

Електроакустика

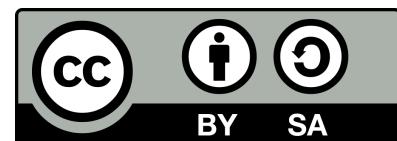
Бранислав Геразов

Факултет за електротехника и информациски технологии
Универзитет Св. Кирил и Методиј во Скопје, Македонија

Електроакустика v0.81

© Copyright by Бранислав Геразов, 2015 – 2020 г.
Скрипта од предавањата по предметот Електроакустика
Институт за електроника
Факултет за електротехника и информациски технологии
Универзитет Св. Кирил и Методиј во Скопје, Македонија

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-
ShareAlike 4.0 International. [https://creativecommons.org/
licenses/by-sa/4.0/](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)



Содржина

1 Вовед	5
1.1 Сетило за слух	5
1.2 Историја на акустиката	5
1.3 Области во акустиката	7
2 Основи на звукот	9
2.1 Видови на звук	9
2.2 Основни карактеристики на звучните бранови	10
2.3 Запознавање со звучните форми	14
3 Физика на звукот	18
3.1 Еднодимензионални бранови	18
3.2 Акустичка бранова равенка	19
3.3 Рамнински бранови	22
3.4 Брзина на простирање на звукот	23
3.5 Брзина и поместување на воздушните честички	23
3.6 Сферни бранови	25
3.7 Специфична акустичка импеданса	26
3.8 Интензитет на звук и акустичка моќност	27
3.9 Акустичка импеданса	28
3.10 Просторен агол на зрачење	30
3.11 Крива на насоченост	30
3.12 Рефлексија на звук	32
3.13 Рефлексија на звук при коса инциденција	33
3.14 Стоjni бранови	34
3.15 Симулација на стоjни бранови	35
3.16 Слабеење на звукот	36
4 Создавање и зрачење на звукот	38
4.1 Создавање на човечкиот глас	38
5 Електроакустички и електромеханички аналогии	42
5.1 Елементи на механичките системи	43
6 Психоакустика	44
6.1 Работа на човековото уво	44
6.2 Поимање на амплитудата на звукот	46
6.3 Поимање на фреквенцијата на звукот	48
6.4 Поимање на спектарот на звукот	49
6.5 Запознавање со феномени во психоакустиката	50
7 Акустика на простории	55
7.1 Резонантни фреквенции	55

7.2 Пресметка на распределбата на модови	59
7.3 Коефициент на апсорпција	60
7.4 Статистичка анализа на звучното поле	62
7.5 Пресметка на звучно поле во просторија	63
7.6 Време на реверберација	64
7.7 Средна должина на слободната патека на звукот	65
7.8 Мерење на импулсниот одсив на просторија	66
7.9 Мерење на импулсниот одсив на просторија	67
8 Микрофони	75
8.1 Електроакустички преобразувачи	75
8.2 Основни карактеристики на микрофоните	75
8.3 Поделба на микрофоните	79
9 Звучници	81
9.1 Основни карактеристики на звучниците	81
10 Студиска аудиотехника	87
10.1 Предзасилувачи	87
10.2 Засилувачи на моќност	89
10.3 Аудиопроцесори	90
10.4 Аудиомиксери	93
Додаток А Слободен и отворен софтвер за инженерска и научна работа	95
A.1 Слободен софтвер	95
A.2 Четири слободи	95
A.3 Предности на слободниот софтвер	96
A.4 Одржливост	97
A.5 Слободен софтвер за инженерска и научна работа	98
Додаток А Питон за процесирање на аудиосигналите	101
A.1 Основи поставки во ГНУ/Линукс	101
A.2 Основи на работата со Питон	102
A.3 Основи на Нумпай и Матплотлиб	106

Поглавје 1

Вовед

Акустиката е интердисциплинарна наука која се занимава со изучување на звукот, неговото создавање, трансмисија и влијание, вклучувајќи ги биолошките и психолошките влијанија. Зборот „акустика“ доаѓа од грчкиот збор ἀκουστικός (акустикос) кој значи „за слушање, спремен за слушање“, односно ἀκούστος (акустос) кој значи „може да биде слушнат“.¹ Од самото значење на зборот акустика може да се види суштинската поврзаност на оваа наука со човековото сетило за слух.

1.1 Сетило за слух

Сетилото за слух е едно од најважните сетила кај човекот. Тоа има суштинско значење од три гледни точки:

- **преживување** – сетилото за слух може да не предупреди за настани во нашата средина кои можат да го загрозат нашиот живот. Токму поради оваа причина, за разлика од сетилото за вид, тоа е постојано вклучено.
- **комуникација** – сетилото за слух е неопходна алка од системот за говорна комуникација. Тоа е способно да ги препознае и најмалите варијации во човековиот глас, што ни овозможува не само да ја разбере лингвистичката порака содржана во говорниот сигнал, туку да извлечеме и паралингвистички информации, како на пр. намерата или емоционалната состојба на говорникот. Уште повеќе некои истражувачи сметаат дека говорот е еден од клучните фактори кои придонесол во развојот на интелигенцијата кај човекот, одвојувајќи го од останатиот животински свет.
- **уживање** – сетилото за слух му овозможува на човекот да ужива во најразлични пријатни звуци и секако во музиката.

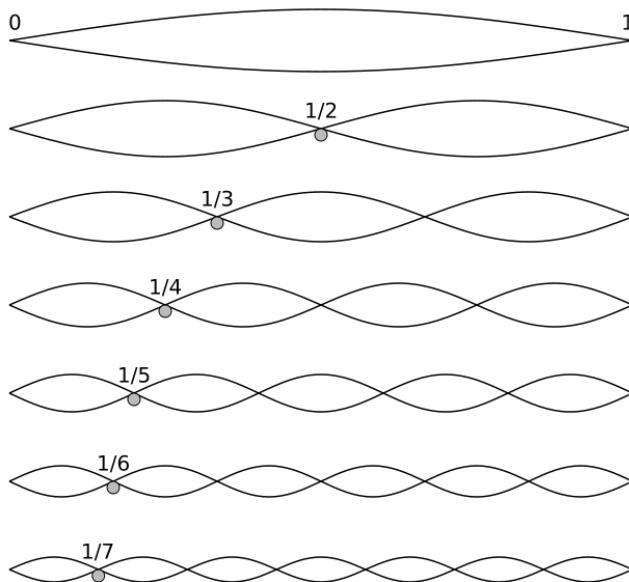
1.2 Историја на акустиката

Акустиката е наука која, поради проблематиката која ја истражува, била актуелна низ целата човечка историја, од антиката па сè до денес. Еден од првите истражувачи во областа на акустиката бил **Питагора** кој живеел во VI век п.н.е. Тој открил дека за тоновите отсвирени на една жица да звучат убаво заедно, т.е. да бидат во **созвучје**, требало должините на жицата да бидат во целоброеен однос, на пр. 1:2, 1:3, 1:4 итн, Сл. 1.1.²

Аристотел, 384 – 322 п.н.е. за првпат го описал **броновиот процес** на простирање на звучната појава како растегања и собирања на воздухот кои се пренесуваат на соседниот воздух.

¹Wikipedia: Acoustics. <https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustics>

²Wikipedia: Pythagorean tuning. https://en.wikipedia.org/wiki/Pythagorean_tuning



Слика 1.1: Основен и виши хармоници на една жица.³

Римскиот архитект [Витрувиус⁴](#) за првпат пишува за акустичките особини на античките театри, што претставуваат почетоци на [архитектонската акустика](#). Во петтата од десетте книги од својата „[Архитектура](#)“, тој го опишува звучниот бран како бран во водата кој се простира во три димензии и кој при постоење на пречка се одбива наназад и се судира со брановите кои доаѓаат. На овој начин, Витрувиус за прв пат пишува за [интерференцијата](#) на звучните бранови. Понатаму, тој дава насоки за поставувањето на седиштата во театрите, како и препораки за поставување на бронзени садови со димензии во зададени целобројни соодноси како резонатори со цел хармонично да се засили звукот од сцената.

По долго затишје во средниот век, [Галилео Галилеј, 1564 – 1642⁵](#), и „таткото на акустиката“ [Марин Мерсен, 1588 – 1648⁶](#), независно еден од друг ги откриваат комплетните закони на вибрација на жица. Галилео исто така за првпат го опишал звукот како психолошки феномен кој се должи на физиолошките промени во сетилото за слух (треперенето на ушното тапанче) предизвикани од брановите создадени од вибрацијата на едно звучно тело. Мерсен е еден од неколкуте истражувачи кои во тој период за прв пат ја измериле [брзината на звукот](#). Во истиот период [Исаак Ньютон, 1642 – 1727⁷](#) во својата „[Принципи“ \(1687\)](#) ја извел и зависноста на брзината на простирање на брановите во цврстите тела која е во основата на [физичката акустика](#), види Поглавје 3.

Голем напредок акустиката доживеала во XVIII век преку употребата на калкулусот за опишување на пропагацијата на звучните бранови. Проминентни фигури во математичката акустика во XIX век биле [Херман фон Хелмхолц⁸](#), кој ги оформил полето на [физиолошката акустика](#), види Поглавје 6, и [lordot Rejli⁹](#) кој го напишал капиталното дело „[Теорија на звукот“ \(1877\)](#). Во ова време [Витстоун, Ом и Хенри](#) ја развиле аналогијата помеѓу електротехниката и акустиката, види Поглавје 5.

Во XX век доаѓа до расширена практична примена на научните сознанија за акустиката. [Волас](#)

⁴Wikipedia: Vitruvius. <https://en.wikipedia.org/wiki/Vitruvius>

⁵Wikipedia: Galileo Galilei. https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei

⁶Wikipedia: Marin Mersenne. https://en.wikipedia.org/wiki/Marin_Mersenne

⁷Wikipedia: Isaac Newton. https://en.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton

⁸“Harmonic partials on strings” by Qef https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Harmonic_partials_on_strings.svg#/media/File:Harmonic_partials_on_strings.svg

⁹Wikipedia: Hermann von Helmholtz. https://en.wikipedia.org/wiki/Hermann_von_Helmholtz

⁹Wikipedia: John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh. https://en.wikipedia.org/wiki/John_William_Strutt,_3rd_Baron_Rayleigh



Слика 1.2: Неолитската окарина од Велес стара 6000 год. од локалитетот „Мрамор“ кај Чашка (Велес).¹²

Сабин¹⁰ ја оформува областа **архитектонска акустика**, види Поглавје 7, дефинирајќи го времето на реверберација како мерило за акустичките особини на една затворена просторија, за чие пресметување емпириски го добива познатото равенство на Сабин. Подводната акустика се применува за пронаоѓање на подморници во I Светска Војна, а ултразвукот овозможил голем напредок во медицината и индустријата. Овој развој пред се бил овозможен од достигнувањата во полето на електроакустиката, вклучувајќи ги развојот на мерните инструменти и технологиите за снимање, пренос и репродуцирање на звукот. Навистина, електроакустиката предизвикала револуција во целокупното човеково живеење.

1.3 Области во акустиката

Акустиката опфаќа повеќе области. **Акустичкото здружение на Америка**¹¹) ги дефинира следните 13 области:

- **Археоакустика** – наука за звукот во археологијата која ги истражува акустичките својства на археолошките локалитети и артефакти, Сл. 1.2.
- **Аероакустика** – наука за бучавата предизвикана од движењето на воздухот и на движењето на звукот низ воздухот. Оваа област е важна во дизајнот на потивки летала и за разбирање на принципите на работа на дувачките музички инструменти.
- **Процесирање на акустички сигнали** – област која се занимава со активно потиснување на шум, дизајнот на слушни помагала и кохлеарни имплантни, поништување на ехо, перцептуално кодирање (mp3) итн.
- **Архитектонска акустика** – наука за постигнувањето на добар звук во простории. Вообично се занимава со проучување на разбираливоста на говорот, неговата приватност и квалитетот на музиката во изградената околина.
- **Биоакустика** – наука која го истражува слушањето и извиците на животните, како и влијанието на акустиката и звуците од околината врз нив.
- **Електроакустика** – наука која се занимава со снимањето, обработката и репродукцијата на звукот со употреба на електрониката. Има низа примени кои се движат од мобилни телефони, до озвучувања на јавни настани и системи за виртуелна реалност.
- **Бучава и звучни пејсажи** – наука која се занимава со бучавата и вибрациите предизвикани од железничкиот, патниот и авионскиот сообраќај, индустриската опрема и рекреационите активности. Главната цел е намалувањето на истата и нејзиното поволно обликување преку дизајн на звучни пејсажи составени од зони со различна бучност во урбаните средини.

¹⁰Wikipedia: Wallace Clement Sabine. https://en.wikipedia.org/wiki/Wallace_Clement_Sabine

¹¹анг. *The Acoustical Society of America (ASA)*.

¹²„Инструмент стар илјадници години“ <http://loza.mk/2015/04/инструмент-стар-илјадници-години/>

- **Музичка акустика** – наука за физиката на музичките инструменти, но и за процесирањето на аудио во електронската музика, компјутерската анализа на музиката и композицијата.
- **Психоакустика** – наука за тоа како човекот го поима звукот.
- **Говорна акустика** – наука за произведувањето, процесирањето и перцепцијата на говорот. Тука спаѓаат областите на автоматско препознавање на говор и дигиталната синтеза на говор.
- **Ултразвучна акустика** – наука која ја истражува примената на ултразвукот во медицината, хемијата, материјалите и под водата.
- **Подводна акустика** – наука за природните и вештачките звуци под површината на водата. Примените вклучуваат сонари за лоцирање на подморници, комуникација на китови, мерење на температурата на океаните, звучни оружја итн.
- **Акустика на вибрации и динамика** – наука за начинот на кој механичките системи вибрираат и за нивната интеракција со средината. Примените вклучуваат вибрации во земјата предизвикани од железниците, изолација од вибрации во зградите и нивна заштита од земјотреси, влијанието на вибрациите врз здравјето итн.

Поглавје 2

Основи на звукот

Звукот претставува нарушување на рамнотежната положба на честичките на дадена еластична средина, вообичаено воздухот, пропратено со промени во нејзината густина и притисокот. Местото на генерирање на овие нарушувања се нарекува звучен извор, а нивното простирање во околната средина се нарекува звучен бран. Звучните бранови во гасовите и течностите се од лонгитудинална природа, односно поместувањето на честичките е во насоката на простирање на звучниот бран; додека во цврстите средини тие се трансверзални, односно поместувањето е под прав агол на оската на простирање. Во физиологијата и психологијата, под поимот звук се подразбира приемот на таквите механички бранови и нивното поимање кај човекот.

2.1 Видови на звук

Во природата постојат два главни вида на звучни бранови – **периодични** и **апериодични**. Периодичните звучни бранови понатаму се делат на **прости** и **сложени**.

Наједноставниот пример за периодичен звук кој уште се нарекува и прост звук е оној чиј звучен притисок временски се менуваат простопериодично. Временскиот облик на овој вид на звучен бран е прикажан на [Сл. 2.1](#).¹³ Освен звучната вилушка, извори на прост звук во природата речиси и да не постојат.¹⁴

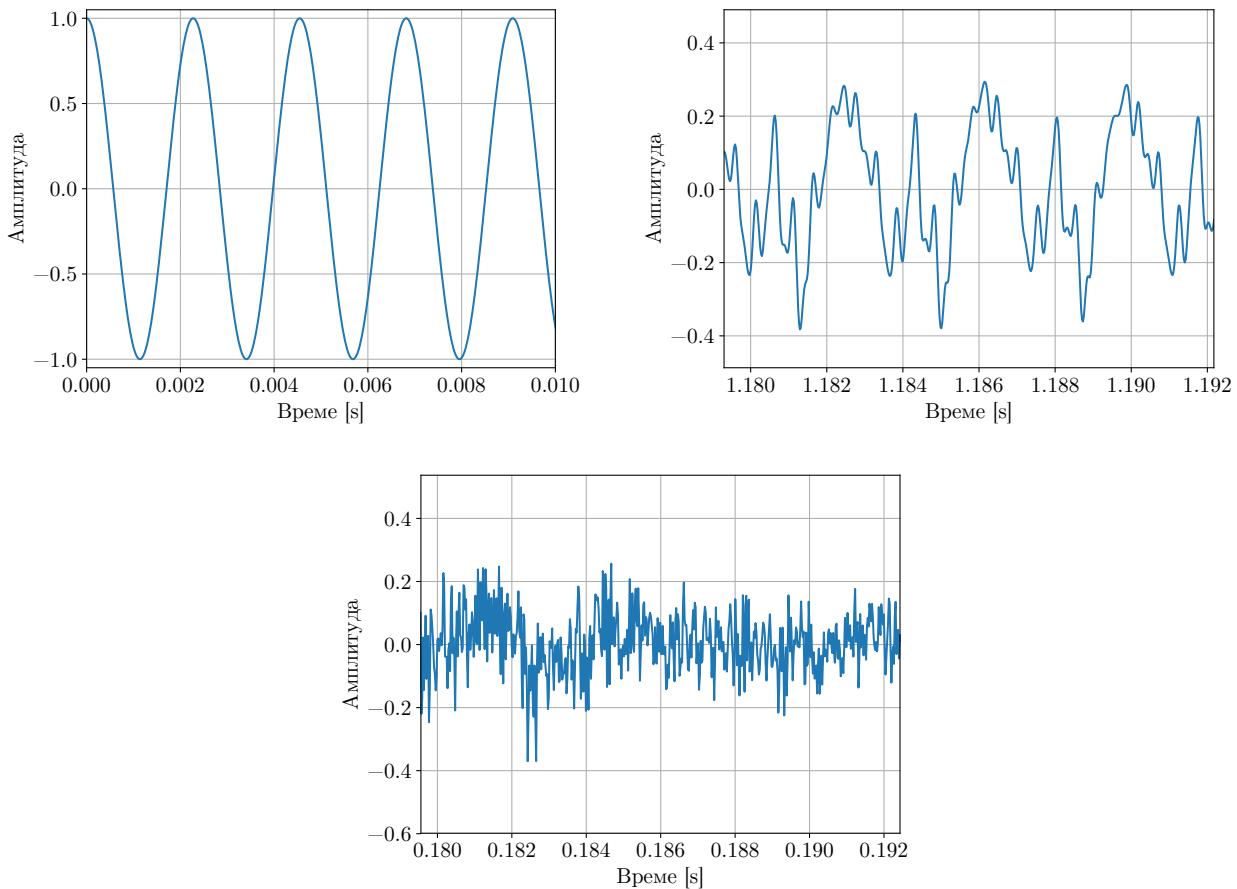
Периодичниот звук кој не е од простопериодична природа се нарекува сложен звук. Изворите на периодичен звук во природата, во прв ред човековиот глас и музичките инструменти. Кај нив, поради физиката на создавање на звукот, секогаш се генерира сложен звук. Пример за периодичен звучен бран добиен од виолина е прикажан на [Сл. 2.1](#).

Апериодичните звуци пак, се оние кои човекот ги поима како шум. Тие се важен и неразделен дел од сите звучни појави кои нè опкружуваат, вклучувајќи ја и музиката. На [Сл. 2.1](#) е прикажан пример за ваков тип на бранови добиен од фус чинела.

Во природата, звукот најчесто е комбинација од сложен периодичен звук и апериодичен шум и се нарекува **мешан звук**. На пример, ударот на тапанот има своја висина, т.е. музичка нота, како и останатите инструменти, иако главна намена му е да генерира шумна компонента – удар. Од друга страна пак, сите природни извори на сложен периодичен звук во периодот пред и по воспоставувањето на стабилниот музички тон имаат апериодична компонента, т.е. шум, а кај некои нејзе ја има и за целото времетраење на музичкиот тон. Пример за првото е ударот со перцето по жиците на гитарата, додека за второто е шумот на кавалот при свирењето во ниската скала.

¹³ Приказот на временскиот облик на звучните бранови уште се нарекува и осцилограм.

¹⁴ Свиркањето со уста исто така генерира близу прост звук меѓутоа при неговата анализа може да се забележи и слаб втор хармоник.



Слика 2.1: Временски облик на простопериодичен (горе лево), сложен периодичен (горе десно) и апериодичен (долу) звучен бран.

2.2 Основни карактеристики на звучните бранови

Во наједноставен случај, звучниот бран претставува простопериодична промена на воздушниот притисок p во време t прикажана на Сл. 2.1. Таа може да биде описана со равенството:

$$p(t) = A \cos(2\pi f t - \phi), \quad (2.1)$$

каде:

- A е амплитудата на притисокот на звучниот бран, изразена во паскали (Pa),
- f е основната фреквенција на бранот, односно бројот на осцилации во 1 секунда, изразена во херци (Hz),
- ϕ е фазата на бранот, која ја диктира вредноста на косинусната функција во временскиот момент $t = 0$.

Ако дополнително земеме дека звучниот бран се простира долж дадена оска x , тогаш во (2.1) се јавува дополнителен член:

$$p(t, x) = A \cos(2\pi f t - \phi - kx), \quad (2.2)$$

каде k е фазниот коефициент кој служи за конверзија од простор во димензија агол:

$$k = \frac{2\pi}{c T}. \quad (2.3)$$

Тука, c е брзината на простирање на звучниот бран, а T е периодата на осцилирање на неговата амплитуда, која е инверзна на неговата фреквенција f :

$$T = \frac{1}{f}. \quad (2.4)$$

Производот $c T$ во (2.3) претставува патот кој го поминува звучниот бран за еден циклус, односно една периода на неговото осцилирање и уште се нарекува **бранова должина λ** .

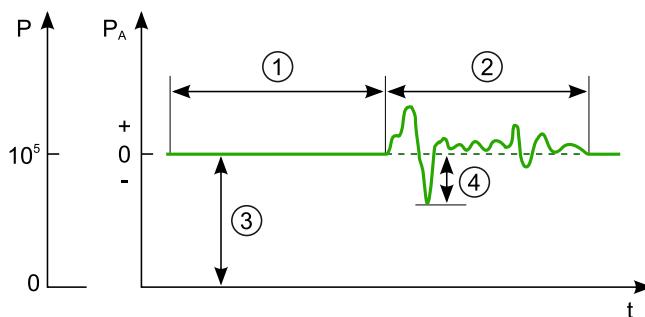
Амплитуда на звучните бранови

Амплитудата на звучните бранови уште се нарекува и **звукен притисок p** . Таа зависи од интензитетот на нарушување на рамнотежната состојба предизвикан од изворот на звук. Од амплитудата зависи **гласноста** на звучните бранови.

Звучниот притисок претставува само мал дел од вкупниот притисок во воздухот p_{tot} кој е збир од атмосферскиот притисок p_{atm} и звучниот притисок:

$$p_{tot} = p_{atm} + p. \quad (2.5)$$

Ова е прикажано на Сл. 2.2. Амплитудата на звучниот притисок се изразува во паскали (Pa) и



Слика 2.2: Звучен притисок суперпониран на атмосферскиот притисок: 1) тишина, 2) звук, 3) атмосферски притисок, и 4) звучен притисок.¹⁵

се движи од прагот на чујност, што претставува најтревкиот звук кој може да го слушне човекот, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa, па сè до прагот на болка од 200 Pa. За споредба, амплитудата на атмосферскиот притисок p_{atm} изнесува 101,325 kPa. Поради големиот опсег на вредности кои може да ги има звучниот притисок, како и поради нелинеарното чувство на гласност на звукот (види [Поглавје 6](#)), неговата амплитуда вообичаено се изразува преку **нивото на звучниот притисок L** дадено со:

$$L = 20 \log \frac{p}{p_0}, \quad (2.6)$$

кое се изразува во децибели (dB). Типични вредности на нивото на звучниот притисок за различни извори на звук се дадени во [Табелата 2.1](#).

Табела 2.1: Ниво на звучниот притисок за различни извори на звук.

Звучен извор	Ниво [dB]
праг на чујност	0
тивка просторија	20 – 30
нормален разговор	40 – 60
во автомобил	60 – 80
сообраќаен метеж	80 – 90
труба	130
праг на болка	140
пукање на балон	155
истрел на пушка	171

¹⁵By CLI - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9708905>

Фреквенција на звучните бранови

Фреквенцијата на звучните бранови се мери во единица Hz (херц) која го означува бројот на повторувања, односно бројот на вибрации во една секунда. Од фреквенцијата зависи висината на звукот.

Фреквенцијата на звучните бранови кои можат да бидат слушнати од човекот се движи од 20 Hz, па сè до 20 kHz. Звучните бранови со пониска фреквенција од 20 Hz се нарекуваат инфразвук, а оние со фреквенција повисока од 20 kHz се нарекуваат ултразвук. Брановата должина на звучниот бран пак се движи од 17,15 m за фреквенција од 20 Hz, па сè до 1,7 cm за фреквенција од 20 kHz.

Спектар на звучните бранови

Звучните бранови, без оглед на периодичноста и типот, секогаш можат математички да се разложат на елементарни синусни функции, процес кој се нарекува Фуриевата трансформација, и да се претстават со равенството:

$$p(t) = \frac{c_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \cos(2\pi k f_0 t + \theta_k), \quad (2.7)$$

каде c_0, c_1, \dots, c_k се амплитудите на косинусите со фреквенции $0, f_0, \dots, k \cdot f_0$ и фаза $\theta_1, \dots, \theta_k$ кои го сочинуваат спектарот на звучниот сигнал. Фреквенцијата f_0 пак, е основната фреквенција на звукот која се нарекува и основен или хармоник. Останатите фреквенции се мултили од оваа фреквенција и се нарекуваат виши хармоници.

Кај апериодичните звучни бранови, спектарот не е дискретна сума, туку континуиран интеграл:

$$p(t) = \int_0^{\infty} c(f) \cos(2\pi f t + \theta(f)) df. \quad (2.8)$$

Амплитудите на елементарните синусоиди го определуваат амплитудниот спектар на звучниот бран, додека пак нивните фази го определуваат фазниот спектар. Притоа, амплитудниот спектар е од поголемо значење за анализата на звучните бранови, поради тоа што човечкото уво не е осетливо на фазата на звукот.

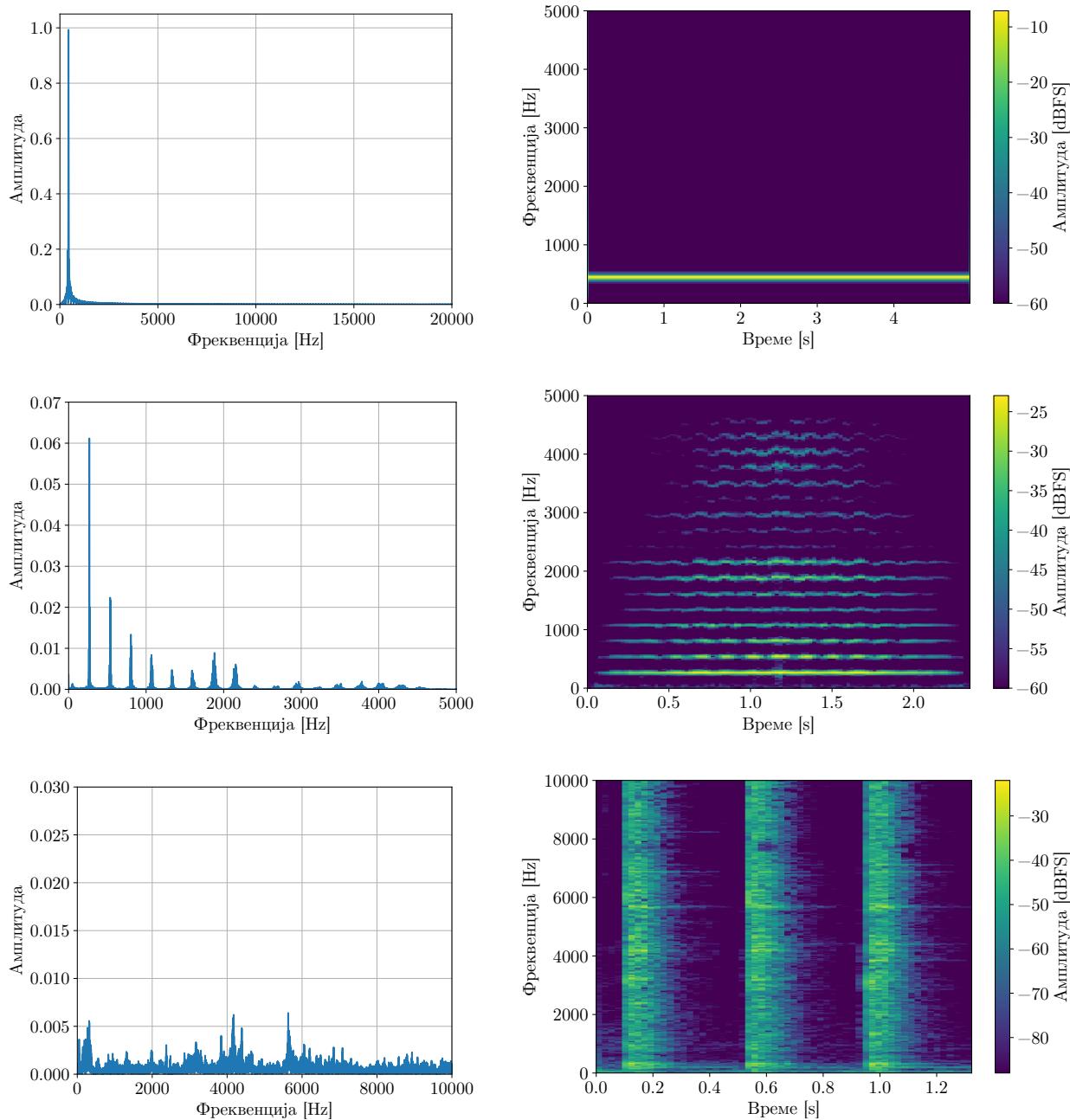
Амплитудниот спектар на простопериодичните звуци содржи единствен Дираков импулс кој го опишува основниот хармоник со фреквенција f_0 , како што е прикажано на Сл. 2.3.

Сложениот периодичен звук исто така има дискретен амплитуден спектар, но тој претставува низа од Диракови импулси. Дираковиот импулс со најниска фреквенција во спектарот соодветствува на основниот хармоник f_0 на звучниот бран. Тој ја одредува висината на сложениот звук, која соодветствува на отсвирената музичка нота. Останатите импулси се јавуваат поради физиката на формирање на стојните бранови и имаат фреквенции f_k кои се мултили од основната:

$$f_k = k \cdot f_0, \quad \text{за } k = 2, 3, \dots \quad (2.9)$$

Овие компоненти на спектарот се нарекуваат виши хармоници. На пример, ако е отсвирен музичкиот тон C₄, неговиот прв или основен хармоник ќе биде со фреквенција $f_1 = f_0 = 262$ Hz, неговиот втор хармоник ќе биде со фреквенција $f_2 = 2 \cdot 262 = 523$ Hz односно музичкиот тон C₅, неговиот трет хармоник – $f_3 = 3 \cdot 262 = 785$ Hz што соодветствува на G₅ итн. Пример за спектар на сложен периодичен звук е даден на Сл. 2.3.

Конечно, апериодичните звуци немаат истакнати импулси, туку имаат континуиран спектар. Амплитудниот спектар на апериодичен звучен сигнал исто така е прикажан на Сл. 2.3.



Слика 2.3: Амплитуден спектар (лева колона) и спектрограм (десна колона) на простопериодичен (горе), сложен периодичен (средина) и апериодичен (долу) звучен бран.

Спектрограм на звучните бранови

Спектрограмот е претстава која ни овозможува да видиме како се менува спектарот на звучниот бран во тек на времето. Тој претставува три-димензионален приказ на амплитудниот спектар во различни временски моменти од сигналот. На x оската од спектрограмот е прикажано време, на y оската фреквенција, а на z оската амплитуда. Притоа, амплитудата вообичаено се претставува преку употреба на различни нијанси на боја за нејзините различни вредности. Со овој приказ може да видиме во кои временски моменти во кои делови од спектарот има највеќе енергија.

Спектрограмот на простопериодичен звучен сигнал е прикажан на Сл. 2.3. Единствената хоризонтална линија соодветствува на основниот хармоник и е поставена на фреквенција f_0 .

На спектрограмот од сложениот периодичен звук пак, можеме да ги забележиме повеќето паралелни хоризонтални линии, од кои најиската соодветствува на основниот хармоник, а

останатите на вишите хармоници.

Кај апериодичните звучни бранови, спектрограмот не содржи паралелни хоризонтални линии, туку континуирани области на изразена енергија. Во него можеме да ги видиме одделните удари на фус чинелата.

Осцилограмот и спектрограмот се двата основни прикази на звучните појави кои се користат при фонетска анализа на човековиот говор. На пример, еден од најупотребуваните слободни софтвери за фонетски истражувања Praat¹⁶ стандардно ги испртува при отворање на звучен файл.

Звучна боја

Бојата на звукот¹⁷, е субјективен начин на описување на спектралната содржина на различните звуци. Според неа човекот може да ги разликува звучните извори меѓу себе. Врз бојата на тонот влијаат постоењето или не постоењето на хармоници во спектарот, а особено фреквенцијата и амплитудата на тие хармоници, како и распределбата на нехармониска, односно апериодична енергија во него. На пример, со бојата на звукот можеме да одредиме дали звукот кој го слушаме потекнува од зурла или клавир. Уште повеќе, некои инструменти бележат и менување на бојата кога свират во високиот регистар, наспроти кога свират во нискиот. Таков е примерот на гитарата која во понискиот регистар користи жици изведени на еден начин, додека во високиот регистар на друг. Разликата во составот на жиците се одразува во генериралиот звук како промена во бојата.

Звучната боја е клучна во разликувањето на гласовите во човековиот говор.

2.3 Запознавање со звучните форми

Практичен дел

Во овој практичен дел ќе се запознаеме со основите на временскиот и фреквенциски облик на различни типови на звук. За таа цел, ќе се послужиме со софтверскиот пакет Аудасити (види Додаток А).

Основни особини на звукот

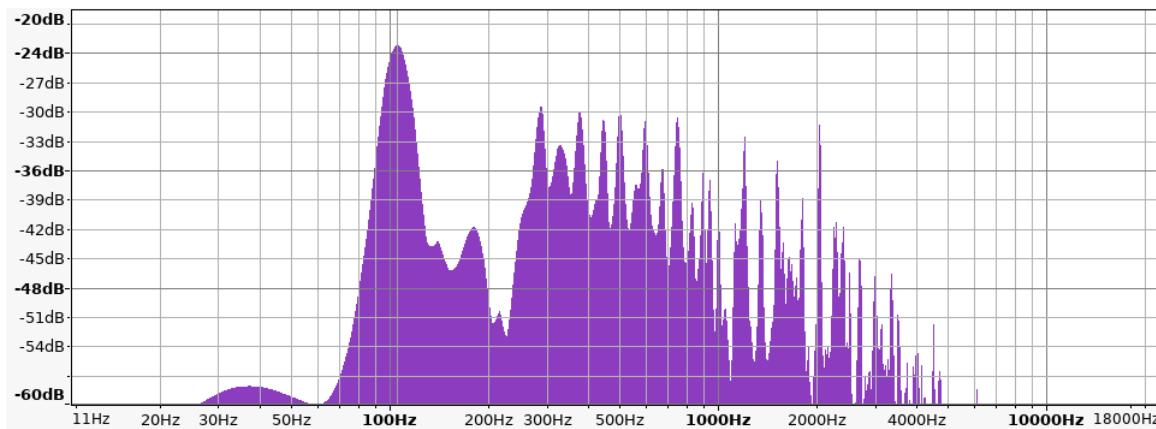
Да го искористиме Аудасити за да се запознаеме со основните особини на звукот. Ќе го отвориме звучниот фајл `Skopsko.wav`. Тоа може да го направиме преку менијата `File > Open`, или преку `drag & drop`. Во работниот простор ќе ни се отвори прозорец со изгледот на нашиот фајл како на Сл. А.1.

Со кликнувањето на аудио траката може да го позиционираме курсорот кој ни кажува на која локација сме во аудиото. Со притискање на `Space`, или со иконата `Play`, можеме да го чуеме фајлот. Во секое време курсорот ни кажува каде сме. Запирањето се врши на истиот начин. Амплитудната оска го прикажува нивото на сигналот од -1 до 1. Лево од аудио траката се наоѓа мал панел кој ги прикажува фреквенцијата на семплирање и резолуцијата на аудио сигналот. Овој панел може да се искористи при миксање на повеќе аудио траки за одредување на нивната амплитуда и позиција во стерео просторот. За да го сменим приказот на аудио траката може да кликнеме на менито со името на фајлот во овој панел.

За навигација долж аудио траката може да се искористи `Shift` и тркалцето на глувчето, а за временско зумирање и одзумирање `Ctrl` и тркалцето. Амплитудно зумирање се врши со кликање на амплитудната оска на траката со левото и десното копче на глушецот.

¹⁶Boersma, Paul (2001). Praat, a system for doing phonetics by computer. Glot International 5:9/10, 341-345. <http://www.praat.org/>

¹⁷фран. *timbre*.



Слика 2.4: Спектар на аудио трака во Аудасити.

Временски облик на звукот. Ако зумираме доволно може да го видиме обликот на аудио сигналот кој соодветствува на дигитализирана вредност на напонот кој го дава микрофонот при снимањето. Напонот пак соодветствува на звучниот притисок кој доаѓа до мемраната на микрофонот.

✓ **Задача за час.** Зумирајте дел од нашиот фајл до ниво на ms и нацртајте го неговиот временски облик! Зумирани на ова ниво можеме со пуштање на аудиото да ги видиме промените на притисокот кои ги „гледа“ ушното тапанче.

✓ **Задача за час.** Зумирајте до ниво на 0.1 ms и употребете го моливчето веднаш од алатникот за да нацртате дел од аудио фајлот според ваша желба. Ваквите можности се незамисливи во едитирањето на аналогното аудио!

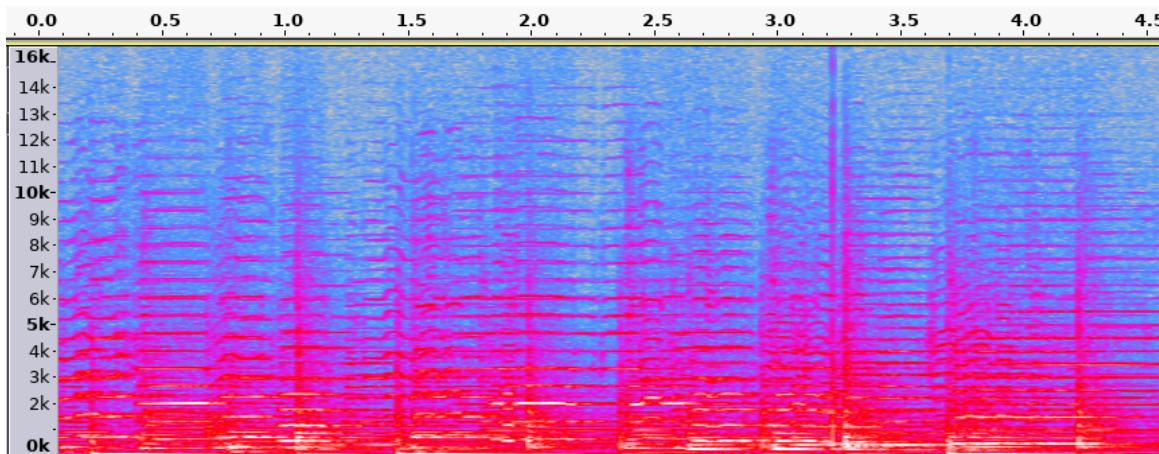
Спектар на звукот. Прикажувањето на спектарот во Аудасити се прави со избор на **Analyze > Plot Spectrum** од менијата, Сл. 2.4. За да го видиме спектарот на аудио фајлот во дадена делница го селектираме делот од интерес и притискаме на **Replot**.

✓ **Задача за час.** Во прозорецот за приказ на спектарот, нагодете логаритамски приказ на фреквенциската оска и забележете каков ефект има промената на должината на прозорецот од 512, 2048 и 16384.

- Колку изнесуваат фреквенциската резолуција Δf , а колку временската резолуција ако претпоставиме 50% преклопување на прозорците и $f_s = 44,1 \text{ kHz}$?
- Анализирај ја целата аудио трака **Skopsko** и нацртај го нејзиниот спектар!

Спектограм на звукот. За да го прикажеме спектограмот во Аудасити треба да ја избереме опцијата **Spectrogram** од панелот до аудио траката. Подесувањата на овој приказ може да се направат преку опцијата **Spectrogram Settings** во панелот.

✓ **Задача за час.** Набљудувај како се менува спектарот за времетраењето на аудио фајлот, зумирај и нацртај слика од една произволна негова делница.



Слика 2.5: Спектрограм на аудио трака во Аудасити.

Анализа на прост, сложен и апериодичен звук

✓ **Задача за час.** Со Аудасити отворете ги бараните звучни фајлови, нацртајте ги нивните временски и спектрални облици и одредете ја висината на основниот тон f_0 :

- звучна вилушка,
- виолина,
- тапан.

