Poju Antsalo

KOTELOIDUN KAIUTTIMEN VIBROAKUSTISET MITTAUKSET

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomiinsinöörin tutkintoa varten Espoossa 28.1.1999.

Työn valvoja: Professori Matti Karjalainen.

Tekijä	Poiu Antsalo		
Tvön nimi	Koteloidun kaiuttimen vibroakustiset mittaukset		
Päivämäärä	28 1 1999		
Sivumäärä	103		
Osasto	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto		
Professuuri	Akustiikka ja äänenkäsittelytekniikka, koodi S-89		
Työn valvoja	Professori Matti Karjalainen		
Tämä diplomityö käsittelee vibroakustisia mittauksia, jotka on tehty Teknillisen korkeakoulun Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratoriossa. Tilavuudeltaan 60 litraista suljettua kaiutinkoteloa mitattiin, jotta tuloksia voitiin verrata muualla elementtimenetelmin tehtyihin numeerisiin simulaatioihin kotelosta. Kaiutinkotelo oli valmistettu MDF-levystä, jonka paksuus oli 19 mm. Kotelo oli melko hutera koska minkäänlaisia sisäisiä tukirimoja ei asennettu. Kahta eri etulevyä käytämällä kaiutinelementti voitiin asentaa kahteen eri kohtaan kotelossa. Kotelon sisällä vaimennukseen käytetyn lasivillan akustisia ominaisuuksia tutkittiin impedanssiputkessa. Myös kaiutinelementin ja MDF-levyn akustista impedanssia yritettiin mitata, mutta heikolla			
Suorakulmaisen särmiön muotoisen kotelon sisämitat olivat: 600 mm, 400 mm ja 250 mm. Sekä sisä- että ulkoäänikenttää mitattiin. Kotelo mitattiin vapaasti seisovana, hiekkaan haudattuna, tyhjänä ja lasivillalla vaimennettuna. Mittausmenetelmiin sisältyi 90 pientä elekrettimikrofonia käsittävä mittahila, joka oli kooltaan juuri kaiutinkoteloon sopiva. Asettamalla mikrofonihila eri korkeuksille koteloon, voidaan äänikenttä mitata kolmiulotteisen suorakulmaisen hilan solmupisteissä, joiden välinen etäisyys on 40 mm. Kaiuttimen synnyttämää "kaukokenttää" mitattiin eri suunnista etäisyydeltä 1 m. Kaiutinkotelon mekaanista värähtelyä tutkittiin laservibrometrin ja kiihtyvyysantureiden avulla. Kaiutinkartion pinnan nopeutta mitattiin käyttäen laservibrometriä.			
Mittausdatan keruu perustui QuickSig signaalinkäsittely-ympäristöön, joka on kehitetty Teknillisen korkeakoulun Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratoriossa. Herätesignaaleina impulssivastemittauksissa käytettiin <i>Random phase flat spectrum</i> (RPFS) and <i>Schoeder-sekvenssiä</i> näytteenottotaajuuksien ollessa 22050 ja 44100 Hz.			
Lasivillan ja kaiutinelementin akustisia ominaisuuksia tutkittiin impedanssiputkella. Käytetty putki oli pituudeltaan lähes 9 m ja sen poikkileikkaus on neliö sivun pituuden ollessa 250 mm. Myös kehittyneempiä, ikkunointiin perustuvia menetelmiä käytettiin yllä selostetun QuickSigin avulla.			
Kaikkia äänikenttämittauksia voidaan pitää varsin tarkkoina. Laservibrometrimittauksia on syytä pitää hieman epätarkempina. Luotettavuudeltaan heikoimpia ovat ilman muuta mittaukset impedanssiputkella johtuen siitä, että haluttiin tutkia rutiinikäytössä niistä poikkeavia menetelmiä. Vain lasivillan mittaustulokset ovat luotettavia.			
Avainsanat	akustiset mittaukset impedanssiputki impulssivasteen mittaus		
, vanounat	kaiutin, kiihtyvyysanturi, laservibrometri, mikrofonihila, vibroakustiikka		

Author	Poju Anteolo		
Name of the Thesis	Vibroacoustical measurements of a loudspeaker box		
Date	28.1.1999		
Number of pages	103		
Faculty	Department of Electrical and Communications Engineering		
Professorship	S-89 Acoustics and audio signal processing		
Supervisor	Professor Matti Karjalainen		
This thesis handles various vibroacoustical measurements that have been carried out in the Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, Helsinki University of Technology. A specific closed loudspeaker box of 60 litres was measured in order to compare the results with numerical simulations done elsewhere using element methods. Material of the wall plates was MDF (medium density fiberboard) with thickness of 19 mm. There were no supporting structures inside the loudspeaker box. Thus, it was rather slender. Two different positions of the speaker element (driver) in the front plate were used. Acoustical properties of the damping wool used inside the loudspeaker box were measured in an impedance tube. The speaker element itself and a piece of MDF plate were also studied in the tube, with a limited success though.			
The inner dimensions of the rectangular loudspeaker cabinet were: 600 mm, 400 mm and 250 mm. The sound field inside and outside the loudspeaker box was examined. The enclosure conditions were varied from rigidly supported wall to a free-standing box with or without some damping material (wool) inside. Measuring facilities included a microphone mesh of 90 small electret capsules. The mesh dimensions matched precisely inside the loudpeaker box. By placing the mesh on different altitudes it was possible to obtain a huge amount of impulse responsies in the nodes of a three-dimensional rectangular grid with a spacing of 40 mm. Also some "far field" measurements were carried out from different directions using a distance of 1 m. Mechanical vibrations of the box were studied using a laser vibrometer and accelerometers. Surface velocity of the driver cone used was also measured using a laser vibrometer.			
The data acquisition system was based on the QuickSig signal processing enviroment delevoped in the Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, Helsinki University of Technology. <i>Random phase flat spectrum</i> (RPFS) and <i>Schoeder-sequence</i> excitation signals at a sampling rates of 22050 and 44100 Hz were used to carry out the impulse response measurements.			
Acoustical properties of wool and a speaker element were studied carrying out standing wave tube measurements. The used tube was nearly 9 m long and had a rectangular diameter of 250 mm. More sophisticated windowing methods with the data acquisition system described above were also used.			
All soundfield and accelerometer measurements can be considered to be quite accurate. Measurements carried out using laservibrometer must be regarded less accurate. Least precise are unquestionably the impedance tube measurements. Only the wool results are somewhat reliable.			
Keywords	accelerometer, acoustical measurements, impedance tube,		
	impulse response measurement, laser vibrometer, loudspeaker, microphone mesh, vibroacoustics		

ALKULAUSE

Tämä opinnäytetyö, joka valmistui Teknillisessä korkeakoulussa 28.1.1999, dokumentoi Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratoriossa tehtyjä vibroakustisia mittauksia. Pienten akustisten tilojen simulointiprojekti (PATS), jonka puitteissa tämä diplomityö on syntynyt, oli ollut käynnissä jo kaksi vuotta aloittaessani työni Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratoriossa 18.2.1998. Sain tehtäväkseni jatkaa tutkija Panu Maijalan tekemiä vibroakustisia mittauksia, ja kirjoittaa niistä tämä opinnäytetyö. Allekirjoittanut haluaa kiittää Panu Maijalaa laajasta opastuksesta työn alkuvaiheessa, ja runsaasta avunannosta työhön liittyvissä asioissa työn edetessä.

Erityisesti haluan kiittää diplomityöni valvojana ja ohjaajana toiminutta professori Matti Karjalaista, joka lukuisten muiden työtehtävien lomassa antoi erityisen tarkkaa ja rakentavaa palautetta diplomityöstäni kirjoituksen aikana.

Erilaisten mittausjärjestelyjen rakentamisessa saatiin ratkaisevaa apua laboratoriomestari Jari Saronsalolta, jota allekirjoittanut haluaa kiittää tarkasta ja nopeasta mittausrekvisiitan järjestämisestä. Haluan kiittää myös sihteeri Lea Södermania työntekoon liittyvien asioiden hoidosta ja koko Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorion henkilökuntaa erinomaisen työilmapiirin luomisesta. Kiitän myös kaikkia PATS-projektissa mukana olleita, erityisesti Kaarina Melkasta laservibrometrin toimittamisesta käyttööni.

Lopuksi haluan kiittää vanhempiani Sirja ja Rainer Antsaloa sekä Agnes Antsaloa kaikesta siitä tuesta, jonka olen heiltä saanut.

Helsingissä 28.1.1999

Poju Antsalo

SISÄLLYSLUETTELO

ETUSIVU	i
Diplomityön tiivistelmä	ii
ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	iii
ALKULAUSE	iv
Sisällysluettelo	\mathbf{v}
LISTA KÄYTETYISTÄ SYMBOLEISTA	viii
Lyhenteet	x

1	Јон	HDANTO	1
2	KO	TELOITU KAIUTIN	2
	2.1	Johdanto	2
	2.2	Kotelotyypit	2
		2.2.1 Suljettu kotelo	
		2.2.2 Refleksikotelo	
		2.2.3 Kaistanpäästökotelo	4
		2.2.4 Transmissiolinjakotelo	4
	2.3	Sijaiskytkennät	4
		2.3.1 Suljetun kotelon sijaiskytkentä	7
		2.3.2 Refleksikotelon sijaiskytkentä	9
	2.4	Koteloitu kaiutin vibroakustisena järjestelmänä	10
3	MI	TTAUSMETODIIKKA	12
	3.1	Johdanto	12
	3.2	Järjestelmän Impulssivaste	12
	3.3	Taajuusvastefunktio	13
	3.4	Heräsionaaleista	15
	0.11	3.4.1 Impulssi	15
		3.4.2 MI S-sekvenssi	
		3.4.3 RPFS-sekvenssi	
		3.4.4 Schroeder-sekvenssi	

	3.5	Äänikenttämittaukset	19
		3.5.1 Kondensaattorimikrofoni	19
		3.5.2 Elektrettimikrofoni	20
	3.6	Vibroakustiset mittaukset	21
		3.6.1 Kiihtyvysanturit	21
	27	3.0.2 Laservibrometri	22
	3.7	271 Dethinittaukset	24
		3.7.2 Seisovan aallon putki heijastuskerroin ja akustinen impedanssi	24 25
		3.7.3 Ikkunointimenetelmä	23
	3.8	QuickSig	27
4	MAT	TERIAALIMITTAUKSET IMPEDANSSIPUTKELLA	28
	4.1	Johdanto	28
	4.2	Teknillisen korkeakoulun seisovan aallon putki ja mittausjärjestely	28
	4.3	Lasikuituvillan putkimittaukset	30
	4.4	Kaiutinelementin putkimittaukset	37
	4.5	Kommentteja tehdyistä mittauksista	41
-	17		40
5	KAI	UTINKOTELON MITTAUKSET	42
	5.1	Kotelomittausten tarkoitus	42
	5.2	Mitatun kotelon rakenne	42
	5.3	Mittausmenetelmät	44
	5.4	Mittausjärjestelmän kuvaus	47
	5.5	Mittalaitteiden asetukset	48
	5.6	Raakadata	48
	5.7	Käsitelty data (kompensointi)	49
	5.8	Kompensointi (toteutus)	50
	5.9	Kompensoitujen vasteiden systemaattiset tiedostonimet	54
	5.10	Kompensoidut mittaukset	56
	5.11	Kaukokenttämittaukset	57
		5.11.1 Mittausjärjestely	57
		5.11.2 Mittauslaitteiden asetukset	58
		5.11.3 Raakavasteet	58
	5.12	Tulkintaa	60
6	VÄR	ÄHTELYN ETENEMINEN MEKAANISESTI	65
5	6.1	Mittausten tarkoitus	65
	6.2	Koejärjestelv	05
	6.2	Mittauskalusto	05
	6.4	Mittalaitteiden asetukset	دں ۸۸
	0.4 6 5	Tob dyst mittaulroot	00
	0.5	Verna energiati	00
	0.0	Nompensointi	6/
	6./	Mittaustulosten analysointi	69

7	KA	KAIUTINKARTION MITTAUKSET	
	7.1	Johdanto	77
	7.2	Koejärjestely	
	7.3	Mittauskalusto	
	7.4	Mittalaitteiden asetukset	
	7.5	Tehdyt mittaukset	
	7.6	Mittaustulosten analysointi	
		7.6.1 Kartio	
		7.6.2 Kiinnityslaippa	
	7.7	Kompensoidut äänikenttävasteet	
8	YH	TEENVETO	88

LÄHTEET JA VIITTAUKSET

90

LISTA KÄYTETYISTÄ SYMBOLEISTA

a	refleksiputken poikkipinta-ala, laserin säteilemä kenttä		
A, B, C, D, E ja F	kaiutinkotelon seinämät		
$A_{\rm d}$	kaiutinkartion ekvivalenttinen säteilypinta-ala		
В	magneettivuon tiheys		
$B\ell$	voimakerroin		
С	äänennopeus (≈345 m/s)		
С	kondensaattori		
С	kapasitanssi		
CF	huippukerroin "crest factor"		
d(f)	ajallinen viive taajuuden funktiona.		
D	pyöreän seisovan aallon putken halkaisija		
е	jännite		
fo	ylärajataajuus		
fmnp	suorakulmaisen tilan mooditaajuudet		
fв	Bragg-cell modulaattorin taajuus		
<i>f</i> D	Doppler-taajuus		
fн	Helmholtz-resonanssitaajuus		
fs	näytetaajuus		
D f	taajuusresoluutio		
Ě	voima		
F{}	Fourier-muunnos		
F -1{}	käänteis-Fourier-muunos		
h(t)	impulssivaste		
$H(f), H_{ m R}(f), H_{ m I}(f)$	taajuusvastefunktio, reaali- ja imaginääriosa		
i	sähkövirta		
Ι	intensiteetti		
k	aaltoluku, indeksi, vakio		
l _{eff}	refleksiputken efektiivinen pituus		
L	seisovan aallon putken pituus, induktanssi		
M , $M_{ m FF}$, $M_{ m p}$	herkkyys, vapaakenttäherkkyys, paineherkkyys		
n	indeksi		
N	lukumäärä		
9	tilavuusnopeus		
\mathcal{Q}	hyvyysluku		
Þ	kokonaisäänikentän paine		
p_0	tasoaallon (paine)amplitudi		
p1	ensimmäisen asteen polynomi		
p ₃	kolmannen asteen polynomi		

<i>p</i> ₁	etenevän ääniaallon paine putkessa		
$p_{ m max}$, $p_{ m max}$	seisovan aallon painemaksimi/minimi		
<i>p</i> _r	palaavan ääniaallon paine putkessa		
r	refleksiputken säde		
<i>r</i> , <i>r</i> ′	heijastuskerroin		
R	resistanssi		
S	seisovan aallon suhde		
t	aika		
T	impulssivasteen ajallinen pituus		
T(s)	siirtofunktio		
$T_{\mathrm{A}}(f)$	päätevahvistimen siirtofunktio		
T _B(f)	kaiutinelementin siirtofunktio		
$T_{\mathrm{K}}(f)$	kaiutinkotelon siirtofunktio		
$T_{\mathrm{K},k}(f)$	kaiutinkotelon siirtofunktio		
\mathcal{U}_1	etenevän ääniaallon hiukkasnopeus putkessa		
\mathcal{U}_{r}	palaavan ääniaallon hiukkasnopeus putkessa		
V kotelon tilavuus, jännite			
V (<i>f</i>) herätesignaalin spektri			
<i>w(t)</i> ikkunointifunktio			
W seisovan aallon putken leveys			
x koordinaatti			
\mathcal{X}_{\max}	painemaksimin etäisyys mitattavasta materiaalista		
$\chi_{\min(n)}$	n:nnen paineminimin etäisyys mitattavasta materiaalista		
У Х	koordinaatti		
$y(t), y_n$	impulssivaste (jatkuva, diskreetti)		
$Y(f), Y_k(kDf)$	mitattavan signaalin spektri (jatkuva, diskreetti)		
$\chi(t), \chi_n$	impulssivaste (jatkuva, diskreetti)		
$\mathbf{Z}(f), \mathbf{Z}_k(k\mathbf{D}f)$	kaiutinkartiosta mitattu spekti (jatkuva, diskreetti)		
Z(x)	kokonaisäänikentän akustinen impedanssi		
Z	impedanssi		
Z_0	ilman karakteristinen impedanssi (≈407 kg/m²s)		
а	vaihekulma		
δ	impulssi		
e	energiasuhde		
f_{1}, f_{1}, f_{n}	vaihekulma		
j	vaihekulma		
1	aallonpituus		
q	vaihekulma		
r_0	ilman tihevs (=1.18 kg/m ³)		
S	Laplace-muuttuian s reaaliosa (vaimennusosa)		
W	kulmataaiuus $(=2nt)$		
VV	$(-2\mathbf{P})$		

LYHENTEET

BEM	Boundary Element Method	
CLOS	Common Lisp Object System	
FDTD	Finite Difference Time Domain	
FEM	Finite Element Method	
FFT	Fast Fourier Transformation	
IFFT	Inverse Fast Fourier Transformation	
LPC	Linear Prediction Coding	
LPFS	Low Peak Factor Signal	
MDF	Medium Density Fiberboard	
MLS	Maximum Length Sequence	
PATS	Pienten Akustisten Tilojen Simulointiprojekti	
RF	Radio Frequency	
RPFS	Random Phase Flat Spectrum	
TKK	Teknillinen korkeakoulu	

Luku 1

JOHDANTO

Vuonna 1996 käynnistyi Helsingin Teknillisen korkeakoulun Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorion, Tampereen teknillisen korkeakoulun Matematiikan laitoksen/Hypermedialaboratorion, Nokia Oy:n, Genelec Oy:n ja Gradient Oy:n muodostama TEKES-hanke "Pienten Akustisten Tilojen Simulointi" (PATS). Projektin tavoitteena on ollut oppia mallintamaan "pieniä akustisia tiloja" (esimerkiksi kaiutinkoteloita) matemaattisesti tietokoneohjelmistoilla. Fysikaalisista syistä johtuen projektissa rajoituttiin tarkastelemaan taajuusaluetta 100-2000 Hz. Mallinnuksen tarkkuus selviää vertaamalla laskennallisia tuloksia akustisiin mittauksiin, jotka tehdään mallin mukaiselle oikealle kaiuttimelle. Tässä diplomityössä raportoidaan juuri näitä kaiutinkotelolle tehtyjä akustisia mittauksia.

Koteloitua kaiutinta käsitellään luvussa 2. PATS-projektissa tutkimuksen tavoitteena on ollut hahmottaa kaiutin vibroakustisena kokonaisuutena, ottaen huomioon sisäisen ja ulkoisen äänikentän lisäksi myös kotelon mekaaniset värähtelyt sekä niiden väliset kytkennät unohtamatta vaimennusmateriaalin ja kaiutinelementin mallinnusta. Tarvitaan siis erityyppisiä mittausmenetelmiä, joita selostetaan lähemmin luvussa 3.

Äänikentät kaiutinkotelon sisä- ja ulkopuolella vaativat omat mittausmenetelmänsä. Näitä mittauksia selostetaan luvussa 5. Kaiutinkartion lähikenttämittaukset taas kuvataan luvussa 7.

Kotelon seinämien mekaanista värähtelyä ja värähtelyn etenemistä tutkittiin kiihtyvyysanturilla. Mittaukset on selostettu luvussa 6. Myös kaiutinkartion värähtelyä mitattiin. Tällöin käytettiin laservibrometriä. Näitä mittauksia selvitetään kartion lähikenttämittauksien kanssa luvussa 7.

Lasikuituvillan materiaaliparametrejä selvitettiin seisovan aallon putkessa. Luku 4 käsittelee näitä mittauksia.

Tutkimuksen tavoitteena ei ollut niinkään maksimaalinen mittaustarkkuus vaan pikemminkin kattavan kokonaiskuvan muodostaminen mittausten ja mallinnuksen kohteena olevasta kaiuttimesta. Osa suoritetuista mittauksista on luonteeltaan hyvin kokeilevia, jolloin myös tarkkuudesta on jouduttu tinkimään. Sensijaan yksinkertaiset perusmittaukset ovat käyttötarkoituksen kannalta hyvinkin tarkkoja.

Luku 2

KOTELOITU KAIUTIN

2.1. Johdanto

Yleisin ja tärkein kaiutintyyppi on dynaaminen kaiutin (katso kuva 2.1). Siinä vahvistimen syöttämä sähkövirta saa puhekelan liikkumaan sopivan muotoisen kestomagneetin muodostamassa magneettikentässä. Puhekela on kiinnitetty ääntä säteilevään kartioon, joka on kiinnitetty yleensä kumista valmistetulla joustavalla reunuksella elementin reunaan (kiinnityslaippaan). Tarkoituksenmukaisuussyistä dynaamiset kaiutinelementit lähes aina asennetaan jonkinlaiseen koteloon. Tärkein koteloimista puoltava *akustinen* seikka on se, että vapaana olevan elementin kyky toistaa pieniä taajuuksia on akustisen oikosulun vuoksi erittäin huono. Kotelo parantaa elementin akustista kuormitusta ja ehkäisee akustista oikosulkua, jolloin nimenomaan pienillä taajuuksilla saavutetaan parempi hyötysuhde. Aluksi käydään läpi eri kotelotyyppejä eksoottisimpia "viritelmiä" lukuunottamatta (kappale 2.2). Tämän jälkeen käydään läpi teoreettisemmin kaiuttimen toimintaa ja esitetään sijaiskytkennät suljetulle ja refleksiviritetylle kotelolle, kun kotelo oletetaan äärettömän jäykäksi ja kaiutinkartio mäntälähteeksi (kappale 2.3). Lopuksi pohditaan koteloitua kaiutinta vibroakustisena järjestelmänä (kappale 2.4).



Kuva 2.1. Dynaaminen kaiutin(elementti).

2.2. Kotelotyypit

Eniten käytetyt kotelotyypit (Toivanen, 1976) ovat suljettu kotelo ja refleksikotelo (kts. kuva 2.2). Muita konstruktioita ovat avoin kotelo, kaiutinlevy, transmissiolinjakotelo sekä monenlaiset bandpass-tyyppiset konstruktiot. Kaikilla rakenteilla on hyvät ja huonot puolensa. Käyttötarkoitus ja kaiutinelementti määräävät kulloinkin, mikä rakenne on toimivin.



Kuva 2.2. Kaiutinkotelotyyppejä. Vasemmalta: suljettu kotelo, bassorefleksiviritteinen kotelo, kaistanpäästökotelo ja transmissiolinjakotelo.

2.2.1. Suljettu kotelo (Small, 1972)

Suljettu kotelo eristää akustisesti kaiutinkartion etu- ja takapinnan synnyttämän painevaihtelun estäen pienillä taajuuksilla akustisen oikosulun. Kaiutinkotelo ja kaiutinelementti muodostavat mekaanisen massa-jousisysteemin, jolla on määrätty resonanssitaajuus. Suljetussa kotelossa kaiutinelementin liikepoikkeama (ja samalla myös harmoninen särö) pysyy yleensä kohtuullisena pienilläkin taajuuksilla. Vaihetoisto pienillä taajuuksilla on oikein suunniteltuna hyvä. Bassotoisto ei kuitenkaan ole erityisen voimakas. Bassovaste laskee 12 dB oktaavia kohden.

2.2.2. Refleksikotelo (Small, 1973)

Tekemällä suljettuun koteloon reikä, tai kuten yleensä, asentamalla siihen putki, voidaan itse *kotelo* virittää tietylle taajuudelle. Tällöin kotelo toimii Helmholtz-resonaattorina (Rossing, 1989). Viritys riippuu reiän tai putken dimensioista ja kotelon sisätilavuudesta. Putken tai reiän poikkipinta-alan ollessa *a* (yksikkö m²), kotelon tilavuuden ollessa V (m³) ja putken efektiivisen pituuden ollessa l_{eff} (metreissä) saadaan kotelon Helmholtz-resonanssitaajuus $f_{\rm H}$ lausekkeesta

$$f_{\rm H} = \frac{c}{2\boldsymbol{p}} \sqrt{\frac{a}{V l_{\rm eff}}}, \qquad (2.1)$$

missä *c* on äänen nopeus. Putken efektiivinen pituus on hieman suurempi kuin sen fysikaalinen pituus johtuen "takertuneesta massasta", jolla tarkoitetaan putken päiden lähistöllä liikkeessä olevaa ilmamassaa. Takertuneen massan määrä riippuu putken sisähalkaisijasta ja siitä, onko putken päät vapaana vai laippaan päättyviä. Putken sisäsäteen ollessa *r* vapaa pääty lisää putken efektiivistä pituutta määrällä 0,85*r* ja laippaan päättyvä määrällä 0,64*r*. Yleensä putken toinen pää on vapaana kotelon sisällä ja toinen laippamaisesti kotelon seinään päättyvä, jolloin putken efektiivinen pituus on fysikaalinen pituus lisättynä määrällä 1,49*r*.

Viritystaajuudella kotelo kuormittaa voimakkaasti kaiutinelementtiä rajoittaen sen liikepoikkeamaa ja samalla myös harmoonista säröä. Viritystaajuuden ympäristössä saatava äänipaine on vastaavaa suljettua koteloa suurempi. Viritystaajuuden alapuolella kotelon elementille tuottama kuorma kuitenkin pienenee dramaattisesti. Elementin liikepoikkeama kasvaa rajusti ja kaiuttimen säteilemä ääniteho laskee 24 dB oktaavia kohden. Refleksikotelon onnistunut mitoitus on suljettua koteloa vaikeampaa. Onnistuessaankin refleksikotelon vaihetoisto on suljettuun koteloon verrattuna hieman huonompi.

2.2.3. Kaistanpäästökotelo (Geddes, 1989)

Kaistanpäästökotelossa on rakennettu elementin taakse suljettu kotelo ja eteen refleksikotelo. Suljettu kotelo hillitsee elementin liikepoikkeamaa pienillä taajuuksilla äänitehon laskiessa 12 dB oktaavia kohden. Refleksiputki toimii alipäästösuotimena (12 dB/ oktaavi) suodattaen suuria taajuuksia. Etu- ja takakotelon viritystaajuuksilla voidaan vaikuttaa sekä päästökaistan leveyteen että suurimpaan saatavaan äänipainetasoon. Päästökaistaa kavennettaessa saatava äänipainetaso kasvaa ja saavutetaan jopa refleksikoteloa suurempi herkkyys särön pysyessä kuitenkin pienenä. Vaihetoisto on huono, etenkin jos päästökaista on viritetty kapeaksi (Tuomela, 1992).

