

TARTU ÜLIKOOL  
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND  
Füüsika Instituut

Teet Tilk

**AKUSTILISE SIGNAALI LEVIAJA MÕÕTMISEL PÕHINEV  
LOKALISEERIMISE SÜSTEEM**

Magistritöö (30EAP)

Juhendajad: professor Alvo Aabloo  
dotsent Mart Noorma

Tartu 2011

# SISUKORD

Sissejuhatus.....	3
1. Ülevaade akustilisest lokaliseerimisest.....	4
2. Metoodika kirjeldus.....	5
2.1. Akustilise signaali allika asukoha määramine sirgel.....	5
2.2. Akustilise signaali allika asukoha määramine tasandil.....	6
2.3. Signaalide digitaliseerimine.....	10
2.4. Signaalide filtreerimine.....	11
2.5. Signaali algushetke automaatne tuvastamine.....	11
2.6. Süsteemis kasutatav riistvara.....	13
3. Töö käik.....	15
3.1. Riistvara kirjeldus.....	15
3.1.1. Riistvara struktuurskeem.....	15
3.1.2. Kondensaatormikrofon.....	16
3.1.3. Eelvõimendi elektriskeem.....	18
3.1.4. Pingekordisti elektriskeem.....	22
3.1.5. Eelvõimendi trükkplaadi skeem.....	24
3.1.6. Analoog-digitaalmuundur.....	25
3.1.7. Andmetöötluse arvuti.....	25
3.2. Tarkvara kirjeldus.....	26
4. Mõõtmistulemused ja analüüs.....	29
4.1. Süsteemi testimine.....	29
4.2. 122 mm kaliibriga haubitsa akustilise signaali parameetrid.....	32
Kokkuvõte.....	33
Viited.....	35
Summary.....	37
Lisa 1. Eelvõimendi elektriskeem.....	38
Lisa 2. Elektroonikakomponentide nimekiri.....	39

# SISSEJUHATUS

Akustilise signaali lokaliseerimist kasutatakse eelkõige militaarsetel eesmärkidel [1]. Relvast laskmisel tekkivat tugevat helilaine rõhku on võimalik mikrofonidega mõõta kuni 20 km kauguselt [2]. Erinevatesse asukohtadesse paigutatud mikrofonideni ehk mõõtepunktideni jõuab helilaine erineval ajal. Mõõtepunktide asukohti ja signaali levimise aegade erinevusi arvesse võttes saab välja arvutada akustilise signaallika asukohta [3]. Erinevalt radaril põhinevast relva asukohta määramise süsteemist, on käesolevas töös kirjeldatud süsteemi eeliseks passiivsus [4]. Seega ei paljasta süsteem töö ajal võimalikule vastasele oma asukohta.

Käesoleva töö eesmärgiks on luua akustilise signaallika lokaliseerimise süsteem, mis võimaldaks 20 km kauguselt määrata 135 dB helirõhuga relva asukohta 30 m täpsusega. Sealjuures peavad kaheksa mõõtepunkti olema laiali paigutatud lõigule, mille pikkus on 10 km. Mõõtepunktide asukohad tuleb määrata täpsusega kuni 3 m. Seatud eesmärgi saavutamiseks on vajalik:

- konstrueerida kaheksast mõõtepunktist koosnev riistvara, mis võimaldaks vastu võtta 20 km kauguselt akustilise signaali ning digitaliseerida signaalid töötlemiseks arvutiga;
- luua tarkvara, mis võimaldaks:
  - rakendada signaalidele filtreid;
  - kuvada reaaliajase ekraanile signaalide aegesitused;
  - tuvastada signaalide algushetked automaatselt või lubada kasutajal peatada signaalide aeg-esituse graafik ning määrata algushetked käsitsi;
  - vastavalt signaalide algushetkede erinevustele ja mõõtepunktide asukohtadele arvutada signaallika asukoht.

Käesolev magistritöö koosneb neljast peatükist, millest esimene annab ülevaate erinevatest signaallika lokaliseerimise meetoditest ja akustilise lokaliseerimise süsteemidest, teine peatükk kirjeldab arvutusmeetodeid, kasutatud algoritme ja kasutatavat riistvara. Kolmandas peatükis selgitatakse käesoleva töö käigus loodud akustilise signaallika lokaliseerimise süsteemi riistvara ja tarkvara lahendusi. Neljandas peatükis antakse ülevaade tehtud katsetuste ja mõõtmiste tulemustest ning tulemuste analüüsist.

# 1. ÜLEVAADE AKUSTILISEST LOKALISEERIMISEST

Signaali allika asukoha lokaliseerimiseks on kaks võimalust: triangulatsioon [5] ja saatja-vastuvõtja vaheliste leviaegade nihete (ingl k TDOA – Time Difference Of Arrival) mõõtmine [3, 6]. Triangulatsiooni meetodi puhul mõõdetakse kahes kindlaks määratud asukohas nurgad saatja ja fikseeritud baasjoone vahel, mis läbib mõlemat mõõtepunkti. Mõõdetud nurkasid ja mõõtepunktide asukohti arvestades saab välja arvutada signaali allika asukoha baasjoone suhtes. Triangulatsiooni kasutatakse navigatsioonis, mõõdeteaduses, astronoomilistes mõõtmistes ja raadiosaatja asukoha määramisel [5].

Saatja-vastuvõtja vaheliste leviaegade nihete mõõtmisel kasutatakse kolme või enamat vastuvõtjat, mis suudavad täpselt fikseerida aja, millal signaal vastu võeti. Sellist lokaliseerimise viisi kasutatakse peamiselt jälgimiste rakendustes tsiviil- ja militaareesmärkidel lennukite, laevade ja autode või statsionaarsete saatjate täpse asukoha kindlakstegemiseks [3, 6].

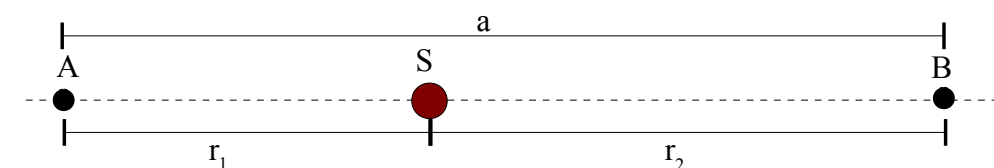
Militaarsetel eesmärkidel relvalasu asukoha kindlakstegemiseks kasutatakse saatja-vastuvõtja vaheliste leviaegade nihete mõõtmist. Signaalide mõõtmiseks kasutatakse laia suunadiagrammiga mikrofone, mis paigutatakse erinevatesse asukohtadesse. Mikrofonid ühendatakse arvutiga, mis tegeleb signaalide analüüsimisega [1, 7]. Snaiprilasu kindlakstegemiseks on olemas mobiilsed seadmed Ears ja ISIS [8, 9]. Ears'i puhul on tegemist peopesasuuruse seadmega, mis kinnitatakse sõduri õlale. ISIS lokaliseerimise süsteem kasutab nelja mikrofonide komplekti. Iga komplekt sisaldab omakorda nelja mikrofoni. Signaali allika asukoha kindlakstegemiseks piisab, kui kolm komplekti võtavad vastu akustilise signaali. Signaalide analüüsimiseks ja mõõtmis- ning arvutustulemuste kuvamiseks kasutatakse pihuarvutit [9]. Statsionaarse akustilise lokaliseerimise lahendusena on olemas firma Safety Dynamics poolt arendatud süsteem SENTRI. SENTRI süsteem koosneb linna paigutatud mikrofonidest ja valvekaameratest. Relvalasu tuvastamisel keerab süsteem automaatselt valvekaamera lasu asukoha peale ning salvestab video lasu sooritajast [10].

Suurtükilasu asukoha kindlakstegemiseks rohkem kui 1 km kauguselt on vaja kasutada tundlikke mikrofone ning mikrofonid tuleb paigutada üksteises eemale vähemalt 50 m. Vastasel juhul ei õnnestu tuvastada signaalide leviaegade nihkeid [2].

## 2. METOODIKA KIRJELDUS

### 2.1. Akustilise signaallallika asukoha määramine sirgel

Akustilise lokaliseerimise võimalikkuse katsetamiseks koostati arvutusmeetod signaallallika asukoha määramiseks sirgel. Akustilise signaallallika asukoha määramiseks sirgel on vaja kasutada kahte mikrofoni. Nii mikrofonid kui ka signaallallikas peavad asuma ühel sirgel, sellist olukorda kirjeldab joonis 2.1.1.



A – mikrofoni A  
B – mikrofoni B  
S – signaallallikas

**Joonis 2.1.1.** Akustilise signaallallika asukoha määramine sirgel

Kuna pole teada ajahetke, millal akustiline signaal tekkis, on võimalik süsteemiga mõõta vaid aega  $t$ , mille võrra jõudis signaal mikrofoni B juurde hiljem kui mikrofoni A juurde. Heli levikiiruse sõltuvuse õhutemperatuurist Kelvini kraadides saab leida valemiga [11]:

$$c = 331,3 + 0,606 \cdot (T - 273,15) \quad 2.1.1$$

$c$  – helikiirus m/s

$T$  – õhutemperatuur °K

Arvestades, et heli levib konstantse kiirusega  $c$ , saab süsteemi poolt mõõdetud aja  $t$  teisendada pikkusühikutesse:

$$d = c \cdot t \quad 2.1.2$$

Suurus  $d$  näitab mikrofonide A ja B kauguste vahet signaallallikast S:

$$d = r_2 - r_1 \quad 2.1.3$$

Mikrofonide asukohad on fikseeritud ning nende omavaheline kaugus avaldub valemiga:

$$a = r_1 + r_2 \quad 2.1.4$$

Teades mikrofonide vahelist kaugust  $a$ , heli levimise kiirust  $c$  ning süsteemi poolt mõõdetud

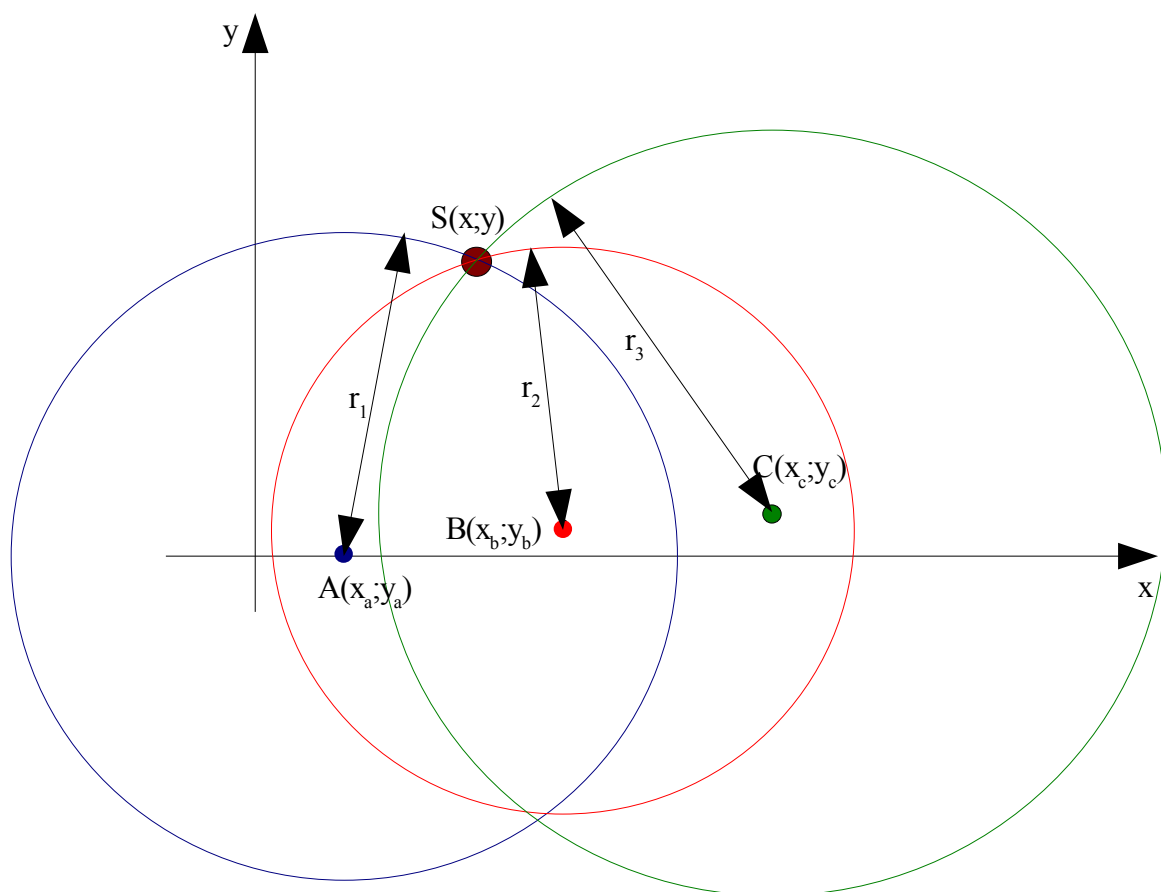
aega  $t$ , saab nende andmete põhjal saab välja arvutada signaallika kauguse mikrofonist A:

$$r_1 = \frac{c \cdot t - a}{-2} \quad 2.1.5$$

Seega on võimalik kahe mikrofoniga levija erinevust mõõtes välja arvutada signaallika asukoht sirgel fikseeritud asukohtadega mikrofonide suhtes.

## **2.2. Akustilise signaallika asukohta määramine tasandil**

Akustilise signaallika asukohta määramiseks kahemõõtmeliselt on vaja kasutada kolme mikrofoni. Nelja või enama mikrofoni kasutamisel saab arvutada mitme võimaliku signaallika asukohta, mis peaksid langema kokku ning asukohtade koordinaate keskmistades on võimalik suurendada süsteemi täpsust. Akustilise signaallika lokaliseerimiseks tasandil koostati käesolevas töös ringjoonte võrrandeid kasutav arvutusmeetod. Lihtsustatult kirjeldab kolme mikrofoniga akustilise signaallika lokaliseerimist joonis 2.2.1.