Анализа на звучна боја

✓ **Задача за час.** Вчитајте и исцртајте ги спектрите на следните аудио фајлови:

- `Gitara_nisko` и `Gitara_visoko`,
- `Kaval_nisko` и `Kaval_visoko`,
- `Zurla` – забележете како се движи мелодијата отсвирена на првата зурла веднаш над статичниот тон од втората зурла,
- `Glas` – на која висина е гласот, т.е. која е неговата основна фреквненција f_0 ? За да го одредите тоа поточно со `Plot Spectrum` селектрирајте дел со изразени хармоници, на пр. за време на некоја од самогласките.

Снимање на аудио

За да го видиме спектарот на вашиот глас, треба првин да направиме снимка. Аудасити овозможува снимање на нов аудио материјал. Снимањето работи со аудио влезовите на звучната карта на компјутерот (влезната линија за микрофон или `Line-in` влезот). Ако е вграден положен звучен хардвер снимањето може да биде и повеќеканално. Во оваа вежба, ќе направиме снимање со микрофонот вграден во слушалките. Алатката за снимање се активира со притискање на `Record` копчето во главниот алатник. Пред тоа треба да се избере `Mono` снимање во опциите кај микрофонот.

✓ **Задача за час.** Вклучете го снимањето и снимете го сопствениот глас. Кажете неколку реченици и внимавајте за време на снимањето покажувачите на ниво на микрофонот да не влезат во црвено – тоа значи ќе настане пресекување на амплитудите во записот, наречено **клипување**. Ако не е доволна јачината на сигналот може ќе треба да ги смените подесувањата на оперативниот систем.

За да го завршите снимањето притиснете на **Stop**. Снимениот говорен сигнал веќе ќе биде прикажан во нова аудио трака која можете да ја преслушате и анализирате. Ако снимката не е добра, затворете ја траката и повторете го снимањето.

Од говорниот сигнал со селектирање и бришење исфрлете ги делниците во кои нема говорен сигнал. Снимете го средниот говорен сигнал со менито **File > Export Selected Audio**. Со помош на спектограмот или спектарот анализирајте го вашиот глас и откријте која е вашата основна фреквенција f_0 !

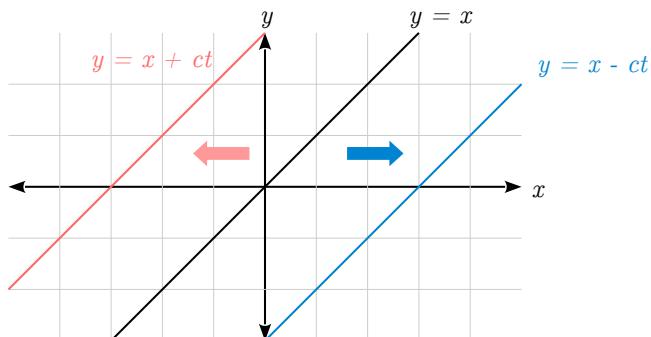
Поглавје 3

Физика на звукот

Звукот претставува нарушување на рамнотежната положба на честичките на дадена еластична средина, попратено со промени во нејзината густина и притисокот. Местото на генерирање на овие нарушувања се нарекува звучен извор, а нивното простирање во околната средина се нарекува звучен бран. Звучните бранови во гасовите и течностите се со лонгитудинална природа, додека во цврстите средини тие се трансверзални. Во физиологијата и психологијата, под поимот звук се подразбира приемот на таквите механички бранови и нивното поимање во мозокот.

3.1 Еднодимензионални бранови

Во најопшт случај може да кажеме дека брановото простирање претставува пренос на информација од една точка до друга. На пример да ја земеме зависноста (3.1) претставена на Сл. 3.1.



Слика 3.1: Движење на зависноста $y = x$ во време во Декартов координатен систем.

Ако таа се простира во позитивната насока на x -оската, тогаш тоа простирање е дадено со (3.2), каде c е брзината на простирање на зависноста. Простирањето на истата зависност во негативната насока на x -оската е дадено со (3.3).

$$y = x \quad (3.1)$$

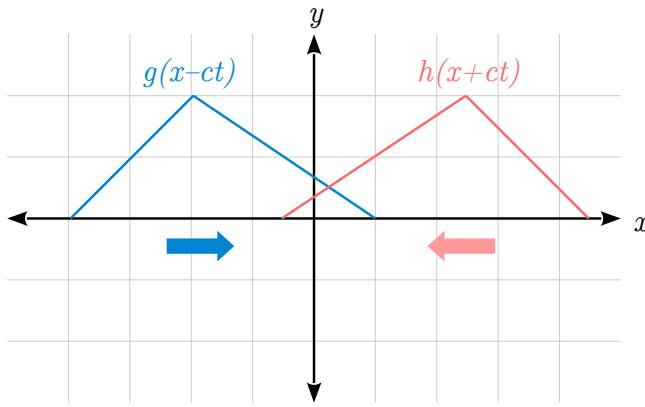
$$y = x - ct \quad (3.2)$$

$$y = x + ct \quad (3.3)$$

Секој еднодимензионален просторен бран може да се претстави како сума од два бранови со спротивни насоки на простирање:

$$y(x, t) = g(x - ct) + h(x + ct), \quad (3.4)$$

каде $g(x, t)$ е функција со произволен облик која се простира во позитивната насока на x -оската, а $h(x, t)$ е функција со произволен облик која се простира во негативната насока на x -оската. На Сл. 3.2 е прикажан пример каде $g(x, t)$ и $h(x, t)$ се огледални триаголни функции.



Слика 3.2: Секој еднодимензионален просторен бран може да се претстави како сума на два бранови кои се простираат во спротивни насоки долж x -оската.

Ако го земеме специјалниот случај:

$$y(x, t) = g(x - ct), \quad (3.5)$$

тогаш бранот е составен само од компонента која се простира во позитивната насока на x -оската. Уште повеќе, ако земеме дека се работи за прост звук (види [Поглавје 2](#)), тогаш обликот на $g(x, t)$ е синусоида, па имаме:

$$y(x, t) = A \cos k(x - ct) = A \cos(kx - kct) = A \cos(kx - \omega t). \quad (3.6)$$

Тука, A е амплитуда на бранот, c е [брзина на простирање](#), а k е [фазен коефициент](#) којшто го воведуваме за да направиме конверзија од димензија простор во димензија агол. Важи:

$$kct = \omega t = 2\pi ft, \quad (3.7)$$

каде ω е [кружна фреквенција](#), а f е [фреквенција](#) во Hz која што е врзана со [периодата](#) T според:

$$f = \frac{1}{T}. \quad (3.8)$$

За k имаме:

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{cT}, \quad (3.9)$$

каде cT е патот што го поминува бранот за една негова периоди и се нарекува [бранова должина](#) λ :

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}, \quad (3.10)$$

па конечно:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (3.11)$$

3.2 Акустичка бранова равенка

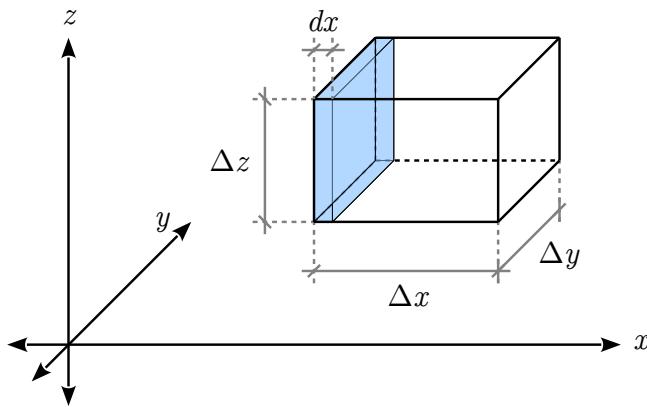
Да замислим во воздушната средина елементарен волумен ΔV во облик на паралелопипед со страни Δx , Δy и Δz , прикажан на [Сл. 3.3](#). На страните на овој паралелопипед делуваат сили кои се последица на притисокот во воздухот. Кога немаме звучни појави, притисокот е еднаков на атмосферскиот притисок p_{atm} во сите точки во овој простор, па затоа и сите сили се еднакви. Поради ова, немаме движење на елементарниот волумен ΔV .

Со појавата на звучен бран во просторот, се јавуваат варијации на атмосферскиот притисок. Во овој случај, вкупниот притисок p_t ќе биде еднаков на:

$$p_t = p_{atm} + p, \quad (3.12)$$

каде со p е означен звучниот притисок. Поради самата природа на звучните појави, секогаш е исполнет условот:

$$p \ll p_{atm}. \quad (3.13)$$



Слика 3.3: Елементарен волумен на воздух во облик на паралелопипед.

Поместување на ΔV . Промените на вкупниот притисок во просторот ќе предизвикаат разлики во силите кои делуваат на страните на елементарниот паралелопипед. Поради ова ќе дојде до негово поместување. Во насока на x -оската резултантната сила ќе биде дадена преку разликата на силата која делува на површината $\Delta x \times \Delta y$ поблиску до координатниот почеток и онаа која делува на површината која е подалеку:

$$F_x = p_t \Delta y \Delta z - \left(p_t + \frac{\partial p_t}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z \quad (3.14)$$

$$= -\frac{\partial p_t}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.15)$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial x} \Delta V. \quad (3.16)$$

Според II Ќутнов закон имаме:

$$F_x = -\frac{\partial p}{\partial x} \Delta V = ma, \quad (3.17)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} \Delta V = \rho \Delta V \frac{\partial v_x}{\partial t}, \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial v_x}{\partial t}. \quad (3.19)$$

За останатите димензии ова равенство може еквивалентно да се изведе:

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -\rho \frac{\partial v_y}{\partial t}, \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho \frac{\partial v_z}{\partial t}. \quad (3.21)$$

Во три димензии ова равенство го има следниот векторски облик:

$$\nabla p = -\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}, \quad (3.22)$$

каде со ∇ е означен грациентот на полето на притисокот кој претставува парцијален извод во трите просторни димензии:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i}_x + \frac{\partial}{\partial y} \vec{i}_y + \frac{\partial}{\partial z} \vec{i}_z. \quad (3.23)$$

Промена на ΔV . Покрај поместувањето во просторот, промената на притисокот предизвикува и промена на елементарниот волумен во вид на негова експанзија и компресија. Ако земеме дека површината $\Delta y \times \Delta z$ поблиску до координатниот почеток се помести во време dt за:

$$dx = v_x dt, \quad (3.24)$$

а подалечната за:

$$dx = \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} \Delta x \right) dt. \quad (3.25)$$

Промената на ΔV во правец на x -оската ќе биде:

$$d\Delta V_x = \left(\left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} \Delta x \right) dt - v_x dt \right) \Delta y \Delta z = \frac{\partial v_x}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z dt = \frac{\partial v_x}{\partial x} \Delta V dt. \quad (3.26)$$

За другите две оски еквивалентно се добива:

$$d\Delta V_y = \frac{\partial v_y}{\partial y} \Delta V dt, \quad (3.27)$$

$$d\Delta V_z = \frac{\partial v_z}{\partial z} \Delta V dt, \quad (3.28)$$

Односно збирно:

$$d\Delta V = \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \Delta V dt. \quad (3.29)$$

Сумата во (3.29) претставува дивергенција на брзината и може да се запише со помош на ∇ операторот за градиент, па за релативната промена на волуменот имаме:

$$\frac{d\Delta V}{\Delta V} = \operatorname{div} \vec{v} dt = \nabla \cdot \vec{v} dt. \quad (3.30)$$

Промена на притисокот p . Промената на волуменот може да ја поврземе со промената на притисокот со помош на гасните закони. Во случајов се работи за адијабатска промена во волуменот, во која, поради нејзината брзина, немаме размена на топлина со соседната средина.¹⁸ За адијабатски промени важи:

$$p_t \Delta V^\kappa = \text{const}. \quad (3.31)$$

Тука κ е адијабатската константа што го дава односот помеѓу специфичната топлина при константен притисок и специфичната топлина при константен волумен, а p_t е вкупниот притисок дефиниран во (3.12). Со диференцирање на овој израз добиваме:

$$p_t \kappa \Delta V^{\kappa-1} d\Delta V + dp_t \Delta V^\kappa = 0, \quad (3.32)$$

$$p_t \kappa \frac{\Delta V^\kappa}{\Delta V} d\Delta V = -\Delta V^\kappa dp_t, \quad (3.33)$$

$$\frac{d\Delta V}{\Delta V} = -\frac{1}{p_t \kappa} dp_t = -\frac{1}{p_t \kappa} dp. \quad (3.34)$$

Ако сега замениме за $d\Delta V/\Delta V$ во (3.30), имаме:

$$-\frac{1}{p_t \kappa} dp = \nabla \cdot \vec{v} dt, \quad (3.35)$$

$$\frac{dp}{dt} \approx \frac{\partial p}{\partial t} = -p_t \kappa \nabla \cdot \vec{v}, \quad (3.36)$$

го добиваме второто равенство кое ги поврзува притисокот и брзината на воздушните честички заедно со (3.22). Сега можеме да ја елиминираме брзината од двете равенства. Најпрвин ќе го диференцираме уште еднаш (3.36):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -p_{atm} \kappa \nabla \cdot \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}, \quad (3.37)$$

¹⁸Изотермички промени во воздухот при простирањето на звукот се јавуваат само во специјални случаи кога средината ја држи температурата на воздухот константна, на пр. во тесни цевки или во порите на порозните материјали.

а потоа ќе земеме дивергенција од двете страни на (3.22):

$$\nabla \cdot \nabla p = \nabla^2 p = -\rho \nabla \cdot \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}. \quad (3.38)$$

Тука p_t и ρ сме ги земале како константи, т.е. $p_t = p_{atm}$, што е оправдано кога е задоволен условот (3.13). ∇^2 пак, го означува лапласијанот.

Бранова равенка. Со замена конечно ја добиваме познатата бранова равенка:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p, \quad (3.39)$$

во која со c е означена брзината на звукот дадена со:

$$c = \sqrt{\frac{p_{atm} \kappa}{\rho}}. \quad (3.40)$$

Брановата равенка со воведување на одредени почетни и гранични услови може да се примени на секое простирање на звучните бранови во воздухот.

3.3 Рамнински бранови

Релациите кои ги опишуваат еднодимензионалните бранови кои ги воведовме погоре, можат да се изведат од брановата равенка ако таа се поедностави за една димензија x :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}, \quad (3.41)$$

За синусоидален звучен извор решението во фазорски облик ќе биде:

$$\underline{p}(x,t) = \underline{p}(x)e^{j\omega t}, \quad (3.42)$$

каде $\underline{p}(x)$ е комплексна функција од x . Со замена на ова решение во (3.41), имаме:

$$\underline{p}(x)(j\omega)^2 e^{j\omega t} = c^2 e^{j\omega t} \frac{d^2 \underline{p}(x)}{dx^2}, \quad (3.43)$$

$$-\underline{p}(x)\omega^2 = c^2 \frac{d^2 \underline{p}(x)}{dx^2}, \quad (3.44)$$

$$\frac{d^2 \underline{p}(x)}{dx^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \underline{p}(x) = 0, \quad (3.45)$$

$$\frac{d^2 \underline{p}(x)}{dx^2} + k^2 \underline{p}(x) = 0, \quad (3.46)$$

$$(3.47)$$

каде го заменим фазниот коефициент $k = \omega/c$. Решението на ова равенство е:

$$\underline{p}(x) = \underline{A}_+ e^{-jkx} + \underline{A}_- e^{jkx}, \quad (3.48)$$

каде \underline{A}_+ и \underline{A}_- се комплексни константи коишто зависат од почетните и граничните услови. Конечното решение кога ќе се внесе (3.42) ќе биде:

$$\underline{p}(x, t) = \underline{A}_+ e^{j(\omega t - kx)} + \underline{A}_- e^{j(\omega t + kx)}. \quad (3.49)$$

Од изразите може да се види дека нашето почетно тврдење дека секој еднодимензионален бран може да се претстави како збир од два спротивно насочени бранови е точно. Исто така, може да се види дека вредноста c воведена со (3.40) навистина претставува брзина на простирање на

звукниот бран. Конечно, ако земеме простирање на само еден бран во позитивната насока на x -оската, како и дека амплитудата на тој бран за $x = 0$ е дадена со A , тогаш (3.49) се упростува во:

$$p = Ae^{j(\omega t - kx)}, \quad (3.50)$$

чија што аналитичка форма:

$$p = A \cos(\omega t - kx), \quad (3.51)$$

е еквивалентна со (3.6).

3.4 Брзина на простирање на звукот

Брзината на простирање на звукот c која важи за сите гасови кога се работи за адијабатски процес, беше дадена со (3.40):

$$c = \sqrt{\frac{p_{atm}\kappa}{\rho}},$$

каде p_{atm} е статичкиот атмосферски притисок, $\kappa = 1,4$ е адијабатската константа, а ρ е густината на воздухот. За температура од $T = 0^\circ\text{C}$ воздушниот притисок на ниво на морето е $p_{atm} = 101,325 \text{ kPa}$, а густината на воздухот е $\rho = 1,293 \text{ kg/m}^3$, па се добива дека брзината на звукот е $c = 331,4 \text{ m/s}$.

За да ја најдеме брзината на звукот за различни температури ќе тргнеме од универзалниот гасен закон:

$$pV = nRT, \quad (3.52)$$

каде p е притисокот на гасот, V е неговиот волумен, n е количеството материја во молови, R е универзалната гасна константа, а T е неговата апсолутна температура во К. Ако ги поделиме двете страни со густината на воздухот ρ ќе добиеме:

$$\frac{pV}{\rho} = \frac{nRT}{\rho}, \quad (3.53)$$

$$\frac{p}{\rho} = \frac{nRT}{\rho V} = \frac{nR}{m} = const \cdot T, \quad (3.54)$$

$$(3.55)$$

каде m е масата на гасот. Можеме да видиме дека односот p/ρ е константен за дадена температура. Од таму имаме:

$$c = \sqrt{\frac{p_{atm}\kappa}{\rho}} = \sqrt{const \cdot \kappa T} = c_0 \sqrt{\frac{const \cdot T}{const \cdot T_0}} = c_0 \sqrt{\frac{T}{273}}, \quad (3.56)$$

каде c_0 е брзината на звукот за температура од 0°C . Од таму можеме да ја пресметаме брзината на звукот за температура од 20°C која изнесува $c_{20} = 343 \text{ m/s} = 1234 \text{ km/h} = 1 \text{ Mach}$. При движење на објект со оваа брзина притисокот од звучните бранови се концентрира пред објектот во вид на [звукен сид](#), Сл. 3.4. Во Табелата 3.1 се дадени брзини на простирање на звукот во различни материјални средини.

3.5 Брзина и поместување на воздушните честички

Врската помеѓу притисокот и брзината на поместување на воздушните честички за простирање во една димензија беше дадена со (3.19):

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial v_x}{\partial t}.$$

¹⁹By Ensign John Gay, U.S. Navy - This Image was released by the United States Navy with the ID 990707-N-6483G-001. Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3890362>



Слика 3.4: Пробивање на звучен сид на брзина од 1 Mach.¹⁹

Табела 3.1: Брзина на звукот во различни средини.

Средина	$c \left[\frac{\text{м}}{\text{s}} \right]$
Вода 10 °C	1440
Метал	3000 – 5000
Дрво	3600 – 4600
Пластика	1000 – 2500
Мека гума	70

Исто така од (3.36) може да ја изведеме и втората релација помеѓу притисокот и брзината на воздушните честички за една димензија:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} &= -p_t \kappa \nabla \cdot \vec{v} \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= -\rho c^2 \frac{\partial v_x}{\partial x}. \end{aligned} \quad (3.57)$$

Од релациите (3.19) и релацијата за поедноставениот случај за рамнински бран кој се простира во една димензија (3.50):

$$p = A e^{j(\omega t - kx)},$$

можеме да ја најдеме брзината на поместување на воздушните честички за случај на еднодимензионален рамнински звучен бран, ако претпоставиме дека и таа се менува по синусоидален закон:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\rho j \omega v, \quad (3.58)$$

$$v = j \frac{1}{\rho \omega} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{k}{\rho \omega} p = \frac{p}{\rho c}. \quad (3.59)$$

Може да видиме дека како и кај притисокот, ефективната вредност на брзината на воздушните честички не се менува за промена на x , како и дека **брзината и притисокот се во фаза**.

Кога ја знаеме брзината на воздушните честички можеме да го најдеме и нивното поместување ξ кое за синусоидални звучни бранови изнесува:

$$\xi = \int v dt = \frac{v}{\omega}. \quad (3.60)$$

Може да се види дека со зголемување на фреквенцијата на звукот поместувањето на честичките се намалува.

3.6 Сферни бранови

Звучните бранови во слободен простор се движат во вид на сферни бранови околу звучниот извор. За нивна анализа згодно е да се премине на сферен координатен систем даден на Сл. 3.5. Еден тродимензионален вектор \vec{M} е дефиниран во правоаголен координатен систем со трите димензии (x, y, z) , додека во сферен координатен систем тој е дефиниран со растојанието од координатниот почеток r и аглите ϕ – помеѓу проекцијата на векторот \vec{M} на xy -рамнината со x -оската, и θ – помеѓу \vec{M} и z -оската.²⁰

Ако изворот на звук се постави во средината на овој сферен координатен систем, поради симетријата на простирањето на звучниот бран, полната форма на лапласијанот во брановата равенка (3.39) ќе биде поедноставена функција од r :

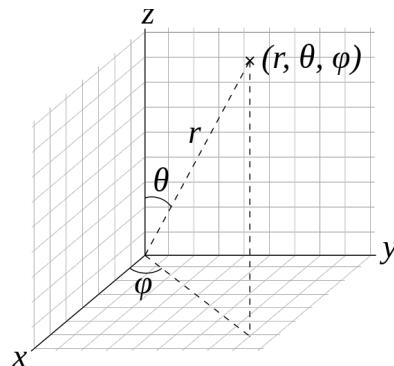
$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p = c^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = c^2 \frac{1}{r} \frac{\partial^2 (pr)}{\partial r^2}, \quad (3.61)$$

$$\frac{\partial^2 (pr)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 (pr)}{\partial r^2}, \quad (3.62)$$

каде е земено дека r не е функција од времето t . Бидејќи формата на оваа равенка е иста со онаа за рамнински бранови (3.41) и овде решението за синусоидална звучна побуда ќе биде слично:

$$pr = A e^{j(\omega t - kr)}, \quad (3.63)$$

$$p = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)}. \quad (3.64)$$



Слика 3.5: Сферен координатен систем.²¹

Ова покажува дека притисокот е обратнопропорционален на растојанието, што може да се каже и поинаку како:

$$pr = \text{const}. \quad (3.65)$$

²⁰За премин од правоаголен во сферен координатен систем важат равенствата:

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \varphi &= \arctan \frac{y}{x} \\ \theta &= \arccos \frac{z}{r} \end{aligned}$$

додека, за премин назад во правоаголен координатен систем:

$$\begin{aligned} x &= r \sin \theta \cos \varphi \\ y &= r \sin \theta \sin \varphi \\ z &= r \cos \theta \end{aligned}$$

За брзината на воздушните честички имаме:

$$v = j \frac{1}{\omega \rho} \frac{\partial p}{\partial r} = j \frac{1}{\omega \rho} \left(\frac{(-jk)Ae^{j(\omega t - kr)} \cdot r - Ae^{j(\omega t - kr)} \cdot 1}{r^2} \right) = \frac{1 + jkr}{j\omega \rho} \frac{A}{r^2} e^{j(\omega t - kr)}, \quad (3.66)$$

за чие решавање сме го употребиле правилото за диференцирање на количник на две функции.²²

3.7 Специфична акустичка импеданса

Можеме да направиме аналогија помеѓу звучниот притисок и електричниот напон, како и помеѓу брзината на воздушните честички и струјата поради нивното браново простирање. Според таа аналогија односот помеѓу притисокот и брзината се нарекува **специфична акустичка импеданса** Z_s . За сферни бранови, специфичната акустичка импеданса ќе биде:

$$Z_s = \frac{p}{v} = \frac{j\rho c k r}{1 + jkr} = |Z_s| e^{j\phi}, \quad (3.67)$$

каде:

$$|Z_s| = \frac{\rho c k r}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} = \rho c \cos \phi, \quad (3.68)$$

$$\phi = \arctan \frac{1}{kr}. \quad (3.69)$$

Тука фазата на импедансата ϕ е **фазната разлика** помеѓу притисокот и брзината на воздушните честички, а во (3.68) сме замениле е:

$$\frac{kr}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} = \cos \phi. \quad (3.70)$$

На Сл. 3.6 и 3.7 е прикажана зависност на аголот ϕ и вредноста на $\cos \phi$ во зависност од растојанието од изворот r изразено во λ . Можеме да видиме дека веќе за $r = \lambda$ фазната разлика ϕ помеѓу притисокот и брзината на воздушните честички е занемарлива, па сферните бранови преминуваат во рамнински. Специфичната импеданса Z_s за $\cos \phi \approx 1$, го добива поедноставениот облик за рамнински бранови, до кој можевме да дојдеме и од (3.59):

$$Z_s = \frac{p}{v} = \rho c. \quad (3.71)$$

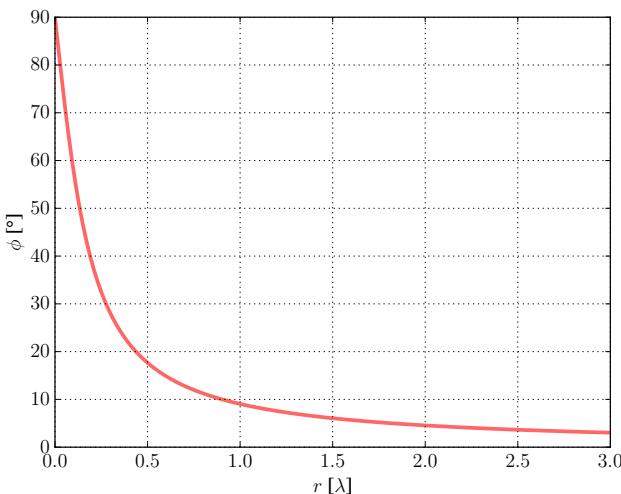
Вредноста на Z_s за рамнински звучни бранови кои се шират во воздух со температура од 20 °C изнесува $414 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$.

Специфичната акустичка импеданса за сферни бранови (3.67) можеме да ја раздвоиме и на нејзиниот реален и имагинарен дел:

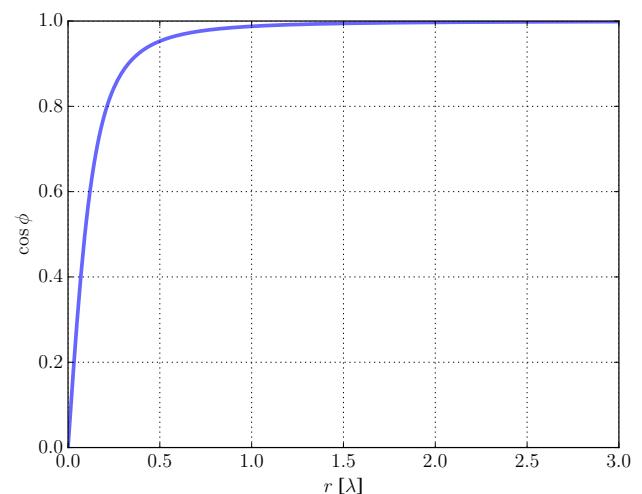
$$Z_s = R_s + jX_s = \frac{j\rho c k r}{1 + jkr} \cdot \frac{1 - jkr}{1 - jkr} = \frac{\rho c k^2 r^2}{1 + k^2 r^2} + j \frac{\rho c k r}{1 + k^2 r^2}. \quad (3.72)$$

Бидејќи X_s е секогаш позитивна таа има особини на индуктанса. На Сл. 3.8 се исцртани нормализираните $R_s/\rho c$ и $X_s/\rho c$ во зависност од растојанието r кое е изразено во однос на λ . Можеме да видиме дека за $r = \lambda$ веќе R_s речиси ја постигнува својата максимална големина која ја има за рамнински бранови. Исто така може да се забележи дека X_s го надмашува R_s само за мали вредности на r во однос на λ , а тежи кон 0 со зголемувањето на r .

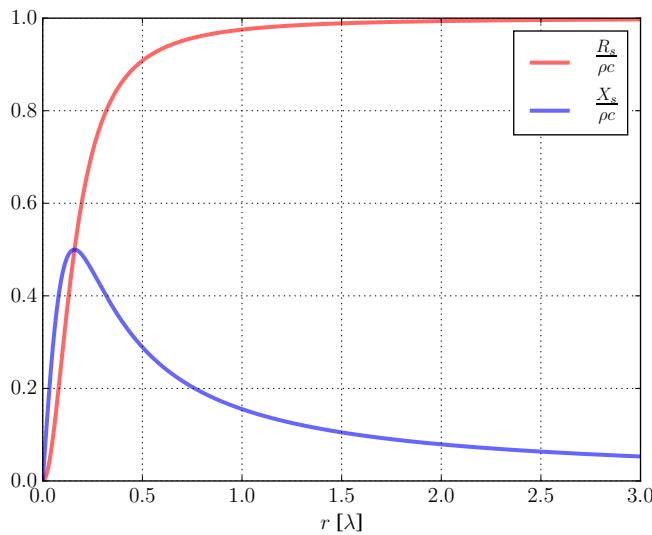
²²Според ова правило $\frac{d}{dx} \frac{g(x)}{h(x)} = \frac{g'(x)h(x) - g(x)h'(x)}{h(x)^2}$.



Слика 3.6: Зависност на аголот ϕ од растојанието r изразено во λ .



Слика 3.7: Зависност на $\cos \phi$ од растојанието r изразено во λ .



Слика 3.8: Реалната и имагинарната компонента на специфичната акустичка импеданса.

3.8 Иntenзитет на звук и акустичка мокност

Од аналогијата помеѓу притисокот и напонот, и брзината на воздушните честички и струјата, за реалната акустичка мокност треба да важи равенството:

$$J = pv \cos \phi, \quad (3.73)$$

но, ако ги анализираме димензиите на десната страна ќе добиеме:

$$[pv] = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} = \frac{\text{N m}}{\text{s m}^2} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}, \quad (3.74)$$

што значи дека добиваме мокност по површина. Со други зборови имаме непотполна аналогија помеѓу двете величини во акустички и двете величини во електричен домен. Изразот (3.73) всушност го дава **интензитетот на звукот**. За сферни и рамнински бранови неговиот облик е даден во Табелата 3.2. Може да забележиме дека во однос на r изразите за интензитетот на звукот се идентични па може да заклучиме дека интензитетот на звукот може да се добие за сите типови на бранови преку:

$$J = \frac{p^2}{\rho c}. \quad (3.75)$$

Табела 3.2: Интензитет на звукот за различни типови на бранови.

Тип на бранови	во однос на p	во однос на v
Сферни	$J = \frac{p^2}{\rho c}$	$J = v^2 \rho c \cos^2 \phi$
Рамнински	$J = \frac{p^2}{\rho c}$	$J = v^2 \rho c$

Знаејќи го интензитетот на звукот можеме да ја пресметаме **акустичката моќност** P_a како:

$$P_a = \oint_S \vec{J} d\vec{S}, \quad (3.76)$$

каде \vec{J} е векторот на интензитетот на звукот, S е произволна површина која го потполно опколува изворот на звукот, а \vec{S} е векторот нормално насочен на нејзе. Овој израз се поедноставува за звучни бранови кои се простираат низ затворена цевка, т.н. звуковод, со напречен пресек S :

$$P_a = SJ, \quad (3.77)$$

односно за сферни бранови:

$$P_a = 4\pi r^2 J. \quad (3.78)$$

Од равенствата (3.75) и (3.78) можеме да го добиеме и следниот израз за акустичкиот притисок кај сферните бранови:

$$p = \sqrt{J\rho c} = \sqrt{\frac{P_a}{4\pi r^2} \rho c} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{P_a \rho c}{4\pi}}, \quad (3.79)$$

кое ни кажува на што е еднаква константата во изразот (3.65): $pr = const.$

3.9 Акустичка импеданса

До потполна аналогија помеѓу величините во акустички и електричен домен ќе дојдеме со воведување на величината **акустички проток** q која ќе ја дефинираме како:

$$q = \int_S \vec{v} d\vec{S}, \quad (3.80)$$

кое, ако брзината е константна долж целата површина, се поедноставува во:

$$q = vS. \quad (3.81)$$

Димензиите во кои се изразува акустичкиот проток се $\frac{m^3}{s}$ што го оправдува избраното име. Соодветните релации помеѓу акустичкиот проток и притисокот ќе ги добиеме со замена на v во (3.19) и (3.57):

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\rho}{S} \frac{\partial q}{\partial t}, \quad (3.82)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\rho c^2}{S} \frac{\partial q}{\partial x}. \quad (3.83)$$

За акустичката моќност сега имаме, според аналогијата со електричниот домен:

$$P_a = pq. \quad (3.84)$$

Во однос на протокот, поради тоа што тој во себе содржи информации за геометријата на просторот на простирање на звучните бранови, специфичната акустичка импеданса преминува во **акустичка импеданса** Z_a :

$$Z_a = \frac{p}{q} = \frac{p}{vS} = \frac{Z_s}{S}. \quad (3.85)$$

Ако замениме за Z_s од (3.72) имаме:

$$Z_a = \frac{1}{4\pi r^2} \left(\frac{\rho c k^2 r^2}{1 + k^2 r^2} + j \frac{\rho c k r}{1 + k^2 r^2} \right) = R_a + j X_a, \quad (3.86)$$

па реалната акустичка моќност можеме да ја добијеме како:

$$P_a = q^2 R_a = q^2 \frac{\rho c k^2}{4\pi(1 + k^2 r^2)}. \quad (3.87)$$

Акустичката импеданса на зрачење можеме да ја најдеме ако во (3.86) замениме за радиусот на изворот r_0 :

$$Z_{a0} = \frac{1}{4\pi r_0^2} \left(\frac{\rho c k^2 r_0^2}{1 + k^2 r_0^2} + j \frac{\rho c k r_0}{1 + k^2 r_0^2} \right) = R_{a0} + j X_{a0}. \quad (3.88)$$

Користејќи го R_{a0} можеме со замена во (3.87) да ја најдеме акустичката моќност на изворот:

$$P_a = q_0^2 R_{a0} = q_0^2 \frac{\rho c k^2}{4\pi(1 + k^2 r_0^2)}. \quad (3.89)$$

Интересно да ги разгледаме двата крајни случаји за димензиите на изворот. Кога $r_0 \ll \lambda$ членот $kr_0 \ll 1$, па важи:

$$P_a = q_0^2 \frac{\rho c k^2}{4\pi}. \quad (3.90)$$

Со овој израз е дадена акустичката моќност на тн. **точkest извор**. Од изразот може да видиме дека акустичката моќност на точkest извор не зависи од неговите димензии r_0 . Со други зборови ако димензиите на изворот се доволно помали од λ , нивната вредност, нити па неговиот облик, нема влијание врз акустичката моќност.

Во спротивниот случај, кога $r_0 \gg \lambda$ членот $kr_0 \gg 1$, па важи:

$$P_a = q_0^2 \frac{\rho c}{4\pi r_0^2} = q_0^2 \frac{\rho c}{S_0}. \quad (3.91)$$

Значи за извор кој е многу поголем од брановата должина која ја зрачи, акустичката моќност не зависи од неговиот облик, ами од неговата површина. Тука, без подробна анализа ќе направиме генерализација дека за извори со различни облици на мембраната, како на пр. конус, полутопка, клип итн., во изразот за P_a фигурира **ефективна површина S_0** , дефинирана како проекција на вистинска површина на изворот во насоката на простирањето. Влијанието на обликот на звучниот извор игра улога во зрачењето само за фреквенции за кои $r_0 \approx \lambda$.

За дискусија, да ја изразиме акустичката моќност дадена со (3.90) преку ефективната површина на мембраната S_0 и брзината на нејзиното движење ξ_0 :

$$P_a = q_0^2 \frac{\rho c k^2}{4\pi} = v_0^2 S_0^2 \frac{\rho c \omega^2}{4\pi c^2} = \frac{\omega^4 \xi_0^2 S_0^2 \rho}{4\pi c}. \quad (3.92)$$

Од тука, можеме да видиме дека акустичката моќност на точkest извор, преку протокот, е правопропорционална на производот на квадратите на неговата ефективна површина и амплитудата на неговото движење, како и четвртиот степен од кружната фреквенција на звукот, т.е. $P_a \propto \omega^4 S_0^2 \xi_0^2$. Ова значи дека извор со помали димензии треба да има дотолку поголемо движење за да постигне иста акустичка моќност, односно проток, како извор со поголеми димензии. Ова исто така значи дека потребните димензии и движење на изворот за постигнување на одредена акустичка моќност преку протокот зависат од фреквенцијата на звукот. Односно, за ниски фреквенции изворот треба да е многу поголем и да има поголемо движење за да постигне иста моќност со извор кој зрачи на високи фреквенции. Како пример споредете ја големината на мембраната на тапанот и големината на фудбалското судиско свирче.

3.10 Просторен агол на зрачење

Да замислиме точкест извор вграден во една бесконечно голема и крута површина, на пр. една мембра на со мали димензии во однос на брановата должина на звучните бранови вградена во цврст и гладок сид. Тогаш, специфичната акустичка импеданса Z_s нема да се промени затоа што таа зависи само од типот на звучните бранови, додека акустичката импеданса на зрачење Z_{a0} ќе биде различна од онаа дефинирана за точкест извор во слободен простор (3.88) поради помалиот простор на зрачење на изворот. Така, овојпат ќе имаме:

$$Z_{a0} = \frac{1}{2\pi r_0^2} Z_s = \frac{1}{2\pi r_0^2} \left(\frac{\rho c k^2 r_0^2}{1 + k^2 r_0^2} + j \frac{\rho c k r_0}{1 + k^2 r_0^2} \right) = \frac{\rho c k^2}{2\pi} + j \frac{\rho c k}{2\pi r_0}, \quad (3.93)$$

Или во општ случај може да запишеме:

$$Z_{a0} = \frac{1}{\Omega_z r_0^2} Z_s = \frac{\rho c k^2}{\Omega_z} + j \frac{\rho c k}{\Omega_z r_0} = R_{a0} + j X_{a0}, \quad (3.94)$$

каде Ω_z е просторниот агол на зрачење. Ова значи и дека акустичката моќност на изворот зависи од аголот на зрачење:

$$P_a = q_0^2 \frac{\rho c k^2}{\Omega_z}, \quad (3.95)$$

а и интензитетот на звукот кој го генерира:

$$J = \frac{P_a}{\Omega_z r^2}. \quad (3.96)$$

Па така, ако претпоставиме дека звучниот извор генерира константен акустички проток, тогаш промената на неговата акустичка моќност ако го преместиме од слободен простор до површината на еден сид ќе биде:

$$\frac{P_{a2}}{P_{a1}} = \frac{q_0^2 \frac{\rho c k^2}{\Omega_{z2}}}{q_0^2 \frac{\rho c k^2}{\Omega_{z1}}} = \frac{\Omega_{z1}}{\Omega_{z2}} = \frac{4\pi}{2\pi} = 2, \quad (3.97)$$

односно тој ќе има двојно поголема моќност. Интензитетот на звукот, од друга страна, кој тој го генерира на исто растојание r ќе биде 4 пати поголем:

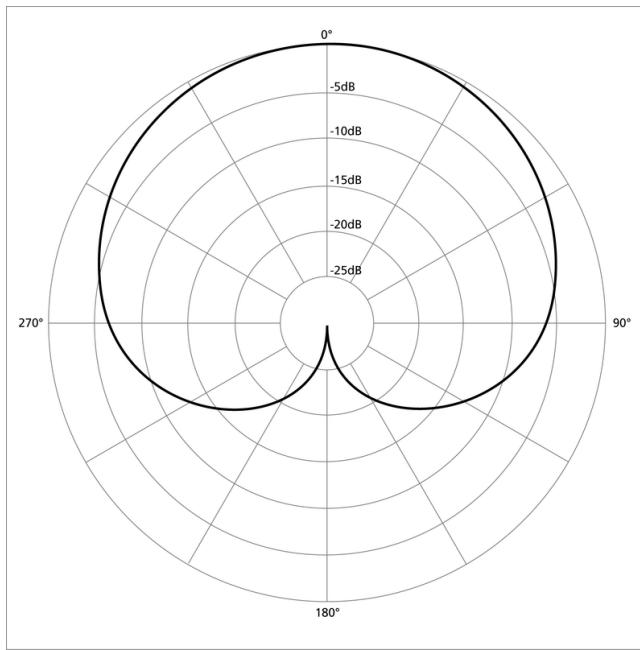
$$\frac{J_2}{J_1} = \frac{\frac{P_{a2}}{\Omega_{z2} r^2}}{\frac{P_{a1}}{\Omega_{z1} r^2}} = \frac{2\Omega_{z1}}{\Omega_{z2}} = \frac{2 \cdot 4\pi}{2\pi} = 4. \quad (3.98)$$

Значи зголемување на моќноста и интензитетот на звукот на еден извор може да добиеме со намалување на неговиот просторен агол на зрачење. Ова често се користи во човековото секојдневие, на пр. кај мегафоните, хорните на звучниците, поставување на звучниците до сид, или уште повеќе во ќопш²³, како и кај довикувањето со поставување на рацете како инка на устата.