2.2.4. Transmissiolinjakotelo

Transmissiolinjakotelossa kaiutinelementin takaa lähtee pitkä ja yleensä kapeneva kanava kotelon sisältä ulos (Toivanen, 1976). Kanavan pituuden tulee olla suhteessa alimpiin toistettaviin taajuuksiin, joten kotelosta tulee helposti kookas. Kanavaan syntyy helposti alakeskialueella resonansseja, joita on hillittävä vaimennusaineella. Runsas vaimennus saa kuitenkin kotelon toimimaan suljetun kotelon tavoin ja kaiuttimen herkkyys putoaa pienillä taajuuksilla. Oikein mitoitettuna transmissiolinjakotelon bassotoisto on voimakas ja hyvälaatuinen. Rakenne on kuitenkin monimutkainen ja kotelon suunnittelu on hankalaa.

2.3. Sijaiskytkennät (Toivanen, 1976)

Kaiutin on periaatteessa sähköakustinen muunnin, joka muuntaa napoihinsa kytketyt sähköiset suureet (eli jännite ja virta) akustisiksi suureiksi (paine ja tilavuusnopeus). Kaiutinta voidaankin pitää nelinapana, joka muuntaa sähköiset suureet vastaaviksi akustisiksi (kts. kuva 2.3).



Kuva 2.3. Kaiutinelementti nelinapana. Sähköisellä puolella (vasemmalla) suureina ovat jännite (e) ja virta (i). Akustisella puolella (oikealla) näitä vastaavat suureet paine (p) ja tilavuusnopeus (q). Zg ja Z_{A(säi)} ovat generaattorin (vahvistimen) lähtöimpedanssi ja kaiutinelementin akustinen säteilyimpedanssi.

Suljettuun tiiviiseen koteloon asennettu kaiutinelementti voidaan kuvitella männäksi, jota kuormittaa kotelon synnyttämä akustinen kapasitanssi (kts. kuva 2.4).



Kuva 2.4. Tiivis suljettu kotelo akustisena kapasitanssina C_b.

Kotelon vuodot, aukot sekä muista syistä johtuvat akustiset impedanssit pienentävät kartion akustista kokonaiskuormitusta (kotelon sisäisen ja ulkoisen paineen erotusta). Sijaiskytkennöissä ne sijoittuvat kotelokapasitanssin rinnalle. Kotelokaiuttimen periaatteellinen akustinen sijaiskytkentä on siten kuvan 2.5 kaltainen. Kuvaan merkitty impedanssi $Z_{A(sähk.)}$ tarkoittaa akustisella puolella näkyvää sähköisen piirin impedanssia.



Kuva 2.5. Koteloidun kaiuttimen yksinkertainen akustinen sijaiskytkentä. Käytetyt alaindeksit löytyvät taulukosta 2.1

Kaiutinelementin synnyttämästä tilavuusnopeudesta q_d osa q_b kuluu ilman puristumiseen kotelon sisällä, osa q_l kotelon vuotoihin ja osa q_p kotelon aukkojen (esim. refleksiputken) kautta kulkevaan tilavuusnopeuteen. Niillä taajuuksilla, joilla aallonpituus on kotelon dimensioihin verrattuna suuri, kaiutin vastaa likimäärin alkiomonopolia ja sen akustiset ominaisuudet määrää lähinnä kotelon sisäinen tilavuusnopeus q_b . Alkiomonopolin aiheuttama äänipaine

$$p = \frac{j \boldsymbol{w} \boldsymbol{r}_0 \boldsymbol{q}_{\rm b}}{4 \boldsymbol{p} \boldsymbol{r}} \mathrm{e}^{-jk\boldsymbol{r}},\tag{2.2}$$

missä w on kulmataajuus, r_0 ilman tiheys (\approx 1,18 kg/m³), k aaltoluku ja r etäisyys alkiomonopolista. Koska paine on verrannollinen taajuuden ja tilavuusnopeuden tuloon, on alkiomonopoli (kaiutin) pienillä taajuuksilla tehoton säteilijä.

Dynaamisen kaiuttimen toiminta perustuu puhekelaan kohdistuvaan voimaan

$$F = B\ell i, \tag{2.3}$$

missä *B* on magneettivuon tiheys, ℓ on puhekelan johtimen pituus ja *i* on puhekelan virta. Voima *F* on ilmaistavissa paineen *p* ja kartion ekvivalenttisen säteilypintan A_d avulla seuraavasti:

$$F = pA_{\rm d}.\tag{2.4}$$

Ekvivalenttisena säteilypintana A_d voidaan pitää elementin kumireunuksen rajoittaman ympyrän alaa. Tyypillisellä bassotaajuuksille tarkoitetulla kaiutinelementillä A_d on suuruusluokkaa 0,005-0,03 m².

Taulukko 2.1. Tässä esityksessä käytetyt alaindeksit.

b	kotelo	d	värähdinkartio
1	kotelon vuodot	р	kotelon (refleksi)aukko
g	generaattori (vahvistin)	с	puhekela

Elementin napoihin kytketty generaattori tuottaa jännitteellä e puhekelaan virran

$$i = \frac{e}{Z_{\rm g} + Z_{\rm c}},\tag{2.5}$$

missä Z_g ja Z_c ovat generaattorin ja puhekelan impedanssit. Puhekelaan vaikuttavan magneettivuon tiheyden *B* ja puhekelan johtimen pituuden ℓ tuloa $B\ell$ (Thiele, 1993) kutsutaan *voimakertoimeksi*. Se ilmaisee mekaanisella ja sähköisellä puolella näkyvien impedanssien suhteen siten, että toisella puolella näkyvä impedanssi *Z* näkyy toisella puolella impedanssina

$$\widetilde{Z} = \frac{\left(B\ell\right)^2}{Z}.$$
(2.6)

Akustinen impedanssi Z_A saadaan vastaavasta mekaanisesta impedanssista jakamalla se ekvivalenttisen säteilypinnan A_d neliöllä:

$$Z_{\rm A} = \frac{Z_{\rm m}}{A_{\rm d}^2}.\tag{2.7}$$

Soveltamalla lausekkeita (2.3)-(2.7) voidaan kuvan 2.5 sijaiskytkentä redusoida akustiselle puolelle (katso kuva 2.6)



Kuva 2.6. Koteloidun kaiuttimen yleinen sijaiskytkentä redusoituna akustiselle puolelle.

2.3.1. Suljetun kotelon sijaiskytkentä

Kaiutinkotelon ollessa todella umpinainen pätee

$$\begin{cases} q_{\rm b} = q_{\rm d} \\ q_{\rm l} = 0 \\ q_{\rm p} = 0 \end{cases}$$
(2.8)

Lauseketta (2.8) soveltaen suljetun kotelokaiuttimen sijaiskytkennäksi saadaan kuvan 2.7 mukainen kytkentä, kun tehdään muutama yksinkertaistus. Generaattorin lähtöimpedanssi Z_g ja puhekelan (kiinto)impedanssi Z_c oletetaan resistiivisiksi. Merkitään niitä symboleilla R_g ja R_c . Tämän jälkeen kirjoitetaan $R_e = R_g + R_c$.



Kuva 2.7. Suljetun kotelokaiuttimen sijaiskytkentä.

Siirtofunktion laskennan helpottamiseksi yhdistellään kuvan 2.7 komponentteja siten, että saadaan yksinkertainen LCR-sarjapiiri (katso kuva 2.8).



Kuva 2.8. Kuvan 2.7 yksinkertaistus.

Komponentit kuvassa 2.8 ovat

$$R_{\rm t} = \frac{(B\ell)^2}{R_{\rm e}A_{\rm d}^2} + R_{\rm d} + R_{\rm b}$$
(2.9)

$$C_{\rm t} = \frac{C_{\rm d} \cdot C_{\rm b}}{C_{\rm d} + C_{\rm b}} \tag{2.10}$$

$$L_{\rm t} = L_{\rm d} + L_{\rm tak},\tag{2.11}$$

missä L_{tak} on takertuneesta massasta aiheutunut akustinen induktanssi. Kompleksista taajuutta

$$s = \mathbf{S} + j\mathbf{W} \tag{2.12}$$

käytettäessä tilavuusnopeuden lausekkeeksi saadaan

$$q_{\rm d} = \frac{B\ell e}{R_{\rm e}A_{\rm d}(R_{\rm t} + sL_{\rm t} + \frac{1}{sC_{\rm t}})}.$$
(2.13)

Kun tämä tilavuusnopeuden lauseke sijoitetaan alkiomonopolin aiheuttaman paineen lausekkeeseen (2.2), saadaan

$$p = \frac{sB\ell er_0}{4prR_eA_d(R_t + sL_t + \frac{1}{sC_t})}e^{-jkr}.$$
(2.14)

Lausekkeesta (2.14) voidaan muokata kaiuttimen herkkyyden, so. äänenpaineen ja generaattorin sähkömotorisen voiman osamäärän lauseke

$$\frac{p}{e} = \frac{B\ell \mathbf{r}_0}{4\mathbf{p}R_e A_d L_t r} \cdot \underbrace{\frac{s^2 L_t}{s^2 L_t + sR_t + \frac{1}{C_t}}}_{G(s)} e^{-jkr}.$$
(2.15)

G(s) on 12 dB/oktaavi laskevan ylipäästösuodattimen normalisoitu siirtofunktio, jonka itseisarvo lähenee taajuuden kasvaessa kohti arvoa yksi. Sen edessä oleva kerroin on taajuudesta riippumaton vakio. Suljettuun koteloon sijoitetun kaiuttimen taajuusvaste on siis periaatteessa kuvan 2.9 mukainen. Systeemin resonanssitaajuus saadaan lausekkeella

$$f_{\rm r} = \frac{1}{2\boldsymbol{p}\sqrt{C_{\rm t}L_{\rm t}}}.$$
(2.16)

Resonanssihuipun korkeus määräytyy kokonaishyvyysluvun

$$Q_{\rm t} = \frac{2\boldsymbol{p}}{f_{\rm r}C_{\rm t}R_{\rm t}} \tag{2.17}$$

mukaan kuvassa 2.9 esitetyllä tavalla.



Kuva 2.9. Suljetussa kotelossa olevan kaiuttimen taajuusvaste systeemin kokonaishyvyysluvun Q_t arvoilla 0,5, 0,71, 1, 1,41 ja 2. Tapaus $Q_t = 0,71$ vastaa laakalatvaista Butterworthin siirtofunktiota. Tätä suuremmilla hyvyysluvun arvoilla vasteeseen syntyy resonanssihuippu.

Käytännössä kaiutinelementin taajuusvasteen epätasaisuus, kotelon sisäiset seisovat aallot ja seinämien värähtelyt, mekaaniset häviöt, kotelon vuodot, kaiuttimen taajuusriippuva suuntaavuus ja kotelon reunaheijastukset tuovat huomattavia epätasaisuuksia Kuvan 2.9 vasteeseen. Taitavalla suunnittelulla epätasaisuuksia voi kuitenkin tasoittaa merkittävästi. Liian pieni kotelo (pieni C_t) tuottaa lausekkeiden (2.16) ja (2.17) mukaisesti suuren resonanssitaajuuden ja systeemin häviöiden ollessa vähäiset suuren kokonaishyvyysluvun, josta on seurauksena voimakkaan resonanssihuippun ilmaantuminen kaiuttimen vasteeseen.

2.3.2. Refleksikotelon sijaiskytkentä

Refleksikotelon, jossa on refleksiaukko ja kotelon vuotoja, sijaiskytkentä voidaan melko suoraviivaisesti esittää kuvan 2.6 perusteella (katso kuva 2.10). Huomionarvoista sijaiskytkennässä on se, että refleksiputkea ja koteloa kuvaavat haarat muodostavat viritystaajuuden ympäristössä resonanssipiirin, jolloin $q_b > q_d$ ja kaiuttimen säteily on vastaavaa suljettua koteloa voimakkaampaa. Viritystaajuuden alapuolella kaiutinelementin synnyttämä tilavuusnopeus ohjautuu suurimmaksi osaksi refleksiputken kautta ($q_d \approx q_p$) aiheuttaen akustisen oikosulun. Äänen säteily on tällöin vaimeampaa kuin suljetun kotelon tapauksessa. Viritystaajuuden ympäristössä refleksikoteloon syntyy helposti voimakkaita painevaihteluja. Kotelon tulisikin olla erittäin tiivis, pienetkin kotelovuodot (R_1 ja L_1) vaimentavat bassotaajuuksia merkittävästi (Tuomela, 1992).



Kuva 2.10. Refleksikotelon akustiselle puolelle redusoitu sijaiskytkentä.

Tekemällä seuraavat yksinkertaistukset saadaan sijaiskytkennästä kuvan 2.11 mukainen.

- Sisällytetään kotelon ja aukon häviöt (R_p ja R_b) vuotohäviöihin R_l.
- Kartion ja refleksiputken vaikutusta toisiinsa ei huomioida.
- Merkitään $R_t = R_d + (B\ell)^2 / R_e A_d^2$.



Kuva 2.11. Refleksikotelon yksinkertaistettu sijaiskytkentä.

Refleksikotelon yksinkertaistettu sijaiskytkentä muodostuu siis sarjaan kytketyistä LCR sarja- ja LCR-rinnakkaispiireistä.

2.4. Koteloitu kaiutin vibroakustisena järjestelmänä.

Todellinen koteloitu kaiutin on erittäin monimutkainen vibroakustinen järjestelmä, jonka kaikkien piirteiden kuvaaminen sijaiskytkennöillä olisi toivotonta. Pienillä taajuuksilla kotelo toimii kutakuinkin akustisena kapasitanssina, mutta suurilla taajuuksilla varsinkin suorakulmaisen särmiön muotoisen kotelon sisälle syntyy seisova aalto aina, kun äänen aallonpituuden monikerta on sama kuin kaksi kertaa kotelon jokin dimensio, siis

$$\frac{nI}{2} = x_{i,} \quad n = 1, 2, 3..., \quad i = 1, 2, 3.$$
(2.18)

Lausekkeessa I on aallonpituus ja x_i kotelon jokin dimensio (katso myös kuva 2.12). Suorakulmaisella tilalla on kuitenkin myös lukuisa määrä mooditaajuuksia, joiden syntyyn osallistuu useampi dimensio. Kaikki mooditaajuudet f_{mnp} saadaan lausekkeella

$$f_{mnp} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{n}{x_2}\right)^2 + \left(\frac{p}{x_3}\right)^2}, \quad \begin{cases} m = 0, 1, 2, \dots \\ n = 0, 1, 2, \dots \\ p = 0, 1, 2, \dots \\ p = 0, 1, 2, \dots \end{cases}$$
(2.19)

missä x_1 , x_2 ja x_3 ovat tilan dimensiot ja *c* äänennopeus. Tapaus m = n = p = 0 tuottaa mooditaajuuden $f_{000} = 0$ Hz, joka vastaa staattista painetta tilassa. Seisovat aallot aiheuttavat ikäviä piikkejä kaiuttimen vasteeseen, mutta onneksi niitä voidaan tehokkaasti vaimentaa asentamalla kotelon sisään sopivaa vaimennusmateriaalia (Bradbury, 1976) tai muotoilemalla kotelon sisäpuoli toisin, esim. vinoseinäiseksi.



Kuva 2.12. Seisovien aaltojen synty suorakulmaiseen tilaan. Alin mooditaajuus f_m on esittetty alhaalla. Sen monikerrat 2f_m ja 3f_m on myös esitetty. Paineella on maksimi kovan seinämän edessä, joten paksut viivat ja katkoviivat esittävät paineen positiivisia ja negatiivisia huippuarvoja. Hiukkasnopeuden on sen sijaan oltava kovalla rajapinnalla nolla. Ohuet viivat ja katkoviivat esittävätkin hiukkasnopeuden positiivisia ja negatiivisia huippuarvoja.

Merkittävä kaiutinkoteloiden ongelma on myös seinämien värähtely. Kaiutinelementin kartion kiihtyvyys aiheuttaa luonnollisesti vastavoiman, joka saa sen seinämän värähtelemään, jossa se on kiinni. Liitoskohtien kautta värähtely leviää kotelon joka sivulle. Pienillä taajuuksilla painevaihtelu kotelon sisä- ja ulkopuolella on vähäisempää kuin jos kyseessä olisi täysin jäykkäseinäinen kotelo. Esimerkiksi refleksikotelon säteilyteho viritystaajuuden ympäristössä alenee merkittävästi, jos kotelon seinämät "hölskyvät" runsaasti (Tuomela, 1992). Suuremmilla taajuuksilla kotelon seinät ovat jo suuntaavia ja voivat säteillä tiettyihin suuntiin niin voimakkaasti, että kaiuttimen vapaakenttävasteessa näkyy huomattavia piikkejä tai kuoppia. Luvussa 6 tehdyistä mittauksista on pääteltävissä, että ainakin mitatun kotelon tapauksessa sisäisen ja ulkoisen äänikentän osuus seinämien värähtelyssä on suurempi kuin mekaanisen etenemisen. Seinämien värähtelyä voi hillitä käyttämällä kotelon rakentamiseen paksumpaa ja massiivisempaa materiaalia. Käytännöllisempää on kuitenkin usein asentaa koteloon tukirimoja. Kaiuttimia on valmistettu kivestäkin.

Luku 3

MITTAUSMETODIIKKA

3.1. Johdanto

 $-\infty$

Tehdyissä mittauksissa on määritetty kiinnostuksen kohteena olevien systeemien impulssivaste. Jotta systeemiä täydellisesti kuvaava impulssivastefunktio olisi määritettävissä, on järjestelmälle asetettava tiettyjä ehtoja. Mitatun systeemin on oltava *stabiili, lineaarinen* ja *aikainvariantti* (Lahti, 1995). Jotta systeemi voisi ylipäätään olla olemassa, täytyy sen olla lisäksi *realisoituva* (kausaalinen). Määritellään kaikki edellä luetellut ehdot täyttävä järjestelmä *ideaaliseksi*.

3.2. Järjestelmän impulssivaste (Lahti, 1995)

Kaikki neljä edellä mainittua ehtoa täyttävän järjestelmän tärkein ominaisuus on yksikköimpulssivastefunktio h(t), lyhyesti impulssivaste. Se on järjestelmän vaste herätteen ollessa ideaalinen impulssi

$$\boldsymbol{d}(t) = \begin{cases} \infty & \text{kun } t = 0 \\ 0 & \text{mulloin} \end{cases}$$
(3.1)
$$\int_{-\infty}^{\infty} \boldsymbol{d}(t) dt = 1$$
(3.2)

ja sisältää täyden informaation systeemin tuottamasta vasteesta mille tahansa herätteelle. Kuvassa 3.1 on esitetty ideaalinen yhden tulo- ja lähtösignaaliparin järjestelmä. Yksikköimpulssivastefunktio h(t) määritellään siis seuraavasti:

$$h(t) = y(t) \quad \text{kun} \quad x(t) = \boldsymbol{d}(t), \tag{3.3}$$

missä t on aika impulssin d(t) saapumisesta järjestelmään. Tunnettaessa järjestelmän impulssivaste on sen antama vaste määritettävissä mille tahansa herätteelle x(t) konvoluutiointegraalilla

$$y(t) = h(t) * x(t) = \int_{0}^{\infty} h(t)x(t-t) dt.$$
(3.4)

Realisoituva eli kausaalinen järjestelmä ei tuota vastetta ennen herätteen saapumista järjestelmään, toisinsanoen

$$h(\mathbf{t}) = 0 \quad \text{kun} \quad \mathbf{t} < 0. \tag{3.5}$$

Tästä syystä lausekkeessa (3.2) integraalin alaraja on 0.



Kuva 3.1. Ideaalinen yhden tulo- ja lähtösignaalin järjestelmä.

Aikainvariantin järjestelmän impulssivaste ei riipu herätteen tulohetkestä, joten pätee

$$h(t,t) = h(t), \quad -\infty < t < \infty. \tag{3.6}$$

Jos järjestelmän impulssivaste täyttää ehdon

$$\int_{0}^{\infty} |h(t)| \mathrm{d}t < \infty \,, \tag{3.7}$$

tuottaa mikä tahansa rajoitettu herätesignaali rajoitetun vasteen. Tällöin järjestelmän sanotaan olevan stabiili.

Järjestelmä on lineaarinen, jos se on sekä additiivinen että homogeeninen. Additiiviselle järjestelmälle pätee

$$y = h * x = y_1 + y_2 \quad \text{kun} \quad \begin{cases} x = x_1 + x_2 \\ y_1 = h * x_1 \\ y_2 = h * x_2 \end{cases}.$$
(3.8)

Homogeeninen järjestelmä täyttää puolestaan ehdon

$$y_2 = Cy_1 \quad \text{kun} \quad \begin{cases} x_2 = Cx_1 \\ y_1 = h * x_1 \\ y_2 = h * x_2 \end{cases}$$
, (3.9)

missä C on vakio. Käytännössä ideaalisen systeemin neljästä vaatimuksesta juuri lineaarisuusehto on vaikeinta täyttää.

3.3. Taajuusvastefunktio

Lineaarisen ja aikainvariantin järjestelmän impulssivasteelle voidaan tehdä mikä tahansa lineaarinen ja kompleksiarvoinen muunnos (Jackson, 1989), (Lahti, 1995). Hyödyllisintä on kuitenkin käyttää Laplace-muunnoksen erikoistapausta, *Fourier-muunnosta*, koska se tuottaa suoraan esityksen järjestelmästä taajuusalueessa. Impulssivastefunktion h(t) Fourier-muunnosta

$$\boldsymbol{H}(f) = \int_{0}^{\infty} h(t)e^{-j2\boldsymbol{p}ft} \mathrm{d}t$$
(3.10)

kutsutaan järjestelmän *taajuusvastefunktioksi*. Se on kullakin taajuudella kompleksiluku, jolla on sekä reaali- että imaginääriosa:

$$\boldsymbol{H}(f) = \boldsymbol{H}_{\mathrm{R}}(f) + \boldsymbol{j}\boldsymbol{H}_{\mathrm{I}}(f) \tag{3.11}$$

$$H_{\rm R}(f) = \int_{0}^{\infty} h(t) \cos(2\mathbf{p}ft) dt$$
(3.12)

$$H_{\rm I}(f) = -\int_{0}^{\infty} h(t)\sin(2\mathbf{p}ft)dt$$
(3.13)

On kuitenkin paljon käytännöllisempää ilmaista taajuusvastefunktio polaarinotaatiolla itseisarvon ja vaiheen avulla:

$$\boldsymbol{H}(f) = \left| \boldsymbol{H}(f) \right| e^{j\boldsymbol{f}(f)} \tag{3.14}$$

$$|H(f)| = \sqrt{H_{\rm R}^2(f) + H_{\rm I}^2(f)}$$
(3.15)

$$\mathbf{f}(f) = \arctan\left(\frac{H_{\mathrm{I}}(f)}{H_{\mathrm{R}}(f)}\right)$$
(3.16)

Tässä esityksessä negatiivinen vaihevaste merkitsee viivettä. Tunnettaessa taajuusvastefunktio impulssivastefunktio b(t) saadaan laskemalla taajuusvastefunktion käänteis-Fourier-muunnos

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f) e^{j2\mathbf{p}ft} \mathrm{d}f.$$
(3.17)

Käytännössä integraalia (3.10) ei voi laskea, voidaanhan h(t) mitata vain jollain äärellisellä aikavälillä. Siksi taajuusvastefunktion laskennassa joudutaan tyytymään *ikkunointiin* ja *äärelliseen Fourier-muunnokseen*

$$X_{T,w(t)}(f) = \int_{0}^{T} w(t)x(t)e^{-j2pft} dt,$$
(3.18)

missä x(t) on muunnettava aika-alueen signaali, joka tunnetaan aikavälillä 0-T ja w(t) jokin ikkunointifunktio. Signaalin katkaisu terävästi aikavälille 0-T tuottaa laskettuun spektriin sinc-funktion muotoisen häiriön, jota voidaan kuitenkin sopivalla ikkunointifunktiolla lieventää taajuusresoluution kustannuksella. Aina ikkunointia ei suoriteta, jolloin w(t)=1. Käytännössä äärelliset Fourier-muunnokset lasketaan tietokoneella *diskreetissä* muodossa

$$\boldsymbol{X}_{k} = \boldsymbol{X}(k\boldsymbol{D}f) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} x_{n} e^{-j2\boldsymbol{p}kn/N} \quad k = 1, 2, 3, ..., N , \qquad (3.19)$$

missä N on signaalivektorissa x_n olevien diskreettien näytteiden lukumäärä ja D_f diskreetin Fourier-muunnoksen taajuusresoluutio, joka määräytyy lausekkeella

$$\boldsymbol{D}f = \frac{1}{T} = \frac{1}{N\boldsymbol{D}t},\tag{3.20}$$

missä **D**t on aikaväli, jolla jatkuvasta signaalista x(t) on otettu näytteitä vektoriin x_n .

Fourier-muunnoksen laskentaan tarvittavien laskentaoperaatioiden määrä on verrannollinen näytteiden lukumäärän N neliöön. Laskenta-aika räjähtää siksi helposti taivaisiin hiemankin suuremmilla N arvoilla. Diskreetti Fourier-muunnos ja vastaava käänteinen operaatio, diskreetti käänteis-Fourier-muunnos lasketaankin yleensä käyttäen nopeita algoritmeja *Fast Fourier Transform* (FFT) ja *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT).

Taajuusvastefunktion itseisarvoa |H(f)| sanotaan usein vahvistukseksi tai ammattipuhekielessä *taajuusvasteeksi* ja vaihefunktiota f(f) vaihevasteeksi. Impulssivasteen Laplacemuunnos

$$\boldsymbol{T}(s) = \int_{0}^{\infty} h(\boldsymbol{t}) e^{-s\boldsymbol{t}} \,\mathrm{d}\boldsymbol{t}$$
(3.21)

on järjestelmän *siirtofunktio*. Usein taajuusvastefunktiota H(f) kutsutaan virheellisesti siirtofunktioksi, vaikka ne siis ovat sama asia vain kun s = j2pf.

