiuo atveju A111 radarų masyvo duomenų taškai vizualiai yra šiek tiek labiau išsibarstę, apskaičiuotas Pearson koreliacijos koeficientas yra $r=0,8345$ yra tik šiek tiek mažesnis negu A121, tačiau taip pat indikuojantis stiprią linijinę priklausomybę.



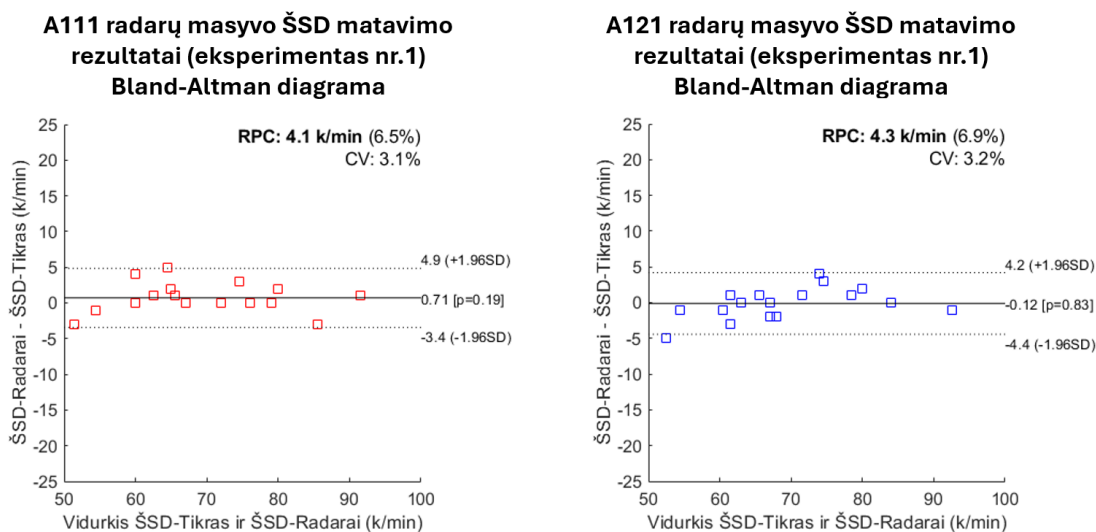
36 pav. Eksperimento nr.1 KD matavimo rezultatai atvaizduoti Bland-Altman diagramomis. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai

36 paveikslėlyje matome eksperimento nr.1 kairėje A111 ir dešinėje A121 radarų masyvų matavimo rezultatus atvaizduotus Bland-Altman diagramoje. Abiejų radarų masyvų matavimo atvejais stebime atsitiktinį rezultatų išsibarstymą. Tai indikuoja, kad proporcinės paklaidos abiem atvejais nestebime. A121 radarų masyvo KD matavimai 3 kartus sutapo su atraminiu matavimo rezultatu - 3 duomenų taškai išsidėstę ant 0 skirtumo linijos. A111 radarų masyvo atveju tokius taškus turime 2.



37 pav. Eksperimento nr.1 ŠSD matavimo rezultatai atvaizduoti koreliacine kreive. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai

37 paveikslėlyje matome A111 kairėje ir A121 dešinėje pusėje radarų masyvų ŠSD matavimo rezultatus gautus eksperimento nr.1 metu ir atvaizduotus koreliacine kreive. Čia taip pat stebime teigiamos krypties koreliaciją tarp atraminio ir abiem radarų masyvais išmatuoto ŠSD. Abiejų radarų masyvų atveju turime matavimo taškus išsidėsčiusius arti idealios linijinės priklausomybės $y=x$. A111 radarų masyvo atveju apskaičiuotas Pearson koreliacijos koeficientas yra $r=0,9817$, A121 atveju $r=0,9828$. Pastebime, jog abu apskaičiuoti koreliacijos koeficientai indikuoja apie stiprią linijinę priklausomybę, taip pat yra itin panašios vertės.



38 pav. Eksperimento nr.1 ŠSD matavimo rezultatai atvaizduoti Bland-Altman diagramomis. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai

38 paveikslėlyje atvaizduoti eksperimento nr.1 ŠSD matavimų rezultatai Bland-Altman diagramoje. Pastebime, kad rezultatai abiem radarų masyvų atvejais išsidėstę atsitiktine tvarka, tad proporcinės paklaidos nestebime. A111 radarų masyvo atveju yra 5 duomenų taškai išsidėstę ant 0 skirtumo linijos.

1 lentelė. Statistiniai eksperimento nr.1 įverčiai

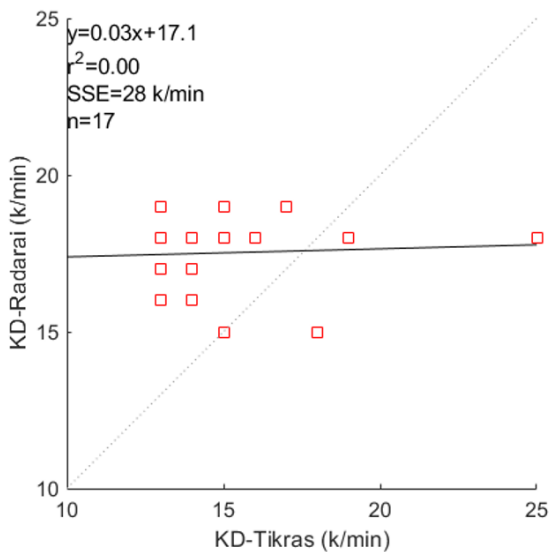
Eksperimentas Nr.1	Koreliacijos kreivė				Bland - Altman diagrama				
	y=ax+b		r ²	SSE, k/min	RPC k/min	CV, %	Pasikliautinis intervalas		Vidutinė paklaida
	a	b					-1,96σ	1,96σ	
KD matavimas A111	0,68	5,3	0,7	22	2,8	8,9	-2,7	3	0,12
KD matavimas A121	0,67	5,42	0,8	15	2,6	8,2	-2,6	2,7	0,06
SSD matavimas A111	0,98	1,79	0,96	71	4,1	3,1	-3,4	4,9	0,71
SSD matavimas A121	1,08	-5,73	0,97	67	4,3	3,2	-4,4	4,2	-0,12

1 lentelėje galime rasti eksperimento nr.1 metu gautų rezultatų statistinius įverčius. Pastebime, jog KD matavimo atveju, aproksimuodami tiesinės priklausomybės kreivę $y=ax+b$ abiem atvejais gauname panašius a ir b koeficientus – a koeficientai skiriasi tik per 0,01, o b skirtumas yra 0,12. Tai rodo, kad abiejų radarų masyvų KD matavimai gali būti aproksimuoti panašia tiesine priklausomybe. Panašūs rezultatai gaunami ir SSD matavimų atveju. Gaunami panašūs a koeficientai, tačiau pagrindinis skirtumas gali būti stebimas matant b koeficiento vertes – A121 atveju y ašį kreivė kerta -5,73 o A111 atveju 1,79. Determinacijos koeficientų skirtumas taip pat yra nedidelis, kas tik patvirtina panašios aproksimacijos teiginį, taip pat vertės 0,7 ir 0,8 rodo, jog aproksimuotos kreivės pakankamai gerai atitinka gautus rezultatus. Dar geresni rezultatai gaunami ŠSD matavimo atveju – r² reikšmės yra artimos 1. Kvadratinų paklaidų sumos matuojant KD A111 atveju yra 22k/min, A121 atveju 15k/min. Kadangi turime tiesinę aproksimaciją, tai yra pakankamai mažos paklaidų sumos, kurios negali būti paaiškintos aproksimuota kreive. Bland-Altman diagramos statistinius įverčius, galime pastebėti, kad tiek KD tiek ŠSD matavimo atveju, abiejų radarų vidutinė paklaida yra artima 0 – tai rodo, jog sisteminės paklaidos yra mažos ir artimos 0. Pasikliautiniai intervalai KD matavimo atveju yra -2,7k/min ir -2,6 k/min apatiniuose režiuose ir 3 k/min bei 2,7 k/min viršutiniuose režiuose. Tai rodo, kad 95% matavimo rezultatų matuojant abiem radarų masyvais patektų į panašius režius. Tą patvirtina ir atsikartojamumo koeficientai, kurie rodo didžiausio tikėtino matavimo skirtumo paklaidą.

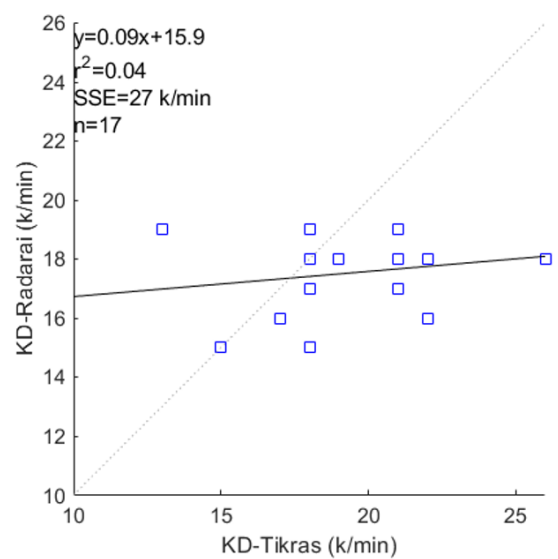
3.3. Rezultatai su duomenimis kai tiriamasis juda

Šio eksperimento metu tiriamasis sėdėjo ant kėdės, buvo instrukuotas žvalgytis, dairytis, sukinėjo galvą, atliko nedidelės amplitudės judesius taip įnešant į radaro signalus įvairių judesio artefaktų. Tai buvo atlikta darant prielaidą, jog normalioje būsenoje, pvz. dirbant kompiuteriu, sėdint kėdės, žmogus nėra visiškai ramus, bet atlieka įvairius natūralius kūno motorikos judesius. Matavimai buvo atlikti su A111 ir A121 radarų masyvais. Radarų masyvų signalai buvo apdoroti 2.3.2 skyriuje aprašytu signalų apdorojimo algoritmu. Atraminio įrenginio signalai buvo apdoroti 2.3.3 skyriuje aprašytu signalų apdorojimo algoritmu. Eksperimento rezultatai atvaizduoti 39, 40, 41, 42 paveikslėliuose bei 2 lentelėje.

A111 radarų masyvo kvėpavimo dažnio matavimo rezultatai (eksperimentas nr.2)



A121 radarų masyvo kvėpavimo dažnio matavimo rezultatai (eksperimentas nr.2)

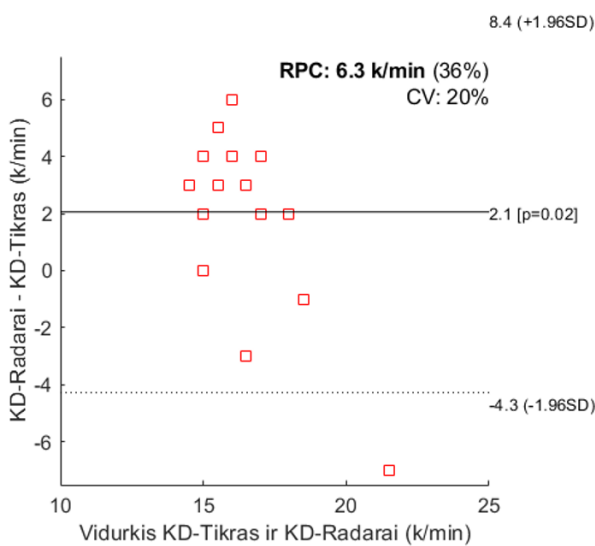


39 pav. Eksperimento nr.2 KD matavimo rezultatai atvaizduoti koreliacine kreive. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai

39 paveikslėlyje matome A111 ir A121 radarų masyvo KD matavimo rezultatus, atvaizduotus koreliacine kreive. Čia galime pastebėti, kad matavimų paklaidos yra pastebimai didelės ir atvaizduoti matavimai mažai koreliuoja su linijine priklausomybe. A111 radarų masyvo atveju apskaičiuotas Pearson koreliacijos koeficientas yra $r=0,0586$, o A121 radarų masyvo atveju $r=0,1927$. Tai yra mažą linijinę priklausomybę atspindintys koeficientai. Lyginant su šio eksperimento rezultatus su eksperimento nr.1 rezultatais pastebime, jog matavimo rezultatai išsidėstę vienoje vietoje, neišsibarstę.

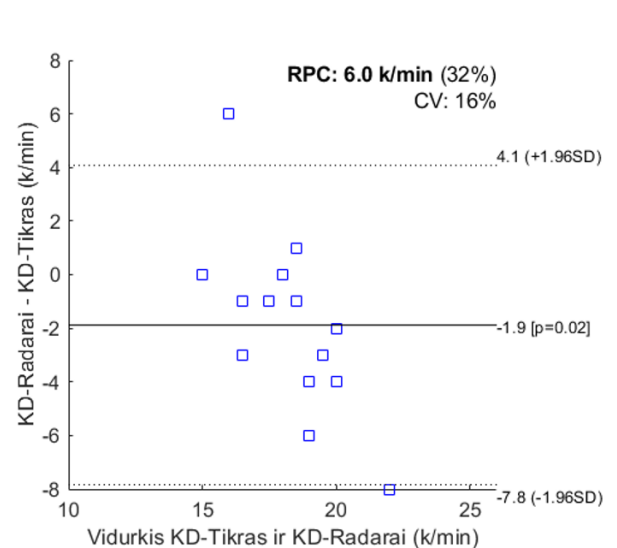
A111 radarų masyvo kvėpavimo dažnio matavimo rezultatai (eksperimentas nr.2)

Bland-Altman diagrama



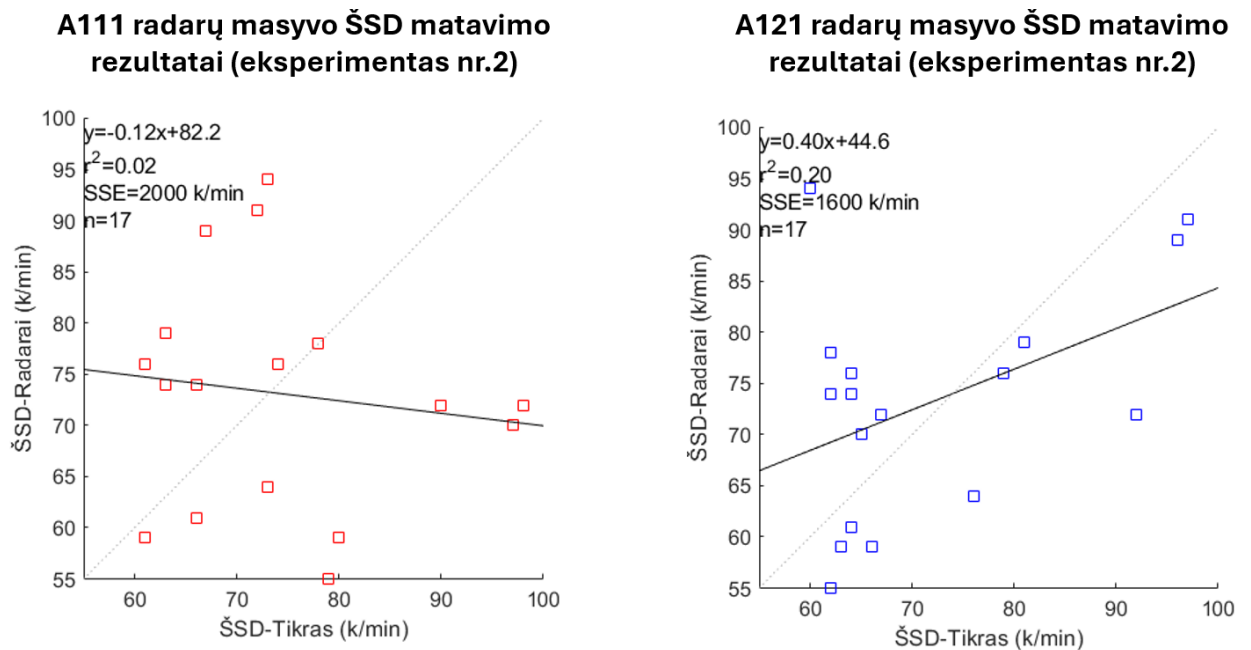
A121 radarų masyvo kvėpavimo dažnio matavimo rezultatai (eksperimentas nr.2)