3.11 Крива на насоченост

Сферните звучни извори за кои зборувавме до сега имаат ненасочено зрачење. Во практиката изворите на звук имаат облици различни од сфера, па во нивната непосредна близина, релативно на брановата должина, звучното поле е во општ случај насочено. Графичкиот приказ на насоченоста на звучниот извор се нарекува **крива на насоченост**, Сл. 3.9. Таа во поларен координатен систем ја претставува насоченоста на звучниот извор како функција од аголот на зрачење θ пресметан во однос на оската на зрачење:

$$\Gamma = \frac{p_\theta}{p_0}, \quad (3.99)$$



Слика 3.9: Крива на зрачење на звучен извор.²⁴

каде p_θ е звучниот притисок генериран од изворот под агол θ , а p_0 е притисокот генериран на исто растојание долж оската на зрачење.

Кривата на насоченост на звучните извори зависи од фреквенцијата на звукот. За ниски фреквенции, изворот се однесува како точkest извор па кривата на зрачење е ненасочена. Ова се менува за повисоките фреквенции за кои обликот на изворот игра улога во зрачењето.

Моќноста на зрачење сега може да ја најдеме од општиот израз даден со 3.76:

$$P_a = \oint_S J_\theta dS = J_0 \oint_S \frac{J_\theta}{J_0} dS = J_0 \oint_S \Gamma^2 dS = J_0 r^2 \oint_0^{4\pi} \Gamma^2 d\Omega, \quad (3.100)$$

каде интегралот го дава **ефективниот просторен агол на зрачење**:

$$\Omega_z = \oint_0^{4\pi} \Gamma^2 d\Omega, \quad (3.101)$$

Од таму имаме:

$$J_0 = \frac{P_a}{\Omega_z r^2}. \quad (3.102)$$

Споредено со (3.96) можеме да заклучиме дека насочен извор ќе го даде истиот интензитет долж оската J_0 како ненасочен извор на кој сме му го намалиле просторниот агол на зрачење на Ω_z . За изразувања на оваа зависност математички се воведува **кофициентот на насоченост γ** :

$$\gamma = \frac{4\pi}{\Omega_z}, \quad (3.103)$$

па за J_0 имаме:

$$J_0 = \gamma \frac{P_a}{4\pi r^2}. \quad (3.104)$$

За произволен агол θ од оската на зрачење, интензитетот на звукот ќе биде даден со:

$$J_\theta = \gamma \frac{P_a}{4\pi r^2} \Gamma^2. \quad (3.105)$$

²³Ова успева само за ниските фреквенции, за кои изворот можеме да го сметаме за точkest, но и за кои можеме да го поставиме доволно близку до сидот релативно на брановата должина на звукот.

²⁴Galak76 "Polar pattern cardioid" <https://en.wikipedia.org/wiki/Microphone>.

3.12 Рефлексија на звук

Во досегашните разгледувања го анализираме простирањето на звучните бранови во неограничен слободен простор, па земавме дека звукот е потполно описан како прогресивен бран. Во реалноста на граничните површини на средината доаѓа до рефлексија на звукот, па правилно е да се земат и прогресивниот и рефлектиријниот бран описан со (3.49):

$$p(x, t) = A_+ e^{j(\omega t - kx)} + A_- e^{j(\omega t + kx)}.$$

За брзината на воздушните честички според (3.59) имаме:

$$v = \frac{A_+}{\rho c} e^{j(\omega t - kx)} - \frac{A_-}{\rho c} e^{j(\omega t + kx)}. \quad (3.106)$$

Ако претпоставиме дека звучниот бран се простира во идеална цевка, т.е. звуковод, која на едниот крај е затворена со специфична импеданса Z_s , тогаш ако го земеме координатниот почеток $x = 0$ на крајот од цевката, во таа точка за односот p/v добиваме:

$$\left. \frac{p}{v} \right|_{x=0} = \rho c \frac{A_+ + A_-}{A_+ - A_-} = Z_s. \quad (3.107)$$

Користејќи ја оваа релација може да го дефинираме **коефициентот на рефлексија r** кој го дава односот на рефлектиријниот и директниот звучен бран:

$$r = \frac{A_-}{A_+} = \frac{Z_s - \rho c}{Z_s + \rho c} = \beta e^{j\delta}, \quad (3.108)$$

каде β го дава односот на магнитудите на двата брана е δ фазната разлика помеѓу брановите. Интересно е да се забележи дека рефлексија ќе немаме само ако $Z_s = \rho c$, односно ако специфичната импеданса на крајот на звуководот е иста со онаа на воздухот низ кој се простира звучниот бран.²⁵ За звуковод, посодветно е да ја искористиме акустичката импеданса за изразување на r :

$$r = \frac{Z_a - \frac{\rho c}{S}}{Z_s + \frac{\rho c}{S}}, \quad (3.109)$$

каде S е површината на напречниот пресек на звуководот.

За екстремниот случај кога $Z_s \rightarrow \infty$ ²⁶ имаме $r = 1$, односно $A_- = A_+$, па станува збор за апсолутна рефлексија, односно немаме трансфер на енергија во бариерата. Тогаш вредноста на притисокот во $x = 0$ според (3.49) ќе биде:

$$p(0,t) = 2A_+ e^{j\omega t}, \quad (3.110)$$

а брзината на воздушните честички според (3.106) ќе е:

$$v(0,t) = 0, \quad (3.111)$$

што е и логично за бесконечна импеданса.

Во случај пак, кога $Z_s = 0$ ²⁷ имаме $r = -1$ па повторно имаме тотална рефлексија но со поместување на фазата за $\delta = 180^\circ$. Во овој случај за притисокот и брзината ќе имаме:

$$p(0,t) = 0, \quad (3.112)$$

$$v(0,t) = 2 \frac{A_+}{\rho c} e^{j\omega t}. \quad (3.113)$$

²⁵ Оваа појава е причината зошто во радиотехниката се поставува импеданса на крајот од водовите единаква со онаа на самиот вод, наречена „терминатор“.

²⁶ Аналогно на отворен вод во електричен домен.

²⁷ Аналогно на куса врска во електричен домен.

Во општ случај, при нормална инциденција на звучен бран на гранична површина помеѓу две средини со различни специфични акустички импеданси, дадени со $\rho_1 c_1$ и $\rho_2 c_2$, соодветно, ќе важи:

$$r = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}. \quad (3.114)$$

Може да се види дека од аспект на магнитудата на r постои потполна симетрија во однос на тоа која средина е прва а која втора. Во звуководи, еквивалентниот израз даден во однос на акустичката импеданса на двете средини би бил:

$$r = \frac{\frac{\rho_2 c_2}{S_2} - \frac{\rho_1 c_1}{S_1}}{\frac{\rho_2 c_2}{S_2} + \frac{\rho_1 c_1}{S_1}}. \quad (3.115)$$

Во случај кога во звуководот нема промена на средината, туку само на напречниот пресек, повторно ќе се јави рефлексија.²⁸ Во тој случај коефициентот на рефлексија ќе биде даден со:

$$r = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2}. \quad (3.116)$$

Двата екстремни случаји, $Z_s \rightarrow \infty$ и $Z_s = 0$, во реалноста ретко можат да се појават, но добиените резултати важат и кога импедансите на двете средини се многу различни. Така, доволно е $Z_s \gg \rho c$, односно $\rho_2 c_2 \gg \rho_1 c_1$, што се јавува кога воздушната средина се граничи со средина која има поголема густина, но и поголема брзина на простирање на звукот. Вакви средини има многу, како што беше илустрирано во Табелата 3.1. Во звуковод ова би било задоволено ако единиот негов крај е затворен.

Спротивниот услов, т.е. $Z_s \ll \rho c$ или $\rho_2 c_2 \ll \rho_1 c_1$, потешко може да се реализира при простирање на звукот низ воздухот, но може да се сртне кога звучниот бран се простира во водата и доаѓа до нејзината површина. Во звуковод условот $\rho_2 c_2 / S_2 \ll \rho_1 c_1 / S_1$ може да се задоволи кога $S_2 \gg S_1$, како на пример кога единиот негов крај е отворен во слободен простор.²⁹

3.13 Рефлексија на звук при коса инциденција

При коса инциденција на звучен бран на гранична површина, прикажано на Сл. 3.10 може да се употребат законите на геометриската оптика ако граничната површина е со димензии поголеми од брановата должина λ . Еквивалентната област во акустиката се нарекува **геометриска акустика** и во неа се анализира простирањето на тенки спонови акустичка енергија наречени **звукни зраци**.

Рефлектиралиот бран при коса инциденција се движи со истата брзина c па за да ја задржи истата бранова должина λ аголот на одбивање θ_r мора да е ист со оној на инциденција θ . Бранот кој продира во другата средина ќе се движи со друга брзина c' , па следствено ќе има и друга бранова должина $\lambda' = c'/f$. Сепак, брановата должина на трагот кој го оставаат двета брана на граничната површина λ_g мора да се поклопи, поради што аголот на бранот кој продира ќе биде различен од инцидентниот $\theta' \neq \theta$. Тој може да се пресмета користејќи го **Снеловиот закон**:

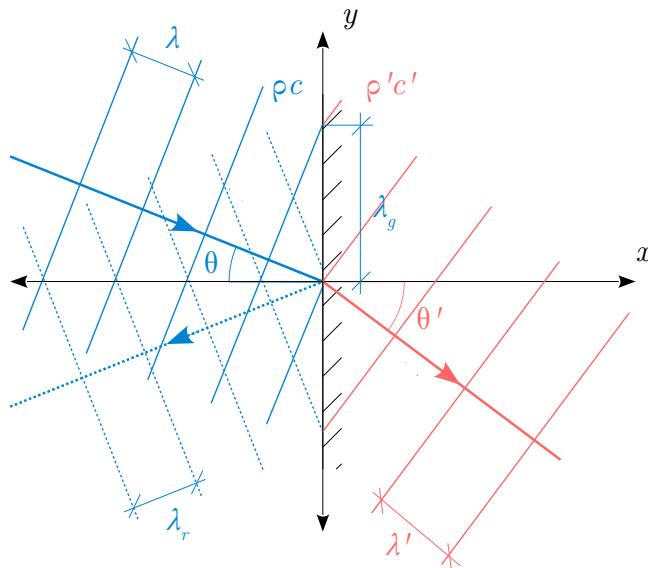
$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta'} = \frac{\theta}{\theta'}. \quad (3.117)$$

Може да се види дека кога брзината на простирање на звукот во втората средина е поголема, т.е. $c' > c$, тогаш и $\theta' > \theta$. Поради ова постои агол на инциденција за кој бранот кој продира во новата средина ќе биде под агол $\theta' = \pi/2$. Над овој агол, нема да има простирање во новата средина. Ова е одредено со релацијата:

$$\sin \theta = \frac{c}{c'}. \quad (3.118)$$

²⁸Ваков вид на рефлексија е суштински за обликувањето на преносната функција на вокалниот тракт при зборувањето.

²⁹Во аналогијата со електричен вод, затворен звуковод одговара на отворен вод, а отворен звуковод одговара на кусо врзан вод.



Слика 3.10: Рефлексија на звук при коса инциденција.

3.14 Стојни бранови

Од изразот за коефициентот на рефлексија (3.108) и изразот за еднодимензионални бранови (3.49) можеме да го напишеме изразот за звучниот притисок при нормална инциденција:

$$p = A_+ (e^{j(\omega t - kx)} + \beta e^{j(\omega t + kx + \delta)}). \quad (3.119)$$

Кога $Z_s \gg \rho c$ имаме totalna рефлексија, па $r = 1$ а овој израз се сведува на:

$$\begin{aligned} p &= A_+ (e^{j(\omega t - kx)} + \beta e^{j(\omega t + kx + \delta)}) = \\ &= A_+ [\cos(-kx) + j \sin(-kx) + \cos(kx) + j \sin(kx)] e^{j\omega t} = \\ &= 2A_+ \cos kx e^{j\omega t}. \end{aligned} \quad (3.120)$$

Може да забележиме дека иако амплитудата зависи од растојанието x , звучниот бран описан со (3.120) не се простира, односно преставува **стоен бран**. Неговата амплитуда е максимална и е двојно поголема од онаа на самиот прогресивен бран, на сите локации за кои $\cos kx = 1$, односно за $x = 0, -\lambda/2, -\lambda, -3\lambda/2, \dots$. Спротивно, за сите позиции за кои $\cos kx = 0$, односно $x = -\lambda/4, -3\lambda/4, -5\lambda/4, \dots$ амплитудата на притисокот на стојниот бран ќе биде 0. Така ако се движиме долж x оската почнувајќи од граничната површина па наназад, ќе забележиме дека звукот со движењето се намалува сè додека сосема не се изгуби за $x = -\lambda/4$, за повторно да почне да се засилува до својот максимум за $x = -\lambda/2$, по што целиот процес се повторува. Ова е илустрирано на Сл. 3.11.

За брзината на воздушните честички важи:

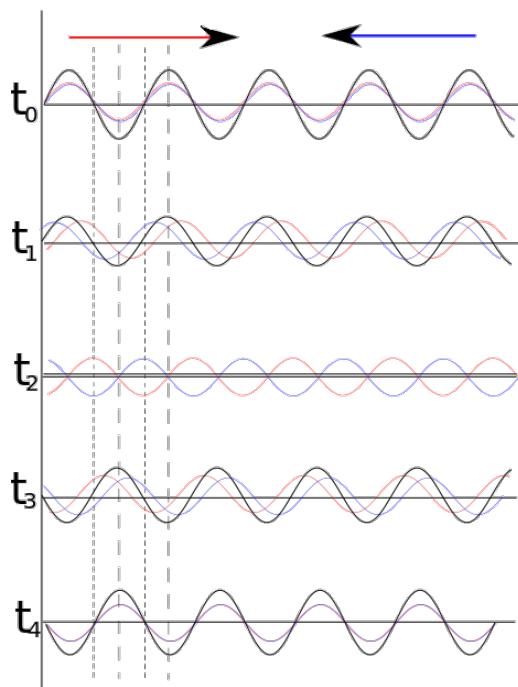
$$v = 2 \frac{A_+}{\rho c} \sin kx e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})}, \quad (3.121)$$

што значи дека повторно се работи за стоен бран, но кој е фазно поместен во однос на притисокот за $\pi/2$. Според (3.73), интензитетот на стојниот бран е:

$$J = pv \cos \phi = pv \cos \frac{\pi}{2} = 0. \quad (3.122)$$

Ова значи дека за произволно избрана површина протокот на звучна енергија во двете насоки е еднаква, па интензитетот е 0 и покрај постоењето на звучна енергија во просторот.

³⁰By Wjh31 - File:Standing_wave_2.gif, Public Domain, [0304\relax0072287](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid1\char).



Слика 3.11: Стоен бран добиен како збир на два брана кои се простираат во спротивни насоки.³⁰

Појавата на стојни бранови не е врзана само со постоењето на рефлексија. Имено, два идентични извори кои зрачат во слободен простор, создаваат стојни бранови долж оската која ги поврзува. Исто така, на површината која се наоѓа нормално на средината од овaa оска звучниот притисок ќе биде идентичен со овој на граничната површина при појавата на стојни бранови. Ова можеме да го искористиме за анализа на проблемот на рефлексија на звучните бранови преку претставување на рефлектиранот бран како бран произведен од звучен извор симетрично поставен на оригиналниот во однос на граничната површина.

3.15 Симулација на стојни бранови

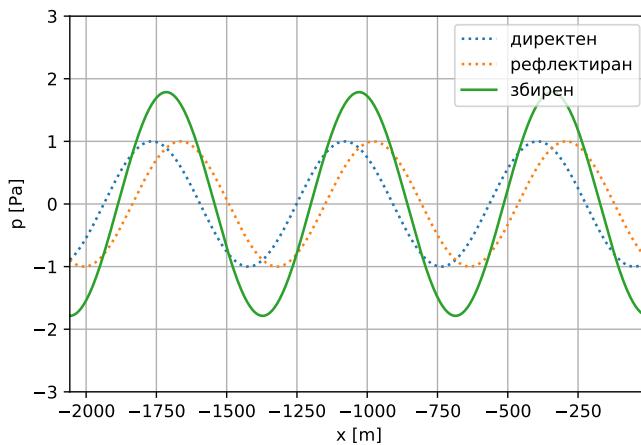
Практичен дел

За симулација на појавата на стојни бранови ќе се послужиме со програмскиот пакет Питон (види [Додаток А](#)). Да го искористиме равенството 3.119 за да ја пресметаме вредноста на звучниот притисок на директен и рефлектиран бран во 1Д координатен систем кој е ограничен во интервалот $(-\lambda, 0)$. Во истиот систем ќе ја пресметаме и сумата од двата брана, која поради тоталната рефлексија ќе биде стоен бран. Симулацијата ќе ја направиме во временски интервал од 5 s, а фреквенцијата на двата брана ќе ја поставиме на 0,5 Hz, за да можеме полесно да ја видиме промената на нивната амплитуда во време.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import time

# %% инит
f = .5 # Hz
c = 343 # m/s
lamda = c / f # m
k = 2*np.pi / lamda # m^-1
A_d = 1 # Pa
x = np.arange(-3*lamda, 0, 0.1) # m

# %% симулираj
```



Слика 3.12: Симулација на појавата на стојни бранови при totalна рефлексија во 1Д координатен систем.

```

plt.ion()
plt.figure()
plot_p_d, = plt.plot(x, x, ':') # init
plot_p_r, = plt.plot(x, x, ':') # init
plot_p_sum, = plt.plot(x, x) # init
plt.grid()
plt.legend(['direct', 'reflected', 'sum'], loc='upper right')
plt.axis([x[0], x[-1], -3, 3])

t_0 = time.time() # s
t = 0 # s, init
while t < 5: # t_max = 5 s
    t = time.time() - t_0
    p_d = A_d * np.cos(2*np.pi*f * t + k*x) # директен бран
    p_r = A_d * np.cos(2*np.pi*f * t - k*x) # рефлектиран бран
    p_sum = p_d + p_r # збир на брановите
    plot_p_d.set_ydata(p_d)
    plot_p_r.set_ydata(p_r)
    plot_p_sum.set_ydata(p_sum)
    plt.draw()
    plt.pause(0.00001)

```

На Сл. 3.12 е прикажан добиениот графикон. Од симулацијата може да видиме дека навистина стојниот бран, кој се јавува како резултат од totalната рефлексија на директниот бран, не се движи долж x -оската иако неговата амплитуда се менува со текот на времето.³¹

3.16 Слабеење на звукот

Во досегашното излагање беше занемарено слабеењето на звукот при неговото простирање во воздухот. Ова не е секогаш оправдано, на пр. во анализата на акустиката на големи простории, како театри и филхармониски сали, особено за високите фреквенции. На загубите во воздухот влијаат три фактори:

- вискозноста на средината,
- одведување на топлинската енергија и
- појавата на резонанса во молекулите.

Загубите поради вискозноста на средината се јавуваат поради меѓусебното триење на воздушните

³¹Забележете дека поради ниската фреквенција на бранот, т.е. големото λ растојанието се мери во стотици метри!

честички, до кое доаѓа поради нивната различна брзина на движење. Овие разлики се должат на просторниот градиент на брзината кој е пропорционален со фреквенцијата на звучниот бран. Затоа, загубите поради вискозност растат со зголемување на фреквенцијата на звукот. Сепак, во гасови, овие загуби доаѓаат до израз кај ултразвукот, или пак во тесни волумени, на пр. цевки, кај кои движењето на воздушните честички непосредно до сидот е 0, па брзината има градиент долж напречниот пресек на волуменот.

Топлинските загуби се должат на разликите во температура помеѓу слоевите згуснат и разретчен воздух, предизвикани од простирањето на звучниот бран. Тие се јавуваат поради тоа што простирањето на звукот не е потполно адијабатски процес, туку и изотермичен. Топлинските загуби се од ист ред на големина како и оние поради вискозноста. Тие исто така доаѓаат до израз за високи фреквенции и мали волумени, во кои одведувањето на топлината од сидовите на средината игра значајна улога.

Најголем дел од загубите во звучната енергија отпаѓа на молекуларните загуби, кои се толку поголеми колку што фреквенцијата на звукот е во резонанса со појавата на размена на енергија со молекулите на кислород O_2 . Во овој случај загубите зависат од влажноста на воздухот.

Слабеењето на звукот за рамнински бранови може да се изрази преку следниот експоненцијален закон:

$$J = J_0 e^{-mx}, \quad (3.123)$$

каде J_0 е интензитетот на звукот на местото $x = 0$, а m е енергетскиот коефициент на слабеење кој зависи од фреквенцијата на звукот и влажноста на воздухот. За сферни бранови имаме:

$$J = J_0 \frac{r_0^2}{r^2} e^{-m(r-r_0)}, \quad (3.124)$$

или изразено преку притисокот:

$$p = p_0 \frac{r_0}{r} e^{-\frac{m(r-r_0)}{2}}. \quad (3.125)$$

Ако го пресметаме слабеењето во dB добиваме:

$$M = 20 \log \frac{p_0}{p} = 20 \log \frac{r}{r_0} + 4,34m(r - r_0). \quad (3.126)$$

Првиот член ги опишува загубите поради ширењето на звукот, додека вториот го изразува слабеењето по единица должина изразено во dB/m. Може да се забележи дека првиот член внесува слабеење од 6 dB за секое удвојување на растојанието, додека вториот зависи линеарно од него. Така, за помали растојанија ќе доминира првиот член додека за поголеми вториот. Вредностите на m се такви што за дисипација во воздухот треба да се води сметка за фреквенции повисоки од 1000 Hz и растојанија над 100 m, ако влажноста на воздухот е околу 40%.

Поглавје 4

Создавање и зрачење на звукот

Со создавањето и зрачењето на звукот кај музичките инструменти се занимава [музичката акустика](#). Начинот на создавање на звукот се разликува кај различните видови на музички инструменти. Човекот, исто така употребува различни начини на генерирање на звук за создавањето на низата на гласови кои го сочинуваат говорот. Со проучување на акустичките особини на овие гласови, како и начинот на нивното создавање, наречено [артикулација](#), кај различните јазици се занимава [фонетиката](#).

4.1 Создавање на човечкиот глас

Кај човекот, звучните бранови се произведуваат во [говорниот апарат](#), односно [вокалниот тракт](#). Движечка сила на овој процес се белите дробови и дијафрагмата со чија контракција се создава воздушен притисок, односно струење на воздухот, кое делува како побуда на вокалниот тракт. Човекот користи два механизми за генерирање на звучни бранови:

1. [гасилките](#) – за создавање на сложени периодични звучни бранови, и
2. [стеснувањата](#) – за создавање на апериодични звучни бранови.

Според тоа дали гласовите се генериирани со употреба на гасилките, разликуваме два типа на гласови:

- [звукни](#) гласови – добиени со употреба на гасилките, и
- [беззвучни](#) гласови – добиени без нивна употреба.

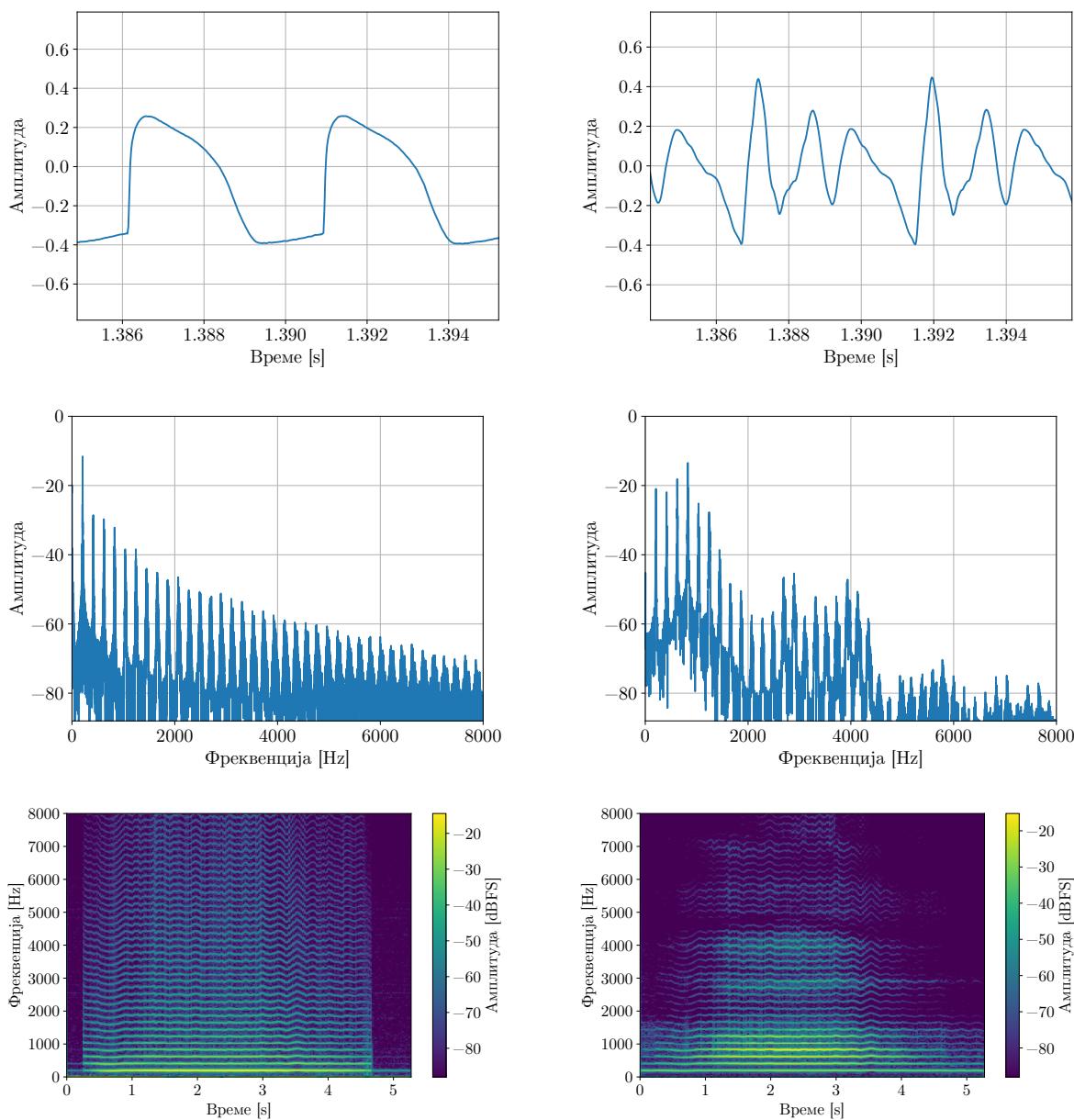
Според тоа дали гласовите се генериирани со употреба на стеснувања, разликуваме други два типа на гласови:

- [самогласки](#) – добиени без стеснувања, туку само со употреба на гасилките, и
- [согласки](#) – добиени со употреба на стеснувања.

Освен самогласките, звучни гласови претставуваат и звучните согласки, кај кои освен активирањето на гасилките, исто така постои стеснување на вокалниот тракт како кај беззвучните гласови.

Генерирање на звук со гасилките

Звучните гласови се создаваат со употреба на гасилките, кои претставуваат пар меки ткива поставени едно наспроти друго во гркланот, односно [ларинксот](#) на човекот. Преку интеракцијата на нивната затегнатост, која се контролира со мускули внатре во гасилките и мускулите на ларинксот, и притисокот на воздухот во белите дробови, т.н. субглотален притисок, гасилките периодично се отвораат и затвораат. Со тоа се врши периодично модулирање на



Слика 4.1: Временски облик (горе), амплитуден спектар (средина) и спектрограм (долу) на ЕГГ сигналот од гласилките (лева колона) и излезниот звучен сигнал – гласот /а/ (десна колона).

воздушната струја низ горниот, супраглотален, вокален тракт. Периодата на оваа модулација ја дава основната фреквенција, односно основниот хармоник, или [висината](#) на човековиот глас. Временскиот и спектралниот облик на овој периодичен сигнал добиен со Електрографотограм (ЕГГ) е прикажан на [Сл. 4.1](#). На сликата и амплитудниот спектар е прикажан во dBFS.

Вокалниот тракт, пак, претставува фреквенциски филтер чија основната задача е да го обликува релативно рамномерниот спектар на звукот создаден со гласилките. Ова обликување ќе му даде боја, која пак ние ја препознаваме како одреден глас.

Така, вокалниот тракт ќе ја засили енергијата на спектарот на сигналот за тие фреквенции за кои вокалниот тракт е во резонанса, слабеејќи ја за останатите фреквенции. Овие фреквенции се нарекуваат [и резонантни фреквенции](#) на вокалниот тракт, а кај самогласките се нарекуваат уште и [форманти](#). Позицијата на формантите во спектарот на говорниот сигнал е всушност она што ни кажува за која самогласка се работи.

Фреквенцијата на формантите зависи од позиционирањето на артикулаторите, кои ги вклучуваат

јазикот, вилицата, мекото непце (велум), итн. На пример, зголеменото отворање на усната празнина предизвикува зголемување на фреквенцијата на првиот формант, додека пак вториот формант е повисок при преместување на местото на резонанција нанапред во усната празнина.

Како пример, на Сл. 4.1 е прикажан и вообличениот звучен бран снимен на излез од вокалниот тракт при снимање на ЕГГ сигналот. Во спектарот на излезниот звучен бран сега може да видиме опсези на фреквенции кои се засилени за сметка на останатите фреквенции, кои пак се потиснати. Во овој случај, тоа се формантите на гласот „а“ /a/.

Генерирање на звук со стеснување

Согласките се создаваат со помош на стеснување во вокалниот тракт добиено со позиционирање на артикулаторите. Ова стеснување предизвикува турбуленции во протокот на воздухот низ вокалниот тракт кои звучат како шум.

Локацијата на стеснувањето се нарекува и [место на артикулација](#). Местото на артикулација ја дефинира бојата на создадениот звучен бран, односно неговиот фонетски карактер. Местото на артикулација го дели вокалниот тракт на два резонатора – преден и заден.

Како пример, на Сл. 4.2 е прикажан временскиот облик, амплитудниот спектар и спектрограмот на гласот „с“ /s/. Може да се види дека во него постои периодичност, па соодветно не постојат изразени импулси во неговиот спектар. За дополнителна илустрација, покрај него е прикажан и неговиот звучен пар „з“ /z/ кој го има истото место на артикулација, но дополнително содржи активација на гласилките. Додадената периодичност може да се забележи во импулсите на спектарот и паралелните линии во спектрограмот.

Според изразеноста на шумната компонента добиена со стеснувањето согласките се делат на:

- **шумни** – со изразена или исклучиво шумна структура, кои пак според степенот на затворање на стеснувањето се делат на:
 - **фрикативи** – со изразено стеснување како „с“ /s/ и „ф“ /f/, и
 - **аспиранти** – со помало стеснување што дава „повоздушест“ впечаток, тоа е гласот „х“ /x/.
- **сонанти** – со изразена периодична компонента, кои пак дополнително се делат на:
 - **назали** – добиени со употреба на носната шуплина како „н“ /n/ и „м“ /m/,
 - **апроксиманти** – како „ј“ /j/, и
 - **ликовиди** – како „р“ /r/ и „л“ /l/.

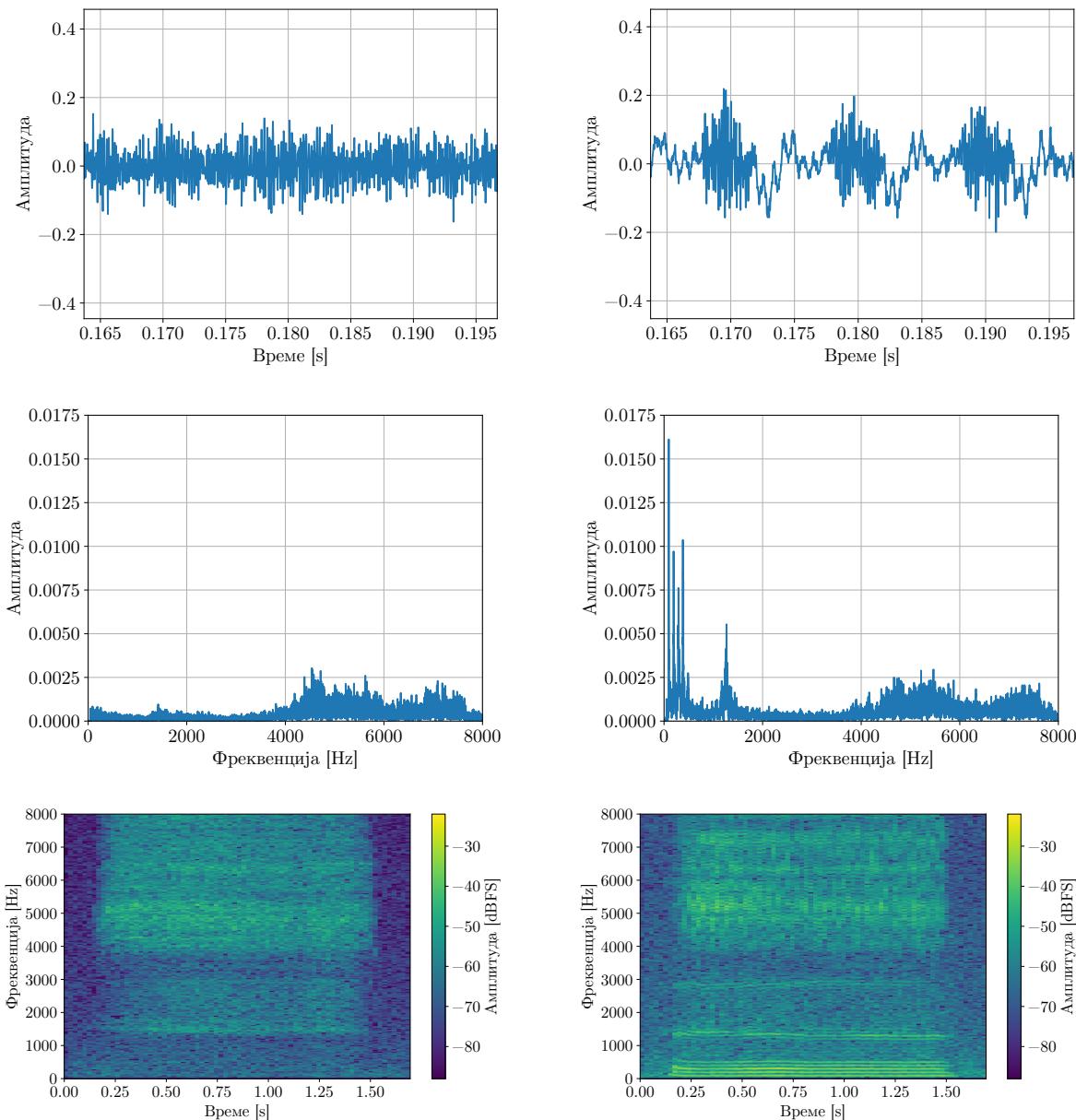
Транзиенти

Премините на вокалниот тракт од една до друга стабилна конфигурација, односно од артикулацијата на еден глас до артикулацијата на друг, се нарекуваат [транзиенти](#). Овие промени се отсликуваат во спектрално временскиот облик на говорните сигнали.

Транзиентите се клучни за остварување на некои типови на гласови. Кај овие гласови постојат две фази во артикулацијата:

- **фаза на затворање** – целосното затворање на протокот на воздух на местото на артикулација кое предизвикува генерирање на зголемен притисок во задниот дел од вокалниот апарат, и
- **фаза на ослободување** – нагло отворање на вокалниот тракт на местото на артикулација за ослободување на протокот на воздух.

Според тоа дали согласките содржат продолжена турбуленција по ослободување на протокот на воздух разликуваме:



Слика 4.2: Временски облик (горе), амплитуден спектар (средина) и спектрограм (долу) на гласот /s/ (лева колона) и гласот /z/ (десна колона).

- **оклузиви** или **плозиви** – кои немаат продолжена турбулентна компонента, и
- **африкати** – кои нејзе ја имаат во вид на фрикатив; тие може да се сметаат и како група на согласки составена од оклузив и фрикатив.

Поглавје 5

Електроакустички и електромеханички аналогии

Воведените аналогии помеѓу акустичките и електрични големини, како и брановото простирање во звуковод со она во електричен вод во Поглавјето 1, важат и за кола со концентрирани компоненти кога димензиите на акустичките системи се поголеми од брановата должина на звукот. Така, во отворен електричен вод со мала должина не доаѓа до појава на простирање, па тој може да се еквивалентира со една концентрирана компонента – капацитивност дадена со:

$$C = C'l, \quad (5.1)$$

каде C' е подолжната капацитивност на водот. Аналогно на него, еден звуковод со кратка должина чиј крај е затворен³², може да се претстави преку една концентрирана **акустичка капацитивност** C_a :

$$C_a = C'_a l = \frac{Sl}{\rho c^2} = \frac{V}{\rho c^2}, \quad (5.2)$$

каде V е волуменот на звуководот. Од (5.2) може да се види дека обликот на затворениот акустички простор всушност не е важен, туку од значење е само неговиот волумен. Во еден ваков простор ќе се јави влезен акустички проток кој ќе биде апсорбиран од еластичноста на затворениот волумен воздух:

$$q_i = p_i \omega C_a, \quad (5.3)$$

односно:

$$p_i = \frac{1}{\omega C_a} q_i. \quad (5.4)$$

Влезниот проток ќе биде до толку поголем, колку е поголема еластичноста на затворениот воздух, која пак е правопропорционална со неговиот волумен. Поради ова, акустичката капацитивност уште се нарекува и **акустичка еластичност**.

Од друга страна, краток затворен вод може да се еквивалентира со индуктивност дадена со:

$$L = L'l, \quad (5.5)$$

каде L' е подолжната индуктивност. Аналогно, еден звуковод со кратка должина со отворен крај, може да се еквивалентира со една **акустичка индуктивност** m_a :

$$m_a = m'_a l = \frac{\rho l}{S}. \quad (5.6)$$

³²Како што беше предочено во Поглавјето 1, затворениот звуковод има акустички проток еднаков на нула на неговиот крај, па е аналоген на отворен вод, на чиј крај нема течење на струја.

Од производот во броителот може да видиме дека акустичката индуктивност зависи од масата на воздухот, па таа и се нарекува **акустичка маса**. Тука влезниот проток ќе зависи од акустичката маса која ќе треба да ја придвижи:

$$q_i = \frac{p_i}{\omega m_a}. \quad (5.7)$$

Важи и:

$$p_i = \omega L_a q_i. \quad (5.8)$$

Поради тоа што акустичкиот проток треба да ги придвижи и воздушните честички непосредно до отворот на кратката цевка, потребна е корекција на (5.6):

$$m_a = \frac{\rho l_{eff}}{S}, \quad (5.9)$$

каде со l_{eff} е означена ефективната должина на воздушната маса која може да се пресмета како:

$$l_{eff} = l + 0,85r_0, \quad (5.10)$$

каде r_0 е радиусот на цевката. Ако цевката е отворена од двете страни, односно е дел од посложен акустички систем, тогаш оваа компензација треба да се примени на двата нејзини краеви, па тогаш имаме:

$$l_{eff} = l + 2 \cdot 0,85r_0 = l + 1,7r_0. \quad (5.11)$$

За добивање на аналогниот акустички елемент на електричниот отпорник треба да ги земеме во обсир загубите на акустичка енергија. Како што беше споменато во Поглавјето 1, тие се најизразени во мали воздушни простори, на пр. тесни цевки, поради разликите во брзините на воздушните честички долж нивниот напречен пресек и појавата на триење, т.е. поради вискозноста на воздухот. Преку анализа на овие загуби ([Куртовиќ, 1982](#)) со добива следниот израз за **акустичката отпорност R_a** на тенка цевка:

$$R_a = \frac{8\mu l}{r_0^4 \pi}, \quad \text{за } r_0 < \frac{2000}{\sqrt{f}}. \quad (5.12)$$

Тука μ е вискозноста на воздухот и изнесува $1,86 \cdot 10^{-5}$ kg/ms, l е должината на цевката, а f е фреквенцијата на звукот.

5.1 Елементи на механичките системи

Аналогијата помеѓу концентрираните елементи на механичките и електричните системи може да ги добиеме со анализа на еден механички систем составен од сериска врска на трите основни градбени елементи на овие системи: **маса**, **еластичност** преку пружина и **триење** преку пригушувач. Диференцијалната равенка која го опишува овој систем од втор ред е:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F - r \frac{dx}{dt} - kx. \quad (5.13)$$

$$m \frac{dv}{dt} + rv + k \int v dt = F, \quad (5.14)$$

каде v е брзината на движење на масата, а x е нејзиното поместување. Како и во акустичкиот домен, и во механичкиот домен постои аналогија помеѓу силата и електричниот напон и брзината на движење со струјата. Ако сега ја напишеме диференцијалната равенка која опишува едно сериско осцилаторно коло, кое е исто така составено од трите основни градбени елементи имаме:

$$L \frac{dI}{dt} + RI + \frac{1}{C} \int I dt = U. \quad (5.15)$$

Може да видиме дека механичката маса е аналогна на електричната индуктивност, што и се надоврзува на заклучоците за акустичката маса, триењето е аналогно на отпорноста, и конечно еластичноста на капацитивноста.

Поглавје 6

Псилоакустика

Псилоакустиката е наука која го проучува поимањето на звукот кај човекот. Поточно таа ги проучува физиолошките и психолошките процеси кои се јавуваат како одсив на звукот како побуда. Како таква таа претставува гранка на акустиката, но и на психофизиката. Големините дефинирани во Поглавјето 3 ја опишуваат физичката манифестација на звукот и затоа претставуваат физички и мерливи големини. Иако поимањето на звукот е правопропорционално со овие големини, субјективното доживување не е линеарно поврзано со нив, делумно поради нелинеарната природа на сетилото за слух, но делумно и поради човековата психологија. Поради ова, за опишување на начинот на кој го поимаме звукот нужно е воведувањето на [психофизички големини](#).

6.1 Работа на човековото уво

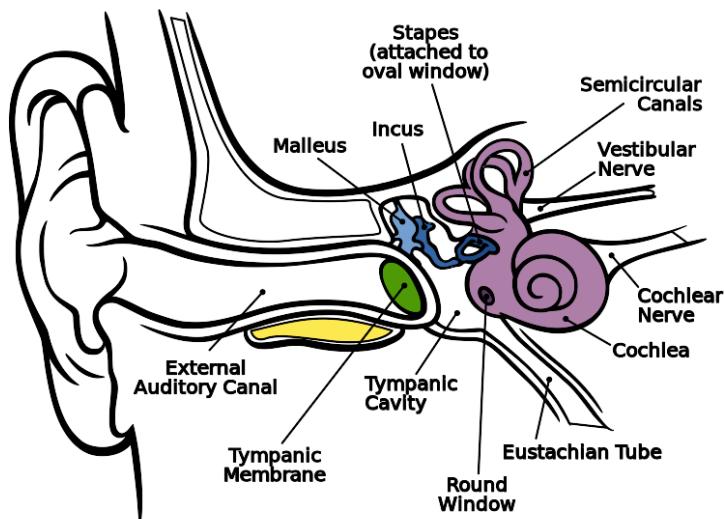
Многу од спецификите на субјективното поимање на звукот се должат на физиолошките особености на работа на човековото увото. Човековото уво прикажано на Сл. 6.1 може да се подели на следните три дела:

- [надворешно уво](#) – одговорно за примање на звучните осцилации од околната со ушната школка (*pinna*) и нивното насочување кон внатрешноста на увото преку надворешниот слушен канал. Обликот на ушната школка врши различно спектрално филтрирање во зависност од тоа од кој вертикалниот агол на инциденција на звучниот бран. Овие т.н. трансфер функции на главата³³ ги користи мозокот за одредување на насоката од која доаѓа звукот.³⁴ Ушниот канал пак, претставува акустички резонатор кој е одговорен за механичко засилување на звучните бранови на фреквенција околу 3 kHz,
- [средно уво](#) – одговорно за преобразба на акустичките осцилации во механички преку слушното тапанче (*membrana tympani*) и нивно пренесување до овалниот прозорец од ушното полжавче преку трите ушни ковчиња: чеканче (*maleus*), наковална (*incus*) и стремен (*stapes*). Поради нивното функционирање како лост, како и поради 19-кратната разлика во површина помеѓу слушното тапанче и овалниот прозорец, средното уво реализира прилагодување на акустичката импедансата помеѓу воздухот и течната средина во ушното полжавче,³⁵
- [внатрешно уво](#) – одговорно за преобразба на акустичките осцилации од механички домен во невронски импулси преку ушното полжавче, (*cochlea*); во внатрешното уво се поместени и полукуружните канали одговорни за рамнотежа кај човекот.

³³анг. Head-Related Transfer Function (HRTF).

³⁴Ова и причината зошто не можеме да кажеме од која висина доаѓа звукот ако тој доаѓа од позади нас.

³⁵Без ова прилагодување на импедансите би била пренесена само 0,1% од акустичката енергија од воздухот во внатрешното уво.



Слика 6.1: Состав на човековото уво.³⁶

Ушното полжавче е составено од канал долг околу 3 см кој е кружно завиткан $2\frac{3}{4}$ пати и е полн со лимфна течност долж која се пренесуваат акустичките осцилации. Каналот е поделен на три комори, прикажани на Сл. 6.2:

- вестибуларна комора (*scala vestibuli*) на чиј почеток е овалниот прозорец,
- тимпанична комора (*scala tympani*) на чиј крај е кружниот прозорец со неповрзаното секундарно ушно тапанче; неговата улога е да го овозможи простирањето на звучните бранови долж целото полжавче,
- средна комора (*scala media*) која е изолирана од затворена во која е поместен органот на Корти.

Звучните бранови во учното полжавче се простираат од овалниот прозорец, низ вестибуларната комора, па назад низ тимпаничната комора и излегуваат низ кружниот прозорец.

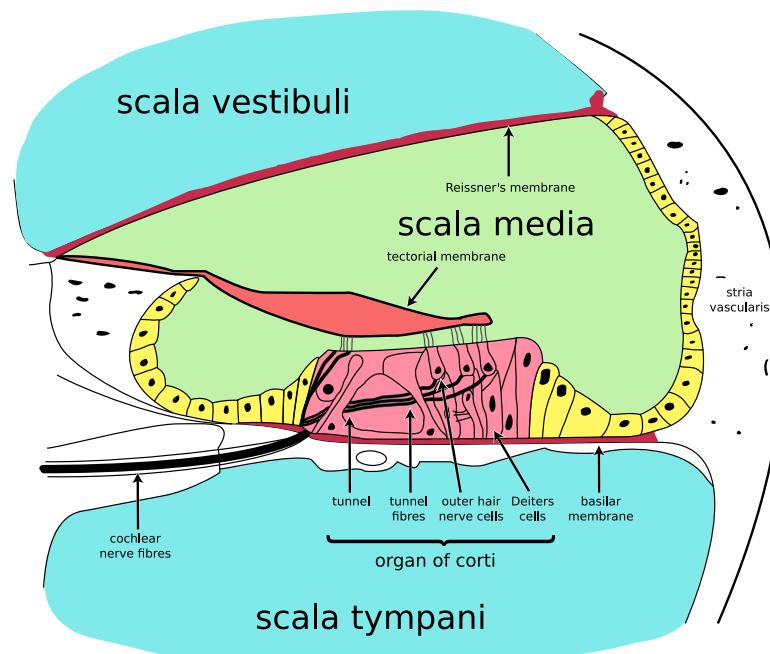
Помеѓу средната и тимпаничната комора се наоѓа **базилијарната мембрана**. Таа е главниот структурен елемент што ги одредува својствата на механичката пропагација на звучните бранови во коклеата. Базилијарната мембрана станува прогресивно поширока и подебела кон крајот на каналот, поради што за различна фреквенција на акустичките осцилации вибрира различен дел од нејзината должина. Така, звучните бранови со повисока фреквенција предизвикуваат максимални осцилации на нејзиниот почеток (поблиску до овалниот прозорец), додека тие со пониска фреквенција делуваат на нејзиниот крај, како што е прикажано на Сл. 6.3. На тој начин, базилијарната мембрана всушност претставува конвертор на фреквенција во растојание.

На површината на базилијарната мембрана, а во средната комора, се наоѓа **органот на Корти** долж кој се распоредени околу 16 000 клетки влакна, кои пак се поврзани со завршетоците на аудиторниот нерв. Поради разликата во механичките потенцијали помеѓу средната комора и тимпаничната комора, влакненцата на клетките влакна се виткаат и предизвикуваат хемиска реакција која предизвикува генерирање на нервни импулси во поврзаните неврони.³⁸ Овие импулси доаѓаат до **аудиторниот кортекс (A1)** во кој различните нервни завршетоци од коклеата

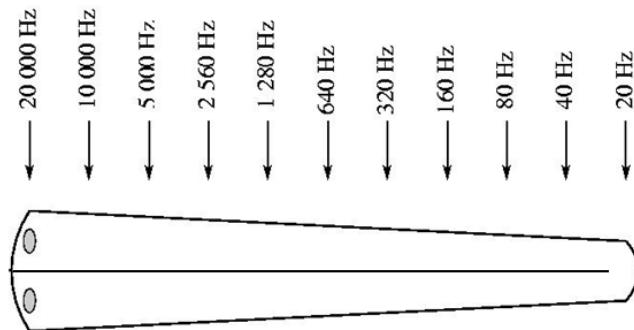
³⁶"Anatomy of the Human Ear en" by Chittka L, Brockmann https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anatomy_of_the_Human_Ear_en.svg#/media/File:Anatomy_of_the_Human_Ear_en.svg

³⁷By Original:OarihVector:Fred the Oyster - Own work based on: Cochlea-crosssection.png, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9851471>

³⁸Добра анимација на овој процес е претставена во видеото Hearing & Balance: Crash Course A&P #17 <https://www.youtube.com/watch?v=Ie2j7GpC4JU>



Слика 6.2: Напреден пресек на каналот на ушното полжавче.³⁷



Слика 6.3: Фреквенциска чувствителност на базилијарната мембра.

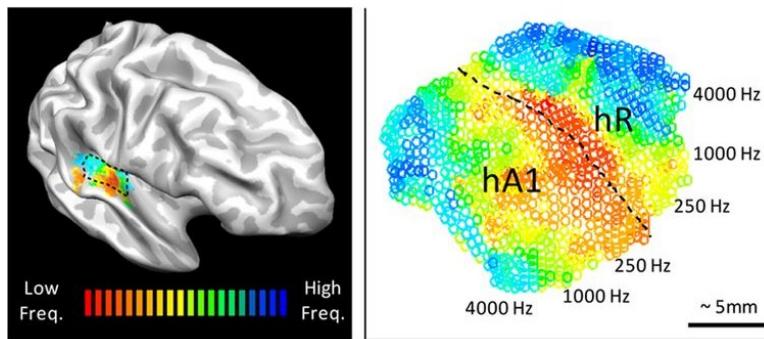
се мапирани во различни региони, кои со тоа се осетливи на различни фреквенции. Оваа распределба на конекциите во аудиторниот кортекс се нарекува **тоно-топична мапа**, види Сл. ??.

На овој начин, ушното полжавче врши фреквенциска анализа на звучната појава, своевидна физиолошка Фурьеова трансформација, овозможувајќи му на иниот мозок да го „види“ спектарот на звукот. Овој механизам исто така ја објаснува релативната неосетливост на човекот кон временскиот облик на звучните појави, односно фазата на спектралните компоненти. Сепак, ова не значи дека временскиот облик на звучните сигнали е неважен. Напротив сложената временско/фреквенциска структура е онаа која комплетно го определува субјективниот впечаток на звукот кај човекот.

6.2 Поимање на амплитудата на звукот

Осетливоста на човековото уво на амплитудата на звучниот притисок е нелинеарна како во однос на интензитетот на звукот, така и во однос на неговата фреквенција. Амплитудната нелинеарност се должи на одсивот на клетките влакна кои се почувствуваат на мали отколку на големи звучни побуди. Уште повеќе, надворешните клетки влакна играат улога на нелинеарни механички засилувачи на акустичките осцилации. Имено, клетките влакна претставуваат електромеханички преобразувачи кои работат во обете насоки, па нивна стимулација од страна

³⁹<https://www.jneurosci.org/content/33/5/1858>



Слика 6.4: Тонотопична мапа на аудиторниот кортекс A1. Превземено од (Da Costa et al., 2013).³⁹

на нервите предизвикува нивна механичка вибрација која во фаза со оригиналната акустичка побуда, ја засилува.⁴⁰ Исто така, мускулите прицврстени на ковчињата од средното уво се активираат при големи звучни притисоци внесувајќи нелинеарност во вид на заситување. Фреквенциската нелинеарност на поимањето на амплитудата пак е поврзана со распределбата на нервните завршетоци на базилијарната мембрана.

Поради ова, за описување на субјективното доживување на амплитудата на звукот се дефинираат две психофизички големини – јачина на звук и гласност. Низ голем број на мерења и усреднување, точно се одредени законите кои ги поврзуваат овие психоакустички големини со физичките, со што се овозможува квантитативното описување на поимањето на звукот.

Јачина на звук

Јачината на звукот Λ изразена во фони (phon) ја квантизира фреквенциската нелинеарност на амплитудната осетливост на човековото уво. Поврзувањето на јачината на звукот и нивото на звукот се врши преку изофонските криви кои први ги измериле Флечер и Мунсон (1933), па потоа и Робинсон и Дадсон (1956). Денес тие се редефинирани со ISO стандардот 226:2003. Прикажани на Сл. 6.5, тие ја отсликуваат фреквенциски нелинеарната карактеристика на сетилото за слух. Во нив може да се види дека за да се постигне иста субјективна јачина на даден прост звук при намалување на неговата фреквенција кон 20 Hz, или нејзино зголемување кон 20 kHz, неговото ниво мора да се покачи. Исто така, може да се види дека најголемата осетливост увото има околу 3 kHz, што се должи и на акустичкото засилување на ушниот канал. Избрано е јачината на звукот Λ [phon] и нивото на звукот L [dB] да се поклопуваат за фреквенција f од 1 kHz.

За да се земе во предвид нелинеаната осетливост на слухот при мерење на субјективната јачина на некој звук, а посебно при мерењето на јачината на некоја бучава, уредите за мерење нудат перцептуална корекција на измереното ниво преку соодветно филтрирање на спектарот. Постојат неколку тежински криви за оваа цел: A, B, C, D и Z, прикажани на Сл. 6.6. Првата A-крива е и најкористена и се базира на кривата за 40 phon од графикот на Флечер и Мунсон, па мерењата со нејзе се најточни за ниски нивоа на бучава. Останатите нивоа измерено со оваа крива се дава во dB(A), односно dBA. Од другите криви во употреба е кривата C која се користи за поголеми нивоа на бучава.

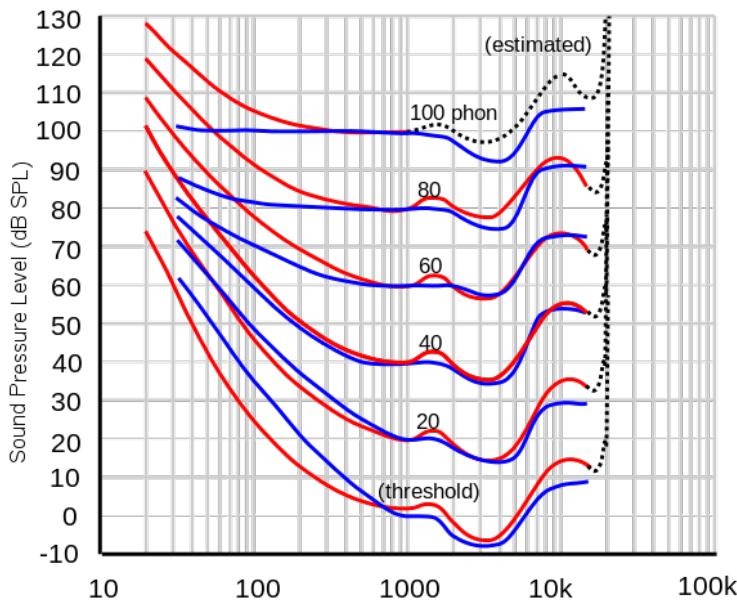
Гласност на звук

Гласноста на звукот Γ измерена во сони (son) ја квантизира амплитудната нелинеарност на амплитудната осетливост на човековото уво. Како и останатите сетила, слухот го следи Вебер–Фехнеровиот закон кој ни кажува дека гласноста ќе се менува линеарно кога звучниот притисок

⁴⁰ Овој интересен феномен може да се види во видеото: Fernando Cordova Tapia, *Dancing hair cell (ear)*, <https://www.youtube.com/watch?v=Xo9bwQuYrRo>.

⁴¹ "Lindos4" by Lindosland <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lindos4.svg#/media/File:Lindos4.svg>

⁴² "Acoustic weighting curves" by Lindosland https://en.wikipedia.org/wiki/File:Acoustic_weighting_curves_%2821%29.svg



Слика 6.5: Криви на еднаква чујност, или изофонски криви, измерени според Флечер и Мунсон (сино) и стандардизирани според ISO стандардот (црвено). ⁴¹

(интензитетот) ќе се менува за ист процент (експоненцијално). Овој закон е изразен со следново равенство:

$$d\Gamma = k \frac{dp}{p}, \quad (6.1)$$

каде со $d\Gamma$ е изразена диференцијалната промена во гласноста, а со dp диференцијалната промена во звучниот притисок. Константата на пропорционалност е означена со k . Со средување на равенството доаѓаме до заклучокот дека всушност гласноста е пропорционална со логаритамот од звучниот притисок, прикажано со следното равенство, каде со p_0 е означен звучниот притисок на прагот на чујност:

$$\Gamma = k \ln \frac{p}{p_0}. \quad (6.2)$$

Овој факт ја потврдува правилноста на изборот за употреба на dB–те при изразување на звучниот интензитет. Од тута следи и врската помеѓу гласноста Γ [son] и јачината на звукот Λ [phon]. При нејзиното дефинирање се усвоени следните две конвенции:

- почувствува гласност на звукот се удвојува за секое зголемување на неговата јачина, односно на неговото ниво за 10 phon, т.е. 10 dB за f од 1kHz.
- договорено е дека на гласност од 1 son одговара јачина од 40 phon.

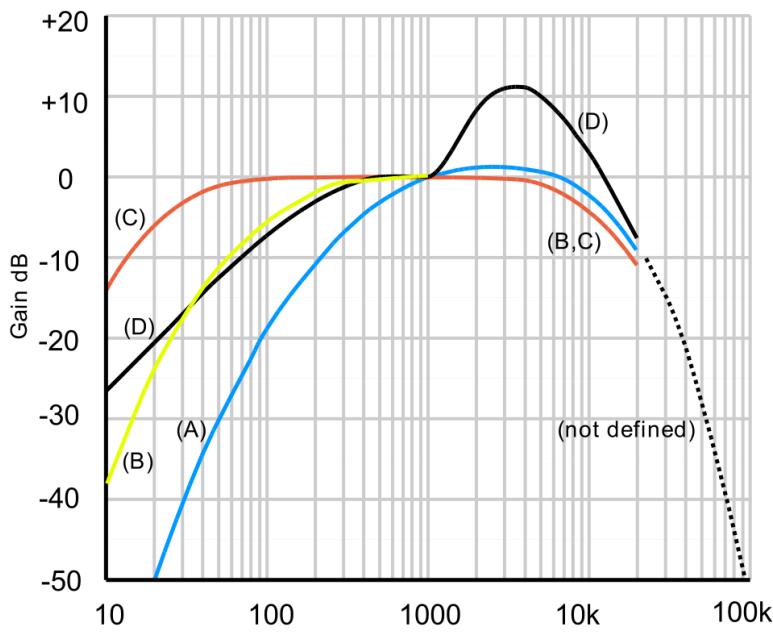
Од овие две правила може да се изведуваат следните равенки кои ја опишуваат нивната врска:

$$\Gamma = 2^{\frac{\Lambda-40}{10}}, \quad (6.3)$$

$$\Lambda = \frac{10}{\log 2} \log \Gamma + 40. \quad (6.4)$$

6.3 Поимање на фреквенцијата на звукот

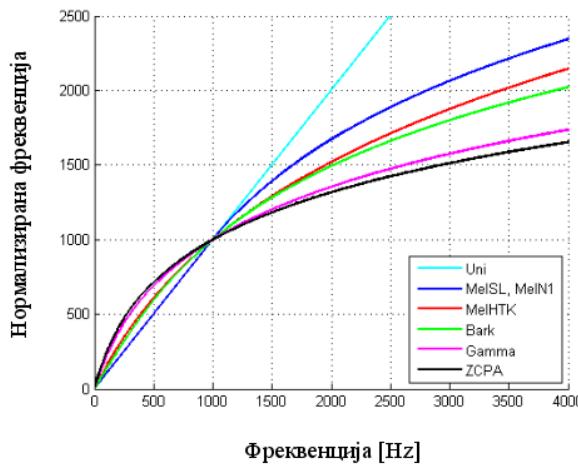
Поради нерамномерната распределеност на фреквенциската осетливоста на базилијарната мембрана прикажана на Сл. 6.3, кај увото постои нелинеарност во поимање на фреквенцијата на звукот. Психофизичката големина која ја рефлектира оваа нелинеарност се нарекува **висина**. Таа е определена со фреквенцијата на звучните вибрации кај простите тонови, односно со фреквенцијата на основниот хармоник кај сложените тонови. И висината увото ја чувствува



Слика 6.6: Тежински криви за мерење на перцептуално ниво на бучава. ⁴²

логаритамски. За мерење на висината се предложени неколку фреквенциски скали, во прв ред Мел скалата и Барк скалата, прикажани на Сл. 6.7. Мел скалата е добиена преку споредба на тонови за кои слушателите имале впечаток дека се еднакво одалечени. Поради тоа и го добила името *mel* од зборот „мелодија“. Може да се види дека се работи за компресија, односно како расте фреквенцијата, растојанијата во Hz се пресликуваат во сè помали растојанија во *mel*. Иако нема строго дефинирана формула за пресметување на *mel*, често се употребува следното равенство:

$$M = 2595 \log_{10} \left(1 + \frac{f}{700} \right). \quad (6.5)$$



Слика 6.7: Мел и другите фреквенциски скали за мерење на перцептуалната висина на звукот.

6.4 Поимање на спектарот на звукот

Преку спектрална анализа на звучните појави кај човекот се создава чувство за спектралната анвелопа на звучните сигнали. Оваа психоакустичка големина се нарекува **боја** на звукот и зависи од бројот на изразени хармоници и соодносот на нивните амплитуди. Не постои квантификација на оваа големина, па таа останува квалитативна. На пр. ако звукот изобилува

со виши хармоници кои имаат изразени амплитуди се вели дека звукот е „светол“ или „остар“. Спротивно, ако енергијата на звукот е концентрирана на мал број на хармоници со ниска фреквенција се вели дека тој звук е „темен“ и „длабок“.

6.5 Запознавање со феномени во психоакустиката

Практичен дел

Во овој практичен дел ќе се запознаеме со некои психо-физиолошки одлики на човековото поимање на звукот. За тоа ќе се послужиме со програмскиот пакет Питон (види [Додаток А](#)).⁴³

Генерирање на звук во Питон

За да генерираме еден простопериодичен синусен тон на фреквенција од 200 Hz ќе го напишеме следниот код:

```
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
from scipy.io import wavfile

f = 200
t = np.arange(0, 4*fs) / fs
sine = np.sin(2*np.pi*f*t)
plt.plot(sine)
```

Наједноставниот начин да го преслушаме аудиосигналот е првин да го запишеме како `wav` фајл, а потоа да ја искористиме системската `play` наредба од SoX.⁴⁴

```
wavfile.write('sine.wav',fs, np.array(sine * 2**15, dtype='int16'))
os.system('play sine.wav')
```

`Sine.wav:`

```
File Size: 353k      Bit Rate: 706k
Encoding: Signed PCM
Channels: 1 @ 16-bit
Samplerate: 44100Hz
Replaygain: off
Duration: 00:00:04.00

In:100% 00:00:04.00 [00:00:00.00] Out:176k [ -==|=--- ] Clip:0
Done.
```

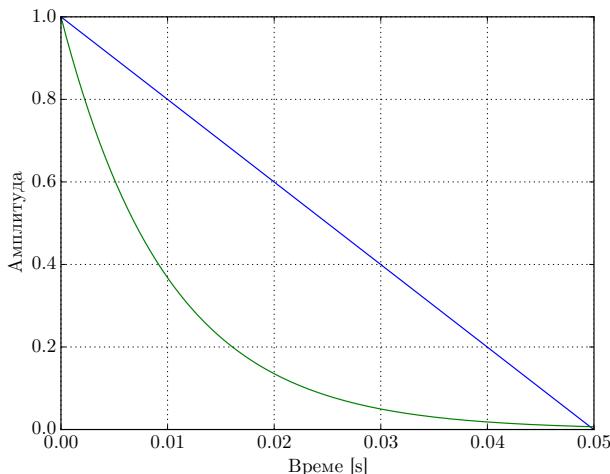
✓ **Задача за час.** Користејќи го напишаниот код тестирајте ги фреквенциските граници на вашиот слух! Колку се валидни добиените резултати?

Логаритамска осетливост на амплитуда

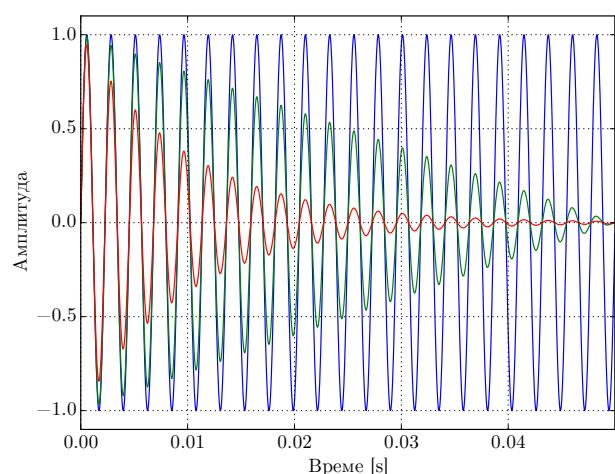
Логаритамската осетливост на увото на амплитудата на звукот ќе го демонстрираме преку примена на втишување (fade out) првин со линеарна, а потоа со логаритамска зависност. За таа цел ќе генерираме вектор од коефициенти за втишување.

⁴³ Делови од ова поглавје се адаптирани од материјалите за предметот Дигитални аудиосистеми кој се предава на додипломски студии (VI семестар) на ФЕИТ. <https://github.com/FEEIT-FreeCourseWare/Digital-Audio-Systems/>

⁴⁴ SoX е слободен софтвер за коверирање, обработка, снимање и преслушување на аудио фајлови. <http://sox.sourceforge.net/>



Слика 6.8: Криви за втишување.



Слика 6.9: Линеарно (зелена) и експоненцијално (црвена) втишување на синусен тон (сина).

```

import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
from scipy.io import wavfile
import os

# generate sine
f = 440
fs = 44100
ts = 1 / fs
t = np.arange(0, 4, ts)
sine = np.sin(2*np.pi*f*t)

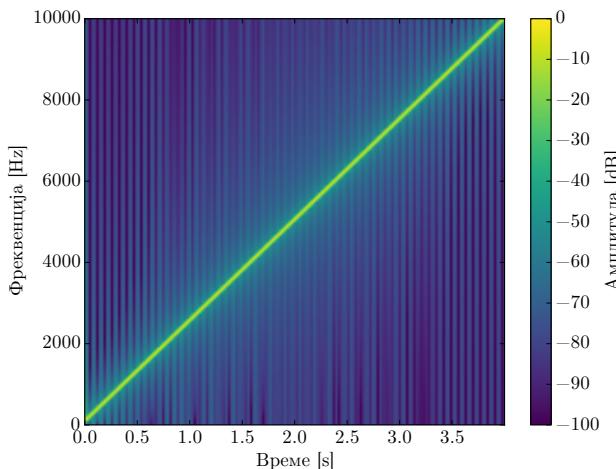
# fade out
lin_fade = np.linspace(1, 0, sine.size)
log_fade = np.exp((lin_fade-1)/.2)
sine_lin = sine * lin_fade
sine_log = sine * log_fade

# plot curves
plt.figure()
plt.plot(t, lin_fade)
plt.plot(t, log_fade)
plt.grid()

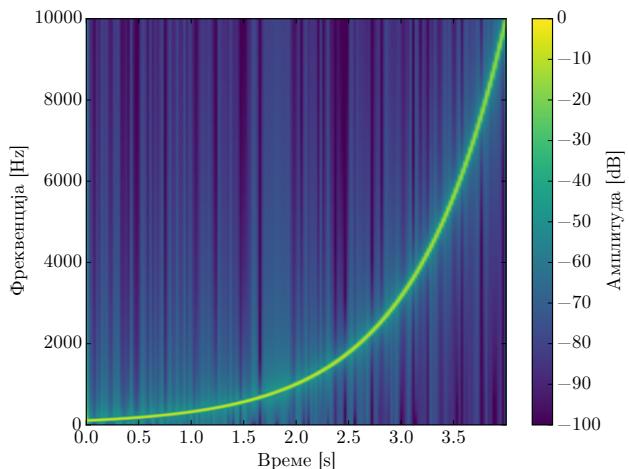
# plot sine
plt.figure()
plt.plot(t, sine)
plt.plot(t, sine_lin)
plt.plot(t, sine_log)
plt.legend(['original','linear','exponential'])

# play sines
wavfile.write('sine.wav',fs, np.array(sine * 2**15, dtype='int16'))
os.system('play sine.wav')
wavfile.write('sine_lin.wav', fs, np.array(sine_lin * 2**15, dtype='int16'))
os.system('play sine_lin.wav')
wavfile.write('sine_log.wav', fs, np.array(sine_log * 2**15, dtype='int16'))
os.system('play sine_log.wav')

```



Слика 6.10: Синус со линеарна промена на фреквенцијата.



Слика 6.11: Синус со логаритамска промена на фреквенцијата.

✓ **Задача за час.** Што можете да чуете? Кој од двата сигнала опаѓа порамномерно?
Направете линеарно и логаритамско засилување на сигналот и споредете ги резултатите.

Логаритамска осетливост на фреквенција

Овој феномен ќе го демонстрираме со синусен тон со променлива фреквенција⁴⁵, кој ќе го генерираме најпрвин со линеарна, а потоа и со логаритамска карактеристика.

```
f = 440
fs = 44100
ts = 1 / fs
t = np.arange(0, 4, ts)
sound = sig.chirp(t, 100, t[-1], 10000)
sound_log = sig.chirp(t, 100, t[-1], 10000, method='logarithmic')
```

За прикажување на спектрограмот ќе се послужиме со функцијата `get_spectrogram` која е вклучена во `ea` модулот.⁴⁶

```
import ea

spectrogram = ea.get_spectrogram(fs, sound, 2048)
spectrogram = ea.get_spectrogram(fs, sound_log, 2048)
```

✓ **Задача за час.** Што можете да чуете? Кој од двата сигнала опаѓа порамномерно?

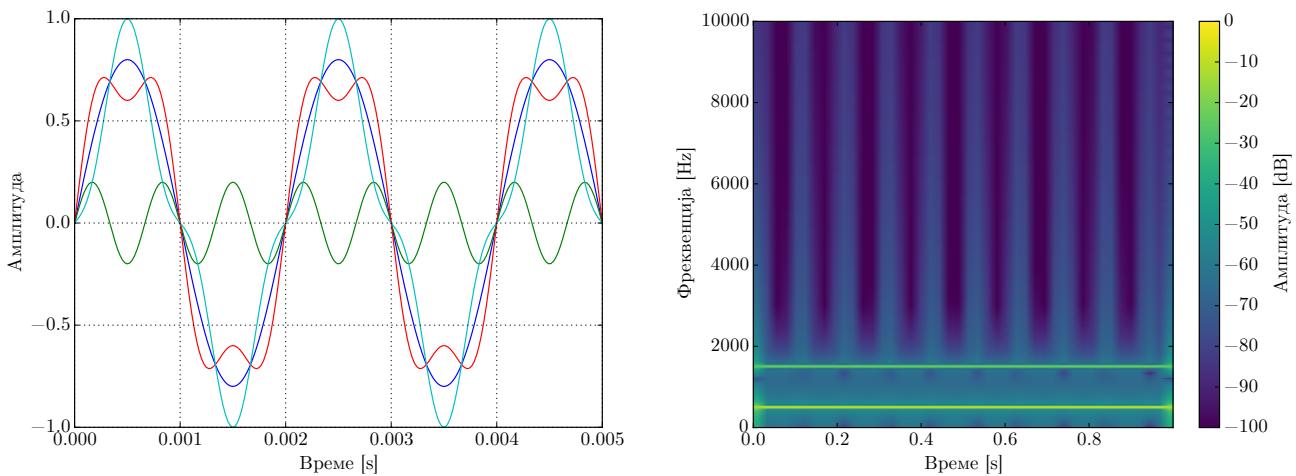
Фазна неосетливост на сетилото за слух

Една од карактеристиките на нашиот слух е тоа што тој не е осетлив на фазата на сигналот. Така ако собереме два простопериодични звуци со и без поместување на фазата на единиот од нив, резултантниот звук ќе биде ист иако двата сигнала имаат различен временски облик.

```
f = 440
fs = 44100
```

⁴⁵анг. *sine sweep*.

⁴⁶Функцијата `get_spectrogram` е всушност позајмена од модулот `das` од предметот Дигитални аудиосистеми <https://github.com/FEEIT-FreeCourseWare/Digital-Audio-Systems>



Слика 6.12: Демонстрација на фазна неосетливост преку сума на две синусоиди со различна фазна поместеност.

```
ts = 1 / fs
t = np.arange(0, 1, ts)
sound_500 = 0.8 * np.sin(2*np.pi*t*500)
sound_1500 = 0.2 * np.sin(2*np.pi*t*1500)
sound_sum1 = sound_500 + sound_1500
sound_sum2 = sound_500 - sound_1500
```

✓ **Задача за час.** Испртажете и преслушајте ги звучните сигнали. Дали можете да видите/чуете разлика? Прикажете го нивниот спектрограм.

Консонанца и дисонанца

Во музиката под сложен, односно музички тон се подразбира мешавина од два или повеќе прости тонови. Зависно од тоновите од кои е составен сложениот тон, тој може да звучи пријатно или непријатно за слушателот. Така, кога сложениот тон е добиен од прости тонови со фреквенции во целоброен сооднос од мали броеви како 2/1 (октава), 3/2 (квинта), 5/4 (голема терца) се создава тон кој е пријатен за човековото уво. Всушност, овие три интервали природно се присутни во спектарот генериран од хармониските резонатори, музичките инструменти и човековиот глас. Оваа појава е позната под името **консонанца**, односно созвучје. Спротивно на неа, ако простите тонови се во целоброен сооднос од големи броеви како 16/15 (мала секунда), сложениот тон е непријатен за слушање. Оваа појава во музиката се нарекува **дисонанца**, односно раззвучје.

Овој феномен ќе го илустрираме преку генерирање на тонови од C dur музичката скала почнувајќи од основниот тон C₄ на 261,6256 Hz. Дурските скали се карактеризираат со растојание од цел музички **степен**, помеѓу сите тонови освен третиот и четвртиот и седмиот и осмиот (првиот) тон помеѓу кои разликата е **полустепен**⁴⁷. Притоа, во една музичка октава, односно удвојување на фреквенцијата, на пр. помеѓу C₄ и C₅ (523,2511 Hz) се дефинираат 12 полуустепени⁴⁸ рамномерно распоредени логаритамски според формулата:

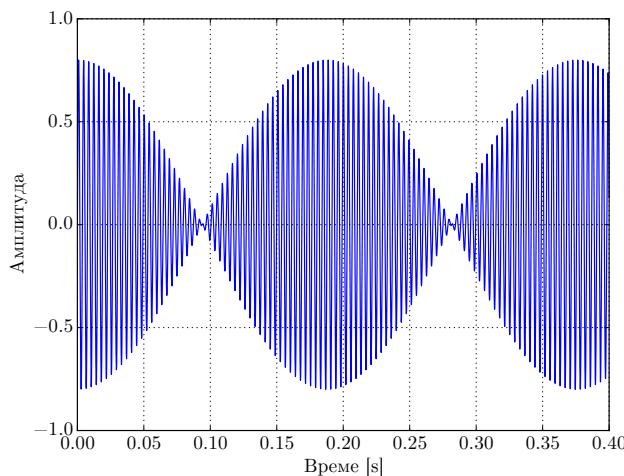
$$1 \text{ st} = \sqrt[12]{2}. \quad (6.6)$$

Растојанијата во степени помеѓу тоновите во C dur скалата се: C - D - E F - G - A - B C, каде со „-“ е означен празен полуустепен. Така, помеѓу C и D има 2 полуустепени (1 цел степен), додека помеѓу E и F има 1 полуустепен.⁴⁹

⁴⁷анг. *semitone*, што се означува како 1 st.

⁴⁸Дополнително секој полуустепен се дели на 100 центи: 1 st = 100 cent.

⁴⁹Тонот C₄ е средниот клавиши на стандардната клавијатура со 88 клавиши на пианото. Првиот клавиши на



Слика 6.13: Илустрација на феноменот на звучно биење.

Искористувајќи го C₄ како основа, да генерираме октава (C₅), квинта (G₄), квarta (F₄), голема терца (E₄), голема секунда (D₄) и мала секунда (C_{#4}) и да чуеме како звучат овие интервали.⁵⁰