3.4. Herätesignaaleista

3.4.1. Impulssi

Impulssin käyttö herätesignaalina impulssivastemittauksissa tuntuu aluksi elegantilta; saadaanhan mitatun järjestelmän antamana vasteena suoraan haluttu impulssivaste. Lisäksi impulssilla on tasainen spektri, mikä on yleensä toivottava ominaisuus. Impulssi on kuitenkin herätteenä erittäin problemaattinen. Ensinnäkin ideaalista impulssia d(t) on mahdoton tuottaa, koska se vaatisi äärettömän kaistanleveyden ja mahdollisuuden äärettömän suurten joskin sentään energialtaan äärellisten signaaliarvojen tuottamiseen. Määritellään nyt käsite huippukerroin

$$CF = \frac{\max\{|x(t)|\}}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_{1}^{T} (x(t)) dt}},$$
(3.22)

missä max { |x(t)| } tarkoittaa signaalin x(t) itseisarvoltaan suurinta arvoa ja T signaalin ajallista pituutta. Pyrittäessä hyvään signaalikohinasuhteeseen tulisi käyttää mahdollisimman pienen huippukertoimen omaavaa herätesignaalia, jolloin mitattavaan systeemiin saadaan syötettyä paljon (signaali)energiaa ilman, että sen lineaarinen toimintaalue ylittyy jo pienellä syöttöenergialla. Ideaalisella impulssilla on aivan toivoton huippukerroin, nimittäin ääretön. Impulssiherätettä käytettäessä ainoaksi signaali-kohinasuhdetta parantavaksi keinoksi jää keskiarvoistaminen monen mittauskerran yli. Koska hyötysignaali on sama mittauskerrasta toiseen, kasvaa sen teho $20\log_{10}N$ dB laskettaessa N mittauskerran vasteet yhteen. Vaste- ja hyötysignaalin erotus on tietenkin kohinaa. Kohina on määritelmänsä mukaisesti satunnaista, joten se ei korreloi mittauskertojen välillä. Siten se summautuu tehollisesti (voimistuu $10\log_{10}N$ dB) laskettaessa N mittauskerran vasteet yhteen. Itse signaali-kohinasuhde kasvaa keskiarvoistuksen myötä siten 10log₁₀N dB. Esimerkiksi sadan mittauskerran yli keskiarvoistaminen parantaa signaali-kohinasuhdetta teoriassa 20 dB verrattuna yhteen mittauskertaan. Alykkäämpää on kuitenkin käyttää herätteenä jotakin huippukertoimeltaan pientä signaalia ja dekonvoloida se myöhemmin pois järjestelmävasteesta, jolloin tuloksena on signaalikohinasuhteeltaan hyvä impulssivaste ilman massiivista keskiarvostamista.

Aiemmin esitetty lauseke (3.4) siis ilmaisee ideaalisen järjestelmän antaman vasteen y(t) ja herättesignaalin x(t) välisen riippuvuuden järjestelmän impulssivasteen ollessa h(t). Kun Fourier-muunnamme lausekkeen, saamme

$$\boldsymbol{Y}(f) = \boldsymbol{H}(f)\boldsymbol{X}(f) \quad \Leftrightarrow \quad \boldsymbol{H}(f) = \frac{\boldsymbol{Y}(f)}{\boldsymbol{X}(f)}, \tag{3.23}$$

missä X(f), Y(f) ja H(f) ovat aika-alueen signaalien x(t), y(t) ja h(t) kompleksiarvoiset Fourier-muunnokset. Merkittäessä Fourier-muunnosta $F\{\}$ ja vastaavaa käänteismuunnosta $F^{-1}\{\}$ saadaan lausekkeesta (3.23) muokattua impulssivasteen lausekkeeksi

$$h(t) = F^{-1} \left\{ \frac{F\{y(t)\}}{F\{x(t)\}} \right\}.$$
(3.24)

Edellä mainittu dekonvoluutio suoritetaan yleensä juuri taajuusalueessa spektrien jakolaskuna lausekkeen (3.24) mukaisesti.

3.4.2. MLS (Maximun Length Sequence)

MLS on näennäissatunnainen jaksollinen sarja diskreettejä näytteitä –1 ja 1. Sarja voidaan tuottaa yksinkertaisesti siirtorekisterillä esittämällä luvut –1 ja 1 biteillä 0 ja 1 (kts. kuva 3.2). Sekvenssin pituus *L* on muotoa

$$L = 2^N - 1, (3.25)$$

missä N on käytetyn siirtorekisterin pituus.



Kuva 3.2. Kolmen yksikköviiveen z^{-1} siirtorekisteri 7 näytteen pituisen MLS-signaalin generointiin. \oplus esittää Boolen algebran modulo-2 summaa (XOR).

MLS-signaaleilla on monia hyviä ominaisuuksia. Niiden magnitudispektri on tasainen ja vaihespektri näennäissatunnainen vaiheen jakautuessa tasaisesti välille $[-\pi, \pi]$. MLS-signaaleilla on pienin mahdollinen huippukerroin (CF = 1) eli niiden energia on amplitudiin nähden maksimaalinen, joten signaali-kohinasuhdekin on optimaalinen. MLS-signaalit ovat näennäissatunnaisia mutta deterministisiä. MLS-heräte on jaksollinen, joten katkaisuefektiä ei esiinny eikä ikkunointia tarvita. Impulssivasteen määrittämisessä käytetään yhden jakson pituista jonoa järjestelmän antaman vasteen ja MLS-herätteen välisen ristikorrelaation laskentaan aika-alueessa. MLS-sekvenssin ominaisuuksista johtuen heräte- ja vastesignaalin välinen ristikorrelaatio on lähes sama kuin mitatun järjestelmän impulssivaste (Lahti, 1995). Laskenta on tehokasta; siinä käytetään nopeaa *Hadamard-algoritmia*, jossa tarvitaan vain yhteen- ja vähennyslaskuja raskaanpien kertolaskujen sijaan (Borish & Angell, 1983), (Borish, 1985), (Rife & Vanderkooy 1989).

MLS-sekvenssiä käytettäessä on kuitenkin otettava huomioon seuraavat seikat:

- Digitaalisen MLS-sekvenssin autospektri on tasainen. MLS-signaaleiden käyttöön perustuvissa implementoinneissa D/A-muunnos suoritetaan kuitenkin pitopiirein, jolloin *analogisen* sekvenssin autospektristä tulee sinc-funktion muotoinen. Spektri on pudonnut jo puolitoista desibeliä taajuudella $f_s/3$. Näytetaajuuden f_s onkin siksi oltava vähintään kolminkertainen mitattavaan taajuuskaistaan nähden. Mitatun systeemin antama signaali on toisaalta suodatettava laskostumisenestosuotimella ennen A/D muunnosta, joten tätä suuruusluokkaa oleva "taajuusmarginaali" on joka tapauksessa tarpeen.
- Herätettä on syötettävä tarpeeksi pitkään systeemiin, jotta alkutransientit ehtivät tasaantua. Tämä ei yleensä ole ongelma.
- Analogisissa MLS-signaaleissa ei ole tasajännitekomponenttia. Akustisissa mittauksissa tämä on yleensä vain etu.

 Mitattavan järjestelmä on oltava aikainvariantti. Niinpä esimerkiksi kompressoreita ei voi MLS-tekniikalla mitata.

3.4.3. RPFS-beräte

RPFS-signaalien (Random Phase Flat Spectrum) (Karjalainen, 1997) magnitudispektri on nimensä mukaan tasainen, mutta niiden vaihespektri on satunnainen (katso kuva 3.3). MLS-sekvenssi on itseasiassa RPFS-sekvenssin erikoistapaus. RPFS-herätteitä on helppo tuottaa; synnytetään herätesekvenssin spektriä kuvaava vektori, jonka itseisarvo on vakio, mutta vaihe satunnainen. RPFS-heräte saadaan tällaisesta vektorista IFFT-muunnoksella. RPFS-signaalin huippukerroin ei ole aivan paras mahdollinen.



Kuva 3.3. RPFS heräte pituudeltaan 128 näytettä: a) magnitudispektri, b) vaihespektri ja c) käänteisellä Fourier-muunnoksella saatu aika-alueen herätesignaali. Kuvassa olevan sekvenssin huippukerroin on 4,309.

3.4.4. Schroeder sekvenssi

Schroeder on tutkinut (1970) menetelmiä tuottaa huippukertoimeltaan edullisia periodisia (heräte)signaaleja kontroloimalla harmonisten komponenttien vaiheita. Ensimmäisen Fourier-komponentin vaiheen ollessa f_1 saadaan muiden harmonisten komponenttien vaiheet lausekkeella

$$\boldsymbol{f}_{n} = \boldsymbol{f}_{1} - \frac{\boldsymbol{p}n^{2}}{N}, \qquad (3.26)$$

missä n on harmonisen komponentin kertaluku ja N on sekvenssin pituus näytteinä. Kaikkien harmonisten komponenttien amplitudi on täsmälleen sama, joten sekvenssin magnitudispektri on tasainen. Vastaava jatkuvan aika-alueen sekvenssi olisi äärettömän pitkä taajuuspyyhkäisy, joka syntyisi viemällä ideaalinen impulssi d(t) sellaisen yksikkösuotimen läpi, jonka ajallinen viive d(t) on taajuuden lineaarinen funktio, siis

$$d(f) = kf. \tag{3.27}$$

Viive *d(f)* on kuitenkin myös määriteltävissä lausekkeella

$$d(f) = \frac{\mathbf{f}(\mathbf{w})}{\mathbf{w}} = \frac{\mathbf{f}(f)}{2\mathbf{p}f},$$
(3.28)

missä w on kulmataajuus ja f(w) viivettä d(f) vastaava vaihekulman kiertyminen taajuuden funktiona. Yhdistämällä lausekkeet (3.27) ja (3.28) saadaan vaiheen lausekkeeksi

$$\mathbf{f}(f) = 2\mathbf{p}fd(f) = 2\mathbf{p}kf^2. \tag{3.29}$$

Vaihe on siis verrannollinen taajuuden neliöön aivan kuten lausekkeessa (3.26). Aikaalueessa diskreeteistä sekvensseistä muodostuukin taajuuspyyhkäisyn approksimaatio (Kuvassa 3.4). Pyyhkäisy alkaa tavallaan alusta loputtuaan. Toisin sanoen epäjatkuvuuskohtaa ei ole, ja sekvenssin spektri on puhtaan valkoinen. Sekvenssiä voikin sulavasti monistaa peräkkäin, mikä onkin hyödyllistä keskiarvoistuksessa.



Kuva 3.4. 128 näytteen pituinen Schroeder sekvenssi. Huippukerroin CF = 1,417.

3.5. Äänikenttämittaukset

Kaiutinkotelon tapauksessa akustinen äänikenttä jakautuu kahteen osaan; sisä- ja ulkokenttään. Ulkoisen äänikentän mittaaminen vaatii yleensä vapaakenttäolosuhteet, mutta sisäkenttää voi hyvällä tarkkuudella mitata myös muissa äänellisesti kohtuullisissa olosuhteissa.

Kotelon sisäisen kentän kattavaa mittaamista varten rakennettiin 90 pienikokoista Hosiden 2823 elektrettimikrofonia sisältävä hila. Hilan rakenne esitetään tarkemmin luvussa 5. Myös ulkokenttää (kaiuttimen lähikenttää) mitattiin käyttäen hilaa, mutta sitä mitattiin pääasiassa käyttäen kondensaattorimikrofonia.

3.5.1. Kondensaattorimikrofoni (Toivanen, 1976)

Kuvassa 3.5 on impedanssilla Z_L kuormitettu mikrofoni. Mikrofonin jännitepaineherkkyys M määritellään kuormitusimpedanssin yli syntyneen jännitteen u ja sen synnyttämiseen tarvittavan äänipaineen p osamääränä

$$M = \frac{u}{p}.$$
(3.30)

Äänipaine kasvaa kovana rajapintana toimivan mikrofonikalvon pinnalla, jos kalvon koko on äänen aallonpituuteen nähden suuri. Äänipaineen kasvu on sitä suurempaa mitä kohtisuoremmin ääni kohtaa mikrofonikalvon. Suurilla taajuuksilla mikrofoni kokee siis suuremman äänipaineen kuin se, joka samassa pisteessä vallitsisi ilman sitä. Tä-

män takia puhutaan erikseen vapaakenttäherkkyydestä $M_{\rm FF}$ ja paine-herkkyydestä $M_{\rm p}$. Edellisen kohdalla käytetään äänipaineelle arvoa, joka vallitsisi ilman mikrofonin aiheuttamaa häiriötä. Jälkimmäisen kohdalla käytetään todellista mikrofonin kalvon edessä vallitsevaa äänipainetta. Pienillä taajuuksilla $M_{\rm p} \approx M_{\rm FF}$ ja suurilla taajuuksilla $M_{\rm p}$ $< M_{\rm FF}$.



Kuva 3.5. Impedanssilla **Z**_L kuormitettu mikrofoni.

Kondensaattorimikrofoni on periaatteessa levykondensaattori, jonka kapasitanssia äänikentän annetaan moduloida. Kondensaattoriin järjestetään mahdollisimman vakiona pysyvä varaus. Tämän ansiosta jännite kondensaattorin yli on kääntäen verrannollinen kapasitanssin arvoon. Kuvassa 3.6 on esitetty kondensaattorimikrofonin toimintaperiaate.



Kuva 3.6. Kondensaattorimikrofonin periaate.

3.5.2. Elektrettimikrofoni (Toivanen, 1976)

Elektrettimikrofoni on periaatteessa kondensaattorimikrofoni. Kondensaattorin vakiovaraus on järjestetty laittamalla elektrodien eristemateriaaliksi elektrettiä, materiaalia, johon on aikaansaatu pysyvä sähkökenttä. Polarisaatiojännitettä ei näin ollen tarvita.

Elektrettimikrofonien valmistaminen on halpaa, mutta niiden ongelmana on varauksen häviäminen ajan myötä. Akustiset ominaisuudet ovat kuitenkin tavanomaisiin kondensaattorimikrofoneihin verrattavissa. Ne voidaan valmistaa pienikokoisiksi ja ne sietävät kosteutta polarisaatiojännitteen puuttuessa.

3.6. Vibroakustiset mittaukset

Kotelon seinämien värähtelynopeutta mitattiin lähinnä käyttäen kiihtyvyysanturia. Koska anturin 30 g massa muuttaisi kaiutinkartion mekaanisia ominaisuuksia dramaattisesti, tehtiin elementtivasteiden mittaus käyttäen laservibrometria.

3.6.1. Kiihtyvyysanturit (Brüel & Kjær, 1976)

Kiihtyvyysanturien toiminta perustuu pietsosähköisten materiaalien käyttöön. Kyseilet materiaalit (esimerkiksi kvartsi, Rochelle-suola ja litiumsulfaatti) synnyttävät sähköisen varauksen joutuessaan puristavan voiman alaiseksi. Yksinkertainen kiihtyvyysanturi on esitetty kuvassa 3.7. Suhteellisen raskas massa on esijännitetty jousen avulla pietsoelementtejä vasten, jolloin syntyy nollakiihtyvyystilan varaus. Anturin kokiessa kiihtyvyyttä muuttuu pietsoelementtien mekaaninen jännitys ja sähköinen varaus (suuremmaksi tai pienemmäksi riippuen kiihtyvyysvektorin suunnasta). Kiihtyvyysanturin herkkyys määritellään sen antaman varauksen ja kiihtyvyyden suhteena. Tässä työssä käytetyn anturin herkkyys on 7,51 pC/ms⁻². Anturin tuottama varaus muunnetaan jännitteeksi varausvahvistimella. Voimakkaan kapasitiivisen takaisinkytkennän ansiosta varausvahvistimen välillä voidaan käyttää hyvinkin pitkää kaapelia ilman pienten taajuuksien vaimenemista.



Kuva 3.7. Kiihtyvyysanturin yksinkertainen esitys.



Kuva 3.8. Mach-Zehnder-interferometri.

3.6.2. Laservibrometri (Polytec, 1995), (Serridge, 1988)

Laservibrometrien toiminta perustuu Mach-Zehnder-interferometrin sovellukseen (katso kuva 3.8). Olkoon laserin säteilemän optisen kentän *a* kompleksinen esitys

$$a(t) = \sqrt{I} e^{i\mathbf{W}t}, \qquad (3.31)$$

missä *I* on kentän intensiteetti, **w** säteilyn kulmataajuus (n. 3×10^{15} rad/s) ja *t* aika. Fotodetektoriin D2 saapuvat erilliskentät a_1 ja a_2 ovat

$$a_1(t) = \frac{\sqrt{I}}{2} e^{(\mathbf{w}t - \mathbf{q}_1)}$$
(3.32)

$$a_2(t) = \frac{\sqrt{I}}{2} e^{(\mathbf{w}t - \mathbf{q}_2)},\tag{3.33}$$

missä vaiheen kiertymät q_1 ja q_2 saadaan säteiden kulkemista matkoista x_1 ja x_2 lausekkeilla

$$\boldsymbol{q}_1 = \frac{2\boldsymbol{p}\boldsymbol{x}_1}{\boldsymbol{l}} \tag{3.34}$$

$$\boldsymbol{q}_2 = \frac{2\boldsymbol{p}\boldsymbol{x}_2}{\boldsymbol{l}},\tag{3.35}$$

missä I on aallonpituus. Kokonaiskenttä a_{D2} fotodetektorin D2 pinnalla on

$$a_{\rm D2} = a_1 + a_2. \tag{3.36}$$

Fotodetektorit ihmissilmä mukaanlukien reagoivat optisen säteilyn intensiteettiin kentän amplitudin sijasta. Intensiteetti *I* saadaan kertomalla kentän amplitudi kompleksikonjugaatillaan:

$$I = a \cdot a^*, \tag{3.37}$$

missä a^* tarkoittaa amplitudin a kompleksikonjugaattia. Kun lausekkeet (3.32), (3.33) ja (3.36) sijoitetaan intensiteetin lausekkeeseen, saadaan fotodetektorin D2 havaitsemaksi intentiteetiksi

$$I_{\rm D2} = \frac{I}{2} [1 + \cos(\boldsymbol{q}_2 - \boldsymbol{q}_1)]. \tag{3.38}$$

Energin säilymisen vuoksi detektoreiden D1 ja D2 havaitsemien intensiteettien I_{D1} ja I_{D2} summan täytyy olla sama kuin laserin synnyttämän säteilyn intensiteetti I. Tästä syystä fotodetektoriin D1 kohdistuva intensiteetti saadaan lausekkeella

$$I_{\rm D1} = I - I_{\rm D2} = \frac{I}{2} [1 - \cos(\boldsymbol{q}_2 - \boldsymbol{q}_1)].$$
(3.39)

Sijoittamalla lausekkeet (3.34) ja (3.35) lausekkeisiin (3.38) ja (3.39) voidaan matkaeron $x_2 - x_1$ lauseke ratkaista:

$$x_{2} - x_{1} = \frac{l}{2p} \arccos\left(\frac{I_{D2} - I_{D1}}{l}\right).$$
(3.40)

Edellä kuvattu järjestely ei kuitenkaan sellaisenaan kelpaa vibrometrimittauksien tekemiseen, vaan on tehtävä muutamia modifikaatioita (katso kuva 3.9). Säteen on päästävä käymään mitattavan kohteen pinnalla. Tämän takia on lisättävä puoliläpäisevä, polarisova peli (kuvassa BS3) pelkän peilin paikalle. Interferometrin ja kohteen välissä on polarisaatiotasoa kääntävä elementti (QWP). Kohteessa käynyt säde ohjautuu tästä syystä kokonaan puoliläpäisevälle peilille SB2.



Kuva 3.9. Vibrometriä varten modifioitu Mach-Zehnder-interferometri.

Oletetaan kohteen liikkuvan interferometria kohti nopeudella v, jolloin sen paikka x(t) ajan t funktion on vt. Vaihe-ero ajan funktiona on tällöin

$$\boldsymbol{q}_2 - \boldsymbol{q}_1 = \frac{2\boldsymbol{p} \cdot 2\boldsymbol{v}t}{\boldsymbol{l}} = 2\boldsymbol{p}f_{\mathrm{D}}t , \qquad (3.41)$$

missä f_D on Doppler-taajuus. Sijoittamalla lauseke (3.41) lausekkeisiin (3.38) ja (3.39) saadaan

$$I_{\rm D1} = \frac{I}{2} \left[1 - \cos(2\mathbf{p}f_{\rm D}t) \right]$$
(3.42)

$$I_{\rm D2} = \frac{I}{2} \left[1 + \cos(2\mathbf{p}f_{\rm D}t) \right]. \tag{3.43}$$

Nämä lausekkeet sisältävät vibroakustiikan kannalta ikävän piirteen: Detektoreiden havaitsema intensiteetti on valitettavasti täsmälleen sama kohti ja poispäin liikkuvalle kohteelle $(\cos(\mathbf{w}t)=\cos(-\mathbf{w}t))$. Ongelma on ratkaistavissa sijoittamalla interferometrin vertailuhaaraan ns. Bragg-cell-modulaattori, joka muuttaa lävitseen kulkevan (monokromaattisen) valonsäteen taajuutta ulkoisen RF-ohjaussignaalin määräämällä taajuudella *f*B. Lausekkeet (3.30) ja (3.31) saavat tällöin muodon

$$I_{\rm D1} = \frac{I}{2} \left[1 - \cos[2\mathbf{p}(f_{\rm B} + f_{\rm D})t] \right]$$
(3.44)

$$I_{\rm D2} = \frac{I}{2} \left[1 + \cos[2\mathbf{p}(f_{\rm B} + f_{\rm D})t] \right]. \tag{3.45}$$

Nyt detektorit havaitsevat erisuuruiset intensiteettit kohti ja poispäin liikkuvan kohteen tapauksessa. Liikkeen suunta on tällöin pääteltävissä. Detektoreiden antosignaalit ohjataan differentiaalivahvistimelle, jonka antojännite V saadaan lausekkeesta

$$V = k \cdot \cos[2\boldsymbol{p}(f_{\rm B} + f_{\rm D})t], \qquad (3.46)$$

missä k on vakio.

3.7. Putkimittaukset

Kotelon vaimennukseen käytetyn lasikuituvillan materiaaliparametrien selvittäminen tapahtui käyttäen seisovan aallon putkea. Myös kaiutinkartion akustista impedanssia mitattiin, joskin verraten heikolla menestyksellä.

3.7.1. Putkimittausten teoriaa (Lahti, 1995)

Kapeassa kovaseinäisessä putkessa esiintyy vain yksiulotteinen tasoaaltokenttä tietyn rajataajuuden alapuolella. Poikkileikkaukseltaan suorakulmaisessa putkessa ylärajataajuudelle fo pätee

$$f_0 = \frac{c}{2W},\tag{3.47}$$

missä *c* on äänennopeus (n. 345m/s) ja *W* putken leveys tai korkeus (suurempi näistä). Putkeen synnytetty *harmoninen* äänikenttä koostuu etenevästä ja palaavasta tasoaallosta p_i ja p_r . Kun aaltoliike oletetaan häviöttömäksi, ovat tasoaaltojen matemaattiset esitykset

$$p_{i}(x,f) = p_{0}e^{jkx}e^{jwt}$$
(3.48)

$$p_{\mathbf{r}}(x,f) = \mathbf{r} p_0 e^{-jkx} e^{j\mathbf{W}t}.$$
(3.49)

Lausekkeissa p_0 on tasoaallon amplitudi, r putken päässä heijastuksen aiheuttaneen materiaalin heijastuskerroin, $k = \mathbf{w}/c$ aaltoluku, x koordinaatti putken pituussuunnassa, $\mathbf{w} < 2\mathbf{p}/c$ kulmataajuus ja t aika. Tasoaaltoihin liittyvät hiukkasnopeudet u_i ja u_r ovat vastaavasti (kun aikariippuvuutta ei merkitä näkyviin)

$$u_{i}(x) = \frac{p_{i}(x)}{Z_{0}}$$
(3.50)

$$u_{\rm r}(x) = -\frac{p_{\rm r}(x)}{Z_0}.$$
(3.51)



Kuva 3.10. Seisovan aallon putki.

Yksittäiselle tasoaalloille akustinen ominaisimpedanssi on siis sama kuin ilman karakteristinen impedanssi $Z_0 \approx 407 \text{ kg/m}^2\text{s}$. Sen sijaan kokonaiskentän $p = p_i + p_r$ impedanssi on

$$\mathbf{Z}(x) = \frac{p_{i}(x) + p_{r}(x)}{u_{i}(x) + u_{r}(x)} = Z_{0} \frac{p_{i}(x) + p_{r}(x)}{p_{i}(x) - p_{r}(x)}.$$
(3.52)

3.7.2. Seisovan aallon putki, heijastuskerroin ja akustinen impedanssi

Työlästä, mutta tarkkaa seisovan aallon menetelmä on käytetty pitkään. Kuva 3.10 esittää klassista seisovan aallon putkea, jolla materiaalien akustisia heijastuskertoimia ja impedansseja voidaan määrittää. Tutkittava materiaali työstetään tarkasti putkeen sopivaksi näytepalaksi ja asetetaan tiiviisti vasten putken takaseinää. Seisovan aallon putket on varustettu pituussuunnassa liikuteltavalla mikrofonilla sekä kaiutinelementillä, joka sijaitsee putken alkupäässä. Suurin käytettävissä oleva taajuus määräytyy suorakulmaisen putken tapauksessa lausekkeella (3.47). Mikäli käytetään poikkileikkaukseltaan pyöreää putkea, muodostuu ylärajataajuudeksi

$$f_0 = 1,84 \frac{c}{\pi D},$$
 (3.53)

missä D on putken halkaisija. Seisovan aallon menetelmässä alarajataajuuden määrää putken pituus L. Menetelmässä etsitään putkeen syntyvän seisovan aallon maksimeja ja minimejä, joten putkeen on mahduttava vähintään yksi maksimi ja minimi. Koska maksimin ja minimin etäisyydeksi putkessa muodostuu c/4f, täytyy käytettävän taajuuden toteuttaa ehto

$$f > \frac{c}{2L}.\tag{3.54}$$

Maksimin kohdalla etenevä ja palaava tasoaalto ovat samanvaiheiset, joten kokonaisäänipaine $|p_{max}| = |p_i|(1+|\boldsymbol{r}|)$. Minimin kohdalla tasoaallot kumoavat toisiaan vastakkaisvaiheisina ja $|p_{min}| = |p_i|(1-|\boldsymbol{r}|)$. Näistä lausekkeista ratkaistuna heijastuskertoimen itseisarvon lausekkeeksi saadaan

$$/\mathbf{r} = \frac{\frac{p_{\max}}{p_{\min}}}{\frac{p_{\max}}{p_{\min}}} = \frac{s-1}{s+1},$$
(3.55)

missä seisovan aallon suhde $s = |p_{max}| / |p_{min}|$. Koska heijastuskertoimen *itseisarvo* on sama kaikkialla putkessa vaiheen kiertyessä paikan funktiona, saadaan koko kompleksinen heijastuskerroin r lausekkeista

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r} / \boldsymbol{e}^{j \boldsymbol{f}} \tag{3.56}$$

$$f = \frac{4px_{\min(n)}}{l} + p$$
; $n = 1, 2, ...$ (3.57)

Yhtälössä (3.57) $x_{\min(n)}$ tarkoittaa n:nnen minimin etäisyyttä mitattavan materiaalin etupinnasta ja $\mathbf{l} = c/f$ aallonpituutta. Vaihe \mathbf{f} ei välttämättä skaalaudu välille 0-2 π , mutta kaavan (3.56) eksponenttiosan jaksollisuuden vuoksi asialla ei ole merkitystä. Yhtälöistä (3.48), (3.49) ja (3.52) saadaan lauseke tutkittavan materiaalin akustiselle impedanssille:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}(0) = Z_0 \frac{1 + \mathbf{r}(0)}{1 - \mathbf{r}(0)}.$$
(3.58)

3.7.3. Ikkunointimenetelmä

Ikkunointimenetelmää käytettäessä mittausjärjestelmä on muuten seisovan aallon menetelmän kaltainen, mutta herätesignaali tuotetaan hallitusti (esim. tietokoneella MLStai Schroeder-sekvenssi) ja tunnetulla herätteellä dekonvoloidaan mikrofonin antama vaste, jolloin saadaan systeemin (kaiuttimesta mikrofoniin) impulssivaste. Sopivalla ohjelmalla impulssivasteesta voi ikkunoida irti ajallisia tapahtumia putkessa. Tapahtuma voi olla esimerkiksi ääniaallon heijastuminen materiaalin pinnasta (katso kuva 3.11). Hyvä mikrofonin paikka on putken puolivälissä. Tällöin putken päistä tapahtuvat heijastukset "ohittavat" mikrofonin mahdollisimman tasaisin väliajoin. Kun nämä ajallisesti yhtä pitkät osat sitten ikkunoidaan erilleen, saadaan eri tapahtumille yhtä hyvä magnitudispektrien taajuusresoluutio.