A – mikrofon A  
 B – mikrofon B  
 C – mikrofon C  
 S - signaallikas

**Joonis 2.2.1.** Akustilise signaallikka asukoha määramine tasandil

Kolme mikrofoniga on võimalik mõõta kaks aega: aeg  $t_1$  on leviaegade vahe mikrofonide A ja B vahel, aeg  $t_2$  aga leviaegade vahe mikrofonide A ja C vahel. Arvestades, et heli levib konstantse kiirusega (valem 2.1.1), saab mõõdetud tulemused teisendada pikkusteks:

$$d_1 = c \cdot t_1 \quad 2.2.1$$

$$d_2 = c \cdot t_2 \quad 2.2.2$$

Pikkused  $d_1$  ja  $d_2$  näitavad ühtlasi, kui palju mikrofon B keskpunktist tõmmatud ringjoone raadius  $r_2$  ja mikrofon C keskpunktist tõmmatud ringjoone raadius  $r_3$  erineb mikrofon A keskpunktist tõmmatud ringjoone raadiusest  $r_1$ .

$$d_1 = r_2 - r_1 \quad 2.2.3$$

$$d_2 = r_3 - r_1 \quad 2.2.4$$

Ringjoonte võrrandid joonisel 2.2.1 on järgmised:

$$(x-x_a)^2+(y-y_a)^2=r_1^2 \quad 2.2.5$$

$$(x-x_b)^2+(y-y_b)^2=r_2^2 \quad 2.2.6$$

$$(x-x_c)^2+(y-y_c)^2=r_3^2 \quad 2.2.7$$

Signaali allika S koordinaatide (x;y) leidmiseks saab võrranditest 2.2.3...2.2.7 tuletada kolme tundmatuga võrrandisüsteemi:

$$\begin{cases} (x-x_a)^2+(y-y_a)^2=r_1^2 \\ (x-x_b)^2+(y-y_b)^2=(d_1+r_1)^2 \\ (x-x_c)^2+(y-y_c)^2=(d_2+r_1)^2 \end{cases} \quad 2.2.8$$

Mikrofonide koordinaadid A(x<sub>a</sub>;y<sub>a</sub>), B(x<sub>b</sub>;y<sub>b</sub>) ning C(x<sub>c</sub>;y<sub>c</sub>) on eelnevalt mõõdetud. Parameetrid d<sub>1</sub> ja d<sub>2</sub> arvutatakse mõõdetud aega ning helikiirust arvestades (2.2.1, 2.2.2). Tundmatud suurused võrrandisüsteemis 2.2.8 on x, y ja r<sub>1</sub>, mille leidmiseks tuleb võrrandisüsteem lahendada. Kasutades kaheksat mikrofoni, on võimalik vastavalt kombinatoorika reeglitele kolmest mõõtepunktist saadud tulemusi võrrandisüsteemis 2.2.8 rakendada 56 korral. Kombinatsioonid kaheksast kolme kaupa:

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!} \quad 2.2.9$$

$$C_8^3 = 56 \quad 2.2.10$$

Saadud punktide koordinaate (x<sub>i</sub>;y<sub>i</sub>) keskmistades on võimalik suurendada süsteemi mõõtmistäpsust. Keskmistatud signaali allika S<sub>k</sub> koordinaadid saab välja arvutada vastavalt arvutatud punktide arvule n järgmiste valemitega:

$$x_k = \frac{\sum x_i}{n} \quad 2.2.11$$

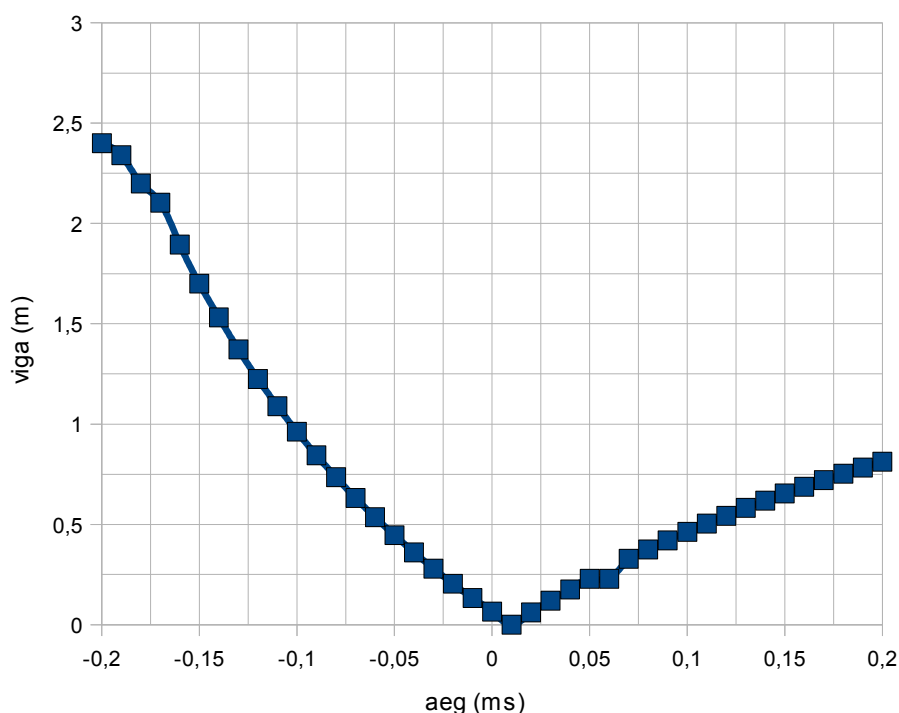
$$y_k = \frac{\sum y_i}{n} \quad 2.2.12$$

### Mõõtevigade simulatsioon

Signaalide algushetkede ja aegade t<sub>1</sub> ning t<sub>2</sub> vajaliku määramistäpsuse hindamiseks simuleeriti süsteemi tööd väikesel ja normaalskaalal. Väikesel skaalal on mikrofonid laiali paigutatud



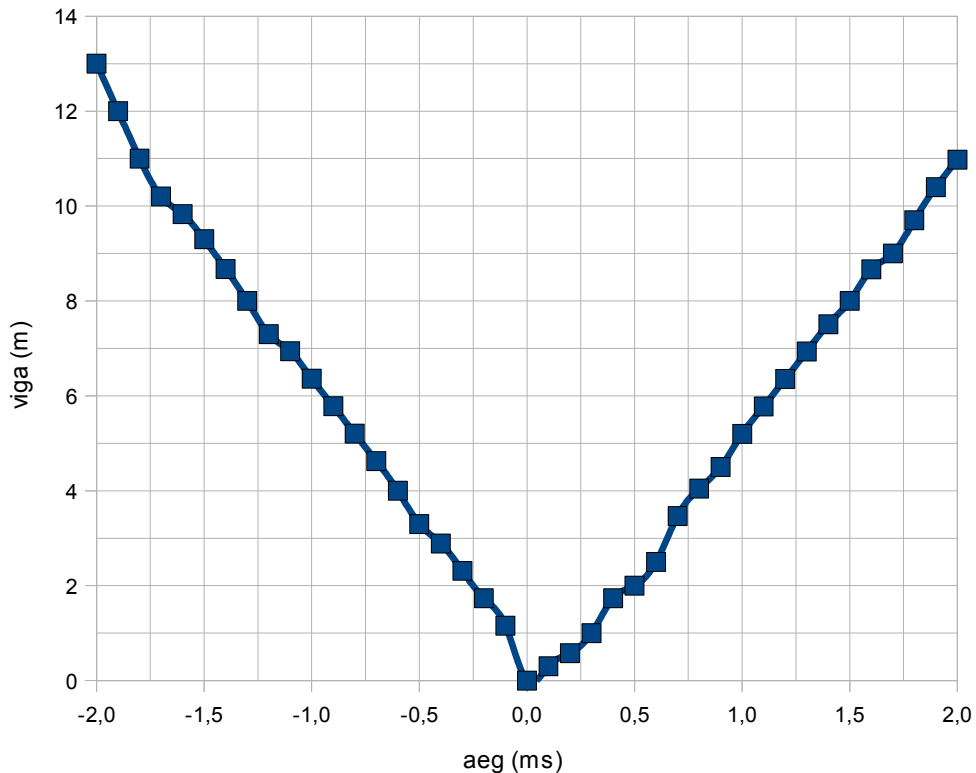
kuni 2 m pikkusele alale ning signaale mõõdetakse kuni 3 m kauguselt. Normaalskaalal on mikrofonid paigutatud laiali 10 km pikkusele alale ning signaale mõõdetakse 20 km kauguselt. Süsteemi simuleerimiseks väikesel skaalal määrati kolme mikrofoni koordinaatideks  $A=(0 \text{ m}; 0 \text{ m})$ ,  $B=(0,6 \text{ m}; 0 \text{ m})$  ja  $C=(1,2 \text{ m}; 0 \text{ m})$ . Signaallallika koordinaatideks määrati  $S=(1,3 \text{ m}; 2,4 \text{ m})$ . Samade parameetritega teostati ka süsteemi testimist, mida kirjeldab käesoleva töö peatükk 4.1. Simulatsiooni käigus tekitati parameetritele  $t_i$  mõõteviga sammuga 0,01 ms vahemikus -0,2...+0,2 ms.



**Joonis 2.2.2.** Mõõtevea simulatsioon väikesel skaalal

Tulemusest selgub (joonis 2.2.2), et juba 0,05 ms suurune ajahetke mõõteviga tekitab akustilise signaallallika asukoha määramisel 0,5 m vea. Kuna signaallallikas paiknes mikrofonidest 2,4 m kaugusel, on 0,5 m vea puhul tegemist väga suure suhtelise veaga (21%). Rahuldavate mõõtetulemuste saavutamiseks tuleks sellises olukorras määrata signaallalgushetked vähemalt 0,01 ms täpsusega.

Mõõtevea simuleerimiseks normaalskaalal määrati mikrofonide koordinaatideks  $A=(0 \text{ m}; 0 \text{ m})$ ,  $B=(5000 \text{ m}; 0 \text{ m})$  ja  $C=(10000 \text{ m}; 0 \text{ m})$ . Signaallallika koordinaatideks määrati  $S=(7500 \text{ m}; 20000 \text{ m})$ . Väikesel skaalaga võrreldes tekitati parameetritele  $t_i$  suurem mõõteviga sammuga 0,1 ms vahemikus -2...+2 ms



**Joonis 2.2.3.** Mõõtevea simulatsioon normaalskaalal

Mõõtevea simulatsioonitulemused on kujutatud graafikuna joonisel 2.2.3. Arvestades, et signaali allikas paiknes mikrofonidest 20 km kaugusel, on 15 m mõõteviga suhtelise veana väga väike (0,075%) ning jääb käesoleva töö eesmärkides esitatud mõõtetäpsuse piiridesse. Lisaks suurendab süsteemi realses kasutuses täpsust kaheksa mikrofoni kasutamine. Seega piisab normaalskaalal signaali algushetke määramise täpsusest  $\pm 1$  ms. Olulisemat rolli mängib antud juhul helikiiruse sõltuvus erinevatest ilmastikuparameetritest ning maastiku iseärasustest [11].

### 2.3. Signaalide digitaliseerimine

Signaalide digitaliseerimiseks kasutatakse ühte analoog-digitaalmuundurit, mille sisendis multipleksitakse 8-kanalist sisendsignaali. Kasutades mitut kanalit, möödab analoog-digitaalmuundur tsükliliselt järjest läbi kõik soovitud kanalid. Käesolevas töös kirjeldatud süsteemis vajatakse ükskiku kanali diskreetimissagedust 20 kHz. Seega kaheksa kanali kasutamisel peab analoog-digitaalmuunduri diskreetimissagedus olema vähemalt  $8 \cdot 20 \text{ kHz} = 160 \text{ kHz}$ . Muundurist loetakse arvutisse korraga 2000 väärtust ühe kanali kohta ning lugemised toimuvad iga 100 ms pikkuse aja järel. Tulenevalt programmeerimiskeskonna LabVIEW omadustest, moodustub kaheksa kanali lugemisel analoog-digitaalmuundurist 8-

elemendiline massiiv, mille elementideks on 100 ms kestusega signaalikujud. [12]

## 2.4. Signaalide filtreerimine

Signaalide filtreerimiseks on süsteemis kasutusel tarkvaraliselt realiseeritud Butterworth'i filter [13]. Kuna süsteemi töö seisukohalt on oluline kindel sagedusvahemik, tuleb kasutada ribapääsfiltrit. Butterworth'i filter on eelistatud tänu tema suhteliselt lineaarsele tunnusjoonele pääsualas. Ribapääsfiltri madalpääs osa amplituud-sageduskarakteristikut iseloomustab järgmine seos:

$$\frac{U_s}{U_v} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_l}\right)^{2n}}} \quad 1.5.1$$