```
fs = 44100
ts = 1 / fs
t = np.arange(0, 4, ts)
c4 = 0.8 * np.sin(2*np.pi*261*t)
c5 = 0.8 * np.sin(2*np.pi*261 * 2**((12/12)*t))
g4 = 0.8 * np.sin(2*np.pi*261 * 2**((7/12)*t))
f4 = 0.8 * np.sin(2*np.pi*261 * 2**((5/12)*t))
e4 = 0.8 * np.sin(2*np.pi*261 * 2**((4/12)*t))
d4 = 0.8 * np.sin(2*np.pi*261 * 2**((2/12)*t))
cis4 = 0.8 * np.sin(2*np.pi*261 * 2**((1/12)*t))

octave = (c4 + c5)/2 # октава
perfect_fifth = (c4 + g4)/2 # квинта
perfect_fourth = (c4 + f4)/2 # кварт
major_third = (c4 + e4)/2 # голема терца
major_second = (c4 + d4)/2 # голема секунда
minor_second = (c4 + cis4)/2 # мала секунда
```

Гледаме дека како се намалува растојанието меѓу фреквенциите, така развучјето преминува во пулсирање. Имено, кога двата прости тона се близу во фреквенција резултантниот звучен бран има амплитуда која ритмично ќе пулсира во интензитет. Овој феномен се нарекува **биење** и музичарите го употребуваат при штимањето на инструментите.

✓ **Задача за час.** Генерирајте звучно биење со генерирање на два тона со многу близки фреквенции и прикажете го на графикон.

клавијатурата на пианото е A₀ со фреквенција од 27,5 Hz, од кого и започнува бележењето на белите клавиши со буквите на латиницата: A, B, C, D, E, F и G. Овие основни тонови можат да бидат повишени (#) или снижени (b) за еден полустепен, па така имаме C_# = D_b, односно E_# = F и F_b = E. Во германската номенклатура се употребува H наместо B, кое пак е резервирано за сниженото H, т.е. H_b = B, односно B_b = G_#. Највисокиот клавиш на клавирот е C₈ со фреквенција од 4186,009 Hz.

⁵⁰Имињата на музичките интервали всушност доаѓаат од бројот на тонови кои тие ги содржат, имено октава = 8 тонови, квинта = 5, кварт = 4, терца = 3 и секунда = 2 тона. Притоа, терцата може да биде голема = 4 st, или мала = 3 st. Слично, разликуваме голема секунда = 2 st и мала секунда = 1 st.

Поглавје 7

Акустика на простории

Просторната акустика е една од најзначајните гранки на акустиката за човековото секојдневие. Со нејзина примена можат да се подобрят акустичките својства на просториите во кои човекот работи, живее и се забавува. Од посебно значење е нејзината примена за намалување на бучавата во работните простории и во обработката на јавните простории наменети за уживање во квалитетен звук и неговото снимање. Во ова поглавје ќе биде направена анализа на основните карактеристики на звучното поле во затворените простории и ќе бидат дадени равенствата кои ги опишуваат.

7.1 Резонантни фреквенции

Во затворените простории ќе дојде до појава на стојни бранови исто како во еднодимензионалните системи анализирани во Поглавје 3. Таму за звуковод затворен со бесконечно крут сид со $Z_s = \infty$ за притисокот и брзината на воздушните честички добивме:

$$p = 2p_+ \cos kxe^{j\omega t}, \quad (7.1)$$

$$v = 2\frac{p_+}{\rho c} \sin kxe^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})}. \quad (7.2)$$

Може да видиме дека на површината на препреката брзината v е 0. Ако поставиме препрека на растојание $-l_x$, брзината на воздушните честички и таму треба да е 0. Од овој услов можеме да ги одредиме резонантните фреквенции f_n за кои ќе се јават стојни бранови во звуковод со должина l_x .

$$v = 2\frac{p_+}{\rho c} \sin k(-l_x)e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})} = 0, \quad (7.3)$$

$$\sin kl_x = 0, \quad (7.4)$$

$$kl_x = n\pi, \quad n \in \mathbb{N}, \quad (7.5)$$

$$k = \frac{n\pi}{l_x}, \quad (7.6)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_n} = \frac{n\pi}{l_x}, \quad (7.7)$$

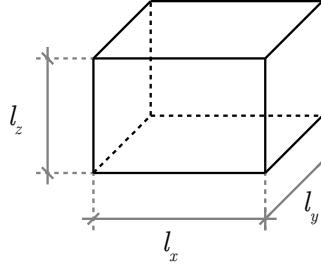
$$\frac{2c}{\lambda_n} = \frac{nc}{l_x}, \quad (7.8)$$

$$f_n = \frac{nc}{2l_x}. \quad (7.9)$$

Гледаме дека во звуковод затворен од двете страни, но и во секој еднодимензионален акустички систем кој има конечна должина l_x , се јавуваат стојни бранови на бесконечно многу фреквенции f_n кои претставуваат мултипли од најниската фреквенција f_1 за која половина од брановата должина е еднаква на должината на звуководот l_x . Оваа фреквенција се нарекува основна

фреквенција или основен хармоник, додека нејзините мултиплли се нарекуваат виши хармоници.⁵¹

За да ја прошириме оваа анализа на тродимензионални затворени простории ќе земеме една просторија со облик на паралелопипед со волумен: $V = l_x \times l_y \times l_z$ дадена на Сл. 7.1.



Слика 7.1: Затворена просторија со облик на паралелопипед.

Ќе започнеме од брановата равенка за три димензии:

$$\frac{\delta^2 p}{\delta t^2} = c^2 \nabla^2 p, \quad (7.10)$$

каде со ∇^2 е означен лапласијанот кој претставува парцијален извод во трите просторни димензии:

$$\nabla^2 = \frac{\delta^2}{\delta x^2} + \frac{\delta^2}{\delta y^2} + \frac{\delta^2}{\delta z^2}. \quad (7.11)$$

Ако се земе дека сидовите на просторијата се бесконечно крути, односно дека $Z_s = \infty$, тогаш во просторијата ќе се формираат стојни бранови чија амплитуда ќе зависи од просторните координати x , y и z и кај кои нема да има појава на простирање. Поради ова притисокот p може да го напишеме како:

$$p(x,y,z,t) = A\Psi(x,y,z)e^{j\omega t}, \quad (7.12)$$

каде е константа, а Ψ ја дава просторната распределеност на притисокот. Поради обликов на просторијата, граничните површини се определни со фиксирање на едната координата на константа а промена на останатите две, што изнудува просторната функција да го има следниот специјален облик:

$$\Psi(x,y,z) = X(x)Y(y)Z(z), \text{ или:} \quad (7.13)$$

$$\Psi = XYZ. \quad (7.14)$$

Со замена на овој израз во (7.12), а потоа во (7.10), добиваме:

$$\frac{\delta^2}{\delta t^2} (A\Psi(x,y,z)e^{j\omega t}) = c^2 \nabla^2 A\Psi(x,y,z)e^{j\omega t}, \quad (7.15)$$

$$AXYZe^{j\omega t}(j\omega)^2 = c^2 Ae^{j\omega t} \left(\frac{\delta^2 X}{\delta x^2} YZ + \frac{\delta^2 Y}{\delta y^2} XZ + \frac{\delta^2 Z}{\delta z^2} XY \right), \quad (7.16)$$

$$\frac{1}{X} \frac{\delta^2 X}{\delta x^2} + \frac{1}{Y} \frac{\delta^2 Y}{\delta y^2} + \frac{1}{Z} \frac{\delta^2 Z}{\delta z^2} = -\frac{\omega^2}{c^2} = -k^2. \quad (7.17)$$

Бидејќи секој од трите членови од левата страна зависи само од една од координатите, тогаш

⁵¹Основниот хармоник почесто се бележи f_0 наместо f_1 .

ова равенство може да е точно само ако секој од овие членови е константа, па имаме:

$$\frac{1}{X} \frac{\delta^2 X}{\delta x^2} = -k_x^2, \quad (7.18)$$

$$\frac{1}{Y} \frac{\delta^2 Y}{\delta y^2} = -k_y^2, \quad (7.19)$$

$$\frac{1}{Z} \frac{\delta^2 Z}{\delta z^2} = -k_z^2. \quad (7.20)$$

$$(7.21)$$

Тогаш (7.17) преминува во:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2. \quad (7.22)$$

Границите услови за звучното поле во оваа просторија велат дека: Според (7.6) имаме:

$$\begin{aligned} v_x &= 0 & \text{за } x = 0 & \text{ и } x = l_x, \\ v_y &= 0 & \text{за } y = 0 & \text{ и } y = l_y, \\ v_z &= 0 & \text{за } z = 0 & \text{ и } z = l_z. \end{aligned}$$

$$k_x = \frac{n_x \pi}{l_x}, \quad n_x \in \mathbb{N}_0, \quad (7.23)$$

$$k_y = \frac{n_y \pi}{l_y}, \quad n_y \in \mathbb{N}_0, \quad (7.24)$$

$$k_z = \frac{n_z \pi}{l_z}, \quad n_z \in \mathbb{N}_0, \quad (7.25)$$

каде со \mathbb{N}_0 е означеното множеството на природни броеви прошириено со 0. Конечно од (7.22) за резонантните фреквенции на просторијата добиваме:

$$\frac{2\pi}{\lambda_N} = \pi \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}, \quad (7.26)$$

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}, \quad (7.27)$$

$$f_n = \sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_z^2}. \quad (7.28)$$

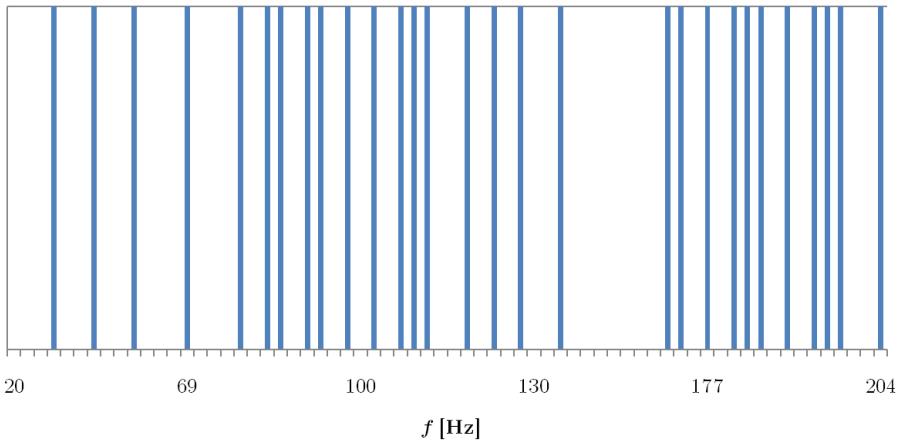
каде n претставува вектор во просторот на резонантни фреквенции на просторијата одреден со тројка од вредности на n_x , n_y и n_z :

$$\mathbf{n} = [n_x, n_y, n_z] \quad (7.29)$$

Секоја тројка N претставува една резонантна фреквенција, или [мод](#), на оваа затворена просторија. На Сл. 7.2 е прикажана распределбата на модовите за ниски фреквенции во една просторија со димензии $5 \times 4 \times 2$. Тројките во кои само едно од трите n е различно од нула ги опишуваат [аксијалните стојни бранови](#) кои се паралелни на една од оските x , y и z . Овие бранови зависат само од една од координатите, па се идентични со стојните бранови во еднодимензионалните акустички средини како звуководите. Фреквенциите за кои две n се различни од нула се поврзани со [површинските стојни бранови](#) кои се паралелни на една од границите површини, определена од тоа n кое има вредност 0. Најсложените [просторни стојни бранови](#) се описани со тројки во кои сите n се различни од 0.

Од (7.27) може да се види дека најниската резонантна фреквенција за оваа просторија се добива за аксијалниот стоец бран кој е паралелен на најдолгата страна на просторијата. Ако тоа е на пр. l_x , тогаш најнискиот мод ќе биде $f_{1,0,0}$ даден со:

$$f_{1,0,0} = \frac{c}{2l_x}, \quad (7.30)$$



Слика 7.2: Резонантни фреквенции пресметани во опсегот од 20 – 200 Hz за просторија со димензии $5 \times 4 \times 2 \text{ m}^3$.

што е еквивалентно со (7.9) за $n = 1$.

Бројот на модови под некоја фреквенција f може приближно да се пресмета како однос на волуменот V_f на октантот со радиус f во просторот на модови, поделен со елементарниот волумен V_0 одреден со тројката $f_{1,1,1}$:

$$N_f \approx \frac{V_f}{V_0} = \frac{\frac{1}{8} \frac{4\pi f^3}{3}}{\frac{c}{2l_x} \frac{c}{2l_y} \frac{c}{2l_z}} = \frac{\frac{1}{8} \frac{4\pi f^3}{3}}{\frac{c^3}{8V}} = \frac{4\pi V f^3}{3c^3}. \quad (7.31)$$

Во овој израз се занемарени модовите кои одговараат на координатните рамнини во просторот на модови. Точниот израз е:

$$N_f = \frac{4\pi V}{3c^3} f^3 + \frac{\pi S}{2c^2} f^2 + \frac{L}{8c} f, \quad (7.32)$$

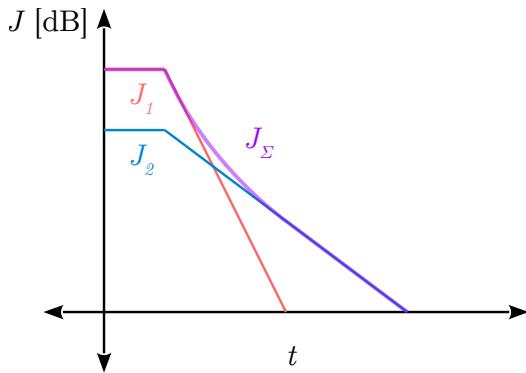
каде $S = 2(l_x l_y + l_x l_z + l_y l_z)$ е вкупната површина на просторијата, а $L = 4(l_x + l_y + l_z)$ е вкупната должина на сите ќошови. Во оваа сума првиот член одговара на просторните модови, вториот на површинските модови, а последниот на аксијалните модови. Може да се види дека последните играат значајна улога само за ниски фреквенции, додека на високи фреквенции преовладуваат просторните модови.

За наоѓање на број на модови во даден опсег на фреквенции (7.32) преминува во:

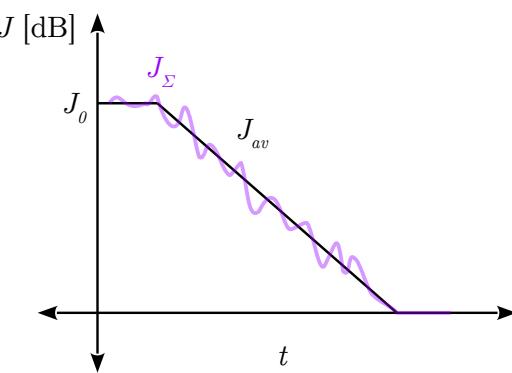
$$\Delta N_f = \left(\frac{4\pi V f^3}{3c^3} + \frac{\pi S f}{2c^2} + \frac{L}{8c} f \right) \Delta f. \quad (7.33)$$

Иако сите равенства беа изведени за просторија со паралелопипеден облик, во изразите (7.32) и (7.33) фигурираат V, S и L од кои не може директно да се одреди обликот на просторијата. Според тоа, тие се применливи и за простории со различен облик.

Постоењето на резонантните (сопствени) фреквенции во една просторија значи дека при нивно побудување ќе дојде до засилување на звучниот притисок, посебно воочливо на местата на максимумите на стојниот бран. Најголем ефект се добива кога фреквенцијата на изворот се поклопува со сопствената фреквенција на просторијата. До резонанција може да дојде и кога фреквенцијата на изворот е близку од резонантната, што зависи од нејзината селективност, т.е. Q-фактор. Поради тоа што сопствените фреквенции на просториите се густо распоредени, како и поради тоа што изворите на звук генерираат поширок спектар, вообичаено тие побудуваат поголем број на резонантни фреквенции. Изразеноста на дадени резонантни фреквенции над другите може да се забележи во областа на ниските фреквенции, за кои густината на сопствените фреквенции е помала. Ова е посебно изразено кога просторијата има правилни димензии, како кај квадратните и кружните простории.



Слика 7.3: Интензитет на звукот во просторија со два извора со различна моќност и различен коефициент на опаѓање.



Слика 7.4: Интензитет на звукот во просторија со многу различни извори.

По престанокот на работата на звучниот извор во просторијата ќе се јават придушени осцилации на побудените резонантни фреквенции. Звучниот притисокот за секоја од нив ќе опаѓа експоненцијално според:

$$p_i = p_{i0} e^{-\delta_i t}, \quad (7.34)$$

каде со δ_i е означен коефициентот на опаѓање на притисокот за резонантната фреквенција i , а со p_{i0} е означена вредноста на притисокот на таа фреквенција пред исклучување на изворот. Ако биле побудени повеќе модови звукот во просторијата по исклучувањето може да се опише со:

$$J = \sum_i J_i = \sum_i J_{i0} e^{-2\delta_i t}. \quad (7.35)$$

Бидејќи δ_i во општ случај се различни за секоја од резонантните фреквенции, опаѓањето на вкупниот интензитет на звукот во просторијата може да отстапува од експоненцијалниот закон, како што е илустрирано на Сл. 7.3. Од друга страна, ако бројот на побудени резонантни фреквенции е голем, разликите во нивното опаѓање меѓусебно се поништуваат, па опаѓањето на звукот во просторијата го следи експоненцијалниот закон описан со членот пред сумата во (7.36), како на Сл. 7.4. Тука δ е среден коефициент на опаѓање, а J_0 вкупен интензитет на звукот пред неговото исклучување даден со (7.37).

$$J = J_0 e^{-2\delta t} \sum_i \frac{J_{i0}}{J_0} e^{-2(\delta_i - \delta)t} \quad (7.36)$$

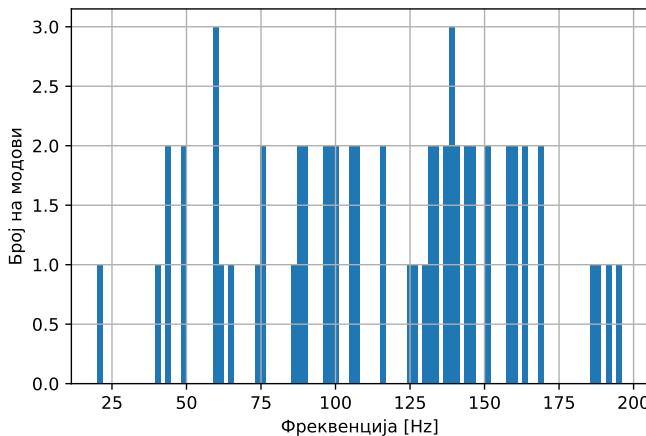
$$J_0 = \sum_i J_{i0} \quad (7.37)$$

7.2 Пресметка на распределбата на модови Практичен дел

Да го искористиме равенството 7.26 за да ги пресметаме фреквенциите на модовите кои ги опфаќа коцката со ќоп во точката (3, 3, 3) и координатниот почеток во k просторот на фреквенции:

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import itertools

# %% иницијализација
c = 343 # m/s
dims = 8.5, 3.9, 3.9 # lx, ly, lz
n_max = 3
```



Слика 7.5: Хистограм на распределбата на модовите за ниските фреквенции на една просторија.

```

ns = itertools.product( # генерирај комбинации
    range(n_max+1),
    range(n_max+1),
    range(n_max+1)
)
ns = list(ns)[1:]

# %% фреквенција за сите комбинации
fs = []
for n in ns:
    k = np.pi * np.sqrt(
        (n[0]/dims[0])**2
        + (n[1]/dims[1])**2
        + (n[2]/dims[2])**2
    )
    lamda = 2*np.pi / k
    f = c / lamda
    fs.append(f)

# %% сортирај и исцртај хистограм
ns = np.array(ns)
fs = np.array(fs)
inds = np.argsort(fs)

ns_sorted = ns[inds]
fs_sorted = fs[inds]

plt.figure()
plt.hist(fs, 100)
plt.grid()

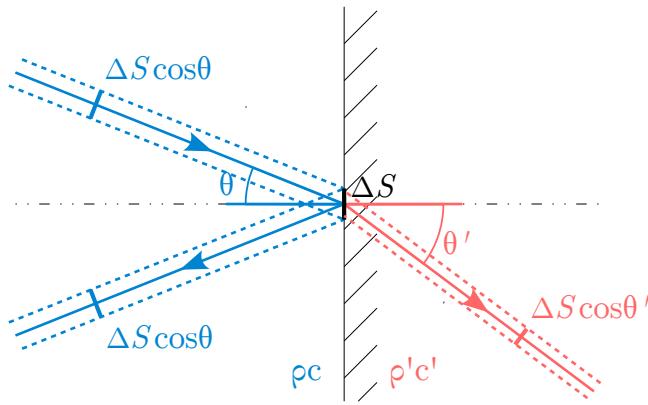
```

На Сл. 7.5 е прикажан добиениот хистограм. Се гледа дека за одредени фреквенции постои преклопување на модовите, кое е дотолку поизразено поради тоа што разгледаната просторија⁵² има еднаква ширина и висина. Поради ова, стojните бранови на овие фреквенции ќе бидат уште поизразени.

7.3 Коефициент на апсорпција

Коефициентот на слабеење на побудените осцилации во дадена просторија во најголема мера зависи од апсорпцијата на акустичката енергија при секое одбивање на звучниот бран. Оваа

⁵²Во случајов тоа е Лабораторијата за Дигитално процесирање на сигнали на ФЕИТ.



Слика 7.6: Звучен спон кој делумно се одбива од граничната површина ΔS , а делумно продолжува да се простира во втората средина.

апсорпција се описува со помош на коефициентот на апсорпција α даден со:

$$\alpha = \frac{P_\alpha}{P_i}. \quad (7.38)$$

Тука со P_i е означена акустичката моќност на звучниот бран пред одбивањето, а со P_α е означена апсорбираната акустичка моќност во втората средина, која дел се претвора во топлина, а дел продолжува да се простира понатаму. За описување на коефициентот на апсорпција преку интензитетот на звукот треба да го земеме во обсир аголот на инциденција на звучниот бран θ , илустриран на Сл. 7.6. Поради тоа што во втората средина бранот продолжува да се простира под агол θ' различен од θ според:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta'} = \frac{c}{c'}, \quad (7.39)$$

Пресекот на спонот ΔS_θ којшто удира во дадена гранична површина ΔS , даден со:

$$\Delta S_\theta = \Delta S \cos \theta, \quad (7.40)$$

во двете средини е различен. Затоа за изразување на коефициентот на апсорпција ќе го исористиме интензитетот на звукот кој бива рефлектиран J_r :

$$\alpha_\theta = 1 - \frac{J_r}{J_i} = 1 - \left| \frac{p_-}{p_+} \right|^2 = 1 - r^2, \quad (7.41)$$

каде r е факторот на рефлексија.

За нормална инциденција важи:

$$\alpha_0 = 1 - \left| \frac{Z_s - \rho c}{Z_s + \rho c} \right|^2, \quad (7.42)$$

каде Z_s е импедансата на граничната површина. За коса инциденција α_θ може да се пресмета користејќи ја нормалната импеданса на втората средина Z_n според:

$$\alpha_\theta = 1 - \left| \frac{Z_n - \frac{\rho c}{\cos \theta}}{Z_n + \frac{\rho c}{\cos \theta}} \right|^2. \quad (7.43)$$

Иако со употреба на (7.43) може да се дојде до средното α за сите агли на инциденција θ по теориски пат, во праксата вообичаено α за различните материјали се наоѓа со мерење.

Интересно е да спомене дека во реалноста постои само еден начин да се постигне $\alpha = 1$ за сите фреквенции, а тоа е отвор со димензии поголеми од брановата должина на звукот, т.н. „отворен прозор“.

7.4 Статистичка анализа на звучното поле

Во просторија со релативно мал просечен коефициент на апсорпција $\bar{\alpha}$ звукот се одбива многу пати пред да ослаби толку за неговото учество во вкупната акустичка енергија во просторијата да стане занемарливо. Ова релативно долго задржување на секој звучен бран ни дава можност да направиме две клучни претпоставки:

1. **Хомогеност** - во секоја точка доаѓаат истовремено многу звучни бранови кои поминале многу различни патови, па и имаат различни притисоци и фазни ставови. Притоа може да се претпостави дека во целата просторија звучното поле има еден ист среден интензитет.
2. **Дифузност** - сите правци на простирање се рамноправно застапени.

При вклучувањето на звучен извор во една просторија вкупното ниво на звукот на почетокот расте како што просторијата сè повеќе ја исполнуваат рефлектираните звучни бранови. Во даден момент настанува рамнотежа помеѓу звучната енергија која ја дава изворот во звучното поле и енергијата апсорбирана во просторијата. Тогаш прирастот на вкупната енергија во просторијата W ќе биде 0:

$$\frac{dW}{dt} = P_a - P_\alpha = 0, \quad (7.44)$$

каде P_a е акустичката моќност на звучниот извор, а P_α е акустичката моќност апсорбирана во просторијата. Може да се покаже ([Куртовиќ, 1982](#)) дека акустичката моќност ΔP_i која удира на елементарна површина ΔS е дадена со:

$$\Delta P_i = \frac{J}{4} \Delta S. \quad (7.45)$$

Од нејзе може да се најде апсорбираната моќност од оваа површина:

$$\Delta P_\alpha = \alpha \Delta P_i. \quad (7.46)$$

Вкупната апсорбирана моќност ќе ја добиеме со сумирање за сите елементарни површини:

$$P_\alpha = \sum_i \Delta P_{\alpha i} = \frac{J}{4} \sum_i \alpha_i \Delta S_i = \frac{J}{4} A, \quad (7.47)$$

каде со A е означена еквивалентната апсорпциона површина во просторијата. Таа може да се смета како површина на „отворениот прозор“ со кој би се еквивалентирала целата апсорпција во просторијата:

$$A = \sum_i A_i = \sum_i \alpha_i \Delta S_i = \bar{\alpha} S. \quad (7.48)$$

Тука со $\bar{\alpha}$ е означен просечниот коефициент на апсорпција на просторијата. За хомогено звучно поле акустичката енергија во просторијата е еднаква на:

$$W = EV, \quad (7.49)$$

каде E е густината на акустичка енергија, а V волуменот на просторијата. Ако знаеме дека:

$$E = \frac{J}{c}, \quad (7.50)$$

тогаш заменувајќи ги (7.49) и (7.47) во (7.44) добиваме:

$$\frac{dW}{dt} = P_a - \frac{J}{4} A, \quad (7.51)$$

$$\frac{dJ}{dt} = \frac{c}{V} P_a - \frac{cA}{V4} J. \quad (7.52)$$

Решението на оваа диференцијална равенка од прв ред е:

$$J = \frac{4P_a}{A} - Ce^{-\frac{A}{4V}ct}, \quad (7.53)$$

каде C е константа која зависи од почетните услови.

За периодот на воспоставување на звучното поле во просторијата важат следните почетни услови:

$$J = 0 \quad \text{за} \quad t = 0 ,$$

за кои (7.53) ја добива следната форма:

$$J = \frac{4P_a}{A} \left(1 - e^{-\frac{A}{4V}ct} \right) . \quad (7.54)$$

Тука можеме да забележиме дека стационарниот интензитет на звукот J_0 кој го постигнува еден извор со акустичка моќност P_a во една затворена просторија е одреден со:

$$J_0 = \frac{4P_a}{A} , \quad (7.55)$$

која можеше да се добие со изедначување на (7.51) на 0.

Овој стационарен интензитет на звукот во себе го содржи интензитетот на директниот и рефлектиралиот звук:

$$J_0 = J_d + J_r , \quad (7.56)$$

за кои важи:

$$J_d = \gamma \frac{P_a}{4\pi r^2} = \bar{\alpha} J_0 , \quad (7.57)$$

$$J_r = (1 - \bar{\alpha}) J_0 . \quad (7.58)$$

За периодот по исклучување на изворот важи следниот почетен услов: па од (7.53) имаме:

$$J = J_0 \quad \text{за} \quad t = 0 ,$$

$$J = J_0 e^{-\frac{A}{4V}ct} . \quad (7.59)$$

7.5 Пресметка на звучно поле во просторија

Практичен дел

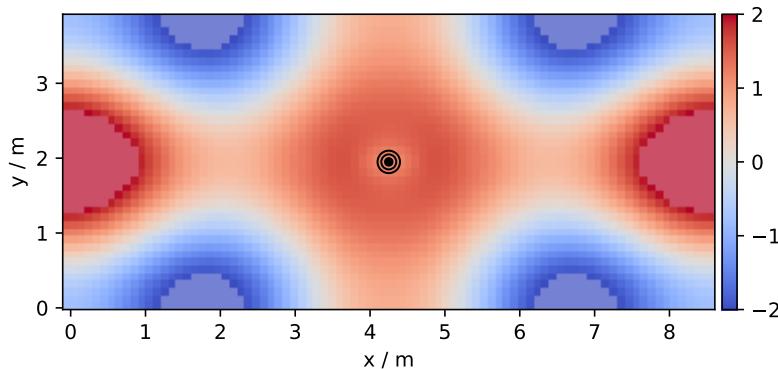
За пресметка на звучно поле во просторија за дадена фреквенција ќе го искористиме алатникот SFS⁵³. Тој содржи функции за проценка на звучното поле во секоја точка од просторијата преку сума на звучните бранови емитирани од виртуелните слики на изворот со кои се претставени рефлектирани звучни бранови. Ќе ги внесеме истите димензии за просторијата, а ќе го поставиме звучниот извор да емитира тон од 88 Hz од нејзината средина. Бројот на рефлексии од секој сид ќе го ограничиме на 20.

```
import numpy as np
import sfs

# %% иницијализација на просторијата
dims = 8.5, 3.9, 3.9 # l * w * h во m3
alpha = 0.01 # апсорпција на сидовите
n_order = 20 # максимален број на рефлексии
c = 343 # m/s

# %% испртаж го звучното поле
f = 88
omega = 2*np.pi*f
```

⁵³Sound Field Synthesis (SFS) Toolbox <https://github.com/sfstoolbox/sfs-python>



Слика 7.7: Распределба на звучното поле во просторијата добиено со извор поставен во нејзината средина кој еmitира звук со фреквенција од 88 Hz.

```
x0 = dims[0]/2, dims[1]/2, 1 # локација на изворот

grid = sfs.util.xyz_grid(
    (0, dims[0]),
    (0, dims[1]),
    dims[2] / 2,
    spacing=.1
)
p = sfs.fd.source.point_modal(
    omega,
    x0,
    grid,
    dims,
    N=n_order,
    deltan=alpha,
)
p *= 0.05
sfs.plot2d.amplitude(p, grid)
sfs.plot2d.virtualsource(x0)
```

На Сл. 7.7 е прикажан добиеното звучно поле. Можеме да видиме дека за фреквенција од 88 Hz се јавуваат јасно изразени стојни бранови со врвови на работите од просторијата но и во нејзината средина. Ако слушателот се движи од левиот до десниот сид, ќе слушне промена во амплитудата на еmitуваниот тон и покрај тоа што изворот го зрачи со непроменета моќност.

7.6 Време на реверберација

Првиот кој го воочил експоненцијалниот закон на опаѓање на интензитетот на звукот во една просторија во 1895 г. е американскиот научник Волас Сабин, за кого се врзани почетоците на модерната акустика на просториите. Тој како мерка за брзината на опаѓање на звукот го вовел времето на реверберација. [Реверберација](#) е низата на последователни слеани еха кои го пратат директниот звук во една просторија. Таа всушност претставува акустички импулсен одсив на просторијата. [Време на реверберација](#) е времето потребно од моментот на исклучување на изворот нивото на звук во просторијата да опадне за 60 dB. Овој пад на нивото го избрал Сабин затоа што толку приближно изнесува и вистинското времетраење на звукот во просторијата кое може да се одреди со помош на сетилото за слух.⁵⁴ Во практични услови поради присуството на позадински шум, не секогаш е можно да се измери пад во нивото од 60 dB, па затоа често се мерат времената на пад на нивото од 20 или 30 dB. Експоненцијалниот закон за опаѓање на звукот, во логаритамски домен претставува права линија, па за овие времиња важи:

$$T = T_{60} = 2T_{30} = 3T_{20}. \quad (7.60)$$

⁵⁴Wikipedia: Wallace Clement Sabine. https://en.wikipedia.org/wiki/Wallace_Clement_Sabine

Времето на реверберација може да го одредиме од (7.59) ако поставиме следниот услов:

$$J = J_0 \cdot 10^{-6} \quad \text{за} \quad t = T .$$

Имаме:

$$J_0 \cdot 10^{-6} = J_0 e^{-\frac{A}{4V} cT}, \quad (7.61)$$

$$10^{-6} = e^{-\frac{A}{4V} cT}, \quad (7.62)$$

$$\ln 10^{-6} = -\frac{A}{4V} cT, \quad (7.63)$$

$$\frac{\log 10^{-6}}{\log e} = -\frac{A}{4V} cT, \quad (7.64)$$

$$T = \frac{24V}{cA \log e}. \quad (7.65)$$

Ако замениме за c и $\log e$, тогаш конечно ја добиваме [формулата на Сабин](#):

$$T = \frac{0,16V}{A} = \frac{0,16V}{\bar{\alpha}S}. \quad (7.66)$$

Ова равенство, во склад со почетните претпоставки што ги направивме во Поглавјето 7.4, односно дека $\bar{\alpha}$ е мало, не важи сосема за простории со голема апсорција.⁵⁵ Сепак, поради својата едноставност, формулата на Сабин се употребува и ден денес за проценка на времето на реверберација на некоја просторија за време на нејзиното проектирање. Кога станува збор за веќе постоечки простор, тогаш мерењето на времето на реверберација останува најточен метод за нејзино одредување.

За високи фреквенции слабеењето на звукот во воздухот не е занемарливо. Тоа може едноставно да се вклучи во формулата на Сабин. Во Поглавјето 3 беше кажано дека звукот слабее експоненцијално со коефициент m зависно од растојанието кое го поминува. Ако овој податок го внесеме во (7.59) добиваме:

$$J = J_0 e^{-\frac{A}{4V} ct} e^{-mct} = J_0 e^{-\frac{A+4mV}{4V} ct}, \quad (7.67)$$

па за T се добива:

$$T = \frac{0,16V}{A + 4mV}. \quad (7.68)$$

7.7 Средна должина на слободната патека на звукот

За да ја одредиме средната должина на патеката која ја поминува звучниот бран во една просторија меѓу две рефлексии ќе земеме просторија со произволен облик како на Сл. 7.8 и една произволна слободна патека на звукот во неа. Ако dS е елементарната површина во која удира звучниот бран, нека dS_n е нејзината проекција нормална на патеката на звучниот бран за која важи:

$$dS_n = dS \cos \theta, \quad (7.69)$$

каде θ е аголот на инциденција на звучниот бран. Тогаш елементарниот волумен околу звучниот зрак ќе биде даден со:

$$dV = l dS_n. \quad (7.70)$$

За да го добиеме целиот волумен на просторијата може да ги собереме сите паралелни зраци на разгледаниот преку интегрирање по целата нејзината површина. Бидејќи ова значи интегрирање

⁵⁵Ако замениме $\bar{\alpha} = 1$ нема да добиеме $T = 0$!

од двете страни на просторијата, всушност резултатот ќе биде двојно поголем од вистинскиот волумен:

$$2V = \oint_S l \cos \theta dS = \bar{l} \overline{\cos \theta} S. \quad (7.71)$$

Тука со \bar{l} е означена средната должина на слободната патека, а со $\overline{\cos \theta}$ е средната вредност за сите можни агли на инциденција. Може да се покаже дека веројатноста на даден агол на инциденција изнесува $\sin \theta$ (Куртовиќ, 1982), па имаме:

$$\overline{\cos \theta} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \sin \theta d\theta = \frac{1}{2}. \quad (7.72)$$

Конечно за средната должина на слободната патека добиваме:

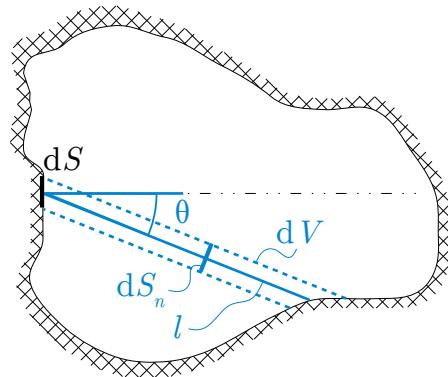
$$\bar{l} = \frac{4V}{S}. \quad (7.73)$$

7.8 Мерење на импулсниот одсив на просторија

Постојат различни начини да се измери импулсниот одсив на една просторија. Оригиналната метода која ја користел Сабин за мерење на акустиката на предавалната во Музејот на уметност Фог вклучувала органа и стоперка, а за мерење на падот во нивото на звукот во просторијата тој го користел своето уво. Во модерни услови за мерење на импулсниот систем постојат комерцијални системи кои во себе вклучуваат калибриран микрофон и хардвер и специјализиран софтвер за правење на меренјата. Кај овие системи во употреба се три различни звучни побуди:

- **импулсна звучна побуда** – генерирана со пукнување на балон, пиштол или со воспоставување на електричен лак.
- **секвенца со максимална должина (MLS)⁵⁶** – псевдослучајна бинарна секвенца која има спектрална карактеристика на бел шум.
- **синусен тон со променлива фреквенција⁵⁷**.

Од овие три типови на побуда, првиот тип е веќе исфрлен од употреба, поради неможноста да се генерира доволно голема акустичка енергија со еден краткотраен импулс. Денес, во најголема мера се употребува синусната побуда, поради предностите кои таа ги носи – со нејзина употреба може едноставно да се елиминираат вишите хармоники на изобличувањата внесени од звучникот, со што се намалува зависноста на резултатот од квалитетот на употребениот звучник, како што ќе видиме во Поглавјето .



Слика 7.8: Просторија со произволен облик и средна должина на слободната патека на звукот во неа.

⁵⁶Wikipedia: Maximum length sequence. https://en.wikipedia.org/wiki/Maximum_length_sequence

⁵⁷анг. *sine sweep*.

Во зависност од кој тип на звучна побуда сме го употребиле, импулсниот одсив се добива на различен начин од побудата. При употреба на импулсна звучна побуда, самата снимка директно го дава импулсниот одсив на просторијата. Во вторите два случаји снимениот звук $y[n]$ преставува конволуција на побудниот звук $x[n]$ и импулсниот одсив на просторијата $h[n]$:

$$y[n] = h[n] * x[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h[m]x[n-m]. \quad (7.74)$$

За да се добие импулсниот одсив кога побудата е MLS, сè што треба да се направи е да се направи корелација на снимениот сигнал со самата побуда. Бидејќи MLS сигналот е (псевдо) случаен, неговата автокорелација е импулс за време 0, па имаме:

$$y[n] \star x[n] = h[n] * x[n] \star x[n] = h[n], \quad (7.75)$$

каде со \star е означена корелацијата:

$$y[n] \star x[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} y[m]x[m+n]. \quad (7.76)$$

Споредувајќи ги (7.74) и (7.76) може да се види дека конволуцијата и корелацијата претставуваат еквивалентни операции кои се разликуваат по тоа што во првиот случај едниот од сигналите е огледално превртен. Од таму, пресметувањето на корелацијата во овој случај е еквивалентно со правење на конволуција со превртениот MLS побуден сигнал:

$$y[n] \star x[n] = h[n] * x[n] * \overleftarrow{x}[n] = h[n]. \quad (7.77)$$

Во третиот случај потребно е да се направи деконволуција на импулсниот одсив преку правење на конволуција со инверзниот сигнал на побудниот:

$$y[n] * x^{-1}[n] = h[n] * x[n] * x^{-1}[n] = h[n], \quad (7.78)$$

каде со $x^{-1}[n]$ е означен инверзниот сигнал на побудата $x[n]$. Или во Фурьеов домен:

$$Y[k] \cdot X^{-1}[k] = H[k] \cdot X[k] \cdot \frac{1}{X[k]} = H[k], \quad (7.79)$$

каде со $Y[k]$, $X[k]$, $X^{-1}[k]$ и $H[k]$ се дадени Фурьеовите трансформации на соодветните сигнали. Како и претходно, инверзниот сигнал се добива со превртување на оригиналниот сигнал, но овојпат има потреба од дополнителна обработка на сигналот.

7.9 Мерење на импулсниот одсив на просторија

Практичен дел

Во овој практичен дел ќе искористиме синусна побуда за снимање на импулсниот одсив на Лабораторијата по Дигитално процесирање на сигнали на ФЕИТ.⁵⁸ Валидноста на резултатите зависи од квалитетот на мерната опрема, но аматерско мерење може да направиме и со обичен микрофон и пар звучници. За таа цел, повторно ќе се послужиме со програмскиот пакет Питон.

Генерирање на побудата

Иако во Поглавјето синусниот тон со променлива фреквенција го генерираме со функцијата `chirp` од модулот `scipy.signal`, овој пат ќе ја генерираме според нејзината математичка дефиниција (Carson et al., 2009):

$$x(t) = \sin \theta(t) = \sin \frac{\omega_l T}{r_\omega} (e^{-t \frac{r_\omega}{T}} - 1). \quad (7.80)$$

⁵⁸Овој практичен дел е инспириран од соработката со проф. д-р Дејан Ќириќ од Електронскиот факултет на Универзитетот во Ниш, Србија и истоимената вежба од практикумот по предметот Акустика кој тој го води.

Тука $\theta(t)$ е променливата фаза на синусниот сигнал, r_ω е логаритам од односот на долната и горната крајна фреквенција на опсегот кој го изминува синусот ω_l и ω_h :

$$r_\omega = \ln \frac{\omega_l}{\omega_h}, \quad (7.81)$$

а T е времетраењето на синусниот сигнал.

```
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
from scipy.io import wavfile
import scipy.signal as sig
import os
import ea

# %% generate sine sweep
fs = 44100
ts = 1 / fs
T = 4
t = np.arange(0, T, ts)
f_l = 100
f_h = 1e4
w_l = 2*np.pi*f_l
w_h = 2*np.pi*f_h
r_w = np.log(w_l/w_h)
sweep = np.sin(w_l*t/r_w * (np.exp(-t*r_w/T) - 1))

# %% plot sound
plt.figure()
plt.plot(t, sweep)
plt.axis((0, .06,-1,1))
plt.grid()

# %% plot spectrum
f, spec = ea.get_spectrum(fs, sweep)
plt.figure()
plt.plot(f, spec)
plt.xscale('log')
plt.axis((100, 1e4,-60,-20))
plt.grid()

# %% plot spectrogram
spectrogram = ea.get_spectrogram(fs, sweep, 2048)

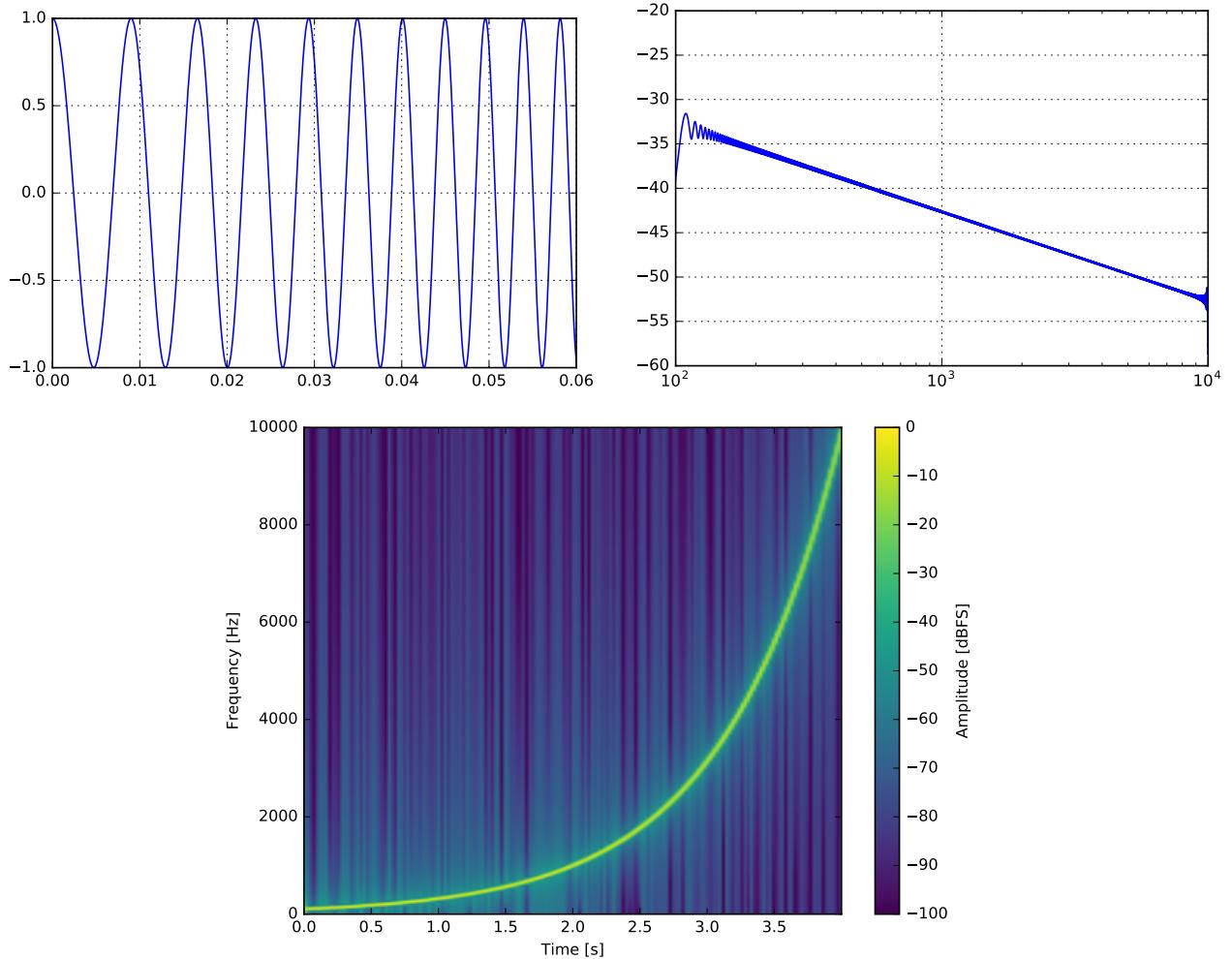
# %% play sound
wavfile.write('sweep.wav', fs, np.int16(sweep * 2**15))
os.system('play sweep.wav')
```

Добиениот сигнал на побуда е прикажан на Сл. 7.9 во временски и фреквенциски домен, како и преку спектограм.

