

Miro Pulkkinen

ULTRAÄÄNI-ILMAISIN

Kandidaatin työ
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Jari Kangas
Maaliskuu 2024

TIIVISTELMÄ

Miro Pulkkinen: Ultraääni-ilmais
Ultrasound-detector
Kandidaatin työ
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan tutkinto-ohjelma
Maaliskuu 2024

Ultraääni-ilmais on vastaanotin, joka toimii ultraäänitaajuusalueella. Ultraääni mahdollistaa erilaisia sovelluksia verrattuna ääneen ja sähkömagneettiseen säteilyyn perustuviin ilmaisimiin. Ultraääni vaikuttaa materiaaleihin eri tavalla verrattuna kuuloalueen ääneen, mikä mahdollistaa monia teollisuuden sovelluksia, kuten ultraäänipuhdistus ja metallin hitsaus. Väliaine, jossa ultraääni kulkee, vaikuttaa äänen kulkuun. Tätä hyödynnetään materiaalien koostumuksien ja etäisyyksien mittaauksessa. Äänen selkeämpi reagointi väliaineen ominaisuuksiin ja hitaampi etenemisnopeus mahdollistaa helpommin mittauksen ajan suhteen verrattuna sähkömagneettiseen säteilyyn.

Ultraäänien tuottoon ja vastaanottoon käytetään usein pietsosähköiseen periaatteeseen perustuvia muuntajia. Pietsosähköisen materiaalin ominaisuuksia voidaan kuvata pietsosähköisellä vakiolla, joka kuvaa materiaalin kykyä muuntaa mekaaninen venymä sähkökentäksi. Vastaanottimen suunnittelun kannalta kiinnostavimmat muuntajan ominaisuudet ovat muuntajan ulostuloimpedanssi ja muuntajan herkkyys. Impedanssi voidaan mallintaa "Butterworth-Van Dyke" (BVD) -mallilla. Muuntajan herkkyys eli kykyyn muuttaa vastaanotettu ääni sähköiseksi signaaliksi vaikuttavat ympäröivän materiaalin ominaisuudet suhteessa muuntajaan, pietsosähköiset ominaisuudet, taajuus ja vastaanotettu tehotaso. Ultraääntä käytetään usein sensoreissa tai kuvauslaitteissa, jotka sisältävät sekä lähetimen että vastaanottimen. Tästä esimerkkinä on ultraääni-tutkimus. Ilman lähetintä toimivia ilmaisimia on vähän markkinoilla. Niitä on pääasiassa eläimien ja veden virtauksien havainnointiin.

Ultraäänivastaanottimen toteutus on samankaltainen kuin sähkömagneettiseen säteilyyn perustuvan vastaanottimen toteutus. Vastaanottimien ero tulee äänen tai säteilyn muuntamisesta sähköiseen signaaliin. Yleisiä ultraääni-ilmais toteutustapoja ovat taajuusjakaminen, heterodyne periaate ja A/D-muunnos.

Työssä rakennettiin yksinkertainen ultraääni-ilmais ja -lähetin 40 kHz taajuudella sekä testipenkki ilmaisimen testaukseen. Ultraääni-ilmaisimessa on pietsosähköinen muuntaja, jonka vastaanotama signaali vahvistetaan vahvistimella ja suodatetaan kaistanpäästösuotimella. Näyttönä käyttäjille toimii valodiodi, joka kytketään komparaattorin avulla päälle, mikäli havaitun signaalin voimakkuus ja kesto ovat tarpeeksi suuria. Lähetin sisältää Wienin siltaoskillaattorin, jonka tuotama sinisignaali syötetään pietsosähköiseen muuntajaan. Oskillaattori rakennettiin operaatiovahvistinkytkentänä. Ilmaisimessa testattiin testipenkillä, joka perustuu markkinoilla olevaan ultraääni-sensoriin. Ultraääni-ilmais ja -lähetin toimivat oletetusti, tosin ilmaisimen toteutuksessa on vielä kehitettävää.

Avainsanat: Ultraääni, ilmaisim, vastaanotin, ultrasound, ultrasonic, detector, ultrasound transducer

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ALKUSANAT

Idea tuli ultraääni-ilmaisimien samankaltaisuudesta sähkömagneettiseen kommunikointiin, mihin on opintojen aikana tullut perehdyttyä. Tämä mahdollisti tästä oppiman soveltamisen ja tarkastelun hieman eri sovellukseen. Tahdon kiittää työni ohjannutta Jari Kangasta antamasta ohjauksesta ja tuesta työn aikana.

Tampereella, 25.03.2024

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. ULTRAÄÄNEN TUOTTO JA VASTAANOTTO	3
2.1 Pietsosähköinen äänen tuotto ja vastaanotto	4
2.2 Pietsosähköisen muuntajan impedanssi.....	9
2.3 Käyttökohteet ja markkinoilla olevat tuotteet	11
3. VASTAANOTTIMEN SÄHKÖINEN TOTEUTUS	14
3.1 Yleinen rakenne ja komponenttien ominaisuudet	14
3.2 Heterodyne vastaanottimen toteutus.....	17
4. YKSINKERTAISEN ULTRAÄÄNI-ILMAISIMEN TOTEUTUS.....	19
4.1 Suunnittelu.....	20
4.1.1 Ultraääni-ilmaisim	20
4.1.2 Ultraäänilähetin	22
4.2 Testipenkki ja mittaukset.....	25
5. YHTEENVETO.....	30
6. LÄHTEET.....	32

LYHENTEET JA MERKINNÄT

c_i	engl. Speed of sound, Äänen nopeus ilmassa
T	engl. Elastic stress, Elastinen venymä
E	engl. Electric field strength, Sähkökentän voimakkuus
c^E	engl. Elastic stiffness with constant electric field, Kimmokerroin vakio sähkökentällä
e	engl. Piezoelectric constant, Pietsosähköinen vakio
D	engl. Dielectric displacement, Sähkövuon tiheys
ε^S	engl. Permittivity with constant strain, Permittiivisyys vakio jännityksellä
S	engl. Strain, Mekaaninen jännitys
d	engl. Piezoelectric modulus, Pietsosähköinen modulus
Z_r	engl. Wave impedance, Aaltoimpedanssi
Z_0	engl. Characteristic impedance, Ominaisimpedanssi
F	engl. Force, Voima
v	engl. Velocity, Nopeus
U	engl. Voltage, Jännite
A	engl. Area, Pinta-ala
a	engl. Radius, Säde
ω	engl. Angular frequency, Kulmataajuus
b	engl. Plate thickness, Levyn paksuus
c_l	engl. Velocity of sound in piezoelectric material, Äänen nopeus pietsosähköisessä materiaalissa
P	engl. Power, Teho
f	engl. Frequency, Taajuus
f_r	engl. Resonance frequency, Resonanssi taajuus
p	engl. Pressure, Paine
Q	engl. Volumevelocity, Tilavuusnopeus
C_s	engl. Parallel capacitance, Rinnakkainen kapasitanssi
I	engl. Current, Virta
ka	engl. Helmholtz number, Helmholtz numero
k	engl. Wavenumber, Aaltoluku
SiO_2	engl. Silicon dioxide
PbNb_2O_6	engl. Meta-niobate
BVD	engl. Butterworth-Van Dyke
L	engl. Inductance, Induktanssi
R	engl. Resistance, Resistanssi
C	engl. Capacitance, Kapasitanssi
w	engl. Mechanical resistance, Mekaaninen resistanssi
Q-arvo	engl. Quality factor
ToF	engl. Time of flight
t	engl. Time, aika
IoT	engl. Internet of things, Esineiden internetti
TVG	engl. Time varying gain, Ajan mukaan vaihteleva vahvistus

A/D-muunnos	engl. Analog to digital transformation, Analogisesta digitalinen muunnos
<i>SNR</i>	engl. Signal to Noise ratio, Signaalin suhde kohinaan
LNA	engl. Low noise amplifier, Vähä kohinainen vahvistin
<i>Z</i>	engl. Impedance, Impedanssi
<i>NF</i>	engl. Noise factor, Kohinaluku
<i>IF</i> taajuus	engl. Intermediate frequency, Väliaikainen taajuus
VCO	engl. Voltage controlled oscillator, Jännite kontrolloitu oskillaattori
R_p	engl. Parasitic resistance, Parasiittinen resistanssi
$T(f_o)$	engl. Loop gain, Silmukkavahvistus
V_{pp}	engl. Peak to peak voltage, Huipusta huippuun jännite
VCC	engl. Positive supply voltage, Positiivinen käyttöjännite
Gnd	engl. Ground, Maadoitus

1. JOHDANTO

Ultraääni-ilmaisimien vastaanotin, joka toimii ultraäänitaajuusalueella. Ultraääni on ihmisten kuuloalueen (20 Hz-20 kHz) yläpuolella oleva taajuusalue $f > 20$ kHz. Nykyään ultraääntä voidaan tuottaa 1 GHz saakka. Yli 1 GHz ääntä nimitetään hyperääninä. Ultraääni eroaa korkeammilla taajuuksilla kuuloalueen äänestä niiden tuottamisessa ja havainnoinnissa. Korkeamman taajuuden äänen tuottamisessa äänen tuottajan elementit pitää mallintaa aaltoputkina, eikä vain massana tai elastisena jousena, mikä riittää kuuloalueella. Ultraääni vaikuttaa myös eri tavalla materiaaleihin sen selkeästi suuremmista kiihtyvyyksistä, painevaihteluista ja äänen intensiteetistä johtuen verrattuna kuuloalueen äänen. Nämä ominaisuudet mahdollistavat kavitaation ja kiinteiden aineiden materiaalin pysyvän muutoksen ylittämällä materiaalin elastisuuden rajat. Elastisuudella tarkoitetaan materiaalin kykyä palautua alkuperäiseen muotoon. Kavitaatiota käytetään esimerkiksi teollisuudessa sekoittamaan eri nesteitä, kuten maitoa tai maalia, ja ultraäänipuhdistukseen, jossa kavitaatiolla likaa irrotetaan nesteessä olevasta puhdistettavasta materiaalista [2]. Ultraäänin tuottajan suuntaavuuden keilat kapenevat, kun aallonpituus on pienempi suhteessa tuottajan pinta-alaan. Tätä käytetään materiaalien ainetta rikkomattomassa testauksessa ja lääketieteellisissä mittauksissa. [1]

Ääni on väliaineessa etenevää mekaanista aaltoliikettä. Ääni voi kulkea vain aineessa verrattuna sähkömagneettiseen säteilyyn, joka voi kulkea myös tyhjiössä. Aine, jossa ääni kulkee vaikuttaa äänen nopeuteen ja vaimentumiseen. Aineen kosteus ja lämpötila vaikuttavat myös äänen nopeuteen. Tätä käytetään materiaalien ominaisuuksien ja koostumuksien mittauksissa. Ultraäänellä voidaan mitata nesteiden tai kiinteiden aineiden molekulaarirakenteita. Aineiden molekyylien etäisyydet toisistaan eli aineen tiheys vaikuttaa äänen nopeuteen. Mitä tiheämpi aine sitä nopeammin aineen molekyylit törmäävät toisiinsa ja ääni kulkee aineessa. Kiinteät aineet ovat tiheämpiä verrattuna nesteisiin ja kaasuihin, tämä johtaa pienempään äänen vaimentumiseen kiinteissä aineissa. [1] Pienempi vaimentuminen mahdollistaa ultraäänellä suurempien etäisyyksien mittauksen veden alla verrattuna ilmassa. Ultraäänin tuottaminen on kuitenkin hyötysuhteeltaan heikompi veden suuremman ominaisimpedanssin takia, mikä perustellaan seuraavassa luvussa.

Ultraääni on ihmisten kuuloalueen ulkopuolella, mutta monet eläinlajit voivat tuottaa ja kuulla ultraääntä. Esimerkiksi koirat 35 kHz asti ja monet pienet nisäkkäät kuten lepakko- ja hiirilajit kommunikoivat 100 kHz asti. Monet lepakkolajit voivat paikantaa saalista ultraäänen avulla. Ne tuottavat ultraääntä, joka heijastuu osittain eri pinnoista takaisin. Heijastumien vahvuudesta, viiveestä ja taajuuden muutoksista lepakot saavat tietoa ympäristöstä. [1] Suomessa lepakkolajeista viiksisiiippa, vesisiippa ja isoviiksisiiippa tuottavat ääntä n. 45 kHz taajuudella ja pohjanlepakko 28 kHz taajuudella [3]. Verrattuna sähkömagneettiseen säteilyyn ultraääni kulkee huomattavasti hitaammin mahdollistaen helpommin mittauksen ajan suhteen [4]. Esimerkiksi äänen nopeus ilmassa $c_i = 345$ [m/s] (22°C) verrattuna sähkömagneettiseen säteilyyn, joka kulkee valonnopeudella $3 \cdot 10^8$ [m/s]. Ultraäänikuvaus, ilmaisimet ja materiaalien etäisyyden ja koostumuksen mittaaminen perustuu samaan periaatteeseen. Ultraääni mahdollistaa erilaisia toiminnallisuksia verrattuna kuuloalueen ääneen, mutta silti samat fyysiset lait ja akustiset ilmiöt vaikuttavat ultraääneen [5]. Ääniaallon eteneminen kaasuissa, nesteissä ja kiinteissä aineissa määritetään samalla tavalla. Muut äänen ilmiöt kuten Doppler-ilmiö, aallon heijastuminen ja taittuminen vaikuttavat ultraääneen.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kuvata ultraääni-ilmaisimen yleistä rakennetta ja ominaisuuksia sekä tarkastella markkinoilla olevia ultraääni-ilmaisimia ja rakentaa yksinkertainen ultraääni-ilmaisin.

Aluksi tarkastellaan ultraäänen ominaisuuksia. Ultraäänen ominaisuuksia vertaillaan sähkömagneettiseen säteilyyn ja kuuloalueen äänen. Tarkastellaan ultraäänen tuottoa ja vastaanottoa äänen muuntajalla. Tässä otetaan huomioon etenkin sähköisen suunnittelun kannalta tärkeät ominaisuudet, ultraäänen tuottajan sisääntuloimpedanssi ja säteilytehon riippuvuus jännitteestä. Tarkastellaan markkinoilla olevia ultraääni-laitteita ja niiden ominaisuuksia. Sähköinen suunnittelu tarkastellaan pääosin vastaanottimen kannalta. Lopuksi suunnitellaan ja toteutetaan yksinkertainen ultraääni-ilmaisimien ja -lähetin. Ilmaisimen testaukseen rakennetaan myös testipenkki. Yhteenveto sisäistää tutkimuksen havainnot ja ehdottaa parannuksia yksinkertaiseen ilmaisimeen.