Kuva 3.11. Ajallisia tapahtumia vastaavat ikkunat impulssivasteessa. Kuvan merkinnät: 1=suora ääni kaiutinelementiltä, 2=heijastus lasivillan pinnalta ja 3=kaksi kertaa lasivillan läpäissyt heijastus putken takaseinästä.

3.8. QuickSig

QuickSig (Karjalainen, Altosaar ja Alku, 1988) on kokeellinen olio-pohjainen ohjelmointiympäristö digitaaliseen signaalinkäsittelyyn. QuickSig on kirjoitettu ohjelmointikielellä *Common Lisp Object System* (CLOS). Sitä voidaankin pitää signaalinkäsittelylaajennuksena edellä mainitulle kielelle.

QuickSigin perustavoitteena on ollut säilyttää Lisp-kielen yksinkertainen syntaksi, kuten esimerkiksi skalaarien summaus,

 $(+12) \rightarrow 3,$

signaalinkäsittelynkin tapauksessa. Tavoite on saavutettu geneerisillä funktioilla. Signaalien tapauksessa määritellään funktio **add** tarkoittamaan argumentteina olevien signaalien yhteenlaskemista näyte kerrallaan:

(add sig1 sig2) \rightarrow sig3.

Koska funktio **add** on geneerinen, voivat **sig1** ja **sig2** olla sisäiseltä toteutukseltaan mitä tahansa signaaleja. Myös signaalien ja skalaarien väliset operaatiot on useissa tapauksissa määritelty. QuickSig koostuu olioluokista, jotka perivät ominaisuutensa alemman tason olioilta. QuickSig sisältääkin olioita ja funktioita 2-ulotteisten signaalien käsittelyyn, digitaaliseen suodatukseen ja lineaariprediktioon (LPC). Ominaisuuksia ovat myös graafinen käyttöliittymä, signaalien tietokannat, lohkokaavioeditointi, tapauskohtainen symbolinen signaalien esitys jne.

QuickSig-ohjelmistoa on käytetty monissa sovelluksissa kuten akustisissa mittauksissa, puheenkäsittelyssä, auditorisessa mallinnuksessa, sääntöpohjaisessa puhesynteesissä, puheentunnistuksessa ja puheenkoodauksessa. Tavanomaisimpiin ohjelmistotyökaluihin verrattuna se on usein nopeuttanut ohjelmien kehitysaikaa. Luomalla uusia funktioita sovellusaluetta voidaan tehokkaasti laajentaa. Tässä työssä QuickSig on ollut pää-asiallinen vastemittauksissa käytetty järjestelmä. Mittaustietokoneena on käytetty Apple G3-tietokonetta (233 MHz suoritin), jossa on asiallisilla A/D- ja D/A-muuntimilla varustettu äänikortti.

Luku 4

MATERIAALIMITTAUKSET IMPEDANSSIPUTKELLA

4.1. Johdanto

Kaiuttimessa käytettyjen materiaalien akustisia ominaisuuksia (akustinen impedanssi, heijastus- ja läpäisykerroin) pyrittiin selvittämään tässä työssä tekemällä mittauksia seisovan aallon putkessa. Materiaaleilla tarkoitetaan lähinnä kaiutinkotelon sisäisen äänikentän vaimentamiseen käytettyä lasikuituvillaa. Itse kotelon materiaalina käytetty MDF-levy todettiin aivan liian jäykäksi (impedanssi erittäin suuri), jotta sen akustiset ominaisuudet voisi käytössä olevin menetelmin selvittää. Kaiutinelementille kehitettiin mittausmenetelmä, mutta luotettavampia mittaustuloksia varten olisi rakennettava elementille räätälöity putki (kts. kappale 4.5).

4.2. TKK:n seisovan aallon putki ja mittausjärjestely

TKK:n Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorion seisovan aallon putken rakenne ilmenee kuvasta 4.1. Putken pituus L on 8820 mm. Poikkileikkaus on neliö särmän pituuden W ollessa n. 250 mm. Lausekkeet (3.47) ja (3.54) antavat siis käyttökelpoiseksi taajuusalueeksi seisovan aallon menetelmää käytettäessä kutakuinkin 20-690 Hz. Yläraja pätee myös muille mittausmenetelmille.



Kuva 4.1. TKK:n seisovan aallon putki.

Seisovan aallon mittauksissa käytetty mittausjärjestely on esitetty kuvassa 4.2. Mittauksessa tarvitut pistetaajuudet tuotettiin piensäröisellä signaaligeneraattorilla Tektronix SG 5010 Programmable Oscillator. Päätevahvistimena toimi Yamaha MX-70, joka syötti signaalin mittausputken kaiutinelementtiin (itse asiassa putkeen on asennettu kaksi samanlaista elementtiä vastakkain harmonisen särön pienentämiseksi, mutta tässä niitä yksinkertaisuussyistä käsitellään yhtenä). Mikrofonin signaalikaapeli kulkee mikrofonin liikuttamiseen käytetyn metallitangon sisällä putkahtaen esille tangon alkupäästä. Kaapeli viedään esivahvistimelle, joka on tähän tarkoitukseen varta vasten suunniteltu ja rakennettu.



Kuva 4.2. Mittausjärjestelmä.

Putki ei tietenkään voi olla seinämiltään äärettömän jäykkä ja häviötön. Jo ääniaallon eteneminen putkessa aiheuttaa hieman termisiä häviöitä ja viskositettihäviöitä. Tämä tosiseikka asettaa rajansa materiaalien mitattavuudelle. Suuren heijastuskertoimen omaavien materiaalinen (esim. MDF-levy) mittaaminen on hankalaa ja epävarmaa, koska putken oma vaikutus äänikenttään on tällöin merkittävää. Mittausputken vaikutus voidaan sen sijaan "unohtaa" mitattaessa voimakkaasti absorboivia materiaaleja. Jotta putken vaikutuksen suuruus olisi tiedossa, mitattiin *tyhjä* putki seisovan aallon menetelmällä. Mittausjärjestely oli mitattavaa materiaalia lukuunottamatta kuvan 4.2 mukainen. Mitatut seisovan aallon maksimit ja minimit sekä vastaavat mikrofonipaikat on lueteltu taulukossa 4.1.

<i>f</i> /Hz	$p_{\rm max}/{\rm mV}$	$p_{\rm min}/{ m mV}$	x_{max}/mm	x_{\min}/mm	S	<i>r</i>
100	944	12,8	1722	859	295	0,993
125	559	11,0	1366	690	203	0,990
160	403	11,8	1074	539	137	0,986
250	175	4,85	690	344	144	0,986
315	149	4,75	561	274	125	0,984
400	162	4,39	436	215	148	0,987
500	95,3	4,30	349	173	89	0,978
630	72,5	4,30	275	136	67	0,971

Taulukko 4.1. Tyhjän putken mittaustulokset.

Heijastuskertoimen r itseisarvo on laskettu kaavalla (3.55) ja lausekkeilla (3.56), (3.57) ja (3.58) lasketut *normeeratut* akustiset impedanssit osuvat välille 33-61. Impedanssi vaiheineen näkyy kuvassa 4.3. Merkillepantavaa on itseisarvon ja vaiheen samanlainen sahamainen aaltoilu. Tämä viittaa mittausepätarkkuuksiin, joiden vaikutus impedanssin arvoon korostuu heijastuskertoimen lähetessä arvoa 1. Jokatapauksessa voidaan sanoa normeeratun impedanssin olevan luokkaa 50.



Kuva 4.3. Tyhjän putken normeerattu akustinen impedanssi (yhtenäinen viiva) ja sen vaihe (pisteviiva).

4.3. Lasivillan putkimittaukset

Mallinnettaessa pienen akustisen tilan äänikenttää matemaattisin menetelmin on välttämätöntä tuntea myös sisäisen äänikentän vaimentamiseen käytetyn materiaalin, tässä tapauksessa lasivillan, akustiset ominaisuudet. Heijastuskertoimen ja akustisen impedanssin määrittäminen tehtiin TKK:n akustiikan laboratorion suurella seisovan aallon putkella. Mittaus tapahtui terssikaistoittain taajuusalueella 100-630 Hz. Yritettäessä mitata 200 Hz taajuudella ilmeni, että mikrofonin siirtelyyn käytetty metallitanko resonoi voimakkaasti estäen luotettavan mittaamisen. Tarkempi tutkimus paljasti resonanssin olevan pahimmillaan 195 Hz kohdalla. Taajuuden muuttuessa 15 Hz ylös- tai alaspäin resonanssi vaimeni korvakuulolta pois. Mittaaminen huomattavasti pienemmällä amplitudilla olisi vähentänyt resonointia ja räminää, mutta tällöin äänipaine seisovan aallon minimeissä olisi liian pieni ollakseen tarkasti mitattavissa. Mittaus tehtiin siksi myös 180 ja 210 Hz taajuuksilla, jolloin saaduista tuloksista on kohtuullisesti interpoloitavissa myös 200 Hz arvot. Tämän lisäksi 200 Hz kohta mitattiin viidennekseen pudotetulla herätejännitteellä (0,2 V_{rms}), jolloin resonointi oli (korvakuulolta) huomattavasti vaimeampaa.

Mittaustulokset ja niistä lausekkeella (3.55) lasketut heijastussuhteen itseisarvot $|\mathbf{r}|$ on esitetty taulukossa 4.2. Seisovan aallon maksimi- ja minimikohdat ovat sarakkeissa p_{max} ja p_{min} ja vastaavat mikrofonin etäisyydet villasta sarakkeissa x_{max} ja x_{min} . Mikrofonin paikoista estimoitu äänennopeus c on 345 m/s. Kun heijastussuhteen vaihe materiaalin pinnalla ratkaistaan lausekkeella (3.57), saadaan kompleksisiksi heijastussuhteiksi taulukon 4.3 mukaiset arvot. Samaan taulukkoon on listattu myös ilman karakteristiseen impedanssiin normeeratut ominaisimpedanssit Z, jotka on laskettu heijastussuhteista lausekkeella (3.58). Kuvissa 4.4 ja 4.5 impedanssin Z itseisarvo ja vaihe on esitetty graafisesti. Kuvassa 4.4 on 200 Hz mittaustulokset merkitty kolmioilla. Kuvaajasta ilmenee seuraavia piirteitä:

- Heijastussuhteen itseisarvo pienenee melko lineaarisesti taajuuden kasvaessa aina 500 Hz asti.
- 500 Hz yläpuolella heijastussuhteen pieneneminen hidastuu asymptoottisesti .

Kun mittausdataan sovitetaan pienimmän neliösumman mielessä suora p₁, saadaan 200 Hz taajuudella heijastussuhteen estimaatiksi 0,848, joka on melko lähellä 0,2 V_{rms} herätteellä mitattua arvoa 0,836. Toisaalta estimaatiksi saadaan 0,863 sovitettaessa dataan kolmannen asteen polynomi p₃, joka huomioi paremmin heijastussuhteen asymptoottisen käyttäytymisen pienillä ja suurilla taajuuksilla (katso kuva 4.5). Suoran p₁(f) ja polynomin p₃(f) lausekkeet ovat:

$$p_1(f) = -1,12 \cdot 10^{-3} f + 1,07.$$

$$p_3(f) = 6,48 \cdot 10^{-9} f^3 - 6,27 \cdot 10^{-6} f^2 + 5,34 \cdot 10^{-4} f + 0,956.$$

ƒ/Hz	$p_{\rm max}/{\rm mV}$	$p_{\rm min}/{ m mV}$	$x_{\rm max}/{\rm cm}$	$x_{\rm min}/{\rm cm}$	r
100	783	17,6	164	249	0,956
125	570	20,8	129	198	0,930
160	376	19,0	99	153	0,904
180	313	19,3	89	135	0,884
200†	226	11,4	77	120	0,904
200*	46,8	4,17	80	119	0,836
210	302	20,0	72	114	0,876
250	170	21,3	62	95	0,777
315	151	25,5	47	75	0,711
400	119	32,3	37	59	0,573
500	65,2	23,6	29	47	0,468
630	51,4	21,0	22	37	0,420

Taulukko 4.2. Mittausdata ja siitä lasketut heijastussuhteen itseisarvot.

[†] Vahvistinjännite 1,0 V_{ms}. Mikrofonin siirtelyyn käytetty tanko resonoi voimakkaasti.

* Vahvistimen lähtöjännitteenä 0,2 Vms, jolloin resonointi oli (korvakuulolta) huomattavasti heikompaa.

<i>f</i> /Hz	r	r /dB	¢∕rad	$\phi/^{\circ}$	$ \mathbf{Z} /Z_0$	θ /rad	$\theta/^{\circ}$
100	0,956	-0,4	-0,35	-20	5,53	-1,44	-83
125	0,930	-0,6	-0,40	-23	4,74	-1,39	-80
160	0,904	-0,9	-0,50	-29	3,78	-1,37	-78
180	0,884	-1,1	-0,57	-33	3,32	-1,35	-77
200†	0,904	-0,9	-0,68	-39	2,79	-1,41	-81
200*	0,836	-1,6	-0,75	-43	2,46	-1,31	-75
210	0,876	-1,1	-0,70	-40	2,68	-1,37	-78
250	0,777	-2,2	-0,78	-45	2,35	-1,22	-70
315	0,711	-3,0	-0,82	-47	2,15	-1,13	-65
400	0,573	-4,8	-0,98	-56	1,95	-0,90	-52
500	0,468	-6,6	-0,87	-50	1,73	-0,74	-42
630	0,420	-7,5	-0,94	-54	1,57	-0,69	-39

Taulukko 4.3. Heijastussuhteet ja normalisoidut akustiset ominaisimpedanssit.



Kuva 4.4. Heijastussuhde taajuuden funktiona.



Kuva 4.5. Kolmannen asteen polynomin p3 sovitus mittauspisteisiin.



Kuva 4.6. Normalisoidun impedanssin Z itseisarvo taajuuden funktiona.



Kuva 4.7. Normalisoidun impedanssin Z vaihe taajuuden funktiona.



Kuva 4.8. Putki tutkittaessa lasivillan heijastusta ja läpäisyä.

Edellä on siis mitattu lasikuituvillan heijastuskerroin ja akustinen impedanssi kovaa rajapintaa vasten. Lasivillan ollessa (yksiulotteisen tasoaallon kulkusuunnassa) irti rajapinnoista heijastus ja läpäisy selvitettiin ikkunointimenetelmällä (kts. kuvat 4.8 ja 4.9).

Putken peräpään luukku aukeaa 117 cm matkalla. Tiiviisti putkeen sopiva lasivillapala työnnettiin aukon kautta 25 cm × 25 cm kokoisen keramiikkalevyn avulla tarkasti 142 cm päähän putken takaseinästä. Mikrofoni vedettiin tarkasti 4 metrin päähän lasivillapalan etupinnasta. Kaiutinelementti ruuvattiin irti 15 cm päähän putken alkupäästä. Tämä tasaa huomattavasti elementin putkeen syöttämän äänen magnitudispektriä.

Herätesignaalina käytettiin 32768 näytteen pituista, näytetaajuudeltaan 44,1 kHz Schroeder-sekvenssiä, joka tuotettiin Apple G3 mittaustietokoneella ja syötettiin päätevahvistinen (Yamaha MX-70) kautta putken kaiutin elementtiin. Mikrofonisignaali vietiin tarkoitusta varten rakennetun mikrofoniesivahvistimen kautta takaisin mittaustietokoneen äänikortille. Mittauksia varten kirjoitettu QuickSig ohjelma dekonvoloi tulosignaalin lähtösignaalilla (herätteellä), jolloin saadaan systeemin impulssivaste 32768 näytteen pituudelta (0,743s). Jatkokäsittelyä varten vasteet talletettiin *.mat-tiedostoiksi. Seuraavaksi kirjoitettiin Matlab-ohjelma, jolla vasteista "kaivettiin" esiin informaatio heijastuksen ja läpäisyn impulssivasteista.



Kuva 4.9. Mittausjärjestely tutkittaessa lasivillan heijastusta ja läpäisyä ikkunointimenetelmällä.

Koska käytössä oli 44,1 kHz näytetaajuus, sisältävät vasteet runsaasti epärelevanttia informaatiota yli 700 Hz taajuuksilla. Signaalin suurtaajuiset komponentit peittävät pahoin kiinnostavaa osaa vasteesta. suuret taajuudet on siis suodatettava pois, ennenkuin äänelliset tapahtumat putkessa saadaan esiin. Ensiksi lasketaan aikavasteen magnitudispektri, joka kerrotaan suodatusvektorilla **filt**. Suodatusvektori muodostetaan seuraavasti:

a = 20; b = 1000;	% Alku 27 Hz, loppu 1,3 kHz
$1 = 2^{15} + 2;$	% Apuvakio
$filt(1:2^{15}) = 2;$	% Suodatus-
filt(a:b) = (cos(0:pi/(b-a):pi)+1)';	% vektorin
filt(b+1:1-b+1) = 0;	% filt
filt(l-b:l-a) = (cos(pi:pi/(a-b):0)+1)';	% laskenta

Tällöin magnitudispektri painetaan taajuusalueella 27-1300 Hz kohotetun kosini-funktion mukaisesti nollaan. Ylemmät taajuudet leikataan kokonaan pois. Loivaa suodatusta on "pakko" käyttää, sillä jyrkällä suodatuksella aikavasteeseen ilmestyisi impulssivasteiden päälle häiritsevät sinc-funktion muotoiset aaltoilut. Koska käytetty suodatus vaimentaa myös jonkin verran hyötysignaalia, on myöhemmin suoritettava kompensoiva käänteissuodatus. Takaisin aika-alueeseen muunnetusta signaalista on nyt helppo erottaa "suora" ääni, ensimmäinen heijastus lasivillasta sekä villapalan kahdesti läpäissyt, putken takaseinästä tapahtunut heijastus. Kun tämän jälkeen ikkunoimme suoraan kaiutinelementista saapunutta ääntä vastaavan impulssivasteen mikrofonin kohdalla ja dekonvoloimme sillä koko aikavasteen, saamme heijastuksien ja kaksinkertaisten läpäisyjen ajan myötä yhä enemmän päällekkäin menevät impulssivasteet (katso kuva 4.10). Impulssivasteen lukeminen, suodatus ja dekonvolointi vektoriksi **D** suoritetaan Matlab-ohjelmariveillä

```
load('impulssivasteen tiedostonimi'); % Luetaan tiedosto
sigd = signal(1829:3225); % Dekonvoloiva vektori
D = real(ifft(fft(signal)./fft(sigd).*filt')); % Dekonvolointi ja suod.
```

Lopuksi tehdään vielä edellämainittu käänteissuodatus *jakamalla* vektorista D erotettujen tapahtumavektorien spektrit suodatusvektorin filt alkuosalla.



Kuva 4.10. Villamittauksen dekonvoloitu aikavaste (5000 ensimmäistä näytettä).

Villaheijastuksen impulssivaste (katso kuva 4.11) ikkunoidaan irti aikavasteesta ja estimoidaan sille suodinkertoimet käyttäen Steiglizt-McBride menetelmää. Vastaavat Matlab-ohjelmarivit ovat:

```
[pronyb,pronya] = stmcb(E(1:366),138,4,7,lpc(E(1:366),4));
imp = filter(pronyb,pronya,[1 zeros(1,2^15-1)]);
```



Kuvat 4.11a-c. Lasivillan heijastus- ja läpäisykerroin sekä vastaavat impulssivasteet.

Lasketun suodinmallin mukaan impulssivaste on kaksinkertaisen läpäisyn alkukohdassa jo sen verran vaimentunut, ettei sen huomioiminen näyttänyt olevan tarpeen.

Dekonvoloinnin ansiosta heijastusta ja läpäisyä vastaavien impulssivasteiden diskreetit Fourier-muunnokset (magnitudispektrit) edustavat suoraan heijastus- ja läpäisykertoimia (katso kuva 4.11a). Heijastuskerroin on melkein vakio taajuusalueella 100-700Hz. Läpäisykertoimessa sen sijaan näkyy häviöiden kasvaminen taajuuden mukana. Hieman mutkikkaampaa on lasivillan läpäisyvasteen määritys. Aikavasteesta saadaan käänteissuodatuksen jälkeen *kaksinkertaista* läpäisyä vastaava impulssivaste, joka täytyy siis "puolittaa" laskemalla Fourier-muunnoksen neliöjuuri ja palaamalla käänteis-Fourier-muunnoksella takaisin aika-tasoon (katso kuva 4.11c). Tämän jälkeen lasketaan Steiglizt-McBride menetelmällä (Steiglitz ja McBride, 1965) kertaläpäisyn impulssivasteelle suodinkertoimet.

Edellä kuvatussa laskennassa on oletettu putken häviöt, siis vuodot, äänienergian karkaaminen seinien läpi ja itse ilman häviöt pieniksi ja jätetty huomiotta. Todellisten heijastusta ja läpäisyä kuvaavien impulssivasteiden energia on siis vähintään yhtä suuri kuin laskettujen impulssivasteiden.

4.4. Kaiutinelementin putkimittaukset

Kaiutinelementin (Seas P17 REX) akustisen impedanssin määrittämiseksi seisovan aallon putkeen asennettiin tarkasti sopiva 18 mm paksuinen MDF-levy, jonka keskelle tehtyyn reikään elementti ruuvattiin kiinni. Asennuksen tiiviys putkessa varmistettiin lopuksi silikonilla. MDF-levyn etureunan etäisyys putken takaseinästä oli 122,5 cm. Erilaisia mittaustilanteita oli 3 kpl., jotka olivat:

- 1) Putken peräpään luukku auki, putki tyhjä.
- 2) Luukku kiinni, putki tyhjä.
- 3) Luukku kiinni, putken takaseinää vasten 60 cm pituinen villakiila-absorbentti.

Eri mittaustilanteet antoivat erittäin samanlaiset vasteet. Impulssivasteiden mittaus tapahtui QuickSig-ohjelmistolla 32768 näytteen pituisena ja jatkokäsittely Matlab-ympäristössä. Jälleen impulssivasteista on aluksi suodatettava loivasti korkeat taajuudet pois ja dekonvoloitava kaiutinelementin ja mikrofonin välisellä impulssivasteella sekä suoritettava käänteissuodatus.

Heijastuksen vaihe **a** saadaan (joskaan ei kovin tarkasti) vertailemalla heijastusta kuvaavan impulssivasteen magnitudispektrin vaihetta ensimmäisen impulssivasteen vaiheeseen poistaen akustisen välimatkan (8 metriä) vaikutus eri taajuuksilla. Mitattu heijastus r' vaiheenaan **a** edustaa kuitenkin heijastusta MDF-levyn ja kaiutinelementin yhdessä synnyttämästä akustisesta kokonaisuudesta. Mittauksissa on oletettu, että osaheijastukset MDF-levystä ja kaiutinelementistä ovat summautuneet mikrofonin kohdalla homogeeniseksi tasoaalloksi alle 690 Hz taajuuksilla. Tärkeää on ymmärtää osaheijastusten tapahtuvan *eri* vaiheisina: MDF-levyn tapauksessa vaiheeksi oletetaan 0° ja elementin tapauksessa **j**(*f*). Lisäksi on oletettu MDF-levyn tapauksessa heijastuskertoimeksi 1.

Kuvasta 4.12 ilmenee, kuinka edellä mainittujen oletusten vallitessa osaheijastuksista (harmaat katkoviivat) muodostuu vektorisummana mittauksista laskettu heijastuskerroin r'. Vektorien pituudet määräytyvät heijastuskertoimen ja pinta-alasuhteiden mukaan määräytyvien kertoimien tulona. Koko putken poikkileikkauksen pinta-alaan

normeerattuna MDF-levyn osuus on $4,8/5,8 \approx 0,828$ ja elementin $1,0/5,8 \approx 0,172$. Heijastuskerroin $|\mathbf{r}|$ ja sen vaihe \mathbf{j} on nyt helposti laskettavissa lausekkeilla:

$$/r \models 5.8\sqrt{(x-0.828)^2 + y^2}.$$
 (4.1)

$$\tan(j) = \frac{x - 0.828}{y}.$$
(4.2)

Kaavoissa x ja y ovat vektorin r' kärkipisteen koordinaatit alkupisteen ollessa origossa. Koska r' ja **a** tunnetaan, on x ja y laskettavissa helposti lausekkeilla:

$$x = \sqrt{\frac{|r'|^2}{1 + \tan^2(a)}}.$$
(4.3)

$$y = x \cdot \tan(\mathbf{a}). \tag{4.4}$$

Kuvasta 4.13 ilmenee heijastuskertoimen \mathbf{r}' estimoitu arvo taajuusalueella 175-700 Hz. Koejärjestelystä johtuen matalammilla taajuuksilla (<150 Hz) tulokset muuttuvat jopa fysikaalisesti mahdottomiksi (kuten ykköstä suuremmat heijastuskertoimet jne.). Kulma $\mathbf{a}(f)$ saadaan laskettua ottamalla mikrofonin ja MDF-levyn etäisyys näytteinä (1087 kpl) huomioon ja laskemalla mikrofonivasteen ja heijastuksen vaiheiden erotus. Lausekkeilla (4.1-4) lasketut pelkän elementin heijastuskertoimen itseisarvo ja vaihe on piirretty kuviksi 4.14a ja 4.14b. Akustinen impedanssi on nyt laskettavissa (katso kuva 4.15a). Havaitaan, että 300 Hz alapuolella vaste kääntyy jyrkkään nousuun. Koska heijastuskerroin (kuva 4.14a) on pienillä taajuuksilla lähellä ykköstä, on mittaustarkkuuden merkitys suuri. Näinollen voidaan olettaa normalisoidun akustisen impedanssin olevan paljon tasaisempi taajuusalueella 100-700Hz kuin laskelmat väittävät. Kohtalaisen hyvä arvio impedanssiksi voisi olla esimerkiksi 1,5Z₀. Impedanssin vaihe (kuva 4.15b) näyttää sijoittuvan radiaaneissa välille 1- $\mathbf{p}/2$. (57-90 astetta).



