

# Електроакустика

Бранислав Геразов

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

## Електроакустика v0.7

©Бранислав Геразов, 17 март 2017 г.

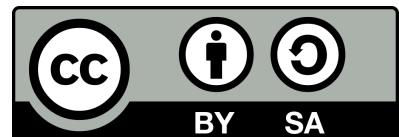
Скрипта од предавањата по предметот Електроакустика

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/>



# Содржина

<b>1 Вовед</b>	<b>5</b>
1.1 Сетило за слух . . . . .	5
1.2 Историја на акустиката . . . . .	5
1.3 Области во акустиката . . . . .	7
<b>2 Зрачење и простирање на звукот</b>	<b>9</b>
2.1 Еднодимензионални бранови . . . . .	9
2.2 Акустичка бранова равенка . . . . .	11
2.3 Рамнински бранови . . . . .	14
2.4 Брзина на простирање на звукот . . . . .	14
2.5 Брзина и поместување на воздушните честички . . . . .	16
2.6 Сферни бранови . . . . .	17
2.7 Специфична акустичка импеданса . . . . .	17
2.8 Интензитет на звук и акустичка моќност . . . . .	19
2.9 Акустичка импеданса . . . . .	20
2.10 Просторен агол на зрачење . . . . .	21
2.11 Крива на насоченост . . . . .	22
2.12 Рефлексија на звук . . . . .	24
2.13 Рефлексија на звук при коса инциденција . . . . .	26
2.14 Стојни бранови . . . . .	26
2.15 Слабеење на звукот . . . . .	28
2.16 Запознавање со звучните форми . . . . .	29
<b>3 Електроакустички и електромеханички аналогии</b>	<b>36</b>
3.1 Елементи на механичките системи . . . . .	37
<b>4 Психоакустика</b>	<b>39</b>
4.1 Работа на човековото уво . . . . .	39
4.2 Поимање на амплитудата на звукот . . . . .	41
4.3 Поимање на фреквенцијата на звукот . . . . .	43
4.4 Поимање на спектарот на звукот . . . . .	44
4.5 Запознавање со феномени во психоакустиката . . . . .	44
<b>5 Акустика на простории</b>	<b>53</b>
5.1 Резонантни фреквенции . . . . .	53
5.2 Коефициент на апсорпција . . . . .	57
5.3 Статистичка анализа на звучното поле . . . . .	59
5.4 Време на реверберација . . . . .	61
5.5 Средна должина на слободната патека на звукот . . . . .	62
5.6 Мерење на импулсниот одсив на просторија . . . . .	63

<b>6 Микрофони</b>	<b>72</b>
6.1 Електроакустички преобразувачи . . . . .	72
6.2 Основни характеристики на микрофоните . . . . .	72
6.3 Поделба на микрофоните . . . . .	77
<b>7 Звучници</b>	<b>79</b>
7.1 Основни характеристики на звучниците . . . . .	79

# 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“.<sup>1</sup> 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:

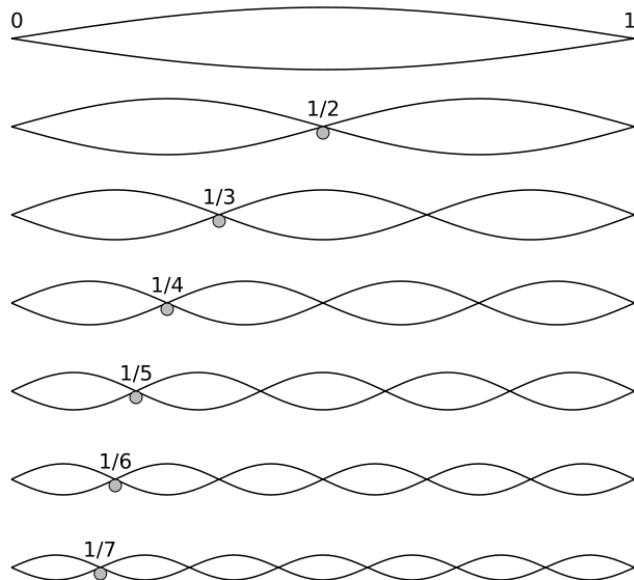
- **преживување** – сетилото за слух може да нè предупреди за настани во нашата средина кои можат да го загрозат нашиот живот. Токму поради оваа причина, за разлика од сетилото за вид, тоа е постојано вклучено.
- **комуникација** – сетилото за слух е неопходна алка од системот за говорна комуникација. 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 паралингвистични 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

---

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



Сл. 1.1: Основен и виши хармоници на една жица.<sup>3</sup>

тоновите отсвирени на една жица да звучат убаво заедно, т.е. да бидат во **созвучје**, требало должините на жицата да бидат во целоброен однос, на пр. 1:2, 1:3, 1:4 итн, Сл. 1.1.<sup>2</sup>

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

Римскиот архитект **Витрувиус**<sup>4</sup> 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 пишува 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 – 1642**<sup>5</sup>, и „таткото на акустиката“ **Марин Мерсен, 1588 – 1648**<sup>6</sup>, независно еден од друг ги откриваат комплетните закони на вибрација на жица. Галилео исто така за првпат го описал звукот како психолошки феномен кој се должи на физиолошките промени во сетилото за слух (треперењето 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 Њутон, 1642 – 1727**<sup>7</sup> во својата „**Принципи“ (1687)** ја извел и зависноста на брзината на простирање на брановите во цврстите тела која е во основата на **физичката акустика**,