2. ULTRAÄÄNEN TUOTTO JA VASTAANOTTO

Kuuloalueen ääntä tuotetaan tyypillisesti kiinteällä värähtelevällä pinnalla, mikä liikuttaa ulkoista ainetta pinnan mukaan. Tämä aiheuttaa aineessa paineen vaihtelua, mikä kulkee aineessa aaltoina. Tämä toteutetaan yleensä männän kaltaisella lähteellä "piston source". Kiinteä pinta on yleensä paperikalvo, jota viritetään värähtelemään sähködynaamisen muuntajan avulla. [1]

Korkeammilla taajuuksilla muuntajan osat eivät ole kiinteitä, vaan käyttäytyvät siirtolinjoina, joilla on erilaisia resonansseja [1]. Ongelmana korkeilla taajuuksilla on kalvon viritys yhtenäisesti samaan vaiheeseen ja amplitudiin. Tämä johtuu siitä, että pienemmillä aallonpituuksilla etäisyys lähettimen kalvon viritys kohdan ja kalvon reunojen välillä on samaa kokoluokkaa aallonpituuden kanssa. Tämä rajoittaa mekaanisten mäntälähteiden käytön ultraäänen matalammille taajuuksille.

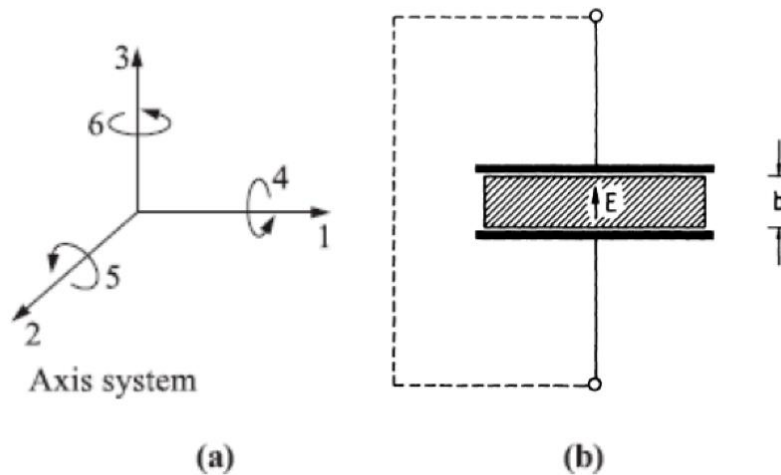
Kalvon yhtenäisempi viritys onnistuu pietsosähköperiaatteella. Se perustuu pietsosähköiseen kalvoon, missä on kapeita metallielektrodeja molemmiin puolin. Kalvo viritetään värähtelemään vaihtosähkösignaalilla elektrodien välillä, mikä aiheuttaa elastisen venymän T [N/m²] kalvon sisälle sähkökentän voimakkuuden E [V/m] mukaan kaavalla [4, 1.3]

$$T = c^E S - eE, \quad (1)$$

missä c^E [N/m²] on materiaalin kimmokerroin vakio sähkökentällä, S on mekaaninen jännitys eli paksuuden muutos, e on pietsosähköinen vakio [N/Vm] tai [As/m²]. Paksuuden muutos riippuu ympäristöstä, materiaalin elastisista ominaisuuksista ja pietsosähköisen materiaalin pietsosähköisestä vakiosta. Jos kalvoa puristetaan, jolloin paksuuden muutosta ei tapahdu, niin venymä riippuu ainoastaan pietsosähköisestä ominaisuudesta $T = -eE$. Ulkoisen voiman aiheuttama paksuuden muutos aiheuttaa materiaalissa myös sähkövuon tiheyden D [4, 1.6]

$$D = \varepsilon^S E + eS, \quad (2)$$

missä ε^S [F/m] on materiaalin permittiivisyys vakiojännityksellä. Toinen yhtenäinen tapa kuvata materiaalin pietsosähköistä ominaisuutta on d pietsosähköisen moduluksen [m/V] tai [As/N] avulla. Pietsosähköinen modulus yhdistää mekaanisen jännityksen S ja sähkökentän E , sekä sähkövuon tiheyden D ja elastisen venymän T . [1]



Kuva 1 Pietsosähköisen muuntimen a) referenssikoordinaatisto ja b) toiminta sähkökentällä, mikä muuttaa muuntimen paksuutta b pietsosähköiseen ilmiön kautta. Eli niin sanotussa yhden suunnan paksuusmoodissa Muokattu [1, s.81] ja [4, fig.8.77]

Molempia e ja d käytetään kuvaamaan materiaalin pietsosähköisiä ominaisuuksia. Ne mitataan ilman mekaanista tai sähköistä kuormaa, ympäristön vaikutus otetaan mukaan myöhemmin ääniaaltojen tuotossa. Venymää ja paksuuden muutosta tapahtuu materiaalissa suoraan tasoja vasten ja leikkaus suuntiin eri tavoin, mikä monimutkaistaa laskemista. Pietsosähköiset ominaisuudet kuvataankin kristallien akselien mukaan matriiseina. Yleensä materiaalia käytetään yhteen suuntaan niin sanotussa paksuusmoodissa, missä muuntajan paksuutta muutetaan vain yhdessä suunnassa. Tavoitteena on minimoida pietsosähköiset ominaisuudet muissa suunnissa. Värähtelyä voidaan myös tuottaa leikkausvoiman avulla riippuen käytetystä materiaalista. Kuvassa 1 nähdään esimerkki referenssikoordinaatistosta ja pietsomuuntajan paksuusmoodista. [1]

2.1 Pietsosähköinen äänen tuotto ja vastaanotto

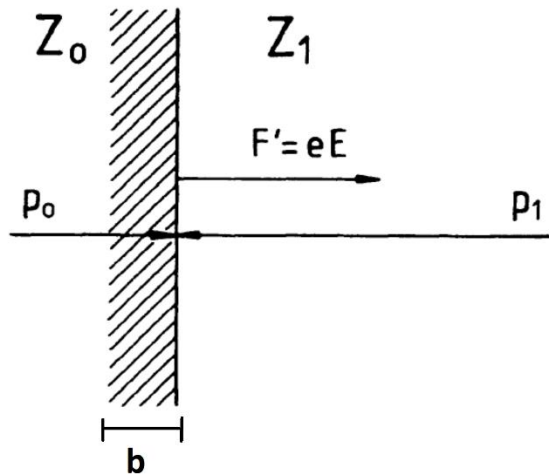
Pietsosähköisen muuntajan toiminnan tarkastelu yksinkertaistetaan paksuusmoodin tarkasteluun. Äänimuuntajan äänen tuottoon vaikuttaa ympäristön aaltoimpedanssi Z_r , joka kuvaa ympäröivän aineen äänen kulun vastustusta. Kiinteälle mäntälähteelle [1, s.69]

$$Z_r = \frac{F}{v_o}, \quad (3)$$

missä v_o on männän pinnan muutos nopeus ja F on vastustava voima. Z_r voi olla eri, muuntajan eri puolilla, muuttaen pietsosähköisiä ominaisuuksia. Jos muuntajan kalvon

pinta-ala on suuri verrattuna aallonpituuteen $Z_r = Z_0$, missä Z_0 on materiaalin ominaisimpedanssi. [1]

Seuraava esimerkki perustuu [1, s.94–101]. Tarkastellaan muuntajan dynaamista käyttäytymistä yhden suunnan paksuusmoodissa, missä molemmilla puolilla on sama ominaisimpedanssi. Esimerkiksi muuntaja on nesteessä, jolloin $Z_1 = Z_2$. Ääniaaltojen tuottoon vaikuttaa ympäröivän aineen ominaisimpedanssi Z_1 ja pietso muuntajan oma impedanssi Z_0 . Kuvassa 2 on muuntajan oikean puolen reuna.



Kuva 2 pietsosähköisen levyn oikea puoli ympäröivässä aineessa. Muokattu [1, s.97]

Virittämällä pietso muuntaja sinimuotoisella vaihtojännitteellä saadaan levyn pinnalle vaikuttama voiman derivaatta muuttumaan $F'(t) = \hat{F}' e^{i\omega t}$ tavalla. Tämä pinnan värähtely tuottaa ääntä akustisella teholla yhden levyn pinnalta [1, s.100]

$$P = \frac{AZ_1}{2b} \frac{e^2 \hat{U}^2}{Z_1^2 + Z_0^2 \cot^2\left(\frac{\omega \tau}{2}\right)}, \quad (4)$$

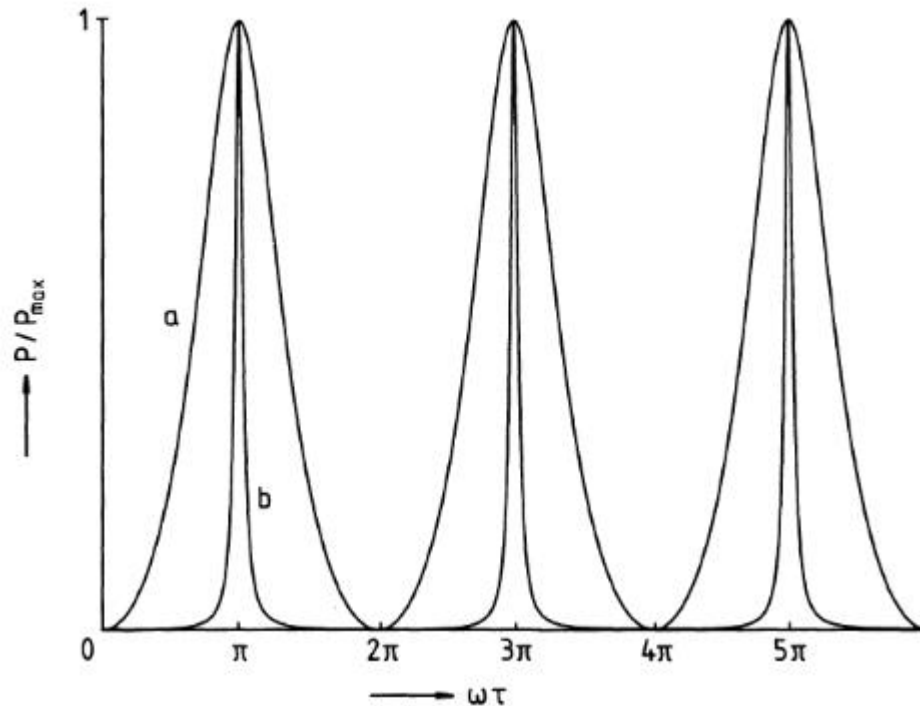
missä $A = \pi a^2$ eli männän pinta-ala, U on jännite, ω on kulmataajuus. Levyn paksuus b jaettuna äänen nopeudella pietso materiaalissa c_l saadaan äänen kulku aika levyn läpi $\tau = \frac{b}{c_l}$. Kaavasta nähdään pietso levyn resonoivan, kun levyn paksuus on pariton kertoma puolikkaasta aallonpituudesta. Resonoidessa maksimiteho on [1, s.100]

$$P_{max} = \frac{e^2 A \hat{U}^2}{2b^2 Z_1}, \quad (5)$$

ja resonointi taajuus on [1, s.100]

$$f_r = \frac{(2n+1)c_l}{2b}. \quad (n = 0,1,2, \dots) \quad (6)$$

Tämä nähdään kuvasta 3, missä äänen tehon riippuvuus taajuudesta ja äänen kulku ajasta pietso materiaalissa on esitetty. Pietso materiaalin ja ympäröivän aineen karakteristiset impedanssit vaikuttavat resonansseihin, mitä suurempi ero näillä on sitä selkeämmät resonanssit. [1]



Kuva 3 äänen tehon riippuvuus taajuudesta pietso levyllä, mikä on kuormitettu molemmilta puolilta samalla impedanssilla $Z_1 = Z_2$. Muokattu [1, s.101]

Vastaanotetulle jännitteelle ulkoisesta ääniallostosta saadaan samankaltaisesti [1, s.156]

$$U(t) = \frac{2e}{i\omega\epsilon^S} \frac{\hat{p}e^{i\omega t}}{Z_1 - iZ_0 \cot g\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)}. \quad (7)$$

Eliminoimalla $Z_1 - iZ_0 \cot g\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)$ kaavoista (7) ja (4) saadaan [1, s.157]

$$\frac{v}{F'} = \frac{i\omega\epsilon^S U_r}{2e p}, \quad (8)$$

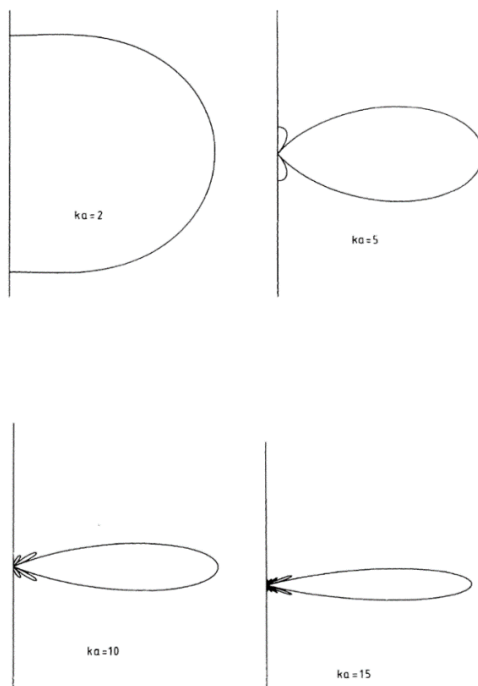
missä p on paine kalvon pinnalla. Tämä voidaan esittää sähköisillä parametreilla lähetysjännitteellä U_s ja vastaanotto virralla I_r , joka kulkee puristetun pietsosähköisen kalvon kapasitanssin C_s läpi [1, s.157]

$$\frac{Q}{U_s} = \frac{I_r}{2p}, \quad (9)$$

missä $Q = Av$ on tilavuusnopeus. Tämä kuvaa muuntajan kaksisuuntaisuutta ”reciprocal law”, vasen puoli kuvaa lähetyksen herkkyyttä ja oikea puoli vastaanoton herkkyyttä. Tämä pätee yleisesti pietsosähköisille muuntajille, joten vain yhden suuntainen herkkyys tarvitsee määrittää. [1]

Pietsosähköiset äänenmuuntajat ovat yksinkertaista valmistaa, mikä mahdollistaa yhteisen virityksen ja voidaan mukauttaa moniin eri sovelluksiin. Tästä syystä ne ovat yleisin ultraäänen tuottoon käytetty tapa. Riippuen sovelluksen vaatimuksista muuntajan elektrodikalvon muotoa tai massan jakautumista voidaan muuttaa, näin tuottaen erilaisia mekaanista värähtelyä. [1] Tällä voidaan muuttaa äänen tuottajan impulssivastetta ja säteilykuvioita, samankaltaisesti kuten antenneja optimoidaan.