Bland-Altman diagrama



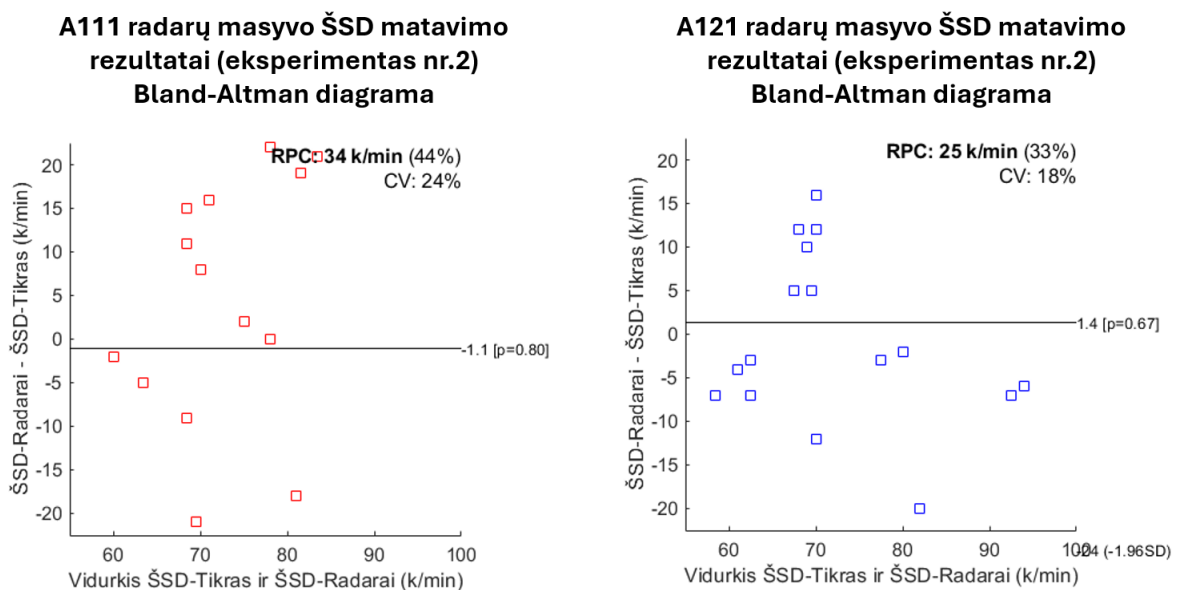
40 pav. Eksperimento nr.2 KD matavimo rezultatai atvaizduoti Bland-Altman diagramomis. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai

40 paveikslėlyje atvaizduoti eksperimento nr.2 KD matavimų rezultatai Bland-Altman diagramoje. Kaip matome, rezultatai išsidėstę atsitiktine tvarka ir proporcinės paklaidos čia nėra, tačiau rezultatai yra išsidėstę vienoje vietoje, koncentruotai. Lyginant šiuos rezultatus su eksperimento nr.1 rezultatais, šiuo atveju matavimų kurių skirtumas būtų 0 yra pastebimai mažiau.



41 pav. Eksperimento nr.2 ŠSD matavimo rezultatai atvaizduoti koreliacine kreive. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai

41 paveikslėlyje atvaizduoti eksperimento nr.3 ŠSD matavimų rezultatai. Kaip matome, matavimų rezultatai smarkiai išsibarstę, vizualiai sunku vertinti kokios krypties koreliaciją gauname. Apskaičiuoti Pearson koreliacijos koeficientai $r = -0,1267$ A111 radarų masyvo atveju ir $r = 0,4444$ A121 radarų masyvo atveju rodo, kad A111 radarų masyvo matavimas netgi įgauna neigiamos krypties koreliaciją. A121 radarų masyvo atveju turime vidutiniškai koreliuojančius atraminį ir radarų masyvo matavimus.



42 pav. Eksperimento nr.2 ŠSD matavimo rezultatai atvaizduoti Bland-Altman diagramomis. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai

42 paveikslėlyje atvaizduoti ŠSD eksperimento nr.2 matavimų rezultatai Bland-Altman diagramoje. Kaip galime pastebėti, gautas tikrai nemažas matavimo rezultatų išsibarstymas. Taip pat tiek A111 tiek ir A121 radarų masyvų rezultatų atžvilgiu galėtume išvelgti proporcinės paklaidos įtaką matavimo tikslumui, kadangi galime matyti piltuvėlio formą atitinkančius matavimų rezultatus. Su eksperimento nr.1 rezultatais palyginus vidutinės paklaidas, abiem radarų masyvų atvejais sisteminė paklaida gauta didesnė. Kitas įdomus aspektas yra A121 radarų masyvo rezultatai yra išsidėstę grupuoti, ties tam tikromis vidurkio ir matavimų skirtumo reikšmėmis.

2 lentelė. Statistiniai eksperimento nr.2 įverčiai

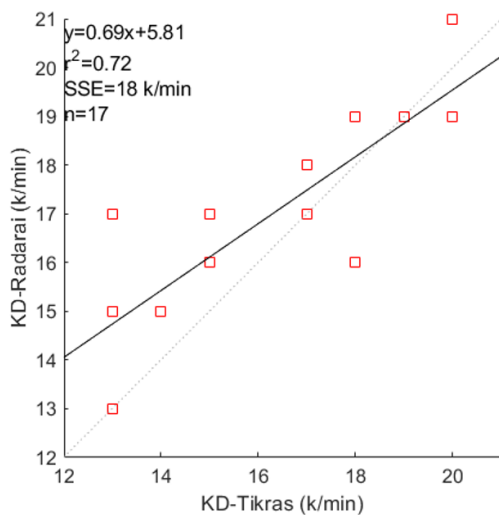
Eksperimentas Nr.2	Koreliacijos kreivė				Bland - Altman diagrama				
	y=ax+b		r ²	SSE, k/min	RPC k/min	CV, %	Pasikliautinis intervalas		Vidutinė paklaida
	a	b					-1,96σ	1,96σ	
KD matavimas A111	0,03	17,1	0	28	6,3	20	-4,3	8,4	2,1
KD matavimas A121	0,09	15,9	0,04	27	6	16	-7,8	4,1	-1,9
SSD matavimas A111	0,12	82,2	0,02	2000	34	24	-35	33	-1,1
SSD matavimas A121	0,4	44,6	0,2	1600	25	18	-24	26	1,4

2 lentelėje yra pateikiami eksperimento nr.2 rezultatų statistiniai įverčiai. KD matavimo rezultatuose galime pastebėti, kad gauti aproksimuojančios tiesinės funkcijos koeficientai yra tolimi idealiosios linijinės priklausomybės koeficientų vertėms. Tai patvirtina ir determinacijos koeficientai – A111 atveju yra gaunamas 0 vertė determinacijos koeficientas, kuris rodo, kad aproksimuota kreivei netinka aprašyti gautiesiems rezultatams. A121 atveju gauname $r^2=0,04$, kas taip pat reiškia, kad aproksimuota kreivė visiškai netinka aprašyti rezultatams. Analizuodami Bland-Altman diagramose gautus pasikliautinius intervalus, matome, kad 95% matavimų papultų net į -4,3 iki 8,4 k/min dydžio diapazoną, A121 atveju į -7,8 iki 4,1 dydžio diapazoną. Širdies susitraukimų dažnio matavimo atveju, gauti aproksimuojančios tiesinės funkcijos koeficientai taip pat yra tolimi teigiamai tiesiniai koreliacijai – A111 radarų masyvo atveju $a=0,12$, o $b=82,2$, A121 atveju $a=0,4$ $b=44,6$. Gautos didelės suminės kvadratinės paklaidos vertės, kurios taip pat rodo didelį likutinių neaprašytų kvadratinių paklaidų dydį. Bland-Altman diagramose gautieji pasikliautiniai intervalai taip pat buvo pakankamai platus. A111 radarų masyvo matavimai patenka į nuo -35 k/min iki 33 k/min režius, vidutinė paklaida -1,1 k/min, o A121 radarų masyvo atveju -24 k/min iki 25 k/min režius, kai vidutinė paklaida siekia 1,4k/min. RPC arba labiausiai tikėtini skirtumai taip patvirtina, jog šio eksperimento matavimo rezultatai turi dideles paklaidas. Šių paklaidų atsiradimo priežastys bus nagrinėjamos 4 skyriuje.

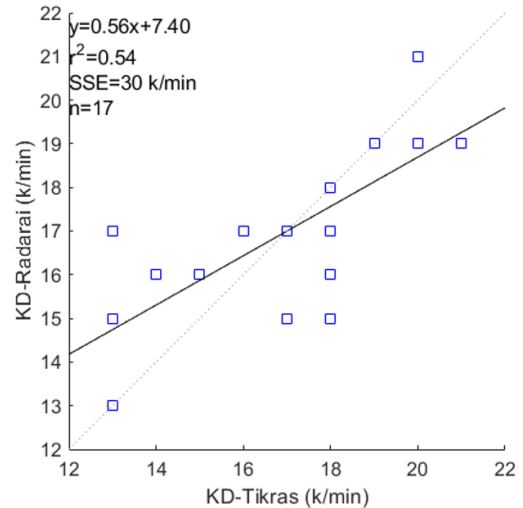
3.4. Rezultatai su duomenimis, kai tiriamasis pasisukęs 30 laipsnių kampu

Šio eksperimento metu tiriamasis sėdėjo ant kėdės pasisukęs kaire puse apytiksliai 30 laipsnių kampu į radarų masyvus, buvo instruktuoatas sėdėti ramiai ir kvėpuoti jam priimtiniu tempu. Matavimai buvo atlikti su A111 ir A121 radarų masyvais. Radarų masyvų signalai buvo apdoroti 2.3.2 skyriuje aprašytu signalų apdorojimo algoritmu. Atraminio įrenginio signalai buvo apdoroti 2.3.3 skyriuje aprašytu signalų apdorojimo algoritmu. Eksperimento rezultatai atvaizduoti 43, 44, 45, 46 paveikslėliuose bei 3 lentelėje.

A111 radarų masyvo kvėpavimo dažnio matavimo rezultatai (eksperimentas nr.3)



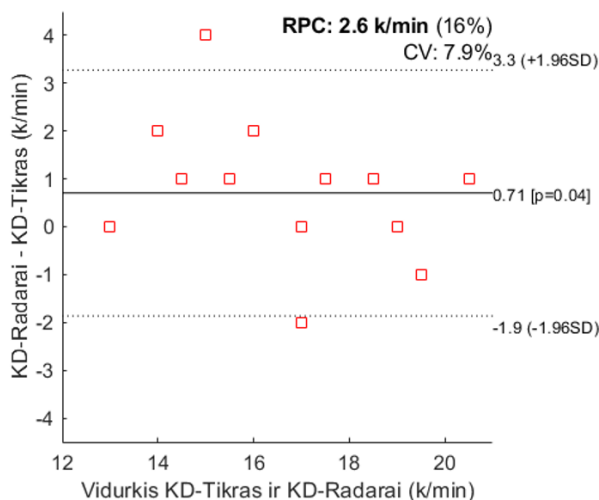
A121 radarų masyvo kvėpavimo dažnio matavimo rezultatai (eksperimentas nr.3)



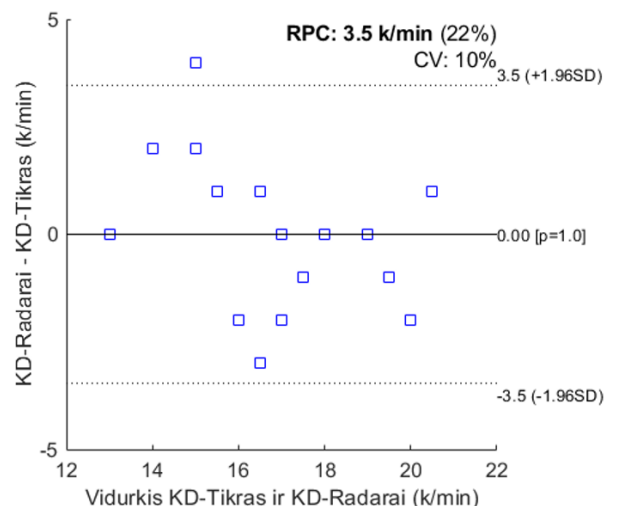
43 pav. Eksperimento nr.3 KD matavimo rezultatai atvaizduoti koreliacine kreive. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai

43 paveikslėlyje matome A111 ir A121 radarų masyvų eksperimento nr.2 KD matavimo koreliacines kreives. Čia pastebime, jog matavimai yra pakankamai išsibarstę, tačiau išlaikoma teigiama koreliacijos kryptis abiejų radarų masyvų matavimo atvejais. Apskaičiuotas Pearson koreliacijos koeficientas A111 radarų masyvų matavimo atveju yra $r=0,848$, o tai rodo, jog koreliacija su atraminiu matavimu yra didelė. Paskaičiavus Pearson koreliacijos koeficientą A121 radarų masyvo matavimams gauname $r=0,7337$. Tai rodo stipriai koreliuotus atraminį ir radarų masyvo matavimus, tačiau šiuo atveju koreliacija yra mažesnė negu A111 radarų masyvo atveju.

**A111 radarų masyvo kvėpavimo dažnio matavimo rezultatai (eksperimentas nr.3)
Bland-Altman diagrama**



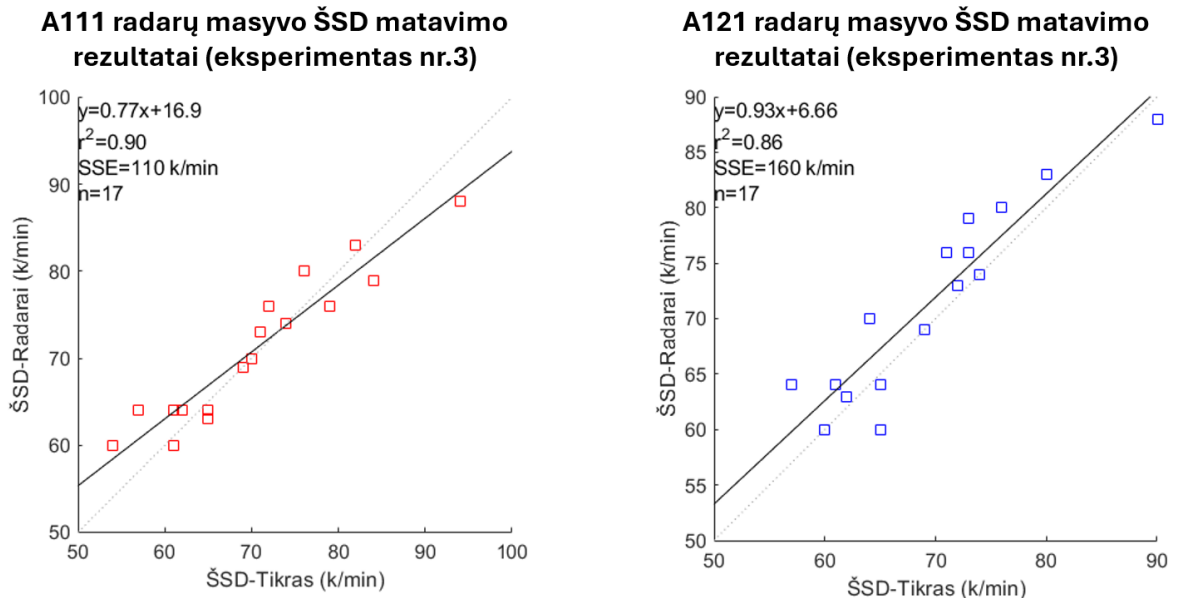
**A121 radarų masyvo kvėpavimo dažnio matavimo rezultatai (eksperimentas nr.3)
Bland-Altman diagrama**



44 pav. Eksperimento nr.3 KD matavimo rezultatai atvaizduoti Bland-Altman diagramomis. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai

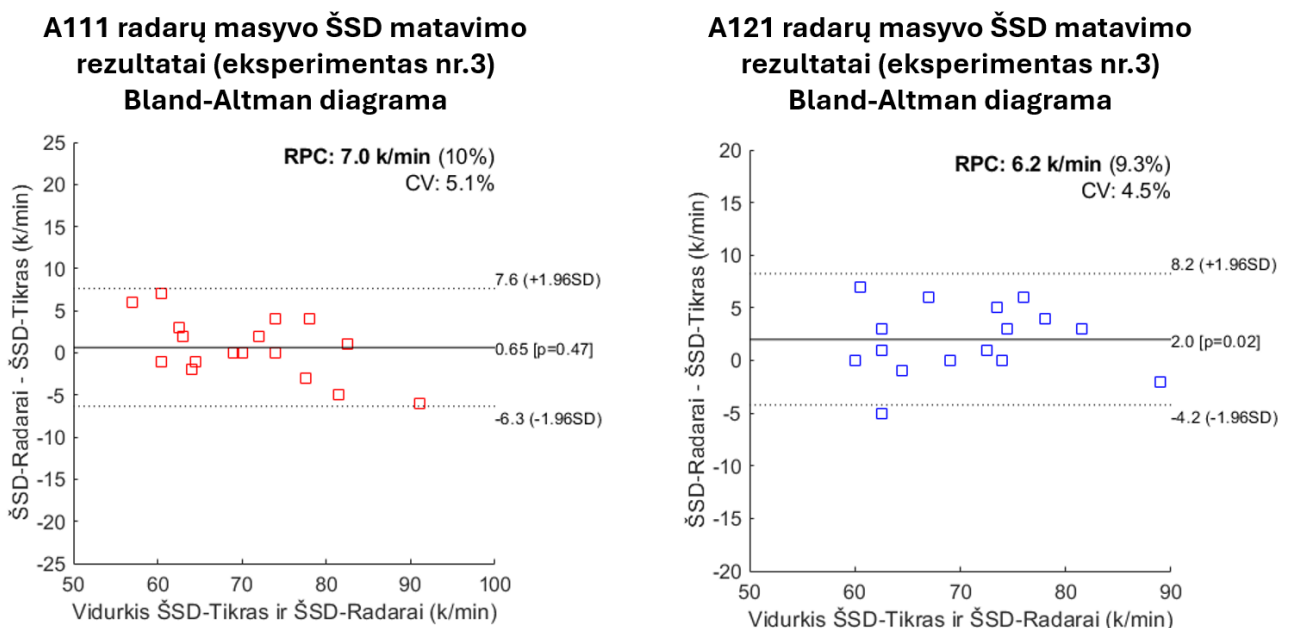
44 paveikslėlyje atvaizduoti eksperimento nr.3 KD matavimų rezultatai Bland-Altman diagramoje. Čia pastebime, kad gautieji abiem radarų masyvais gauti rezultatai yra tikslesni negu eksperimento nr.2 metu, tačiau galima pastebėti didesnę rezultatų išsibarstymą negu lyginant su eksperimento nr.1

rezultatais. Proporcinės paklaidos abiem atvejais nestebime. A121 radarų masyvo atveju turime net 4 matavimus, kai skirtumas tarp atraminio signalo ir algoritmo rezultato nesiskyrė, o vidutinis skirtumas yra 0 k/min.



45 pav. Eksperimento nr.3 ŠSD matavimo rezultatai atvaizduoti koreliacine kreive. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai

45 paveikslėlyje matome A111 ir A121 radarų masyvo eksperimento nr.3 ŠSD matavimo rezultatus, atvaizduotus koreliacine kreive. Pastebime, kad rezultatai išsibarstę arti idealiosios tiesinės priklausomybės. Pearson koreliacijos koeficientai A111 radarų masyvo atveju $r=0,9507$, A121 radarų masyvo atveju $r=0,9292$. Iš šių dviejų koeficientų galime teigti, jog atraminio matavimo rezultatai yra stipriai tiesiškai koreliuoti su abiejų radarų masyvų matavimų rezultatais. Taip pat galime pastbėti, kad A121 radarų masyvo atveju aproksimuojanti kreivė yra labai artima punktyrinei, idealiąją tiesinę priklausomybę vaizduojančiai tiesei.



46 pav. Eksperimento nr.3 ŠSD matavimo rezultatai atvaizduoti Bland-Altman diagramomis. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai.

46 paveikslėlyje atvaizduoti eksperimento nr.3 ŠSD matavimų rezultatai Bland-Altman diagramose. Kaip matome, matavimų rezultatai išsidėstę atsitiktine tvarka, proporcingų paklaidų nestebime. Vizualiai vertinant gautus rezultatus galime teigti, kad eksperimento nr.3 ŠSD matavimo rezultatai yra tikslesni negu eksperimento nr.2 gauti rezultatai, tačiau ne tokie tikslūs kaip eksperimento nr.1 metu gauti matavimų rezultatai.

3 lentelė. Statistiniai eksperimento nr.3 įverčiai

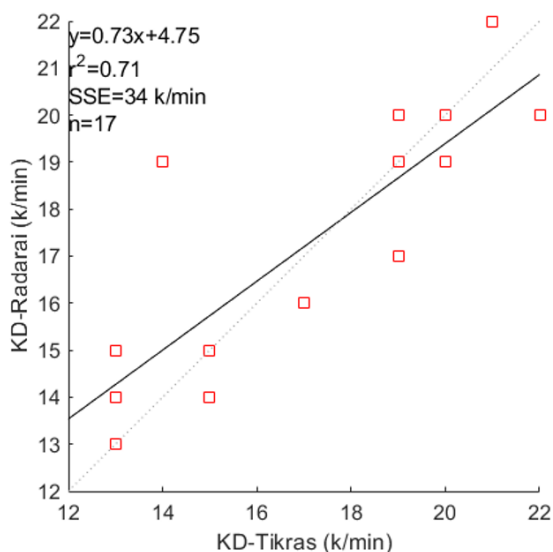
Eksperimentas Nr.3	Koreliacijos kreivė				Bland - Altman diagrama				
	y=ax+b		r ²	SSE, k/min	RPC k/min	CV, %	Pasikliautinis intervalas		Vidutinė paklaida
	a	b					-1,96σ	1,96σ	
KD matavimas A111	0,69	5,81	0,72	18	2,6	7,9	-1,9	3,3	0,71
KD matavimas A121	0,56	7,40	0,54	30	3,5	10	-3,5	3,5	0,00
SSD matavimas A111	0,77	16,9	0,9	110	7	5,1	-6,3	7,6	0,65
SSD matavimas A121	0,93	6,66	0,86	160	6,2	4,5	-4,2	8,2	2

3 lentelėje pateikti eksperimento nr.3 statistiniai įverčiai. Bendroje sumoje, visi statistiniai įverčiai rodo, kad gauti matavimo rezultatai yra tikslesni negu eksperimento nr.2, tačiau nežymiai mažiau tikslūs negi eksperimento nr.1 metu gauti rezultatai. Galime pastebėti, kad KD matavimo rezultatai pasižymi tiesine priklausomybe. Koeficientai r² gauti 0,72 A111 atveju rodo stiprią rezultatų tiesinę priklausomybę. A121 koeficientas r² gautas šie tiek mažesnis 0,54. Likutinė kvadratinė paklaida abiem atvejais yra nedidelė – 18k/min A111 atveju ir 30k/min A121 atveju. KD matavimo Bland-Altman diagramoje pastebime, kad vidutinė paklaida A121 radarų masyvo atveju yra lygi 0, kas rodo sisteminės paklaidos nebuvimą, o pasikliautinis intervalas yra nuo -3,5 iki 3,5. Tačiau šiek tiek geresnis rezultatas buvo gautas A111 radarų masyvo atveju, kai vidutinė paklaida nors ir yra 0,71k/min., tačiau pasikliautinio intervalo režiai yra nuo -1,9k/min iki 3,3k/min. ŠSD matavimas šio eksperimento metu taip pat pasižymėjo stipria tiesine priklausomybe. Gauti aproksimuojančios tiesės koeficientai įvertinti determinacijos koeficientų 0,9 ir 0,89 tik patvirtina egzistuojančią tiesinę priklausomybę. Šiuo atveju analizuojant Bland-Altman diagramas pastebime, kad A121 radarų masyvo rezultatai yra mažiau išsibarstę negu A111 radarų masyvo matavimų rezultatai – pasikliautinis intervalas A121 radarų masyvo atveju yra nuo -4,2k/min iki 8,2 k/min ir tai yra mažiau negu A111 radarų masyvo gautas režis nuo -6,3k/min iki 7,6k/min.

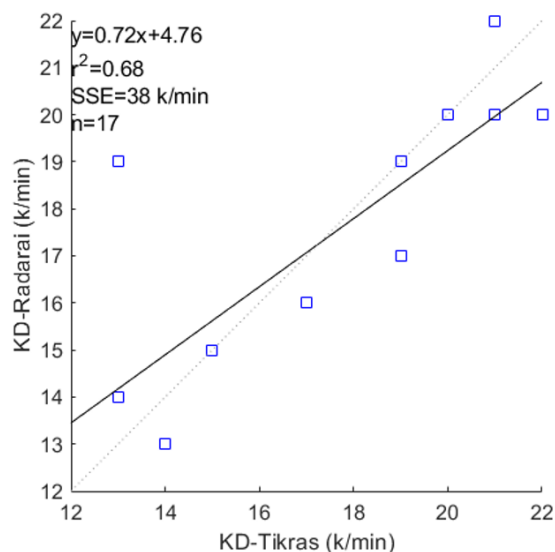
3.1. Rezultatai su duomenimis, kai tiriamasis pasisukęs 30 laipsnių kampu į kitą pusę

Šio eksperimento metu žmogus sėdėjo ant kėdės pasisukęs dešine puse apytiksliai 30 laipsnių kampu į radarų masyvus. Radarų masyvai buvo nutaikyti kiek įmanoma arčiau tiriamojo krūtinės vidurio linijos. Tiriamasis instrukuotas sėdėti ramiai, kvėpuoti jam priimtinu dažniu. Signalai buvo apdoroti tais pačiais signalų apdorojimo algoritmais aprašytais ankstesniuose eksperimentų rezultatų skyriuose. Rezultatai atvaizduoti 39, 40, 41, 42 paveikslėliuose.

A111 radarų masyvo kvėpavimo dažnio matavimo rezultatai (eksperimentas nr.4)



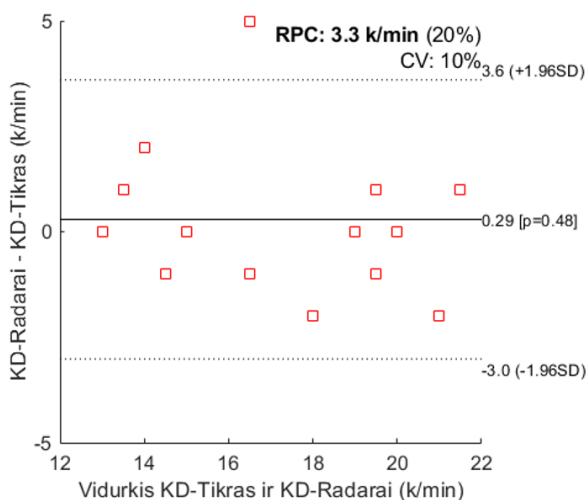
A121 radarų masyvo kvėpavimo dažnio matavimo rezultatai (eksperimentas nr.4)



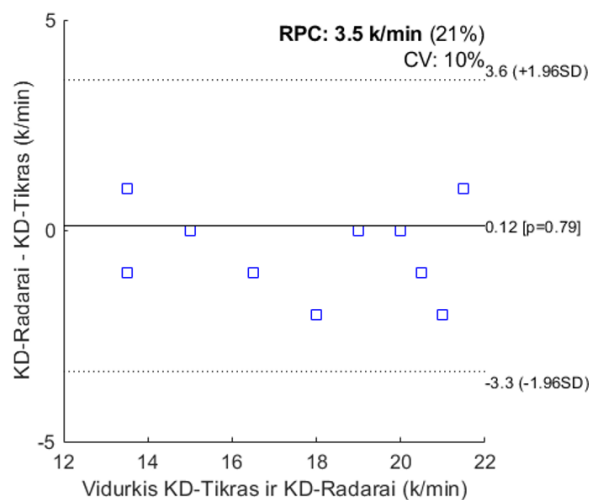
47 pav. Eksperimento nr.4 KD matavimo rezultatai atvaizduoti koreliacine kreive. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai

39 paveikslėlyje matome A111 ir A121 radarų masyvo eksperimento nr.4 KD matavimo rezultatus, atvaizduotus koreliacine kreive. Čia galime abiem radarų masyvo atvejais galime pastebėti, jog koreliacija tarp atraminio matavimo ir radarų masyvų matavimo yra teigiama, tai patvirtina ir Pearson koreliacijos koeficientai: A111 radarų masyvo atveju jis yra $r=0,8439$, o A121 radarų masyvo atveju jis yra $r=0,825$. Rezultatai yra šiek tiek nutolę nuo visišką tiesinę priklausomybę indikuojančios kreivės, itin didelių nuokrypių nestebime.

**A111 radarų masyvo kvėpavimo dažnio matavimo rezultatai (eksperimentas nr.4)
Bland-Altman diagrama**



**A121 radarų masyvo kvėpavimo dažnio matavimo rezultatai (eksperimentas nr.4)
Bland-Altman diagrama**

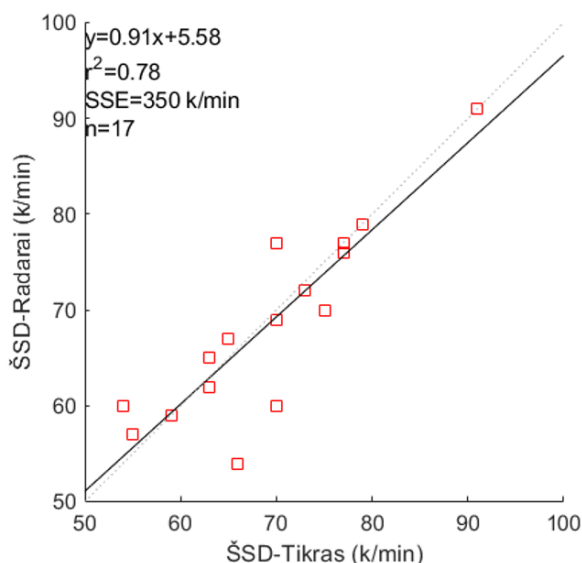


48 pav. Eksperimento nr.4 KD matavimo rezultatai atvaizduoti Bland-Altman diagramomis. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai

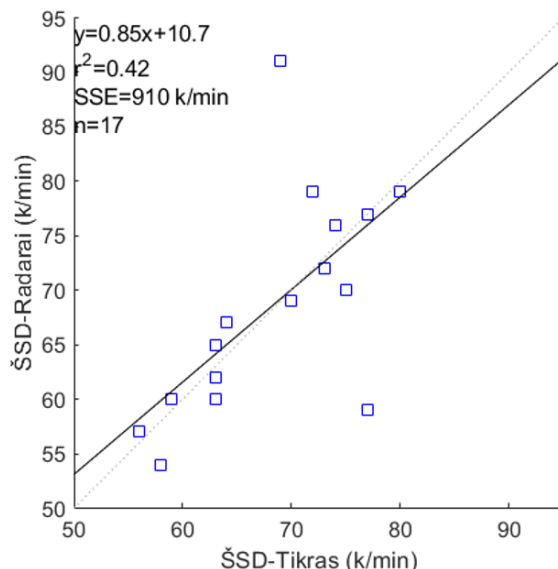
40 paveikslėlyje atvaizduoti KD matavimų rezultatai Bland-Altman diagramoje. Rezultatai yra išsibarstę atsitiktine tvarka, proporcinės paklaidos nestebime. Eksperimento nr.4 KD matavimo

rezultatai yra tikslesni negu eksperimento nr.2 metu gauti matavimo rezultatai, tačiau ne tokie tikslūs negu eksperimento nr.1 ar nr.3 metu gauti KD rezultatai.