$U_s$  – sisendpinge

$U_v$  – väljundpinge

$f$  – sisendpinge sagedus

$f_l$  – filtri lõikesagedus

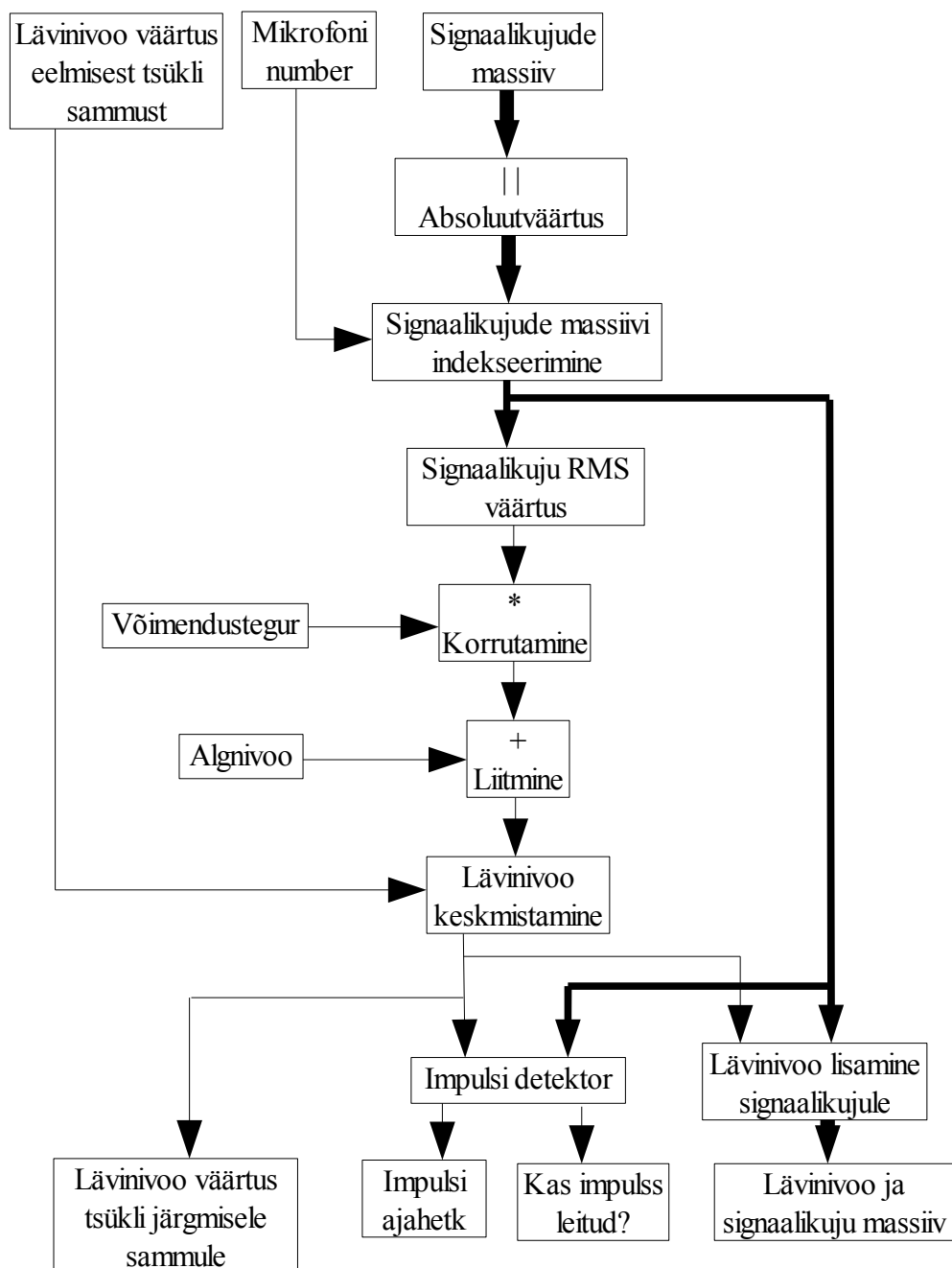
$n$  – filtri järk

Filtri sumbealas on filtri tunnusjoone tõus  $6 \cdot n$  dB oktavi kohta, kus  $n$  tähistab filtri järku. Filtri järk tuleb valida selliselt, et see rahuldaks süsteemi signaalide filtreerimisele esitatud nõudeid. Käesolevas töös kirjeldatud süsteemis kasutatakse neljandat järku Butterworth'i filtrit. Butterworth'i filtri faasi-sageduse tunnusjooned on lõikesageduse piirkonnas võrdlemisi lineaarsed. Faasitunnusjoone ebalineaarsus põhjustab siirdemoonutust: filtri sisendisse signaaliimpulsi saabumisel tekib väljundpinge kõveral ülevõnge, millele järgneb kiiresti sumbuv võnkumine. Ülevõnke amplituud kasvab koos filtri järguga  $n$ . Filtri selline reaktsioon võib moonutada helisagedussignaali kvaliteeti. Akustilise lokaliseerimise süsteemis kasutatakse signaali vaid leviaja mõõtmise eesmärkidel ning helisignaali kvaliteedi langus ei häiri süsteemi normaalset toimimist [13].

## 2.5. Signaali algushetke automaatne tuvastamine

Signaali algushetke tuvastamiseks kasutatakse käesolevas töös kirjeldatud süsteemis lävinivood, mille ületamisel registreeritakse signaali algushetk. Lävinivoo peab olema seatud selliselt, et juhuslikud madalama nivooga mürad ei rakendaks algushetke automaatset tuvastamist. Pärast signaalide filtreerimist antakse signaalikujud edasi süsteemi arendamise

käigus loodud algoritmile, mis tegeleb signaali algushetke automaatse tuvastamisega. Algoritmi kirjeldab joonis 2.5.1.



**Joonis 2.5.1.** Signaali algushetke tuvastamise algoritm

Algoritmi sisenditeks on kõikide signaalikujude massiiv, kanali number, mida analüüsitakse ja lävinivoo väärtus eelmisest tsükli sammust. Algoritmi väljunditeks on lävinivoo väärtus, ühe kanali signaalikuju pärast filtreerimist, lävinivoo signaalikuju, tõeväärtus impulsi leidmise kohta ning aeg, millal impulss leiti.

Kõigepealt võetakse signaalikujudest absoluutväärtus, kuna akustiline signaal on

kahepoolaarne ning signaali algushetke tuvastamisel on oluline vaid signaalinivoo absoluutväärtus. Pärast absoluutväärtuse võtmist indekseeritakse signaalikujude massiivist üks signaalikuju edasiseks analüüsiks. Kuna analoog-digitaalmuundurist loetakse signaalikujusid 100 ms sammuga, võetakse ühest 100 ms kestusega signaalikujust elektriline efektiivväärtus (ingl k RMS – Root Mean Square). Saadud efektiivväärtus korrutatakse konstantse võimendusteguriga. Katsetused näitavad, et sobiv võimendustegur on ligikaudu 40. Korrutamine on vajalik, et tõsta lävinivood signaalinivoo suhtes. Kuna lävinivoo peab normaalolukorras olema alati kõrgem kui signaalinivoo, tuleb lävinivoole juurde liita veel algnivoo, mille väärtuseks sobib katsetuste teel määratud ligikaudu 0,5 ühikut. [14]

Tänu lävinivoo keskmistamisele tõuseb lävinivoo väärtus üles, kui signaali mõjutavad suhteliselt ühtlase nivooga mürad, näiteks tuul. Lävinivood keskmistatakse antud funktsioonis viie sekundi laiuse aknaga, mis tähendab, et lävinivood mitteületanud mürasignaali viib lävinivoo viieks sekundiks kõrgemaks, et signaali algushetke automaatne tuvastamine ei rakenduks mürasignaalile. Selline keskmistamisalgoritm on mõeldud eelkõige tuule poolt tekitatud müra vältimiseks, kuna see ei teki üldjuhul järsult, vaid kasvab teatud aja jooksul. Relvalasu järsk signaaliimpulss aga ületab lävinivoo koheselt ja rakendab impulsidetektorit.

Impulsidetektorit ülesandeks on signaalikuju väärtuste hulgast, mis ületavad lävinivoo, otsida esimene punkt, kus tõusev signaalinivoo saavutab oma tippväärtuse ning hakkab langema. Sellist punkti nimetatakse kõvera käänupunktiks. Impulsidetektor annab oma väljundisse tõeväärtuse käänupunkti leidmise kohta ja käänupunkti ajahetke väärtuse. Impulsi ajahetke väärtus antakse akustilise signaali allika asukoha arvutamise funktsioonile, mille matemaatilisi meetodeid kirjeldab käesoleva töö peatükk 2.2.

Lävinivoo väärtus ja üksiku mikrofoni signaalikuju graafik lisatakse kokku ühte massiivi, et ühel graafikul kuvada korraga nii lävinivoo kui ka mikrofoni signaalikuju absoluutväärtus.

## **2.6. Süsteemis kasutatav riistvara**

20 km kauguselt suurtüki poolt tekitatud helilaine vastuvõtmiseks on vaja kasutada suure tundlikkusega mikrofone. Samuti peavad mikrofonide amplituud-sageduskarakteristikud olema suhteliselt lineaarsed madalamatel sagedustel. Käesolevas töös valiti mikrofonideks Samson C02 kondensaatormikrofonid. Valitud mikrofonid on sümmeetrilise väljundiga, mille abil saab tunduvalt vähendada häirete mõju signaali kaablile.

Signaalide digitaliseerimiseks tuleb kasutada vähemalt 160 kHz diskreetimissagedusega

analoog-digitaalmuundurit. Kuna süsteemi tarkvara on kirjutatud National Instruments LabVIEW keskkonnas, valiti analoog-digitaalmuunduriks National Instruments USB-6218 BNC. Antud muunduri diskreetimissagedus on 300 kHz.

Kondensaatormikrofonide ühendamiseks analoog-digitaalmuunduriga on vajalik kasutada eelvõimendit, kuna mikrofonide väljundid on sümmeetrilised ning muunduri sisendid on mittesümmeetrilised. Lisaks vajavad kondensaatormikrofonid tööks 12...48 V alalispinget, mis tuleb samuti anda eelvõimendi kaudu mikrofonidele [15]. Eelvõimendi sisendites peab olema raadiosageduslike häirete filtreerimine. Sümmeetrilise signaali võimendamiseks kasutatakse operatsioonvõimendit. Kaheksa mikrofonikanali võimendamiseks on otstarbekas kasutada operatsioonvõimendi mikroskeem, mis sisaldaks nelja operatsioonvõimendit, näiteks TL084 [16]. Kondensaatormikrofonide toiteks vajaliku kõrge alalispinge genereerimiseks tuleb kasutada alalispinge konverterit. 9 V toitepingest 40 V toitepinge genereerimist võimaldab mikroskeem LM2733 [17]. Kuna odavaim elektroonikaseadmete tootmisviis on pindmontaaž, peab eelvõimendi skeemis olema võimalikult palju komponente pindmontaaži korpustes [18].

Arvuti andmetöötluseks ja signaalide graafiliseks kuvamiseks peab olema hea arvutus- ja graafikavõimsusega. Samuti on eelistatud sülearvuti tänu tema paremale toite autonoomsusele ja kompaktsusele.

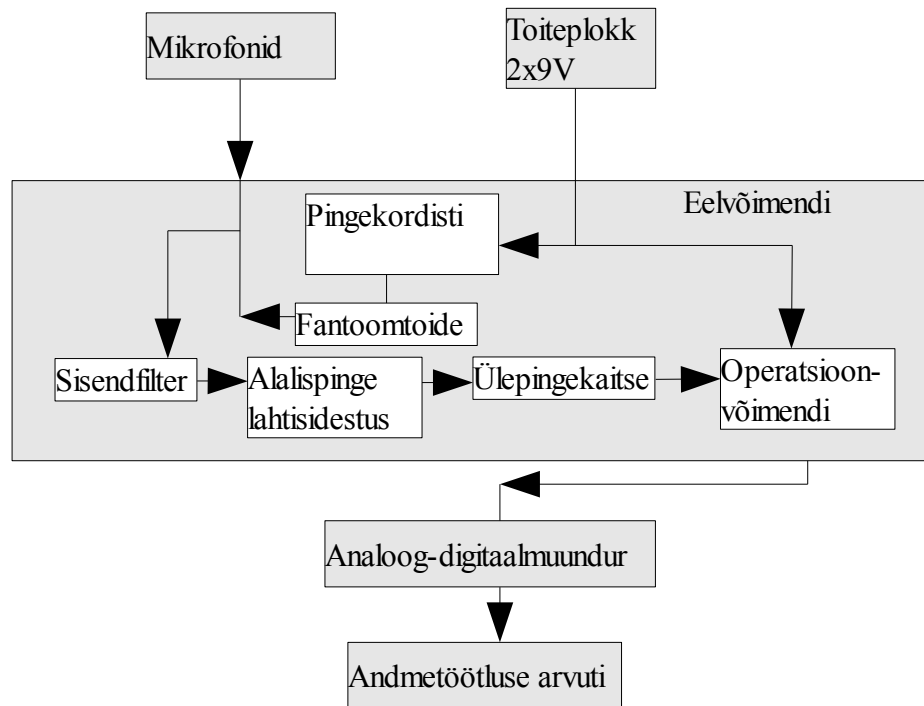
## 3. TÖÖ KÄIK

### 3.1. Riistvara kirjeldus

Akustiliste signaalide muundamiseks elektrilisteks signaalideks on antud süsteemis kasutusel kondensaatormikrofonid Samson C02. Signaalide digitaliseerimiseks kasutatakse National Instruments'i analoog-digitaalmuundurit USB-6218. Mikrofonide eelvõimendiga tõstetakse signaalide nivoo ja antakse fantoomtoidet (ing. k. phantom power). Signaale töödeldakse ja mõõtmistulemusi kuvatakse PC-tüüpi sülearvutiga.

#### 3.1.1. Riistvara struktuurskeem

Süsteem koosneb viiest erinevast omavahel ühendatud osast (joonis 3.1.1). Akustilise signaali vastuvõtmiseks kasutatavaid mikrofone on süsteemis kasutusel 3...8. Mikrofonid ühendatakse eelvõimendi sisenditesse XLR-tüüpi pistikute ja pesade ning kaablitega. Toiteplokk tagab eelvõimendile 9 V kahepolaarse stabiliseeritud toitepinge. Eelvõimendi koosneb omakorda kuuest osast. Igal mikrofonikanalil on oma sisendfilter, alalispinge lahtisidestus, fantoomtoide ning ülepingekaitse. Operatsioonvõimendi mikroskeem sisaldab endas nelja operatsioonvõimendit, seega on kaheksa kanali jaoks vaja kasutada kahte mikroskeemi. Sisendfiltri ülesandeks on eelkõige raadiosageduslike häirete filtreerimine. Kuna kondensaatormikrofone toidetakse alalispingega, siis on skeemis alalispinge lahtisidestus ning komponendid fantoomtoite andmiseks. Ülepingekaitse ülesandeks on operatsioonvõimendi sisendite kaitsmine juhuslike pingepulsside eest. Fantoomtoite jaoks üldisest toitepingest kõrgema alalispinge genereerimiseks on eelvõimendis pingekordisti. Operatsioonvõimendi väljunditest antakse signaalid edasi analoog-digitaalmuundurile. Ühendamiseks kasutatakse BNC-tüüpi kaableid ja pistikuid. Analoog-digitaalmuundur ühendatakse andmetöötlusarvutiga USB-kaabliga.