Kalvoa voidaan yksinkertaisesti mallintaa kiinteänä loppumattomana kalvona, mitä viritetään pyöreällä alueella (pyöreä mäntä), kuten äskeisessä esimerkissä. Tämä yksinkertaistus toimii approksimaationa korkeilla taajuuksilla, kun aallonpituus on pieni verrattuna männän halkaisijaan. Helmholtz numeroa ka , missä k on aaltoluku ja a on männän säde, lukua käytetään kuvaamaan männän piirin suhdetta värähtelyn aallonpituuteen. Suurilla ka äänen suuntaavuus kapenee yhteen pääkeilaan ja pieniin sivukeiloihin (kuva.4). Tämä on yleistä megahertsi taajuuksien äänen tuottajissa. [1] Esimerkkinä, jos $ka = 5$ ja kalvoa viritetään taajuudella $f = 1$ MHz. Tällöin kalvon säde on $a = 270 \mu\text{m}$, joten kalvon koko on hyvin pieni ja näin pienen kalvon toteuttaminen haastavaa.



Kuva 4: äänen paineen amplitudin suuntaavuus pyöreälle kalvolle aallonpituuden ja kalvon säteen suhteen. [1, s. 67]

Pietsosähkö muuntajia käytetään usein kaksisuuntaisina sekä lähetykseen, että vastaanottoon. Kaksisuuntaisuus onkin tärkeä tekijä huomioida suunnittelussa. Kalvoa voidaan myös herättää monimutkaisemmilla herätteillä verrattuna mäntälähteen yhtenäiseen viritykseen. Virittämällä kalvoa eri amplitudeilla ja vaiheilla voidaan optimoida säteilyn suuntaavuutta. Tällöin voidaan myös mallintaa tarkemmin aikaisemmin mainittua epätasaisen virityksen vaikutusta, mitä havaitaan myös pietso muuntajissa. [1]

Pietsosähköiset materiaalit ovat rakenteeltaan epäsymmetrisiä kiteitä. Niiden kimmoisa muodonmuutos perustuu positiivisten varattujen ionien siirtymiseen suhteessa negatiivisiin ioneihin muodostaen sähköisen dipolimomentin suhteessa venymään. Sähköinen dipolimomentti kuvaa systeemin polaarisuutta. Yleisin pietsosähköinen materiaali on kvartsi (Silicon dioxide, SiO_2). Sillä on pienet mekaaniset ja sähköiset häviöt. Se on helpposti prosessoitava, kestäen hyvin korkeita lämpötiloja ja helppo leikata. [1]

Ferrosähköiset materiaalit ovat myös pietsosähköisiä. Ferrosähköisillä materiaaleilla on selkeästi suuremmat pietsosähköiset ominaisuudet verrattuna kvartsiin, mikä mahdollistaa tehokkaammat muuntajat [4]. Niissä on polarisoituja alueita ilman ulkoista sähkökenttää. Ne ovat yksittäisinä kristalleina hyvin pietsosähköisiä soveltuen ultraäänen muuntajaksi. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi lead zirconate titanate ($\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$), jolle käytetään nimeä PZT ja lead meta-niobate (PbNb_2O_6). Osa materiaaleista ei ole saatavilla kristalleina vaan jauheena, mistä tehdään keraamisia muuntajia. Nämä lämmitetään ja muovataan haluttuun muotoon. Polarisointi tehdään ulkoisella sähkökentällä. Verrattuna kiteisiin käyttöikä on lyhyempi, polarisaation heikentymisen takia. [1]

Taulukossa 1 on listattu kolmen pietsosähköisen materiaalin ominaisuuksia. Taulukosta nähdään ferrosähköisten materiaalien olevan selkeästi pietsosähköisempiä materiaaleja verrattuna kvartsiin pietsosähköinen moduluksen d perusteella muuntaen suuremmalla hyötysuhteella sähkö- ja painevaihtelun välillä.

Taulukko 1 Kolmen pietsosähköisen materiaalin ominaisuuksien vertailu. Taulukko on muokattu taulukoista pietsosähköiset ominaisuudet [4, taulukko 1.2] ja sähköisen piirin ominaisuudet [1, s.112]. Lähteiden arvot erosivat pietsosähköisille ominaisuuksille, joten sähköisen piirin ominaisuudet eivät ole johdettu taulukossa olevien pietsosähköisten ominaisuuksien mukaan. Sähköisten ominaisuuksien määrittelyssä levyn pinta-ala 5 cm^2 , paksuus 1 mm ja sen oletetaan olevan vedessä [1].

ominaisuus	Symboli	Kvartsi $LiNbO_3$	Lead me- taniobate	Lead zirconate titanate (PZT 5H)
Äänen nopeus	$c_L \text{ m/s}$	7400	3100	4600
permittiivisyys vakio jännityksellä	ϵ_{33}^T	29.8	300	3430
Permittiivisyys vakio venymällä	ϵ_{33}^S	29	270	1470
pietsosähköinen modulus	$d_{33} \text{ pm/V}$	5.9	85	590
Rinnan kapasitanssi	$C_s \text{ pF}$	20.4	842	
Sarja kapasitanssi	$C \text{ pF}$	0.034	15.9	
Induktanssi	$L \text{ mH}$	91.7	586	
resistanssi	$R \text{ k}\Omega$	205	578	
Resonanssi taajuus	$f_r \text{ MHz}$	2.85	1.65	
Q-arvo	$f_r/2\Delta f$	8.0	10.6	

2.2 Pietsosähköisen muuntajan impedanssi

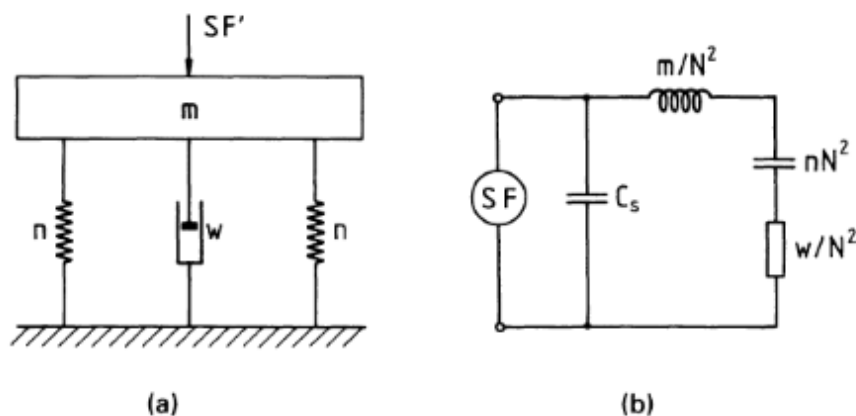
Määritettäessä pietsosähköisen muuntajan lähetysteho havaittiin muuntajan resonoin. Tätä voidaan mallintaa mekaanisena resonaattorina ja siitä pietsosähköisten ominaisuuksien pohjalta sähköiseen resonaattoriin. Kuvassa 5 on mekaaninen ja sähköinen resonanssiipiiri tilanteessa, jossa muuntajan paksuusmoodin molemmilla puolilla on sama ominaisimpedanssi. Muuntaja viritetään voimalla SF' ja taajuudella f . [1]

Sähköiselle piirille sisääntuloimpedanssi voidaan määrittää määrittämällä ensin sisääntuloimpedanssi mekaaniselle piirille. Se saadaan asettamalla pietsosäädin muuntajan alin resonanssi taajuus (14) ja "half-width" yhtä suureksi mekaanisen resonaattorin ominaisuuksiin. "half-width" on taajuuskaista resonanssin ympärillä, missä säteilyteho on yli puolet maksimitehosta. [1] Aikaisemmin määritetystä tilanteesta saadaan [1, s.107]

$$2\Delta f = \frac{2c_l Z_1}{\pi b Z_0}. \quad (10)$$

Mekaaninen resistanssi w , mikä kuvaa materiaalin mekaanisten voimien vastustusta asetetaan yhtä suureksi levyn kaksinkertaisen aaltoimpedanssin kanssa $2AZ_1$, tästä saadaan mekaaniselle resonaattorille sisääntuloimpedanssi, jonka avulla määritetään sähköisen piirin sisääntuloimpedanssi. Tämä koostuu kuvassa 4 olevasta piiristä missä on rinnakkainen kapasitanssi, käämin, kapasitanssin ja resistanssi kanssa. [1] Tarkemmat määritelmät löytyvät esimerkiksi lähteestä H. Kuttruffin kirja *Ultrasonics Fundamentals and Applications* [1, s.111].

Impedanssien määrittäminen on yksinkertaistusta "Butterworth-Van Dyke" (BVD) mallista yhdelle resonanssille. Riippuen pietsosähköisen materiaalin valmistuksesta, sillä voi olla useita eri resonansseja, monimutkaisten mallia. [6] Lisäämällä rinnakkaisen resistanssin BVD malliin on saatu parempi vastaavuus mitattuun impedanssiin [7]. Taulukossa 1 on ilmoitettu sähköisten komponenttien arvot kvartsille ja ferrosähköiselle materiaalille lead metaniobate. Näistä voidaan nähdä heikko Q-arvo molemmille resonaattoreille, mikä johtuu ympäröivän materiaalin eli veden ominaisimpedanssin eroavan huomattavasti muuntajan ominaisimpedanssista vaimentaen värähtelyä. Ilmassa kvartsille Q-arvo voi olla jopa 28 000 ilman pienemmän aaltoimpedanssin ja vaimennuksen takia. Suuren Q-arvon takia niitä käytetäänkin paljon sähköisissä oskillaattoreissa. [1]



Kuva 5 pietsosähköisen levyn piiri fundamentaalisessa paksuus moodin resonanssissa. a) mekaaninen ja b) sähköinen BVD malli. [1, s.109]

2.3 Käyttökohteet ja markkinoilla olevat tuotteet

Ultraääni-vastaanottimien ja lähettimien toimintaa voidaan kuvailla eri ominaisuuksilla. Näihin ominaisuuksiin kuuluu taajuusalue, suuntaavuus, teho, hyötysuhde, kannettavuus, reaaliaikaisuus, toimintasäde ja hinta. Etenkin käytetty taajuusalue ja teho ovat tärkeitä ja käyttökohderiippuvaisia.

Äänenmuuntajia voidaan käyttää moniin sovelluksiin. Näillä sovelluksilla on omat vaatimuksensa, jotka vaikuttavat muuntajien suunnitteluun. Ultraääntä käytetään sensoreina mittaamaan etäisyyksiä ja tutkimaan aineiden koostumusta. Tämä perustuu ultraäänen lähetykseen ja sen heijastumiseen "time of flight" eli ToF-periaatteeseen. Yksinkertaisimmillaan etäisyyttä voidaan mitata lähettämällä pulssi ja ottamalla ajankesto, kun vastaanotin saa heijastuksen

$$x = \frac{TC_L}{2}. \quad (11)$$

Etäisyyden mittausta käytetään esimerkiksi roboteissa, auton parkinta-avustus- ja IoT-laitteissa havainnoimaan ympäristöä. Muuntajan taajuus vaikuttaa tarkkuuteen ja maksimietäisyyteen. [8] Tämä johtuu suurempien taajuuksien suuremmasta vaimentumisesta ja suurempien taajuuksien tiheämmästä paineen vaihtelusta erotellen esineitä tarkemmin.

Ultraäänen etuna muihin sensoreihin tulee sen ympäristöolosuhteiden kestämiseen ja kykyyn havainnoida värikkäitä ja läpinäkymättömiä esineitä. Ultraäänellä on kuitenkin vaikeuksia mitata esineitä, joilla on sama akustinen impedanssi kuin ympäröivällä materiaalilla heikon heijastumisen takia. Etäisyyden mittauksessa käytetään yleensä TVG periaatetta eli ajan mukaan vaihtelevaa vahvistusta. Tällä vahvistusta kasvatetaan ajan kuluessa lähettimen pulssin lähetyksestä. [8] Tämä tehdään lyhyen matkan signaalien suureen tehoon verrattuna pitemmän matkan tehon takia, aiheuttaen mikserin saturoitumista tai liian pientä herkkyyttä pitemmän matkan signaaleihin.

Aikaisemmin mainittu materiaalien rikkomattoman testaus perustuu heijastuneen signaalin havainnointiin, kuten etäisyys sensorit. Tämä perustuu kiinteän materiaalin epähomogeenisuus kohtien vaikutuksesta äänen kulkuun materiaalissa. Epähomogeenisuus materiaaleissa nähdään epäjatkuvuus kohtina äänelle ja ne vaikuttavat äänen kulkuun. Monissa rakenteissa tämä tarkoittaa virheitä ja halkeamia. Tätä käytetään esimerkiksi siltojen, teräsrakenteiden tai raaka materiaalien virheiden havainnointiin ja homogeenisuuden tarkasteluun. [2] Tätä käytetään myös lääketieteessä diagnosoimaan

potilaita ultraäänitutkimuksella. Tarkasteltavat elimet liikkuvat ja ovat nestemäisiä rakenteeltaan muuttaen tarkastelua. Dopplerin ilmiötä voidaan käyttää esimerkiksi sydänlämpien liikkeen tarkasteluun. Se on hyvin turvallinen kuvaus tekniikka, se ei ionisoi, eikä myöskään vaadi kontrasti materiaalia kuten röntgenkuvaus.[1]

Teho ultraääni applikaatioissa korkeaintensiteetti ultraäänellä muutetaan pysyvästi materiaalin fyysisiä, kemikaalisia tai biologisia ominaisuuksia. Käytetyt tehotasot ovat laajalta 10–1000 watin alueelta ja usein hyvin matalilla taajuuksilla 20–100 kHz. Perustuu epälineaarisiin ilmiöihin kuten aalto vääristymiin, säteily paineeseen ja kavitaatioon nesteissä. Näillä ilmiöillä aiheutetaan monia muutoksia aineessa, kuten lämpenemistä, mekaanisia purkautumisia ja kemikaalisia muutoksia. Tätä käytetään monissa teollisissa applikaatioissa, kuten metallien hitsauksessa, metallien aineiden työstössä ja puhdistuksessa. Käyttöön vaikuttaa aikaisemmin mainitut tehotasot ja taajuudet. Esimerkiksi ultraääntä käytetään lääketieteellisissä leikkauksissa, joissa sillä leikataan kovia ja pehmeitä kudoksia. Esimerkiksi Bonescapel, Misonix käyttää 22.5 kHz ultraääntä yleisesti kirurgi operaatioissa. Se siis toimii selkeästi suuremmalla teholla verrattuna ultraäänikuvausvauksiin. [2]

Ultraäänimuuntajat ovat mekaanisia, joten ulkopuolinen mekaaninen värinä ja iskut vaikuttavat niiden toimintaan ja aiheuttavat pietsosähköisen ilmiön kautta häiriöitä. Muuntajien pakkaukset pitääkin suojata ja ympäröivän systeemin aiheuttamat mekaaniset häiriöt otettava huomioon. Muuntajien pakkauksia voidaan ostaa suljettuina tai avoimina. Suljetut suojaavat yleensä myös kosteudelta.