A111 radarų masyvo ŠSD matavimo rezultatai (eksperimentas nr.4)



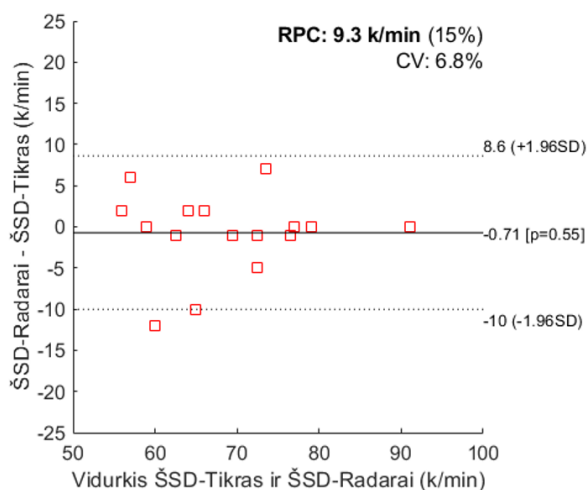
A121 radarų masyvo ŠSD matavimo rezultatai (eksperimentas nr.4)



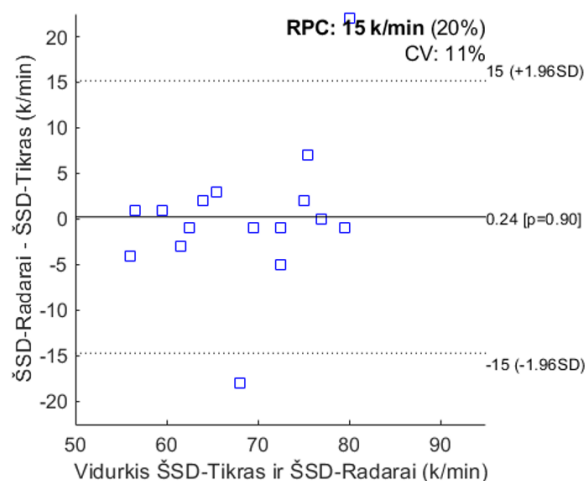
49 pav. Eksperimento nr.4 ŠSD matavimo rezultatai atvaizduoti koreliacine kreive. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai

41 paveikslėlyje matome A111 ir A121 radarų masyvo eksperimento nr.4 ŠSD matavimo rezultatus, atvaizduotus koreliacine kreive. Pearson koreliacijos koeficientai A121 radarų masyvo atveju $r=0,6498$, A111 radarų masyvo atveju $r=0,8817$. Tai rodo, kad A111 radarų masyvo atveju tiesinė priklausomybė yra didesnė negu A121 atveju. Taip pat įdomu, kad A121 radarų masyvo atveju turime du matavimus su pakankamai dideliu atotrūkiu nuo idealiosios linijinės priklausomybės.

**A111 radarų masyvo ŠSD matavimo rezultatai (eksperimentas nr.4)
Bland-Altman diagrama**



**A121 radarų masyvo ŠSD matavimo rezultatai (eksperimentas nr.4)
Bland-Altman diagrama**



50 pav. Eksperimento nr.4 ŠSD matavimo rezultatai atvaizduoti Bland-Altman diagramomis. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai

42 paveikslėlyje atvaizduoti ŠSD matavimų rezultatai Bland-Altman diagramoje. Rezultatai išsibarstę atsitiktine tvarka, kas indikuoja, jog proporcinės paklaidos nestebime. A111 radarų masyvo atveju pastebime, kad rezultatai išsidėstę daug arčiau vidutinės paklaidos negu A121 atveju. Eksperimento nr.4 rezultatai lyginant su kitų eksperimentų rezultatais

4 lentelė. Statistiniai eksperimento nr.4 įverčiai

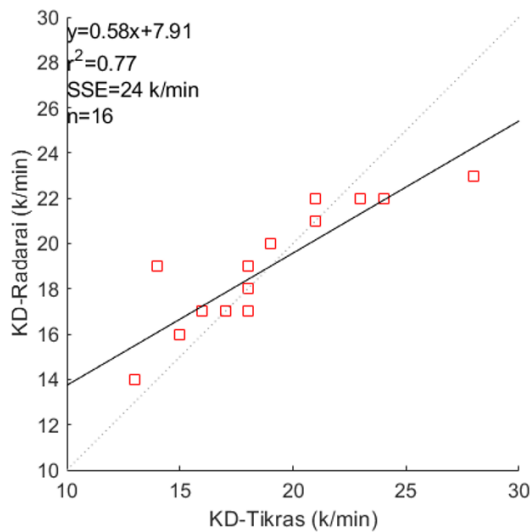
Eksperimentas Nr.4	Koreliacijos kreivė				Bland - Altman diagrama				
	y=ax+b		r ²	SSE, k/min	RPC k/min	CV, %	Pasikliautinis intervalas		Vidutinė paklaida
	a	b					-1,96σ	1,96σ	
KD matavimas A111	0,73	4,75	0,71	34	3,3	10	-3	3,6	0,29
KD matavimas A121	0,72	4,76	0,68	38	3,5	10	-3,3	3,6	0,12
SSD matavimas A111	0,91	5,58	0,78	350	9,3	6,8	-10	8,6	-0,71
SSD matavimas A121	0,85	10,7	0,42	910	15	11	-15	15	0,24

4 lentelėje yra pateikti eksperimento nr.4 statistiniai įverčiai. KD matavimas pasižymi pakankamai stipria tiesine priklausomybe. Tai mus rodo gauti determinacijos koeficientai $r^2=0,71$ A111 radarų masyvo atveju ir $r^2=0,68$ A121 radarų masyvo atveju. Lyginant šio eksperimento KD matavimus su kitų eksperimentų KD matavimais, gautas matavimų rezultatas yra tikslesnis negu eksperimento nr.2 rezultatai, tačiau mažiau tikslus negu eksperimentų nr.1 ir nr.3 rezultatai. Analizuodami Bland-Altman diagramos rezultatus pastebime, kad gautieji pasikliautinieji intervalai yra pakankamai panašūs – A111 radarų masyvo atveju pasikliautinis intervalas gautas nuo -3 iki 3,6, o A121 radarų masyvo atveju nežymiai didesnis, nuo -3,3 iki 3,6, tačiau A121 atveju vidutinė paklaida yra 0,12k/min, o tai yra mažiau negu A111 radarų masyvo atveju 0,29k/min. Šio eksperimento metu, ŠSD matavimas tarp abiejų radarų masyvų pastebimai skiriasi. Analizuodami koreliacines kreives pastebime, kad A111 radarų masyvo atveju determinacijos koeficientas gaunamas $r=0,78$, o tai reiškia, kad gautieji tiesinės funkcijos koeficientai pakankamai gerai aprašo atraminio ir A111 radarų masyvo priklausomybę. To negalime pasakyti apie A121 radarų masyvo matavimą. Gautas determinacijos koeficientas $r=0,42$ rodo, kad gautieji aproksimuojančios funkcijos koeficientai nevisiškai atspindi tiesinę priklausomybę tarp atraminio ir A121 radarų masyvų matavimo. Tą patvirtina ir likutinė kvadratinė paklaida. Nagrinėdami Bland-Altman diagramą taip pat pastebime, kad A111 radarų masyvo matavimas turi mažesnę pasikliautinąjį intervalą. A121 radarų masyvo atveju turime mažesnę vidutinę paklaidą, tačiau didesnę atsikartojamumo ir variacijos koeficientus. Priežastis, kodėl šiame eksperimente naudotas A111 radarų masyvas gavo tikslesnius matavimus, analizuojama 4 skyriuje.

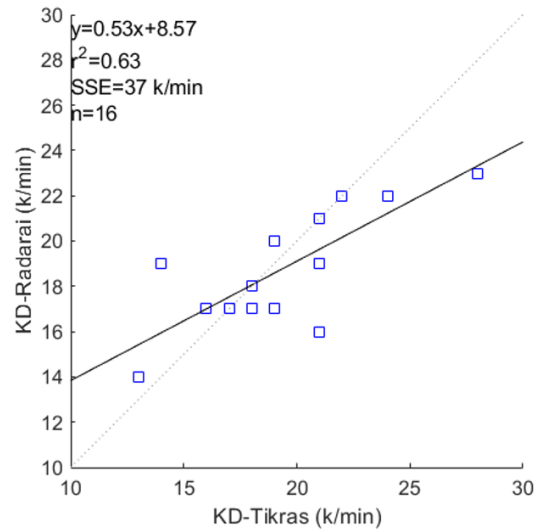
3.2. Rezultatai po fizinio krūvio, tiriamajam sėdint ramiai

Šio eksperimento pradžioje tiriamasis buvo instruktuo tas nusileisti laiptais iš 3 aukšto žemyn, tuomet užlipti tais pačiais laiptais atgal. Tai atlikus tiriamasis grįžo į vietą kurioje buvo atliekami matavimai, atsisėdo į kėdę. Tiriamojo krūtinė buvo statmenai atsukta į radarų masyvus. Verta paminėti, jog nuo fizinio krūvio pabaigos iki matavimo starto praėjo neapibrėžtas laiko tarpas, kurio metu buvo prijungiami atraminio matavimo „bioplux“ EKG elektrodai, kvėpavimo diržas, radarų masyvai nutaikomi apytikriai į tiriamojo krūtinės vidurio liniją. Matavimų rezultatai atvaizduoti 51, 52, 53, 54 paveiksluose ir 5 lentelėje.

A111 radarų masyvo kvėpavimo dažnio matavimo rezultatai (eksperimentas nr.5)



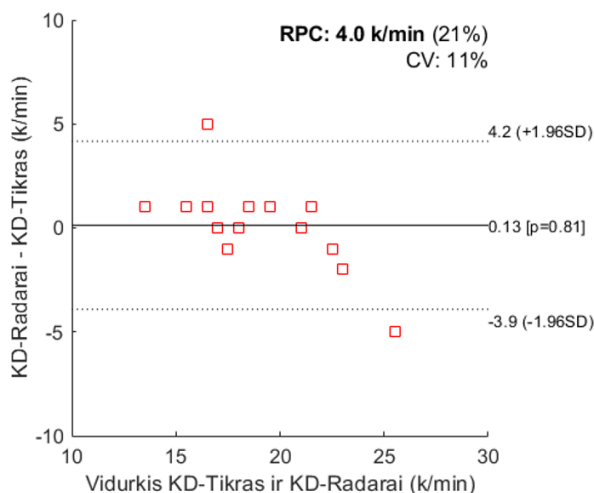
A121 radarų masyvo kvėpavimo dažnio matavimo rezultatai (eksperimentas nr.5)



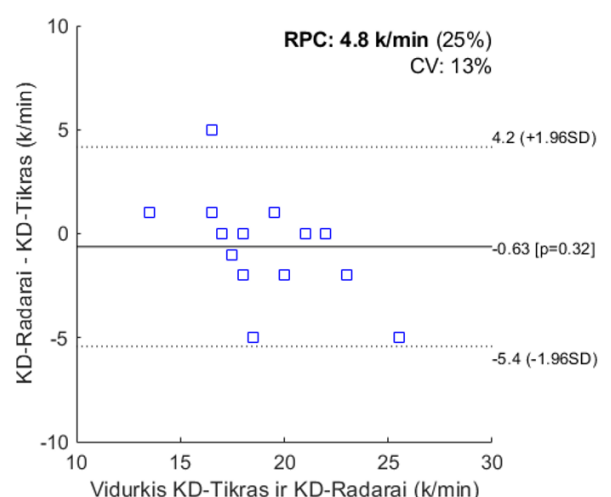
51 pav. Eksperimento nr.5 KD matavimo rezultatai atvaizduoti koreliacine kreive. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai

51 paveikslėlyje matome eksperimento nr.5 KD matavimo rezultatus atvaizduotus koreliacine kreive. Čia pastebime, kad matavimų rezultatai yra susitelkę labiau ties diagramos viduriu (x ašyje) ir nėra išsibarstę aplink aproksimuojančią tiesę ar aplink idealią tiesinę priklausomybę indukuojančią tiesę. Tačiau Pearson koreliacijos koeficientai A121 radarų masyvo atveju $r=0,7966$ ir A111 radarų masyvo atveju $r=0,8772$ rodo, jog tiesinė priklausomybė tarp atraminio ir radarų masyvo matavimo yra pakankamai stipri.

**A111 radarų masyvo kvėpavimo dažnio matavimo rezultatai (eksperimentas nr.5)
Bland-Altman diagrama**



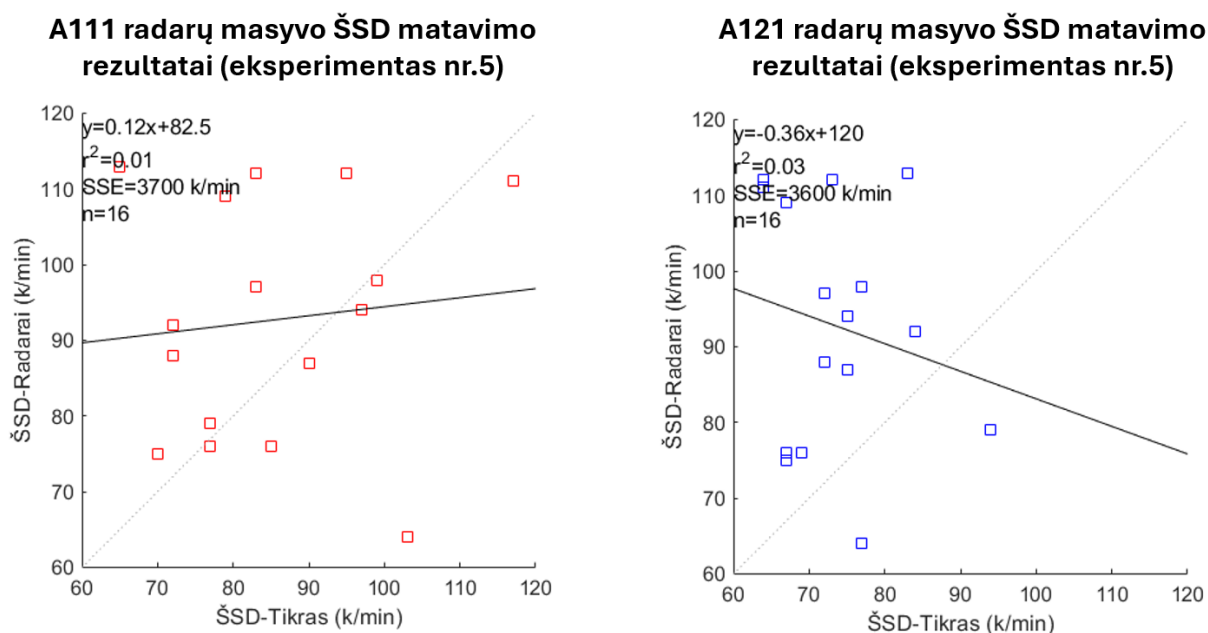
**A121 radarų masyvo kvėpavimo dažnio matavimo rezultatai (eksperimentas nr.5)
Bland-Altman diagrama**



52 pav. Eksperimento nr.5 KD matavimo rezultatai atvaizduoti Bland-Altman diagramomis. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai

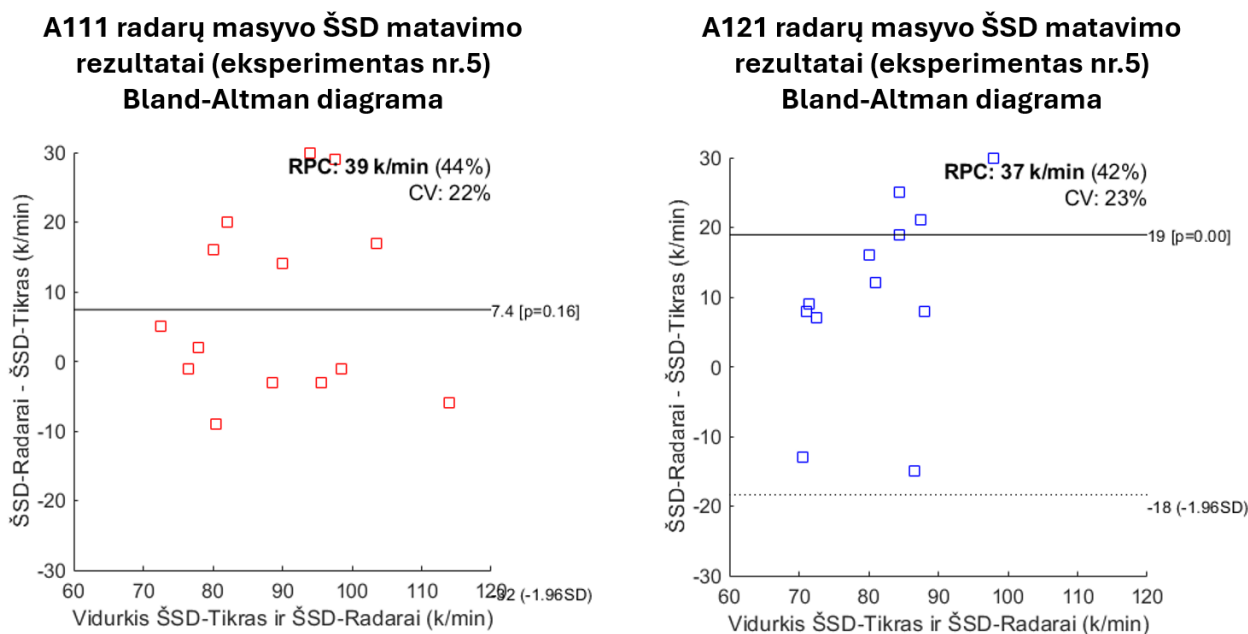
52 paveikslėlyje atvaizduoti KD matavimų rezultatai Bland-Altman diagramoje. Kaip ir daugumoje atvejų, rezultatai yra išsibarstę atsitiktine tvarka ir proporcinės paklaidos čia nestebime. Taip pat galime pastebėti, kad lyginat A121 ir A111 radarų masyvų rezultatus, A111 radarų masyvo rezultatai

yra išsidėstę arčiau vidutinės paklaidos, nepaisant poros toliau nuo vidutinės paklaidos atsiskyrusių rezultatų, lyginant su A121 radarų masyvo rezultatais.