Kuva 4.12. Mitatun heijastuskertoimen muodostuminen osaheijastuksista.



Kuva 4.13 MDF-levyn ja kaiutinelementin muodostaman kokonaisuuden heijastuskerroin **r**'.

MDF-levyyn kiinnitettyä kaiutinelementtiä mitattiin myös seisovan aallon menetelmällä, jotta ikkunointimenetelmällä saatujen tulosten luotettavuus tulisi testattua. Perusongelma tämänkaltaisessa mittauksessa on se, ettei heijastuneen aallon vaihetta voi jakaa MDF-levyn ja kaiutinelementin kesken. Lisäämällä mikrofonin todelliseen etäisyyteen 1 cm luokkaa oleva "offset", voidaan jollakin tavalla ottaa huomioon kaiutinkartion syvyys suhteessa MDF-levyyn, toisin sanoen systeemin efektiivinen etäisyys mikrofonista.



Kuvat 4.14a ja 4.14b. Pelkän elementin heijastuskerroin: a) itseisarvo, b) vaihe.



Kuvat 4.15a ja 4.15b. Ilman karakteristiseen impedanssiin normeerattu akustinen impedanssi: a) itseisarvo, b) vaihe.

Elementin paikka putkessa oli sama kuin ikkunointimenetelmää käytettäessä mutta nyt MDF-levyn taakse järjestettiin mahdollisimman hyvät vapaakenttäolosuhteet jättämällä luukku auki ja asettamalla takaosaan 90 cm pituinen villakiila absorbentiksi (katso kuva 4.16). Lisäksi kaiutinelementin navat oikosuljettiin mallintamaan tilannetta, jossa päätevahvistin syöttää virtaa alhaisella impedanssilla (ikkunointimenetelmässä napoja ei oikosuljettu, joten mittaukset eivät ole täysin vertailukelposia).



Kuva 4.16. Seisovan aallon putki elementin SAS-mittauksessa.

Mittausjärjestely on itse putkea lukuunottamatta kuvan 4.9 mukainen. Pistetaajuudet tuotettiin Tektronix SG 5010 Programable Oscillator signaaligeneraattorilla. Tehollisarvoinen päätevahvistimen lähtötaso oli jälleen 1V, joka tarkoittaa noin 250mW sähköistä tehoa. Mikrofonisignaali johdettiin lopuksi Fluke 45 yleismittariin, josta "paine"-maksimit ja minimit (p_{max} ja p_{min}) luettiin. Mikrofonin etäisyys (x_{max} ja x_{min}) MDFlevystä pyrittiin pitämään useana metrinä, jotta epähomogeeninen heijastus ehtisi tasaantua. Heijastuskertoimen itseisarvo $|\mathbf{r}|$ lasketaan aivan normaalisti kaavalla (3.55). Heijastuskertoimen vaihe \mathbf{j} MDF-levyllä saadaan niinikään aivan normaalisti kaavalla (3.57) ja kompleksinen heijastuskerroin lausekkeella (3.56). Normeerattu akustinen impedanssi lasketaan jakamalla lausekkeen (3.58) antama lukuarvo luvulla 5,8 jolloin putken ja elementin välinen pinta-alaero tulee otettua huomioon.

Mittauspöytäkirja sekä sen tiedoista lasketut seisovan aallon suhteet s, heijastuskertoimet $|\mathbf{r}|$ sekä normeeratut akustiset impedanssit vaiheineen ilmenevät taulukosta 4.4 (impedanssit myös kuvasta 4.17). Mainittakoon, että impedanssin arvot eivät ole 100-160Hz taajuuksilla kovin herkkiä mittausepätarkkuuksille. Sensijaan taajuusalueen yläpäässä pienetkin muutokset esim. äänennopeudessa vaikuttavat huomattavasti impedanssin arvoon. Ilmiö on suoraan yhteydessä heijastuskertoimeen. Mitä pienempi $|\mathbf{r}|$, sitä vähemmän impedanssin arvo riippuu epätarkkuuksista. Näyttäisi kuitenkin siltä, että oikosuljetun elementin akustinen impedanssi kasvaisi jonkin verran taajuuden mukana. Kohtalainen approksimaatio voisi olla seuraava: impedanssin itseisarvo 100 Hz taajuudella on 1,5 Z_0 (vaihe 0-20°) ja taajuudella 630 Hz 3 Z_0 (vaihe 55-75°). Muilla taajuuksilla impedanssin itseisarvon voisi lineaarisesti interpoloida vaiheen käyttäytyessä kuitenkin epälineaarisesti.

taajuus	$p_{\rm max}/{\rm V}$	p_{\min}/V	$\chi_{\rm max}/m$	χ_{min}/m	S	<i>r</i>	$ Z /Z_0$	j
100Hz	3,080	0,341	3,448	2,579	9,043	0,801	1,550	6
125Hz	2,647	0,217	4,151	3,462	12,187	0,848	1,681	37
160Hz	1,985	0,185	3,242	3,776	10,758	0,830	1,625	29
250Hz	0,721	0,028	3,457	3,791	25,459	0,924	2,707	52
315Hz	0,755	0,028	3,277	3,557	27,362	0,930	2,143	63
400Hz	0,701	0,022	3,865	3,657	31,366	0,938	3,059	55
630Hz	0,270	0,009	3,826	3,688	28,421	0,932	2,069	65

Taulukko 4.4. SAS-mittauksien tulokset ja niistä laskettu heijastuskerroin ja impedanssi.



Kuva 4.17. Kaiutinelementin akustinen impedanssi seisovan aallon menetelmällä.

4.5. Kommentteja tehdyistä mittauksista

Kuten aiemmin toivottavasti lukijalle on käynyt selväksi, ovat tehdyt kaiutinelementin mittaukset koeluontoisia yrityksiä ja tarkkuudeltaan siksi korkeintaan suuntaa antavia. Perusongelmana on se, että poikkileikkaukseltaan neliönmuotoisessa putkessa on yritetty mitata muodoltaan pyöreää ja pinta-alaltaan pienempää elementtiä. Jouduttiin siksi käyttämään putkeen sopivaa asennuslevyä, ja tekemään samalla oletuksia, joiden paikkansapitävyys on vähintään kyseenalaista. Impedanssiputken tulisi olla muodoltaan pyöreä ja sisämitoiltaan tarkalleen mitatun elementin värähtimen kokoinen. Putkea tulisi asentaa elementin molemmin puolin siten, että etupuolinen putki olisi taajuusresoluution vuoksi tarpeeksi pitkä. Elementin takana oleva putki voisi olla lyhyempi, kunhan siihen järjestettäisiin vaimennus, esimerkiksi taperoitu villakiila. Tällöin elementin läpi päässyt ääni ei heijastuisi enää takaisin. Ottamalla lisäksi putken häviöt huomioon olisi elementin akustinen impedanssi mitattavissa epäilemättä hyvinkin tarkasti ja luotettavasti. Koska mitatun elementin värähtimen halkaisija on n. 14 cm, voitaisiin mittaukset lausekkeen (3.53) mukaan tehdä aina 1400 Hz asti (Vrt. käytetyn putken ylärajataajuus 690 Hz). Tämän projektin puitteissa kyseisen putken rakentaminen ei kuitenkaan ollut valitettavasti mahdollista.

Tehtyjä lasivillamittauksia voidaan sensijaan pitää melko luotettavina, työstettiinhän lasivillasta tarkasti putkeen sopiva pala, jolloin mitään muoto-ongelmia ei ollut. Lisäksi lasivillan akustiset ominaisuudet ovat sellaiset, että pienet mittausepätarkkuudet eivät kovin helposti johda massiivisiin virheisiin lasketuissa tuloksissa. Tulosten luotettavuutta rasittaa kuitenkin putken häviöiden huomiotta jättäminen.

Luku 5

KAIUTINKOTELON MITTAUKSET

5.1. Kotelomittausten tarkoitus

Simuloitaessa (kooltaan pientä) akustista tilaa numeerisilla menetelmillä (esimerkiksi FEM, BEM ja FDTD) tarvitaan tulosten verifiointiin todellista, mitattua informaatiota mallinnuksen kohteen akustisesta käyttäytymisestä. Näinollen on tehtävä riittävä määrä akustisia mittauksia. Tässä luvussa raportoidaan mittauksia, joiden kohteena oli koteloitu kaiutin.

5.2. Mitatun kotelon rakenne

Mitattu kotelo (kts. kuva 5.1) on tyypiltään suljettu ja varustettu yhdellä 17 cm bassokeskiäänielementillä. Kotelo suunniteltiin melko suureksi (60 litraa), jotta sisäkentänkin mittaaminen onnistuisi helposti. Koteloa ei tehty tarpeettoman tukevaksi jos ei luonnottaman huteraksikaan, jotta seinämien värähtelyt olisivat hyvin mitattavissa. Kotelon sisämitat ovat 600 mm × 400 mm × 250 mm. Materiaali on 18 mm paksuista MDF-levyä, joten ulkomitat ovat 638 mm × 438 mm × 288 mm. Sisäisiä tukirimoja ei ole. Etulevy E on kiinnitetty koteloon 12 ruuvilla, joiden kiinnityksessä käytetään ruuvinväännintä mahdollisimman tasaisen momentin aikaansaamiseksi. Näin etulevy voidaan poistaa ja asentaa takaisin ilman, että kotelon rakenteellinen jäykkyys muuttuu. Etulevyn ja muun kotelon välissä on tiivistenauha, joten kotelo on melko tiivis. Etulevystä on olemassa 2 eri variaatiota (kts. kuva 5.4). Toisessa niistä kaiutinelementti sijaitsee levyn keskellä ja toisessa elementti on levyn reunassa kuten kuvassa 5.1. Kotelon sivuja merkitään kirjaimilla A-F kuvan 5.1 mukaisesti.



Kuva 5.1. Mitattu kaiutinkotelo. Kuvassa sisämitat.

Etulevyyn neljällä ruuvilla kiinnitetty kaiutinelementti on mallia Seas P17 REX. Sen parametrit on lueteltu taulukossa 5.1. Elementin mitat selviävät kuvasta 5.2. Toistovasteet sekä impedanssin itseisarvo on esitetty kuvassa 5.3. Elementin kiinnityslaipan ja kotelon välissä on tiivistysnauhaa. Kuvassa 5.4 on esitetty myös banaaniliittimien sijoitus etulevyssä.

Nimellisir	npedanssi	8 Ω		
Suositeltu	taajuusalue	40 – 3000 Hz		
Lyhytaikainen teho	nkesto (IEC 268-5)	250 W		
Pitkäaikainen teho	nkesto (IEC 268-5)	80	W	
Herkkyys	(1W, 1m)	89 dB		
Puhekelan ha	lkaisija/pituus	39 mm/12 mm		
Liikepoikkeama (l	ineaarinen/suurin)	±3 mm/:	±9,5 mm	
Magnettiv	uon tiheys	1	Т	
Magneet	in massa	0.64 kg		
Kokona	usmassa	1,6 kg		
Puhekelan resista	anssi/induktanssi	6,1 Ω		
Voimake	erroin B	8,5 1	N/A	
Resonanssita	ajuus vapaana	34 Hz		
Liikkuv	a massa	16 g		
Ripustuksen	komplianssi	1,4 mm/N		
Ripustuksen meka	aaninen resistanssi	3,0 Ns/m		
Kartion efektii	vinen pinta-ala	130 cm ²		
	Small – Thie	le parametrit		
V _{as}	30 litraa	Q _{ms}	1,21	
Q _{es} 0,31 Q _{ts}		Qts	0,24	

Taulukko 5.1. Kaiutinelementin (Seas P17 REX) parametrit (valmistajan ilmoituksen mukaan).



Kuva 5.2. Seas P17 REX kaiutinelementin mitat millimetreinä. Kuvan alkuperä: http://www.seas.no.



Kuva 5.3. Elementin toistovaste kaiuttomassa huoneessa mitattuna kulmissa 0, 30 ja 60 astetta 0,5 metrin päästä elementtin ollessa asennettuna tilavuudeltaan 12 litran suljettuun koteloon. Mittausjännitteenä on käytetty 2 V_{rms}. Ylempi käyrä esittää elementin impedanssin itseisarvon niinikään logaritmisella asteikolla. Kuva http://www.seas.no.



Kuva 5.4. Kaiutinkotelon etulevyn 2 eri variaatiota.

5.3. Mittausmenetelmät

Lähinnä kotelon sisäisen, mutta myös ulkoisen kentän mittaamiseen käytettiin erityistä koteloon suunniteltua mikrofonihilaa (katso kuvat 5.5, 5.6, 5.7 ja 5.8). Hilassa on tukeva metallikehys, joka on rakennettu 6 mm paksuisesta messinkiputkesta. Kehykseen on viritetty tennismailan tapaan rautalankaa siten, että muodostuu silmäkooltaan 40 mm × 40 mm hilaverkko. Risteyskohdissa rautalangat on eristetty toisistaan ja niihin



Kuva 5.5. Mikrofonihila ja lasivilla kaiutinkotelossa.

on kiinnitetty 90 kpl pieniä Hosiden 2823 elektreettimikrofoneja kaskadiin diodin kanssa (katso kuvat 5.7, 5.9 ja 5.10). Hilan jokainen pysty- ja vaakarivi on sähköisesti yhdistetty digitaalisesti ohjattuun analogimultiplekseriin lattakaapelin johtimilla. Mikrofoneja merkitään sen mukaan, missä risteyksessä nesijaitsevat. Ensimmäistä mikrofonia merkitään koodilla r0c0 ja viimeinen r14c5. Mikrofoni r5c3 sijaitsee siis kuudennen vaakarivin ja neljännen pystyrivin risteyskohdassa.



Kuva 5.6. Mikrofonihilan mitat. Ympyrät esittävät mikrofoneja.



Kuva 5.7. Mikrofonihila.



Mikä tahansa yksittäinen mikrofoni voidaan aktivoida multiplekserillä, joka toimii samalla myös mikrofoniesivahvistimena Kytkimet valitsevat jonkin vaaka- ja pystyrivin muodostaman parin, jolloin niiden risteyskohdassa oleva mikrofoni tulee biasoiduksi vastuksen R ja diodin avulla. Mikrofonin ja diodin yli oleva jännite johdetaan kapasitanssin C kautta mikrofoniesivahvistimelle. Asettamalla hilakehikko eri korkeuksille kotelossa, esimerkiksi 4 cm välein, voidaan sisäkenttää mitata kolmiulotteisen hilan kaikissa pisteissä. Mikrofonien ja esivahvistimen muodostaman kokonaisuuden alarajataajuuden todettiin olevan n. 30 Hz. Kiinnostavalla taajuusalueella 100 Hz – 2 kHz taajuusvasteen aaltoilu on mittausten mukaan alle 1 dB.



Kuva 5.9. Hosiden 2823 elektreettimikrofonin rakenne.

Sekä kaiutinkartion että kotelon seinämien värähtelyjä mitattiin Polytec OFV3001 ja Brüel & Kjær Type 3544 laservibrometreillä. B&K Type 3544 koostuu Type 8323 laserista sekä Type 2815 teholähteestä. Mittauskohtiin asetettiin pala voimakkaasti valoa heijastavaa teippiä.

Seinämien värähtelyiden mittaamiseen käytettiin myös Brüel & Kjær Type 4334 kiihtyvyysanturia yhdessä Brüel &Kjær Type 2635 varausvahvistimen kanssa. Anturi kiinnitettiin mittauksissa mehiläisvahalla kotelon seinämiin.



Kuva 5.10. Hosiden 2823 mikrofonin taajuusvasteen poikkeaman ääriarvot valmistajan ilmoituksen mukaan taajuusalueella 50 Hz-8 kHz.

5.4. Mittausjärjestelmän kuvaus

Mittausjärjestelmä perustuu QuickSig signaalinkäsittely-ympäristöön, joka on kehitetty Teknillisen korkeakoulun Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratoriossa. Quick-Sigille voi kätevästi laatia erilaisia mittausrutiineja; esimerkiksi ohjelma mikrofonihilan jokaisen 90 mikrofonin r0c0 – r14c5 läpikäymiseen multiplekseriä ohjaamalla.

Herätteenä impulssivastemittauksissa oli mittaustietokoneen (joka tässä tapauksessa oli Apple Macintosh Quadra 950) tuottama RPFS-signaali (kts. kuva 3.3). Herätteen pituus oli 8192 näytettä ja näytetaajuus 22 050 Hz. Impulssivasteiden ajalliseksi pituudeksi muodostui siis 0,37 sekuntia. Kaiutinkotelon impulssivasteet eivät ole tätä pidempiä. Herätesignaali johdetaan mittauskoneen äänikortilta päätevahvistimeen (Yamaha MX – 70), jolla kotelon kaiutinelementtiä ajetaan. Mikrofonihilan tapauksessa mittauskoneen digitaalisesti ohjaama multiplekseri välittää halutun hilamikrofonin signaalin takaisin mittauskoneen äänikortille. Kiihtyvyysanturia käytettäessä tietokoneen äänikortti saa signaalinsa varausvahvistimelta, johon anturi on kytketty. Vibrometrimittauksessa laserin teholähde hoitaa mittaussignaalin syötön mittauskoneelle.

Kuten aikaisemminkin todettiin, on kiinnostava taajuusalue näissä mittauksissa 100 Hz - 2 kHz. Sähköakustisen systeemin impulssivasteet saadaan dekonvoloimalla mitatut vasteet herätesekvenssillä keskiarvoistaen esimerkiksi 20 toistokertaa. Mittauksien signaali-kohinasuhde on parempi kuin 40 dB, joten häiriöiden vaikutus vasteisiin on melko olematon. Mittausdata tallennettiin *.mat formaatissa jatkokäsittelyn tapahtuessa Matlab-ohjelmilla.



Kuva. 5.11. Mittausjärjestelmä kotelomittauksissa.

Mittausjärjestelmä on havainnollistettu kuvassa 5.11. Vain tarvittavat laitteet ovat kerrallaan käytössä riippuen siitä, mitä mittausmenetelmää käytetään. Kuvassa esiintyvän kaluston lisäksi käytössä oli Philips PM 3218 oskilloskooppi ja Fluke 45 Dual Display yleismittari, joilla tarpeen mukaan tarkkailtiin eri signaaleja. Mittaustietokone ja multiplekseri on yhdistetty toisiinsa sekä lattakaapelilla, jossa kulkee mittauskoneen ohjaussignaalit multiplekserille, että tavallisella RCA-kaapelilla, jonka tehtävänä on kuljettaa mikrofoniesivahvistimen signaali tietokoneelle.

5.5. Mittalaitteiden asetukset

Kiihtyvyysanturilla tehdyissä mittauksissa varausvahvistimen herkkyysasetus oli 0,1-1 pC/m/s² ja vahvistus 1000 mV/Unit. Mitattavaksi suureeksi valittiin nopeus, jolloin "Unit" oli 0,01 m/s. Alarajataajuus oli 10 Hz ja ylärajataajuus 10 kHz. Käytetyn kiihtyvyysanturin herkkyys on 7,51 pC/m/s².

Brüel & Kjær Type 3544 laservibrometrin teholähteen (Type 2815) nopeusrajoituksen asetus oli 0-2 kHz ja itse laserin (Type 8323) nopeusalueasetus 0-1 m/s.

Kaiuttimeen syötetty jännite oli yleensä 2,83 V_{rms} (1 W/8 Ω), mutta esimerkiksi mitattaessa mikrofonihilalla äänikenttää kaiuttimen takana jouduttiin jännite nostamaan tasoon 5 V_{rms} (merkitsee n. 3 W sähköistä tehoa), jotta signaali-kohina-suhteen kannalta järkevä äänipainetaso toteutuisi. Suuremmilla tasoilla elementin särö olisi alkanut vaivata varsinkin pienillä taajuuksilla.

5.6. Raakadata

Varsinkin mikrofonihilalla tehdyistä mittauksista kertyi valtaisa määrä dataa. Esimerkiksi yksi tyhjän kotelon mittaus käsittää hilakorkeudet 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28 ja 32 cm, jolloin mikrofonipisteiden määräksi tulee $8 \times 90 = 720!$ Näytetaajuus $f_s = 22050$ Hz ja näytteiden lukumäärä N = 8192, joten yksi (raaka) impulssivaste on kooltaan 65683 tavua.

5.7. Käsitelty mittausdata (kompensointi)

PATS-projektin puitteissa tapahtuneissa matemaattisissa mallinnuksissa herätteenä on yksinkertaisuussyistä kaiutinelementtiä karkeasti mallintavan mäntälähteen (tilavuus)nopeus. Reaalimaailman kotelomittauksissa heräte sen sijaan on mittaustietokoneen tuottama RPFS-signaali, jota päätevahvistin aavistuksen vääristää ennenkuin se pääsee liikuttamaan kaiutinelementtiä tavalla, joka riippuu elementin sähkömekaanisista ominaisuuksista ja akustisesta kuormituksesta. Raakadatasta on siis kompensoitava pois osuus RPFS-herätteestä kaiutinelementin tilavuusnopeuteen. Tähän käytetään elementin laservibrometrimittauksista saatuja vasteita. Kuva 5.12 selventää tilannetta. Mittaustietokone synnyttää herätesignaalin V(j), joka kulkee päätevahvistimen läpi muuttuen mekaaniseksi liikkeeksi kaiutinkartiossa. Kartion liike taas saa aikaan äänikentän, johon kotelo omalla tavallaan vaikuttaa. Lopputulos (kuvassa 5.12 Y(j)) mitataan poislukien kartion vibrometrimittaukset, jossa mittauksen kohteena on itse elementti. Vahvistimen siirtofunktion ollessa $T_A(f)$, kaiutinelementin $T_B(f)$ (elementin korvakkeissa olevasta jännitteestä tilavuusnopeudeksi) ja kotelon $T_K(f)$ saadaan mitatulle signaalille lauseke

$$\boldsymbol{Y}(f) = \boldsymbol{V}(f)\boldsymbol{T}_{A}(f)\boldsymbol{T}_{B}(f)\boldsymbol{T}_{K}(f).$$
(5.1)

Vastaavasti mitattaessa elementtiä laservibrometrillä mitattu kaiutinkartion nopeus Z(f) saadaan lausekkeella

$$\mathbf{Z}(f) = \mathbf{V}(f)\mathbf{T}_{\mathrm{A}}(f)\mathbf{T}_{\mathrm{B}}(f).$$
(5.2)

Mittauksista saatavat vasteet ovat luonnollisesti aikarajoitettuja ja reaaliarvoisia aikaalueen impulssivasteita; elementin vibrometrimittauksissa $\chi(t)$ ja muissa y(t). Y(f) ja Z(f)saadaan näistä Fourier muuntamalla lausekkeilla

$$Y(f) = \int_{0}^{1} y(t)e^{-j2pft} dt,$$
(5.3)

$$\mathbf{Z}(f) = \int_{0}^{T} z(t)e^{-j2\mathbf{p}ft} \mathrm{d}t.$$
(5.4)

Kaavoissa T tarkoittaa mitatun impulssivasteen ajallista pituutta. Laskenta suoritetaan luonnollisesti diskreetissä muodoissa

$$Y_k(kDf) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} y_n e^{-j2pkn/N}$$
 ja (5.5)

$$\boldsymbol{Z}_{\boldsymbol{k}}(\boldsymbol{k}\boldsymbol{D}\boldsymbol{f}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} z_n e^{-j2\boldsymbol{p}\boldsymbol{k}\boldsymbol{n}/N}$$
(5.6)

nopealla algoritmilla (FFT). Kaavoissa (5.5-6) Y_k ja Z_k tarkoittavat impulssivastevektoreiden y_n ja z_n k:nnetta spektrikomponenttia (k = 1, 2, 3,...,N) taajuusresoluution ollessa $Af = f_s/N = 22100 \text{ Hz}/8192$ 2,7 Hz. Koska sekä $Y_k(f)$ että $Z_k(f)$ näinollen tunnetaan, itse kaiutinkotelon siirtofunktio $T_{K,k}(f)$ saadaan määritettyä helposti lausekkeella

$$\boldsymbol{T}_{\mathrm{K},k}(k\boldsymbol{D}f) = \frac{\boldsymbol{Y}_{k}(k\boldsymbol{D}f)}{\boldsymbol{Z}_{k}(k\boldsymbol{D}f)}.$$
(5.7)



Kuva 5.12. Mittaussysteemin sürtofunktioaskeleet.

5.8. Kompensointi (toteutus)

Kaiutinelementin kartiota mitattiin seitsemässä pisteessä radiaalisesti. Mittauspisteiden etäisyydet kartion keskipisteestä ovat: 0 mm, 15 mm, 23 mm, 27 mm, 33 mm, 45 mm ja 58 mm. Koska kartio ei ole äärettömän jäykkä, ovat nämä eri pisteissä mitatut vasteet hieman erilaisia. Kysymys kuuluukin, mikä niistä edustaa parhaiten kartion efektiivistä tilavuusnopeutta? Asian selvittämiseksi tehtiin koeluontoisia kompensointeja eräälle vasteelle käyttäen eri pisteistä mitattuja elementtivasteita. Kompensoidun impulssivasteen lopussa olevien häiriöiden suuruudesta pääteltiin kompensoivan elementtivasteen sopivuus. Mikäli kompensoitu vaste "kuolee pois" tasaisen rauhallisesti ja on muutenkin järkevän näköinen, voidaan otaksua kompensoivan vasteen olleen ainakin melkein "oikea". Elementistä mitattujen impulssivasteiden magnitudispektrithän ilmaisevat kartion nopeuden ja elementin korvakkeissa olevan jännitteen suhteen taajuuden funktiona (katso kuva 5.13). Kompensoinnin oleellisimpia tavoitteita on kuvassa 5.13 näkyvän vasteen laskun poisto tehtyjen mittausten magnitudispektreistä.