Muuntajien teknisissä tiedoissa ilmoitetaan yleensä käyttötaajuus, kapasitanssi 1 kHz taajuudella, maksimi ajojännite käyttötaajuudella, suuntaavuus ja toiminta lämpötilat. Osissa ilmoitetaan muuntajan impedanssi, herkkyys tai äänen paine taso, havaintoetäisyydet ja vasteaika. [9,10,11,12] Mitattu muuntajan kapasitanssi taajuudella 1 kHz voidaan käyttää approksimoimaan BVD mallin rinnakkaiskapasitanssi C_s . Muuntajien sisääntuloimpedanssit ovat 40 kHz muuntajilla 3 k Ω ja 2.1 MHz muuntajalle 250 Ω kokoluokkaa [10,12]. Suuremmilla taajuuksilla sisääntuloimpedanssi laskee C_s vuoksi.

Pelkästään ultraääni-ilmaisimia on vähän markkinoilla, yleensä lähetin on myös mukana. Ultraääni-ilmaisimet yleensä on tarkoitettu, joko veden virtauksien tai eläimien havainnointiin. Muutama ilmaisim toteutustapa ja niiden ominaisuudet löytyvät taulukossa 2. Taajuusjakaminen periaatteessa suurempi taajuinen signaali muutetaan matalammalle taajuudelle jakamalla signaalin taajuus [13]. Tämä on yksinkertainen tapa, mutta se kompressoii informaatiota. A/D muunnoksessa analoginen signaali muutetaan suoraan A/D muuntimella digitaaliseksi [14]. Tämä Aiheuttaa vähiten vääristymiä, mutta A/D

muuntimen näyteottotaajuus rajoittaa toiminta taajuuksia. Heterodyne periaatteessa korkeampitaajuinen ultraääni muunnetaan mikserin ja jännitesäätöisen oskillaattorin avulla matalammalle taajuudelle [15]. Se on markkinoiden yleisin ilmaisoin toteutustapa. Heterodyne periaatetta tarkastellaan tarkemmin luvussa 3.2.

Taulukko 2 Eri ultraääni vastaanotin toteutustapoja, niiden ominaisuuksia ja esimerkki tuote.

Vastaanotin toteutus	Informaatio esitystavat	Edut	Haitat	Esimerkki tuote
Heterodyne	Kuuloalueen äänenä, visuaalisesti ja digitaalisena datana	Voidaan säätää suurelle taajuusalueelle. Ei kompressoii informaatiota. Mahdollistaa hyvin korkeiden taajuuksienkin tarkastelun.	Hetkellinen taajuusalue rajoitettu Verrattuna suoraan A/D muuntimeen mikseri aiheuttaa vääristymää signaaliin	Elekon lepakkodektori [15] Informaatio esitetään äänenä
Taajuus jakaminen	Kuuloalueen äänenä ja visuaalisesti	Yksinkertainen toteutus	Kompressoii informaatiota heikentäen tarkkuutta. Rajallinen taajuusalue kompressoinin takia	Batabox baton lepakko detektori [13] Esitetään äänenä. Taajuusalue 20 kHz-120 kHz muunnetaan 2 kHz-12 kHz alueelle jakamalla 10:llä
Suoraan A/D muunnos	Digitaalisena datana	Signaalia voidaan tarkastella suoraan taajuussisällöltä. Ainoastaan A/D muuntimen aiheuttama epätarkkuus (pyöritys amplitudi ja aika- tason)	Rajoittaa taajuuden ylärajan A/D muuntimen näyteenotto nopeuteen	Petersson M500 A/D muunnos detektori [14] Informaatio esitetään digitaalisena datana. Näyteenotto taajuus 384 kHz tai 500 kHz ja ADC resoluutio 16 bittiä.

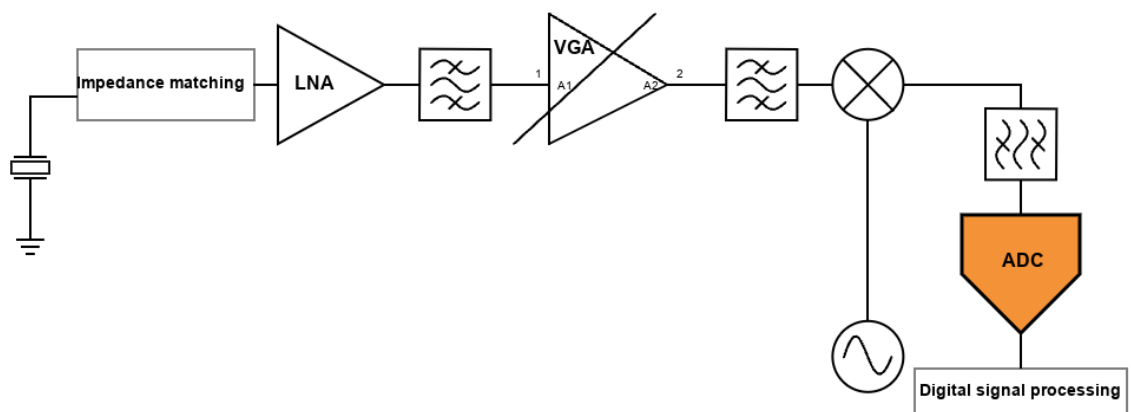
3. VASTAANOTTIMEN SÄHKÖINEN TOTEUTUS

3.1 Yleinen rakenne ja komponenttien ominaisuudet

Ultraäänen vastaanottimet ja lähettimet ovat samankaltaisia kuin sähkömagneettisen säteilyn perustuvaan kommunikaatioon käytettävät vastaanottimet ja lähettimet. Ero tulee signaalin muuntamisesta ultraäänestä tai sähkömagneettisesta säteilystä sähköiseen signaaliin. Sähkömagneettisille signaaleille käytetään antennoja, missä sähkövarausten vaihtelut aiheuttavat säteilevän signaalin. Ultraäänen muuntaminen käytiin aikaisemmissa luvuissa. Ultraäänivastaanottimen sähköisessä suunnittelussa voidaan siis käyttää samoja periaatteita kuin sähkömagneettisissa vastaanottimissa. Yksi tärkeimmistä vastaanottimen ominaisuuksista on sen herkkyys eli kyky erottaa signaali kohinasta. Sitä kuvaa SNR eli signaalin tehon suhde P_{in} kohina tehoon P_{noise}

$$SNR = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_{noise}} \right), \quad (12)$$

tässä kuvattuna desibeleinä dB. Vastaanottimilla tavoitellaan korkeaa herkkyyttä. Aikaisemmin määritettiin äänimuuntajan ulostulotuloimpedanssi ja vastaanotetun jännitteen riippuvuus vastaanotetusta äänestä. Tietämällä muuntajan ulostuloimpedanssi, muuntajan ja kytketyn lohkon välillä voidaan tehdä impedanssi sovitus maksimoimaan tehonvälitys. Vastaanotetun jännitteen riippuvuus äänestä kuvaa muuntajan herkkyyttä. Kuvassa 6 on esimerkki ultraääni vastaanotin, joka perustuu lähteen [16] esimerkkiin.



Kuva 6 ultraääni vastaanotin systeemikaavio

Impedanssisovitus taajuuksilla, millä signaalin aallonpituudet ovat johdotusten kokoluokkaa perustuu tehon välityksen maksimointiin. Tämä johtuu heijastumisista eri impedanssi rajapintojen välillä. Tehon välityksen maksimointi tehdään sovittamalla eri systeemien

osien impedanssit samoiksi. Yleensä 50Ω on systeemien tavoite, mikä mahdollistaa modulaarisen suunnittelun. Matalilla taajuuksilla heijastumiset ovat pieniä, joten suunnittelun ei tarvitse perustua tehon välitykseen. [17] Impedanssi sovitus voidaan tehdä sovituspäiirillä esimerkiksi rinnakkain olevalla kondensaattorilla C ja sarja induktanssilla L , jolloin [1, s.116]

$$Z_{in} = \frac{L}{CZ_t}, \quad (13)$$

missä Z_t on muuntajan impedanssi ja Z_{in} on haluttu sovitus impedanssi. Korkeammilla taajuuksilla voidaan käyttää siirtolinjoja passiivisten komponenttien sijasta.

Vastaanotettu ääniaalto on vaimentunut ennen vastaanottoa. Signaalin taajuusmuutokseen ja prosessointiin tarvitaan tarpeeksi suuri signaali taso. Tähän käytetään LNA "Low noise amplifier" vahvistinta. LNA vahvistimissa minimoidaan kohinaa, mitä vahvistin lisää signaalin. Tätä kuvaa NF eli kohinaluku, mikä kertoo kuinka SNR heikkenee piirissä

$$NF = 10 \log \left(\frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \right). \quad (14)$$

Kohinan minimoiminen vahvistimissa tarkoittaa kompromissia LNA:n sisääntuloimpedanssin ja vahvistuksen kanssa. LNA:n vahvistus halutulla taajuuskaistalla pitää olla tasainen minimoimaan signaalin vääristymistä. Ultraääntä käytetään yleensä pienillä kaistaleveyksillä, joten tämä ei ole kriittinen suunnittelutekijä. Stabiilointi on tärkeää LNA:lla, jonka sisääntulossa on muuntaja. Tämä johtuu muuntajan suurista lähde impedanssin vaihteluista ympäristön olosuhteiden vaihtelun takia. Tämän takia LNA suunnitellaan ehdottoman stabiiliksi eli stabiiliksi kaikilla lähde impedansseilla ja taajuuksilla. [17] LNA itsessään tai LNA:n kanssa on usein muutettava vahvistin VGA tai vaimennin. Tällä voidaan säätää vastaanotetun signaalin vahvistusta. Riippuen mistä signaali vastaanotetaan signaalin teho voi olla liian suuri mikserille aiheuttaen harmonista vääristymää ja saturoimista. Muutettavan vahvistimen vahvistusta voidaan säätää ohjauksella, missä vahvistimen ulostulosta otetaan testisignaali ja sen perusteella säädetään vahvistusta, näin välttämällä mikserin saturoitumisen.

Vastaanottimen herkkyyteen vaikuttaa eniten vastaanottimen ensimmäiset systeemin lohkot. Tämä johtuu vastaanotetun signaalin olevan heikoin, jolloin kohina vaikuttaa enemmän. [17] Tämä nähdään myös lohkojen kaskadin NF määrittämisestä Friisin kaavalla [17, s.54]

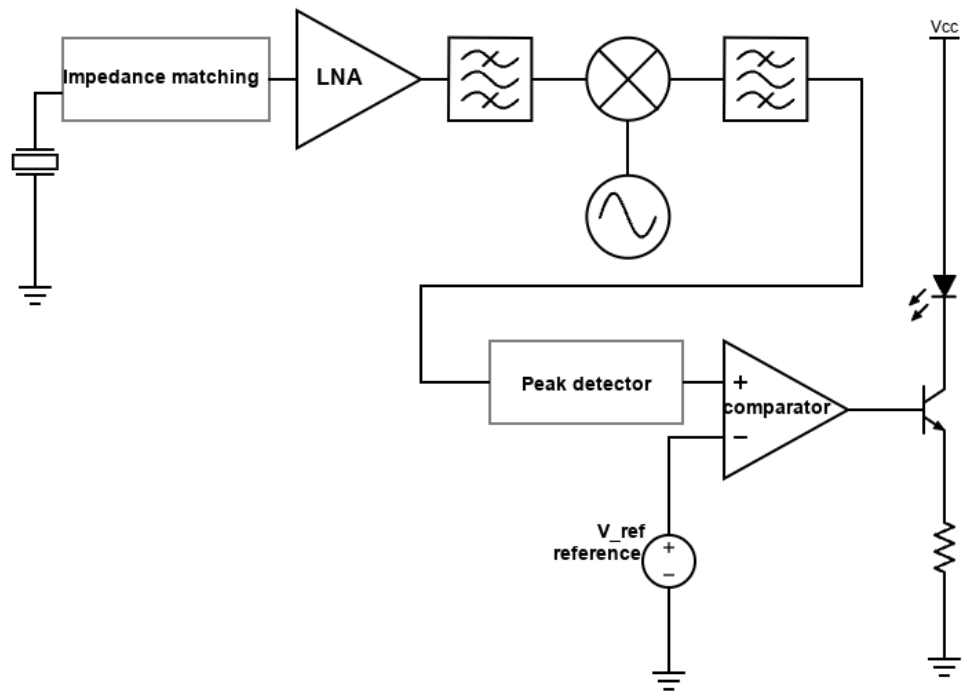
$$NF_{tot} = 1 + (NF_1 - 1) + \frac{NF_2 - 1}{A_{p1}} + \dots + \frac{NF_m - 1}{A_{p1} \dots A_{p(m-1)}}, \quad (15)$$

missä NF_n on lohkojen kohinaluku ja A_{Pn} on lohkojen vahvistus. Myöhempien lohkojen kohina lukujen vaikutus vähenee kokonais-kohinalukuun aikaisempien lohkojen vahvistuksella. [17] Impedanssi sovituksessa ja LNA:ssa kohinaa voidaan minimoida muun muassa käyttämällä passiivisia komponentteja, joilla on suuri Q-arvo, jolloin komponenteilla on vähemmän parasitiivisiä resistansseja ja niiden aiheuttamaa kohinaa.

Mikserit ja oskillaattorit kuuluvat yleensä lähettämiin ja vastaanottimiin. Mikserit kertovat kaksi signaalia keskenään ja oskillaattorit tuottavat jaksottaisen signaalin, jollakin taajuudella. Molempia käytetään muuntamaan signaalin taajuutta matalammalle tai korkeammalle taajuudelle. Tästä tarkemmin seuraavassa osuudessa. Tarkempaa tietoa mikseristä ja oskillaattoreista on esimerkiksi Razavi Behzadin kirjassa RF Microelectronics [17].

Äänenmuuntajilla on yleensä korkea Q-arvo, joten suodatus ennen LNA:ta ei ole välttämätön. Tähän vaikuttaa kuitenkin äänen muuntajan kaistanleveys, applikaation tarkkuus ja signaalin taajuuden selektiivisyys. Vahvistimet ja mikserit aiheuttavat kohinaa, joka vaikuttaa mittauksen tarkkuuteen. Tämän takia kaistanpäästösuodattimia käytetään vahvistimien ja mikserien jälkeen minimoimaan kohinaa ei halutun taajuusalueen ulkopuolella. Mikserillä on myös ei haluttuja Intermodulaatio ja harmonisia epälinearisuuksia, mitkä halutaan suodattaa [17].