53 pav. Eksperimento nr.4 ŠSD matavimo rezultatai atvaizduoti koreliacine kreive. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai

53 paveikslėlyje matome A111 ir A121 radarų masyvo eksperimento nr.5 ŠSD matavimo rezultatus, atvaizduotus koreliacine kreive. Čia jau stebime daug didesnės paklaidos rezultatus, negu kad stebėjome kitų eksperimentų rezultatuose. Čia Pearson koreliacijos koeficientas A111 atveju yra tik $r=0,1058$, kuris indikuoja nedidelę atraminio matavimo ir radarų masyvo matavimo tiesinę priklausomybę. A121 radarų masyvo atveju Pearson koreliacijos koeficientas netgi yra neigiamas $r=-0,1864$, kas rodo, jog tiesinės priklausomybės kryptis netgi yra priešinga. Šie ŠSD matavimo rezultatai yra prasčiausi lyginant su visais atliktais eksperimentais.



54 pav. Eksperimento nr.5 ŠSD matavimo rezultatai atvaizduoti Bland-Altman diagramomis. Kairėje – A111 radarų masyvo matavimų rezultatai. Dešinėje – A121 radarų masyvo matavimų rezultatai

54 paveikslėlyje atvaizduoti ŠSD matavimų rezultatai Bland-Altman diagramoje. Čia taip pat atsispindi šio eksperimento metu gautos didelės matavimų paklaidos. Vizualiai analizuodami rezultatų išsibarstymą, abiem radarų masyvų matavimo atvejais galime išvelgti proporcinės paklaidos požymių – rezultatai išsidėstę piltuvėlio forma.

5 lentelė. Statistiniai eksperimento nr.5 įverčiai

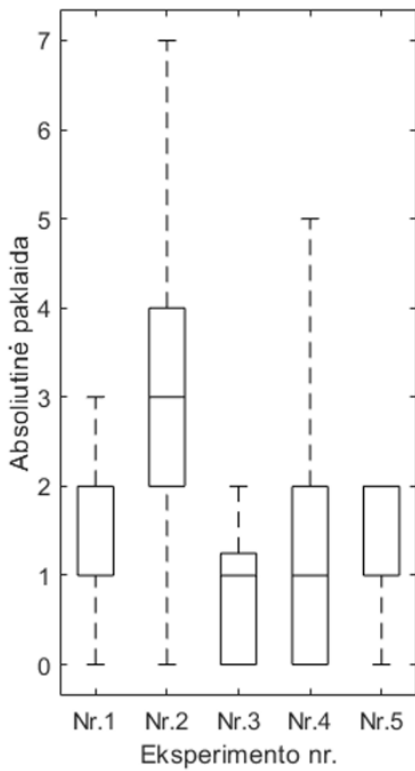
Eksperimentas Nr.5	Koreliacijos kreivė				Bland - Altman diagrama				
	y=ax+b		r ²	SSE, k/min	RPC k/min	CV, %	Pasikliautinis intervalas		Vidutinė paklaida
	a	b					-1,96σ	1,96σ	
KD matavimas A111	0,58	7,91	0,77	24	4	11	-3,9	4,2	0,13
KD matavimas A121	0,53	8,57	0,63	37	4,8	13	-5,4	4,2	-0,63
SSD matavimas A111	0,12	82,5	0,01	3700	39	22	-32	47	7,4
SSD matavimas A121	-0,36	120	0,03	3600	37	23	-18	56	19

5 lentelėje yra pateikti eksperimento nr.5 statistiniai įverčiai. KD dažnio matavimas, kaip jau minėjome ir analizuodami koreliacinių kreivių diagramas ir Pearson koreliacijos koeficientus, rezultatuose turime tiesinės priklausomybės rezultatą tarp atraminio ir radarų masyvo matavimų. Šį teiginį taip pat patvirtina ir gauti determinacijos koeficientai – A111 radarų masyvo atveju $r=0,77$, o A121 radarų masyvo atveju $r=0,63$. Likutinės kvadratinės paklaidos 24k/min ir 37k/min rodo, jog nepaisant tiesinės priklausomybės, vis tiek turime dalį rezultatų, kurie negali būti aprašyti aproksimuojančia kreive. KD Bland-Altman diagramų statistiniai įverčiai rodo, kad A111 radarų masyvo matavimai turi 0,13k/min vidutinę paklaidą, o pasikliautinis intervalas yra nuo -3,9k/min iki 4,2k/min ir šiuo atveju yra šiek tiek tikslesnis, negu A121 radarų masyvo matavimas. Šio eksperimento metu gauti ŠSD matavimai yra patys netiksliausi. Determinacijos koeficientai 0,01 ir 0,03 indikuoja apie tiesinės priklausomybės nebuvimą, likutinės kvadratinės paklaidos 3700k/min ir 3600k/min rodo, kad didžioji dalis rezultatų negali būti aprašyta aproksimuojančia tiese. Bland-Altman diagramoje pasikliutienieji intervalai yra labai platūs A111 radarų masyvo atveju nuo -32k/min iki 47k/min, A121 radarų masyvo atveju nuo -18k/min iki 56k/min.

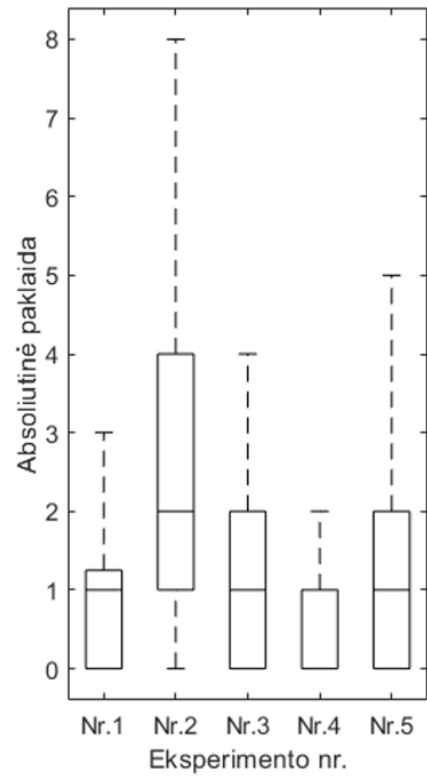
3.3. Trečio skyriaus apibendrinimas

Eksperimento metu, kuris buvo atliktas vadovaujantis skyriuje aprašytu protokolu, buvo surinkta 170 struktūrinių duomenų, įrašų iš radarų masyvų kuriuos iš viso sudarė 765 atskiri radarų įrašai, 85 atraminio matavimo įrašai. Surinkti duomenys apdoroti skyriuose aprašytais signalų apdorojimo algoritmais. Rezultatų pristatymui ir interpretacijai buvo pasirinkta rezultatus atvaizduoti Bland-Altman ir koreliacijos kreivės diagramomis su papildomais statistinės analizės įverčiais ir koeficientais. Geriausias matavimo rezultatas KD ir ŠSD matavimams buvo gautas eksperimento nr.1 metu, KD vidutinė paklaida 0,06k/min, pasikliautinis intervalas -2,6k/min iki 2,7 k/min, ŠSD vidutinė paklaida -0,12k/min, pasikliautinis intervalas -4,4k/min iki 4,2k/min. Prasčiausias KD matavimas eksperimento nr.2 metu, A111 radarų masyvas, vidutinė paklaida 2,1k/min, pasikliautinis intervalas nuo -4,3k/min iki 8,4k/min. Prasčiausias ŠSD matavimas eksperimentas nr.5 A121 radarų masyvas vidutinė paklaida 19k/min, pasikliautinis intervalas nuo -18k/min iki 56k/min. Rezultatų lentelės pateikiamos 2 ir 3 prieduose. Daliniai rezultatai pristatyti mokslinėje konferencijoje (1 priedas). Absoliutinės paklaidos pateiktos 55, 56 paveikslėliuose.

A111 radarų masyvo KD
absoliutinės paklaidos rezultatai

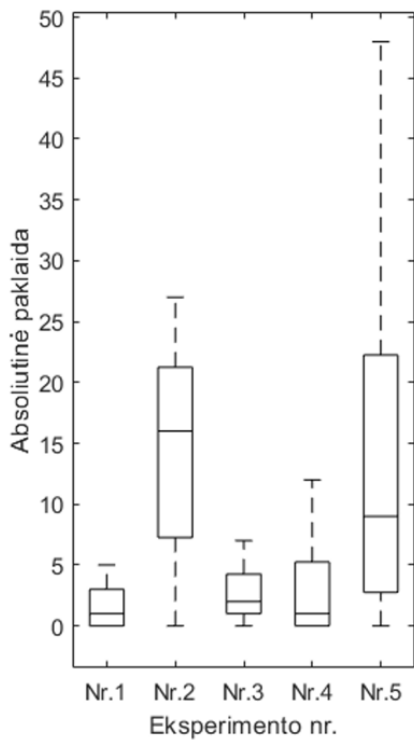


A121 radarų masyvo KD
absoliutinės paklaidos rezultatai

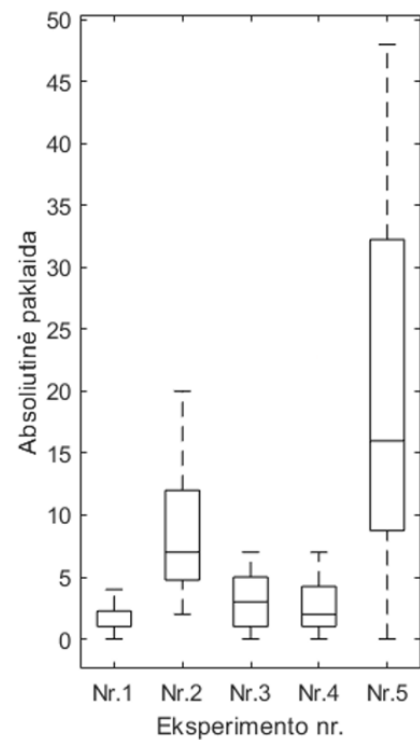


55 pav. Radarų masyvų KD matavimų absoliutinės paklaidos rezultatai

A111 radarų masyvo ŠSD
absoliutinės paklaidos rezultatai



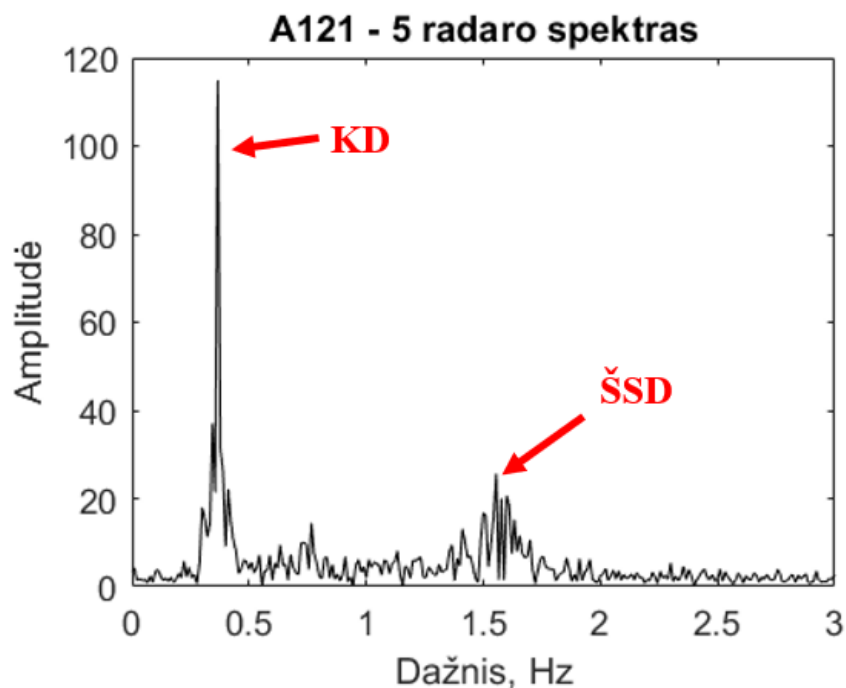
A121 radarų masyvo ŠSD
absoliutinės paklaidos rezultatai



56 pav. Radarų masyvų ŠSD matavimų absoliutinės paklaidos rezultatai

4. Diskusija

Atliekant rezultatų analizę, buvo pastebėta, kad tiksliausi matavimo rezultatai, lyginant su visais atliktais eksperimentais, yra gaunami eksperimento nr.1 metu. Absoliutinės paklaidos, koreliacijos koeficientai taip pat kiti statistiniai įverčiai rodo, jog radarų masyvai gali tiksliai išmatuoti tiriamojo KD ir ŠSD. A111 atveju gautas vidutinis skirtumas siekė tik 0,12, A121 radarų masyvo atveju dar mažiau 0,06. ŠSD matavimo atveju taip pat gautas nedidelis vidutinis skirtumas – A111 radarų masyvo atveju 0,71, o A121 radarų masyvo atveju -0,12. Rezultatai neturi sisteminės ar proporcinės paklaidos, Pearson koreliacijos koeficientai indukuoja apie stiprią linijinę koreliaciją. Taip pat galime daryti išvadą, kad šiuo atveju 5 radarų masyvas gali išmatuoti šiuos gyvybinius parametrus tiksliau, negu 4 radarų A111 masyvas. Kadangi šio eksperimento metu suteikiamos palankiausios sąlygos bekontakčiam gyvybinių parametrų matavimui (tiriamasis yra atsisukęs statmenai radarų masyvams, stengiasi nejudėti, ŠSD ir KD yra nepadažnėję dėl fizinio krūvio), 5 radarų masyve A121 esantis centrinis radaras yra nutaikomas į krūtinės ląstos centrą – tai yra taškas, kuriame krūtinės pakilimai kvėpuojant ir širdies pulsacijos aptinkamos lengviausiai, todėl matavimų rezultatai gaunami tikslesni. Tai atsispindi analizuojant atskirus signalus iš radarų masyvų. 48 paveikslėlyje pavaizduotas centre esančio radaro modulio signalo spektras iš A121 radarų masyvo. Kaip pastebime, aiškiai matomos dvi KD ir ŠSD spektrinės dedamosios (57 pav.).

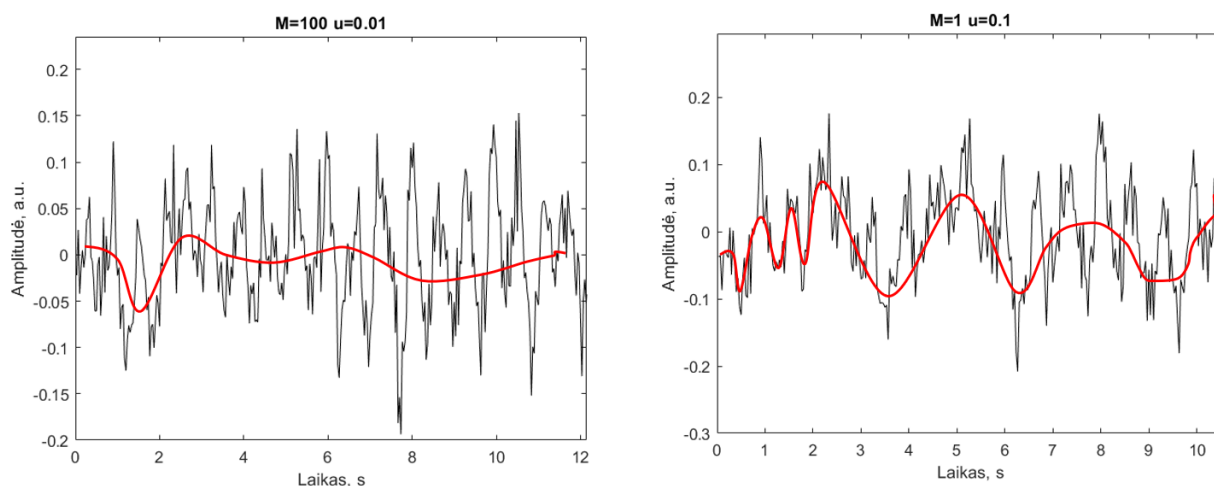


57 pav. A121 radarų masyvo, radaro nr.5 esančio centre, eksperimento nr.1 metu gautas signalo spektras

Taip pat pakankamai neblogi rezultatai yra gaunami, eksperimento nr.3 metu, kai tiriamasis sėdėjo kaire puse atsisukęs į radarų masyvą. Kaip žinome iš literatūros analizės, anatomiškai žmogaus širdis yra išsidėsčiusi tiek per kairiau krūtinės ląstos centro (skilveliai yra ties 4-5 tarpšonkauliniu tarpu, o širdies viršūnė yra po kairiuoju šonkaulių lanku). Tai galėjo lemti, jog šio eksperimento metu gauti pakankamai geri širdies susitraukimų dažnio matavimų rezultatai – vidutinė paklaida ŠSD matavime gauta 0.02k/min. Taip pat ir KD matavimai šio eksperimento buvo pakankamai tikslūs, vidutinė paklaida gauta Bland-Altman diagramoje yra 0k/min, tačiau pasikliautinis intervalas yra didesnis, nei geriausio, eksperimento nr.1 metu. Kadangi tiriamasis šio eksperimento metu buvo pasisukęs apytiksliai 30 laipsnių kampui, krūtinės ląstos kilnojimas jau nebėra statmenas radarų masyvams.