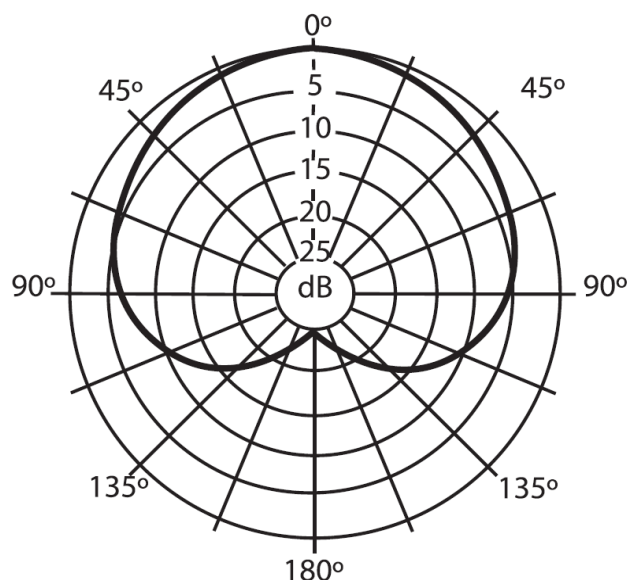


**Joonis 3.1.1.** Akustilise lokaliseerimise süsteemi riistvara struktuurskeem

### 3.1.2. Kondensaatormikrofon

Mikrofonidena on kasutusel Samson C02 kondensaatormikrofonid. Kondensaatormikrofon muundab helirõhu muutuse elektrimahtuvuse muutuseks. Mikrofonis moodustab kondensaatori ühe plaadi metalliseeritud plaat, mis asub paigalseisvast plaadist paarikümne mikromeetri kaugusel. Mahtuvuse muutus teisendatakse elektripinge muutuseks lülitusega, kus mikrofoniki kondensaatoriga on järjestikku ühendatud alalispinge allikas ja takisti. Sellises lülituses muutub koos mahtuvusega kondensaatori laeng. Laengu muutusest põhjustatud elektrivool tekitab takistil membraani võnkumist järgiva pingelangu. Kondensaatormikrofonid on eelistatud tänu nende suhteliselt lineaarsele amplituud-sagedusarakteristikule ja suurele tundlikkusele. Mikrofoniki suunadiagramm on kardioid-tüüpi (joonis 3.1.2).

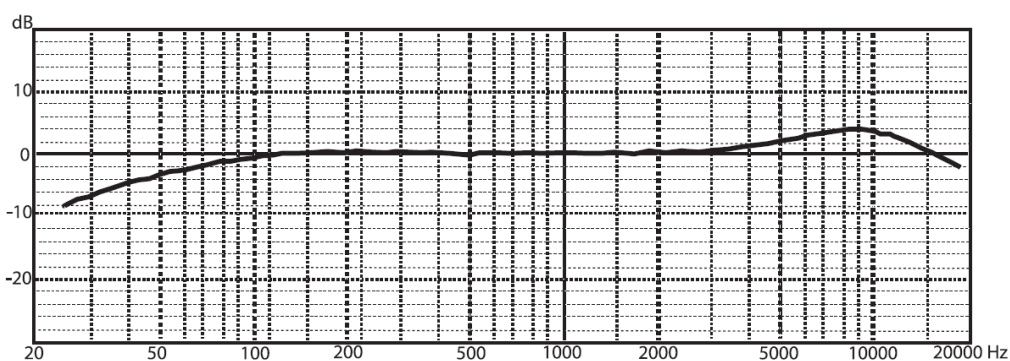




**Joonis 3.1.2.** Mikrofoni suunadiagramm

Kardioid-tüüpi suunadiagramm tähendab, et mikrofon võtab vastu paremini eestpoolt tulevaid signaale, kuid ei ole samas ka liiga kitsas ning ei vaja täpset suunamist. Tänu sellisele suunadiagrammile ei võeta tugevalt vastu külgedelt ja tagantpoolt tulevat taustmüra.

C02 mikrofoni amplituud-sageduskarakteristik on kondensaatormikrofonile omaselt suhteliselt lineaarne. Joonisel 3.1.3 on suhteline amplituud-sageduskarakteristik, kus 1 kHz sageduskosteks on 0 dB.



**Joonis 3.1.3.** Mikrofoni amplituud-sageduskarakteristik 1kHz suhtes

Kuigi sageduskarakteristik langeb madalate sageduste osas, on kondensaatormikrofon madalate sageduste osas ikkagi tundlikum kui dünaamiline mikrofon. Mikrofoni teised olulised tehnilised parameetrid on järgmised:

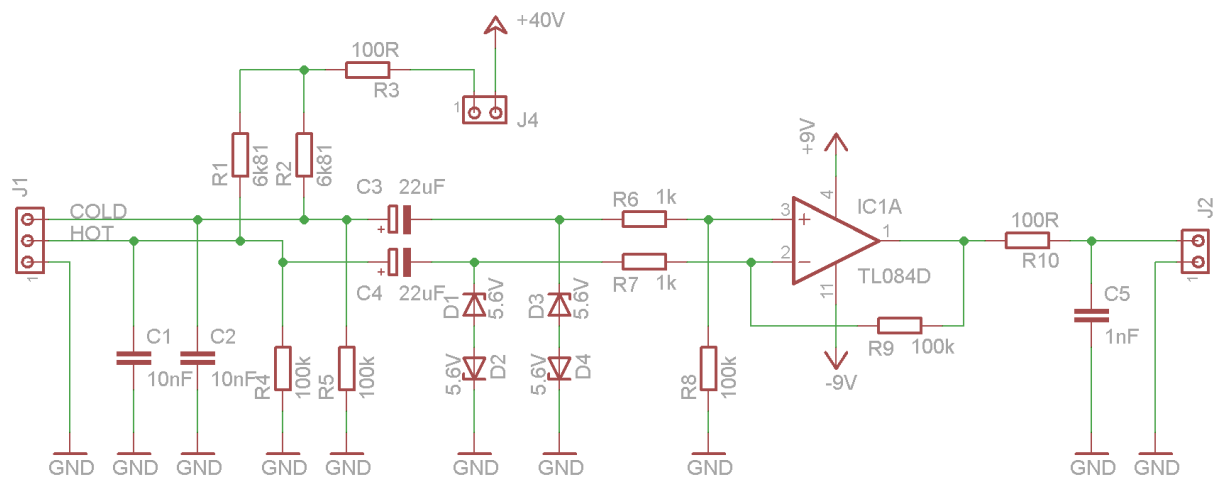
- tundlikkus: 10 mV/Pa;
- impedants: 200  $\Omega$ ;
- toitepinge: 48 V fantoomtoide;

- voolutarve: 3,5 mA.

Mikrofoni pikkade ühenduskaablite tõttu tekkiva müra vähendamiseks on antud mikrofoni väljundsignaaliks sümmeetriline signaal. Signaalikaablis edastatakse nii väljundsignaal kui ka väljundsignaal vastandfaasis ning ühisjuhtmeks (ing. k. common) on kaabli varjestus. Fantoomtoite positiivne polaarsus antakse signaalijuhtmetele ning negatiivne polaarsus ühisjuhtmele [15, 19, 20].

### 3.1.3. Eelvõimendi elektriskeem

Mikrofonide kaablid on käesolevas töös kirjeldatud süsteemi puhul suhteliselt pikad. Samuti on pingeniivood mikrofonide väljundites millivoltides, mille tõttu üle 10 m pikkuste kaablite kasutamine annaks juba mitterahuldava signaali-mürasuhte. Parema häirekindluse saavutamiseks müra vastu kasutatakse mikrofonide väljundis sümmeetrilist signaali. Analoog-digitaalmuunduri sisendid on aga mitesümmeetrilised, seega on vajalik eraldi eelvõimendi mikrofonidele, mis paikneb analoog-digitaalmuunduri ja andmetötluse arvuti juures. Eelvõimendi ja analoog-digitaalmuunduri vahelised mitesümmeetrilise signaali kaablid on lühikesed ja hästi varjestatud, samuti on signaali pingeniivood juba võimendatud, seega ei avalda häired signaalile olulist mõju. Kasutades kondensaatormikrofone, on vajalik ka fantoomtoite andmine mikrofonidele eelvõimendi kaudu.



Joonis 3.1.4. Mikrofonide eelvõimendus ja fantoomtoide

#### Sisendastme filter

Eelvõimendi skeemis (joonis 3.1.4) moodustavad kondensaatorid  $C_1$  ja  $C_2$  ning mikrofon ja mikrofonikaabel madalpääsfiltri, mille ülesandeks on sisendastme puhastamine võimalikest raadiosageduslikest häiretest. Madalpääsfiltri -3 dB lõikesagedus arvutatakse järgmise valemiga:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad 3.1.1$$

Soovitud lõikesageduseks võetakse 100 kHz, mis on piisavalt kõrge, et mitte avaldada mõju kasulikule helisignaalile, kuid samas lõigatakse maha raadiosageduslikud häired. Takistuseks R võib antud juhul võtta mikrofone impedantsi 200 Ω. Reaalsuses mängib rolli ka mikrofonikaabel, kuid mikrofonikaablite impedantsi ei spetsifitseerita. Kondensaatori mahtuvuse saab valemist 3.1.1 arvutada järgmiselt:

$$C = \frac{1}{2\pi R f_c} = \frac{1}{2\pi \cdot 200 \cdot 100 \cdot 10^3} = 7,96 \cdot 10^{-9} F = 7,96 nF \quad 3.1.2$$

Lähima standardse väärtusena valitakse kondensaatorite C<sub>1</sub> ja C<sub>2</sub> väärtusteks 10 nF. Kuna kondensaatoreid kasutatakse raadiosageduslike häirete filtreerimiseks, peavad kondensaatoritel C<sub>1</sub> ja C<sub>2</sub> olema madal järjestikune parasiitne induktiivsus ning kasutada tuleb keraamilisi kondensaatoreid. Trükkplaadil peab sisendastme filterkondensaatoritel olema väga hea ühendus ühismaaga (ing. k. common ground) [21, 22].

### **Fantomtoite andmine**

Takistite R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> ja R<sub>3</sub> (joonis 3.1.4) ülesandeks on fantoomtoite andmine mikrofonile. Kondensaatormikrofonide toitmiseks on kaks võimalust: A-B pingestamine (DIN 45595) ja fantoomtoite (DIN 45596). A-B pingestamise puhul antakse toitepinge kaabli sümmeetrilise signaali juhtmetele ning varjestus jäetakse kasutamata. Antud pingestamisviis on aga sobimatu dünaamiliste mikrofonide jaoks. Toitepinge poolt tekitatud elektrivool voolaks läbi mikrofone mähise ning põletaks selle läbi. Fantoomtoite puhul antakse toitepinge negatiivne polaarsus varjestusele ning positiivne polaarsus antakse läbi takistite mõlemale sümmeetrilise kaabli signaalijuhtmetele. Kuigi käesolevas töös kirjeldatud süsteemis kasutatakse kondensaatormikrofone, on soovitatav kohe disainida valmidus nii dünaamiliste kui ka kondensaatormikrofonide kasutamiseks. Takistid R<sub>1</sub> ja R<sub>2</sub> peavad olema täppistakistid, et vältida fantoomtoite alalispingest tingitud potentsiaalierinevusi sümmeetrilise signaalikaabli signaalijuhtmetel. Takistite täpsusklass peab olema 1% või parem. Standardites IEC 268-15 ja DIN 45596 soovitatakse fantoomtoite andmiseks kasutada 6,81 kΩ takistusi. Täiendava järjestikuse takistuse lisamiseks on 100 Ω väärtusega takisti R<sub>3</sub>. R<sub>3</sub> puhul võib kasutada enimlevinud 5% täpsusklassiga takistit. Vastavalt fantoomtoite standarditele võib kasutada 12...48V toitepinget. Käesolevas skeemilahenduses kasutatakse 40 V pinget, kuna sellist pinget on võimalik genereerida tavaliste pingekonverteritega ka 9 V toitepingest.

Sildühenduse  $J_4$  abil on võimalik fantoomtoide üksikute eelvõimendi kanalite kaupa välja lülitada [23, 24].

### Alalispinge lahtisidustus

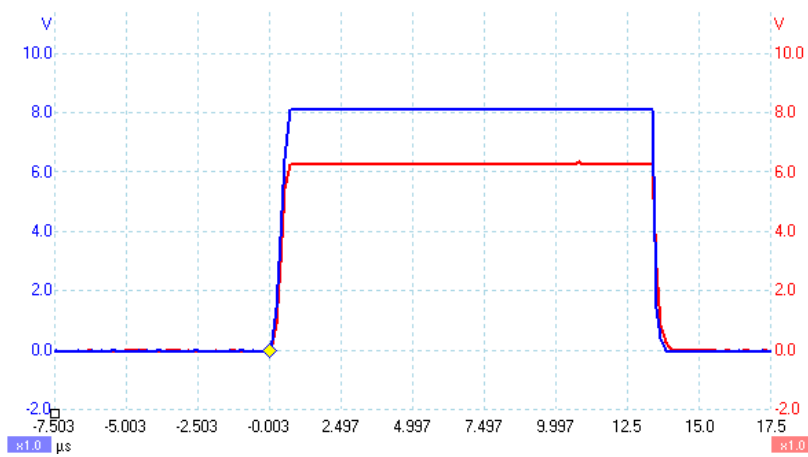
Elektrolüüt-kondensaatoritega  $C_3$  ja  $C_4$  sidestatakse fantoomtoite väga kõrge alalispinge (40 V) lahti operatsioonvõimendi  $IC_{1A}$  sisenditest (väljaviigud 3 ja 4). Kuna operatsioonvõimendi sisendid on virtuaalsed maad ning nende potentsiaal on ligilähedane 0 V-ga, moodustavad kondensaatorid  $C_3$  ja  $C_4$  koos takistitega  $R_6$  ja  $R_7$  kaks kõrgpääsfiltrit. Võttes kondensaatorite väärtusteks 22  $\mu\text{F}$  ja takistite väärtusteks 1  $\text{k}\Omega$ , avaldub filtri -3 dB lõikesagedus sarnaselt madalpääsfiltriga valemist 2.1.1 järgmiselt:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 22 \cdot 10^{-6}} = 7,2 \text{ Hz} \quad 3.1.2$$

Tänu madalale lõikesagedusele 7,2 Hz, ei lähe oluline osa helisignaali spektrist kaduma. Kuna skeemis on kasutusel 40 V fantoomtoide, tuleb elektrolüüt-kondensaatorid valida vähemalt 63 V-sed. Takistite  $R_4$  ja  $R_5$  ülesandeks on skeemitoite väljalülitamise puhul kondensaatorite tühjaks-laadimine. Valides suure, 100  $\text{k}\Omega$  takistusega takistid, ei avalda need arvestatavat mõju helisignaale [22].