Од приказот на спектарот на сигналот може да видиме дека имаме опаѓање на амплитудата во фреквенција и тоа за 10 dB/dek. Ова се должи на експоненцијалната промена на фреквенцијата на синусниот сигнал. Имено, синусот се задржува сè помалку на една фреквенција како таа е поголема. Фреквенцијата на синусот во дадено време t можеме да ја добиеме преку првиот извод на фазата:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = -\omega_l e^{-t \frac{r_\omega}{T}}. \quad (7.82)$$

Енергијата на сигналот во дадено време t ќе биде инверзно пропорционална на брзината на



Слика 7.9: Побудниот синусен сигнал претставен во временски и спектрален домен и во вид на спектрограм.

промената на фреквенцијата, односно ќе имаме:

$$E(t) \propto \frac{1}{\frac{d\omega(t)}{dt}} = \frac{T}{\omega_l r_\omega} e^{t \frac{r_\omega}{T}}. \quad (7.83)$$

Фуреовата трансформација на експоненцијална функција е дадена со:

$$\mathcal{F}\{e^{at}\} = \int_0^\infty e^{at} e^{-j\omega} dt = -\frac{1}{-a + j\omega} e^{-(a+j\omega)t} \Big|_0^\infty = \frac{1}{-a + j\omega}. \quad (7.84)$$

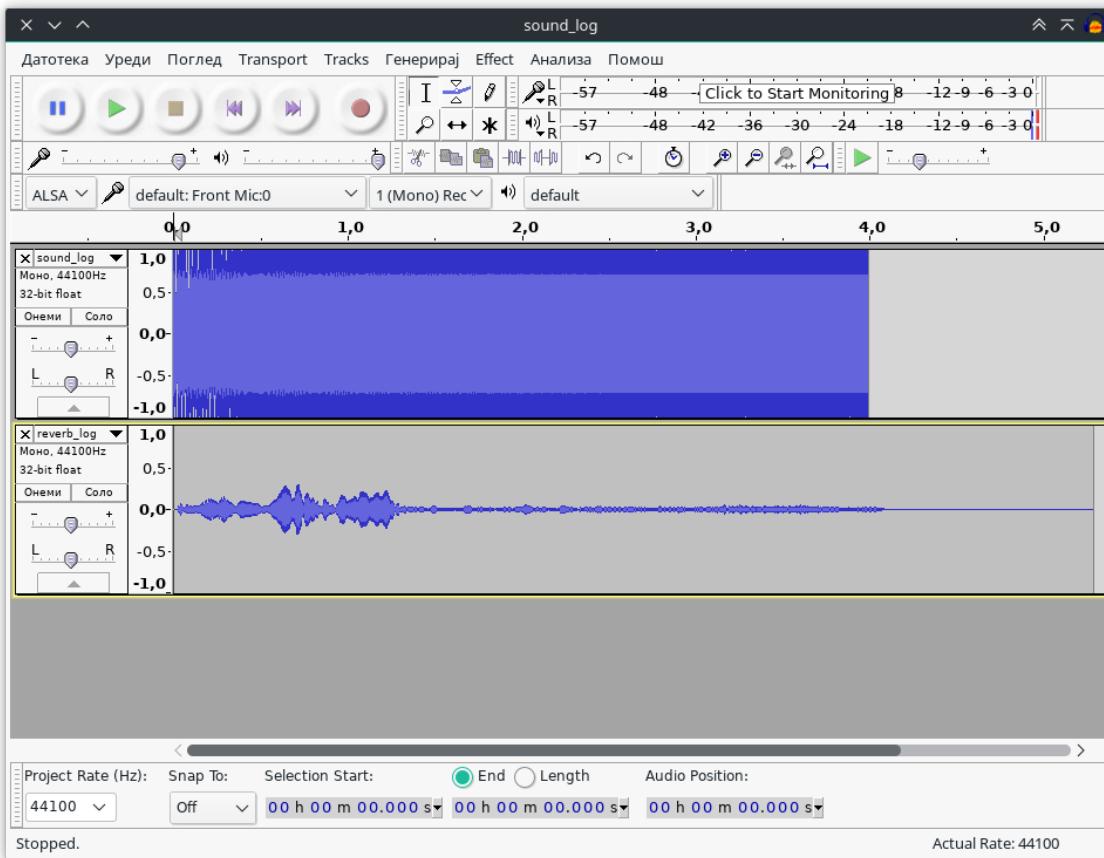
Оттука за (7.83) имаме:

$$E(j\omega) = k \frac{T}{\omega_l r_\omega} \frac{1}{-\frac{r_\omega}{T} + j\omega}, \quad (7.85)$$

каде со k е претставена константата на пропорционалност. Од 7.85 може да видиме дека енергијата опаѓа инверзно со порастот на фреквенцијата. Така, за пораст на фреквенција од една декада, односно $\omega_2 = 10 \cdot \omega_1$ имаме пад на енергијата од $20 \log^{1/10} = 10$ dB, како што и можеше да се види на Сл. 7.9.

Снимање на реверберацijата на просторијата

Вака генериралиот сигнал на побуда треба да го пуштиме на звучниците и да го снимиме со микрофонот. За таа цел ќе го вчитаме во програмскиот пакет Аудасити со кој веќе се запознавме во Поглавјето . По вчитувањето доволно е да притиснеме на копчето за снимање и аудио фајлот ќе биде пуштен на звучниците при самото снимање. Резултатите на ваквото снимање, прикажани на Сл. 7.10, зачувавајте ги во wav фајл.



Слика 7.10: Снимање на одсивот на просторијата во Аудасити.

Прикажување на снимениот одсив на просторијата

Снимениот одсив ќе го вчитаме во Питон и ќе го прикажеме неговиот спектрограм.

```
fs, reverb = wavfile.read('reverb.wav')
reverb = reverb / 2**15
spectrogram_rev = ea.get_spectrogram(fs, reverb, 2048)
```

Од спектрограмот даден на Сл. 7.11 може да видиме дека имаме појава на мали изобличувања кај звучникот за ниските фреквенции до 500 Hz, како и во опсегот од 1 до 3 kHz, но тие не се толку изразени. Изобличувањата предизвикани од звучникот се обработени во Поглавјето .

Генерирање на инверзниот сигнал на побудата

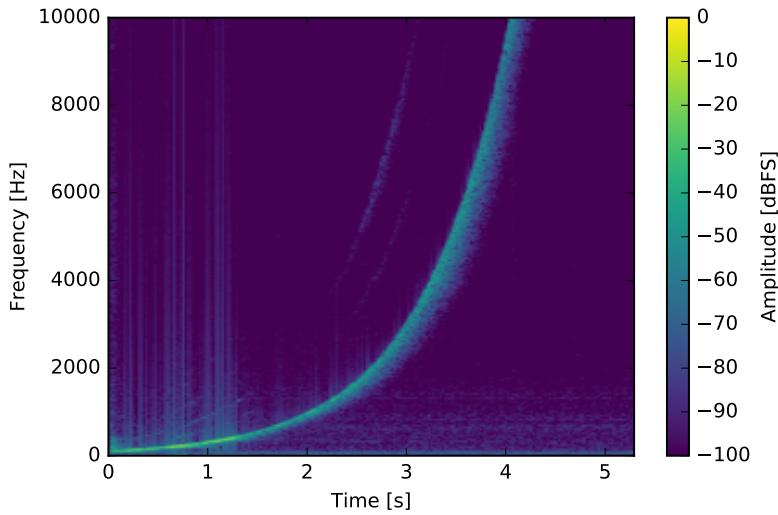
За конструкција на инверзниот сигнал на побудата, најпрвин ќе го превртиме временски генерираниот сигнал. Потоа ќе мора да го компенсираме падот на енергијата во зависност од фреквенцијата преку модулирање на превртениот сигнал со сигнал кој има еднаков раст на енергијата со фреквенцијата:

$$x_m(t) = \sin \theta_m(t), \quad (7.86)$$

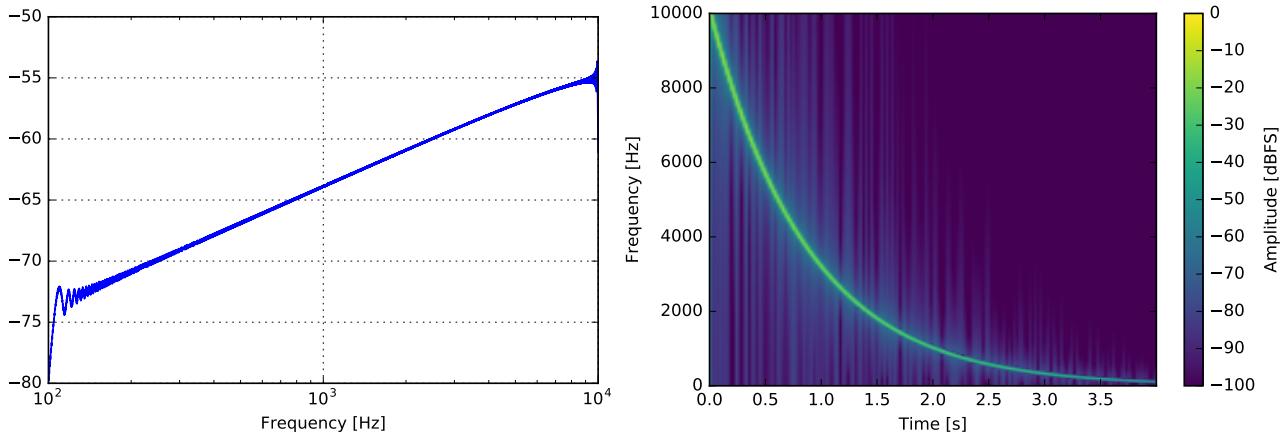
каде $\theta_m(t)$ е дадено со:

$$\theta_m(t) = \int \omega_m(t) dt = \int \frac{A}{\omega(t)} dt, \quad (7.87)$$

каде со A е означена амплитудата на инверзната функција на фреквенцијата. За да се добие амплитуда 1 по конволуцијата на инверзниот сигнал со оригиналната побуда треба да се земе



Слика 7.11: Спектрограм на снимената реверберација на просторијата.



Слика 7.12: Спектар и спектрограм на инверзниот сигнал.

$A = \omega_l$, со што за инверзниот сигнал конечно добиваме:

$$\theta_m(t) = \int \frac{\omega_l}{-\omega_l e^{-t\frac{r_\omega}{T}}} dt = \int -e^{t\frac{r_\omega}{T}} dt = -\frac{T}{r_\omega} e^{t\frac{r_\omega}{T}}, \quad (7.88)$$

$$x^{-1}(t) = \overline{x}(t) \cdot \sin -\frac{T}{r_\omega} e^{t\frac{r_\omega}{T}}. \quad (7.89)$$

Да го генерираме овој сигнал во Питон.

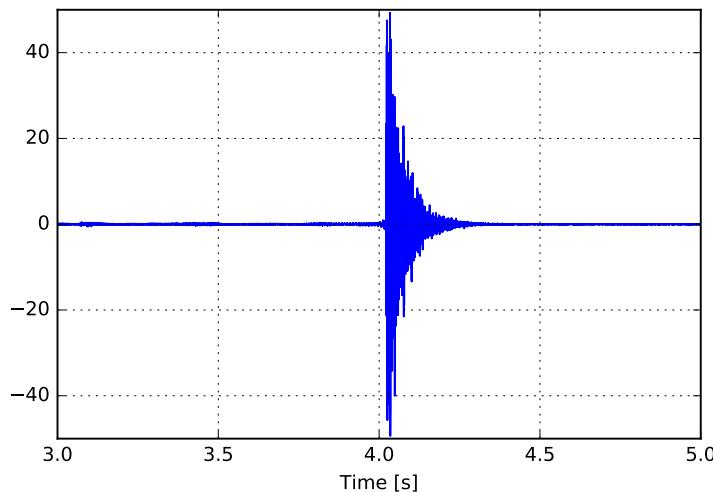
```
th_m = -T/r_w * np.exp(t*r_w/T)
modulation = np.sin(th_m)
inverse = sweep[::-1] * modulation

# %% plot spectrum
f, spec_inv = ea.get_spectrum(fs, inverse)
plt.figure()
plt.plot(f, spec_inv)
plt.xscale('log')
plt.grid()

# %% plot spectrogram
spectrogram_rev = ea.get_spectrogram(fs, inverse, 2048)
```

Спектарот на инверзниот сигнал и неговиот спектрограм се прикажани на Сл. 7.12

За да го добиеме импулсниот одсив на просторијата ќе направиме конволуција на снимениот



Слика 7.13: Временски облик на пресметаниот импулсен одсив на просторијата.

одсив на собата и инверзниот сигнал на побудата. Така добиениот одсив е прикажан на Сл. 7.13. Сосема малку може да се забележат предехата предизвикани од хармониските изобличувања на звучникот. Поизразен приказ на оваа појава е даден во Поглавјето .

```
# %% convolve
room_response = sig.convolve(reverb_log, inverse)

# %% plot sound
plt.figure()
plt.plot(room_response)
plt.grid()
```

Следно ќе го изолираме делот од добиениот сигнал кој одговара на бараниот импулсен одсив на просторијата и ќе го прикажеме во вид на спектрограм и преку водопад дијаграм⁵⁹. Од така изолираниот одсив ќе ја пресметаме и преносната функција на просторијата.

⁵⁹анг. *waterfall diagram*.

```

# %% isolate impulse response
room_response = room_response / np.max(np.abs(room_response))
max_ind = np.argmax(room_response)
t_minus = 0.01 # s
t_plus = 1 # s
room_response_trimmed = room_response[
    int(max_ind - t_minus*fs) : int(max_ind + t_plus*fs)
]

# %% time domain in dB
plt.figure()
t = np.arange(0, room_response_trimmed.size/fs, ts)
plt.plot(t, 20*np.log10(room_response_trimmed))

# %% transfer function (spectrum)
f, transfer_func = ea.get_spectrum(fs, room_response_trimmed)
plt.figure()
plt.plot(f, transfer_func)
plt.xscale('log')

# %% spectrogram
t_frame, f, frames_spec = ea.get_spectrogram(fs, room_response_trimmed, 2048)

# %% waterfall diagram
from mpl_toolkits.mplot3d import axes3d
fig = plt.figure()
ax = fig.gca(projection='3d')
X, Y = np.meshgrid(t_frame, np.log10(f[:512]))
ax.plot_wireframe(X, Y, frames_spec[:512,:,:], rstride=0, cstride=4)

# %% play impulse response
wavfile.write(
    'room_response.wav', fs,
    np.array(room_response_trimmed * 2**15, dtype='int16')
)
os.system('play room_response.wav')

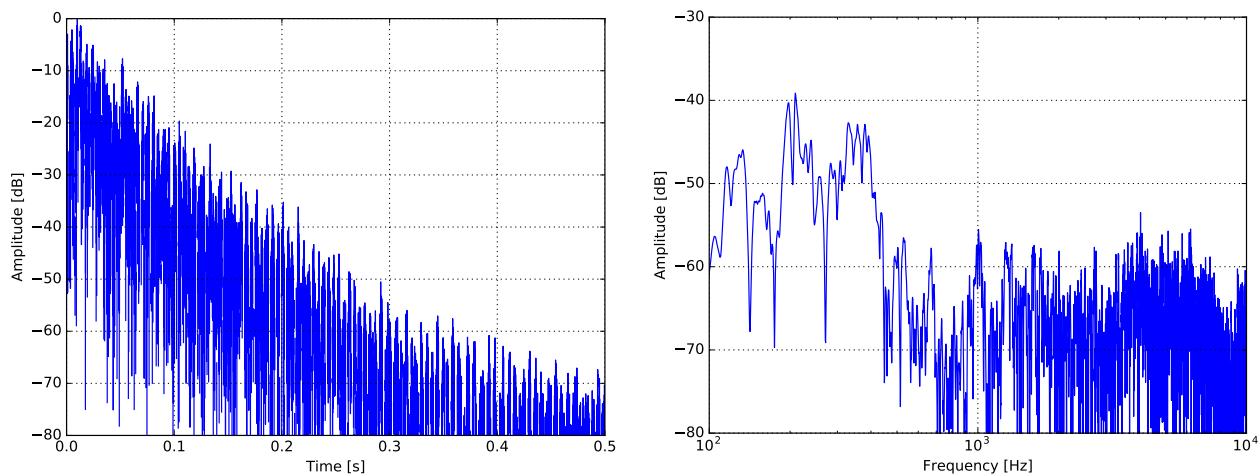
```

Добиените графици за импулсниот одсив на просторијата се дадени на Сл. 7.14 и 7.15. Од временскиот облик во dB може да се прочита времето на реверберацija кое во случајов изнесува околу 0,3 s. Од преносната функција пак може да видиме дека во просторијата постојат изразени врвови за ниските фреквенции, поточно за фреквенциите: 130, 200 и 350 Hz. Тие се всушност резонантните фреквенции на мерената просторија. Од спектрограмот и водопад дијаграмот пак, може да видиме дека иако импулсниот одсив на поголем дел од фреквенциите исчезнува по 0,3 s, на резонантните фреквенции тој продолжува да трае и до 1 s.

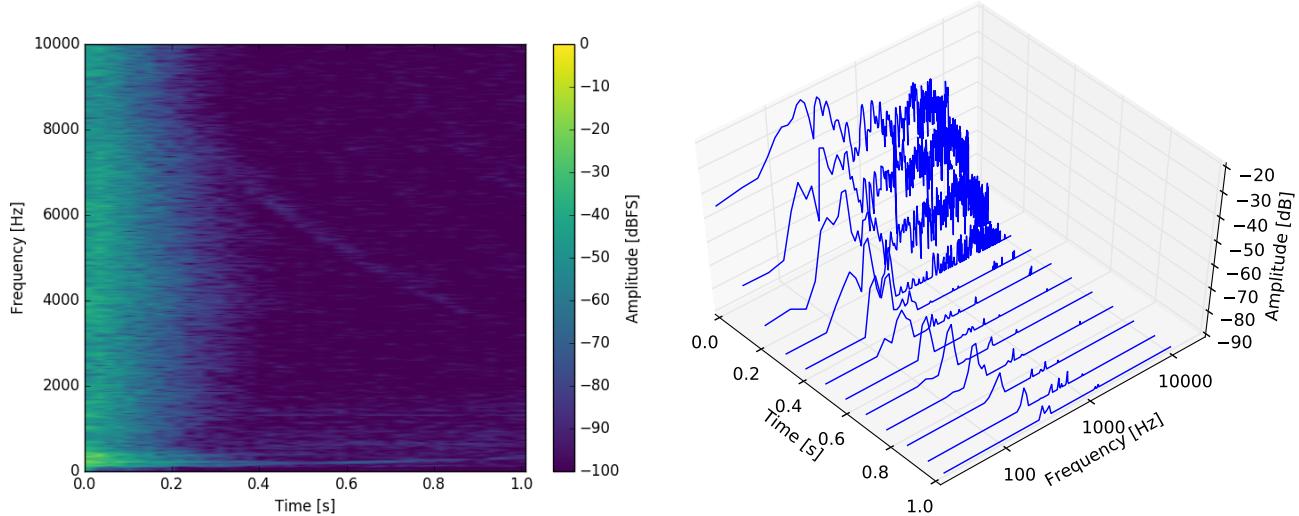
Изобличувања предизвикани од звучникот

Една од главните предности на употребата на синусна побуда за мерењето на реверберацijата е можноста да се отстранат изобличувањата на звучникот од аудиосигналот. Еден спектрограм од снимена реверберацija со неквалитетен звучник е прикажана на Сл. 7.16. На истата слика е прикажан и пресметаниот импулсен одсив во кој се јасно воочливи предизвикани од изобличувањата на звучникот. Тие можат лесно да се отстранат од добиениот импулсен одсив со отсекување.

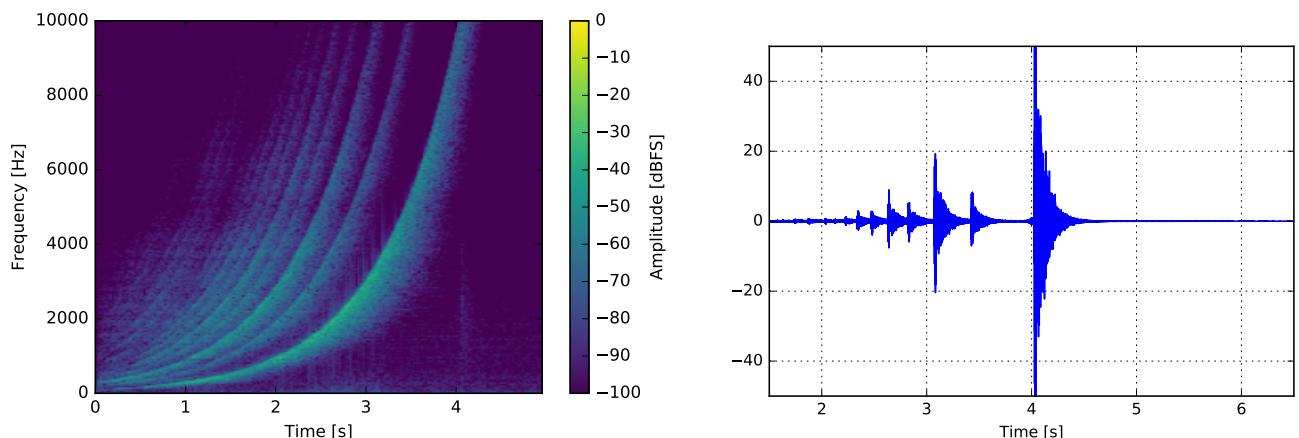
✓ Задача за дома. Измерете ја реверберацijата во вашиот дом.



Слика 7.14: Графички приказ на импулсниот одсив на просторијата преку неговиот временски облик во dB (лево) и спектралниот облик, т.е. преносната функција (десно).



Слика 7.15: Графички приказ на импулсниот одсив на просторијата преку неговиот спектрограм (лево) и водопад дијаграм (десно).



Слика 7.16: Спектрограм на снимената реверберација (лево) и временски облик на пресметаниот импулсен одсив (десно) на просторијата со употреба на неквалитетен звучник.

Поглавје 8

Микрофони

8.1 Електроакустички преобразувачи

Преобразувачите или трансдусерите, претставуваат уреди кои вршат преобразба на енергијата од еден физички домен во друг. Во електроакустиката од интерес се повеќе видови на преобразувачи и тоа:

- **електроакустички преобразувачи** - ја трансформираат акустичката енергија на звукот во електричен домен и обратно. Тука спаѓаат микрофоните, звучниците и слушалките.
- **електромеханички преобразувачи** - ја трансформираат механичката енергија во електрична и обратно. Тука спаѓаат на пример ултразвучните проектори кои се користат во медицината, и хидрофоните, т.е. подводните микрофони, кои се користат на пример кај сонарот.
- **механоакустички преобразувачи** - ја трансформираат акустичката енергија во механичка и обратно. Тука спаѓаат механички елементи, како на пр. мембрани, жици и сл., кои со нивното вибрирање зрачат, а можат и да примаат, звук.

Од најголемо значење за човековото секојдневно живеење со звукот се разбира се електроакустичките преобразувачи. Тие претставуваат основните градбени елементи со кои започнува и завршува секој електроакустички систем. Поради нивната специфична конструкција, до ден денес тие претставуваат најкритична алка во синџирот за пренос на звукот.

8.2 Основни карактеристики на микрофоните

При избор на квалитетен микрофон, од најголемо значење се неговите електроакустички карактеристики:

- осетливоста,
- фреквенциската карактеристика,
- кривата на насоченост,
- факторот на насоченост,
- динамичкиот опсег и
- импедансата.

Карактеристиките на микрофонот Neumann U87 прикажан на Сл. 8.1, кој е еден од најпрочуените и најдобри кондензаторски микрофони во историјата на музичката индустрија, се дадени во Табела 8.1.

⁶⁰ Превземено од http://www.neumann.com/?lang=en&id=current_microphones&cid=u87_description



Слика 8.1: Кондензаторски микрофон Neumann U87.⁶⁰



Слика 8.2: Фреквенциска карактеристика на микрофонот Neumann U87.⁶¹

Осетливост

Осетливоста T ⁶² претставува односот на напонот u на краевите на микрофонот во зависност од звучниот притисок p во звучно поле од рамнински бранови, т.н. [слободно поле](#):

$$T = \frac{u}{p}. \quad (8.1)$$

Единицата мерка за осетливост е V/Pa , но од практични причини вообичаено се користи mV/Pa . Исто така, осетливоста често се изразува во dB со т.н. [индекс на осетливост](#):

$$T[\text{dB}] = 20 \log \frac{u}{p}, \quad (8.2)$$

при што како референтна осетливост се зема 1 V/Pa . Бидејќи ниту еден микрофон не ја постигнува оваа осетливост, вредноста во dB секогаш е негативна. Ако земеме дека напонските нивоа на аудиосигналите при нивниот пренос во аудиотехниката се од редот на 1 V , а звуците со релативно голем интензитет имаат амплитуда од редот на 1 Pa , односно $94 \text{ dB}_{\text{SPL}}$, осетливоста всушност го означува приближно потребното засилувањето на сигналот кој се добива од микрофонот.

Во Табела 8.1 може да се види дека осетливоста на микрофонот Neumann U87 зависи од типот на карактеристиката на насоченост и мерена на 1 kHz и $1 \text{ k}\Omega$ изнесува 20 , 28 , односно 22 mV/Pa . Во dB овие изнесуваат -34 , -31 и -33 dB .

Фреквенциска карактеристика

⁶¹Превземено од http://www.neumann.com/download.php?download=copi0173_U87Ai_068820-A11_10-2014.pdf

⁶²Факторот на претворање се обележува со T кај сите трансдусери.

Табела 8.1: Технички карактеристики на микрофонот Neumann U87 дадени од производителот.

Acoustical operating principle	Pressure gradient transducer
Directional pattern	omnidirectional/cardiod/figure-8+
Frequency range	20 Hz – 20 kHz
Sensitivity at 1 kHz into 1 kohm	20/28/22 mV/Pa
Rated impedance	200 Ω
Rated load impedance	1 k Ω
Equivalent noise level, CCIR	26/23/25 dB
Equivalent noise level, A-weighted	15/12/14 dB-A
Signal-to-noise ratio, CCIR (rel. 94 dB SPL)	68/71/69 dB
Signal-to-noise ratio, A-weighted (rel. 94 dB SPL)	79/82/80 dB
Maximum SPL for THD 0.5%	117 dB (cardiod)
Maximum SPL for THD 0.5% with preattenuation	127 dB
Maximum output voltage	390 mV
Supply voltage (P48, IEC 61938)	48 V \pm 4 V
Current consumption (P48, IEC 61938)	0.8 mA
Matching connectors	XLR3F
Weight	500 g
Diameter	56 mm
Length	200 mm

Фреквенциската карактеристика на микрофонот ја дава зависноста на осетливоста од фреквенцијата. Оваа карактеристика се дава во dB, а како референтно ниво се користи осетливоста на 1 kHz. Обликот на оваа крива е можеби најкритичниот параметар кој ги издвојува високо квалитетните микрофони. Идеалниот микрофон има рамна фреквенциска карактеристика без нагласени отстапувања, но извесни отстапувања може да се посакувани во музичката индустрија затоа што тие поволно го филтрираат, т.е. „бојат“ звукот. Фреквенциските карактеристика на Neumann U87 е дадена на Сл. 8.2. Од фреквенциската крива може да се одреди и фреквенцискиот опсег на микрофонот.

Крива на насоченост

Кривата на насоченост $\Gamma(\theta)$ ја опишува промената на осетливоста во зависност од аголот на инциденција на звучниот бран θ во однос на нормалната оска на мембраната. Притоа осетливоста се прикажува релативно во однос на референтната осетливост на микрофонот при нормална инциденција $\theta_0 = 0$ којашто е и најголема:

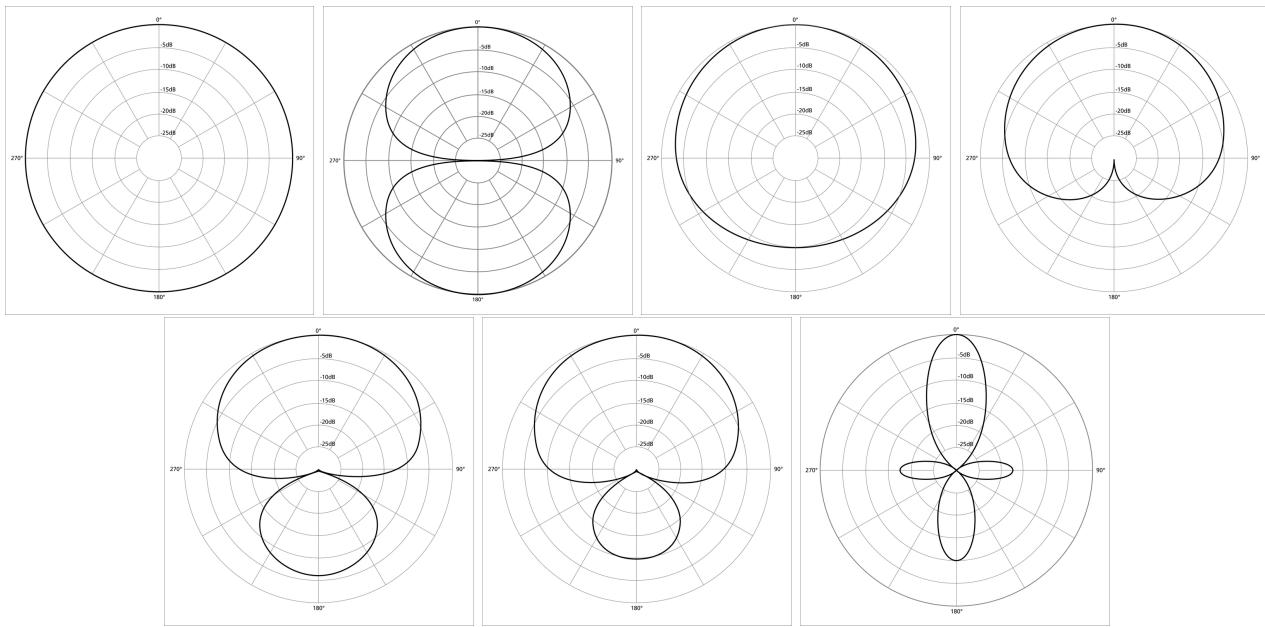
$$\Gamma(\theta) = \frac{T_\theta}{T_0}. \quad (8.3)$$

На графиците овој однос вообичаено се исцртува во dB.

Постојат различни типови на криви на насоченост кај микрофоните илустрирани на Сл. 8.3. Во праксата најчесто се среќаваат омнидирекционалната, кардиоидата и осмицата. Супердирекционалната карактеристика пак, се употребува за прислушување на разговори на големи растојанија. Поквалитетните микрофони вообичаено нудат можност корисникот сам да ја избере карактеристиката која му е потребна.

Кривата на насоченост зависи и од фреквенцијата на звукот. Имено микрофоните секогаш се повеќе насочени за повисоките фреквенции, а помалку за пониските. На Сл. 8.4 е прикажана промената на обликот на кардиоидата на Neumann U87 за различни фреквенции на звукот. Може да се види дека за пониските фреквенции карактеристиката преминува во омнидирекционална,

⁶³Galak76, "Polar pattern omnidirectional", "Polar pattern figure eight", "Polar pattern subcardioid", "Polar pattern cardioid", "Polar pattern hypercardioid", "Polar pattern supercardioid", "Polar pattern directional", <https://en.wikipedia.org/wiki/Microphone>.



Слика 8.3: Различни криви на насоченост на микрофоните (од горе надолу, од лево надесно): омнидирекционална, бидирекционална (осмица), субкардиоида, кардиоида, хиперкардиоида, суперкардиоида и супердирекционална.⁶³

додека за повисоките преминува во осмица. Ова доаѓа од релативните димензии на мемраната во однос на брановата должина на звукот.

Ако градбата на микрофонот е симетрична, тогаш кривите на насоченост се исти за сите рамнини кои поминуваат низ нормалната оска на мемраната.

Слично како кај насоченоста на изворите на звук, за описување на насоченоста на микрофонот со една вредност се користи факторот на насоченост на микрофонот γ_m кој се пресметува како:

$$\gamma_m = \frac{4\pi}{\int_0^{4\pi} \Gamma^2 d\Omega} = \frac{4\pi}{\Omega_m}, \quad (8.4)$$

каде Ω_m е **ефективниот просторен агол** на микрофонот. Тоа е всушност аголот за кој неговата осетливост треба да е еднаква на осетливоста на неговата нормална оска T_0 , а надвор од кој таа треба да е 0, за да го има истиот фактор на насоченост. Факторот на насоченост може да биде даден и во dB при што за референтна насоченост се зема онаа на омнидирекционалниот микрофон $\gamma_m = 1$, па имаме:

$$\gamma_m [\text{dB}] = 10 \log \gamma_m. \quad (8.5)$$

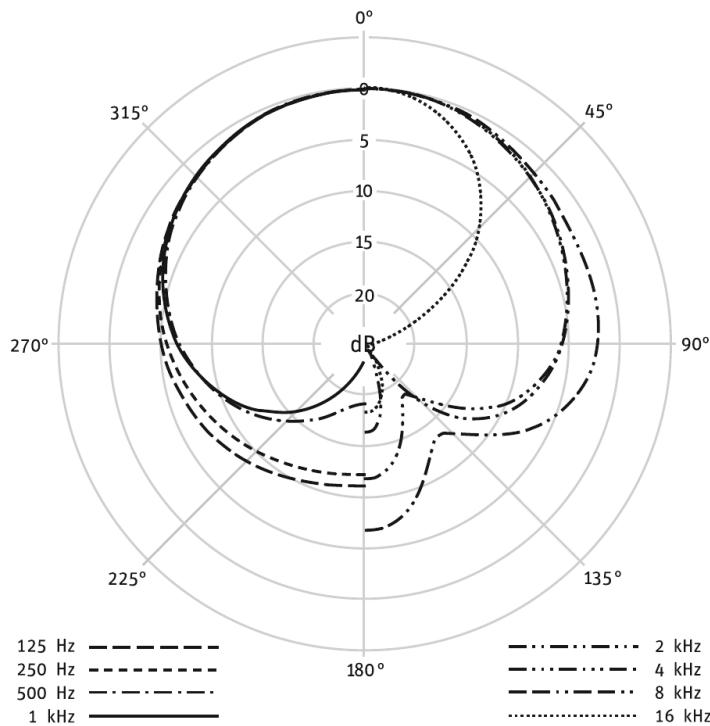
Динамички опсег

Динамичкиот опсег на микрофонот е одреден од најсилниот и најтвркиот звук којшто тој може да го регистрира без шум и изобличувања. Од долу тој е ограничен од нивото на шум кое се јавува на излезот од микрофонот. Овој бел шум постои секогаш и е резултат на шумот на внатрешната отпорност на микрофонот. Тој, како и во електротехниката, може да се одреди со:

$$u_n = \sqrt{1,64 \cdot 10^{-20} R \Delta f}, \quad (8.6)$$

каде R е внатрешната реална, но и реактивна отпорност на микрофонот, а Δf е неговиот фреквенциски опсег. Освен микрофоните кои се направени со специјална намена за снимање на многу тивки звуци, ни најдобрите студиски микрофони немаат ниво на шум толку ниско за тие да имаат осетливост како онаа на човековото уво, т.е. 0 dB. Исклучок на ова претставува

⁶⁴Превземено од http://www.neumann.com/download.php?download=copi0173_U87Ai_068820-A11_10-2014.pdf



Слика 8.4: Крива на насоченост – кардиоида на Neumann U87 за различни фреквенции.⁶⁴

микрофонот Brüel & Kjaer 4179 кој има ниво на шум од околу 0 dB SPL. Сепак, и покрај ненултото ниво на шум, вообичаено шумот кај квалитетните микрофони е под оној од останатите уреди во електроакустичкиот ланец.

Од горе динамичкиот опсег е ограничен од максималниот звучен притисок за кој [вкупните хармониски изобличувања](#), односно Total Harmonic Distortion (THD), на сигналот на излез од микрофонот се под даден процент. Вообичаено се зема вредност од 0,5% која увото не може да ја чуе.

Од Табелата 8.1 за Neumann U87 може да прочитаме дека за кардиоида нивото на шум е 23 dB, а максималниот звук кој може да се регистрира при THD од 0,5% е 117 dB. Од тута следува дека динамичкиот опсег на овој микрофон изнесува 94 dB, како што и е дадено во табелата.

Импеданса

Импедансата на микрофоните е важен податок за нивното приклучување на некој засилувач, аудиолинија, односно проводник. Притоа, вообичаениот пристап на прилагодување на импедансите тука не важи. Имено, како што е познато за пренос на максимална моќност, потребно е влезната импеданса на засилувачот, односно водот, да биде еднаква на излезната импеданса на микрофонот. Проблемот со овој пристап, е тоа што кај микрофоните постои изразена реактивна компонента во импедансата, па нејзината апсолутна вредност се менува со фреквенцијата. Во случај на прилагодување на импедансите, оваа промена ќе се предизвика варијација на излезниот напон на микрофонот. За да се избегне ова, се зема влезната импеданса на засилувачот да е што поголема (барем еден ред на големина) во однос на излезната импеданса на микрофонот. На тој начин, нејзините варијации нема да дојдат до израз.

8.3 Поделба на микрофоните

Типовите на микрофони можат да се поделат од две аспекти:

1. **Акустичка поделба.** Според величината на звучното поле од која непосредно зависи силата која влијае на мембраната тие се делат на:

- **притисочни** – кај кои поместувањето или брзината на мемраната зависат од звучниот притисок,
- **градиентни** – кај кои тие се сразмерни на градиентот на притисокот, и
- **комбинирани** – кај кои влијаат и вредноста на притисокот и неговиот градиент.

Од оваа поделба зависи карактеристиката на насоченост на микрофонот. Притисочните микрофони се ненасочени, градиентните имаат крива во облик на осмица, а последните кардиоида.

2. **Електрична поделба.** Според начинот на кој добиените вибрации на мемраната се претвораат во електрични осцилации тие се делат на:

- **контактни** – кај кои се менува отпорноста поради менување на контактот на јаглеродните зрна,
- **електромагнетни** – кај кои се менува напонот поради промените на магнетниот флукс предизвикани од движењето на мемраната направена од феромагнетен материјал,
- **електродинамички** – кај кои се генерира струја поради движење на проводник во магнетно поле и
- **електростатички** – кај кои се генерира струја поради промените на капацитивноста.
- **пиезоелектрични** – кај кои се генерира напон поради деформирање на вградениот кристал.

Од овие пет најраспространети се електростатичките и електродинамичките микрофони.

Поглавје 9

Звучници

во соработка со Владимир Филевски⁶⁵

Звучниците се електроакустички преобразувачи со спротивната задача од микрофоните – да ги преобразат електричните осцилации во акустички. Со нив секојдневно се среќаваме бидејќи тие претставуваат последната, а и најкритичната алка во секој електроакустички ланец. Како и микрофоните, звучниците содржат мембрана со која ги генерираат звучните бранови. Уште повеќе, поради еднаквоста на принципот на работа, секој звучник може да се употреби како микрофон и обратно. Сепак, за разлика од микрофоните, мембраната кај звучниците е многу поголема затоа што таа треба со својата моќност на зрачење да ги замени звучните извори, кои некогаш можат да бидат и цел филхармониски оркестар.

9.1 Основни карактеристики на звучниците

Основните електроакустички карактеристики кај звучниците во голема мера се поклопуваат со оние на микрофоните:

- фактор на преобразба,
- фреквенциска карактеристика,
- крива на насоченост,
- факторот на насоченост,
- импеданса,
- ефикасност,
- степен на искористување,
- номинална моќност и
- фактор на изобличување.