Kokeillen havaittiin, että parhaiten kompensointi tuntuu onnistuvat käyttämällä impulssivastetta, joka on mitattu 33 mm päästä elementin kalvon keskipisteestä (katso kuva 5.14). Kyseinen kohta tuntuu myös intuitiivisesti hyvältä. Elementin halkaisijaltaan 39 mm puhekela puskee kartiota ympyrällä, jonka säde on n. 20 mm. Tältä ympyrältä lähtee pinta-aalto kartiota pitkin kohti kumireunusta. On melko ilmeistä, että jollakin kohtaa puhekelan ja kumireunuksen välissä on kohta, jolta mitattu vaste edustaa hyvin koko elementin kokonaisvastetta.



Kuva 5.13. Elementin nopeutta edustavien impulssivasteiden magnitudispektrit mitattuina eri etäisyyksiltä kartion keskipisteestä. Ylhäältä alaspäin: 0 mm, 15 mm, 23 mm, 27 mm, 33 mm, 45 mm ja 58 mm.



Kuva 5.14. Kompensoidun vasteen loppuosa riippuen siitä, millä elementtivasteella kompensointi on tehty. Loppuosa on kiertyneenä impulssivasteen alkuun n. 50 näytteen matkalta ja kuvan oikeassa laidassa näkyy hieman impulssivasteiden alkua. Alhaalta ylöspäin: 0 mm, 15 mm, 23 mm, 27 mm, 33 mm (paksu käyrä), 45 mm ja 58 mm, jota vastaava elementtivaste on selvästi huonoin.

Lausekkeen (5.5) mukaisen laskennan toteuttamiseksi kirjoitettiin Matlab-ohjelma (compe.m). Se suodattaa alle 22 Hz ja yli 2150 Hz taajuuksia sekä lisäksi suorittaa näytetaajuuden puolituksen (22 050 Hz 11 025 Hz) yksinkertaisesti pudottamalla joka toisen näytteen pois. Voimakkaan kaistarajoituksen ansiosta minkäänlaista laskostumista ei tapahdu. Ohjelman keskeiset kohdat ovat:

 Suodatusvektorin cofu määrittely. Päästökaistalla suodatusvektorin arvo on 1 ja estokaistalla 0. Siirtymäkaistoilla (0-22 Hz ja 2150-4850 Hz) vektorin arvo painuu päästökaistan arvosta nollaan kohotetun kosinifunktion [1+cos(*wt*)]/2 muotoisesti (katso kuva 5.15). Ohessa on ote Matlab-ohjelmasta:

```
cofu(1:8192,1) = 0;
cofu(797:1796) = 0.5*cos([1:1000]/318)+0.5;
cofu(6398:7397) = 0.5*cos([1000:-1:1]/318)+0.5;
cofu(2:9) = 0.5*cos([8:-1:1]/2.5465)+0.5;
cofu(8185:8192) = 0.5*cos([1:8]/2.5465)+0.5;
cofu(10:796) = 1;
cofu(7398:8184) = 1;
```

2) Viiveen poisto elementin impulssivasteesta. Mittausjärjestelmä tuottaa ylimääräistä viivettä impulssivasteisiin. Yksinkertaisuuden vuoksi viive poistetaan kompensoi-vista vasteista ennen kompensointia. Viiveen pituus vasteissa on 542-544 näytettä. Näinollen kompensoitavan vasteen viive siirtyy sellaisenaan kompensoituihin vasteisiin. Järjestelyllä estetään kompensoitujen impulssivasteiden alkaminen näytevektorin loppupäästä (negatiivinen viive). Vastaava Matlab-koodi on (Kompensoitava impulssivaste on luettu vektoriin signal):

```
Ncomp = 544;
sig1(1:8192-Ncomp,1) = signal(Ncomp+1:8192,1);
sig1(8192-Ncomp+1:8192,1) = 0;
```

3) Kompensoidun spektrin laskenta. Matlab-ohjelmassa kompensoitava vaste on vektorissa sig2 ja kompensoiva vaste vektorissa sig1. kompensoidun vasteen spektri lasketaan aluksi vektoriin spcompe, joka kerrotaan suodatusvektorilla cofu (joka siis määriteltiin kohdassa 1). Tulos sijoitetaan vektoriin spc.

```
spcompe = fft(sig2)./fft(sig1);
spc = spcompe.*cofu;
```

4) IFFT ja desimointi. Käänteis-Fourier-muunnettu vaste desimoidaan lukemalla vain joka toinen näyte vektoriin signal. Aiemmin suoritetun suodatuksen ansiosta vältetään laskostumisilmiöt desimointivaiheessa. Desimoinnin jälkeen impulssivasteiden näytetaajuus on 11025 Hz ja pituus 4096 näytettä. Muistia kuluu 32960 tavua impulssivastetta kohti.

```
sig = real(ifft(spc));
signal = sig(1:2:N);
```



Kuva 5.15. Suodatusvektorin cofu muoto: a) pienillä taajuuksilla, b) suurilla taajuuksilla.

Edellä esitettyjen koodirivien lisäksi kompensointia varten kirjoitettu ohjelma sisältää paljon tiedostojen lukemiseen ja kirjoittamiseen liittyviä käskyjä. Mikrofonihilamittausten kompensointia varten ohjelmassa on 2 sisäkkäistä silmukkaa 90 mikrofonin vasteiden läpikäymiseen sekä niitä vastaavien tiedostonimien generointiin. Kompensoivien elementtivasteiden osalta käytettävissä olivat seuraavat tapaukset:

- 1) Kotelon seinämät pääsevät värähtelemään vapaasti, elementti sijoitettuna keskelle ja kotelo tyhjänä.
- 2) Kotelon seinämät pääsevät värähtelemään vapaasti, elementti sijoitettuna keskelle ja kotelossa 50 mm villaa.
- 3) Kotelon seinämät pääsevät värähtelemään vapaasti, elementti sijoitettuna keskellä ja kotelossa 100 mm villaa.
- 4) Kotelon seinämät pääsevät värähtelemään vapaasti, elementti sijoitettuna reunaan ja kotelo tyhjänä.
- 5) Kotelon seinämät pääsevät värähtelemään vapaasti, elementti sijoitettuna reunaan ja kotelossa 50 mm villaa.
- 6) Kotelon seinämät pääsevät värähtelemään vapaasti, elementti sijoitettuna reunaan ja kotelossa 100 mm villaa.
- 7) Kotelo upotettuna hiekkaan, elemetti sijoitettuna keskelle ja kotelo tyhjänä.
- 8) Kotelo upotettuna hiekkaan, elemetti sijoitettuna reunaan ja kotelo tyhjänä.

Vertailtaessa eri tilanteissa mitattuja vasteita todetaan niiden olevan keskenään lähes identtisiä. Taajuusalueella 100-2000 Hz vasteet eroavat toisistaan oikeastaan vain kotelomoodeista aiheutuvien resonanssipiikkien osalta, niiden ollessa vaimennettujen koteloiden tapauksissa huomattavasti vaimeampia. 5 kHz yläpuolella (siis elementille Seas P17 REX jo sopimattoman suurilla taajuuksilla) erot ovat selvempiä; jopa reuna- ja keskiasennuksen erot ovat nähtävissä. Kompensointi on suoritettu käyttäen aina mahdollisimman hyvin mittaustilannetta vastaavaa elementin impulssivastetta. "Väärillä" elementtivasteilla on jouduttu kompensoimaan ainoastaan silloin, kun kyseessä on ollut villalla vaimennettu kotelo upotettuna hiekkaan. Kompensointiin on näissä tapauksissa käytetty tyhjän kotelon vastaavia impulssivasteita (tapaukset 7 ja 8 yllä). Kuva 5.16 demonstroi "väärällä" vasteella kompensoinnin vaikutuksen. Vasemmalla on impulssivasteen magnitudispektri, kun sen kompensointiin on käytetty "oikeaa" elementtivastetta. Oikeanpuoleinen magnitudispektri esittää kompensointia "väärällä" impulssivasteella. Kompensoitu esimerkkivaste on mitattu vapaasti värähtelemään pääsevän 100 mm lasivillaa sisältävän kotelon sisällä mikrofonilla r8c0 mikrofonihilan ollessa kotelossa korkeudella 120 mm ja kaiutinelementin ollessa etulevyn keskellä. "Väärä"

elementtivaste edustaa tilannetta, jossa tyhjä kotelo on upotettuna hiekkaan ja kaiutinelementti on etulevyn reunassa.



Kuva 5.16. Väärällä elementtivasteella kompensoinnin vaikutus magnitudispektreihin: vasemmalla on kompensointi suoritettu oikealla elementtivasteella ja oikealla on käytetty mahdollisimman huonosti sopivaa elementtivastetta.

Vertailtaessa kuvan 5.16 magnitudispektrejä huomataan heti, että ne ovat muodoltaan hyvin samanlaisia lukuunottamatta n. 300 ja 500 Hz kohdalla olevia teräviä koteloresonansseja. Mielenkiintoista on se, että "väärä" magnitudispektri on sileämpi yli 1 kHz taajuuksilla.

5.9. Kompensoitujen vasteiden systemaattiset tiedostonimet

Kompensoitujen impulssivasteiden tiedostonimille pyrittiin luomaan mahdollisimman systemaattinen säännöstö. Suuren tiedostomäärän ohjelmallinen hallinta tulee helpommaksi, koska esim. tiedostojen lukemista varten on kirjoitettavissa melko vaivattomasti Matlab-koodi. Mikrofonihilavasteet on koottu hakemistoiksi siten, että yhden hilamittauksen 90 mikrofonin r0c0-r14c5 vasteet ovat samassa hakemistossa, jonka nimi ilmaisee hilakorkeuden ja muut mittausolosuhteet. Hakemistonimien muoto on seuraava:

$$\begin{cases} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ i \end{cases} + \begin{cases} f \\ s \end{cases} + \begin{cases} e \\ v \\ w \end{cases} + \begin{cases} m \\ r \\ w \end{cases} + \begin{cases} 04 \\ 08 \\ 12 \\ \vdots \\ 32 \end{cases} = \begin{cases} afem04 \\ \vdots \\ efer08 \\ \vdots \\ iswr32 \end{cases}$$

$$1. kirjain$$

$$1. kirjain$$

Taulukosta 5.2 selviää eri kirjainten merkitys. Esimerkiksi hakemistonimi iswm16 tarkoittaa mittausta, jossa kaiutinelementti on ollut etulevyn keskellä ja mikrofonihila 16 cm korkeudella hiekkaan upotetun kaiutinkotelon sisällä, jonka pohjalla on lisäksi 100 mm lasikuituvillaa.

1.	2.	3.	4.	
а				Mitattu oikeaa sivulevyä A (638 mm × 438 mm)
b				Mitattu takalevyä B (638 mm × 288 mm)
с				Mitattu ylälevyä C (438 mm × 288 mm)
d				Mitattu alalevyä D (438 mm × 288 mm)
e				Mitattu etulevyä E (638 mm × 288 mm)
f				Mitattu vasenta sivulevyä F (638 mm × 438 mm)
i				Mitattu kotelon sisäkenttää
	f			Kotelo pääsee värähtelään vapaasti
	S			Kotelo upotettuna hiekkaan
		e		Kotelossa ei ole lasivillaa
		v		Kotelossa on pohjalla 50 mm lasivillaa
		W		Kotelossa on pohjalla 100 mm lasivillaa
			m	Kaiutinelementti sijoitettuna keskelle etulevyä
			r	Kaiutinelementti sijoitettuna etulevyn reunaan

Taulukko 5.2. Kirjainten merkitys mikrofonihilamittausten hakemistonimissä.

Kiihtyvyysanturivasteiden tiedostonimet noudattavat melko samanlaisia logiikkaa. Mittauspisteiden koodaus on kuitenkin hieman mutkikkaampaa. Tiedostonimien rakenne on muotoa:

$$\begin{cases} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{cases} + f + \begin{cases} e \\ v \\ w \end{cases} + \begin{cases} m \\ r \\ w \end{cases} + \begin{cases} m \\ r \\ r \end{cases} + \\ 4. kirjain \\ 3. kirjain \end{cases} = \begin{cases} afem - p \\ \vdots \\ dfer - p \\ \vdots \\ ffwr - 46 \\ \vdots \\ -46 \end{cases}$$
tiedostonimi
$$\begin{cases} 5. ja 6. \\ 5., 6 ja 7. \end{cases} merkki$$

1

Neljällä ensimmäisellä kirjaimella on kiihtyvyysanturimittauksissa saatujen impulssivasteiden tiedostonimissä täysin samat merkitykset kuin mikrofonihilamittausten impulssivasteiden tiedostonimillä. Ensimmäinen kirjain ei kuitenkaan voi olla i, koska mitataan nimenomaan seinämiä eikä sisäkenttää. Toinen kirjain f on itse asiassa turha, koska hiekkaan upotetun kotelon seinämiä ei ole voitu mitata, mutta on mukana yhteneväisyyssyistä. Tiedostonimen loppuosa ilmaisee jälleen mittauspisteen. Kotelon joka sivulla on erikseen valittu kohta, joka merkitään tiedostonimeen loppuosalla -p. Näiden pisteiden kautta kulkevat seinämien normaalit leikkaavat koordinaattipisteessä (340 mm, 184 mm, 176 mm) kotelon ollessa sijoitettuna koordinaatistoon seuraavasti: sivujen B, D ja F (ulkopintojen) leikkauspiste on origossa ja sivujen A, C ja E (ulkopintojen) leikkauspiste koordinaattipisteessä (638 mm, 288 mm, 438 mm) (katso kuva 5.17). Seinämien keskipisteitä merkitään loppuosalla –m. Näiden mittauspisteiden lisäksi tehtiin sivulla A hilatyyppinen mittaus, jossa mittauspisteet muodostavat silmäkooltaan 10 cm \times 10 cm verkon. Nämä pisteet ilmaistaan kahdella numerolla, joista ensimmäinen kertoo vaakarivin ja toinen pystyrivin. Kaikki 4 × 6 mittauspisteestä saatua impulssivastetta on koottu hakemistoksi, jonka nimen neljä ensimmäistä kirjainta noudattavat taulukon 5.2 sääntöjä. Tiedostonimien loppuosan muodostavat kirjaimet dm (desimetri) silmäkoon merkiksi. Niinpä hakemistossa afvdm oleva tiedosto afvr-23 sisältää impulssivasteen, joka on mitattu sivun A toisen vaakarin ja kolmannen pystyrivin risteykohdassa kotelon ollessa varustettu 50 mm lasivillalla ja etulevyllä, jossa kaiutinelementti on reunassa.



Kuva 5.17. Kotelon seinämiltä valitut mittauspisteet.

5.10. Kompensoidut mittaukset

Aivan kaikkia mahdollisia mittauksia ei ole sentään tehty. Mikrofonihila- ja kiihtyvyysanturimittauksien kaikkien kombinaatioiden läpikäyminen tuottaisi n. 21 tuhatta impulssivastetta, jotka veisivät muistia kompensoitunakin noin 700 Mtavua! Symmetrian takia redundanttisia mittauksia on jätetty tekemättä; esim. oikea ja vasen sivulevy (A ja F) ovat symmetrisessä asemassa kaikissa mittauksissa ja lisäksi sivut C ja D käytettäessä elementin keskiasennusta. Lisäksi on huomioitava, että käytettäessä kotelon sisällä lasivillaa on alimpien hilakorkeuksien käyttö mahdotonta. Mikrofonihilamitauksien osalta löytyvätkin seuraavat hakemistot (jotka siis kaikki sisältävät impulssivastetiedostot r0c0.mat - r14c5.mat):

- ifem04 ifem32
- ifer04 ifer32
- ifvm08 ifvm32
- ifvr08 ifvr32

- ifwm12 ifwm32
- ifwr12 ifwr32
- isem04 isem32
- iser04 iser32
- isvm08 isvm32
- isvr08 isvr32
- iswm12 iswm32
- iswr12 iswr32
- bfer04, bfer08, efer04, efer08,
- afwm04, afwm08, bfwm04, bfwm08, cfwm04, cfwm08, efwm04, efwm08

Myös sellainen mittaus, jossa mikrofonihila on asetettuna pystyasentoon etulevyn E päälle on tehty käyttäen näytetaajuuksina 22 050 Hz ja 48 000 Hz. Kyseiset impulssivasteet löytyvät hakemistoista, jotka merkitään näytetaajuutta ilmaisevasti nimillä efer22 ja efer48.

Kiihtyvyysanturimittauksien tapauksessa löytyvät seuraavat impulssivastetiedostot:

- afer-p, bfer-p, cfer-p, dfer-p ja efer-p
- afem-m, bfem-m, cfem-m ja efem-m
- afvm-m, bfvm-m, cfvm-m ja efvm-m
- afwm-m, bfwm-m, cfwm-m ja efwm-m
- Hakemisto aferdm \rightarrow tiedostot afer-11 afer-46
- Hakemisto afvrdm \rightarrow tiedostot afvr-11 afvr-46
- Hakemisto afwrdm \rightarrow tiedostot afwr-11 afwr-46

5.11. "Kauko"kenttämittaukset

PATS-projektissa pyritään laskennallisin mallein selvittämään myös kaiuttimen synnyttämä kaukokenttä. Kiinnostavaa on kaiuttimen säteily eri suuntiin. Tästä syystä tehtiin Teknillisen korkeakoulun suuressa kaiuttomassa huoneessa reaalimaailman mittauksia, joihin laskentamalleilla saatuja tuloksia voidaan verrata. Kotelo mitattiin 1 metrin päästä joka sivulta siten, että mikrofoni sijaitsi sivujen keskipisteen kautta kulkevalla normaalilla. Ensiksi mitattiin tyhjä kotelo ja sen jälkeen vaimennettu kotelo, johon oli laitettu 50 mm paksuinen kerros lasikuituvillaa takasivua vasten. Tyhjän kotelon tapauksessa mitattiin myös etulevyn suuntaavuutta. Etulevy mitattiin sekä vaaka- että pystytasossa kulmissa 0°, 30°, 60° ja 90° elementin pyörähdysakseliin nähden. Kotelon etulevy oli kaikissa mittauksissa reuna-asennusversio.

5.11.1. Mittausjärjestely

Mikrofonina käytettiin yhden tuuman Brüel & Kjær Type 4145 kondensaattorimikrofonia. Mikrofoniesivahvistin oli B&K Type 2636 Measuring amplifier. Mittaustietokone oli Apple G3 ja käytetty ohjelmisto QuickSig. Herätesignaalina toimi 32 768 näytteen pituinen Schroeder-sekvenssi näytetaajuuden f_s ollessa 44,1 kHz. Päätevahvistimena toimi Luxman stereo amplifier M-120A, jonka oikeaa kanavaa käytettiin. Kaiuttimeen syötetty signaali oli tehollisarvoltaan 2,83 V. Syöttöjännitettä tarkkailtiin Fluke 45 Dual Display Multimeter yleismittarilla. Mittausjärjestely on esitetty kuvassa 5.18. Kaiutin seisoi nurkkapisteittensä alle asetettujen vanupalojen päällä kaiuttoman huoneen verkolla. Koteloa käännettiin mittausten välissä siten, että sen sivut osoittivat vuoronperään kohti mikrofonia. Joka kerta mikrofonin paikka "hienosäädettiin" mahdollisimman tarkaksi. Käytännössä verkon painuminen työskentelijän jalkojen alla sekä muut vastaavat seikat rajoittivat tarkkuuden muutamaan senttimetriin.



Kuva 5.18. Mittausjärjestely mitattaessa kaiuttimen synnyttämää äänikenttää 1 m päästä kaiutinkotelon joka sivusta.

5.11.2. Mittauslaitteiden asetukset

Mikrofoniesivahvistimen tulovahvistus (Input section gain) oli 30 dB, lähtövahvistus (Output section gain) 0 dB. Infraäänisuodin (22,4 Hz) oli käytössä. Näillä asetuksilla mittauskoneen äänikortille saapunut mikrofonisignaali oli juuri sopivasti yliohjausrajan alapuolella (noin 1 V) mitattaessa suurimman äänipainetason antavaa tapausta eli tyhjän kotelon etulevyä.

5.11.3. Raakavasteet

Mitatuista impulssivasteista lasketut magnitudispektrit kuvaavat kaiuttimen tuottamaa äänipainetasoa vapaassa kentässä mikrofonin kohdalle. Kohtisuoraan seinämien edestä 1 m päästä mitatut vasteet ilmenevät kuvasta 5.19. Vasteet on piirretty 20 dB välein. Vasemmalla ovat vasteet tyhjälle ja oikealla 50 mm lasikuituvillalla vaimennetulle kotelolle. Odotusten mukaisesti nimenomaan etulevyn edestä mitatut vaste edustaa mittaussarjan korkeinta äänipainetasoa koko taajuusalueella. Sivulevyiltä A ja F mitatut vasteet ovat lähes identtiset aivan kuten symmetrisyys edellyttääkin. Kotelon takaa mitatusta vasteesta ilmenee jo hyvin kaiuttimen kasvava suuntaavuus suuremmilla taajuuksilla. Edestä mitatussa vasteessa äänipainetaso 300 Hz ja 2000 Hz taajuuksilla on suunnilleen sama, mutta takaa mitatussa vasteessa tasoeroa on suuntaavuudesta johtuen syntynyt pienien taajuuksien hyväksi jo noin 10 dB. Lasikuituvillalla vaimennetun kotelon vasteet ovat odotetusti "pehmennettyjä" versioita vastaavista tyhjän kotelon vasteista. Todetaan, että viisi cm villaa kaiuttimen sisätilan takaseinällä ei vielä merkittävästi alenna kaiuttimen herkkyyttä.

Etulevyn eri suunnista tehtyjen mittausten raakavasteet esiintyvät kuvissa 5.20 ja 5.21. Myös näissä kuvissa eri vasteet on sijoitettu 20 dB välein. Kuvassa 5.20 vasteet on mitattuna vaakatasossa siten, että kulman kasvaessa mikrofoni liikkuu sivun A puolelle. Pyörähdysakselin kiintopiste on keskellä elementtiä etulevyn tasossa. Kulman kasvaessa nollasta arvoon 90° pienten taajuuksien (100-500 Hz) taso laskee n. 3 dB. Suurien taajuuksien (1500-2000 Hz) kohdalla äänipainetaso laskee suuntaavuudesta johtuen enemmän, 6-8 dB. Kuva 5.21 esittää pystytason kaiutinvasteita kulmissa \pm (0°, 30°, 60° ja 90°) siten, että negatiivinen arvo tarkoittaa kulmaa vaakatasosta alaspäin. Äänipaine laskee kulman (absoluuttiarvon) kasvaessa melko yhtenevästi vaakatason vasteiden kanssa, joskin \pm 90° kulmissa taso on laskenut hieman enemmän kuin vaakatason vastaavassa. Johtopäätelmänä todetaan suuntaavuuden olevan pystytasossa suurempi.



Kuva 5.19. Vapaakenttävasteet joka sivulta. Vasemmalla tyhjä kotelo ja oikealla lasivilla-palalla vaimennettu kotelo. Etulevyn E edestä mitattu äänipainetaso on luonnollisesti suurin.



Kuva 5.20. Raakavasteet mitattaessa vaimentamatonta kaiutinta vaakasuunnassa kulmista 0°, 30°, 60° ja 90°.



Kuva 5.21. Raakavasteet mitattaessa vaimentamatonta kaiutinta pystysuunnassa 1m etäisyydeltä kulmista 0°, $\pm 30^{\circ}$, $\pm 60^{\circ}$ ja $\pm 90^{\circ}$. Negatiivinen kulman arvo tarkoittaa vaakatason alapuoleisia kulmia.

5.11.4. Kompensoidut vasteet

Mittauksissa kerätyt impulssivasteet kuvaavat kaiuttimen vastetta kaiutinelementin napoihin syötetystä jännitteestä äänenpaineeksi mittauspisteeseen. Matemaattisissa malleissa heräte on kuitenkin kartion nopeus (mäntälähde). Jotta mitattujen ja simuloitujen vasteiden vertailu olisi mahdolista, on mitatut vasteet kompensoitava elementtivasteilla, jotka siis kuvaavat impulssivastetta vahvistinjännitteestä kartion nopeuteen. Kuvissa 5.22-27 on esitetty Sivuilta A-F mitattujen impulssivasteiden kompensoidut magnitudispektrit. Kuvissa on sijoitettu kunkin seinämän vasteet tyhjän ja vaimennetun kotelon tapauksessa allekkain 20 dB päähän toisistaan. Vastaavat kompensoidut vasteet etulevyn suuntaavuuden mittauksesta ovat kuvissa 5.28-29.



Kuva 5.22. Sivu A. Ylempi kuvaaja esittää vastetta tyhjälle kotelolle ja alempi 50 mm lasivillakerroksella vaimennettulle kotelolle.



Kuva 5.23. Sivu B. Ylempi kuvaaja esittää vastetta tyhjälle kotelolle ja alempi 50 mm lasivillakerroksella vaimennettulle kotelolle.



Kuva 5.24. Sivu C. Ylhäällä tyhjä kotelo ja alhaalla 50 mm lasivillakerroksella vaimennettu kotelo.



Kuva 5.25. Sivu D. Ylhäällä tyhjä kotelo ja alhaalla 50 mm lasivillakerroksella vaimennettu kotelo.



Kuva 5.26. Sivu E. Ylhäällä tyhjä kotelo ja alhaalla 50 mm lasivillakerroksella vaimennettu kotelo.


Kuva 5.27. Sivu F. Ylhäällä tyhjä kotelo ja alhaalla 50 mm lasivillakerroksella vaimennettu kotelo.



Kuva 5.28. Kompensoidut kulmavasteet 1 m päästä mitattuna vaakatasossa kulmista 0°, 30°, 60° ja 90° (kotelo tyhjä).



Kuva 5.29 Kompensoidut kulmavasteet 1 m päästä mitattuna pystytasossa kulmista $0^{\circ}, \pm 30^{\circ}, \pm 60^{\circ}$ ja $\pm 90^{\circ}$ (kotelo tyhjä).

5.12. Tulkintaa

Kotelon sisäkentän mittaukset eivät loppujen lopuksi tuottaneet mitään erityisiä yllätyksiä; onhan kovaseinäisen suorakulmaisen särmiön sisälle syntyvä äänikenttä pienillä taajuuksilla melko tarkasti ennustettavissa. Mittaukset osoittavat kuitenkin, että jo 5 cm lasivillakerros kotelon takaseinällä tasoittaa kaiuttimen toistoa huomattavasti. Tasoittuminen merkitsee tässä kapeiden resonanssipiikkien madaltumista, sillä kaiutinelementille ominaista laakeaa toistovastetta korostumisineen ja kuoppineen ei vaimennusmateriaalilla pysty oikomaan.