Sähköinen signaali muutetaan A/D muunnoksella digitaaliseksi signaaliksi. Digitaalisesti signaalin taajuussisältöä voidaan tarkastella Fourier muunnoksen kautta ja jatkoprosesoida signaalia. Yksinkertaiselle ilmaisimelle kiinnostuksena on, onko taajuuskaistalla ultraääntä. Tämä voidaan toteuttaa kuvan 7 systeemillä. A/D muuntimen tilalla on huippuilmaisim, jolla voidaan näytteenottaa signaalia. Tämä jännite voidaan verrata komparaattorilla referenssi jännitteeseen. Kun signaali on suurempi kuin referenssijännite, komparaattoriin jännite kasvaa ja avaa Q1 transistorin ja valodiode D1 menee päälle. Huippuilmaisinta voidaan resetoida aikavälein, jotta valodiode sammuu, kun ultraääntä ei enää ole. Tätä käytetään myöhemmin kokeellisessa osuudessa.



Kuva 7 Yksinkertainen ultraääni ilmaisain systeemi

3.2 Heterodyne vastaanottimen toteutus

Tarkastellaan seuraavaksi heterodyne periaatteeseen perustuvaa ultraäänivastaanotinta. Heterodyne-periaatteessa haluttu signaali f_{in} taajuus muunnetaan, joko korkeammalle taajuudelle tai pienemmälle väliaikaiselle taajuudelle IF taajuudelle f_{IF} . Vastaanotossa korkeammat taajuudet taajuus muunnetaan IF taajuudelle, jossa signaalin suodatus, A/D muunnos ja prosessointi on helpompaa. Tämä tehdään mikserin ja oskillaattorin avulla. Mikserissä vastaanotettu signaali sekoitetaan oskillaattorin signaalin f_{LO} avulla [17, s.163]

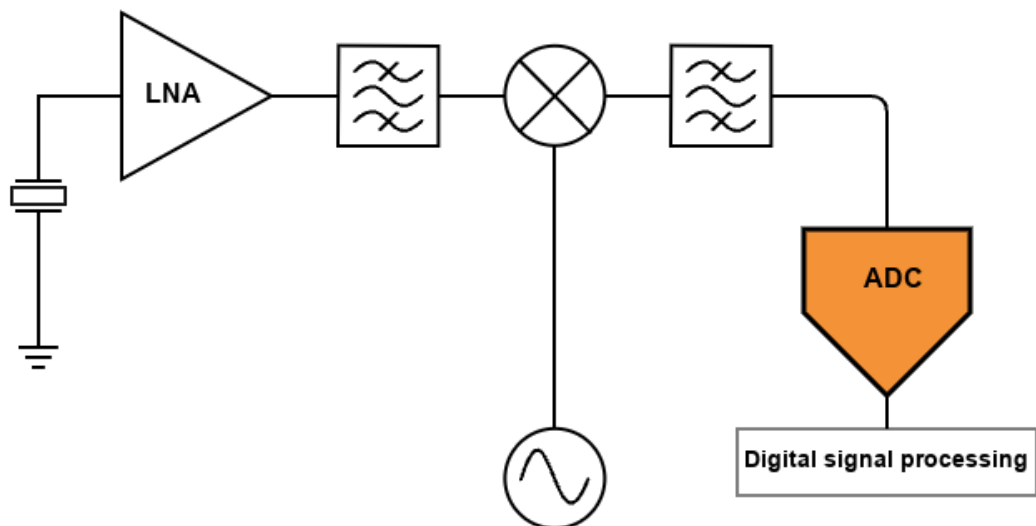
$$\text{Acos}(\omega_{IF}t) = \text{Acos}((\omega_{in} - \omega_{LO})t) = \text{Acos}((\omega_{LO} - \omega_{in})t), \quad (16)$$

missä A on signaalin amplitudi, ω_{IF} on IF kulmataajuus, ω_{in} on sisääntulo kulmataajuus ja ω_{LO} on oskillaattorin kulmataajuus. IF taajuudelle muunnetaan kahdelta eri taajuudelta taajuuden ω_{LO} ympäriltä. Ei haluttua puolta nimitetään "image", tämä pitää suodattaa ennen taajuusmuunnosta, jotta voidaan estää signaalin vääristymisen. [17] Langattomassa liikenteessä nämä olisivat muita kanavia ja mahdollista elektromagneettista häiriötä. Ultraäänelle mahdolliset häiriöt riippuvat olosuhteista ja taajuusalueesta, jota tarkastellaan. Korkeilla taajuuksilla ei ole niin paljon muita lähteitä, jotka häiritsevät, mutta signaali vaimentuu lyhyilläkin matkoilla, joten pienemmätkin signaalit saattavat häiritä.

Matalilla taajuuksilla voidaan tehdä suoraan A/D muunnos, jos A/D muuntimen näytteenottotaajuus on tarpeeksi suuri.

Kuvassa 8 on yksinkertainen esimerkkitoetus. Aluksi signaali vahvistetaan LNA:n avulla. Sen jälkeen suodatetaan kaistanpäästösuodattimella, jolla on yleensä laaja kaistanleveys. Sitten signaali taajuus muunnetaan matalammalle taajuudelle mikserin ja VCO:n avulla. Tämä suodatetaan taajuus selektiivisemmällä IF suodattimella, joka rajaa halutun kaistanleveyden. Voidaan säätää haluttua taajuusalueita muuttamalla oskillaattorin taajuutta. Kaavasta (23) huomataan, että säätämällä oskillaattorin taajuutta ω_{LO} , sisääntulo signaali taajuudella $\omega_{in} = \omega_{LO} - \omega_{IF} = \omega_{LO} + \omega_{IF}$ muunnetaan taajuudelle ω_{IF} . Näin IF suodatin voidaan toteuttaa vain taajuudelle ω_{IF} helpottaen systeemin toteutusta. Toteutuksessa VCO:n taajuuden säätöalue rajoittaa ilmaisimen käytetyn taajuusalueen.

Informaatio voidaan esittää kuuloalueen äänenä tai visuaalisesti. Informaatio voidaan muuttaa A/D muuntimella tarkempaa signaalin tarkastelua varten. Monet lepakkodekterit kuten Elekon lepakkodekterit [15] toimii tällä periaatteella. Se voi muuntaa audiota 15–120 kHz taajuusalueelta kuuloalueelle. Taajuus, miltä ultraääni muunnetaan matalammalle taajuudelle, voidaan säätää. Kerralla voidaan esittää kuitenkin vain yhtä taajuusalueita, mitä rajoittaa IF suodattimen kaistanleveys.



Kuva 8 yksinkertainen heterodyne vastaanotin

4. YKSINKERTAISEN ULTRAÄÄNI-ILMAISIMEN TOTEUTUS

Työn käytännön osuuden tavoitteena on toteuttaa ultraääni-ilmaisimien 40 kHz taajuudelle. Ilmaisimen toteutus on yksinkertaisempi verrattuna aikaisemmin mainittuun yleiseen rakenteeseen. Tämä rajoittaa ilmaisimen ominaisuuksia, kuten signaalin muodon ja signaalin taajuusvälän tarkastelua. Matalan toimintataajuuden vuoksi voidaan jättää huomioimatta esimerkiksi tarkempi impedanssisovitus komponenttien välillä yksinkertaisen toteutusta. Ilmaisimen toiminnan testaamiseen toteutetaan myös testipenkki, missä käytetään markkinoilla olevaa ultraäänisensoria HC-SR04 [19]. Sensori mittaa etäisyyttä aikaisemmin mainitsemalla "ToF" periaatteella. Tätä verrataan ilmaisimen vastaanottaman signaalin ajoitukseen. Työssä toteutetaan myös ultraäänilähetin 40 kHz taajuudelle. Lähetin toteutetaan Wien siltaoskillaattorilla [18], jonka ulostuleva 40 kHz sinisignaali syötetään ultraäänimuuntajalle. Ilmaisimen toimiminen ensin tarkastetaan testipenkillä ja sen jälkeen lähettimen toiminta testataan ilmaisimella. Lähettimellä tarkastellaan myös tapahtuuko lähettimen ja vastaanottimen välillä signaalin vääristymistä. Signaaleita tarkastellaan oskilloskoopeilla. Taulukossa 3 on suunnittelussa ja mittauksessa käytetyt simulointiohjelmistot ja mittauslaitteet.

Taulukko 3 Suunnittelussa ja testauksessa käytetyt sovellukset, laitteet ja niiden asetukset

Käyttö tarkoitus	Piirisimulointi ohjelmisto	oskilloskooppi	oskilloskooppi anturit	Signaali generaattori	virtalähde
Laitteisto tai ohjelmisto	NI Multisim 14.3	Agilent DSO-X 2002A	N2862B 10:1	Agilent 33500B	Agilent E3631A
asetukset	Pääosin oletusasetukset. Transient simuloinneissa käytettiin TMAX=1e-06 Interactive, Transient ja AC sweep käytettiin simuloinneissa	Coupling: DC		Waveform: pulse, amplitude: 3 V, offset: 1.5 V, pulse width: 30us, load: high Z	ilmaisimien VCC=3 V, VEE=-3 V, sensori VCC=5 V Lähetin VCC=10 V, VEE=-5 V

4.1 Suunnittelu

Seuraavaksi ultraääni-ilmaisimen ja -lähettimen suunnittelu ja simulointitulokset. Simuloinnit ovat toteutettu Multisim ohjelmistolla.

4.1.1 Ultraääni-ilmaisim

Ultraääni-ilmaisim toteutettiin vastaanottimella, mikä vertaa vastaanotettua signaalia referenssijännitteeseen komparaattorilla, joka kytkee ledin päälle, kun vastaanotettu signaali on suurempi kuin referenssijännite. Ilmaisim on esimerkkiratkaisu ja komponenttivalinnat ovat rajoitettu komponentteihin, mitkä olivat käytettävissä. Ultraääni-ilmaisimen suunniteltu piirikaavio on kuvassa 9. Tavoitteena on havaita vastaanotettu signaali muuntajasta amplitudilla $V_o = 100$ mV ja taajuudella $f_o = 40$ kHz. Ensiksi vastaanotettu signaali vahvistetaan LNA:lla, tämä toteutetaan ei-invertoivalla operaatiovahvistim kytkenällä. Operaatiovahvistimena käytetään LM833D sen pienen kohinaluvun vuoksi [20]. Kahden vastuksen R_1 ja R_2 takaisin kytkenällä kontrolloidaan vahvistimen vahvistusta

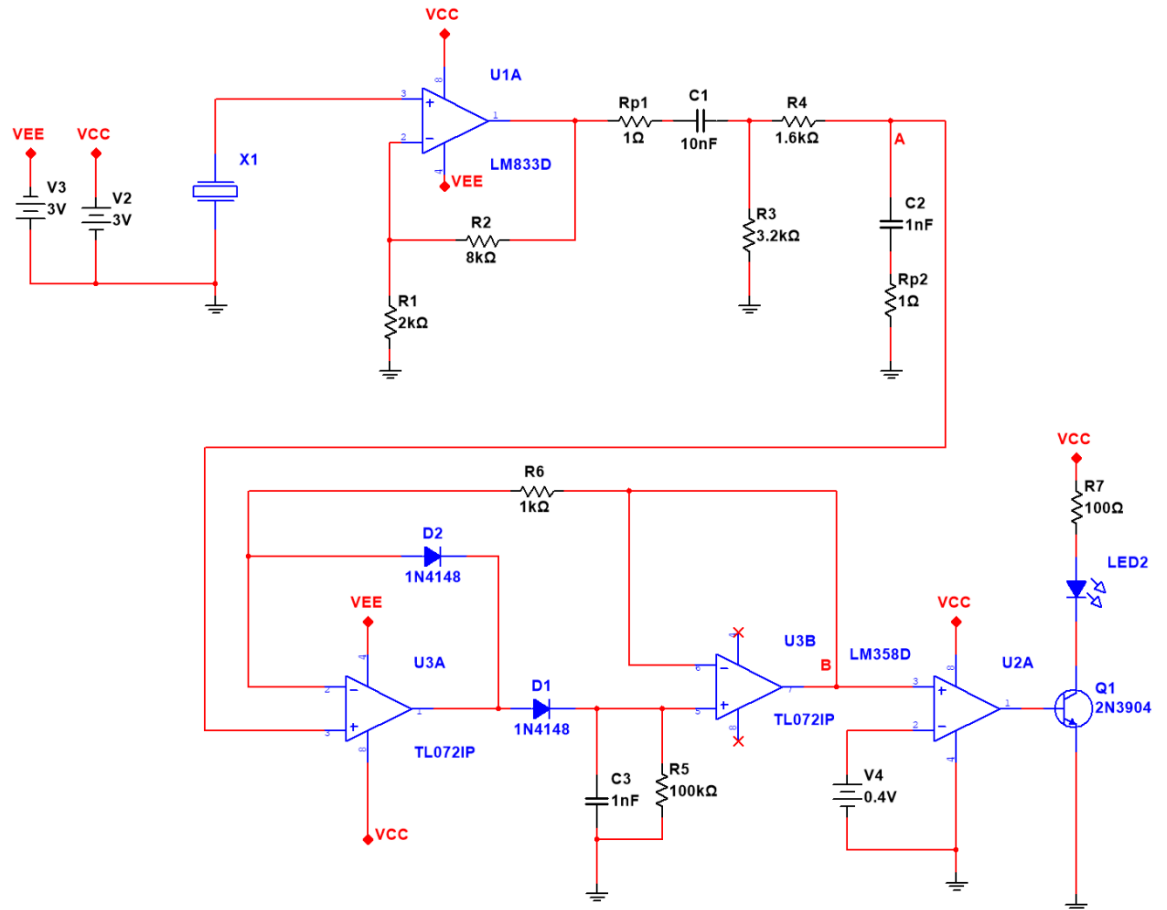
$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (17)$$

Vahvistukseksi valitaan $A_v = 5$ kompensoimaan suodattimen häviöitä ja mahdollistaen suuremman vertailujännitteen. Vahvistettua signaalia suodatetaan kaistanpäästösuoitimella. Kaistanpäästösuoitim toteutetaan 1.asteen ylipäästö- ja alipäästösuoittimen sarjan kytkenällä. ylipäästösuoitim toteutetaan kuvassa 9 olevilla C_1 ja R_3 komponenteilla ja alipäästösuoitim C_2 ja R_4 komponenteilla. Kondensaattorien kanssa on sarjassa R_{p1} ja R_{p2} , mitkä kuvaavat kondensaattorin parasitiittisiä resistansseja. Suodattimien -3 dB rajataajuudet f_c voidaan määrittää kaavalla

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (18)$$

Alipäästösuoittimen rajataajuudeksi määritettiin $f_c = 100$ kHz ja kondensaattorin arvoksi $C_1 = 1$ nF, jolla saatiin vastuksen arvoksi $R_3 = 1.6$ k Ω . Ylipäästösuoittimen rajataajuudeksi määritettiin $f_c = 5$ kHz ja kondensaattorin arvoksi valittiin $C_2 = 10$ nF, jolla saatiin vastuksen arvoksi $R_4 = 3.2$ k Ω . Kondensaattorien ja vastuksien arvojen valinnassa pitää ottaa huomioon suotimien impedanssisovitus, mikäli tavoitteena on optimoida kaistanpäästösuoittimen toimintaa. Tarkemmin suotimien suunnittelusta [21]. Kaistanpäästösuoittimen simuloituksi vahvistukseksi saatiin noin $A_{BP} = 0.82 - 0.86$ taajuuskaistalla 30–50 kHz.