Tai gali lemti, kad aptinkamas judesys yra daug mažesnės amplitudės ir yra užteršiamas kitais signale esančiais triukšmais. Panašiai galėtume apibūdinti ir eksperimento nr.4 matavimo rezultatus, tik šiuo atveju ŠSD paklaidos gaunamos gerokai didesnės, dėl jau minėtų žmogaus kūno anatominių savybių.

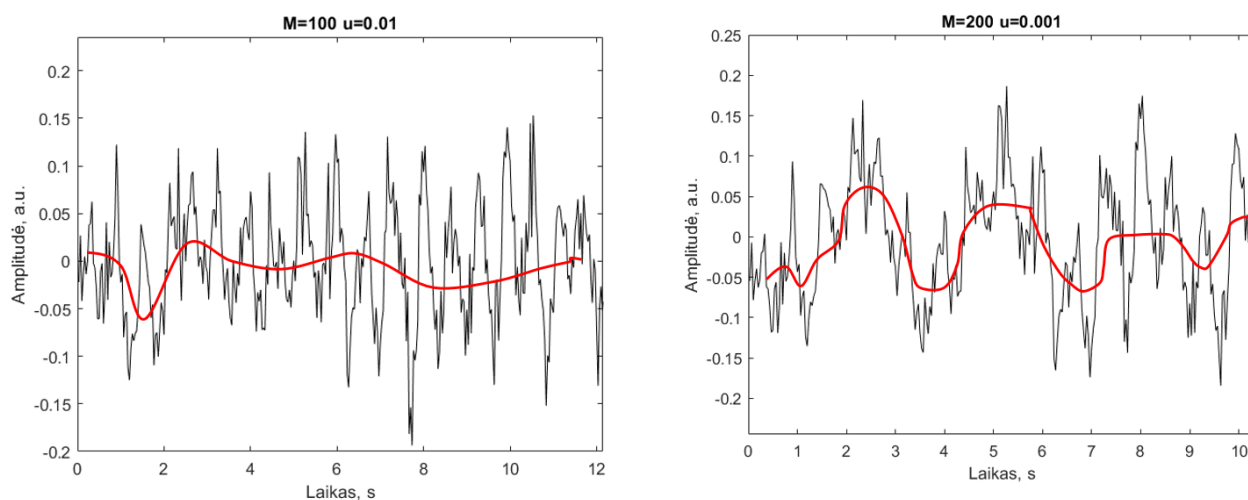
Taip pat turime nepamiršti, kad filtro parametrai taip pat turi įtakos rezultatams. Eksperimento rezultatai buvo gauti naudojant pastovius mažiausiųjų vidurinių kvadratų filtro parametrus. Pagrindiniai jų yra filtro eilė ir konvergencijos arba adaptacijos koeficientas. Eksperimentiškai buvo nustatyta, kad geriausi rezultatai gaunami filtro eilei esant $M=100$, o konvergencijos koeficientui $\mu=0.01$.



58 pav. Adaptyvaus filtro eilės ir konvergencijos koeficiento įtakos nufiltruotam signalui palyginimas.

Kairėje pusėje filtro eilė $M=100$, konvergencijos koeficientas $\mu=0.01$, dešinėje pusėje $M=1$ $\mu=0.1$

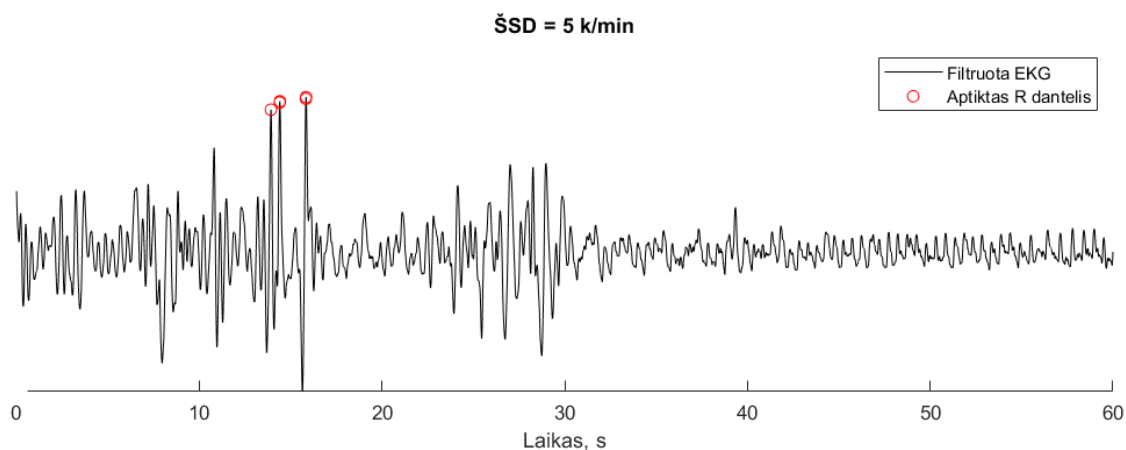
58 paveikslėlyje pavaizduotas širdies ritmo signalo filtravimas adaptyviuoju filtru. Kairėje pusėje galime pastebėti, kad žemo dažnio dedamosios beveik nėra, pradžioje iki tol, kol filtras adaptuoja savo ribotos impulsinės reakcijos filtro koeficientus pagal mažiausiųjų vidutinių kvadratų algoritmą, yra matomas nežymus artefaktas. Tuo tarpu kairėje pusėje matome, jog žemo dažnio dedamoji matoma per visą signalą, o tai turės įtakos vėliau skaičiuojant ŠSD.



59 pav. Adaptyvaus filtro eilės ir konvergencijos koeficiento įtakos nufiltruotam signalui palyginimas.

Kairėje pusėje filtro eilė $M=100$, konvergencijos koeficientas $\mu=0.01$, dešinėje pusėje $M=200$ $\mu=0.001$

59 paveikslėlyje pavaizduotas širdies ritmo signalo filtravimas adaptyviuoju filtru. Kairėje pusėje yra jau aptartas atvejis su 100 filtro eile ir 0.01 adaptacijos žingsniu. Dešinėje pusėje matome, jog žemo dažnio dedamoji matoma visame signale. Kadangi žinome, jog filtro eilė turi įtakos filtro stabilumui, tai gali būti nestabilaus filtro padarinys. Šiame darbe filtro koeficientai buvo parinkti eksperimentiškai, t.y. filtruojant signalus ir lyginant rezultatus su atraminio signalo matavimais. Tačiau filtro parametrų parinkimui yra naudojamas iteracinis greičiausiojo nusileidimo metodas.



60 pav. Prasto atraminio matavimo EKG pavyzdys

Kitas svarbus veiksnys, kuris galėjo turėti įtakos matavimų rezultatams yra pats atraminis matavimas. Dauguma atveju signalai gauti pakankamai kokybiški ir iš jų apskaičiuoti KD ir ŠSD buvo nesudėtinga. Tačiau pasitaikė atvejų, kai dėl galimai prastai priklijuotų EKG elektrodų arba netinkamai uždėto kvėpavimo diržo iš atraminių signalų tiksliai apskaičiuoti KD arba ŠSD neįmanoma. 53 paveikslėlyje pavaizduotas būtent tokio EKG signalo pavyzdys. Šis matavimas yra iš eksperimento nr.5, kai tiriamojo KD ir ŠSD buvo matuojamas po fizinio krūvio. Kai kurie atraminiai EKG matavimai buvo pakankami rankiniu būdu suskaičiuoti QRS komplekso R dantelius ir gauti ŠSD. 60 paveikslėlyje matome vienintelį atvejį, kai to padaryti nebuvo įmanoma.

Analizuojant ir patį mažiausiųjų vidutinių kvadratų algoritmą, galima buvo pasirinkti kitą priegą pasirenkant adaptyvaus filtro eilę. Šiame darbe filtro eilė buvo pasirinkta eksperimentiškai, tačiau šio parametro pasirinkimui buvo galima naudoti 5 formulę:

$$0 < \mu < \frac{1}{NP_x} \quad (5)$$

Kur N – filtro koeficientų skaičius, P_x – įėjimo signalo galia, arba signalo dispersija. Taip būtų parinktas optimalus konvergencijos koeficientas, kuris paveiktų gautų signalų tikslumą.

Išvados

1. Eksperimentuose buvo naudojami dviejų konfigūracijų radarų masyvai, sudaryti iš atskirų radaro modulių. Pagrindiniai jų skirtumai buvo skirtingas radarų modulių skaičius radarų masyve ir maksimalus matuojamas atstumas. Analizuojant atliktų eksperimentų ir matavimų rezultatus, pastebėta, kad tiksliausias matavimas yra gaunamas eksperimento nr.1 metu A121 radarų masyvu. Čia kvėpavimo dažnio vidutinė paklaida 0,06k/min, pasikliautinis intervalas -2,6k/min iki 2,7 k/min, širdies susitraukimų dažnio matavimo atveju vidutinė paklaida gauta -0,12k/min, pasikliautinis intervalas -4,4k/min iki 4,2k/min.. Prasčiausias rezultatas buvo gautas eksperimento nr.2 metu, kuomet tiriamasis darė nedidelius judesius, jų metu A111 radarų masyvo KD matavimo vidutinė paklaida 2,1k/min, pasikliautinis intervalas nuo -4,3k/min iki 8,4k/min. Prasčiausias ŠSD matavimas gautas eksperimento nr.5 metu A121 radarų masyvo, kur vidutinė paklaida 19k/min, pasikliautinis intervalas nuo -18k/min iki 56k/min. Lyginant abiejų konfigūracijų radarų masyvus pastebėta, kad geresnius rezultatus gauname su penkių A121 radarų modulių masyvu dėl papildomo radaro.
2. Buvo sukurtas radarų masyvo modelis, kuris imituoja gaunamą signalą iš impulsinių radarų masyvų. Modelis remiasi prielaida, kad kvėpavimo signalas gali būti modeliuojamas kaip sinusoidžių suma, širdies pulsacijos gali būti modeliuojamos kaip pulsai. Buvo pasirinkta kvėpavimo signalą modeliuoti harmoniniu sinusiniu signalu, širdies pulsacijoms modeliuoti pasirinkta modeliuoti juos teigiamu harmoninio sinusinio signalo pusperiodžiu. Šių dviejų signalų suma ir atspindi krūtinės judesius kuriuos registruoja kiekvienas radaro modulis esantis radarų masyve. Galima pasirinktinai modeliuoti skirtingus kvėpavimo bei širdies susitraukimų dažnio signalus, keisti triukšmo tikimybės tankio funkciją.
3. Radarų signalų apdorojimui buvo pasiūlytas signalų apdorojimo algoritmas, kuris atrenka geriausios kokybės signalą remdamasis spektrine analize. Kadangi normalaus kvėpavimo dažnio bei širdies susitraukimų dažnio režiai ramybės būsenoje yra žinomi, algoritmas atrenka, kuris radarų masyvo kanalas, arba konkrečiai – kuris radaras turi didžiausios amplitudės dedamąsias tuose ruožuose ir taip išrenka „naudingąjį“ signalą. Tokiu pačiu principu yra išrenkamas triukšmo signalas, tik algoritmas jau išrenka tą radarų masyvo kanalą, kuris turi mažiausios amplitudės dažnines dedamąsias kvėpavimo ir širdies susitraukimų dažnių ruožuose. Šie signalai siunčiami į adaptyvųjį mažiausiųjų vidutinių kvadratų filtrą, kuriame išgaunami du signalai – krūtinės judesio kvėpuojant signalas ir širdies pulsacijų signalas. Tuomet iš šių signalų yra suskaičiuojami KD ir ŠSD, suskaičiuojant šių signalų spektrus ir išrenkant didžiausias spektrines dedamąsias KD ir ŠSD signalų dažnių ruožuose. Rezultatai gaunami kartais per minutę ir lyginami su atraminio signalo matavimais.

Galimi tolimesnių tyrimų pasiūlymai:

1. Ištirti kitų konfigūracijų impulsinių radarų masyvo galimybes, taip pat galimybes stebėti du tiriamuosius vienu metu;
2. Ištirti kitus radarų masyvo nutaikymo taškus, pvz.: vieną iš radarų nutaikyti žemiau epigastriumo srities, kur matomos pilvinės aortos pulsacijos;
3. Signalų filtravimui panaudoti impulsinių radarų masyvo signalų modelį;
4. Signalų filtravimui panaudoti kitus adaptyvinius algoritmus, pvz.: normalizuotąjį mažiausiųjų vidutinių kvadratų, dekoraliuotą rekursinį mažiausiųjų kvadratų.