Kaiken kaikkiaan mikrofonihilamittauksia tuli määrällisesti tehtyä vähintään riittävästi. Rationaalisempaa olisi saattanut olla kotelon sisäisten mittausten tekeminen vain muutamasta huolellisesti valitusta pisteestä. Erilaisia akustisia tilanteita olisi kuitenkin voinut olla useampia (esimerkiksi tutkimus siitä, miten lasivilla paikka kotelossa vaikuttaa vasteisiin). Joka tapauksessa matemaattisilla malleilla tehdyjä simulaatioita voitiin verrata aitoihin mittaustuloksiin. kaiutinkartion nopeuden mittaaminen oli välttämätöntä, jotta kompensointi voitiin suorittaa. Kiihtyvysanturimittaukset kertovat seinämien värähtelystä.

Metrin päästä tehdyt äänikenttämittaukset antavat tietoa kotelon suuntaavuudesta ja säteilystä kaukokenttään yleensä. Esimerkiksi vertailemalla kuvan 5.19 vasteita E (etulevy) ja B (takalevy) selviää suoraan eteenpäin ja taaksepäin suuntautuvan äänisäteilyn suhde.

Luku 6

VÄRÄHTELYN ETENEMINEN MEKAANISESTI

6.1. Mittausten tarkoitus

Kaiutinkotelolle tehtiin kiihtyvyysanturilla tavanomaisten luvussa 5 selostettujen vibroakustisten mittausten lisäksi hieman kekseliäämpiä värähtelymittauksia, joilla pyrittiin selvittämään kotelovärähtelyjen *mekaanista* välittymistä kotelon seinämältä toiselle. Mittauksilla pyrittiin siis saamaan jonkinlainen tuntuma siihen, kuinka merkittävä osa sivuseinämien värähtelyistä johtuu sisäisestä sekä ulkoisesta äänikentästä ja kuinka suuri osuus välittyy mekaanisesti seinämältä toiselle. Tässä tapauksessa tutkittiin värähtelyn etenemistä etulevyltä E oikeanpuoleiselle sivulevylle A. Samalla tutkittiin myös kaiutinelementin magneetin värähtelyjä.

6.2. Koejärjestely

Mitattu kotelo oli siis sama suljettu kotelo kuin varsinaisissa luvussa 5 selostetuissa kotelomittauksissa. Erona oli kuitenkin nyt kaiutinelementin sijoitus etulevyyn "väärinpäin" siten, että sen magneetti puhekeloineen jäi kotelon ulkopuolelle. Temppu mahdollistaa värähtelyjen mittaamisen magneetista sekä kotelon seinämien värähtelymittaukset magneetin ollessa hyvin tuettuna. Kahdesta etulevyvaihtoehdosta oli käytössä jälleen reuna-asennusversio. Koska tutkittiin mekaanista värähtelyä, vapaakenttäolosuhteita ei katsottu tarpeellisiksi. Mittaukset tehtiin Teknillisen korkeakoulun Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorion kellarissa. Käytetyt mittausmenetelmät olivatkin luonteeltaan sellaisia, että tukeva betonilattia oli vain eduksi. Kotelo asetettiin siis betonilattialle pienten vaahtomuovipalojen varaan. Mittausjärjestely ilmenee kuvasta 6.1.

6.3. Mittauskalusto

Kiihtyvyysanturina käytettiin jälleen mallia B&K Type 4334 varausvahvistimen ollessa B&K Type 2635. Herätesignaali syötettiin kaiutinelementtiin Yamaha MX-70 päätevahvistimella. Mittauskoneena käytettiin putkimittauksissakin käytettyä Apple G3 tietokonetta. Mittaukset tehtiin nytkin QuickSig-ohjelmistolla herätesignaalin ollessa Schroeder-sekvenssi, jonka pituus oli 32 768 näytettä. Näytetaajuus oli 44,1 kHz, joten mitattujen impulssivasteiden ajallinen pituus oli n. 0,74 s. Käytössä oli myös Philips PM 3218 oskilloskooppi, jonka näytöltä näkyi varausvahvistimen antama signaali, sekä Fluke 45 Dual Display yleismittari päätevahvistimen lähtöjännitteen seurantaan.



Kuva 6.1. Mittausjärjestely tutkittaessa värähtelyn mekaanista etenemistä kaiutinkotelossa.

6.4. Mittalaitteiden asetukset

Varausvahvistimen herkkyysasetuksena oli 1-11 pC/m/s² ja vahvistuksena 1000 mV/ Unit. Mittauksen kohteena oli nopeus, jolloin "Unit" oli 0,01 m/s. Ala- ja ylärajataajuusasetuksina olivat 10 Hz ja 10 kHz. Päätevahvistimen antamaksi herätesignaalin jännitteeksi säädettiin 1,0 V_{rms}.

6.5. Tehdyt mittaukset

Aluksi tehtiin referenssiksi eräänlainen perusmittaus, jossa kiihtyvyysanturilla vuoronperään mitattiin etulevyn E ja sivulevyn A värähtelynopeuden impulssivasteet kotelon ollessa tyhjä ja vapaasti värähtelevä. Tällöinhän kaiutinelementin synnyttämä värähtely välittyy etulevyltä E sivuseinämälle A sekä akustisesti äänikentän kautta että mekaanisesti seinämien liitoksen kautta. Mittauspisteet sivuilla olivat samat kuin luvun 5 kappaleessa 5.9. esitetyt (katso myös kuva 5.17). Vertailemalla näistä mainituista kahdesta pisteestä mitattuja impulssivasteita voidaan niiden välinen riippuvuus selvittää. Vaikka impulssivasteiden välillä onkin vahva korrelaatio, on seinämillä myös omat resonanssitaajuutensa. Siksi impulssivasteista lasketut magnitudispektrit muistuttavat kyllä toisiaan, mutta omaavat myös toisistaan eroavia yksityiskohtia. Eroavuudet on tulkittava lähinnä seinämien omiksi resonansseiksi.

Seuraavassa mittauksessa pyrittiin eliminoimaan etulevyn E värähtely. Tätä varten pinottiin etulevyn päälle 16 kpl tiiliskiviä. Naarmuuntumisen estämiseksi etulevyn ja tiilien välissä oli sopivasti leikattu pahvilevyn pala. Jälleen mitattiin impulssivasteet levyjen E ja A mittauspisteistä. Lisäksi mitattiin impulssivaste kiihtyvyysanturin ollessa kiinnitettynä kaiutinelementin magneettiin. Selvää on, että jäykennetyn etulevyn värähtely on vapaata tapausta vaimeampaa, mutta kuinka paljon etulevyn vaimentaminen muuttaa sivuseinämän värähtelyä? Sen selvittäminen oli yksi mittauksen päämääristä.

Kolmannessa koejärjestelyssä edellisen mittauksen 16 tiiliskiveä poistettiin kotelon etulevyn päältä ja niistä 11 kpl pinottiin kaiutinelementin magneettiosan päälle (kieli keskellä suuta). Pyrittiin siis eliminoimaan magneetin värähtely. Etulevy oli nyt muuten vapaa värähtelemään.

Lopuksi tehtiin mittaus, jossa kaikki tiiliskivet oli poistettu kotelon päältä, mutta kaiuttimen sisäistä ja ulkoista äänikenttää oli vaimennettu. Kotelo oli ensinnäkin täytetty kokonaan lasikuituvillalla ja pumpulilla kuitenkin niin, että sivulevyn A ja vaimennusmateriaalin väliin jäi n. 1 cm suuruinen ilmarako. Tällä varmistettiin se, ettei vaimennusmateriaali estänyt sivulevyä A värähtelemästä vapaasti. Kotelon ulkopuolista äänikenttää vaimennettiin suurilla lasikuituvillalevyillä, jotta ääntä kulkeutuisi kaiutinelementiltä sivulevylle A mahdollisimman vähän. Mittaukset äänitasomittarilla (B&K Type 2203) antoivat ymmärtää, että A-painotettu äänipainetaso sivuseinän A vieressä oli vaimennuksen ansiosta laskenut n. 10 dB. Äänikentän vaimentaminen tehtiin joka tapauksessa niin, että kotelon seinämät pääsivät mahdollisimman vapaasti värähtelemään.

6.6. Kompensointi

Tässä mittaussarjassa olennaista on eri tilanteissa kerättyjen impulssivasteiden vertailu. Käytännössä lasketaan siis impulssivasteiden magnitudispektrien suhde. Näinollen minkäänlainen kotelomittauksissa käytetty kompensointi ei välttämättä ole tarpeen, mutta se kuitenkin tehtiin, jotta myös seinämien värähtelyn suhde kaiutinkartion tilavunsnopeuteen selviäisi. Kompensointi suoritettiin samalla tavalla kuin kotelomittausten tapauksessa lukuunottamatta muutamaa seikkaa.

Ensinnäkin on hyväksyttävä se tosiseikka, että kaiutinelementin asennus etulevyyn "nurinpäin" aiheuttaa aavistuksen virhettä käytettäessä elementtivasteita, jotka on mitattu elementin ollessa asennettuna oikeinpäin. Kotelon sisälle muodostuu tietenkin hieman erilainen äänikenttä kaiutinelementin magneetin ollessa kotelon ulkopuolella. Taajuusalueella 100 Hz – 2 kHz äänen aallonpituus on kuitenkin luokkaa 0,2 - 3,4 metriä, joten nyrkin kokoinen magneetti vaikuttaa äänikenttään merkittävästi vasta mainitun taajuusalueen yläpuolella. Asennettaessa elementti nurinpäin 60 litraisen kotelon sisätilavuus kasvaa alle prosentin (arviolta noin 0,3-0,4 litraa) joten tilavuusero voitanee jättää huomiotta. Mittauksissa järjestettyjen tilanteiden, äänikentän vaimennuksen sekä mekaanisen värähtelyn monenlaisen rajoittamisen takia kaikki olemassaolevat elementtivasteet ovat hieman vääränlaisia. Kaikki impulssivasteet kompensoitiin samalla vasteella, jotta niiden vertailu ei kärsisi (magnitudispektrien suhde pysyy ennallaan). Käytetty kompensointivaste edustaa tilannetta, jossa kotelo on tyhjä, elementti on sijoitettu etulevyn reunaan ja kartion värähtelyn mittauspiste on ollut 33 mm etäisyydellä elementin keskipisteestä.

Toinen huomattava seikka on se, että elementtivasteet, joilla värähtelymittauksien vasteet on kompensoitu, on saatu käyttämällä RPFS-sekvenssiä. Näytetaajuus niiden osalta on 22 050 Hz ja impulssivasteet ovat lisäksi 8 192 näytteen pituisia. Schroeder-sekvenssillä määritetyt värähtelyvasteet ovat sen sijaan 32 768 näytteen pituisia näytetaajuuden ollessa 44 100 Hz. Kompensointia varten kirjoitettiin Matlab-ohjelma. Jotta kompensointi onnistuisi jakamalla kompensoitavan impulssivasteen magnitudispektri kompensoivan vastaavalla on niiden siis oltava "samaa formaattia". Elementtivasteiden näytetaajuus kaksinkertaistetaan ohjelmassa käyttämällä Matlabin funktiota **interp**. Tämän jälkeen 16 384 näytteen pituiset elementtivasteet kasvatettiin 32 768 näytteen pituisiksi yksinkertaisesti lisäämällä niiden loppuun nollia. Suodatusvektori **cofu** sai tällä kertaa muodon:

```
cofu(1:N,1) = 0;
cofu(Nstart:Nen) = 0.5*cos([0:Nend-Nstart]/Ncos)+0.5;
cofu(N+2-Nend:N+2-Nstart) = 0.5*cos([Nend-Nstart:-1:0]/Ncos)+0.5;
cofu(Mstart:Mend) = 0.5*cos([Mend-Mstart:-1:0]/Mcos)+0.5;
cofu(N+2-Mend:N+2-Mstart) = 0.5*cos([0:Mend-Mstart]/Mcos)+0.5;
cofu(1) = 0;
cofu(Mend:Nstart) = 1;
cofu(N+2-Nstart:N+2-Mend) = 1;
```

Funktio **cofu** muistuttaa siis muodoltaan luvussa 5 määriteltyä funktiota **cofu**. (kts. kuva 5.15). Vakioiden ja muuttujien arvot ovat ohjelmassa seuraavanlaiset:

```
N = 32768; % Schröder-sekvenssin pituus näytteinä
Ns = 8192; % RPSF herätteen pituus näytteinä
Srate = 44100; % Schröder-sekvenssin näytetaajuus [Hz]
Ssrate = 22050; % RPFS herätteen näytetaajuus [Hz]
cutstart = 4000; % Alipäästösuodatuksen alku [Hz]
cutend = 5000; % Alipäästösuodatuksen loppu [Hz]
fstart = 1; % Ylipäästösuodatuksen alku [Hz]
fend = 20; % Ylipäästösuodatuksen loppu [Hz]
               % Kompensoivan vasteen alkuviive näytteinä
Ncomp = 544;
Mstart = round(fstart/Srate*N)+1; % Nämä
Mend = round(fend/Srate*N)+1; % koodirivit
Mcos = (Mend-Mstart)/pi; % skaalaavat
Nstart = round(cutstart/Srate*N)+1; % vakioiden arvoja
Nend = round(cutend/Srate*N)+1; % asteikolta
Ncos = (Nend-Nstart)/pi; % toiselle
```

Vektori **cofu** siis suodattaa kohotetun kosinifunktion muotoisesti alle 20 Hz ja yli 4 kHz taajuuksia. Toisin kuin putkimittauksissa suurtaajuinen informaatio on täysin relevanttia, mutta PATS-projektin puitteissa kiinnostuksen ulkopuolella.

Mittausohjelmiston tuottaman bulkkiviiveen poisto sekä edellä mainitut interpolointi oikeaan näytetaajuuteen ja nollien lisäys impulssivasteen loppuun tapahtuivat koodiriveillä:

```
sig(1:Ns-Ncomp,1) = signal(Ncomp+1:Ns,1); % Viiveen poisto
sig(Ns-Ncomp+1:Ns,1) = signal(1:Ncomp); % Viiveen poisto
sig = interp(sig,Srate/Ssrate); % Näytetaajuuden tuplaus
```

sig(Ns*Srate/Ssrate+1:N) = 0; % Nollien lisäys

missä kompensoiva vaste on ladattu vektoriin **signal** ja käsittelyn jälkeen on luettavissa vektorista **sig**. Tämän jälkeen vektoriin **signal** luetaan tiedostosta kompensoitava vaste ja suoritetaan koodirivit:

```
spcompe(:,i) = fft(signal)./fft(sig).*cofu;
signal = real(ifft(spcompe(:,i)));
```

Nyt vektori **signal** sisältää kompensoidun vasteen. Voimme siirtyä viimein mittaustulosten analysointivaiheeseen.

6.7. Mittaustulosten analysointi

Kompensoitujen vasteiden magnitudispektrit taajuusalueella 50 Hz – 2000 Hz ilmenevät kuvista 6.2-5. Käytetty notaatio on seuraava:

- A0 ja E0: Sivut A ja E on mitattu kotelon ollessa tyhjä. Kaiuttimen seinämät pääsevät lisäksi värähtelemään vapaasti.
- A1 ja E1: Sivut A ja E on mitattu etulevyn värähtelyn ollessa vaimennettu. Etulevyn päälle on kasattu tiiliskiviä. Kotelo on tyhjä.
- A2 ja E2: Sivut A ja E on mitattu magneetin värähtelyn ollessa vaimennettu tiiliskivillä. Kotelo on kuitenkin tyhjä.
- A3 ja E3: Sivut A ja E on mitattu äänikentän ollessa vaimennettu. Kotelo on täytetty kokonaan vaimennusmateriaalilla ja sen ulkopuolelle on aseteltu kookkaita lasivillalevyjä (56 cm × 86 cm × 5 cm). Seinämät pääsevät kuitenkin värähtelemään mahdollisimman vapaasti.

Kuva 6.2. ilmaisee vapaan värähtelyn taajuuden funktiona sivuilla E ja A valituissa mittauspisteissä kotelon ollessa tyhjä. Vasteissa esiintyy yhteneviä resonanssipiikkejä joillakin taajuuksilla. Jotkin niistä selittyvät värähtelyn etenemisestä seinämältä toiselle liitoskohdan kautta. Resonansseja näkyy myös eri taajuuksilla ja niiden taas voidaan olettaa aiheutuvan äänikentästä, koska koteloon tietenkin muodostuu seinämäparien välille kotelon dimensioiden määräämät seisovat aallot.

Kuvan 6.3 magnitudispektrit edustavat mittaustilannetta, jossa etulevyä on vaimennettu 16 tiiliskivellä. Alle 700 Hz taajuuksilla vaimennetun etulevyn värähtely onkin keskimäärin selvästi vaimeampaa kuin vapaana värähtelevän kotelon tapauksessa. Ero näkyy selvästi kuvassa 6.7, josta ilmenee magnitudispektrien "E1" ja "E0" suhde desibeleinä. Yli 700 Hz taajuuksilla värähtely ei yllättävää kyllä ole vaimennetussa etulevyssä oikeastaan ollenkaan vaimeampaa. Värähtelymoodit muuttuvat hieman, mutta keskimääräinen taso pysyy samana. Vertailtaessa kuvan 6.7 sivulta A mitattujen magnitudispektrejä "A0" ja "A1" havaitaan värähtelymoodien nytkin muuttuvan, mutta värähtelyn keskimääräinen voimakkuus pysyy tarkasti samana (magnitudispektrien suhdetta kuvaava käyrä mutkittelee tasapuolisesti molemmin puolin asteikon viivaa 0 dB).



Kuva 6.2. Seinämien A ja E värähtelynopeuden magnitudispektrit, kun kotelo on tyhjä ja seinämät pääsevät värähtelemään vapaasti.

Määritellään kahden spektrin Y_1 ja Y_2 , jotka on diskreetillä Fourier-muunnoksella impulssivasteista laskettu, energiasuhde $a(Y_1, Y_2, f_1, f_2)$ taajuusalueella $f_1 - f_2$ seuraavasti:

$$\boldsymbol{e}(\boldsymbol{Y}_{1}, \boldsymbol{Y}_{2}, f_{1}, f_{2}) = \frac{\sum_{k=Nf_{1}/f_{s}}^{Nf_{2}/f_{s}} |\boldsymbol{Y}_{1}(k\boldsymbol{D}f)|^{2}}{\sum_{k=Nf_{1}/f_{s}}^{Nf_{2}/f_{s}} |\boldsymbol{Y}_{2}(k\boldsymbol{D}f)|^{2}}.$$
(6.1)

Taajuudet f_1 ja f_2 on luonnolliseti valittava siten, että lausekkeessa (6.1) olevien summien ala- ja yläindeksit Nf_1/f_s ja Nf_2/f_s ovat kokonaislukuja väliltä 0 – N/2. Taajuusresoluutio saadaan lausekkeesta $Df = f_s/N$, missä f_s on näytteenottotaajuus.

Lauseketta (6.1) soveltamalla saadaan seuraavanlaisia energiasuhteita: $a(Y_{E1}, Y_{E0}, 100 \text{ Hz}, 2 \text{ kHz}) = 0,4091$ ja $a(Y_{A1}, Y_{A0}, 100 \text{ Hz}, 2 \text{ kHz}) = 1,0918$. Toisin sanoen taajuusalueella 100-2000 Hz sivuseinämältä A mitatun värähtelynopeutta kuvaavan impulssivasteen kokonaisenergia ei pienene vaimennettaessa etuseinämän E värähtelyä. Herää epäilys, että sivuseinämän värähtely johtuisi suurimmaksi osaksi äänikentästä kotelon sisä- ja ulkopuolella.

Vertailemalla kuvia 6.4 ja 6.2 havaitaan seinämän A värähtelynopeuden olevan hyvin samankaltainen riippumatta siitä, onko kaiutinelementin magneetin päälle kasattu tiiliskiviä vai ei. Selvästi tämä näkyy myös kuvasta 6.9. Seinämän E värähtely sentään vaimenee alle 400 Hz taajuuksilla sekä lisäksi taajuusalueella 1,0-1,2 kHz (kts. kuva 6.9). Huomionarvoista on myös sivun E resonanssipiikkien terävöityminen, kun magneettia on vaimennettu tiiliskivillä. Energiasuhteiksi saadaan nyt: $d(Y_{E2}, Y_{E0}, 100 \text{ Hz}, 2 \text{ kHz})$ = 1,6419 ja $d(Y_{A2}, Y_{A0}, 100 \text{ Hz}, 2 \text{ kHz}) = 1,0031.$



Kuva 6.3. Seinämien A ja E värähtelyn magnitudispektri, kun kotelo on tyhjä ja etulevyn E värähtelyä on vaimennettu kasaamalla sen päälle 16 kpl. tiiliskiviä.



Kuva 6.4. Seinämien A ja E värähtelyn magnitudispektri, kun kotelo on tyhjä ja kaiutinelementin magneetin päälle on kasattu 11 kpl. tiiliskiviä.

Kuvassa 6.5 on seinämien A ja E värähtelyn magnitudispektrit, kun kotelon sisä- ja ulkokenttää on vaimennettu. Silmiinpistävää ja odotusten mukaista on spektrien pehmentyminen sekä resonanssien (ja antiresonanssien) madaltuminen. Kuva 6.11 osoittaa, että äänikentän vaimentaminen pienensi värähtelyä keskimäärin noin 10 dB lukuunottamatta aivan pienimpiä taajuuksia (alle 400 Hz). Energiasuhteet ovat: $a'(Y_{E3}, Y_{E0}, 100 \text{ Hz}, 2 \text{ kHz}) = 0,3466 ja <math>a'(Y_{A3}, Y_{A0}, 100 \text{ Hz}, 2 \text{ kHz}) = 0,0851.$

Merkittävä piirre kuvassa 6.5 on sivuja A ja E vastaavien magnitudispektrien peilikuvamainen käyttäytyminen, joka on silmiinpistävän selvää yli 1 kHz taajuuksilla. Toisin sanoen seinämän A värähdellessä suurella amplitudilla seinämä E värähtelee vain hieman ja päinvastoin. Ilmiön selitys voisi olla seuraava: kun seinämän taivutus välittyy toisiin seinämiin niiden liitoskohtien kautta, säilyy liitoskohdan suora kulma miltein muuttumattomana ja tästä aiheutuu viereisten seinämien taipuminen esim. "sisäänpäin" taivutettaessa jotakin seinämää "ulospäin" (katso kuva 6.13a). Jos taas seinämien taipuminen aiheutuu kotelon sisäisestä paineenvaihtelusta, taipuvat kaikki seinämät "samaan suuntaan" (kuva 6.13b). Todellisuudessa molemmat mekanismit vaikuttavat samanaikaisesti ja ilmiöiden voimakkuussuhde määrää lopullisen taipuman. Kun äänikenttää ei ole vaimennettu, on paineenvaihtelun vaikutus keskimäärin suurempi, mutta kun sisäistä (ja ulkoista) äänikenttää vaimennetaan, tulee kuvan 6.13 mekamismeista tasaveroisemmat. Jokseenkin yhtä voimakkaina ne aiheuttavat joillakin sivuilla taipuman kasvamista, mutta viereisillä sivuilla kumoavat vastakkaisvaiheisina toisiaan. Edellä käsiteltiin yksinkertaisuuden vuoksi alimman moodin värähtelyä mutta sama pätee myös korkeampiin moodeihin sekä tietysti niiden erilaisiin kombinaatioihin.



Kuva 6.5. Seinämien A ja E värähtelyn magnitudispektri, kun kotelon sisä- ja ulkokenttää on vaimennettu.



Kuva 6.6. Seinämien A ja E värähtelyn magnitudispektrien suhde kun kotelo on vapaana ja kun etulevyn E päälle on kasattu 16 kpl. tiiliskiviä.

Kuvassa 6.12 on esitetty kaiutinelementin magneetin värähtely kahdessa eri tapauksessa. Toisessa kaiutinelementti on kotelossa kiinni ja etulevyä on vaimennettu kasaamalla sen päälle 16 kpl tiiliskiviä. Toinen käyrä kuvaa tilannetta jossa elementti on ruuvattu irti kotelosta ja asetettu betonilattialle magneetti ylöspäin. Elementin kiinnityslaipan päälle kasattiin neljään kohtaan yhteensä 16 tiiliskiveä ja näiden päälle vielä massiivisia teräslevyjä (katso kuva 6.14). Tavoittaana oli saada elementin kiinnityslaippa (josta elementti kiinnittyy koteloon) mahdollisimman vähän värähteleväksi. Jotta kaiutinkartio ja betonilattia eivät olisi muodostaneet haitallista tiivistä painekammiota, laitettiin kiinnityslaipan ja lattian väliin kiinnitysruuvit, jolloin syntyi muutaman millimetrin rako.Voimakkain resonanssi näkyy koteloon kiinnitetyn elementin magneetissa n. 250 Hz kohdalla ja lattiaa vasten tuetun elementin tapauksessa hieman korkeammalla.



Kuva 6.7. Seinämistä E ja A mitatun värähtelyn magnitudispektrien suhde tapauksissa joissa kotelo on ollut vapaana ja kun etulevyn E päällä on ollut 16 kpl tiiliskiviä.



Kuva 6.8. Seinämien A ja E värähtelyn magnitudispektrien suhde kun kotelo on vapaana ja kun kaiutinelementin magneetin päälle on kasattu 11 kpl tiiliskiviä.



Kuva 6.9. Seinämistä E ja A mitatun värähtelyn magnitudispektrien suhde tapauksissa joissa kotelo on ollut vapaana ja kun kaiutinelementin magneetin päällä on ollut 11 kpl. tiiliskiviä.



Kuva 6.10. Seinämien A ja E värähtelyn magnitudispektrien suhde kun kotelo on vapaana ja kun kotelon ulkoista ja sisäistä äänikenttää on vaimennettu.



Kuva 6.11. Seinämistä E ja A mitatun värähtelyn magnitudispektrien suhde tapauksissa joissa kotelo on ollut vapaana ja kun kotelon ulkoista ja sisäistä äänikenttää on vaimennettu.



Kuva 6.12. Kaiutinelementin magneettin värähtelyn magnitudispektri, kun kotelo on tyhjä ja etulevyn E päällä on 16 kpl tiiliskiviä ja kun elementti on asetettu lattialle ja sen kiinnityslaippa on tuettuna kunnolla.

Tämä selittyy sillä, että etulevy lisää värähtelevää massaa eli pienentää resonanssitaajuutta. Kuten kuvasta 6.12 ilmenee, on värähtelytaso vasteiden kesken melko sama. Yli 800 Hz taajuuksilla värähtelyn magnitudispektrit ovat melko tasaisia joskin 1200 – 1300 Hz kohdalla on kotelomittauksen tapauksessa heilahtelua, joka lienee etulevyn värähtelyä. Magneetin värähtelyn taso on kuitenkin melko suuri, samaa luokkaa kuin seinämien tapauksessa. Betonilattiaa vasten tehdyn mittauksen tarkoitus oli varmistaa että magneetin värähtely (suhteessa kiinnityslaippaan) on todellakin mitattua tasoa.