Карактеристиките на мониторскиот звучник Генелек⁶⁶ 8040B прикажан на Сл. 9.1, се дадени во

⁶⁵Дипл. инж. Владимир Филевски дипломирал на Електротехничкиот факултет (денешен ФЕИТ) во Скопје, насока електроника и телекомуникации. Член е на IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) и AES (Audio Engineering Society). Во 2007 год. ја оформува фирмата Аудио Експерт која се занимава исклучиво со аудиотехника. Тој е Генерален секретар на Националната асоцијација на пронаоѓачите на Македонија. Има патентирано 6 свои пронајдоци и е добитник на Сребрен медал за патентот „Мултимедија звучник“ на ЕУРЕКА 2004 – Светска изложба на патенти во Брисел, 2004 год и Златен медал за патентот „Засилувач за 50/60 Hz“ на ИЕНА 2010 – Меѓународна изложба на патенти во Нирнберг, 2010 год. За истиот патент е награден со признанието „Патент на годината“ што го доделува Државниот завод за заштита на индустриска сопственост на Македонија. Има објавено повеќе научни трудови од областа звучници во реномирани научни списанија и на низа меѓународни конференции.

⁶⁶Genelec



Слика 9.1: Мониторски звучник Генелек 8040B.⁶⁷

Табела 9.1.

Табела 9.1: Технички карактеристики на звучникот Генелек 8040B дадени од производителот.

Lower cut-off frequency, -3 dB	≤ 45 Hz
Upper cut-off frequency, -3 dB	≥ 20 kHz
Free field frequency response of system (± 2.0 dB)	48 Hz – 20 kHz
Maximum short term sine wave acoustic output on axis in half space, averaged from 100 Hz to 3 kHz	≥ 105 dB SPL @ 1 m ≥ 111 dB SPL @ 0.5 m
Maximum long term RMS acoustic output in same conditions with IEC weighted noise (limited by driver unit protection circuit)	≥ 99 dB SPL @ 1 m
Maximum peak acoustic output per pair above console top, @ 1 m from the listening position with music material	≥ 115 dB SPL
Self generated noise level in free field @ 1m on axis (A-weighted)	≤ 10 dB
Harmonic distortion at 90 dB SPL @ 1m on axis	< 2% (50 – 100 Hz) < 0.5% (> 100 Hz)
Drivers – Bass cone	165 mm (6 ¹ / ₂ ")
Drivers – Treble metal dome	19 mm (3/4")
Crossover frequency, Bass/Treble	3.0 kHz
Weight	8.6 kg (18.9 lbs)
Height	350 mm (13 13/16")
Width	237 mm (9 3/8")
Depth	223 mm (8 13/16")

Факторот на преобразба T го означува односот помеѓу излезната акустичка величина, најчесто звучниот притисок p , и влезната електрична величина, најчесто напонот u , кој вообичаено е константен на излез од засилувачите:

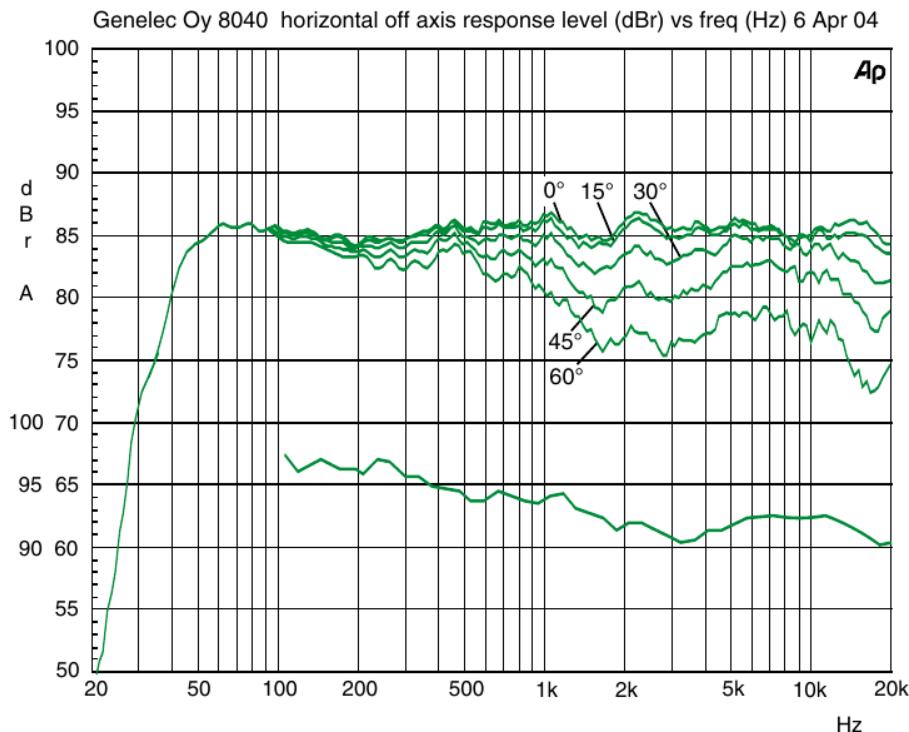
$$T = \frac{p}{u}. \quad (9.1)$$

Тука притисокот се дава вообичаено на 1 м растојание во правец на оската на звучникот. Слично како кај микрофоните, факторот на преобразба може да биде даден и во dB, т.н. индекс на преобразба:

$$T[\text{dB}] = 20 \log \frac{p}{u}, \quad (9.2)$$

при што како референтна осетливост се зема 1 Pa/V .

⁶⁷Превземено од <http://www.genelec.com/studio-monitors/8000-series-studio-monitors/8040b-studio-monitor>



Слика 9.2: Фреквенциска карактеристика и крива на насоченост на мониторскиот звучник Genelec 8040B.⁶⁸

Фреквенциска карактеристика и крива на насоченост

Фреквенциската карактеристика и кривата на насоченост на звучникот ги даваат еквивалентните карактеристики разгледани кај микрофоните. Имено и тука важи:

$$\Gamma(\theta) = \frac{T_\theta}{T_0} = \frac{p_\theta}{p_0}. \quad (9.3)$$

За Генелек мониторските звучници, производителот ги дал овие карактеристики здружено на еден графикон прикажан на Сл. 9.2. Може да видиме дека за ниските фреквенции звучникот има омнидиреционална крива на насоченост, додека за високите таа станува се понасочена со порастот на фреквенцијата. Исто така може да забележиме дека во оската на зрачење звучникот има исклучително рамна фреквенциска карактеристика, што е неопходно за мониторските звучници кои се користат за преслушување на аудиосигналите за време на снимањето но и по него при нивната продукција во студиото.

Ефикасност, степен на искористување и номинална моќност

Ефикасноста на звучникот е дефинирана како односот на звучниот притисок на 1 m во насока на оската во слободно поле и квадратниот корен од привидната електрична моќност:

$$e = \frac{p}{P} \quad (9.4)$$

и се мери во единици P_a/\sqrt{W} . Со други зборови ефикасноста ја дава вредноста на звучниот притисок на 1 m за дадена влезна електрична моќност. Со помош на овој податок можеме да го пресметаме максималниот звучен притисок кој може да го даде еден звучник користејќи ја неговата номинална, т.е. максимална, електрична моќност.

Степенот на искористување го дава односот помеѓу излезната акустичка моќност и влезната електрична моќност:

$$\eta = \frac{P_a}{P}. \quad (9.5)$$

⁶⁸Превземено од <http://www.genelec.com/studio-monitors/8000-series-studio-monitors/8040b-studio-monitor>

Тој е особено важен при употреба на звучниците за озвучување на затворени простории, додека за озвучување на отворен простор поважни се ефикасноста и кривата на насоченост. Степенот на искористување може да се пресмета од ефикасноста и вообичаено е од редот на 1%.

Номиналната моќност на звучникот која ја дава производителот е електричната моќност која не смее да се надмине за дадените карактеристики на звучникот да не бидат нарушени. Некогаш се специфицира и т.н. **границна моќност**, над која производителот не гарантира дека нема да дојде до оштетување на звучникот. Кај професионалните звучници номиналната моќност се дава во W RMS (Root Mean Square) или т.н. синусна моќност, додека кај ефтините звучници за општа потрошувачка оваа моќност вообичаено се дава во W PMPO (Peak Music Power Output). Тоа претставува маркетингшки трик за вештачко прикажување на огромни моќности. Така, може лесно да се најдат малечки компјутерски звучници со моќност од 200 W (PMPO), иако вистинската (RMS) моќност им е од редот на 2 W. Од друга страна, бидејќи при реална употреба звучниците нема да емитуваат чист синусен тон со постојана амплитуда, а тие се толерантни на краткотрајни пречекорувања на номиналната моќност, професионалните компании уште специфицираат и т.н. музичка моќност.

Различните начини на мерење на електричната моќност може индиректно да се видат во Табелата 9.1. Така, производителот специфицирал максимален притисок во dB SPL за: *i*) краткотрајна синусна побуда (105 dB SPL), *ii*) долготраен RMS излез (99 dB SPL) и *iii*) музичка побуда на пар звучници, односно при вообичаено поставување и користење (115 dB SPL). Во случајов се дадени директно звучните притисоци поради тоа што се работи за **активна звучна кутија**, која се разликува од **пасивната** звучна кутија поради тоа што содржи вградено засилување на аудиосигналот.

Импеданса

Импедансата на звучниците е реактивна, што значи променлива со фреквенцијата, како што е прикажано на Сл. 9.3. На графиконот може да видиме дека звучникот има резонантна фреквенција од 40 Hz, за која се јавува врв во импедансата. Оваа фреквенија е важна за конструкција на звучничката кутија. Уште повеќе, ако се земе дека во една повеќесистемска звучна кутија имаме повеќе звучници врзани на свртница, која и самата содржи реактивни компоненти, пресметувањето на влезната импеданса станува уште посложно. Поради тоа, производителот специфицира номинална импеданса Z_{nom} на звучникот која треба со една вредност да ја опише неговата импедансата за целото фреквенциско работно подрачје. Вообичаено, Z_{nom} е стандардизирана на 4, 6, 8 и 16 Ω, при што треба да е задоволено:

$$Z_{min} > 0,8 Z_{nom}, \quad (9.6)$$

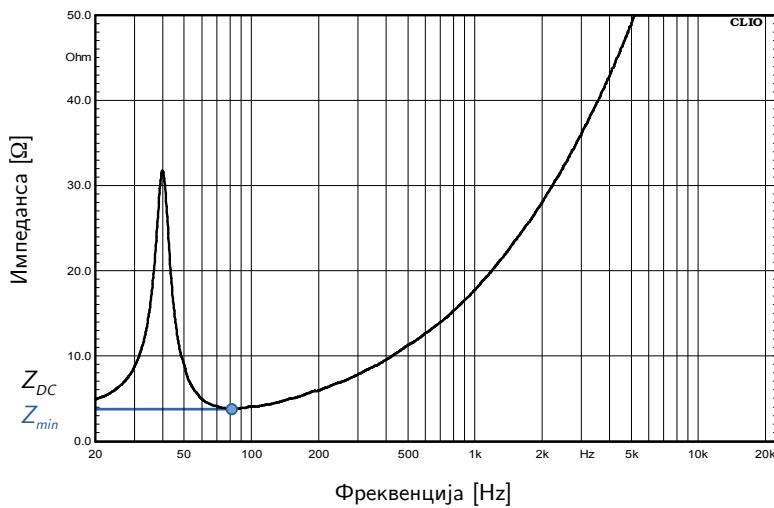
каде Z_{min} е минималната вредност на импедансата, која вообичаено се јавува веднаш над резонантната фреквенција на звучникот.

Вредноста на Z_{nom} е важна за нивно правилно приклучување на излезот од аудиозасилувачите. Имено ако се поврзе звучник со помала импеданса од онаа за која е димензиониран засилувачот, тогаш тој ќе повлече повеќе струја, што може да предизвика нарушување на перформансите на засилувачот, па и да доведе до оштетувања.

Хармониски изобличувања

Хармониските изобличувања кои кај микрофоните беа занемарливи, се една од најважните карактеристики на звучниците, поради тоа што тие често се користат со максимални излезни моќности. Еден од изворите на овие изобличувања се нарушувањата во крутоста на мем branата односно нејзино деформирање. Тие се мерат во % THD⁶⁹ при побуда на звучникот со синусен

⁶⁹анг. *Total Harmonic Distortion*.



Слика 9.3: Пример за зависноста на импедансата на еден звучник во слободно поле, т.е. надвор од кутија, од фреквенцијата.

тон според:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N A_i^2}}{A_1}, \quad (9.7)$$

каде A_1 е амплитудата на звучниот притисок кој одговара на фреквенцијата на синусниот тон, додека A_i се амплитудите на генерираните N виши хармоници поради изобличувањата внесени од звучникот. THD е мерка за нелинеарноста на звучникот.

Поделба на звучниците

Начинот на претворање на електричниот сигнал во акустички ја дава електрична поделба на звучниците. Таа речиси целосно соодветствува на поделбата на микрофоните. Така, разликуваме:

- електродинамички звучници – најголем број на звучниците,
- електромагнетни звучници,
- електростатски звучници,
- пиезоелектрични звучници – во употреба како високотонци, и
- јонски звучници – високотонци без тврда мембрана.

Акустичката поделба на звучниците зависи од конструктивното решение на звучничката единица (драјвер), но и од начинот на кој таа е вградена во звучната кутија⁷⁰. Така, според бројот на звучнички единици во кутијата, разликуваме:

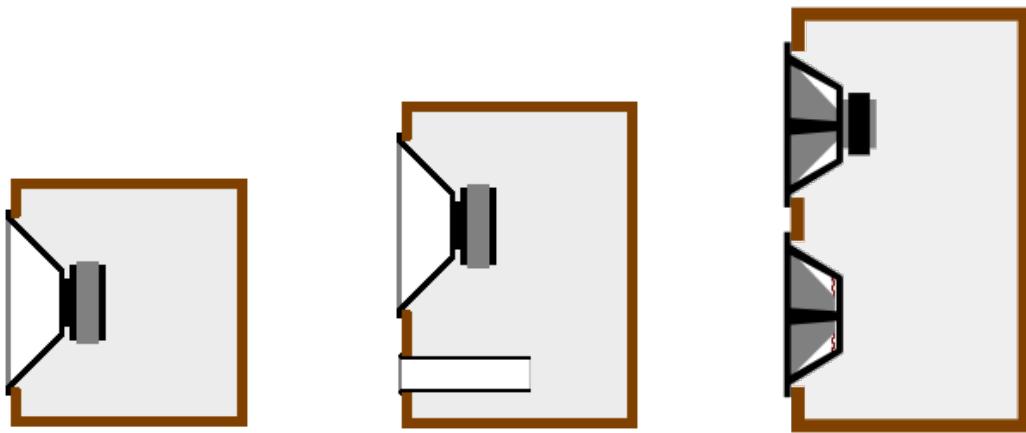
- едносистемски звучни кутии,
- двосистемски звучни кутии,
- трисистемски звучни кутии, односно
- повеќесистемски звучни кутии.

Од градбата на кутијата пак, разликуваме:

- компресиони звучни кутии,
- бас-рефлекс звучни кутии, односно звучни кутии со издув⁷¹,

⁷⁰Wikipedia: Loudspeaker enclosure, https://en.wikipedia.org/wiki/Loudspeaker_enclosure.

⁷¹Wikipedia: Bass reflex, https://en.wikipedia.org/wiki/Bass_reflex.



Слика 9.4: Примери за градба на звучни кутии: компресиона⁷³, бас-рефлекс⁷⁴, и звучна кутија со пасивна мембрана⁷⁵.

- звучни кутии со пасивна мембрана⁷², односно
- звучни кутии од повисок ред.

Примери на овие изведби се прикажани на Сл. 9.4.

⁷²Wikipedia: Passive radiator (speaker), [https://en.wikipedia.org/wiki/Passive_radiator_\(speaker\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Passive_radiator_(speaker)).

⁷³CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=52702>

⁷⁵CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=52694>

⁷⁵By Passive_radiator_enclosure.gif: Maksimderivative work: Malyszkz (talk) - Passive_radiator_enclosure.gif, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15034223>

Поглавје 10

Студиска аудиотехника

Слободан Таневски⁷⁶

Студиската аудиотехника е посебен сегмент од аудиотехниката задолжен за засилување, обработка и снимање на звукот, главно во аудио и ТВ-студијата, но и на јавни манифестации или на терен. Во ова поглавје ќе бидат претставени Се одликува со многу висок квалитет и доверливост.

10.1 Предзасилувачи

Предзасилувачи⁷⁷ се нарекуваат и засилувачи на мали сигнали бидејќи нивната основна функција е да обезбеди првично засилување на слаби аудиосигнали до линиско ниво⁷⁸. Притоа тие треба да внесат минимални изобличувања и шум во аудиосигналот. Линиското ниво е дефинирано во опсег од 0,1 V до 2 V. Во професионалната аудиотехника тоа изнесува +4 dBu = 1,23 V, а во полупрофессионалната аудиотехника е -10 dBV = 316 mV. Освен засилувањето, предзасилувачите обезбедуваат напонско приспособување на импедансите, а можат да извршат и корекција на амплитудната фреквенциска карактеристика.

Разликуваме различни видови предзасилувачи според активниот елемент на кој се базирани, и тоа предзасилувачи базирани на:

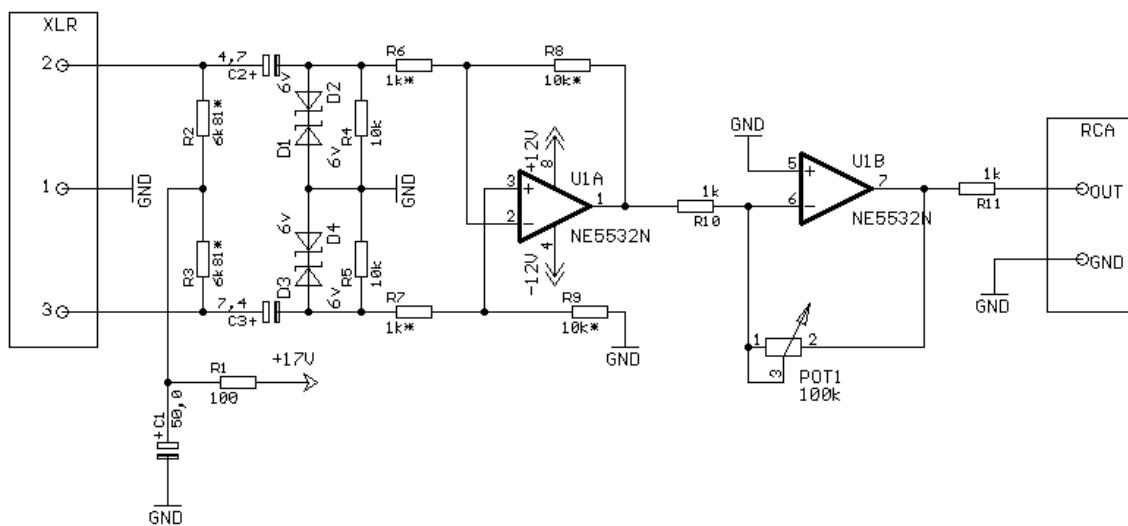
- интегрирани кола – операцијски засилувачи – најчесто користени предзасилувачи во последните 30 години заради едноставната конструкција и високиот квалитет,
- транзистори – денес во професионалната аудиотехника се користат ретко, а почесто се застапени во комерцијалната аудиотехника и други сфери од електрониката,
- електронски ламби – денес се користат ретко но се употребуваат заради специфичната боја на звукот која се должи на хармониските изобличувања кои ги внесуваат (види подолу), и
- хибридни – комбинација од претходните типови.

Според намената пак, разликуваме:

⁷⁶Слободан Таневски е дипл. инж. по електроника и телекомуникации. Работел како професор во средните електротехнички училишта „Орце Николов“, „Михајло Пупин“ и „Илинден“. Бил основач, технички раководител и главен уредник на првото независно радио во Македонија, Младинското радио „Клуб 100“ при УСО „Орце Николов“ (1987-1991), како и тонски снимател и продуцент во сопственото тонско студио Avalon Soundfix (1992-2001). Во 1995 год. го основа списанието за наука и техника „Емитер“, чиј главен уредник е до денес. Од 2007 год. е стручен соработник / предавач на Универзитетот за аудиовизуелни уметности ЕФТА, за предметите „Акустика и аудиотехника“ и „Филмска и ТВ-техника“. Поглавјето е адаптирано од предавањата на предметот „Акустика и аудиотехника“. Автор е на повеќе стручни и научно-популарни статии, како и на повеќе проекти од областа на електрониката и акустиката.

⁷⁷анг. *preamplifiers, preamps*.

⁷⁸анг. *line level*.



Слика 10.1: Типична електрична шема на предзасилувач со операцијски засилувачи.

- **микрофонски** – треба да го засилат слабиот сигнал од микрофонот кој вообичаено се движки во опсегот $0,1 - 10 \text{ mV/Pa}$, па затоа треба да имаат променливо засилување од 40 до 80 dB , линеарна фреквенциска карактеристика и влезна отпорност од околу $2 \text{ k}\Omega$. Заради малите влезни сигнали и големото засилување најосетливи се на појава на шум, па мора да бидат изработени од компоненти кои создаваат малку шум,
 - **гитарски** – електричната гитара има $v_o = 1 - 100 \text{ mV}$ и $R_o = 5 - 500 \text{ k}\Omega$ па овој предзасилувач треба да има $R_i = 1 \text{ M}\Omega$ и променливо засилување од околу 20 до 60 dB , придружен со контрола на бојата на тонот – нелинеарна фреквенциска карактеристика.
 - **грамофонски** – магнетната грамофонска глава има $v_o = 1 - 10 \text{ mV}$ и $R_o < 5 \text{ k}\Omega$ па предзасилувачот треба да има засилување околу 60 dB и $R_i = 47 \text{ k}\Omega$, со нелинеарна фреквенциска карактеристика која ги засилува басовите и ослабува високите фреквенции според RIAA стандардот⁷⁹,
 - **линиски** – изворите на линиски сигнал, на пр. електричните музички инструменти, ЦД/ДВД плеери, компјутер и сл., имаат $v_o = 0,1 - 2 \text{ V}$, $R_o < 5 \text{ k}\Omega$, па предзасилувачот треба да има мало засилување од околу 0 dB , влезна отпорност $R_i = 10 - 47 \text{ k}\Omega$ и рамна фреквенциска карактеристика.

Предзасилувач со операциски засилувачи

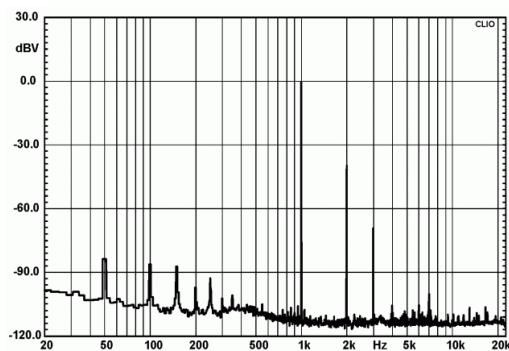
Една типична шема за предзасилувач со интегрирани кола, во случајов операциски засилувачи, е дадена на Сл. 10.1. Ова е микрофонски предзасилувач со балансиран (симетричен) влез со XLR конектор, а излезот е несиметричен со RCA конектор. Првиот степен е диференцијален засилувач со засилување од 10 пати (R_8/R_6), а вториот степен е инвертирачки засилувач со засилување од 1 до 100 пати (се нагодува со POT1). Со тоа вкупното засилување може да се нагодува од 10 до 1000 пати, т.е. од 20 до 60dB. R_4 и R_5 ја одредуваат влезната отпорност, а преку R_1 , R_2 и R_3 се обезбедува DC напон од 17 V за „фантомско напојување“ на кондензаторски микрофони. Зенер диодите служат за заштита од преголем влезен сигнал.

Предзасилувач со ламби

На Сл. 10.2 е даден предзасилувач со електронски ламби и неговата преносна карактеристика.⁸⁰ Предзасилувачот има засилување од 0 до 7,5 пати, фреквенциски опсег 20 Hz – 20 kHz и однос

⁷⁹ Wikipedia: RIAA equalization https://en.wikipedia.org/wiki/RIAA_equalization

⁸⁰ Предзасилувачот е изработен според проектот за самоградба на аноден предзасилувач со ламба во научнопопуларното списание Емитер бр. 11/2010.



Слика 10.2: Изглед и преносна карактеристика на предзасилувач со електронски ламби.

сигнал-шум > 100 dB. Сепак можеме да видиме дека при синусна побуда од 1 kHz и излезен напон од 1 V, предзасилувачот внесува изразени хармониски изобличувања, при што најизразен е вториот хармоник на 2 kHz, а во помала мера и третиот хармоник на 3 kHz. Останатите хармоници не се значајно изразени. Изобличувањата кои тие ги внесуваат изразени во THD за секој од хармониците се $A_2 = 1\%$ и $A_3 = 0,04\%$ ($A_2 = 1,5\%$ и $A_3 = 0,07\%$ за $v_o = 2V$).

10.2 Засилувачи на моќност

Аудиозасилувачот на моќност е последниот засилувач во секој тонски ланец па затоа се нарекува и излезен засилувач.⁸¹ Тој има задача да го засили аудиосигналот на ниво кое е доволно за побуда на звучникот со цел да еmitува звук со соодветно ниво. Односно, засилувачот на моќност врши конверзија на аудиосигналот од средно ниво и средна импеданса – околу 1 V и десетици k Ω , во високо ниво и ниска импеданса – десетици V и m Ω , погодни за побуда на звучниците кои самите имаат мала импеданса – 4 или 8 Ω . Уште повеќе, поради малата ефикасност на звучниците за конверзија на електричната енергија во звучна, излезниот засилувач треба да биде во можност да даде големи струи и моќности.

Потребната излезна моќност зависи од намената, а опсезите во кои таа се движи се:

- 10 mW – 500 mW кај засилувачи за слушалки,
- 0,1 W – 10 W кај мали преносни уреди,
- 10 W – 100 W кај засилувачи за домашна и студиска употреба, и
- 100 W – 2000 W кај засилувачи за озвучување на големи простори.

Покрај основната задача да обезбеди соодветно засилување и моќност на аудиосигналот за побуда на звучниците, излезниот аудиозасилувач треба да обезбеди напонско приспособување од предзасилувачот или изворот на аудиосигнал – да има R_i од редот на десетици k Ω , да обезбеди напонско приспособување кон звучникот – да има R_o од редот на m Ω , како и да обезбеди рамна преносна карактеристика со минимални изобличувања и шум.

Како и кај предзасилувачите и тука разликуваме засилувачи со:

- **полупроводници**⁸² – овие се делат на засилувачи со:
 - **дискретна техника**⁸³, односно транзисторски засилувачи – можат да бидат со биполарни транзистори (BJT), со униполарни транзистори (FET и MOSFET) или со биполарни транзистори со изолиран гејт (IGBT),
 - **интегрирани кола** (ИК), и

⁸¹анг. *power* или *output amplifier*.

⁸²анг. *semiconductor* или *solid state amplifiers*.

⁸³анг. *discrete amplifiers*.



Слика 10.3: Аудиозасилувач XA160.5 на Passlabs во класа A (лево) и M1 на Anthem во класа D (десно).

- **хиbridni poluprovodнички засилувачи** – комбинација на ИК и транзистори во кои вообичаено побудниот степен е со ИК, а излезниот со транзистори,
- вакуумски електронски цевки⁸⁴, и
- **хиbridни засилувачи** – комбинација на електронски цевки и полупроводници.

Класи на аудиозасилувачи на моќност

Во зависност од тоа колку време во текот на една периода на влезен синусен сигнал спроведува активниот елемент, аудиозасилувачите се поделени во следните класи:

- **Клас А** – активниот елемент спроведува 100% од периодата,
- **Класа В** – активниот елемент спроведува 50% од периодата, па потребни се најмалку два елеменети за да се пренесе и засили целиот сигнал,
- **Класа АВ** – преодна класа помеѓу класите А и В каде активниот елемент спроведува повеќе од 50% од периодата, повторно се потребни најмалку два елеменети за да се пренесе и засили целиот сигнал,
- **Класа D** – сигналот се дигитализира со импулсно-ширинска модулација (ИШМ) во низа на правоаголни импулси со променлива ширина, а активниот елемент работи во прекинувачки режим,
- **Класи G и H** – кои се подобрување на класите В и АВ во поглед на ефикасноста; користат два или повеќе напони за напојување така што при мал влезен сигнал засилувачот се напојува со мал напон и спротивно, при голем влезен сигнал со голем напон.

Во поглед на ефикасноста, на која е обратно пропорционална топлинската диспација, најефикасни се засилувачите во класа D (до 95%), па В, G и H (до 70%), по кои следат АВ (до 60%) и на крајот А (до 40%). Соодветно, по овој редослед аудиозасилувачите се подредени по цена и тежина од најниска за класа D до највисока за класа А. На пример, засилувачите на Сл. 10.3, двата за едноканален аудиосигнал, на излез даваат 160 W при потрошувачка од 600 W (класа А) наспроти 2700 W (класа D), а притоа тежините им се 60 kg наспроти 9 kg.

10.3 Аудиопроцесори

Аудиопроцесор⁸⁵ е уред за обработка на аудиосигналот за промена на некои негови временски или спектрални карактеристики, како што се временски доцнења, модулирање на амплитудата, филтрирање на спектарот итн. Тие се делат на: временски, амплитудни и спектрални аудиопроцесори.⁸⁶

⁸⁴анг. *vacuum tube* или *valve amplifiers*.

⁸⁵анг. *sound processor*.

⁸⁶Повеќе за алгоритмите за процесирање на аудиосигналите и аудиоэффектите може да прочитате во скриптата од

Временски аудиопроцесори

Временските аудиопроцесори се уреди кои го обработуваат аудиосигналот во временски домен. Најзначајни претставници се уредите за вештачка реверберација (ревербератори) и уредите за доцнење и ехо. Во оваа категорија спаѓаат и уредите за специјални временски ефекти: хор, фазирање и фленџерот.⁸⁷

Ревербератори Реверберацијата на звукот му дава просторност, длабочина, поголема гласност, побогата боја, што посебно доаѓа до израз кај акустички добро дизајнираните простории, на пр. концертна сала. Но многу често не можеме да имаме вакви идеални услови при снимање и репродукција на звук. Снимање вообичаено се врши во мала просторија – студио, со голема апсорција и мала природна реверберација. И кога се снима во големи простории, микрофоните се поставуваат близу до акустичките инструменти и вокалите, па во снимката доминира директниот звук, а природната реверберација на просторијата е потисната. Од друга страна, електричните и електронските инструменти, на пр. електрична гитара и синтисајзерот, често пати директно се врзуваат електрично со аудиосистемот. Конечно, репродукцијата на звукот најчесто се одвива во соби со мали димензии и висока апсорција, па и мала природна реверберација. Сите претходно наведени причини налагаат додавање на вештачка реверберација (а по потреба и ехо) со цел снимениот и репродуциран звук да добие соодветна просторност и звучен карактер.

Првите ревербератори биле акустичко-механички. Се употребувале специјали реверберациски простории со мал просечен коефициент на апсорција, акустички линии за доцнење, ревербератори со пружина, реверберациски плочи, магнетофонски системи итн. Во поново време ревербераторите се исклучиво дигитални електронски уреди. Аналогните ревербератори од 1970те како линија за доцнење користеле склоп за пренос на полнежот⁸⁸, но денес се користат ретко, главно од гитаристи. Од 1980те доминира употребата на дигиталните уреди за вештачка реверберација и ехо, како хардверски уреди, така и софтверски апликации во последните 2 децении.

Спектрални аудиопроцесори

Тоа се уреди (или компјутерски програми) кои го обработуваат аудиосигналот во фреквенциски домен, односно ја менуваат јачината на некои од компонентите во спектарот на аудиосигналот. Тоа значи дека преносната карактеристика на спектралните аудиопроцесори може да се нагодува според потребите. Процесот на нејзиното обликување се нарекува **еквализација** според првичната намена – израмнување односно изедначување на вкупната преносна карактеристика. Сепак денес, најчесто станува збор за изобличување на вкупната преносна карактеристика. Според видот на елементите разликуваме: пасивни и активни, според принципот на работа: аналогни и дигитални, а според нагодувањето: графички и параметарски.

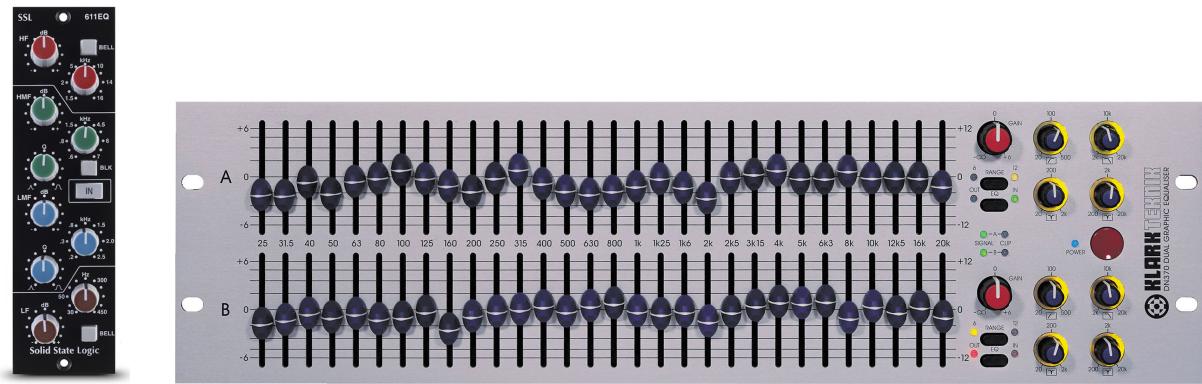
Основни склопови во еквализаторите се електричните **филтри**, во чиј состав влегуваат капацитивности и индуктивности. Филтрите, сочинети само од пасивни елементи можат само да ја намалат амплитудата на компонентите на сигналот во некој фреквенциски опсег, но не можат да ја зголемат. Доколку во филтрите има и активни елементи, тогаш тие можат да извршат и засилување на сигналите на одредени фреквенции. Според намената филтрите можат да бидат:

- **ниско пропусни** филтри (НП),
- **високо пропусни** филтри (ВП),
- **филтри пропусници на опсег** (ПО) и
- **филтри непропусници на опсег** (НО).

предметот Дигитални аудиосистеми <https://github.com/FEEIT-FreeCourseWare/Digital-Audio-Systems>

⁸⁷анг. соодветно *chorus*, *phaser*, и *flange*.

⁸⁸анг. *bucket brigade device* – *BBD* или *Charge Transfer Device* – *CTD*



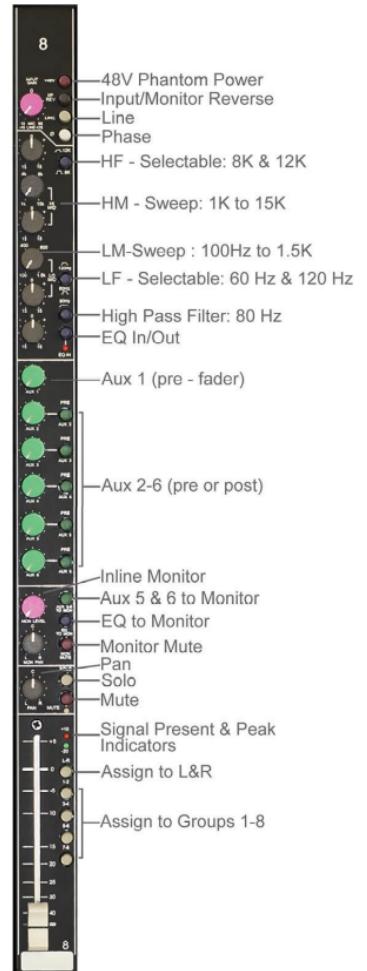
Слика 10.5: Параметарски еквализатор Solid State Logic 611EQ (лево) и графички еквализатор Klark Teknik DN370 (десно).

Најважни карактеристики на филтрите се: засилувањето во пропусниот опсег, слабеењето во непропусниот опсег, граничната фреквенција и стрмнината на преносната карактеристика во непропусниот опсег. ПО и НО филтрите имаат две гранични фреквенции; кај нив од значење е ширината на пропусниот опсег и централната фреквенција, со кои се дефинира *Q*-факторот. Филтрите НО со висок *Q*-фактор се нарекуваат и **ноч**⁸⁹ филтри. Според вредноста на стрмнината филтрите можат да бидат: од I ред (-6 dB/oct), II ред (-12 dB/oct), III ред (-18 dB/oct), IV ред (-24 dB/oct) итн.

Еквализаторите кои се среќаваат во потрошувачката аудиотехника најчесто содржат само два филтри – еден НП и еден ВП, кои се нарекуваат **бас** и **требл** филтри. Во професионалната аудиоопрема, на пр. аудиомиксерите, се вградени **параметарски еквализатори** прикажани на Сл. 10.5. Тие освен двата гранични филтри, вклучуваат уште 1 – 4 ПО/НО филтри за средните фреквенции, чии централни фреквенции и *Q*-фактор може да се нагодуваат.

Еквализаторите со повеќе филtri се изработуваат како засебни уреди и се нарекуваат **графички еквализатори**. Името им потекнува од тоа што положбата на нивните потенциометри приближно графички ја прикажуваат резултантната преносна карактеристика, Сл. 10.5. Потенциометрите вообичаено се лизгачки, а многу ретко вртливи. Секој од нив може да атенуира или да истакне одреден опсег фреквенции.

Графичкиот еквализатор е всушност банка на филтри ПО со ист *Q*-фактор. Централните фреквенции на филтрите се распоредени рамномерно на логаритамската скала на фреквенцијата. При распределбата, вообичаено се употребуваат музичките интервали – октави или терци. Така стандардизираните централни фреквенции за октавни опсези се (во Hz): 31, 63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k и 16k. Централните фреквенции за терцните филtri пак се: 25, 31, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1k, 1,25k, 1,6k, 2k, 2,5k, 3,15k, 4k, 5k, 6,3k, 8k, 10k, 12,5k, 16k и 20k.



Слика 10.4: Влезните канали на студиската миксета TOFT ATB 32.

⁸⁹англ. *notch*.



Слика 10.6: Студиски миксер SSL Duality SE 6000 во режијата на музичкото студио M1 во Македонската Радио Телевизија.

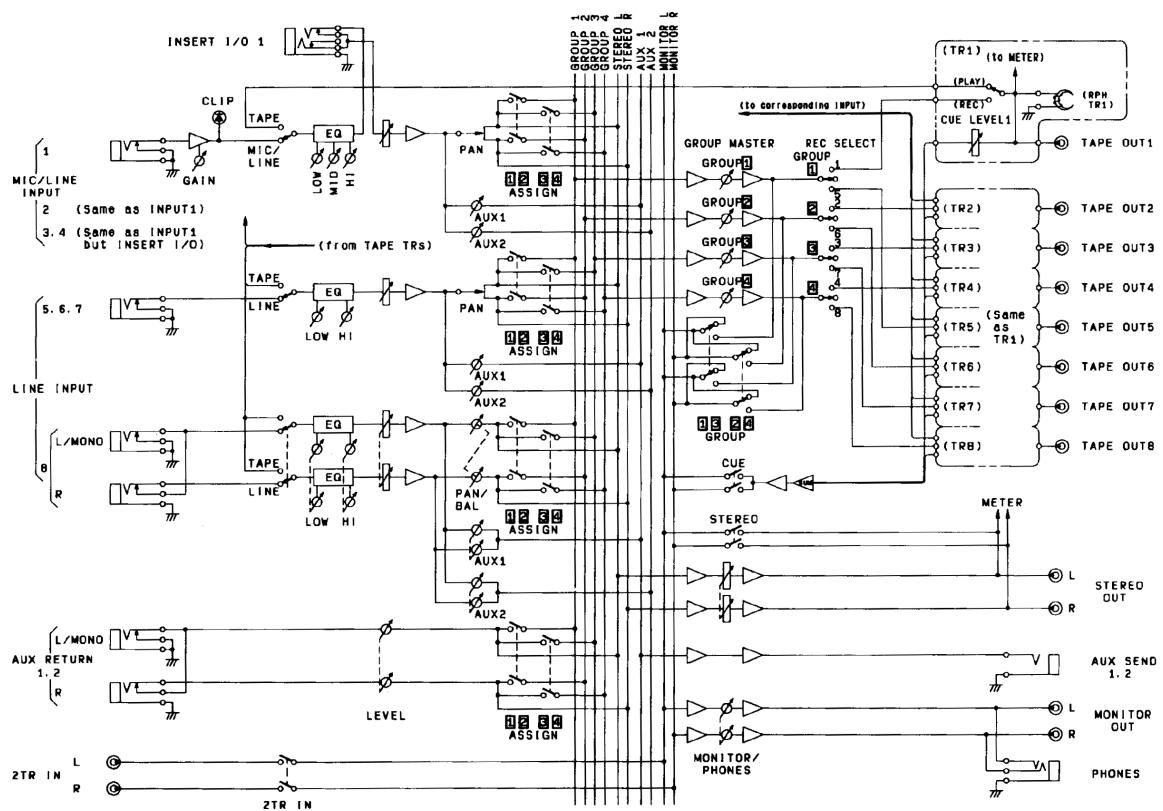
10.4 Аудиомиксери

Тонскиот **аудиомиксер**, уште наречен **миксета** или **миксер**, е електронски уред кој што служи за засилување, обработка и мешање на аудиосигнали добиени од различни извори. Според принципот на работа можат да бидат аналогни и дигитални, а според бројот на влезови, влезни канали, групи и мастер излези можни се најразлични комбинации, почнувајќи од најмалата миксета со 2 канали па се до концертни и студиски миксети со по 48 канали и повеќе со мноштво контролни копчиња на секој канал, [Сл. 10.6](#). Според намената разликуваме:

- **DJ** миксета,
- **радио миксер**⁹⁰ – за еmitување на програма во живо,
- миксер за озвучување на **живи настани** – концерти, театарски претстави, конференции и др.,
- **продукциски** или **студиски** миксери – за повеќеканално снимање и креирање на музички снимки, радииски емисии, како и звук за филм и телевизија.