Informacijos šaltinių sąrašas

1. Brinkman JE, Toro F, Sharma S. Physiology, Respiratory Drive. 2023. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024. Prieiga per: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29494021/> [Žiūrėta 2023-03-29]
2. Range or distance measurement. Prieiga per: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Distance-determination.en.html> [Žiūrėta 2023-03-29]
3. Peter Barrett Bryan. Mind your I's and Q's: The Basics of I/Q data. Prieiga per: <https://towardsdatascience.com/mind-your-is-and-q-s-the-basics-of-i-q-data-d1f2b0dd81f4>. [Žiūrėta 2023-03-29]
4. Phases of the mechanical breath. Prieiga per: <https://derangedphysiology.com/main/cicm-primary-exam/required-reading/respiratory-system/Chapter%20532/phases-mechanical-breath> [Žiūrėta 2023-03-29]
5. Žmogaus kvėpavimo sistemos sandara. Prieiga per: <http://biomokslai.blogspot.com/2010/02/kvepavimas.html> [Žiūrėta 2023-03-29]
6. Hui Li, Hao Lv, Teng Jiao, Guohua Lu, Sheng Li, Zhao Li, Miao Liu, Xijing Jing, Jianqi Wang. Measurement of chest wall displacement based on terahertz wave. Prieiga per: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4913561> [Žiūrėta 2023-03-29]
7. Oberman R, Shumway KR, Bhardwaj A. Physiology, Cardiac. [Updated 2023 Jul 30]. In: StatPearls [Internetinis]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Jan. Prieiga per: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK526089/> [Žiūrėta 2023-03-29]
8. Heart. Anatomy. Britannica Prieiga per: <https://www.britannica.com/science/mesentery> [Žiūrėta 2023-03-29]
9. Ghufuran Shafiq and Kalyana C. Veluvolu. Surface Chest Motion Decomposition for Cardiovascular Monitoring. Prieiga per: doi: 10.1038/srep05093 [Žiūrėta 2023-03-29]
10. Short Range Radar. A Look Behind the Scenes. Prieiga per: <https://www.ilmens.com/short-range-radar> [Žiūrėta 2023-03-29]
11. Levent Sevgi. Radar. Prieiga per: https://www.researchgate.net/figure/1-Types-of-radars-according-to-different-parameters_tbl1_285687200. [Žiūrėta 2023-03-29]
12. Svein-Erik Hamran. Radar Performance of Ultra-Wideband Waveforms. Prieiga per: <https://www.intechopen.com/chapters/6880> [Žiūrėta 2023-03-29]
13. Dušan Kocur, Mária Švecová and Jana Rovňáková. Through-the-Wall Localization of a Moving Target by Two Independent Ultra-Wideband (UWB) Radar Systems. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/1424-8220/13/9/11969> [Žiūrėta 2023-03-29]
14. A. L. Swindlehurst and P. Stoica, "Maximum likelihood methods in radar array signal processing," in Proceedings of the IEEE, vol. 86, no. 2, pp. 421-441, Feb. 1998, Prieiga per: doi: 10.1109/5.659495 [Žiūrėta 2023-03-29]
15. Ran Klein (2024). Bland-Altman and Correlation Plot (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/45049-bland-altman-and-correlation-plot>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved May 9, 2024. [Žiūrėta 2023-03-29]
16. Yu, H.; Huang, W.; Du, B. SSA-VMD for UWB Radar Sensor Vital Sign Extraction. Sensors 2023. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/s23020756> [Žiūrėta 2023-03-29]
17. Kebe, M.; Gadhafi, R.; Mohammad, B.; Sanduleanu, M.; Saleh, H.; Al-Qutayri, M. Human Vital Signs Detection Methods and Potential Using Radars: A Review. Sensors 2020. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/s20051454> [Žiūrėta 2023-04-15]
18. Phonocardiography | Medicine. Britannica. Prieiga per: <https://www.britannica.com/science/phonocardiography> [Žiūrėta 2023-04-15]

19. Adeel Ahmad, June Chul Roh, DanWang, Aish Dubey. Vital Signs Monitoring of Multiple People using a FMCW Millimeter-Wave Sensor . Dallas, Texas, USA: , 2018. Prieiga per: <https://www.semanticscholar.org/paper/Vital-signs-monitoring-of-multiple-people-using-a-Ahmad-Roh/64b7e022593409af64e6faab400571a4097a56de> [Žiūrėta 2023-04-15]
20. Radar | Definition, Invention, History, Types, Applications, Weather, Facts. Britannica. Prieiga per : <https://www.britannica.com/technology/radar> [Žiūrėta 2023-04-15]
21. Doppler Effect | Definition, Example, Facts. Britannica Prieiga per: <https://www.britannica.com/science/Doppler-effect> [Žiūrėta 2023-04-15]
22. Cesar Iovescu and Sandeep Rao. The Fundamentals of Milimeter Sensors. Overview. [Internetinis] Prieiga per: https://www.ti.com/lit/wp/spyy005a/spyy005a.pdf?ts=1717662498956&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FAWR1642 [Žiūrėta 2023-04-15]
23. Range or distance measurement. Radar tutorial web page. [Internetinis] Prieiga per: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Distance-determination.en.html> [Žiūrėta 2023-04-15]
24. Galli A, Montree RJH, Que S, Peri E, Vullings R. An Overview of the Sensors for Heart Rate Monitoring Used in Extramural Applications. Sensors (Basel). 2022. Prieiga perdoi: 10.3390/s22114035. [Žiūrėta 2023-04-15]
25. Measurement of chest wall displacement based on terahertz wave. Prieiga per: <https://pubs.aip.org/aip/apl/article-abstract/106/7/073705/28394/Measurement-of-chest-wall-displacement-based-on?redirectedFrom=fulltext> [Žiūrėta 2023-04-15]
26. Paolo Di Lorenzo, Paolo Banelli. Adaptive Least Mean Squares Estimation of Graph Signals Prieiga per: <https://arxiv.org/pdf/1602.05703> [Žiūrėta 2023-05-02]
27. Abbasi A, Gupta SS, Sabharwal N, Meghrajani V, Sharma S, Kamholz S, Kupfer Y.A comprehensive review of obstructive sleep apnea. Sleep Sci. 2021. Prieiga per: doi: 10.5935/1984-0063.20200056. [Žiūrėta 2023-05-02]
28. Levent Sevgi. Radar. Short Range Radar. A Look Behind the Scenes. [Internetinis] Prieiga per: <https://www.ilmsens.com/short-range-radar/> [Žiūrėta 2023-05-02]
29. Svein-Erik Hamran. Radar Performance of Ultra-Wideband Wave forms. Prieiga per: doi:10.5772/7171 [Žiūrėta 2023-05-02]
30. What are UWB Radars? Prieiga per: <https://www.everythingrf.com/community/what-are-uwb-radars> [Žiūrėta 2023-05-02]
31. Da-Zheng Feng, Zheng Bao and Li-Cheng Jiao, "Total least mean squares algorithm," in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 46, no. 8, pp. 2122-2130, Aug. 1998, doi: 10.1109/78.705421. Prieiga per: doi: 10.1109/78.705421. [Žiūrėta 2024-05-02]
32. Rong, Y.; Dutta, A.; Chiriyath, A.; Bliss, D.W. Motion-Tolerant Non-Contact Heart-Rate Measurements from Radar Sensor Fusion. Sensors 2021. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/s21051774> [Žiūrėta 2024-05-20]
33. K. Kulpa, "The CLEAN type algorithms for radar signal processing," 2008 Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium, Kiev, Ukraine, 2008, pp. 152-157, Prieiga per: doi: 10.1109/MRRS.2008.4669567. [Žiūrėta 2024-05-20]
34. Yu, Myoungseok, Narae Kim, Yunho Jung, and Seongjoo Lee. 2020. "A Frame Detection Method for Real-Time Hand Gesture Recognition Systems Using CW-Radar" Sensors 20, no. 8: 2321. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/s20082321> [Žiūrėta 2024-05-02]
35. Rong, Y.; Dutta, A.; Chiriyath, A.; Bliss, D.W. Motion-Tolerant Non-Contact Heart-Rate Measurements from Radar Sensor Fusion. Sensors 2021. Prieiga per <https://doi.org/10.3390/s21051774> [Žiūrėta 2024-05-02]

36. Jang, A.-J.; Lee, I.-S.; Yang, J.-R. Vital Signal Detection Using Multi-Radar for Reductions in Body Movement Effects. *Sensors* 2021, 21, 7398. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/s21217398> [Žiūrėta 2024-05-02]
37. Zhang, X.; Yang, X.; Ding, Y.; Wang, Y.; Zhou, J.; Zhang, L. Contactless Simultaneous Breathing and Heart Rate Detections in Physical Activity Using IR-UWB Radars. *Sensors* 2021. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/s21165503> [Žiūrėta 2024-05-02]
38. Liang, X., Deng, J., Zhang, H. et al. Ultra-Wideband Impulse Radar Through-Wall Detection of Vital Signs. *Sci Rep* 8, 2018. Prieiga per: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31669-y> <https://doi.org/10.3390/s21217398> [Žiūrėta 2024-05-02]
39. National Research Council (US) Committee on Assessment of the Possible Health Effects of Ground Wave Emergency Network (GWEN). *Assessment of the Possible Health Effects of Ground Wave Emergency Network*. Washington (DC): National Academies Press (US); 1993. 6, *Effects of Electromagnetic Fields on Organs and Tissues*. Prieiga per: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK208983/> [Žiūrėta 2024-05-20]
40. H. Zhang, J. Liang and Z. Zhang, Active Fault Tolerant Control of Adaptive Cruise Control System Considering Vehicle-Borne Millimeter Wave Radar Sensor Failure, *IEEE Access*, vol. 8, Prieiga per: doi: 10.1109/ACCESS.2020.2964947. [Žiūrėta 2024-05-20]
41. A121 – Pulsed Coherent Radar (PCR) Datasheet v1.6. Prieiga per: <https://www.acconeer.com/products/>. [Žiūrėta 2024-05-21]
42. A111 – Pulsed Coherent Radar (PCR) Datasheet v2.9 Prieiga per: <https://www.acconeer.com/products/>. [Žiūrėta 2024-05-21]
43. Spears W, Mian A, Greer D. Brain death: a clinical overview. *J Intensive Care*. 2022. Prieiga per: doi: 10.1186/s40560-022-00609-4 [Žiūrėta 2024-05-21]
44. Clinical death. *Britannica*. Prieiga per: <https://www.britannica.com/science/death/Cell-death#ref385043> [Žiūrėta 2024-05-21]
45. Kim HG, Cheon EJ, Bai DS, Lee YH, Koo BH. Stress and Heart Rate Variability: A Meta-Analysis and Review of the Literature. *Psychiatry Investig*. 2018 Mar;15(3):235-245. Prieiga per: doi: 10.30773/pi.2017.08.17. [Žiūrėta 2024-05-21]
46. Top 10 causes of death, WHO. Prieiga per: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> [Žiūrėta 2023-04-22]
47. Widjaja D, Orini M, Vlemincx E, Van Huffel S. Med. Cardiorespiratory dynamic response to mental stress: a multivariate time-frequency analysis. *Comput Math Methods*. Prieiga per: doi: 10.1155/2013/451857. [Žiūrėta 2023-04-22]
48. Andre Hedesand et al. Acconeer exploration tool. Prieiga per: <https://github.com/acconeer/acconeer-python-exploration> [Žiūrėta 2023-03-27]
49. Lauteslager, T.; Maslik, M.; Siddiqui, F.; Marfani, S.; Leschziner, G.D.; Williams, A.J. Validation of a New Contactless and Continuous Respiratory Rate Monitoring Device Based on Ultra-Wideband Radar Technology. *Sensors* 2021. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/s21124027> [Žiūrėta 2023-03-27]

Priedai

1 priedas. Dalinių rezultatų pristatymas konferencijoje

V.Dailidėnas, M.Jucevičius, D.Jegelevičius. Monitoring vital signs using multiple pulse radars. Biomdlor 2023: 14th international conference, 22-24 October 2023, Białystok, Poland: book of abstracts / editors: J. Pauk, M. Borowska, M. Klekotka 2023-10-22 Oficyna wydawnicza Politechniki Białostockiej.



61 pav. Dalyvavimą konferencijoje patvirtinantis dokumentas

2 priedas. A111 Radarų masyvo matavimų rezultatai

6 lentelė. A111 radarų masyvo matavimų eksperimento nr.1 metu rezultatai

Eksperimentas nr.1									
Nr.	Radarai		Bioplux		Absoliutinė paklaida		Reliatyvioji paklaida		Komentari
	ŠSD	KD	ŠSD	KD	ŠSD	KD	ŠSD	ŠSD	
Tiriamasis nr.2	60	18	60	17	0	1	0%	6%	
Tiriamasis nr.3	72	13	72	16	0	3	0%	19%	
Tiriamasis nr.4	79	15	79	16	0	1	0%	6%	
Tiriamasis nr.5	67	13	67	14	0	1	0%	7%	
Tiriamasis nr.6	79	13	81	14	2	1	2%	7%	
Tiriamasis nr.7	58	17	62	15	4	2	6%	13%	
Tiriamasis nr.8	62	18	67	18	5	0	7%	0%	
Tiriamasis nr.9	87	19	84	18	3	1	4%	6%	
Tiriamasis nr.10	55	15	54	14	1	1	2%	7%	
Tiriamasis nr.11	60	19	60	17	0	2	0%	12%	
Tiriamasis nr.12	73	13	76	14	3	1	4%	7%	
Tiriamasis nr.13	53	15	50	14	3	1	6%	7%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.14	62	19	63	18	1	1	2%	6%	
Tiriamasis nr.15	65	16	66	18	1	2	2%	11%	
Tiriamasis nr.16	91	22	92	22	1	0	1%	0%	
Tiriamasis nr.17	76	16	76	16	0	0	0%	0%	
Tiriamasis nr.18	64	15	66	17	2	2	3%	12%	

7 lentelė. A111 radarų masyvo matavimų eksperimento nr.2 metu rezultatai

Eksperimentas nr.2									
Nr.	Radarai		Bioplux		Absoliutinė paklaida		Reliatyvioji paklaida		Komentari
	ŠSD	KD	ŠSD	KD	ŠSD	KD	ŠSD	ŠSD	
Tiriamasis nr.2	73	17	94	19	21	2	22%	11%	Prasti radaro ir atr. EKG signalai
Tiriamasis nr.3	63	13	79	18	16	5	20%	28%	
Tiriamasis nr.4	67	15	89	18	22	3	25%	17%	
Tiriamasis nr.5	90	14	72	16	18	2	25%	13%	
Tiriamasis nr.6	61	13	76	16	15	3	20%	19%	
Tiriamasis nr.7	73	14	64	18	9	4	14%	22%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.8	61	15	59	19	2	4	3%	21%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.9	98	19	72	18	26	1	36%	6%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.10	79	16	55	18	24	2	44%	11%	
Tiriamasis nr.11	80	14	59	17	21	3	36%	18%	
Tiriamasis nr.12	74	14	76	18	2	4	3%	22%	
Tiriamasis nr.13	97	13	70	17	27	4	39%	24%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.14	66	13	61	19	5	6	8%	32%	
Tiriamasis nr.15	66	15	74	15	8	0	11%	0%	
Tiriamasis nr.16	72	25	91	18	19	7	21%	39%	
Tiriamasis nr.17	78	18	78	15	0	3	0%	20%	
Tiriamasis nr.18	63	15	74	19	11	4	15%	21%	

8 lentelė. A111 radarų masyvo matavimų eksperimento nr.3 metu rezultatai

Eksperimentas nr.3									
Nr.	Radarai		Bioplux		Absolutinė paklaida		Reliatyvioji paklaida		Komentari
	ŠSD	KD	ŠSD	KD	ŠSD	KD	ŠSD	ŠSD	
Tiriamasis nr.2	65	17	63	18	2	1	3%	6%	
Tiriamasis nr.3	72	17	76	17	4	0	5%	0%	
Tiriamasis nr.4	82	17	83	17	1	0	1%	0%	
Tiriamasis nr.5	71	20	73	19	2	1	3%	5%	
Tiriamasis nr.6	84	14	79	15	5	1	6%	7%	Prastas radaro signalas
Tiriamasis nr.7	61	15	64	16	3	1	5%	6%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.8	62	15	64	17	2	2	3%	12%	
Tiriamasis nr.9	70	20	70	21	0	1	0%	5%	
Tiriamasis nr.10	57	14	64	15	7	1	11%	7%	Prastas radaro signalas
Tiriamasis nr.11	61	18	60	16	1	2	2%	13%	
Tiriamasis nr.12	79	18	76	19	3	1	4%	5%	
Tiriamasis nr.13	54	15	60	16	6	1	10%	6%	
Tiriamasis nr.14	65	19	64	19	1	0	2%	0%	
Tiriamasis nr.15	74	13	74	15	0	2	0%	13%	
Tiriamasis nr.16	94	19	88	19	6	0	7%	0%	
Tiriamasis nr.17	76	13	80	13	4	0	5%	0%	
Tiriamasis nr.18	69	13	69	17	0	4	0%	24%	

9 lentelė. A111 radarų masyvo matavimų eksperimento nr.4 metu rezultatai

Eksperimentas nr.4									
Nr.	Radarai		Bioplux		Absolutinė paklaida		Reliatyvioji paklaida		Komentari
	ŠSD	KD	ŠSD	KD	ŠSD	KD	ŠSD	ŠSD	
Tiriamasis nr.2	63	21	65	22	2	1	3%	5%	
Tiriamasis nr.3	70	15	77	15	7	0	9%	0%	
Tiriamasis nr.4	77	15	77	15	0	0	0%	0%	
Tiriamasis nr.5	73	20	72	19	1	1	1%	5%	
Tiriamasis nr.6	79	13	79	14	0	1	0%	7%	
Tiriamasis nr.7	54	14	60	19	6	5	10%	26%	
Tiriamasis nr.8	63	19	62	20	1	1	2%	5%	
Tiriamasis nr.9	55	15	57	14	2	1	4%	7%	
Tiriamasis nr.10	70	13	60	13	10	0	17%	0%	
Tiriamasis nr.11	59	13	59	15	0	2	0%	13%	
Tiriamasis nr.12	77	13	76	15	1	2	1%	13%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.13	66	15	54	15	12	0	22%	0%	
Tiriamasis nr.14	65	19	67	19	2	0	3%	0%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.15	70	19	69	17	1	2	1%	12%	
Tiriamasis nr.16	91	20	91	20	0	0	0%	0%	
Tiriamasis nr.17	79	17	79	16	0	1	0%	6%	
Tiriamasis nr.18	75	22	70	20	5	2	7%	10%	