Suodattimen ulostulo syötetään huippuarvoilmaisimeen [18], joka säilyttää suodattimen ulostulon huippuarvon. Suodattimen ulostulon arvo varastoituu C_3 kondensaattorin ja näkyy tämän kautta ulostulossa. Tämä maksimi arvo purkautuu R_5 vastuksen avulla RC-aikavakion mukaan. Huippuarvoilmaisimen ensimmäinen operaatiovahvistin U_{3A} käytetään komparaattorina, jos sisääntulo on suurempi kuin aikaisemmin varastoitu arvo C_3 :ssa, sen ulostulo kasvaa ja avaa diodin D_2 ladataan kondensaattoria C_3 . Kun kondensaattorin arvo ylittää sisääntulon komparaattorin ulostulo laskee biasoiden D_2 diodin esotsuuntaan, jolloin tulojännite ei enää muutu. Kondensaattorin jännite näkyy ulostulossa puskuroituna U_{3B} operaatiovahvistimen avulla. Huippuarvoilmaisimen tarkoituksena on pidentää ledin päällä oloaika etenkin lyhyt aikaisille impulsseille, joita muutoin ihminen ei ennäitä havaitsemaan. Huippuarvoilmaisimen ulostuloa verrataan komparaattorilla referenssijännitteeseen V_{ref} , jolla voidaan määrittää ilmaisimen herkkyys vastaanotetun jännitteen amplitudiin. Referenssijännite tuotetaan käyttöjännitteestä V_{CC} käyttämällä 20 k Ω potentiometriä. Komparaattorina käytetään LM358 operaatiovahvistinta sen saataavuuden vuoksi. Komparaattorin tarkoituksena on asettaa ulostuloksi V_{CC} , kun vastaanotettu signaali on suurempi kuin referenssijännite. Huippuilmmaisimen ulostulo avaa transistorin Q1, jos ulostulo ylittää Q1 transistorin kynnsijännitteen $V_{th} \approx 0.7 V$. Tämä kytkee ledin päälle. Ledin läpi kulkevaa virtaa kontrolloidaan R_g vastuksella. Simuloidut tulokset ovat kuvassa 11. Tuloksista havaitaan suodattimen ulostulon A olevan noin nelinkertainen verrattuna sisääntuloon ja huippuilmmaisimen ulostulon B olevan hieman suurempi verrattuna suodattimen ulostuloon maksimissaan ja laskee jakson aikana noin 100 mV. Piiri kytkee ledin päälle, kun referenssi jännitteenä käytetään 400 mV. Referenssijännite tulisi olla suurempi verrattuna vastaanotettuun ympäröivään kohinaan, jotta ei tule vääriä havaintoja.



Kuva 9 Suunnitellun ultraääni-ilmaisimen piirikaavio, kuvassa X1 kuvaa ultraääni muuntajaa

4.1.2 Ultraäänilähetin

Ultraäänilähetin toteutettiin Wien siltaoskillaattorilla [18], jonka ulostulo syötetään suoraan ultraäänimuuntajaan. Kuvassa 10 näkyy suunnitellun oskillaattorin piirikaavio. Positiivinen takaisinkytkentä toteutetaan kahden RC-ketjun avulla R_1 ja C_1 , sekä R_2 ja C_2 ketjuilla, joissa $R = R_1 = R_2$ ja $C = C_1 = C_2$. Värähtelytaajuus saadaan

$$f_o = 1/2\pi RC, \quad (19)$$

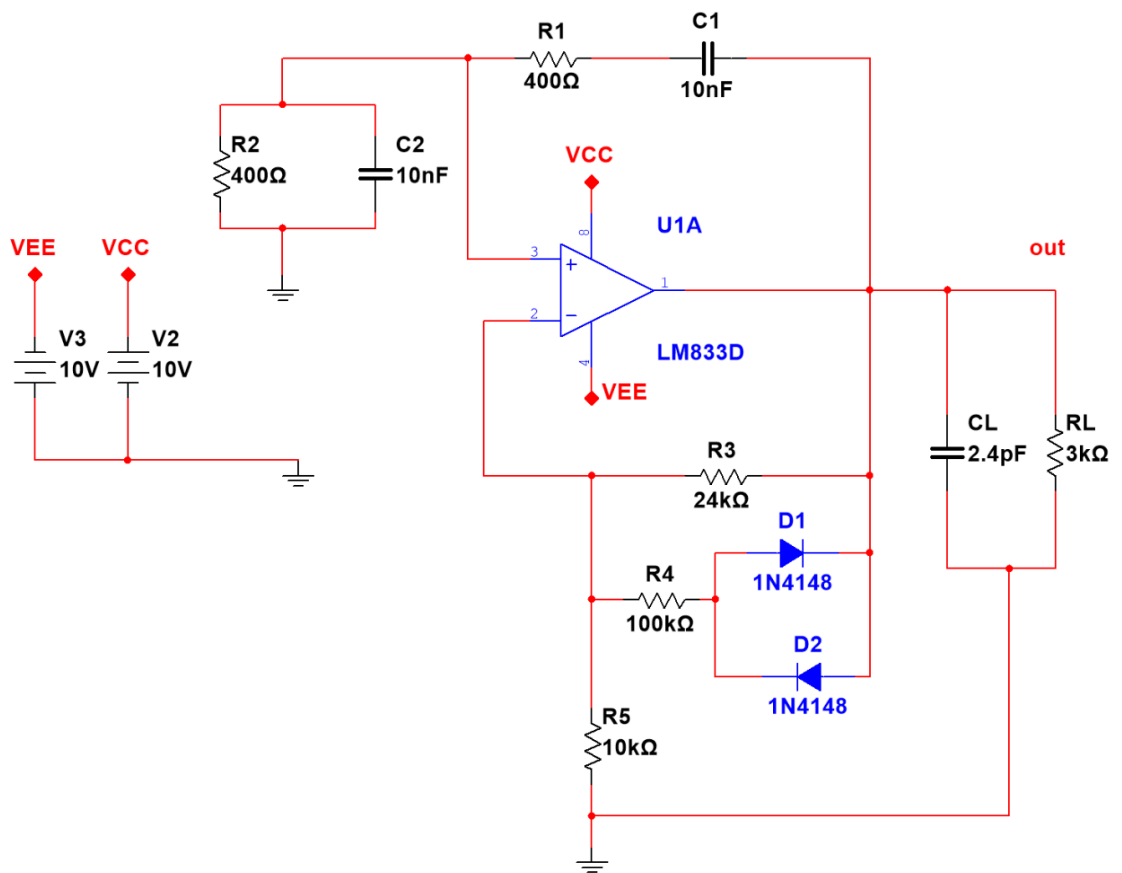
tämän perusteella RC ketjun komponentit mitoitettiin $C = 10 \text{ nF}$ ja $R = 400 \Omega$. Simuloinneissa havaittiin värähtelyn olevan pienemmällä taajuudella ja vastukset muutettiin $R = 375 \Omega$. Piirin aktiivisena komponenttina käytetään operaatiovahvistinta LM833D kompen-

soimaan piirin häviöt. Negatiivisella takaisinkytkennällä kontrolloidaan oskillaattorin ulostulon amplitudia. Tämä tehdään R_3 ja R_5 vastuksilla, jolloin piirin silmukkavahvistuksen maksimi taajuudella $f_o = 40$ kHz on

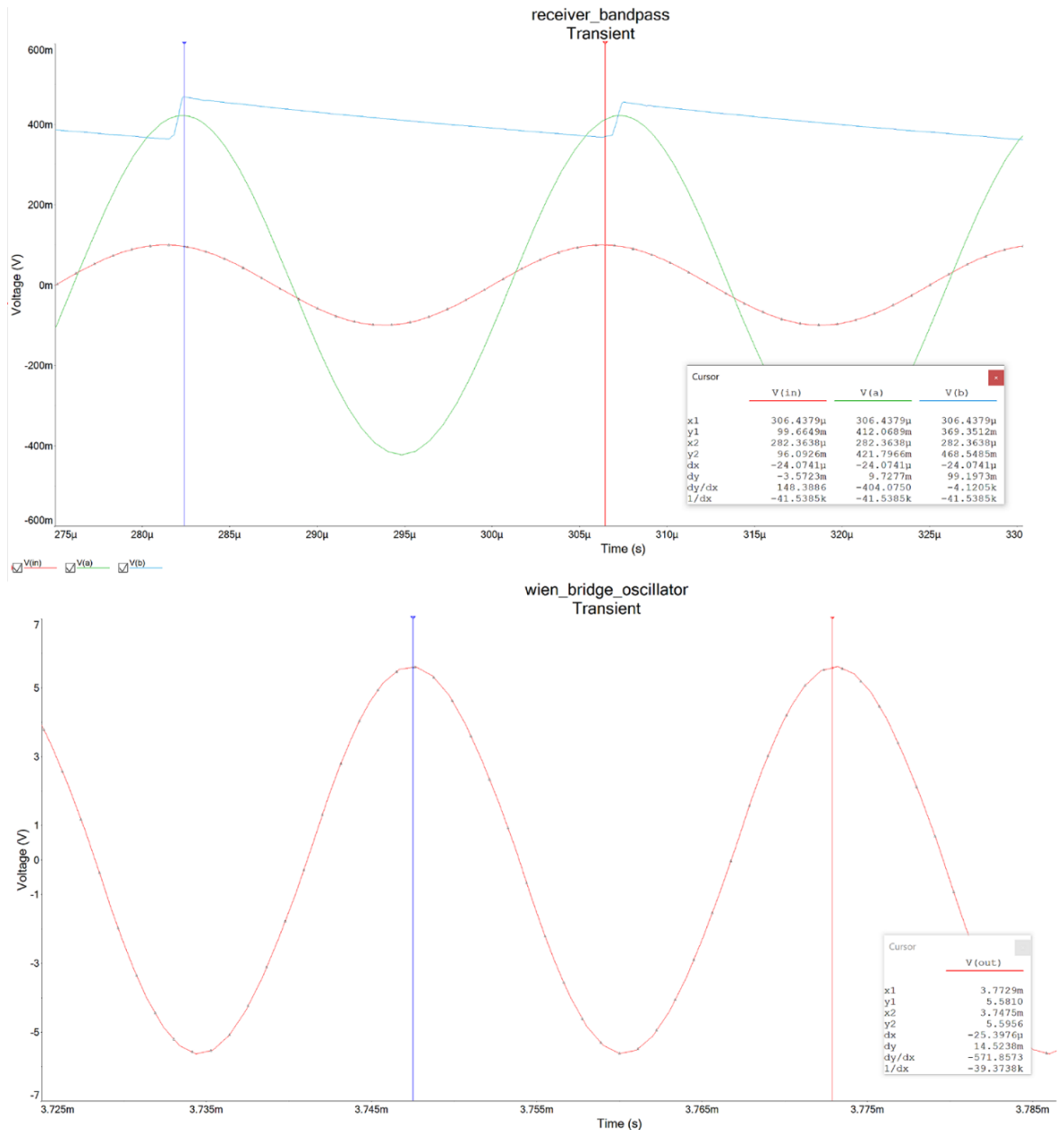
$$T(f_o) = \frac{1 + \frac{R_3}{R_5}}{3}, \quad (20)$$

jotta oskillaattori värähtelee, silmukkavahvistuksen tulee olla vähintään yksi. Tämä to-
teutetaan asettamalla R_3 ja R_5 suhde arvoon 2.4. Jos silmukkavahvistus on yli yhden ja
sitä ei rajoiteta, piiri on epästabiili ja se värähtelee kasvavalla amplitudilla. Piirin ulostulo
kuitenkin satureituu johonkin arvoon tässä piirissä operaatiovahvistimen ulostulojännit-
teen ääripäihin leikaten signaalin huippuja aiheuttaen säröytymistä. Operaatiovahvisti-
men ulostulon jännitteen ääripäät määräytyvät käytetyistä käyttöjännitteistä VCC ja VEE
ja ajettavasta kuormasta. Silmukkavahvistusta voidaan rajoittaa lisäämällä R_3 vastuksen
rinnalle R_4 diodien D_1 ja D_2 avulla. Diodit avautuvat suuremmilla ulostulosignaaleilla kyt-
kien R_4 vastuksen R_3 vastuksen rinnalle. Tällöin vahvistus laskee noin arvoon 1.9, tämä
arvio on määritetty pelkästään vastuksien R_3 ja R_4 avulla. Simuloinneilla saavutetaan
amplitudi 11 Vpp sinisignaali taajuudella noin 39.4 kHz, mikä nähdään kuvassa 11.
Kuormana käytetään 2.4 pF kondensaattoria ja 3 k Ω vastusta. Kondensaattorin arvo on
käytetyn muuntajan teknisistä tiedoista [22] ja vastuksen arvo arvioitu samankaltaisten

muuntajien sisääntuloimpedansseista [11], koska sen impedanssia ei ole teknisissä tiedoissa mainittu.