### Ülepingsekaitse

Stabilitrone ehk Zeneri diode  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  ja  $D_4$  kasutatakse operatsioonvõimendi sisendite kaitsmiseks pingepulsside eest, mis ületavad operatsioonvõimendi enda toitepinget. Kõrgete pingepulsside eest kaitsmiseks kasutatakse stabilitroni erilist omadust, milleks on teatud vastupingel läbilöögi tekkimine. Positiivse pingepulsi korral mikrofonikaabli teisel juhtmel (HOT) rakendub stabilitronile  $D_1$  vastupinge. Kuna stabilitroniga  $D_1$  on järjestikku ühendatud vastupidise polaarsusega stabilitron  $D_2$ , jääb  $D_2$ -le peale tavalisele diodile iseloomulik päripingelang 0,7 V. Valides stabilitroni  $D_1$  väärtuseks 5,6 V, kaitsevad järjestikku ühendatud stabilitronid  $D_1$  ja  $D_2$  operatsioonvõimendi sisendit üle 6,3 V pingepulsside eest. Joonisel 3.1.5 on PC-ostilloskoobiga salvestatud kaitseskeemi sisendi ja väljundi signaalikujud 8 V pingepulsi korral. Negatiivse pingepulsi korral on stabilitronil  $D_1$  päripingelang ning stabilitron  $D_2$  on vastupingestatud. Sarnaselt positiivsele pingepulssile kaitseb antud skeemilahendus operatsioonvõimendit ka -6,3 V negatiivse pingepulsi eest. Mikrofonikaabli kolmanda signaalijuhtme kaitseskeemi moodustavad samal põhimõttel stabilitronid  $D_3$  ja  $D_4$  [25].



**Joonis 3.1.5.** Kaitseskeemi testimine 8 V pingepulsiga. Sinine joon - sisendpinge, punane joon - väljundpinge.

### Diferentsiaalses režiimis operatsioonvõimendi

Käesolevas skeemilahenduses töötab operatsioonvõimendi diferentsiaalses režiimis. Ideaalne operatsioonvõimendi võimendab vaid sisendite 2 ja 3 vahelist pinget. Kui mõlemale sisendile tuleb samas faasis ja sama amplituudiga signaal ehk ühissignaali, siis seda diferentsiaalvõimendi ei võimenda. Ühissignaali on tüüpiliselt mürasignaali, kuna signaalijuhthmed paiknevad kaablis lähestikku ja müra indutseeritakse signaalijuhthmetesse võrdselt. TL084-tüüpi operatsioonvõimendi ühissignaali nõrgendustegur (ing. k. Common-Mode Rejection Ratio (CMRR)) on 86 dB. Ühissignaali nõrgendustegur avaldub valemist:

$$CMRR = 20 \log_{10} \frac{K_d}{K_u} = 86 \text{ dB} \quad 3.1.3$$

$K_d$  – diferentsiaalvõimendustegur (kasuliku signaali võimendus)

$K_u$  – ühissignaali võimendustegur (mürasignaali võimendus)

Diferentsiaalse signaali ehk kasuliku signaali võimendusteguri määravad antud skeemilahenduses takistid  $R_6$ ,  $R_7$ ,  $R_8$  ja  $R_9$ . Madala nivooga mikrofonide signaalide digitaliseerimiseks analoog-digitaalmuunduriga on vaja võimendada diferentsiaalset sisendpinget suurusjärgus  $K_U = 200$  korda. Diferentsiaalses režiimis töötava operatsioonvõimendi väljundpinge  $U_{välj}$  sõltuvus sisendpingetest  $U_1$  ja  $U_2$  avaldub järgmise valemiga:

$$U_{välj} = U_1 \frac{(R_9 + R_7) R_8}{(R_8 + R_6) R_7} - U_2 \frac{R_9}{R_7} \quad 3.1.4$$

$U_1$  – sisendpinge mitteinverteerival sisendil (IC<sub>1A</sub> väljaviik 3)

$U_2$  – sisendpinge inverteerival sisendil ( $IC_{1A}$  väljaviik 2)

Kuna mõlemat sisendsignaali on vaja võimendada võrdse võimendusteguriga, võib võtta takistid  $R_6$  ja  $R_7$  võrdsete väärtustega ning samuti  $R_8$  ja  $R_9$  võrdsete väärtustega. Väljundpinge avaldub seega järgmise valemiga:

$$U_{välj} = \frac{R_B}{R_A} (U_1 - U_2) \quad 3.1.5$$

$R_A$  – takistite  $R_6=R_7$  väärtused

$R_B$  – takistite  $R_8=R_9$  väärtused

Käesolevas töös kirjeldatud lokaliseerimissüsteemis kasutatavate mikrofonide väljundpingeteks on võrdse amplituudiga, kuid vastandfaasilised signaalid, mis antakse operatsioonvõimendi sisenditele. Seetõttu kirjeldab väljundpinge ja sisendpinge  $U_{sis}$  seost valem:

$$U_{välj} = \frac{R_B}{R_A} (2 U_{sis}) \quad 3.1.6$$

Pingevõimendustegur avaldub valemiga:

$$K_U = \frac{U_{välj}}{U_{sis}} \quad 3.1.7$$

Valides takistite  $R_6$  ja  $R_7$  (valemites tähistatud  $R_A$ ) väärtusteks 1 k $\Omega$ , saab nõutava pingevõimendusteguri  $K_U=200$  saavutamiseks takistite  $R_8$  ja  $R_9$  (valemites tähistatud  $R_B$ ) väärtused arvutada järgmise valemiga:

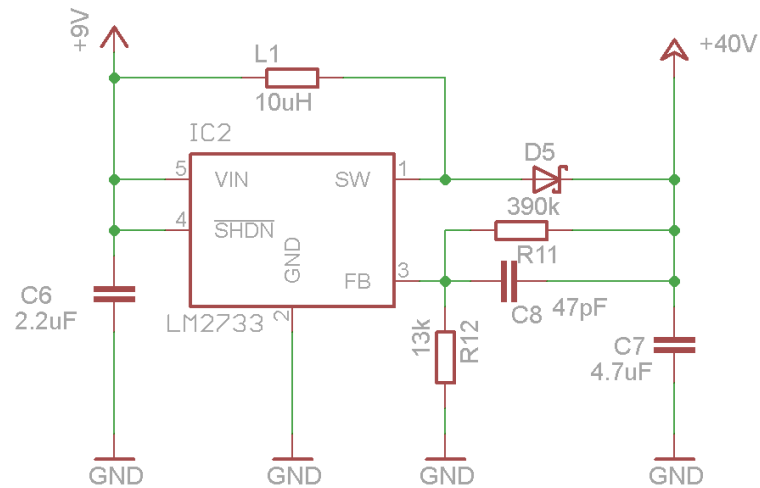
$$R_B = \frac{K_U \cdot R_A}{2} = \frac{200 \cdot 1 \cdot 10^3}{2} = 10^5 \Omega \quad 3.1.8$$

Seega peab takistite  $R_8$  ja  $R_9$  väärtus olema 100 k $\Omega$ . Takistid  $R_6$ ,  $R_7$ ,  $R_8$  ja  $R_9$  peavad olema täppistakistid täpsusklassiga vähemalt 1%, kuna erinevate väärtuste puhul tekib olukord, kus inverteeriva ja mitteinverteeriva sisendi võimendustegurid on erinevad.

Takisti  $R_{10}$  ülesandeks on voolu piiramine ning operatsioonvõimendi kaitsmine juhuks, kui väljundite pistikute ühendamisel peaks tekkima lühis. Kondensaator  $C_5$  töötab täiendava filtrina raadiosageduslike häirete vastu [13, 26, 16].

#### 3.1.4. Pingekordisti elektriskeem

Kondensaatormikrofonide fantoomtoiteks vajaliku 40 V pinge saamiseks üldisest 9 V toitepingest kasutatakse LM2733-tüüpi alalispingekordistit (joonis 3.1.6).



**Joonis 3.1.6.** Pingekordisti LM2733-tüüpi mikroskeemiga

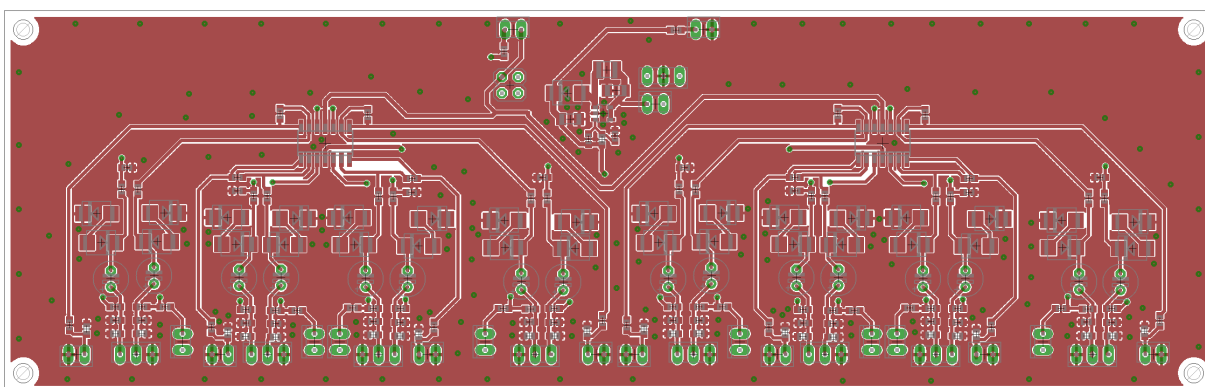
Pingekordisti skeemi koostamisel on lähtutud vastavalt LM2733 andmelehel esitatud soovitudest [17]. Skeemis kasutatavad kondensaatorid  $C_6$ ,  $C_7$  ja  $C_8$  peavad olema madala järjestikuse parasiitse induktiivsusega (ing. k. low ESR), kuna antud pingekordisti kasutab kõrget muundamissagedust (antud skeemilahenduses kuni 0,6 MHz). Vastavalt andmelehe soovitudest peab sisendi kondensaator  $C_6$  olema vähemalt 2.2  $\mu\text{F}$  mahtuvusega. Kondensaator peab tagama piisava energiareservi ajahetkeks, mil vool voolab läbi pooli  $L_1$ . Kuna kasutusel on kõrge muundamissagedus, siis kondensaatori  $C_6$  ülesandeks on ka häirete filtreerimine, mis võivad sattuda pingekordisti sisendi kaudu ülejäänud eelvõimendi skeemi toiteahelasse. Pingekordisti väljundahela kondensaatorina kasutatakse tüüpiliselt 4,7...10  $\mu\text{F}$  mahtuvusega keraamilist kondensaatorit. Kuna kaheksa mikrofoni toitek on alla 30 mA, siis võib kasutada 4,7  $\mu\text{F}$  mahtuvusega kondensaatorit. Kondensaator peab olema kindlasti keraamilist tüüpi, kuna elektrolüüt-kondensaatorid ei suuda siluda üle 500 kHz sagedusega pingepulsatsiooni. Kondensaator  $C_8$  on tagasiside silumiseks, ilma milleta võib skeem genereerida minna. Pingekordisti väljundpinge seadmiseks kasutatakse takistit  $R_{11}$ . Takisti  $R_{12}$  väärtuseks soovib tootja valida 13,3 k $\Omega$ . Takisti  $R_{11}$  väärtus väljundpinge  $U_{\text{välj}}=40\text{ V}$  saamiseks arvutatakse järgmiselt:

$$R_{11} = R_{12} \cdot \left( \frac{U_{\text{välj}}}{1,23} - 1 \right) = 13,3 \cdot 10^3 \cdot \left( \frac{40}{1,23} - 1 \right) = 419 \cdot 10^3 \Omega \quad 3.1.9$$

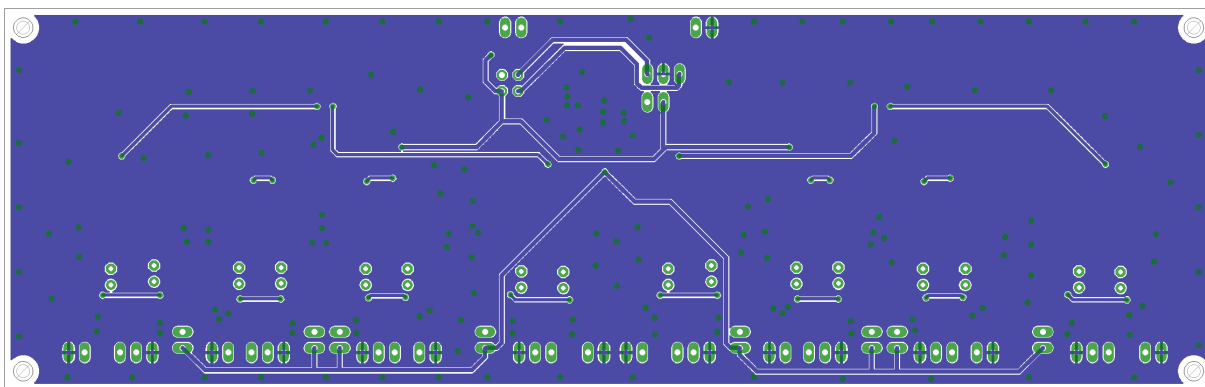
$R_{11}$  jaoks on E12-seeriast lähim 390 k $\Omega$ . Diodiks  $D_5$  tuleb kasutada Schottky-tüüpi diodi. Induktiivsuseks  $L_1$  soovitakse kasutada vähemalt 10  $\mu\text{H}$  pooli. Kuna mikrofonide toitek on vaja vähe voolu, on 10  $\mu\text{H}$  induktiivsus skeemi normaalseks tööks piisav [17].

### 3.1.5. Eelvõimendi trükkplaadi skeem

Käesolevas töös kirjeldatud süsteemi eelvõimendi trükkplaat on joonestatud arvestusega, et kasutatakse valdavalt pindmontaaži komponente. Joonistel 3.1.7 ja 3.1.8 on CAD-programmiga Eagle koostatud plaadikihtide joonised. Lisaks pindmontaažikomponentidele on plaadil aukmontaažiga pistikud ja elektrolüütcondensaatorid. Pindmontaažikomponendid on vaid pealmisel poolel ning masinjootmisel on neid võimalik joota pastajootmisprotsessiga. Komponentide korpused on valitud selliselt, et oleks võimalik prototüüpe valmistada käsijootmisega. Sisendite ja väljundite pesade ühendamiseks trükkplaadile kasutatakse piikriba-tüüpi pistikuid. Tänu sellele on võimalik valmisjoodetud trükkplaat paigutada seadme korpusesse ilma täiendavaid jootmisi tegemata.