Пример за електрична шема на еден мал миксер е дадена на [Сл. 10.7](#). На [Сл. 10.4](#) пак, е даден описот на сегментите на еден влезен канал на студиска миксета.

⁹⁰анг. *broadcast mixer*.



Слика 10.7: Блок-схема на мал аудиомиксер.

Додаток А

Слободен и отворен софтвер за инженерска и научна работа

Еден од најпрочуените софтверски пакети за нумериичка обработка е програмскиот пакет [Матлаб⁹¹](#). Матлаб, преку својата синтакса на високо ниво дозволува: лесна манипулација на матрици, исцртување на функции и податоци, имплементација на алгоритми, создавање на кориснички интерфејси, итн. Тој може да се употреби во најразлични области од инженерската практика, меѓу кои и во дигиталната обработка на звук, слика и видео. За првпат бил издаден во 1984 г., а во 2004 г. имал 1 милион корисници инженери, научници и економисти.

Сепак Матлаб, како комерцијален софтвер носи и низа од недостатоци, пред сè високата цена која го става вон дофат на студентите, истражувачите, малите компании, како и на научно истражувачките и образовните установи во поголем дел од светот. Други недостатоци на Матлаб се ограничната преносливост на кодот, како и неговата затвореност.

A.1 Слободен софтвер

Денес сè повеќе инженери и научници ја напуштаат употребата на комерцијалниот затворен софтвер и својата работа ја засноваат на платформи базирани на [слободен софтвер⁹²](#). Ова пред сè се должи на философијата на движењето за слободен софтвер започнато од [Ричард Сталман⁹³](#) во 1983 г. со креирањето на ГНУ оперативниот систем⁹⁴, а подоцна со воспоставување на Фондацијата за слободен софтвер⁹⁵ во 1985 г., како и поширокото [движење за отвореност⁹⁶](#), а тоа е заедништво во создавањето и напредувањето на технологијата и човештвото.

A.2 Четири слободи

Слободниот софтвер е дефиниран со четирите слободи:⁹⁷

⁹¹ MATLAB®Matrix Laboratory, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States. <http://www.mathworks.com/products/matlab>

⁹² Wikipedia – Free software movement https://en.wikipedia.org/wiki/Free_software_movement

⁹³ Wikipedia – Richard Stallman https://en.wikipedia.org/wiki/Richard_Stallman

Предавање на Ричард Сталман за философијата на движењето за слободен софтвер – Richard Stallman – Free software, free society, TEDxGeneva 2014 https://www.youtube.com/watch?v=Ag1AKI1_2GM

⁹⁴ ГНУ е име на животно од саваните на Африка но и рекурзивна кратенка од GNU's Not Unix. Поопширно за неговото создавање и општо за движењето за слободен софтвер во документарниот филм Револуција ОС (Revolution OS) <https://www.youtube.com/watch?v=Eluzi700-P4>

⁹⁵ Wikipedia – Free Software Foundation https://en.wikipedia.org/wiki/Free_Software_Foundation

⁹⁶ Wikipedia – Open-source model https://en.wikipedia.org/wiki/Open-source_model

Nathan Seidle – How Open Hardware will Take Over the World, TEDxBoulder https://www.youtube.com/watch?v=xGhj_1LNtd0

⁹⁷ Превземено од вебстраницата на организацијата Слободен софтвер Македонија <https://slobodensoftver.org.mk/shto>

- **Слобода 0.** Слобода да ја користите програмата за било која намена.

Добавањето рестрикции за користење на слободен софтвер, како што се временските рестрикции („Пробен период од 30 дена“, „Лиценцата истекува на 1 јануари 2005“), рестрикции на целта („Дозволена е употреба за истражувачки и некомерцијални цели“) или рестрикции на географската област („Мора да се користи во земјата А“), ја прават програмата неслободна.

- **Слобода 1.** Слобода да проучите како работи програмата и како истата да ја адаптирате на сопствените потреби.

Добавањето легални или практични рестрикции на разбирањето или менувањето на програмата, како што се задолжително купување на специјални лиценци, потпишување на спогодба за неоткривање (Non-Disclosure-Agreement) или правењето изворниот код да биде недостапен, исто така ја прават програмата неслободна. Без слободата да се менува програмата, луѓето ќе останат на милост на единствен снабдувач.

- **Слобода 2.** Слобода да редистрибуирате копии за да му помогнете на вашиот сосед.

Софтверот може да се копира/дистрибуира скоро без никакви трошоци. Ако не смеете да му дадете некоја програма на некој човек кому таа му треба, тоа ја прави програмата неслободна. Се разбира, доколку сакате, за ваквите активности можете да наплатите.

- **Слобода 3** Слобода да ја подобрувате програмата и да ги издадете вашите подобрувања во јавноста, од што корист ќе има целата заедница.

Сите луѓе не се подеднакво добри програмери. Некои луѓе пак воопшто не знаат да програмираат. Оваа слобода им дозволува на оние луѓе кои немаат време или знаење да решат некој проблем индиректно да пристапат до слободата за менување на програмата. Се разбира, доколку сакате, за ваквите активности можете да наплатите.

Доколку софтверот не ги исполнува сите горни услови, тогаш тој не е слободен софтвер.

A.3 Предности на слободниот софтвер

Од практичен аспект, отворениот софтвер има низа предности над затворениот софтвер и тоа:

- **достапноста** – поради основната премиса на давање на изворниот код, со цел да се овозможи неговиот развој од заедницата, отворениот софтвер е *de facto* и бесплатен софтвер. Така, повеќето производители на слободниот софтвер живеат од донацији, но и од продавање поддршка за нивниот производ.
- **безбедноста** – поради достапноста на изворниот код, не постои начин производителот на софтверот да прави нешто скриено од вас, а секој спорен дел од кодот е подложен на промена од заедницата. Кај затворениот софтвер тоа не е случај.^{98,99}
- **слободата од производителот** – како корисници на отворениот софтвер, вие не сте затворени во екосистемот на производителот.¹⁰⁰ Истиот тој софтвер може да биде превземен од друга

⁹⁸ Во Windows 10 производителот го задржува правото да ги чува вашите приватни податоци како што вели во изјавата за приватност: “Finally, we will access, disclose and preserve personal data, including your content (such as the content of your emails, other private communications or files in private folders), when we have a good faith belief that doing so is necessary ...”

Истите механизми се додадени во претходните верзии на Windows преку автоматските надградби.

Zach Epstein, Windows 10 is spying on almost everything you do – here's how to opt out, Jul 31, 2015, <http://bgr.com/2015/07/31/windows-10-upgrade-spying-how-to-opt-out/>

Ashley Allen, How to Stop Windows 7 and 8 From Spying on You <http://www.etechnix.com/stop-windows-7-8-spying/>

⁹⁹ Епл и Самсунг ги забавија телефоните на корисниците преку нивното редовно ажурирање <https://www.cnet.com/news/apple-and-samsung-fined-for-slowing-down-phones-with-updates/>

¹⁰⁰ Don Reisinger – Steve Jobs wanted to ‘further lock customers’ into Apple’s ‘ecosystem’ <https://www.cnet.com/news/steve-jobs-wanted-to-further-lock-customers-into-apples-ecosystem/>

заедница на програмери и да продолжи неговото одржување и развој во друга насока.

- **подобар квалитет** – при воспоставување на критична големина на заедницата околу еден отворен софтвер, развојот не може да се спореди со ресурсите кои ги поседува било која корпорација во светот. Така, развојот на [Линукс јадрото](#)¹⁰¹, кое е во основата оперативниот систем [ГНУ/Линукс](#) познат и само како [Линукс](#)¹⁰² и повеќе од 600-те [ГНУ/Линукс дистрибуции](#)¹⁰³, првично напишано од [Линус Торвалдс](#)¹⁰⁴, денес претставува најголемиот здружен проект во историјата на човештвото со околу 6000 активни разивачи, над 20 милиони редови на код, и со проценета развојна вредност од над 2 милијарди евра.¹⁰⁵

Сите овие придобивки заедно придонесуваат за широка рас пространетост на слободниот софтвер денес. Така, ГНУ/Линукс и ФриБСД¹⁰⁶ оперативните системи се во употреба во 98,27 % од серверите на интернет (споредено со 1,73 % со Виндоус), 79,3 % од паметните телефони (Андроид оперативниот систем)¹⁰⁷, и 99 % од суперкомпјутерите¹⁰⁸. Сепак, неговиот пробив во персоналните компјутери засега е незначителен – 2,1 % (наспроти 87 % на Виндоус и 9,7 % на МекОС).

A.4 Одржливост

Постојат различни начини на кои се реализира финансиската поддршка на слободниот софтвер и покрај бесплатноста и тоа:

- финансиска поддршка од компании – зад многу пакети слободен софтвер стојат компании од чиј интерес е неговиот развојот, Најдобар пример за тоа е можеби самото Линукс јадро на кое работат инженери од многу компании од целиот свет, а најголемиот придонес го има компанијата Интел. Тука се и низа на ГНУ/Линукс дистрибуции меѓу кои Убунту¹⁰⁹, Федора¹¹⁰, и ОпенСусе¹¹¹, како и пакетите за длабоко учење Тензорфлоу¹¹² и Пајторч¹¹³, исто така разивани од компании,
- финансиска поддршка од јавно финансирање и грантови – голем број на слободни софтвери се плод на работата на инженери и научници финансиирани од државите низ светот или од приватни фондации. Таков е на пример КиКАД софтверот за електронски дизајн и изработка на печатени плочи развиен во ЦЕРН¹¹⁴, софтверот за обработка на аудио Аудасити започнат во Универзитет Карнеги Мелон¹¹⁵, или пак пакетот за машинско учење Сајкитлрн започнат во Инриа¹¹⁶,
- бизнис модел базиран на поддршка – најголемата компанија која денес работи исклучиво со слободен софтвер е Ред Хет чиј ГНУ/Линукс оперативен систем е еден од најзастапените на интернет серверите.¹¹⁷ Ред Хет заработка преку продажба на поддршка за овој оперативен систем и во моментов е проценета на вредност од 38 милијарди УСД,

¹⁰¹ Wikipedia – Linux kernel https://en.wikipedia.org/wiki/Linux_kernel

¹⁰² Wikipedia – Linux <https://en.wikipedia.org/wiki/Linux>

¹⁰³ Wikipedia – List of Linux distributions https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Linux_distributions

¹⁰⁴ Wikipedia – Linus Torvalds https://en.wikipedia.org/wiki/Linus_Torvalds

¹⁰⁵ Добар документарен филм за раѓањето и развојот на ГНУ/Линукс оперативниот систем е Revolution OS - 2001 <https://www.youtube.com/watch?v=Eluzi700-P4>

¹⁰⁶ FreeBSD <https://www.freebsd.org/>

¹⁰⁷ Оваа бројка е речиси 91 % ако се има в' предвид дека и iOS е базиран на Линукс јадрото.

¹⁰⁸ Linux is Running on Almost All of the Top 500 Supercomputers <https://itsfoss.com/linux-supercomputers-2017/>

¹⁰⁹ Ubuntu <https://www.ubuntu.com/>

¹¹⁰ Fedora <https://getfedora.org/>

¹¹¹ OpenSUSE <https://www.opensuse.org/>

¹¹² TensorFlow – An end-to-end open source machine learning platform <https://www.tensorflow.org/>

¹¹³ PyTorch – from research to production <https://pytorch.org/>

¹¹⁴ KiCad EDA – A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite <http://kicad-pcb.org/>

¹¹⁵ Audacity – Free, open source, cross-platform audio software <https://www.audacityteam.org/>

¹¹⁶ scikit-learn – Machine Learning in Python <https://scikit-learn.org/stable/index.html>

¹¹⁷ Red Hat – The world's leading provider of open source solutions <https://www.redhat.com>

- финансиска поддршка од донацији – многу слободни софтвери егзистираат благодарејќи на донацији направени од нивните корисници. Тука спаѓаат најголем број од ГНУ/Линукс дистрибуциите како на пример Манџаро¹¹⁸ или Минт¹¹⁹, а исто така СпајдерSpyder – The Scientific Python Development Environment <https://manjaro.org/> развојната средина за Питон која ќе ја користиме во предметов,
- ентузијазам – мотивот нешто да се создаде или подобри и да се сподели со целиот свет понекогаш е доволен мотив за развој на слободниот софтвер. Постојат низа пакети со заедници на развивачи кои немаат финансиски придобивки од нивната работа на проектот, но сепак продолжуваат да работат на него водени од сопствените убедувања и стремеж кон повисоки вредности.

A.5 Слободен софтвер за инженерска и научна работа

Постојат низа на слободни софтвери кои можат да бидат искористени за обработка на нумерички податоци.

- **ГНУ Октејв**¹²⁰ има синтакса направена да биде во голема мера компатибилна со онаа на Матлаб. Во Октејв се реализирани голем број на пакети кои можат да се искористат за обработка на најразлични типови на сигнали. Проблемот со Октејв е во неговата мала брзина на извршување, поради што највеќе се употребува во образоването како замена за Матлаб.
- **Сајлаб**¹²¹ е слободен софтвер за нумеричка обработка наменет за инженери и научници, во употреба од 1994 г. Сајлаб во себе вклучува и слободна замена за Симуллинк пакетот на Матлаб, наречена Икскос¹²².
- **Питон**¹²³ е широко распространет, повеќенаменски, интерпретиран и динамичен програмски јазик на високо ниво направен од Гуидо ван Росум¹²⁴ во 1989 г. Иако не е наменет строго за нумеричка анализа, елегантната и едноставна синтакса која овозможува лесна читливост, како и неговата широка распространетост во најразлични области, го прават Питон идеална основа за слободната работа и соработка на научната и образовната заедница ширум светот.
- **Цулиа**¹²⁵ е јазик за нумеричко процесирање со компајлирање направен на МИТ, кој иако има синтакса на високо ниво како онаа на Матлаб, работи речиси еднакво брзо со код напишан во С. И покрај големиот потенцијал на Цулија, за сега неговата примена останува ограничена во области во кои е неопходна голема процесирачка моќ.

Аудасити

Аудасити¹²⁶ е уште еден слободен софтвер кој ќе ни биде од корист во анализата, едитирањето и снимањето на дигитално аудио, прикажан на Сл. А.1. Неговиот развој го започнале Доминик Мацони и Роџер Даненберг во 1999 во Универзитетот Карнеги Мелон и е иницијално објавен во 2000 како верзија 0,8. Од 2011, тој е 11-от најсимнуван софтвер на Сорсфорџ, со 76,5 милиони симнувања. Аудасити е добитник на наградата за најдобар проект за мултимедија од заедницата Сорсфорџ во 2007 и 2009. Во 2015 е преместен на Фосуб каде за 4 месеци постигнува 10 милиони

¹¹⁸Manjaro – Professional Linux at its best <https://manjaro.org/>

¹¹⁹Linux Mint – From freedom came elegance <https://linuxmint.com/>

¹²⁰GNU Octave – Scientific Programming Language <https://www.gnu.org/software/octave/>

¹²¹Scilab – Open source software for numerical computation <https://www.scilab.org/>

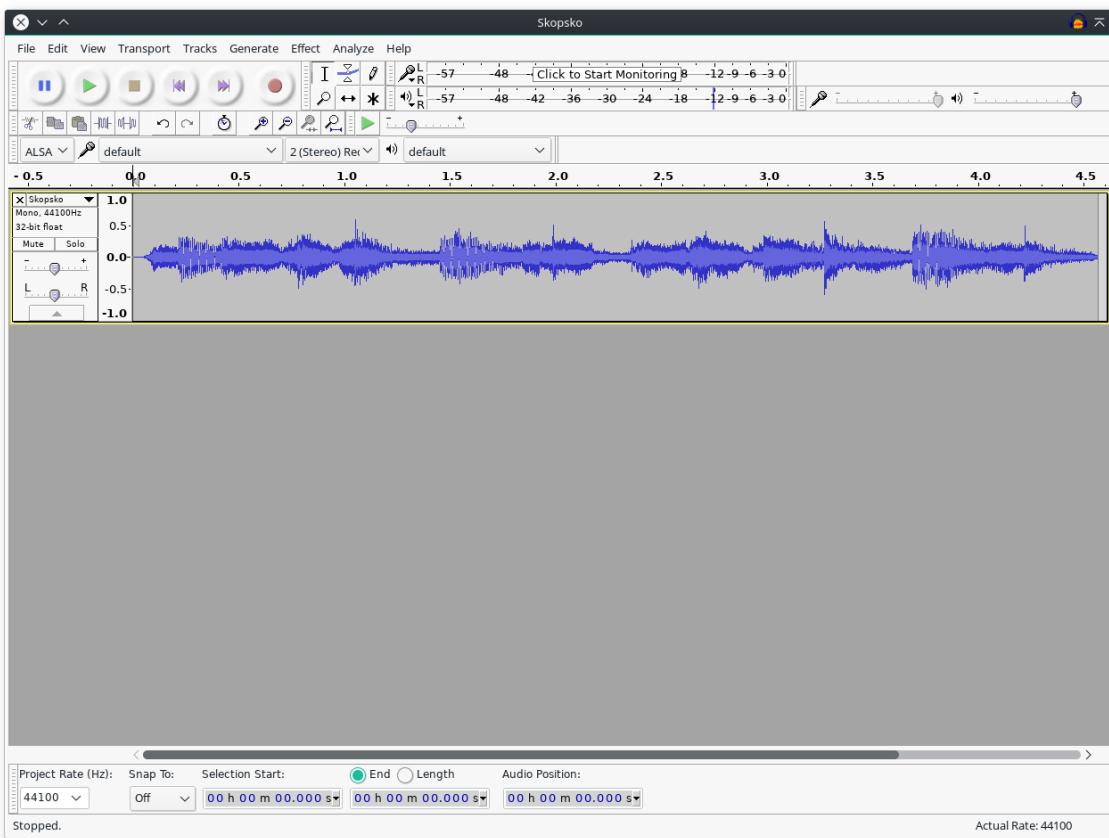
¹²²Xcos <https://www.scilab.org/software/xcos>

¹²³Python <https://www.python.org/>

¹²⁴Wikipedia – Guido van Rossum https://en.wikipedia.org/wiki/Guido_van_Rossum

¹²⁵The Julia Programming Language <https://julialang.org/>

¹²⁶Audacity. <http://www.audacityteam.org/>



Слика А.1: Отворен аудио файл во главниот прозорец на Аудасити.

симнувања.¹²⁷

Освен тоа што поддржува снимање од повеќе извори, Аудасити може да се искористи за процесирање на сите типови на аудио, преку додавање на ефекти како нормализација, поткастрување, и прелевање. Тој може да се користи за снимање и миксање на цели албуми, како што е случајот со групата Tune-Yards. Тој е во употреба и во националниот курс за ICT ниво 2 на OCR¹²⁸ во Велика Британија. Главните особини на Аудасити вклучуваат:

- Читување и снимање на различни типови на аудио формати, како WAV, AIFF, MP3, Ogg Vorbis, FLAC, WMA, AAC, AMR и AC3.
- Снимање и репродукција на звук.
- Едитирање со неограничен број на undo.
- Автоматска поделба на аудио траки на дигитализирани снимки од касети или грамофонски плочи.
- Повеќеканално миксање.
- Голем број на аудио ефекти и плагини. Додатни ефекти можат да се напишат во Nyquist кој е диалект на Lisp, а поддржани се плагини направени во отворениот LV2 стандард, како и VST плагини.
- Едитирање на амплитудната анвелопа.
- Намалување на шумот.
- Намалување на вокалите.

¹²⁷ Wikipedia: Audacity (audio editor). [https://en.wikipedia.org/wiki/Audacity_\(audio_editor\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Audacity_(audio_editor))

¹²⁸ Oxford, Cambridge and RSA Examinations

- Спектрална анализа со употреба на FFT.
- Поддршка на повеќеканално дигитално аудио со фреквенција на семплирање до 96 kHz и резолуција до 32 bit.
- Прецизно нагодување на брзината на аудиото без промена во фреквенцијата на звукот.
- Нагодување на висината на тонот без промена на брзината.
- Можности за модерно повеќеканално едитирање.
- Работа на повеќе платформи.
- Приказ на ефектите базирани на LADSPA, VST (32-bit) и Audio Unit (OS X) во реално време.
- Зачувување и вчитување на кориснички предпоставувања.

Тој исто така работи на сите оперативни системи.

Додаток А

Питон за процесирање на аудиосигналите

За процесирањето на дигиталните аудиосигнали ќе биде искористен програмскиот јазик Питон и тоа неговата нова верзија 3, заедно со библиотеките:

- Нумпј – за работа со вектори и матрици,¹²⁹
- Сајпј – за дигитално процесирање на сигнали,¹³⁰
- Матплотлиб – за визуелизација.¹³¹

Освен овие постојат мноштво библиотеки за Питон кои се користат во научните истражувања како на пример Пандас¹³² за статистички анализи, Симпј¹³³ за симболичка математика, Сајкитлрн¹³⁴ за машинско учење итн.

Како интерфејс кон Питон ќе ја користиме интерактивната конзола ИПитон¹³⁵ и научната развојна средина за Питон Спајдер¹³⁶.

A.1 Основи поставки во ГНУ/Линукс

Иако користењето на Питон не е врзано со ГНУ/Линукс оперативниот систем, вежбите во овој предмет ќе се базираат на работа под ГНУ/Линукс. Доколку веќе немате ГНУ/Линукс, истиот се препорачува да го инсталирате паралелно на постоечкиот оперативен систем. Во најмала рака може да инсталирате ГНУ/Линукс во виртуелна машина, но ова може да ги ограничи постоечките ресурси за процесирање на сигналите.¹³⁷ Во Лабораторијата за дигитално процесирање на сигнали ќе работиме со Убунту Mate¹³⁸ кој е базиран на Убунту, а ја користи десктоп средината Mate чиј изглед е базиран на Гном 2, а е имплементиран во Гном 3.¹³⁹

¹²⁹NumPy <http://www.numpy.org/>

¹³⁰SciPy <http://www.scipy.org/>

¹³¹Matplotlib <http://matplotlib.org/>

¹³²Pandas <http://pandas.pydata.org/>

¹³³Sympy <http://www.sympy.org/en/index.html>

¹³⁴SciKit-Learn <http://scikit-learn.org/stable/>

¹³⁵IPython Interactive Computing <http://ipython.org/>

¹³⁶Spyder – The Scientific PYthon Development EnviRonment <https://github.com/spyder-ide/spyder>

¹³⁷Добар преглед на популарноста на различните Линукс дистрибуции, како и повеќе информации за истите може да најдете на вебстраницата Distrowatch. <http://distrowatch.com/>

¹³⁸Ubuntu MATE. <https://ubuntu-mate.org/>

¹³⁹Кај ГНУ/Линукс оперативните системи можат да се користат различни десктоп средини како GNOME и MATE, но уште и KDE Plasma, Xfce, LXQt, Cinnamon, Pantheon, итн.

За работа со ГНУ/Линукс можеме да го искористиме стандардниот БАШ терминал.¹⁴⁰ Вообичаена кратенка за отворање на нов терминал е `ctrl-alt-t`, или ако дистрибуцијата доаѓа со терминал на спуштање копчето `F12`.

За почеток треба во вашиот основен фолдер¹⁴¹ да отворите нова папка со името на предметот. Тоа може да го направите преку файл експлорерот, или преку терминалот:

```
~ $ mkdir ea
```

Следно, од страната на предметот Електроакустика на Гитхаб¹⁴² или Гитлаб¹⁴³ превземете го фолдерот со звучни сегменти кои ќе ги користиме во вежбите. Тоа можете да го направите на следниот начин:

```
~ $ cd ea
~/ea/ $ git clone https://github.com/FEEIT-FreeCourseWare/Digital-Audio-Systems.git
~/ea/ $ cp -r Digital-Audio-Systems/code/audio .
```

За да може да ги слушнеме овие аудиозаписи треба да го инсталирајме `SoX`¹⁴⁴ кој претставува моќна алатка за конверзија на аудиофајлови од еден формат во друг, но може да се искористи и за додавање на различни аудиоэффекти, како и снимање и преслушување на аудиофајлови. За инсталирање и надградба на софтверот и самиот оперативен систем во Линукс е одговорен менаџерот на пакети. Кај дистрибуциите од фамилијата на Убунту како менаџер се користи `apt-get` или на повисоко ниво `apt`. Поради безбедносни причини во Линукс при секое менување на инсталираниот софтвер и системските фајлови мора да се повикаме на администраторски привилегии преку наредбата `sudo`¹⁴⁵:

```
~/ea/ $ sudo apt install sox
```

По што може да преслушаме некој од аудиофајловите:

```
~/ea/ $ play audio/Solzi.wav
```

`Solzi.wav`:

```
File Size: 345k      Bit Rate: 714k
```

```
Encoding: Signed PCM
```

```
Channels: 1 @ 16-bit
```

```
Samplerate: 44100Hz
```

```
Replaygain: off
```

```
Duration: 00:00:03.87
```

```
In:52.8% 00:00:02.04 [00:00:01.83] Out:90.1k [ -==|==-- ] Clip:0
```

A.2 Основи на работата со Питон

¹⁴⁰Bourne-Again Shell (BASH) средината е стандардна за сите дистрибуции на ГНУ/Линукс и МекОС. Добро напатство за нејзина употреба претставува: Software Carpentry – The Unix Shell <http://swcarpentry.github.io/shell-novice/>

Постојат и понапредни шел средини како на пример Z shell – скратено Zsh. Еве еден туторијал за нејзина инсталација: Oh-My-Zsh! A Work of CLI Magic—Tutorial for Ubuntu <https://medium.com/wearetheledger/oh-my-zsh-made-for-cli-lovers-installation-guide-3131ca5491fb>

¹⁴¹Бо ГНУ/Линукс основен фолдер на секој корисник е `/home/user_name/`, а кратенка за него е `~`.

¹⁴²<https://github.com/FEEIT-FreeCourseWare/Electroacoustics>

¹⁴³<https://gitlab.com/feeit-freecourseware/Electroacoustics>

¹⁴⁴SoX - Sound eXchange. <http://sox.sourceforge.net/>

¹⁴⁵Кратенка од *super user do*.

Питон интерпретер

За работа со Питон може да ја искористиме стандардната инсталацијата на Питон која доаѓа со секоја ГНУ/Линукс дистрибуција. Питон интерпретерот можеме да го повикаме во стандардниот БАШ терминал со:

```
$ python

Python 3.7.2 (default, Jan 10 2019, 23:51:51)
[GCC 8.2.1 20181127] on linux
Type "help", "copyright", "credits" or "license" for more information.
>>> print('hello world')
hello world
```

За излегување од Питон конзолата треба да ја притиснеме стандардната кратенка `ctrl-d` или да напишеме `exit()`.

ИПитон

Поради ограничните можности на основниот Питон интерпретер, вообичаено со Питон се работи во интерактивната конзола **ИПитон** која нуди низа на подобрувања. Нејзe може да ја инсталираме со:

```
$ sudo apt install ipython
```

а по инсталацијата може да ја повикаме со:

```
$ ipython

Python 3.7.2 (default, Jan 10 2019, 23:51:51)
Type 'copyright', 'credits' or 'license' for more information
IPython 7.3.0 -- An enhanced Interactive Python. Type '?' for help.

In [1]: print('hello world')
hello world
```

Некои од главните придобивки кои ги носи ИПитон се:

- пристап до стандардната помош во Питон, како на пример докстрингови на објекти и напатствието за Питон, преку наредбата `help`,
- низа од специјални наредби, наречени и „магии“, како на пример `%timeit` за мерење на времето потребно за извршување на една наредба, `%matplotlib` за овозможување на интерактивно исцртување, или `%history` за испишување, пребарување или запишување на историјата на извршените наредби; повеќе за овие наредби може да се види со наредбата `%magic`,
- информации за секој објект преку употреба на `?` наредбата,
- автоматско комплетирање на имињата на објектите и променливите од локалниот простор на имиња, како и имиња од локалниот фолдер, со употреба на `Tab` копчето,
- пребарување на претходно внесени наредби со стрелките и внесување на првите букви од саканата наредба, а со `ctrl-r` и со пребарување на целата содржина на претходните наредби,
- извршување на шел наредби со помош на `!`.

За да ги видите сите можности кои ги нуди ИПитон напишете `?` или `%quickref` во интерактивната конзола.

```

File Edit View Kernel Window Help
Jupyter QtConsole 4.1.1
Python 2.7.10 (default, Oct 14 2015, 16:09:02)
Type "copyright", "credits" or "license" for more information.

IPython 4.0.3 -- An enhanced Interactive Python.
?           -> Introduction and overview of IPython's features.
%quickref -> Quick reference.
help        -> Python's own help system.
object?    -> Details about 'object', use 'object??' for extra details.
%uiref     -> A brief reference about the graphical user interface.

In [1]: from __future__ import division
...: import numpy as np
...: from scipy.io import wavfile
...: from matplotlib import pyplot as plt
...:

In [2]: %matplotlib inline

In [3]: plt.plot(np.arange(10))
Out[3]: []

```

Слика А.1: Јупајтер Кјут конзолата нуди напредна интерактивност.

Дополнително, ИПитон е основата зад **Јупајтер Кјутконзолата**¹⁴⁶ прикажана на Сл. А.1, која е реализирана во Кјут технологијата и овозможува плотирање во самата конзола кое може да се активира со наредбата `%matplotlib inline`. Таа се стартира во терминалот со наредбата:

```
$ jupyter qtconsole
```

Виртуелни средини за Питон

Инсталирањето на Питон пакети, како што направивме со ИПитон козолата, директно во оперативниот систем не е препорачливо. За избегнување на судир помеѓу системската инсталација на Питон на ГНУ/Линукс оперативниот систем, како и за изолирање на екосистемот од инсталирани модули на секој засебен проект, правилно е да направиме Питон виртуелна средина за процесирање на дигиталните аудиосигнали. Постојат низа пакети за создавање и раководење со виртуелните средини во Питон, од кои `pipenv`¹⁴⁷ е оној кој е препорачан од Телото за пакување на Питон¹⁴⁸.

За инсталирање на `pipenv` треба да го инсталирате користејќи го системскиот `pip`¹⁴⁹. Поради можноста на употреба на Питон 2 како стандарден во инсталираната ГНУ/Линукс дистрибуција, најдобро е да напишеме:

¹⁴⁶Jupyter QtConsole <https://github.com/jupyter/qtconsole>

¹⁴⁷Pipenv – Python Development Workflow for Humans <https://github.com/pypa/pipenv>

¹⁴⁸Python Packaging Authority PyPA <https://www.pypa.io/en/latest/>

¹⁴⁹Python Install Package (pip) <https://pypi.org/project/pip/>

```
$ sudo pip3 install pipenv
```

А доколку системот го нема `pip3`, истиот може да се инсталира како:

```
$ sudo apt install python3-pip
```

За креирање на виртуелна средина во фолдерот за овој предмет ќе напишеме:

```
$ mkdir ea
$ pipenv --python 3
```

```
Creating a virtualenv for this project...
Pipfile: /tmp/ea/Pipfile
Using /usr/bin/python3 (3.7.2) to create virtualenv...
Creating virtual environment...Using base prefix '/usr'
New python executable in ~/.local/share/virtualenvs/ea-aWLbLjVf/bin/python3
Also creating executable in ~/.local/share/virtualenvs/ea-aWLbLjVf/bin/python
Installing setuptools, pip, wheel...
done.

Running virtualenv with interpreter /usr/bin/python3

Successfully created virtual environment!
Virtualenv location: ~/.local/share/virtualenvs/ea-aWLbLjVf
Creating a Pipfile for this project...
```

Со ова `pipenv` креира нова виртуелна средина во локален фолдер во нашиот кориснички фолдер, во неа го копира системскиот Питон 3 и `pip`. За активирање на виртуелната средина може да ја искористиме наредбата `pipenv shell` која ја става патеката на виртуелната средина како прва во листата на системски патеки. Така следниот пат кога ќе сакаме да го повикаме Питон интерпретерот или да инсталлираме пакет со `pip`, тоа ќе се случува внатре во виртуелната средина:

```
$ which pip
/usr/bin/pip

$ echo $PATH
/usr/local/sbin:/usr/local/bin:/usr/bin ...

$ pipenv shell
Launching subshell in virtual environment...
. ~/.local/share/virtualenvs/ea-aWLbLjVf/bin/activate

(ea) $ echo $PATH
~/.local/share/virtualenvs/ea-aWLbLjVf/bin:/usr/local/sbin:/usr/local/bin:...

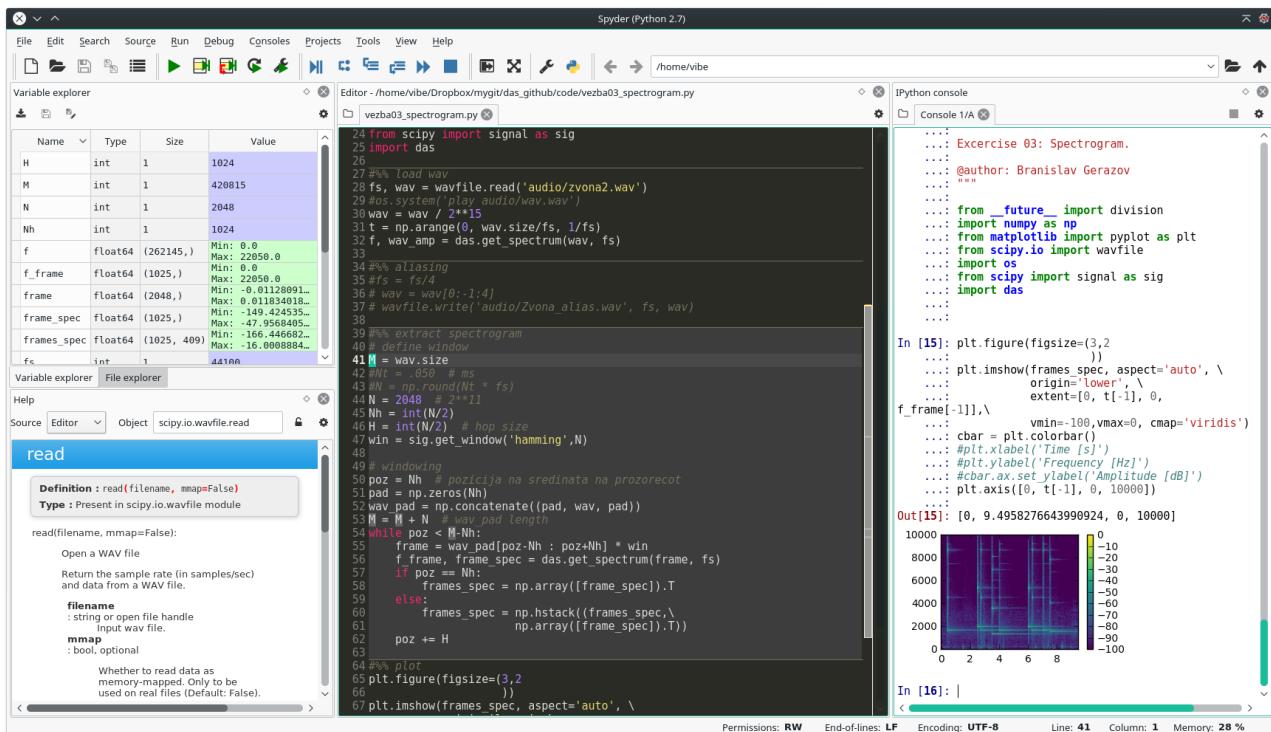
(ea) $ which pip
~/.local/share/virtualenvs/ea-aWLbLjVf/bin/pip
```

Гледаме дека `pipenv` ни дозначува дека сме во виртуелната средина со `(ea)` пред БАШ промптовт. За да излеземе од неа повторно може да ја употребиме кратенката `ctrl-d` или да напишеме `exit`.

Спајдер

Наместо да работиме со ИПитон конзолата во терминалот, во предметот електроакустика ќе ја употребиме развојната средина за Питон специјализирана за инженерска и научна работа **Спајдер**¹⁵⁰ прикажана на Сл. А.2. Спајдер во себе вклучува:

¹⁵⁰Spyder - The Scientific PYthon Development EnviRonment. <https://github.com/spyder-ide/spyder>



Слика А.2: Спајдер развојната средина за Питон специјализирана за инженерска и научна работа.

- **Едитор** – со вклучен прелистувач на функции/класи, можности за анализа на код, автоматско завршување на код, и вчитување на дефиниции.
- **Интерактивна конзола** – интегрирани Питон и иПитон конзоли со работни простори и подршка за дебагирање и поддршка за Матплотлиб, овозможуваат инстантна евалуација на кодот напишан во едиторот.
- **Документација** – покажување на документацијата на било која класа или функција повикана во едиторот или конзолата.
- **Приказ на променливи** – овозможува брза анализа на променливите генериирани со некој код.
- **Приказ на фајлови и фолдери**.
- **Историја на наредби**.

Спајдер можеме да го инсталлираме во виртуелната средина која ја креираме во работниот фолдер `ea`:

```
(ea) $ pip install spyder
```

A.3 Основи на Нумпай и Матплотлиб

За да ги инсталлираме потребните модули во новата виртуелна средина ќе напишеме:

```
(ea) $ pip install numpy matplotlib scipy
```

Сега може да ги повикаме во ИПитон:

```
In [1]: import numpy as np
In [2]: from matplotlib import pyplot as plt
```

```
In [3]: x = np.linspace(0, 2*np.pi, 100)
In [4]: y = np.sin(x)
In [5]: %matplotlib
Using matplotlib backend: Qt5Agg

In [6]: plt.plot(x, y)
Out[6]: [

```

Забележете дека го импортираме Нумпaj со `import numpy as np` наместо со `from numpy import *`. Ова е препорачана практика за избегнување на оптеретување на постоечките функции во основниот простор на имиња¹⁵¹, како и за зачувување на засебен простор со имиња за секој од импортирани модули. Ова овозможува и одлично автоматско надополнување на започнатото име на модул, функција или променлива во Питон.¹⁵² Со наредбата `%matplotlib` се овозможува интерактивното плотирање во IPитон конзолата.

Добар вовед во програмскиот јазик Питон во рамки на екосистемот за научна работа е даден во [Скриптата за Сајпај \(Varoquaux et al., 2015\)](#)¹⁵³ која е достапна под слободна лиценца¹⁵⁴. Оваа книга претставува отворен проект и во неа, благодарејќи на многуте автори и придонесувачи, се поместени основите за работа не само со Питон, Нумпaj, Матплотлиб и Сајпај, туку и Пандас, Симпај, Сајкитимиџ, Сајкитлрн, па дури и Цајтон¹⁵⁵.

За запознавање со основите на програмскиот јазик Питон можат да послужат мноштво на материјали, каков што е [официјалниот туторијал за Питон](#) на вебстраницата на Питон¹⁵⁶ и Викикнигата [Програмирање во Питон](#)¹⁵⁷, обете во употребува на МИТ.

¹⁵¹ Добрата структурираност на просторите на имиња (namespaces) е една од важните одлики на Питон како што е и наведено во стиховите на [Зенот на Питон](#) кој може да го прочитате ако напишете `import this`.

¹⁵² Автоматското надополнување се активира со притискање на `Tab`.

¹⁵³ Scipy Lecture Notes <http://scipy-lectures.org/>

¹⁵⁴ Creative Commons <https://creativecommons.org/>

¹⁵⁵ Cython <https://cython.org/>

¹⁵⁶ The Python Tutorial. <https://docs.python.org/3/tutorial/index.html>

¹⁵⁷ Python Programming https://en.wikibooks.org/wiki/Python_Programming

Литература

Madeline Carson, Hudson Giesbrecht, Tim Perry, and Peter Driessens. Surround sound impulse response. *Victoria*, 2009. URL http://web.uvic.ca/~hgiesbre/ELEC499/Elec499_ProgressRep2.pdf.

Sandra Da Costa, Wietske van der Zwaag, Lee M Miller, Stephanie Clarke, and Melissa Saenz. Tuning in to sound: frequency-selective attentional filter in human primary auditory cortex. *Journal of Neuroscience*, 33(5):1858–1863, 2013.

Gael Varoquaux, Valentin Haenel, Emmanuelle Gouillart, Zbigniew Jędrzejewski-Szmeik, Ralf Gommers, Fabian Pedregosa, Olav Vahtras, Pierre de Buyl, Gert-Ludwig Ingold, Nicolas P. Rougier, and et al. *scipy-lecture-notes: Release 2015.1 beta*. Zenodo, 2015. doi: 10.5281/zenodo.31521. URL <http://www.scipy-lectures.org/>.

Хуснија ІІІ. Куртовић. *Основи техничке акустике*. Научна Књига, Београд, 1982.