Kuva 10 Wien siltaoskillaattorin piirikaavio



Kuva 11 Ylhäällä olevassa kuvaajassa ilmaisimen simuloitujen aikatasojen tulokset, sisääntulo (punainen), suodattimen ulostulo (vihreä) ja huippuilmaisimen ulostulo (sininen). Alhaalla oskillaattorin ulostulo

4.2 Testipenkki ja mittaukset

Testipenkinä käytetään markkinoilla olevaa ultraäänisensoria HC-SR04, joka nähdään kuvassa 12. Sensorilla on neljä pinniä VCC, Trig, Echo ja Gnd pinnit. Käyttöjännite 5 V syötetään VCC pinniin ja maadoitetaan Gnd pinniin. Trig pinniin syötetään sensorin teknisistä tiedoista määritetty 10 us kestävä 3 V tai 5 V korkea pulssi, mihin sensori reagoi

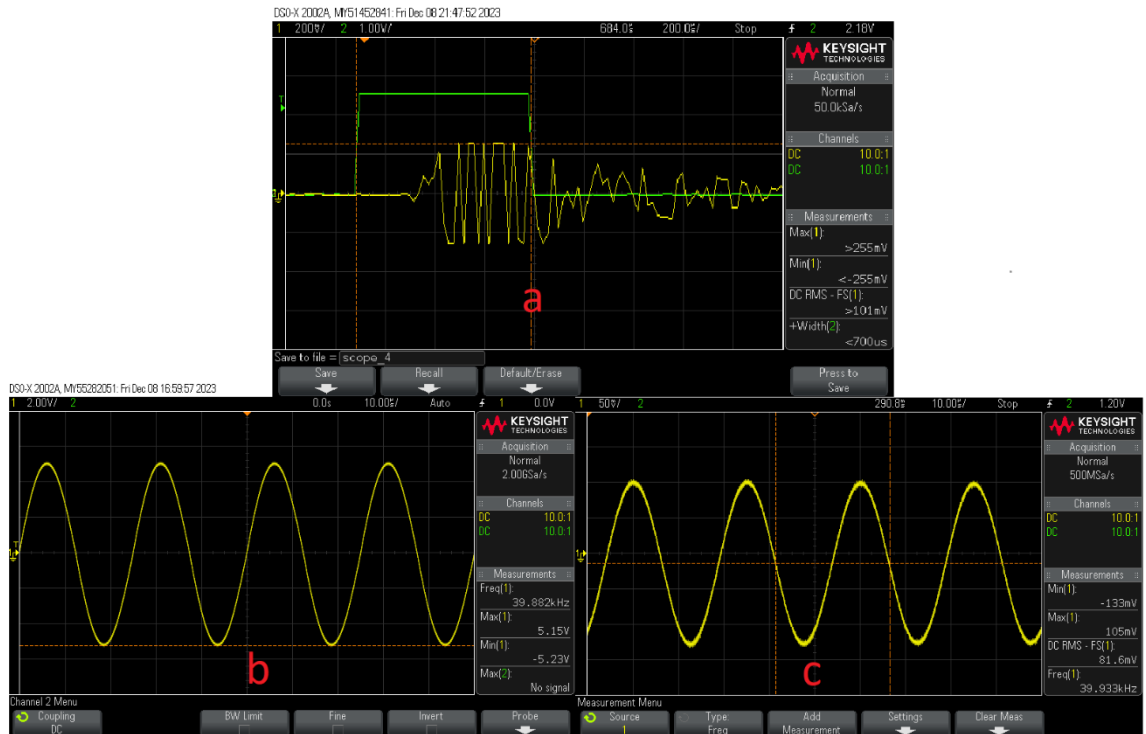
lähettämällä ultraääni impulssin. Echo pinni on sensorin ulostulo ja mittaa ultraääni impulssin lähetyksen paluun kestävän ajan. Ulostulo nousee VCC jännitteeseen, kun impulssi lähetetään ja laskee takaisin Gnd arvoon, kun impulssi on vastaanotettu heijastumisesta. Pulssin kesto kertoo heijastuneen esineen etäisyyden sensorista ToF periaatteella (18).



Kuva 12 HC-SR04 ulträänisensori [19]

Sensoria voidaan käyttää mikroprosessorin avulla, etenkin Arduino sovellusalustalle löytyy paljon materiaalia [23,24]. Tässä opinnäytetyössä sensoria ohjataan signaaligeneraattorilla ja ulostuloa mitataan oskilloskoopilla. Signaaligeneraattorilla tuotettiin 30 us pulssi, mitä toistettiin $f_x = 1$ Hz taajuudella. Pulssina käytettiin pitempää kestoä verrattuna 10 us signaaligeneraattorin ulostulon hitauden vuoksi. Rakennettu ilmaisimen asetettiin vastakkain sensoria vasten noin 13 cm etäisyydelle. Eli sensori ja ilmaisimen äänen muuntajat ovat kohtisuoraan vastakkain. Ilmaisimen takana on seinä, josta ultraääni heijastuu takaisin sensoriin. Näin ilmaisimen vastaanottaa sensorin lähettämän impulssin noin puolivälissä sensorin mittaamassa ajassa. Tätä käytetään mittauksessa mittaamalla vastaanottimen saatu signaali oskilloskoopilla ja vertaamalla sitä sensorin ulostuloon, mikä nähdään kuvassa 13 a). Kuvasta nähdään, että ilmaisimen vastaanottaa impulssin $V_{in} = 510$ mVpp, minkä alku on noin puolivälissä sensorin ulostulon pulssia. Impulssi kestää noin puolet sensorin ulostulon pulssin ajasta n. 350 us ja ilmaisimessa on selkeää "ringing" eli ylimääräistä värähtelyä impulssin jälkeen. Ilmaisimen valodiodin syttymistä kokeiltiin lähettämällä pulsseja eri taajuuksilla 1 Hz ja 10 Hz ja tarkastelemalla muuttuuko valodiodin vilkkuminen tämän tahtiin. Siis Trig pulssin lähetyksen taajuutta muutetaan, mutta itse lähetetty impulssi on edelleen 40 kHz taajuudella. Ilmaisimen valodiodi vilkkui selkeästi näiden eri taajuuksien mukaisesti ja kykeni havaitsemaan pulssit. Lähettimen toimintaa testattiin käyttämällä rakennettua ilmaisinta. Lähetin ja vastaanotin asetettiin samalla tavalla kuin aikaisemmin, muuntajat vastakkain, noin 20 cm etäisyydelle toisistaan. Kuvan 13 b) ja c) ovat lähettimen oskilloskooppi mittaustulokset. Vastaanotetussa signaalissa havaitaan kohinaa ja signaalin olevan selkeästi vaimentunut lähetetystä $V_s =$

10.4 Vpp ja $V_r = 240 \text{ mVpp}$, johtuen muuntajissa ja lähetysskanavassa tapahtuvasta vai-
mennuksesta ja kohinasta. Vastaanotetun signaalin taajuus on sama kuin lähetetty $f_o \approx$
39.9 kHz. Ilmaisim pystyi siis havaitsemaan lähetetyn signaalin.

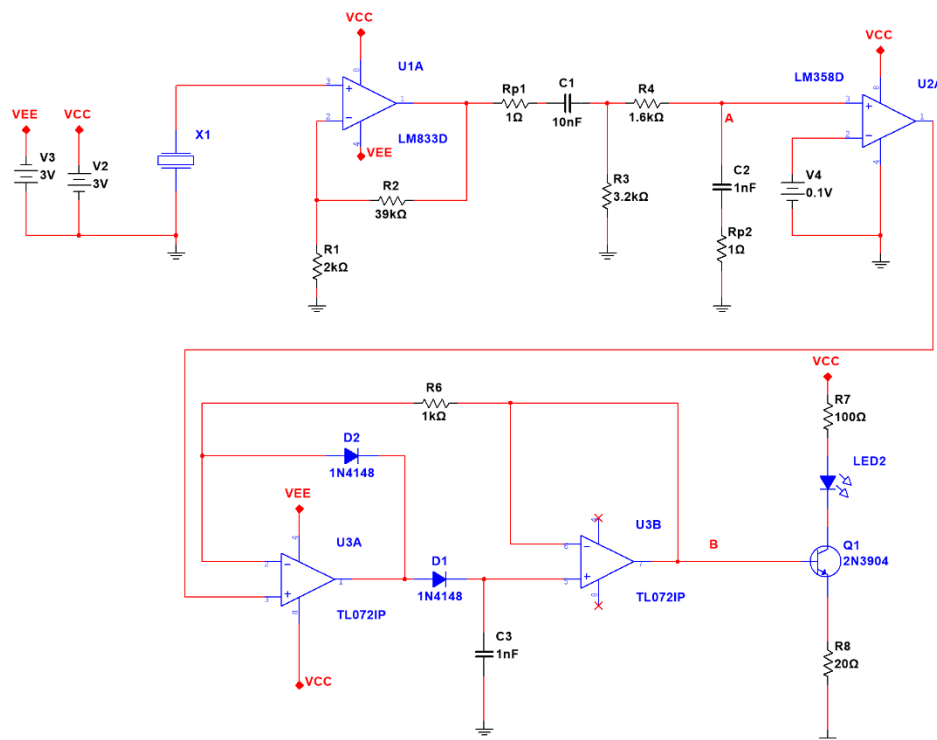


Kuva 13 Oskilloskooppi mittaustulokset: a) Sensorin Echo ulostulon (vihreä) ja ilmaisimen vastaanottama pulssi (keltainen), b) lähettimen oskillaattorin ulostulo $V_s = 10.4 \text{ Vpp}$ ja $f_o = 39.88 \text{ kHz}$, ja c) ilmaisimen vastaanottama signaali lähettimestä $V_r = 240 \text{ mVpp}$ ja $f_o = 39.93 \text{ kHz}$

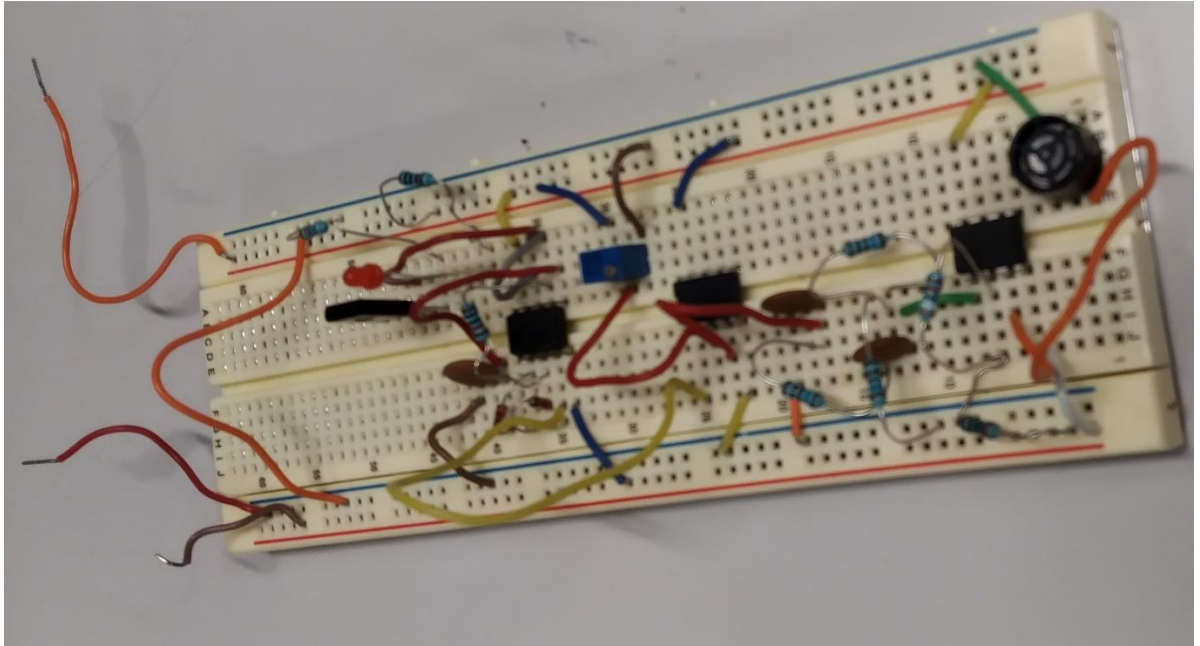
Suunniteltu ilmaisim ei toiminut suunnitellusti. Huippuilmaisimen ulostuloon aiheutui negatiivinen jännite, eikä vastannut simuloiteja. Tämä korjattiin siirtämällä komparaattori ennen huippuilmaisinta. Tämä muuttaa piirin käytöstä selkeästi, nyt huippuilmaisim säilyttää komparaattorin huipun arvon ja pidentää ledin päällä olo aikaa. Huippuilmaisimesta poistettiin myös R_5 vastus pidentämään varastoidun arvon pitoa. Verrattuna simulointiin komponenttien epäideaalisuudet purkavat C3 kondensaattorin varauksen nopeammin. Komparaattori vaati V_{in} olevan nelinkertainen verrattuna referenssijännitteeseen, jotta komparaattorin ulostulo alkoi kasvaa. Operaatiovahvistimen LM358 teknisistä tiedoista [25] "Overload recovery time" $t_{OR} = 10 \mu\text{s}$, mikä on aika, jossa vahvistin alkaa vahvistaa, kun ulostulo on saturoitunut jännitteen ääripäähän. Mittauksissa havaittiin samankaltainen viive, kun komparaattoria testattiin erillään. Tämä selittäisi komparaattorin vaativan suuremman V_{in} ja samalla pidemmän ajan, jolloin V_{in} on suurempi kuin referenssijännite. Tämä tulisi huomioida jo suunnitteluvaiheessa ja valita operaatiovahvistin, millä on lyhyt t_{OR} . Kaistanpäästösuodatin vaimensi signaalia huomattavasti enemmän verrattuna simuloituihin tuloksiin.

Tämä näkyy kuvan 16 a) ja b) oskilloskooppituloksissa, missä vahvistettu signaali $V_{LNA} = 2\text{ V}$ vaimentuu suodattimen jälkeen $V_{bp} = 0.43\text{ V}$. Kompensoimaan tätä LNA:n vahvistusta kasvatettiin selkeästi kasvattamalla R_2 vastusta. Parannuksena piiriin vastus R_2 olisi voinut olla säätövastus, mahdollistaen helpon vahvistuksen säädön. Nyt jos referenssinä käytetään 100 mV jännitettä ja sisään tuleva signaali on 200 mVpp komparaattori toimii lyhyen jakson, näkyy kuvassa 16 c) ja ledi syttyy päälle. Komparaattorin ulostulo ei kuitenkaan kasva tarpeeksi lähelle VCC tasoa, joten ledin kytkemän transistorin ja maan väliin laitetaan pienempi vastus R_8 ja vastus R_7 ledin ja VCC välille rajoittamaan virtaa. Käytetyssä koekytkentälevyissä havaittiin testien aikana kaksi oikosulua, mitkä harmillisesti osaltaan hankaloittivat piirin analysointia. Rakennetun ilmaisimen piirikaavio on kuvassa 14 ja itse rakennettu ultraääni-ilmaisimen kuvassa 15. Ilmaisimen toimii, mutta vielä on paljon kehitettävää.