**Joonis 3.1.7.** Trükkplaadi pealmine vasekiht ja komponentide paigutus



**Joonis 3.1.8.** Trükkplaadi alumine vasekiht

Komponentide paigutamisel trükkplaadile järgitakse eelkõige kahte nõuet: raadiosageduslike häirete filterkondensaatorid on paigutatud signaali teele selliselt, et häired filtreeritaks enne signaali jõudmist teiste komponentideni ning sümmeetrilise signaali rajad peavad olema sama pikkusega. Trükkplaat valmistatakse kahepoolsena ning signaaliradadest ülejääv pind kaetakse mõlemal küljel maa-kihiga. Trükkplaadi puuravad peavad olema metalliseeritud, kuna avade kaudu käib plaadi pealmise ja alumise kihi elektriline ühendus [18, 27].



### 3.1.6. Analoog-digitaalmuundur

Eelvõimendi väljunditest saadud võimendatud audiosignaali digitaliseerimiseks kasutatakse National Instruments'i USB-6218 BNC-tüüpi analoog-digitaalmuundurit. Sellist tüüpi muunduri eelisteks on arvutiga ühendamise võimalus läbi USB-pordi ning täielik ühilduvus programmeerimiskeskkonnaga LabVIEW. Lisaks on muunduril olemas BNC-tüüpi pesad tööstuslikult toodetud BNC-pistikutega signaalikaablite ühendamiseks. USB-6218 muunduri olulisemad tehnilised parameetrid on järgmised:

- diskreetimisresolutsioon: 16 bitti;
- diskreetimissagedus: 250 kHz (mitme kanali kasutamisel jaguneb kanalite vahel);
- ajastamise täpsus: 50 ppm diskreetimissagedust;
- ajastamise resolutsioon: 50 ns;
- maksimaalne sisendpinge: 10 V;
- sisendtakistus: 1000 Ω.

Kasutades korraga kaheksat kanalit, jääb muunduripoolseks teoreetiliseks diskreetimissageduseks 31,25 kHz:

$$f = \frac{250 \cdot 10^3}{8} = 31,25 \cdot 10^3 \text{ Hz} \quad 3.1.10$$

Kuna mõõdetavad akustilised signaalid on võrdlemisi madala sagedusega, kasutatakse süsteemis 20 kHz diskreetimissagedust ühe kanali kohta. Tänu heale ajastamisresolutsioonile ei põhjusta analoog-digitaalmuundamine täiendavaid märgatavaid vigu mõõtmistulemustes [12].

### 3.1.7. Andmetöötluse arvuti

Andmetöötlus- ja mõõtmistulemuste kuvamiseks on vajalik väga hea arvutusvõimsuse ja graafikakaardiga PC-tüüpi arvuti. Kompaktsuse ja toite autonoomsuse huvides on soovitatav kasutada sülearvutit. Hea hinnaga ning esitatud nõuetega sobivaks arvutiks on näiteks Lenovo Thinkpad Edge E520 versioon NZ33MMS. Arvuti olulisemad tehnilised parameetrid on järgmised:

- protsessor: Intel i5 2410M 2,3 GHz;
- operatiivmälu: 4GB DDR3 1333 Mhz;
- kõvaketas: 500GB 7200p/min;
- graafikakaart: ATI Mobility Radeon HD6630 2 GB;
- ekraan: 15.6“, 1366x768;

- aku: 5 h 6-elementiline liitium-ioon.

Tänu heale protsessorile ja graafikakaardile on E520 arvuti võimeline mõistliku ajaga arvutama signaali allika koordinaate ning kuvama reaajas signaalikujusid ekraanile [28].

### 3.2. Tarkvara kirjeldus

Käesolevas töös kirjeldatud süsteemi tarkvara on koostatud visuaalprogrammeerimiskeskonna LabVIEW versiooniga 8.5. LabVIEW-keskkond sobib eriti hästi erinevate signaalide graafiliseks kuvamiseks ekraanile ning samuti andme- ja signaalitöötlusalgoritmide rakendamiseks ja loomiseks. Programmeerimine LabVIEW-keskkonnas sarnaneb elektriskeemide joonestamisele. Programmi üksikud funktsioonid on tähistatud graafiliste ikoonidega ning funktsioonide sisendite ja väljundite vahel seoste loomiseks kasutatakse virtuaalseid juhtmeid. LabVIEW-keskkond sisaldab endas vaikimisi teeki erineva andmehõiveriistvaraga suhtlemiseks, sealhulgas on vaikimisi olemas tugi süsteemis kasutatavale USB-6218 BNC analoog-digitaalmuundurile. Süsteemi kasutamisel peab operaator kõigepealt sisestama mikrofonide ehk mõõtepunktide geograafilised koordinaadid (joonis 3.2.1).

Mõõtepunkt	kraadid	minutid	sekundid
Mõõtepunkt 1 N	0	0	0
Mõõtepunkt 1 E	0	0	0
Mõõtepunkt 2 N	0	0	0
Mõõtepunkt 2 E	0	0	0
Mõõtepunkt 3 N	0	0	0
Mõõtepunkt 3 E	0	0	0
Mõõtepunkt 4 N	0	0	0
Mõõtepunkt 4 E	0	0	0
Mõõtepunkt 5 N	0	0	0
Mõõtepunkt 5 E	0	0	0
Mõõtepunkt 6 N	0	0	0
Mõõtepunkt 6 E	0	0	0
Mõõtepunkt 7 N	0	0	0
Mõõtepunkt 7 E	0	0	0
Mõõtepunkt 8 N	0	0	0
Mõõtepunkt 8 E	0	0	0

*Joonis 3.2.1. Koordinaatide sisestamise akna ekraanilõige*

Iga mõõtepunkti juures saab sisestada põhjalaiuse ja idapikkuse koordinaadid kraadide,

minutite ja sekunditena. Süsteemi edasiarendusena on võimalik kasutada mõõtepunktide koordinaatide vastuvõtmist raadio teel GPS-seadmetelt, mis on üksiku mõõtepunkti elektroonika osa.

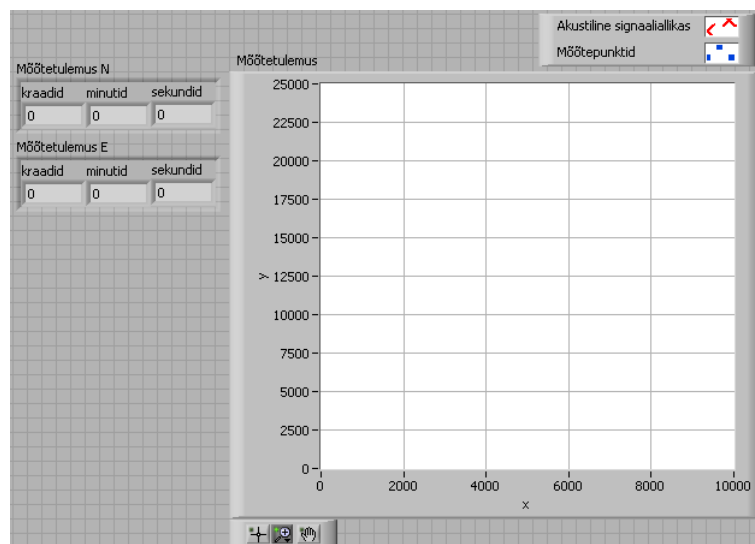
Pärast koordinaatide sisestamist saab mõõtmised käivitada signaalide graafilise kuvamise aknast (joonis 3.2.2). Olenevalt arvuti ekraaniresolutsioonist on võimalik korraga kuvada kolm kuni viis signaaligraafikut, peidetud graafikute nägemiseks on võimalik akent kerida. Operaatoril on võimalik aknast valida, kas soovitakse ka salvestada signaale või kas soovitakse signaalide algushetked määrata käsitsi. Algushetkede käsitsi määramiseks tuleb eelnevalt peatada mõõtmised vastavale nupule vajutamiselega. Signaalide graafikute kõrval on ka indikaatorid, mis näitavad, kas süsteem on automaatselt tuvastanud signaali algushetke.



*Joonis 3.2.2. Signaali graafikute akna ekraanilõige*

Graafikute kõrval olevate tööriistade abil saab graafikuid suurendada ja nihutada. Graafikute suurendamine on eriti vajalik, kui kasutada signaalide algushetkede käsitsi määramist. Vaikimisi kuvatakse graafikutel signaalid 10 sekundi jooksul.

Pärast signaalide algushetkede tuvastamist arvutab programm välja akustilise signaali allika koordinaadid ning kuvab koordinaadid mõõtetulemuste aknasse (joonis 3.2.3).



*Joonis 3.2.2. Mõõtetulemuste kuvamise akna ekraanilõige*

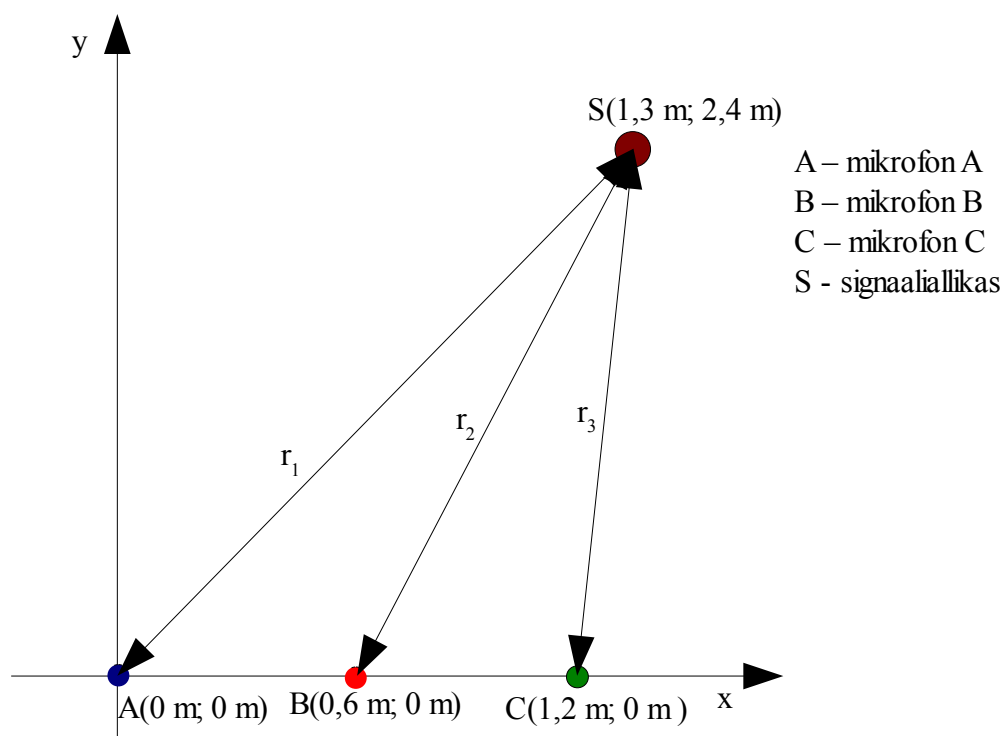
Lisaks mõõtetulemuste koordinaatidele kuvatakse graafiliselt ühele graafikule mikrofonide asukohad ja arvutatud signaali allika asukoht. Kuna graafiku telgedel on ühikud meetermõõdustikus, kuvatakse mikrofonide ja signaali allika asukoht mikrofon A suhtes. Mikrofon A paikneb graafiku koordinaatidel (0;0).

Süsteemi tarkvaras kasutatud algoritmid ja arvutuslikud meetmed on kirjeldatud käesoleva töö peatükkides 2.2 kuni 2.5.

## 4. MÕÖTMISTULEMUSED JA ANALÜÜS

### 4.1. Süsteemi testimine

Süsteemi testiti väikesel skaalal – mikrofonid olid laiali paigutatud 1,2 m pikkusele lõigule ning signaaliallikas asus mikrofonidest ligikaudu 2 m kaugusel. Kasutusel oli kolm mikrofoni ning akustilise signaali tekitas puuklotside kokkulöömine, mis tekitas järsu helirõhu fronti. Süsteemi paiknemist testimisel kirjeldab joonis 4.1.1.



*Joonis 4.1.1. Akustilise signaali allika lokaliseerimise süsteemi testimine*

Testimisel olid mikrofonide asukohad määratud täpsusega  $\pm 0,01$  m ning signaali allika asukoht täpsusega  $\pm 0,05$  m. Nullpunktiks võeti mikrofoni A asukoht ning ülejäänud kaks mikrofoni paigutati mikrofoni A suhtes koordinaatidele (0,6 m; 0 m) ja (1,2 m; 0 m). Signaali allika koordinaadid määrati mikrofoni A suhtes (1,3 m; 2,4 m). Signaali allika tegelikud kaugused mikrofonidest saab välja arvutada järgmise valemiga:

$$r = \sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2} \quad 4.1.1$$

$(x; y)$  – signaali allika koordinaadid

$(x_n; y_n)$  - mikrofonide koordinaadid

$r$  – signaali allika ja mikrofoni vaheline kaugus

Vastavalt testolukorrale joonisel 4.1.1 ning valemile 4.1.1 on signaali allika ja mikrofonide

kaugused:

$$r_1 = \sqrt{(1,3-0)^2 + (2,4-0)^2} = 2,729 \text{ m} \quad 4.1.2$$

$$r_2 = \sqrt{(1,3-0,6)^2 + (2,4-0)^2} = 2,5 \text{ m} \quad 4.1.3$$

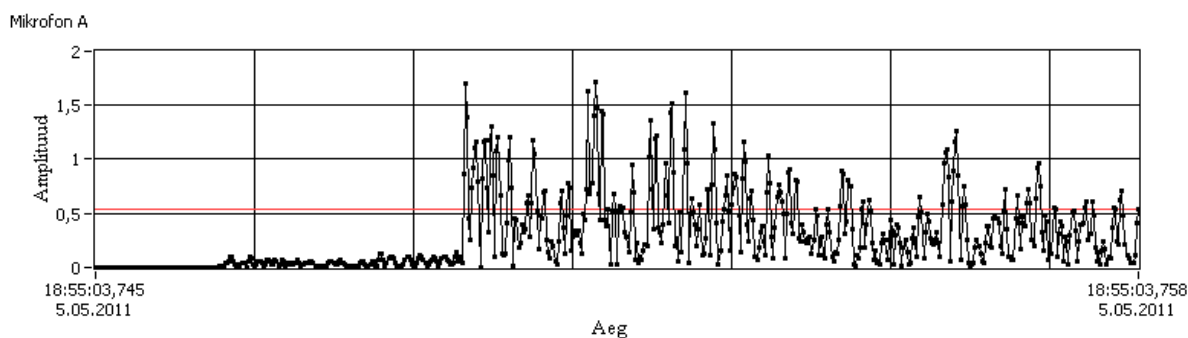
$$r_3 = \sqrt{(1,3-1,2)^2 + (2,4-0)^2} = 2,402 \text{ m} \quad 4.1.4$$