Kuva 6.13. Poikkileikkaus seinämien keskinäisestä taipumisesta: a) kun taivutus välittyy kulmaliitoksen kautta (liitoskohdassa säilyy 90 asteen kulma), b) kun taipuminen johtuu paineenvaihtelusta (äänikentästä) kotelon sisällä.



Kuva 6.14. Kaiutinelementin magneetin värähtelyjen mittaus siten, että kiinnityslaippa on tuettu tiiliskivien ja teräslevyn massalla betonilattiaa vasten. Lattian ja kiinnityslaipan välissä on elementin kiinnitykseen tarkoitettujen ruuvien kantaosa, joten kartion ja lattian väliin ei synny haitallista tiivistä painekammiota.

Luku 7

KAIUTINKARTION MITTAUKSET

7.1. Johdanto

Yksi hankalimpia matemaattisesti mallinnettavia asioita kaiuttimessa on itse kartio. PATS-projektissa kaiutinelementin fysikaalisena mallina käytettiin aluksi ideelista mäntälähdettä määriteltäessä kaiutin mallinnusohjelmiin. Kaiutinelementin kartio ei kuitenkaan ole äärettömän jäykkä, yhtenäisesti värähtelevä tasolevy, vaan se on akustiselta käyttäytymiseltään paljon monimutkaisempi. Jotta kaiutinelementin mallia voisi tarkentaa, on saatava mitattua tietoa elementin käyttäytymisestä. Kiihtyvysantureiden käyttö kaiutinkartion nopeuden mittaamiseen on problemaattista, koska niiden massa muuttaa helposti mekaanisia ominaisuuksia ja lisäksi niiden kiinnitys kartioon on hankalaa. Paljon kätevämpää on käyttää kartion nopeuden mittaamiseen laservibrometria. Mittaamalla lisäksi mikrofonilla äänipaine aivan kartion pinnan läheisyydessä saadaan informaatiota kartion akustisesta säteilystä.

7.2. Koejärjestelyt

Laservibrometrimittausten tekeminen kaiuttomassa huoneessa heiluvan verkon päällä olisi melko mahdotonta ja kaiken lisäksi turhaa. Tukeva lattia mittausalustana on sitävastoin tärkeä vaatimus. Jopa *äänikentän* mittaus kartion pinnalla tuottaa helposti hyvän signaali-kohinasuhteen muuallakin kuin kaiuttomassa huoneessa. Mittaukset tehtiinkin siksi Teknillisen korkeakoulun Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorion kellaritiloissa, tukevalla betonilattialla.



Kuva 7.1. Mittausjärjestelmä vibrometrimittauksissa.

Vibrometrimittauksissa itse laserpää asetettiin noin metrin etäisyydelle kaiutinkotelosta. Kartiosta valittiin edustavalta tuntuva joukko mittauspisteitä, joista pinnan nopeuden impulssivaste mitattiin (katso kuva 7.2). Koejärjestely on kuvassa 7.1.

Äänipainemittauksissa mikrofoni asetettiin vuoronperään eri mittauspisteiden kohdalle siten, että juuri mittauspiste oli aina mahdollisimman tarkasti 1 cm etäisyydellä mikrofonin keskikohdasta. Kotelo seisoi vanupalojen varassa betonilattialla. Peilikuvaperiaatteen avulla arvioituna lattiaheijastuksen taso oli noin 40 dB suoraa ääntä vaimeampi. Kotelon eteen lattialle asetettiin kuitenkin vielä lasivillaa, joka lisää vaimennusta etenkin suurilla taajuuksilla. Mittausjärjestely ilmenee kuvasta 7.3.

7.3. Mittauskalusto

Vibrometrimittauksissa käytetty laser oli Polytec OFV 303 Sensor head ja sitä ohjasi Polytec OFV 3001 Vibrometer controller. Kaiutinta ajavana päätevahvistimena toimi Yamaha MX-70 ja mittaustietokoneena Apple G3. Mittausohjelmistona oli käytössä nytkin QuickSig.

Myös äänikenttämittauksissa mittauskoneena toimi Apple G3 ja mittausohjelmistona QuickSig. Päätevahvistin oli Yamaha MX-70. Mikrofoni oli yhden tuuman Brüel & Kjær Type 4145 kondensaattorimikrofoni. Esivahtimena toimi B & K Type 2636 Measuring Amplifier. Vahvistinjännitettä tarkkailtiin yleismittarilla (Fluke). Herätesignaali oli 32 768 näytteen pituinen Schroeder-sekvenssi 44,1 kHz näytetaajuudella.

7.4. Mittalaitteiden asetukset

Päätevahvistimen syöttämäksi jännitteeksi asetettiin 1,0 V_{rms}. Vibrometrimittauksissa ohjausyksikön asetukset olivat: herkkyys (Velocity range) 125mm/s/V, Tracking filter asennossa off ja nopeuden alipäästösuodin (Velocity filter) 5 kHz. Herätteenä toimi 32 768 näytteen pituinen Schroeder-sekvenssi näytetaajuuden ollessa 44,1 kHz. Keskiarvoistus tapahtui 20 herätesekvenssin yli. Äänipainemittauksissa kaiutinta syötettiin samalla jännitteellä kuin vibrometrimittauksissa, siis 1,0 V_{rms}. Mikrofoniesivahvistimen tulovahvistus oli 30 dB ja lähtövahvistus 0 dB. Pientaajuisia häiriöitä vaimennettiin infraäänisuotimella (22,4 Hz).

7.5. Tehdyt mittaukset

Mittaukset tehtiin lähinnä tyhjälle kotelolle. Kartion nopeus mitattiin vibrometrillä halkaisijaa pitkin 1 cm välein sekä vaaka- että pystysuunnassa. Lisäksi kartion nopeus mitattiin 90 asteen matkalta 22,5° välein 33 mm päästä kartion keskipisteestä. Elementin kiinnityslaipan nopeus mitattiin kolmesta paikasta: ylhäältä, alhaalta ja kiinnitysruuvin vierestä. Mittauspaikat on havainnollistettu kuvassa 7.2. Nämä pisteet mitattiin siis kaiutinkotelon ollessa tyhjänä. Lasivillalla vaimennetun kotelon tapauksessa kartion nopeus mitattiin vaakatason halkaisijaa pitkin kartion vasemmalta puoliskolta pisteissä, joiden etäisyys keskipisteestä on 0 cm, 3 cm ja 6 cm.



Kuva 7.2. Mittauspisteet tyhjän kotelon tapauksessa. Mustat neliöt kuvaavat vaakaja pystytasossa tehtyjä mittauksia halkaisijaa pitkin 1 cm välein. Harmaat neliöt esittävät mittauspisteitä 33 mm päästä kartion keskipisteestä kulmissa 0°, 22,5°, 45°, 67,5° ja 90°. Kiinnityslaippa mitattiin mustien pallojen kohdalta.

Nopeusvasteista havaittiin kotelon olevan akustisestikin erittäin symmetrinen vaakasuunnassa, joten äänipainemittaukset tehtiin vain kartion oikealle puoliskolle. Pystysuunnassa mitattiin kuitenkin koko halkaisija. Vaimennetun kotelon tapauksessa mitattiin ainoastaan kolme kontrollipistettä samoista kohdista kuin nopeusvasteet oli mitattu vaimennetusta kotelosta.



Kuva 7.3. Mittausjärjestely mitattaessa äänipainetta kartion pinnan läheisyydessä.

7.6. Mittaustulosten analysointi

7.6.1. Kartio

Vertailemalla aika-alueessa kartion nopeuden impulssivasteita eri kohdista kartiota saadaan näkyviin kartion taivutusaallon säteittäinen eteneminen. Lyhyt pätkä nopeuden impulssivastetta mitattuna niin vaaka- kuin pystysuunnassa on esitetty kuvassa 7.4. Välittömästi havaitaan, että pienin viive on niillä impulssivasteilla, jotka on mitattu 3 cm etäisyydeltä kartion keskipisteestä. Viive kasvaa mentäessä joko lähemmäs tai kauemmas kartion keskipistettä. Tämä johtuu siitä, että halkaisijaltaan 29 mm puhekela on kiinnitetty kartion tyveen, josta taivutusaalto etenee kartion ulkoreunaa kohti (kts. kuva 7.5). Edettyään n. 1 cm se kohtaa pölykupin kiinnityskohdan. Taivutusaalto jakautuu tässä kohtaa kahteen osaan. Osa siitä jatkaa edelleen kohti elementin reunaa loppuosan kulkiessa pölykuppia pitkin kohti elementin keskipistettä. Kuvassa 7.4 tämä ilmiö näkyy selvästi. Taivutusaallon enenemisnopeus impulssivasteista määritettynä on luokkaa 200 m/s.

Kuvassa 7.6. on esitetty päällekkäin osa impulssivasteiden alkua mittauksesta, jossa kartion nopeutta tutkittiin kuvan 7.2 harmaiden neliöiden kohdalta. Havaitaan, että merkittävää eroa niiden välillä ei näytä olevan. Laskettaessa magnitudispektri ja vaihespektri (kuva 7.7) saadaan lisävarmistusta siihen, ettei kartion nopeudessa ole merkittäviä eroja kulman muuttuessa. Suurimmat erot johtunevat siitä, että kotelon sisäiset seisovat aallot vaikuttavat hieman eri tavoin kartion akustiseen kuormitukseen sen eri kohdissa. Suurinta epäyhtenäisyyttä näyttää esiintyvän taajuusalueella 600-800 Hz sekä yli 1500 Hz taajuuksilla.



Kuva 7.4. Impulssivasteen viiveet mittauspaikan funktiona.



Kuva 7.5. Taivutusaallon eteneminen kaiutinkartion pinnalla.



Kuva 7.6. Impulssivasteiden alkuosa eri kulmista mitattuna. Pisteiden etäisyys 33 mm elementin keskipisteestä.



Kuva 7.7. Etäisyydeltä 33 mm elementin keskipisteestä 22,5° välein mitattujen impulssivasteiden Fourier-muunnokset. Vasemmalla magnitudispektrit (alhaalla 0° ja ylhäällä 90°) ja oikealla vaihespektrit.

Kuva 7.8 esittää kartion nopeuden magnitudispektrin muuttumista taivutusaallon kulkiessa pitkin kartiota. Magnitudispektrit on kompensoitu kartion keskipisteestä etäisyydeltä 3 cm mitatulla vasteella, jolloin mainittua mittauspistettä vastaavan impulssivasteen magnitudispektristä tulee viivasuora (eli aika-alueessa tämä impulssivaste on kompensoinnin vuoksi *impulssi*.). Alle 800 Hz taajuuksilla magnitudispektrin muuttuminen paikan funktiona on erittäin vähäistä. Kilohertziä suuremmilla taajuuksilla kartion nopeus pyrkii kasvamaan muutaman desibelin lukuunottamatta elementin reunaa (6 cm), jossa suuret taajuudet ovat jo vaimentuneet. Suoraviivaisin selitys ilmiölle on kartion "hölskyminen", mikä kasvattaa kartion pinnan nopeutta kaikkialla muualla paitsi puhekelan kiinnityskohdassa ja suuren mekaanisen resistanssin omaavan (häviöllisen) kumireunuksen lähellä.



Kuva 7.8. Kartion nopeuden magnitudispektrin muuttuminen taivutusaallon kulkiessa pitkin kartiota. Vasteet on kompensoitu 3 cm kohdasta mitatulla vasteella havainnollisuuden vuoksi.

Kuvassa 7.9 on esitetty alkuosa äänikentän impulssivasteista, jotka on mitattu vaakatasossa 1 cm välein. Vastaavat impulssivasteet pystysuunnassa mitattuna ovat kuvassa 7.10. Tyypillinen piirre vasteissa on se, että mitattu äänipainetaso laskee siirryttäessä elementin keskikohdasta kohti reunaa. Tämä ei tietenkään ole yllättävää, sillä näinhän pitäisikin käydä siirryttäessä kauemmaksi ääntä säteilevän kappaleen akustisesta keskipisteestä. Vaakatason impulssivasteiden taajuusalueen esitykset ovat kuvassa 7.11 ja pystytason vastaavat kuvassa 7.12.



Kuva 7.9. Alkuosa vaakatasossa mitatuista impulssivasteista tyhjän kotelon tapauksessa. Pisteviivalla on piirretty ensimmäisenä alkava vaste (3 cm etäisyydellä elementin keskikohdasta mitattu).



Kuva 7.10. Alkuosa pystytasossa mitatuista impulssivasteista tyhjän kotelontapauksessa. Pisteviivalla on piirretty ensimmäisinä alkavat vasteet (3 cm etäisyydellä elementin keskikohdasta mitatut).

7.6.2. Kiinnityslaippa

Kaiutinelementin kiinnityslaipan ja kartion värähtelynopeutta taajuuden funktiona on verrattu kuvassa 7.15. Todetaan laipan nopeuden olevan keskimäärin n. 20 dB kartion nopeutta pienempi. Kuvassa 7.16 on esitetty laipan nopeuden impulssivasteen alkuosa mitattuna kolmesta eri pisteestä (kts. kuva 7.2). Laipan impulssivasteita verratessa huomataan melko selvästi, että vaste b), joka siis mitattiin laipan kiinnitysruuvin vierestä, edustaa vähäisintä värähtelyä. Laipan yläreunasta mitattu impulssivaste a) on lisäksi rauhallisempi kuin vastaava alareunasta mitattu.



Kuva 7.11. Alkuosa vaimennetusta kotelosta mitatuista impulssivasteista.



Kuva 7.12. Vaakasuunnassa mitattujen äänikentän impulssivasteiden esitys taajuustasossa. Vasteet ovat 10 dB välein.



Kuva 7.13. Pystysuunnassa mitattujen äänikentän impulssivasteiden esitys taajuustasossa. Vasteet on asetettu 10 dB välein.

Intuitiivisin selitys asialle on se, että alareuna sijaitsee reuna-asennuksessa melko lähellä etulevyn keskiosaa, joka pyrkii äänikentän vaikutuksesta värähtelemään suuremmalla amplitudilla kuin etulevyn reuna-alueet, missä laipan yläreunakin sijaitsee.



Kuva 7.14. Vaimennetusta kotelosta mitattut impulssivasteet taajuusalueessa.

7.7. Kompensoidut äänikenttävasteet

Kuvissa 7.17 ja 7.18 on esitetty tyhjän kotelon tapauksessa elementtivasteella kompensoidut taajuusalueen vasteet. Mielenkiintoista vasteissa on kartion synnyttämän äänipaineen lokaali maksimi n. 600 Hz ja vastaavasti kuoppa n. 800 Hz kohdalla. Muuten äänipaine kasvaa taajuuden mukana kuvaten kartion akustisen säteilykuorman reaaliosan kasvamista. Taajuuksilla 1500-2000 Hz aallonpituus on jo lyhentynyt vastaamaan elementin dimensioita ja äänipaineen kasvu suhteessa kartion nopeuteen päättyy.



Kuva 7.15. Kartiosta ja kiinnityslaipasta mitattujen nopeuksien magnitudispektrien vertailu. Laipan värähtely on keskimäärin n. 20 dB vaimeampaa.



Kuva 7.16. Laipan nopeuden impulssivasteen alkuosa kolmesta eri mittauskohdasta: a) yläreuna, b) kiinnitysruuvin vierus ja c) alareuna.



Kuva 7.17. Taajuusalueen kompensoidut vaakatasossa mitatut vasteet tyhjän kotelon tapauksessa.



Kuva 7.18. Taajuusalueen kompensoidut pystytasossa mitatut vasteet tyhjän kotelon tapauksessa.

Luku 8

YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä on selostettu vibroakustisia mittauksia, jotka osana PATS-projektia tehtiin syvemmän ymmärryksen saavuttamiseksi koskien koteloidun kaiuttimen akustisia ja mekaanisia ilmiöitä. Saatuja mittaustuloksia on PATS-projektissa käytetty mm. kaiutinkoteloa mallintavien matemaattisten mallien parantamisessa.

Luvussa 5 esitetyt kaiutinkotelon sisäisen äänikentän selvittämiseksi tehdyt kattavat mikrofonihilamittaukset teki pääasiassa tutkija Panu Maijala. Allekirjoittanut suoritti muutaman kotelon ulkopuolella tapahtuneen lähikenttämittauksen hilaa käyttäen sekä kaukokenttämittaukset. Kaiutinkotelon mittaukset ovat olleet hyödyllisiä mallintajien kannalta. Tehtyjen mittausten määrä oli näin jälkikäteen arvioituna ehkä turhan suuri. Maijala suoritti myös osan kotelon ja kaiutinkartion laservibrometrimittauksista. Kartion värähtelyn impulssivasteiden mittaaminen oli välttämätöntä, jotta kotelovasteiden saattaminen mallintajien kannalta sopivaan muotoon (kompensointi) voitiin suorittaa.

Impedanssiputkella tehdyt materiaalimittaukset (luku 4) suoritti kokonaan diplomityön kirjoittaja. Vaimennusmateriaalina käytetyn lasivillan akustisten ominaisuuksien, erityisesti akustisen impedanssin vaiheen, tarkempi koodaaminen matemaattisiin malleihin auttoi mallintajia pääsemään simulaatioissaan lähemmäksi mitattuja vasteita. Kotelon materiaalina käytetyn MDF-levyn ominaisuuksia ei valitettavasti pystytty toivotulla tavalla selvittämään. Myös kaiutinkartion akustisen impedanssin mittaukset jäivät hieman kokeilevalle asteelle. Luvun 4 lopussa on esitetty mittausmenetelmään tehtäviä muutoksia, jotta kaiutinelementin akustiset ominaisuudet voisi mitata tarkemmin ja luotettavammin. MDF-levyn akustinen impedanssi sen sijaan on niin suuri, että sen luotettava mittaaminen vaatinee aivan toisenlaisia mittausmenetelmiä taikka tässä käytettyjen metodien nerokasta soveltamista.

Allekirjoittanut suoritti myös luvussa 6 selostetut vibroakustiset mittaukset, joilla tutkittiin värähtelyn etenemistä mekaanisesti kaiutinkotelossa. Mittaustulokset antoivat selviä viitteitä siitä, että mitatun kotelon tapauksessa seinämien värähtely aiheutuu pääasiassa äänienergian kulkeutumisesta akustisesti ilman kautta. On kuitenkin syytä intuitioon nojautuen tehdä oletus, että kotelon pienetessä ja paksumpaa seinämämateriaalia käytettäessä mekaanisesti seinämien liitoskohtien kautta tapahtuva värähtelyn eteneminen tulee merkittävämmäksi. Luvussa 7 esitetyt kartion mittaukset on tehnyt kirjoittaja. Tarkoitus oli, että kartiosta rakennetaan matemaattisiin simulointeihin yksityiskohtainen malli, joka huomioi värähtelyn erot kartion eri pisteissä. Ideana oli approksimoida kartiota sisäkkäisinä 1 cm levyisinä renkaina, joiden asettaminen malleissa hieman eri tasoille mahdollistaisi kartion syvyyden huomioimisen. Laservibrometrimittauksissa värähtely todettiin olevan lähes vakio ympyrällä, jonka keskipiste yhtyy kaiutinelementin pyörähdysakseliin ja jonka säde on 30 mm. Lienee melko turvallista olettaa värähtely vakioksi osarenkaalla, etenkin kun huomioidaan muut tekijät. Kartion jakaminen päällekkäisillä tasoilla oleviin sisäkkäisiin renkaisiin on vain karkeahko, joskin epäilemättä tasaista mäntälähdettä parempi approksimaatio kartionmuotoisesta kappaleesta.

LÄHTEET JA VIITTAUKSET

Ashley, J. & Swan, M. 1978. *Experimental Determination of Low-Frequency Loudspeaker Parameters*. Loudspeakers, vol. 1. Audio Engineering Society, New York.

Bendat, J. & Piersol, A. 1986. *Analysis and Measurement Procedures*. Second edition. A Wiley-Interscience Publication. 566 s.

Beranek, L. 1954. Acoustics. McGraw-Hill, New York.

Borish, J. ja Angell, J. 1983. An Efficient Algorithm for Measuring the Impulse Response Using Pseudorandom Noise. J. Audio Eng. Soc., vol. 31, no. 7, ss. 478-487.

Borish, J. 1985. Self-Contained Crosscorrelation Program for Maximum-Length Sequences. J. Audio Eng. Soc., vol. 33, no. 11, ss. 888-889.

Bradbury, S. 1976. The Use of Fibrous Materials in Loudspeaker Enclosures. J. Audio Eng. Soc., vol. 24, ss. 162-170.

Brüel & Kjær, 1976. Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers. Teoria- ja sovellus käsikirja. Brüel & Kjær, Naerum, Denmark, 102 s.

Chu, W. 1991. Impedance Tube Measurements – A Comparative Study of Current Practice. *Noise Contr. Eng. J.*, col 37, no. 1, ss. 37-44.

Colloms, M. 1991. *High performance Loudspeakers*. 4th Ed. GB. Pentech Press, Lontoo, Iso-Britannia, 407 s.

Fahy, F. 1993. A Simple Method for Measuring Loudspeaker Cabinet Impedance. J. Audio Eng. Soc., vol. 41, ss.154-156.

Fahy, F. 1984. Rapid Method for the Measurement of Sample Acoustic Impedances in a Standing-Wave Tube. J. Sound Vibr., vol. 97, no. 2, ss. 168-170.

Fincham, L. 1985. Refinements in the Impulse Testing of loudspeakers. J. Audio Eng. Soc., vol. 33, no. 3, ss. 133-144.

Geddes, E. 1989. An Introduction to Band-Pass Loudspeaker Systems. J. Audio Eng. Soc., vol 37, ss. 308-342.

Iverson, J. 1973. The Theory of Loudspeaker Cabinet Resonances. J. Audio Eng. Soc., vol. 21, ss. 177-170.

Jackson, L. 1989. *Digital Filters and Signal Processing*. 2nd Ed. Kluwer Academic Publishers, Higham, Massachusetts, USA, 410 s.

Karjalainen, M., Altosaar, T. ja Alku, P. 1988. QuickSig – An Object-Oriented Signal Prosessing Environment. *Proc. of IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Sig. Proc.*, New York, NY, 1988.

Karjalainen, M. 1998. *Suullista informaatiota*. Teknillinen korkeakoulu, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, Espoo.

Karjalainen, M. 1990. DSP Software Integration by Object-Oriented Programming: A Case Study of QuickSig. *IEEE ASSP Magazine*, Huhtikuu 1990, 11 s.

Lahti, T. 1995. *Akustinen mittaustekniikka*. Otaniemi. Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorion raportti 38. 152 s.

Maxwell, R. 1993. Low-Frequency Options: Design Curves for Vented-Box Loudspeakers. J. Audio Eng. Soc., vol. 41, ss. 44-48.

Moir, J. 1961. Structural Resonances in Loudspeaker Cabinets. J. Brit. Sound Recording Assoc., vol. 6.

Moreno, J. 1991. Measurement of Loudspeaker Parameters Using a Laser Velocity Transducer and Two-Channel FFT Analysis. J. Audio Eng. Soc., vol. 39, ss. 243-249.

Polytec, 1995. Vibrometer Operator's Manual for Polytec Vibrometer Series 3000.

Riederer, K., 1998. Head-Related Transfer Function Measurements. Diplomityö. 137 s.

Rife, D. & Vanderkooy, J. 1989. Transfer-Function Measurement with Maximum-Length Sequences. J. Audio Eng. Soc., vol. 37, ss. 419-444.

Rife, D. 1996. MLLSA Reference Manual Version 10.0. DRA Laboratories. USA.

Rossing, Thomas D. 1990. *The Science of Sound*. Second edition. USA. Addison-Wesley Publishing Company Inc. 686 s.

Rutt, T. 1985. Root-Locus Technique for Vented-Box Loudspeaker Design. J. Audio Eng. Soc., vol. 33, no. 9, ss. 659-668.

Sakai, S., Kagawa, Y. & Yamabuchi. Acoustic Field in an Enclosure and Its Effect on Sound-Pressure Responses of a Loudspeaker. *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 32, no. 4, ss. 218-219.

Schroeder, M. R. 1970. Synthesis of Low-Peak-Factor Signals and Binary Sequences With Low Autocorrelation. *IEEE Transactions of Information Theory*, s. 85-89.

Seas internet sivut: <ULR:http://www.seas.no>

Serridge, M. 1988. The Laser Velocity Transduser Its Principles and Applications. Brüel & Kjær Appl. Note.

Small, R. 1972. Direct-Radiator Loudspeaker System Analysis. J. Audio Eng. Soc., vol. 20, ss. 383-395.

Small, R. 1972. Closed-Box Loudspeaker Systems; Part I: Analysis. J. Audio Eng. Soc., vol. 20, ss. 798-808.

Small, R. 1973. Closed-Box Loudspeaker Systems; Part II: Synthesis. J. Audio Eng. Soc., vol. 21, ss. 11-18.

Small, R. 1972. Simplified Loudspeaker Measurements at Low Frequencies. J. Audio Eng. Soc., vol. 20, ss. 28-33.

Small, R. 1973. Vented Box Loudspeaker Systems; Part I: Small-Signal Analysis. J. Audio Eng. Soc., vol. 21, ss 363-372.

Small, R. 1973. Vented-Box Loudspeaker Systems; Part II: Large-Signal Analysis. J. Audio Eng. Soc., vol. 21, ss. 438-444

Small, R. 1973. Vented-Box Loudspeaker Systems; Part III: Synthesis. J. Audio Eng. Soc., vol. 21, ss. 549-554.

Small, R. 1973. Vented-Box Loudspeaker System; part IV: Appendices. J. Audio Eng. Soc., vol. 21, ss. 635-639.

Steiglitz, K., L. E. McBride. 1965. A Technique for the Identification of Linear Systems. *IEEE Transactions of Automatic Control*, s. 461-464.

Struck, C. 1990. Investigation of the Nonrigid Behavior of a Loudspeaker Diaphragm Using Modal Analysis. J. Audio Eng. Soc., vol. 38, ss. 667-675.

Tappan, P. 1962. Loudspeaker Enclosure Walls. J. Audio Eng. Soc., vol. 21, no. 3.

Thiele, A. 1978. Loudspeakers in Vented Boxes: Part I ja II. Loudspeakers, vol. 1. Audio Engineering Society, New York.

Thiele, A. 1993. Force Conversion Factors of a Loudspeaker Driver. J. Audio Eng. Soc., vol. 41, ss. 701-703.

Toivanen, J. 1976. Teknillinen Akustiikka. Otatieto.

Tuomela, P. 1992. Rakenna hifi-kaiuttimet. Sanomaprint, Erikoislehdet. 202 s.