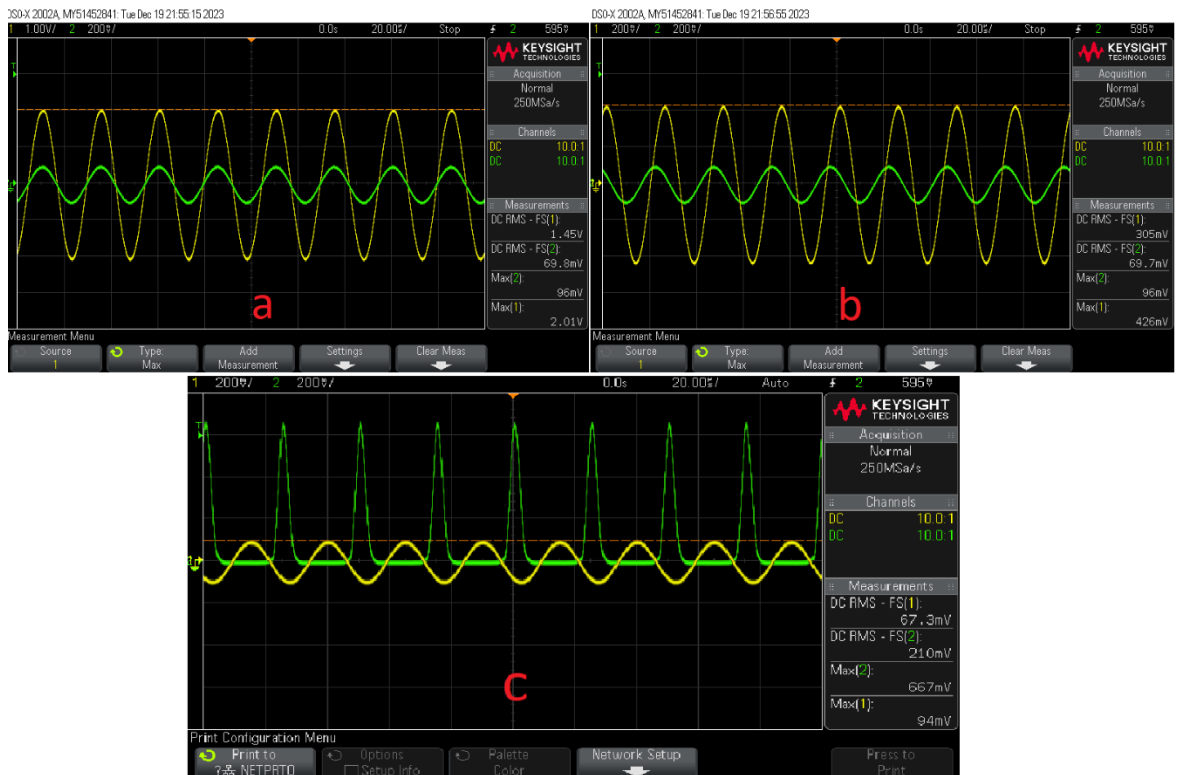
Lähettimen oskillaattori ei myöskään värähdellyt aluksi. Tämän vuoksi silmukavahvistusta kasvatettiin muuttamalla $R_3 = 25\text{ k}\Omega$, jolloin piiri alkoi värähdellä. Se värähteli korkeammalla taajuudella $f_o = 42\text{ kHz}$ verrattuna simuloituun ja suuremmalla amplitudilla $V_{out} = 11\text{ Vpp}$. Muuttamalla Positiivisen takaisinkytkennän $R_1 = R_2 = 400\ \Omega$ ja diodeilla kytkettävän vahvistusta rajoittavan vastuksen $R_4 = 100\text{ k}\Omega$ ulostuloon saatiin 40 kHz signaali amplitudilla 10 Vpp , tämä näkyy kuvassa 13 b). Lähettimen toteutus onnistui kokonaisuudessaan hyvin ja piiriin tehtiin pieniä muutoksia lähinnä komponenttien epäideaalisuuksien vuoksi.



Kuva 14 rakennetun ilmaisimen piirikaavio, kuvassa X1 kuvaa ultraääni muuntajaa



Kuva 15 rakennettu ultraääni-ilmaisin



Kuva 16 Oskilloskooppi mittaustulokset: a) sisääntulo (vihreä) $V_{in,max} = 96 \text{ mV}$ ja LNA ulostulo (keltainen) $V_{o,max} = 2.01 \text{ V}$, b) sisääntulo (vihreä) $V_{in,max} = 96 \text{ mV}$ ja kaistanpäästösuodattimen ulostulo (keltainen) $V_{o,max} = 426 \text{ mV}$, ja c) sisääntulo (keltainen) $V_{in,max} = 94 \text{ mV}$ ja komparaattorin ulostulo (vihreä) $V_{o,max} = 667 \text{ mV}$

5. YHTEENVETO

Tässä työssä tarkasteltiin markkinoilla olevia ultraäänilaitteita ja ultraääni-ilmaisimen rakennetta ja toteutusta. Aluksi tarkasteltiin ultraäänen muuntamista sähköiseksi signaaliksi eli ultraäänimuuntajia. Pietsosähköiseen ilmiöön perustuvat ultraäänimuuntajat ovat yleisimpiä. Ultraääni-ilmaisimen sähköistä suunnittelua varten muuntajan impedanssi ja herkkyys ovat tärkeitä tarkastella. Ultraäänen ominaisuuksia ja käyttökohteita tarkasteltiin ensiksi yleisesti, tavoitteena oli tarkastella ultraäänen soveltuvuutta verrattuna sähkömagneettiseen säteilyyn. Ultraäänen reagointi eri materiaaleihin ja moninkertaisesti hitaampi etenemisnopeus verrattuna sähkömagneettiseen säteilyyn mahdollistaa helpomman mittauksen ajan suhteen. Kirjallisuuskatsauksen materiaalista ja markkinoilla olevista tuotteista tuli myös esille, että vastaanottimia käytetään yleensä lähettimien kanssa, eikä pelkästään ilmaisimina. Esimerkiksi sensorit ja kuvauslaitteet perustuvat tähän. Ilmaisimia käytetään esimerkiksi lepakkojen havainnointiin.

Ultraääni vastaanottimen rakennetta ja sen eri lohkoja tarkasteltiin yleisesti ja Heterodyne periaatteeseen perustuvaa vastaanotinta tarkasteltiin tarkemmin. Vastaanottimen tarkastelu perustui pääosassa materiaaliin, mikä käsitteli sähkömagneettiseen säteilyyn perustuvia vastaanottimia. Näiden soveltuvuus perusteltiin vastaanottimien eroavaisuuden pääosin johtuvan muuntimista, eikä vastaanottimen sähköisestä piiristä. Muutama eroavaisuus kuitenkin otettiin esille. Ultraäänimuuntimilla on usein suuri Q-arvo vähentäen suodatuksen tarvetta muuntimen jälkeen. Ultraäänellä on myös vähemmän häiriöitä muilta kanavilta verrattuna sähkömagneettiseen säteilyyn, millä taajuuksia käytetään laajalti myös kommunikointiin. Ultraäänivastaanottimiin kohdistuvat mekaaniset iskut ja värähtelyt voivat kuitenkin häiritä enemmän verrattuna antenneihin pietsosähköisen ilmiön takia. Vastaanottimen suunnittelusta otettiin esille LNA, kaistanpäästösuodattimet, VGA ja lyhyesti mikserit ja oskillaattorit. Heterodyne periaatetta tarkasteltiin taajuusmuunnoksen kannalta ja sen käyttöä vastaanottimissa.

Kokeellisessa osiossa toteutettiin ultraääni-ilmaisimien ja -lähetin 40 kHz taajuudelle. Ultraääni-ilmaisimien vastaanottaa signaalin pietsosähköisellä muuntimella ja tarpeeksi voimakkaalla vastaanotetulla signaalilla punainen valodiodei kytkeytyi päälle ilmaisemaan ultraääntä. Suunniteltua piiriä muutettiin huomattavasti käytännön toteutuksessa huippuarvoilmaisimen aiheuttamista ongelmista. Kaistanpäästösuodatin aiheutti selkeästi suuremmat häviöt verrattuna simuloituihin tuloksiin ja komparaattori vaati selkeästi suuremman vastaanotetun signaalin, kuin mitä suunnitteluvaiheessa oli oletettu. Suodattimen häviöt pystytään kompensoimaan lisäämällä vahvistusta ja komparaattorin ero selittyi

pääosin "Overload recovery time" t_{OR} vuoksi, mitä simuloinnit eivät ota huomioon. Ilmaisimen saatiin kuitenkin toimimaan ja se kykeni ilmaisemaan ultraäänen 40 kHz taajuudella, vaikkakin vaati selkeästi vahvemman signaalin verrattuna simuloituihin tuloksiin. Ilmaisinta voisi kehittää lisäämällä ominaisuuksia. Esimerkiksi useampi taajuuskaista heterodyneperiaatteen avulla tai useampi valodiodeja ilmoittamaan vastaanotetun signaalin voimakkuutta.

Lähettimen toteutus onnistui käyttämällä Wien siltaoskillaattoria. Ilmaisimen toiminnan testaukseen tehtiin testipenkki, missä käytettiin HC-SR04 ultraäänisensoria. Testipenkki toimi oletetusti. Testipenkkiä voisi kehittää automatisoimalla se esimerkiksi Arduino sovellusympäristöllä. Ultraäänisensorin toimintaa olisi voinut tarkastella tarkemmin etenkin lähetetyn signaalin kannalta. Ilmaisimen ja lähettimen toteutukset ovat yksinkertaisia, mutta hyviä esimerkkejä.

6. LÄHTEET

- [1] H. Kuttruff, Ultrasonics Fundamentals and Applications, Springer Netherlands, E-kirja, hakuteos, 1991
- [2] Gallego-Juarez ja Graff, Power Ultrasonics, Elsevier Science & Technology, E-kirja, hakuteos, 2014
- [3] Eeva-Maria Tidenberg, Luomus, verkkosivu, 13.08.2019, Saatavissa: (viitattu 15.10.2023) [Suomessa tavatut lepakkolajit | LUOMUS](#)
- [4] Nakamura, K, Ultrasonic Transducers Materials and Design for Sensors, Actuators and Medical Applications, 1st edition, Cambridge, U.K. ; Woodhead Pub, Print, 2012
- [5] Cheeke, J. David N, Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves, 2nd ed, Boca Raton: CRC Press, E-kirja, hakuteos, 2012
- [6] K. S. Van Dyke, "The Piezo-Electric Resonator and Its Equivalent Network," in Proceedings of the Institute of Radio Engineers, vol. 16, no. 6, pp. 742-764, June 1928, doi: 10.1109/JRPROC.1928.221466.
- [7] Sun, Huaxi, Design of front-end receiver for low noise ultrasound imaging system, Nanyang Technological University, Singapore, Maisterin työ, 2017
- [8] Akeem Whitehead, Ultrasonic sensing overview, Texas Instruments, youtube video, Saatavissa: (viitattu 21.11.2023) <https://www.youtube.com/watch?v=AXDf7itcpd0&list=PLo2Nosz1Sd4fAxGNJUQdS97o17dC9GSI0&index=1>
- [9] H2KA500KB1CD00, tekniset tiedot, saatavilla: (viitattu 21.11.2023) <https://www.digikey.fi/fi/products/detail/unictron-technologies-corporation/H2KA500KB1CD00/19188534?s=N4lgjCBcpgzAnFUB-jKAzAhgGwM4FMAaEAeygG0QAmWANhvgHYQBdlgBwBcoQ-BIDgJwCWAOWdmlAL5SgA>

- [10] CUSA-TR80-065-2000-TH68, tekniset tiedot, saatavissa: (viitattu 21.11.2023) <https://www.digikey.fi/fi/products/detail/cui-devices/CUSA-TR80-065-2000-TH68/16579210>
- [11] CUSP-TR80-15-2500-TH, tekniset tiedot, saatavissa: (viitattu 21.11.2023) <https://www.digikey.fi/fi/products/detail/cui-devices/CUSP-TR80-15-2500-TH/13687408>
- [12] US0078-000, tekniset tiedot, saatavissa: (viitattu 21.11.2023) <https://www.digikey.fi/fi/products/detail/audiowell-international-llc/US0078-000/20379712>
- [13] Batabox baton, Taajuus jakamiseen perustuva lepakkodetektor, batmanagement, verkkosivu, Saatavissa: (viitattu 21.11.2023) <https://batmanagement.com/collections/bat-detector-buyers-guide-active-detectors/products/bat-box-baton>
- [14] Pettersson M500 Microphone ,A/D muunnos lepakkodetektor, batmanagement, verkkosivu, Saatavissa: (viitattu 21.11.2023) <https://batmanagement.com/collections/bat-detector-buyers-guide-active-detectors/products/pettersson-m500-microphone>
- [15] Elekon BATSCANNER, Heterodyne periaate lepakkodetektor, batmanagement, verkkosivu, Saatavissa: (viitattu 21.11.2023) <https://batmanagement.com/collections/bat-detector-buyers-guide-active-detectors/products/elekon-batscanner>
- [16] Poole, Ian, Superheterodyne Receiver Block Diagram, electronicsnotes, verkkosivu, Saatavissa: (viitattu 21.2.2024) <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/superheterodyne-receiver/block-diagram.php>
- [17] Razavi, Behzad, RF Microelectronics, 2nd ed, Prentice Hall, Print, 2012
- [18] Franco, Sergio, Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits, 4th ed. Boston (MA): McGraw-Hill, Print, 2015
- [19] Ultraäänisensori HC-SR04, tekniset tiedot, saatavissa: (viitattu 22.12.2023) [3942 Adafruit Industries LLC | Anturit, muuntimet | DigiKey](https://www.digikey.com/en/products/detail/adafruit-industries-llc/3942)
- [20] Operaatiovahvistin LM833D, tekniset tiedot, saatavissa: (viitattu 22.12.2023) [LM833 Dual High-Speed Audio Operational Amplifier datasheet \(Rev. B\)](https://www.ti.com/lit/ds/lm833)

- [21] Williams, Arthur B, Analog Filter and Circuit Design Handbook, 1st ed, New York: McGraw-Hill Education, 2014, saatavissa: <https://www-accessengineer-inglibrary-com.libproxy.tuni.fi/content/book/9780071816717>
- [22] CUSA-T80-18-2400-TH, tekniset tiedot, saatavissa: (viitattu 07.01.2024) <https://www.digikey.fi/fi/products/detail/cui-devices/CUSA-T80-18-2400-TH/13687409>
- [23] How HC-SR04 Ultrasonic Sensor Works & Interface It With Arduino, Last-minuteengineers, verkkosivu, Saatavissa: (viitattu 15.01.2024) <https://last-minuteengineers.com/arduino-sr04-ultrasonic-sensor-tutorial/>
- [24] Nedelkovski, Dejan, Ultrasonic Sensor HC-SR04 and Arduino – Complete Guide, howtomechatronics, verkkosivu, 13.08.2019, Saatavissa: (viitattu 15.01.2024) <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/ultrasonic-sensor-hc-sr04/>
- [25] Operaatiovahvistin LM358B, tekniset tiedot, saatavissa: (viitattu 11.01.2024) <https://www.ti.com/lit/gpn/lm358>