Arvutatud kauguste  $r_1$ ,  $r_2$  ja  $r_3$  kaudu saab leida käesoleva töö peatükis 2.2 valemities 2.2.3 ja 2.2.4 kirjeldatud kauguste erinevused  $d_1$  ja  $d_2$ :

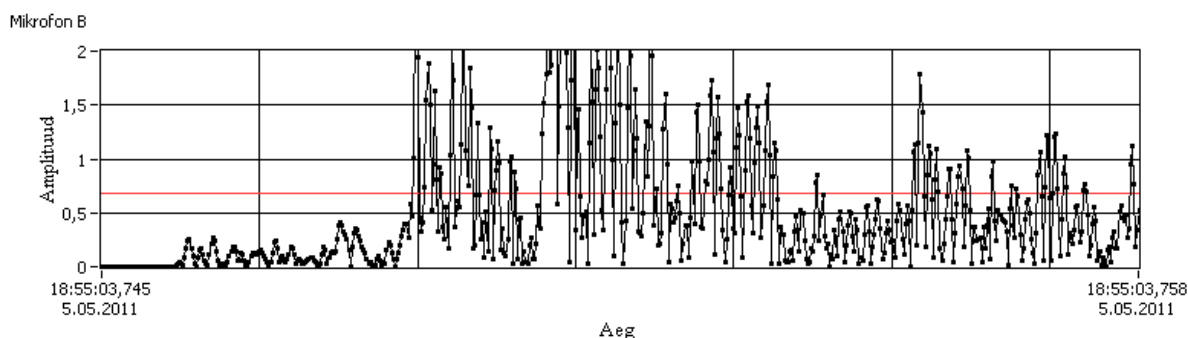
$$d_1 = 2,5 - 2,729 = -0,229 \text{ m} \quad 4.1.5$$

$$d_2 = 2,402 - 2,729 = -0,327 \text{ m} \quad 4.1.6$$

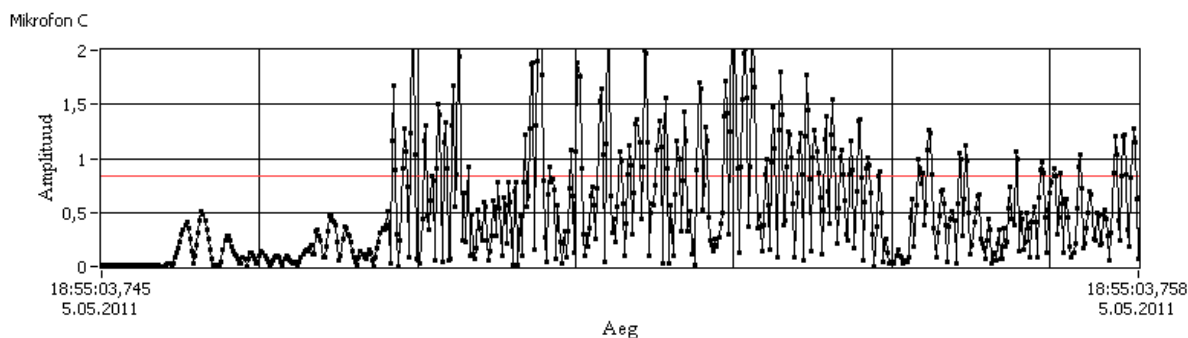
Süsteemi testimisel tuvastati automaatselt mikrofonideni A ja B jõudnud akustilise signaali ajaliseks erinevuseks  $t_1 = -0,6766$  ms ning mikrofonide A ja C ajaliseks erinevuseks  $t_2 = -0,9654$  ms. Saadud tulemused on negatiivse väärtusega, kuna mikrofonid B ja C paiknesid akustilisele signaallikale lähemal kui mikrofon A. Joonistel 4.1.2, 4.1.3 ja 4.1.4 on erinevate mikrofonide poolt mõõdetud signaalikujud. Joonistel olev ajaskaala on võrdne ning tänu sellele on selgesti eristatav, et akustiline signaal jõuab erinevates asukohtades paiknevate mikrofonideni erinevatel aegadel.



*Joonis 4.1.2. Mikrofon A poolt mõõdetud signaalikuju*

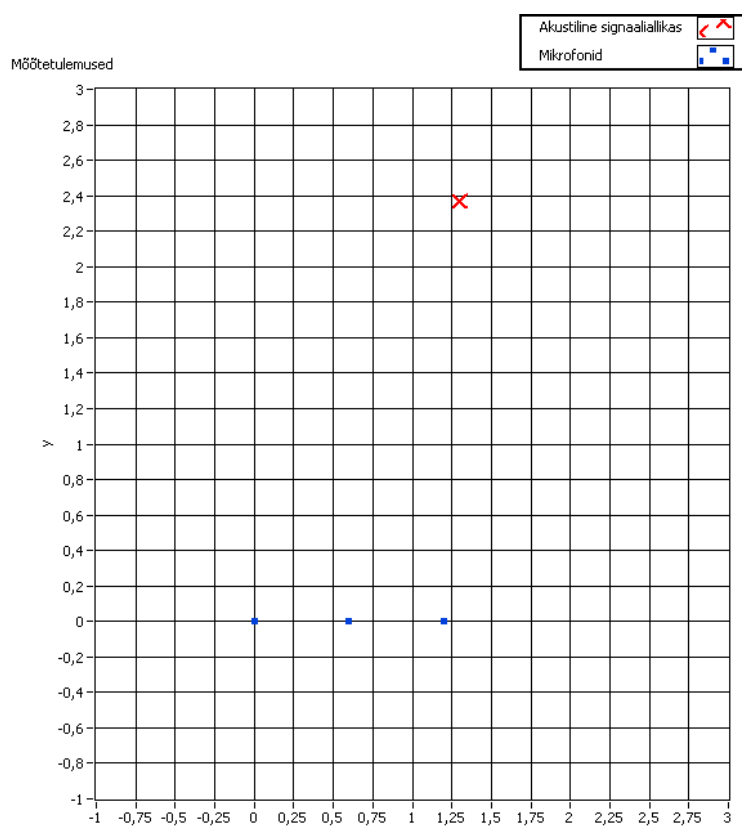


*Joonis 4.1.3. Mikrofon B poolt mõõdetud signaalikuju*



**Joonis 4.1.4.** Mikrofonid C poolt mõõdetud signaalkuju

Süsteem fikseerib akustilise signaali algushetke juhul, kui signaalinivoo ületab joonistel punase joonega tähistatud lävinivoo. Algushetk määratakse esimesena lävinivoo ületanud signaaliimpulsi tipu asukohaga ajateljel. Süsteemi testiti ligikaudu 20°C õhutemperatuuriga, mille juures helikiirus  $c$  on ligikaudu 343 m/s [11]. Arvestades helikiirust, arvutas süsteem kauguste erinevusteks  $d_1 = -0,232$  m ja  $d_2 = -0,331$  m ning akustilise signaali allika koordinaatideks (1,30 m; 2,38 m). Mõõtmistulemused ja mikrofonide asukohad kuvatakse tarkvara poolt graafiliselt ekraanile (joonis 4.1.5).



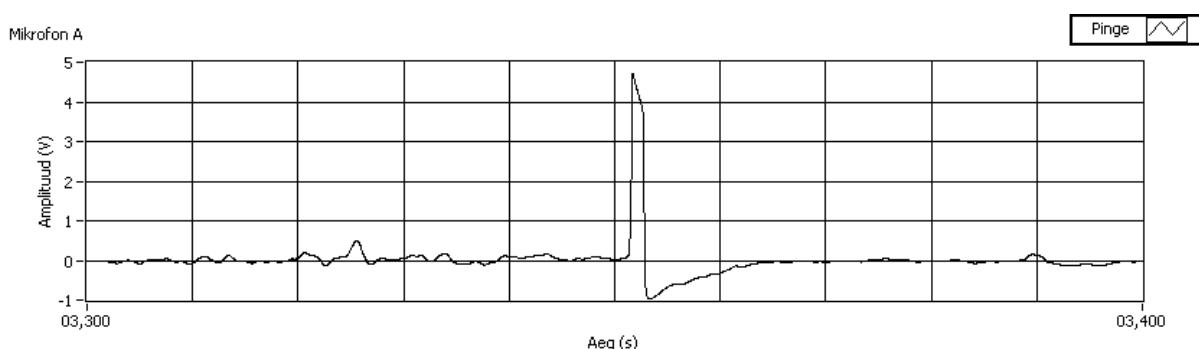
**Joonis 4.1.5.** Mikrofonide asukohad ja arvutatud signaali allika asukoht

Võrreldes reaalse signaali allika asukohaga (1,30 m; 2,40m) on süsteemi poolt mõõdetud asukoht (1,30m; 2,38 m) 0,02 m veaga. Sellise mõõtetäpsuse saavutamiseks pidi süsteem ajahetked mõõtma vastavalt simulatsiooni käigus arvutatud veahinnangutele (peatükk 2.2)

vähemalt 0,01 ms täpsusega. Tänu saavutatud väiksele mõõteveale süsteemi testimisel vähendatud skaalal, ei teki märgatavaid ajahetkede määramisest tingitud vigu süsteemi töös normaalskaalal.

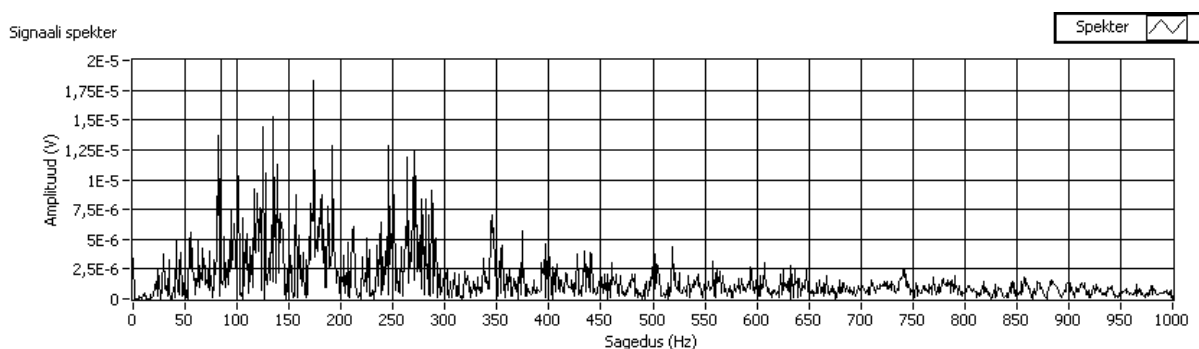
## 4.2. 122 mm kaliibriga haubitsa akustilise signaali parameetrid

Realse relva poolt tekitatud helilaine mõõtmine toimus koostöös Eesti Kaitsevägega Kuusalu vallas Kaitseväge keskpõlügenil. Mõõdeti 5 km kauguselt laske sooritava 122 mm kaliibriga haubitsa poolt tekitatud helilained. Sellist tüüpi relva ja sellele sarnaste relvade asukoha määramiseks ongi käesolevas töös kirjeldatud akustilise signaali allika lokaliseerimise süsteem disainitud.



*Joonis 4.2.1. 122 mm haubitsa signaalikuju aegesis*

Joonisel 4.2.1 esitatud signaalikuju põhjal selgub, et reaalse relva lasu korral tekib väga konkreetne signaaliimpulss ning sellisel impulsil saab väga täpselt määrata signaali algushetke.



*Joonis 4.2.2. 122 mm haubitsa signaali spekter*

Signaalspektrist joonisel 4.2.2 on näha, et haubitsa lasu akustilise signaali spektrikomponendid jäävad põhiliselt vahemikku 20...300 Hz. Seega tuleb relva lasu mõõtmisel seada süsteemi programmis ribapääsfiltri alumine lõikesagedus 20 Hz peale ning ülemine lõikesagedus 300 Hz peale. Mõõtmistel välitingimustes selgus ka, et mikrofonidel tuleb kasutada korralikke tuulekaitseid.



## KOKKUVÕTE

Käesolev magistritöö kirjeldab akustilise signaali leviaja mõõtmisel põhineva lokaliseerimise süsteemi tehniliste lahenduste väljatöötamist. Signaali leviaja mõõtmisel põhinevat lokaliseerimist kasutatakse peamiselt mobiilsides ja lennunduses raadiosaatja asukoha kindlakstegemiseks. Akustilise signaali lokaliseerimist kasutatakse militaarsetel eesmärkidel vastase relva asukoha kindlakstegemiseks. Akustilises lokaliseerimise süsteemis paigutatakse mikrofonid maastikule laiali ning akustiline signaal jõuab mikrofonideni erinevatel ajahetkedel. Mikrofonidesse tulnud signaalid saadetakse edasi analüüsimise keskusesse mööda kaableid või raadio teel. Võrreldes radariga on akustilise lokaliseerimise eeliseks passiivsus ning isegi, kui kasutada mõõtepunkte, mis edastavad oma signaali raadio teel, on mitmete mõõtepunktide hävitamine vastase jaoks keerulisem kui hävitada üks radar. Radari asukoha suudab võimalik vastane kiiresti tuvastada, kuna radar kiirgab ise elektromagnetlaineid.

Magistritöö raames valmis süsteem, mis võimaldab digitaliseerida ning analüüsida kaheksast mikrofonist tulnud signaale. Signaalide analüüsimiseks loodi tarkvara visuaalprogrameerimiskeskkonnas LabVIEW 8.5. Loodud tarkvara võimaldab signaalidele rakendada filtreid, tuvastada automaatselt signaalide algushetki ning kuvada signaalikujusid ja mõõtetulemusi ekraanile. Signaalide algushetkede automaatseks tuvastamiseks koostati algoritm, mis reageerib järskudele signaaliimpulssidele. Kuna ei ole teada, mis ajahetkel akustiline signaal tekkis, saab signaali allika asukoha arvutamisel kasutada vaid signaali leviaja erinevusi. Signaali allika asukoha määramiseks tasandil on sellisel juhul vaja kasutada vähemalt kolme mikrofone. Kolme mikrofoniga signaale analüüsidest saab mõõta kaks aega: leviaegade vahe 1. ja 2. mikrofone vahel ning leviaegade vahe 1. ja 3. mikrofone vahel. Teisendades ajaühikud helikiirust arvestades pikkusühikuteks, saab akustilise signaali allika asukoha arvutamiseks koostada ringjoonte võrrandite süsteemi.