10 lentelė. A111 radarų masyvo matavimų eksperimento nr.5 metu rezultatai

Eksperimentas nr.5									
Nr.	Radarai		Bioplux		Absoliutinė paklaida		Reliatyvioji paklaida		Komentarai
	ŠSD	KD	ŠSD	KD	ŠSD	KD	ŠSD	ŠSD	
Tiriamasis nr.2	77	16	76	17	1	1	1%	6%	
Tiriamasis nr.3	97	19	94	20	3	1	3%	5%	
Tiriamasis nr.4	95	18	112	17	17	1	15%	6%	
Tiriamasis nr.5	70	15	75	16	5	1	7%	6%	
Tiriamasis nr.6	83	18	112	19	29	1	26%	5%	
Tiriamasis nr.7	72	23	92	22	20	1	22%	5%	
Tiriamasis nr.8	99	13	98	14	1	1	1%	7%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.9									Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.10	85	18	76	18	9	0	12%	0%	
Tiriamasis nr.11	77	17	79	17	2	0	3%	0%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.12	117	21	111	22	6	1	5%	5%	
Tiriamasis nr.13	72	24	88	22	16	2	18%	9%	
Tiriamasis nr.14	90	18	87	17	3	1	3%	6%	
Tiriamasis nr.15	79	16	109	17	30	1	28%	6%	
Tiriamasis nr.16	65	28	113	23	48	5	42%	22%	
Tiriamasis nr.17	83	21	97	21	14	0	14%	0%	
Tiriamasis nr.18	103	14	64	19	39	5	61%	26%	Prastas atraminis EKG signalas

3 priedas. A121 Radarų masyvo matavimų rezultatai

11 lentelė. A121 radarų masyvo matavimų eksperimento nr.1 metu rezultatai

Eksperimentas nr.1									
Nr.	Radarai		Bioplux		Absolutinė paklaida		Reliatyvioji paklaida		Komentari
	ŠSD	KD	ŠSD	KD	ŠSD	KD	ŠSD	ŠSD	
Tiriamasis nr.2	61	18	60	17	1	1	2%	6%	
Tiriamasis nr.3	71	13	72	16	1	3	1%	19%	
Tiriamasis nr.4	78	16	79	16	1	0	1%	0%	
Tiriamasis nr.5	67	13	67	14	0	1	0%	7%	
Tiriamasis nr.6	79	13	81	14	2	1	2%	7%	
Tiriamasis nr.7	61	14	62	15	1	1	2%	7%	
Tiriamasis nr.8	69	18	67	18	2	0	3%	0%	
Tiriamasis nr.9	84	19	84	18	0	1	0%	6%	
Tiriamasis nr.10	55	14	54	14	1	0	2%	0%	
Tiriamasis nr.11	63	19	60	17	3	2	5%	12%	
Tiriamasis nr.12	73	13	76	14	3	1	4%	7%	
Tiriamasis nr.13	55	15	50	14	5	1	10%	7%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.14	63	19	63	18	0	1	0%	6%	
Tiriamasis nr.15	68	20	66	18	2	2	3%	11%	
Tiriamasis nr.16	93	22	92	22	1	0	1%	0%	
Tiriamasis nr.17	72	16	76	16	4	0	5%	0%	
Tiriamasis nr.18	65	15	66	17	1	2	2%	12%	

12 lentelė. A121 radarų masyvo matavimų eksperimento nr.2 metu rezultatai

Eksperimentas nr.2									
Nr.	Radarai		Bioplux		Absolutinė paklaida		Reliatyvioji paklaida		Komentari
	ŠSD	KD	ŠSD	KD	ŠSD	KD	ŠSD	ŠSD	
Tiriamasis nr.2	60	21	94	19	34	2	36%	11%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.3	81	19	79	18	2	1	3%	6%	
Tiriamasis nr.4	96	18	89	18	7	0	8%	0%	
Tiriamasis nr.5	92	17	72	16	20	1	28%	6%	
Tiriamasis nr.6	79	22	76	16	3	6	4%	38%	
Tiriamasis nr.7	76	26	64	18	12	8	19%	44%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.8	63	13	59	19	4	6	7%	32%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.9	67	22	72	18	5	4	7%	22%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.10	62	19	55	18	7	1	13%	6%	
Tiriamasis nr.11	66	21	59	17	7	4	12%	24%	
Tiriamasis nr.12	64	21	76	18	12	3	16%	17%	
Tiriamasis nr.13	65	18	70	17	5	1	7%	6%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.14	64	21	61	19	3	2	5%	11%	
Tiriamasis nr.15	62	15	74	15	12	0	16%	0%	
Tiriamasis nr.16	97	21	91	18	6	3	7%	17%	
Tiriamasis nr.17	62	18	78	15	16	3	21%	20%	
Tiriamasis nr.18	64	18	74	19	10	1	14%	5%	

13 lentelė. A121 radarų masyvo matavimų eksperimento nr.3 metu rezultatai

Eksperimentas nr.3									
Nr.	Radarai		Bioplux		Absolutinė paklaida		Reliatyvioji paklaida		Komentarai
	ŠSD	KD	ŠSD	KD	ŠSD	KD	ŠSD	ŠSD	
Tiriamasis nr.2	62	18	63	18	1	0	2%	0%	
Tiriamasis nr.3	71	16	76	17	5	1	7%	6%	
Tiriamasis nr.4	80	17	83	17	3	0	4%	0%	
Tiriamasis nr.5	72	21	73	19	1	2	1%	11%	
Tiriamasis nr.6	73	17	79	15	6	2	8%	13%	
Tiriamasis nr.7	61	15	64	16	3	1	5%	6%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.8	61	18	64	17	3	1	5%	6%	Prastas radaro signalas
Tiriamasis nr.9	64	20	70	21	6	1	9%	5%	
Tiriamasis nr.10	57	18	64	15	7	3	11%	20%	
Tiriamasis nr.11	60	18	60	16	0	2	0%	13%	
Tiriamasis nr.12	73	20	76	19	3	1	4%	5%	
Tiriamasis nr.13	65	14	60	16	5	2	8%	13%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.14	65	19	64	19	1	0	2%	0%	
Tiriamasis nr.15	74	13	74	15	0	2	0%	13%	
Tiriamasis nr.16	90	19	88	19	2	0	2%	0%	
Tiriamasis nr.17	76	13	80	13	4	0	5%	0%	
Tiriamasis nr.18	69	13	69	17	0	4	0%	24%	

14 lentelė. A121 radarų masyvo matavimų eksperimento nr.4 metu rezultatai

Eksperimentas nr.4									
Nr.	Radarai		Bioplux		Absolutinė paklaida		Reliatyvioji paklaida		Komentarai
	ŠSD	KD	ŠSD	KD	ŠSD	KD	ŠSD	ŠSD	
Tiriamasis nr.2	63	21	65	22	2	1	3%	5%	
Tiriamasis nr.3	77	15	77	15	0	0	0%	0%	
Tiriamasis nr.4	77	15	77	15	0	0	0%	0%	
Tiriamasis nr.5	73	13	72	19	1	6	1%	32%	
Tiriamasis nr.6	80	13	79	14	1	1	1%	7%	
Tiriamasis nr.7	63	19	60	19	3	0	5%	0%	
Tiriamasis nr.8	63	21	62	20	1	1	2%	5%	
Tiriamasis nr.9	56	13	57	14	1	1	2%	7%	
Tiriamasis nr.10	59	14	60	13	1	1	2%	8%	
Tiriamasis nr.11	77	15	59	15	18	0	31%	0%	
Tiriamasis nr.12	74	15	76	15	2	0	3%	0%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.13	58	15	54	15	4	0	7%	0%	
Tiriamasis nr.14	64	19	67	19	3	0	4%	0%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.15	70	19	69	17	1	2	1%	12%	
Tiriamasis nr.16	69	20	91	20	22	0	24%	0%	
Tiriamasis nr.17	72	17	79	16	7	1	9%	6%	
Tiriamasis nr.18	75	22	70	20	5	2	7%	10%	

15 lentelė. A121 radarų masyvo matavimų eksperimento nr.5 metu rezultatai

Eksperimentas nr.5									
Nr.	Radarai		Bioplux		Absolutinė paklaida		Reliatyvioji paklaida		Komentariai
	ŠSD	KD	ŠSD	KD	ŠSD	KD	ŠSD	ŠSD	
Tiriamasis nr.2	67	16	76	17	9	1	12%	6%	
Tiriamasis nr.3	75	19	94	20	19	1	20%	5%	
Tiriamasis nr.4	64	18	112	17	48	1	43%	6%	
Tiriamasis nr.5	67	21	75	16	8	5	11%	31%	
Tiriamasis nr.6	73	21	112	19	39	2	35%	11%	
Tiriamasis nr.7	84	24	92	22	8	2	9%	9%	
Tiriamasis nr.8	77	13	98	14	21	1	21%	7%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.9									Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.10	69	18	76	18	7	0	9%	0%	
Tiriamasis nr.11	94	17	79	17	15	0	19%	0%	Prastas atraminis EKG signalas
Tiriamasis nr.12	64	22	111	22	47	0	42%	0%	
Tiriamasis nr.13	72	24	88	22	16	2	18%	9%	
Tiriamasis nr.14	75	19	87	17	12	2	14%	12%	
Tiriamasis nr.15	67	16	109	17	42	1	39%	6%	
Tiriamasis nr.16	83	28	113	23	30	5	27%	22%	
Tiriamasis nr.17	72	21	97	21	25	0	26%	0%	
Tiriamasis nr.18	77	14	64	19	13	5	20%	26%	Prastas atraminis EKG signalas

4 priedas. Kiti išvestiniai matavimų rezultatai

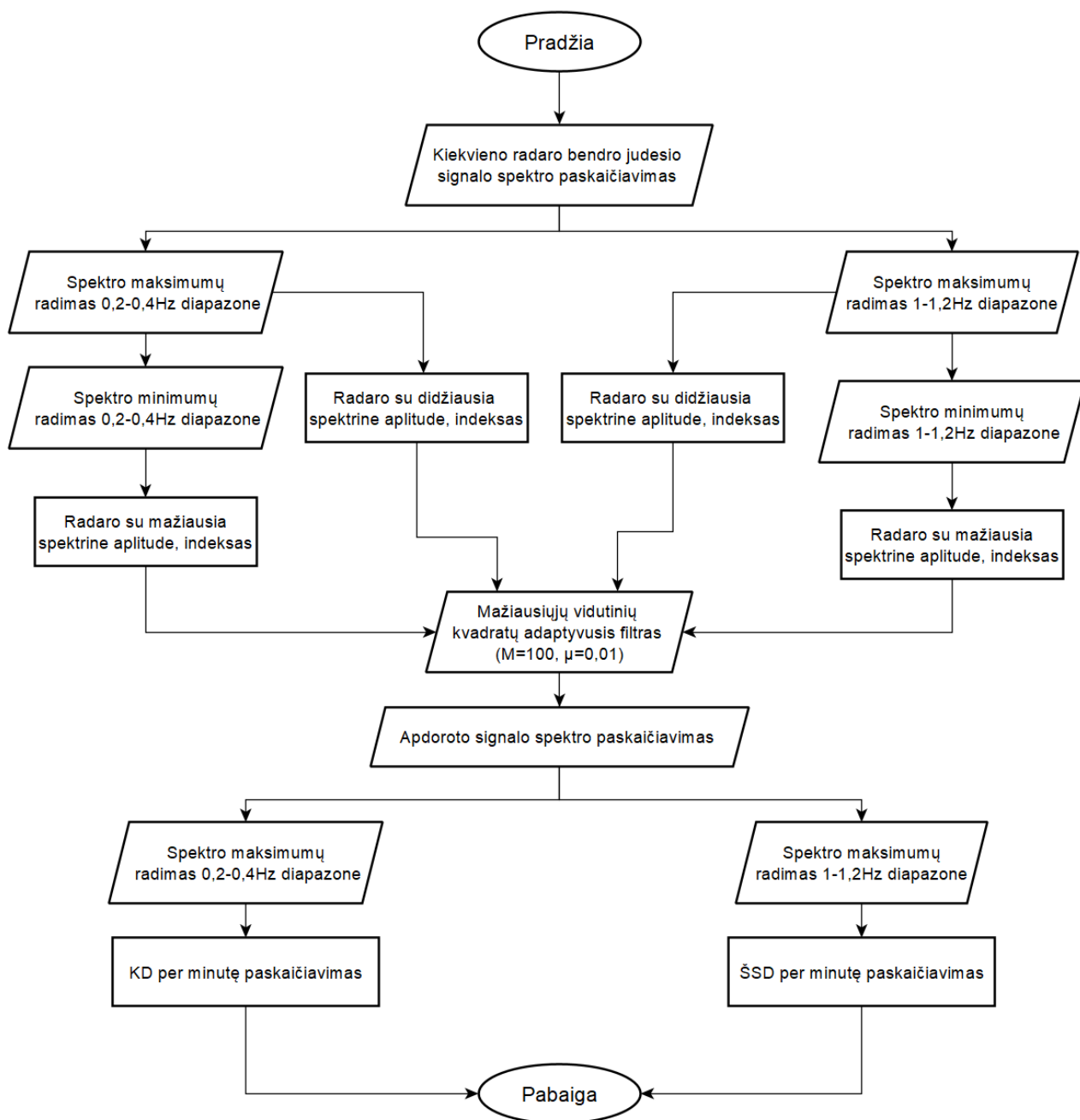
16 lentelė. Visų eksperimentų A111 radarų masyvo matavimų absoliutinės paklaidos suvestinė

Eksperimento nr.	Absoliutinė ŠSD paklaida A111					Absoliutinė KD paklaida A111				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Tiriamasis nr.2	0	21	2	2	1	1	2	1	1	1
Tiriamasis nr.3	0	16	4	7	3	3	5	0	0	1
Tiriamasis nr.4	0	22	1	0	17	1	3	0	0	1
Tiriamasis nr.5	0	18	2	1	5	1	2	1	1	1
Tiriamasis nr.6	2	15	5	0	29	1	3	1	1	1
Tiriamasis nr.7	4	9	3	6	20	2	4	1	5	1
Tiriamasis nr.8	5	2	2	1	1	0	4	2	1	1
Tiriamasis nr.9	3	26	0	2		1	1	1	1	
Tiriamasis nr.10	1	24	7	10	9	1	2	1	0	0
Tiriamasis nr.11	0	21	1	0	2	2	3	2	2	0
Tiriamasis nr.12	3	2	3	1	6	1	4	1	2	1
Tiriamasis nr.13	3	27	6	12	16	1	4	1	0	2
Tiriamasis nr.14	1	5	1	2	3	1	6	0	0	1
Tiriamasis nr.15	1	8	0	1	30	2	0	2	2	1
Tiriamasis nr.16	1	19	6	0	48	0	7	0	0	5
Tiriamasis nr.17	0	0	4	0	14	0	3	0	1	0
Tiriamasis nr.18	2	11	0	5	39	2	4	4	2	5

17 lentelė. Visų eksperimentų A111 radarų masyvo matavimų absoliutinės paklaidos suvestinė

Eksperimento nr.	Absoliutinė ŠSD paklaida A121					Absoliutinė KD paklaida A121				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Tiriamasis nr.2	1	34	1	2	9	1	2	0	1	1
Tiriamasis nr.3	1	2	5	0	19	3	1	1	0	1
Tiriamasis nr.4	1	7	3	0	48	0	0	0	0	1
Tiriamasis nr.5	0	20	1	1	8	1	1	2	6	5
Tiriamasis nr.6	2	3	6	1	39	1	6	2	1	2
Tiriamasis nr.7	1	12	3	3	8	1	8	1	0	2
Tiriamasis nr.8	2	4	3	1	21	0	6	1	1	1
Tiriamasis nr.9	0	5	6	1		1	4	1	1	
Tiriamasis nr.10	1	7	7	1	7	0	1	3	1	0
Tiriamasis nr.11	3	7	0	18	15	2	4	2	0	0
Tiriamasis nr.12	3	12	3	2	47	1	3	1	0	0
Tiriamasis nr.13	5	5	5	4	16	1	1	2	0	2
Tiriamasis nr.14	0	3	1	3	12	1	2	0	0	2
Tiriamasis nr.15	2	12	0	1	42	2	0	2	2	1
Tiriamasis nr.16	1	6	2	22	30	0	3	0	0	5
Tiriamasis nr.17	4	16	4	7	25	0	3	0	1	0
Tiriamasis nr.18	1	10	0	5	13	2	1	4	2	5

5 priedas. Pasiūlyto signalų apdorojimo algoritmo bendra schema



62 pav. Pasiūlyto signalų apdorojimo algoritmo bendra schema