Kuna kasutusel on sümmeetriliste väljunditega kondensaatormikrofonid, oli vajalik konstrueerida spetsiaalne eelvõimendi, mis oleks sümmeetriliste sisenditega ning annaks mikrofonidele signaalikaabli kaudu fantoomtoite (ingl k phantom power). Analoog-digitaalmuundur kasutab PC-tüüpi arvutiga suhtlemiseks USB-porti.

Süsteemi testimise ja simuleerimise tulemusena tehti kindlaks, et süsteem suudab akustilise signaali allika asukoha määrata täpsusega 15 m, kusjuures mikrofonid on paigutatud laiali 10

km pikkusega alale ning signaale mõõdetakse 20 km kauguselt. Lokaliseerimise süsteemi testimine toimus vähendatud skaalal, kus mikrofonid olid kuni 2 m pikkusele alale laiali paigutatud ja signaale mõõdeti 3 m kauguselt. Samuti mõõdeti reaalse suurtüki signaalikujusid ja spektreid 5 km distantssi pealt.

Süsteemi edasiarendusena võib täiustada mõõtepunktide elektroonikat, lisades mõõtepunktile GPS-vastuvõtjad ning mõõtepunkti koordinaate ja vastuvõetud akustilisi signaale saata raadio teel analüüsimise keskusesse. Samuti tuleks uurida maastiku mõju helikiirusele.

## VIITED

1. Microphone array. Wikipedia, the free encyclopedia. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 14.05.2011] [http://en.wikipedia.org/wiki/Microphone\\_array](http://en.wikipedia.org/wiki/Microphone_array)
2. J. P. F. Wooler, R. I. Crickmore, Fiber-optic microphones for battlefield acoustics (Optical Society of America, 2007)
3. Multilateration. Wikipedia, the free encyclopedia. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 14.05.2011] <http://en.wikipedia.org/wiki/Multilateration>
4. Radar. Wikipedia, the free encyclopedia. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 14.05.2011] <http://en.wikipedia.org/wiki/Radar>
5. Triangulation. Wikipedia, the free encyclopedia. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 14.05.2011] <http://en.wikipedia.org/wiki/Triangulation>
6. F. Gustafsson, F. Gunnarsson, Positioning using time-difference of arrival measurements (Department of Electrical Engineering, Linköping, 2003).
7. Acoustic source localization. Wikipedia, the free encyclopedia. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 14.05.2011] [http://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic\\_source\\_localization](http://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic_source_localization)
8. EARS, QinetiQ's battle proven sniper detection system. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 14.05.2011] [http://www.qinetiq.com/home/newsroom/news\\_releases\\_homepage/2008/1st\\_quarter/ears.html](http://www.qinetiq.com/home/newsroom/news_releases_homepage/2008/1st_quarter/ears.html)
9. Helmet Based Sniper Location System. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 14.05.2011] [http://www.associatedcontent.com/article/1593904/new\\_sniper\\_location\\_system\\_will\\_save\\_pg2.html?cat=15](http://www.associatedcontent.com/article/1593904/new_sniper_location_system_will_save_pg2.html?cat=15)
10. Safety Dynamics SENTRI Gunshot Detection. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 14.05.2011] <http://www.safetydynamics.net>
11. Speed of sound. Wikipedia, the free encyclopedia. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 05.05.2011] [http://en.wikipedia.org/wiki/Speed\\_of\\_sound](http://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_sound)
12. Bus-Powered M Series Multifunction DAQ for USB. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 04.05.2011] <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-48/lang/en>
13. L. Abo, Raadiolülitused (Valgus, Tallinn, 1990)
14. Root mean square. Wikipedia, the free encyclopedia. [Võrgumaterjal] [Viimati alla

- laetud: 07.05.2011] [http://en.wikipedia.org/wiki/Root\\_mean\\_square](http://en.wikipedia.org/wiki/Root_mean_square)
15. C02 Condenser Microphone Owners Manual. (Samson Technologies Corp., 2003)
  16. TL081, TL081A, TL081B, TL082, TL082A, TL082B, TL084, TL084A, TL084B JFET-input operational amplifiers. Texas Instruments Incorporated. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 29.04.2011] <http://focus.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=tl084&fileType=pdf&track=no>
  17. 0.6/1.6 MHz Boost Converters With 40V Internal FET Switching SOT-23. National Semiconfuctor. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 04.05.2011] <http://www.national.com/pf/LM/LM2733.html>
  18. Surface-mount technology. Wikipedia, the free encyclopedia. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 04.05.2011] [http://en.wikipedia.org/wiki/Surface-mount\\_technology](http://en.wikipedia.org/wiki/Surface-mount_technology)
  19. L. Abo, Raadioseadmete üksikosad (Valgus, Tallinn, 1981)
  20. I. Eiskop, A. Sillart, Akustika ja helitehnika (Valgus, Tallinn, 1988)
  21. Equivalent series resistance. Wikipedia, the free encyclopedia. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 26.04.2011] [http://en.wikipedia.org/wiki/Equivalent\\_series\\_resistance](http://en.wikipedia.org/wiki/Equivalent_series_resistance)
  22. Low-pass filters. All About Circuits. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 26.04.2011] [http://www.allaboutcircuits.com/vol\\_2/chpt\\_8/2.html](http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_8/2.html)
  23. Microphone Design and Operation. Wikibooks. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 26.04.2011] [http://en.wikibooks.org/wiki/Acoustics/Microphone\\_Design\\_and\\_Operation](http://en.wikibooks.org/wiki/Acoustics/Microphone_Design_and_Operation)
  24. Phantom Power to IEC 268-15/DIN 45596. AKG. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 26.04.2011] [http://www.ake.com/site/service\\_glossary/powerslave,id,30,nodeid,9,\\_language,EN.html](http://www.ake.com/site/service_glossary/powerslave,id,30,nodeid,9,_language,EN.html)
  25. A. Kasemaa, Elektroonika komponendid. Loengukonspekt (Kuressaare, 2003)
  26. Operational amplifier applications. Wikipedia, the free encyclopedia. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 29.04.2011] [http://en.wikipedia.org/wiki/Operational\\_amplifier\\_applications](http://en.wikipedia.org/wiki/Operational_amplifier_applications).
  27. Electromagnetic compatibility. Wikipedia, the free encyclopedia. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 04.05.2011] [http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic\\_compatibility](http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_compatibility)
  28. Laptops & notebook computers, netbooks, desktops & accessories. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 04.05.2011] <http://shop.lenovo.com>

# LOCALIZATION SYSTEM BASED ON ACOUSTIC SIGNAL TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL

Summary

Teet Tilk

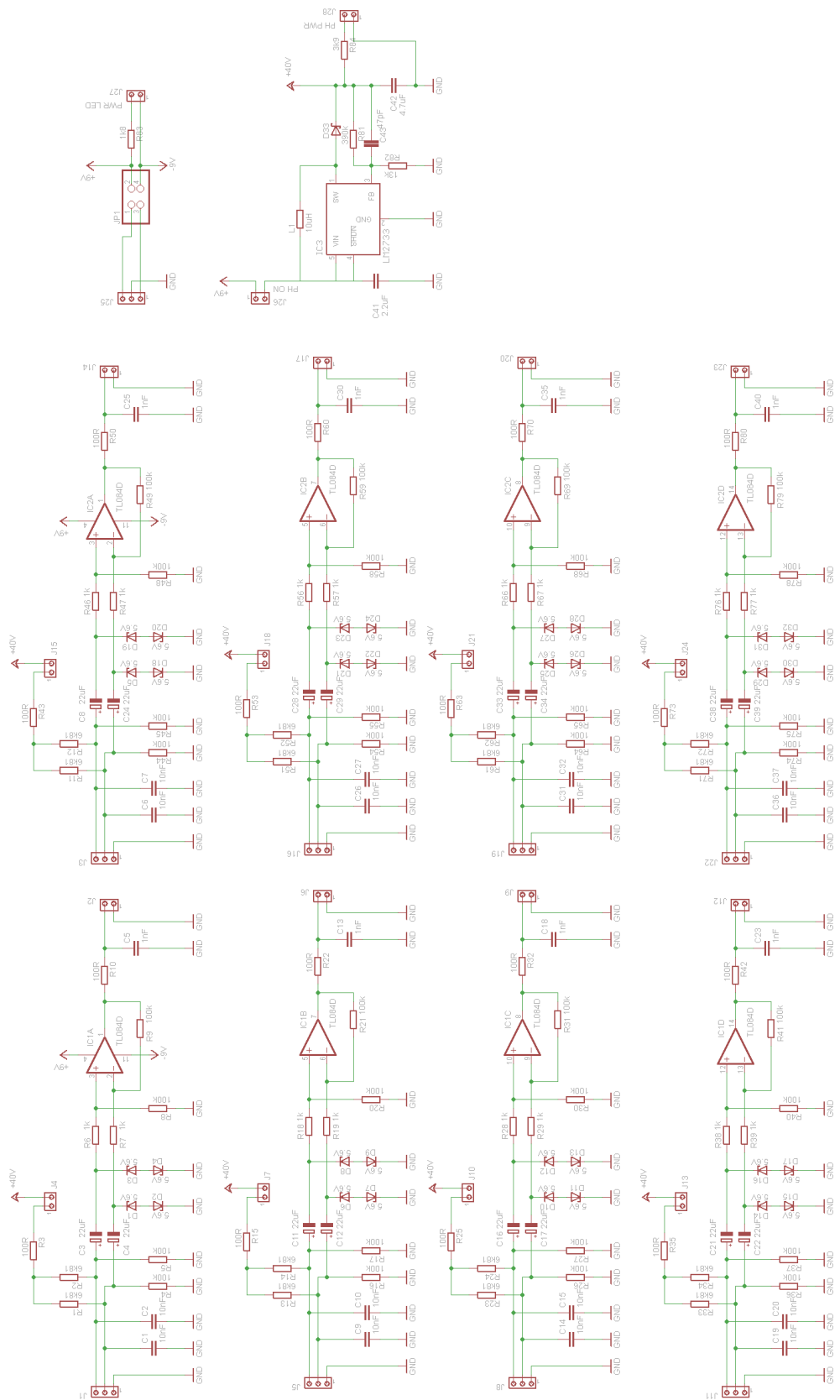
Localization systems based on signal time difference of arrival (TDOA) are mostly used in mobile communications and aviation to locate the transmitter position. Localization systems which measure acoustic signal time difference of arrival are used on military purposes to locate enemy cannons. In an acoustic localization system, at least three microphones are placed in different locations and due to speed of the sound the acoustic signal arrives at each microphone at different time. By analysing the signal time differences of arrival it is possible to calculate the position of the acoustic signal source. Compared to a usual radar based localization system, the acoustic localization system is passive and does not emit electromagnetic radiation. Emission of electromagnetic radiation makes radars easily detectable.

The acoustic localization system described in this thesis is able to digitize and analyse signals from eight microphones. The signal analysis software is designed using the LabVIEW 8.5 visual programming environment. The software can apply filters to signals, display signal waveforms and display localization results on screen. The location of an acoustic signal source is calculated by using an equations system of three circles. An algorithm that automatically detects the beginning of an acoustic signal impulse is also realized in this software.

Furthermore, a special microphone preamp was designed because the system uses high sensitivity condenser microphones with balanced output. Due to the use of condenser microphones, it is necessary to give phantom power to microphones via a preamp. An analog-to-digital converter using a USB port to connect to a PC laptop computer which is used to analyse the signals.

System tests were carried out on a reduced scale. According to test and simulation results, the system is able to locate acoustic signal from a 20 km distance with 15 meter accuracy. Thanks to the Estonian Defence Forces, it was also possible to measure a real cannon acoustic signals from 5 km distance.

# LISA 1. EELVÕIMENDI ELEKTRISKEEM



## LISA 2. ELEKTROONIKAKOMPONENTIDE NIMEKIRI

Väärtus	Korpus	Tarnija	Tootekood	Hind 1tk	Kogus	Hind kokku
100k	R0603	Farnell	9330402	€0,028	32	€ 0,90
100R	R0603	Farnell	9330364	€0,007	16	€ 0,11
10nF	C0603	Farnell	1759102RL	€0,006	16	€ 0,10
10uH	R1210	Farnell	9522204	€0,320	1	€ 0,32
13k	R0603	Farnell	1527594	€0,390	1	€ 0,39
1k	R0603	Farnell	9330380RL	€0,028	16	€ 0,45
1k8	R0603	Farnell	9330712	€0,028	1	€ 0,03
1nF	C0603	Farnell	1414608RL	€0,020	8	€ 0,16
2.2uF	C1206	Farnell	1288208RL	€0,950	1	€ 0,95
22uF	E2,5-6	Farnell	9693777	€0,086	16	€ 1,38
390k	R0603	Farnell	9233695RL	€0,012	1	€ 0,01
3k9	R0603	Farnell	9331140RL	€0,028	1	€ 0,03
4.7uF	C1206	Farnell	1572637	€0,710	1	€ 0,71
47pF	C0603	Farnell	1414639RL	€0,027	1	€ 0,03
Zener 5.6V	SMB	Farnell	1431162	€0,580	32	€ 18,56
6k81	R0603	Farnell	1170873RL	€0,014	16	€ 0,22
BNC pesa		Oomipood	BNC-204	€0,800	8	€ 6,40
LED green	3mm	Oomipood	L-934LGD	€0,190	2	€ 0,38
LM2733	SOT23-DBV	Farnell	8181675	€2,740	1	€ 2,74
TL084D	SO14	Farnell	1564347	€0,740	2	€ 1,48
Tumbler 2*ON-ON		Oomipood	8011	€1,700	2	€ 3,40
XLR male		Oomipood	XLR-3FC	€1,280	8	€ 10,24
Diiod 100V/2A	SMB	Farnell	1858606	€0,520	1	€ 0,52

Hind kokku: € 49,50