<sup>2</sup>Wikipedia: Pythagorean tuning. [https://en.wikipedia.org/wiki/Pythagorean\\_tuning](https://en.wikipedia.org/wiki/Pythagorean_tuning)

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

<sup>5</sup>Wikipedia: Galileo Galilei. [https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo\\_Galilei](https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei)

<sup>6</sup>Wikipedia: Marin Mersenne. [https://en.wikipedia.org/wiki/Marin\\_Mersenne](https://en.wikipedia.org/wiki/Marin_Mersenne)

<sup>7</sup>Wikipedia: Isaac Newton. [https://en.wikipedia.org/wiki/Isaac\\_Newton](https://en.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton)



**Сл. 1.2:** Неолитската окарина од Велес стара 6000 год. од локалитетот „Мрамор“ кај Чашка (Велес).<sup>12</sup>

види Поглавје 2.

Голем напредок акустиката доживеала во XVIII век преку употребата на калкулусот за описување на пропагацијата на звучните бранови. Проминентни фигури во математичката акустика во XIX век биле **Херман фон Хелмхолц**<sup>8</sup>, кој ги оформил полето на **физиолошката акустика**, види Поглавје 4, и **lordot Rejli**<sup>9</sup> 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 3.

Во XX век доаѓа до раширена практична примена на научните сознанија за акустиката. **Волас Сабин**<sup>10</sup> ја оформува областа **архитектонска акустика**, види Поглавје 5, 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** (ASA<sup>11</sup>) ги дефинира следните:

1. **Археоакустика** – наука за звукот во археологијата која ги истражува акустичките својства на археолошките локалитети и артефакти, Сл. 1.2.
2. **Аероакустика** – наука за бучавата предизвикана од движењето на воздухот и на движењето на звукот низ воздухот. Оваа област е важна во дизајнот на

<sup>7</sup>”Harmonic partials on strings” by Qef [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Harmonic\\_partials\\_on\\_strings.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Harmonic_partials_on_strings.svg#/media/File:Harmonic_partials_on_strings.svg)

<sup>8</sup>Wikipedia: Hermann von Helmholtz. [https://en.wikipedia.org/wiki/Hermann\\_von\\_Helmholtz](https://en.wikipedia.org/wiki/Hermann_von_Helmholtz)

<sup>9</sup>Wikipedia: John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh. [https://en.wikipedia.org/wiki/John\\_William\\_Strutt,\\_3rd\\_Baron\\_Rayleigh](https://en.wikipedia.org/wiki/John_William_Strutt,_3rd_Baron_Rayleigh)

<sup>10</sup>Wikipedia: Wallace Clement Sabine. [https://en.wikipedia.org/wiki/Wallace\\_Clement\\_Sabine](https://en.wikipedia.org/wiki/Wallace_Clement_Sabine)

<sup>11</sup>The Acoustical Society of America.

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

потивки летала и за разбирање на принципите на работа на дувачките музички инструменти.

3. **Процесирање на акустички сигнали** – област која се занимава со активно потиснување на шум, дизајнот на слушни помагала и кохлеарни импланти, поништување на ехо, перцептуално кодирање (mp3) итн.
4. **Архитектонска акустика** – наука за постигнувањето на добар звук во простории. Вообично се занимава со проучување на разбирливоста на говорот, неговата приватност и квалитетот на музиката во изградената околина.
5. **Биоакустика** – наука која го истражува слушањето и извиците на животните, како и влијанието на акустиката и звуките од околината врз нив.
6. **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.
7. **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.
8. **Музичка акустика** – наука за физиката на музичките инструменти, но и за процесирањето на аудио во електронската музика, компјутерската анализа на музиката и композицијата.
9. **Психоакустика** – наука за тоа како човекот го поима звукот.
10. **Говорна акустика** – наука за произведувањето, процесирањето и перцепцијата на говорот. Тука спаѓаат областите на автоматско препознавање на говор и дигиталната синтеза на говор.
11. **Ултразвучна акустика** – наука која ја истражува примената на ултразвукот во медицината, хемијата, материјалите и под водата.
12. **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.
13. **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.

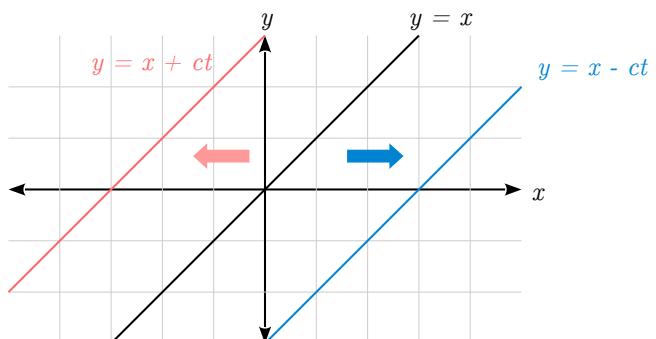
## Поглавје 2

# Зрачење и простирање 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 лонгitudинална 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.

### 2.1 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 (2.1) претставена на Сл. 2.1.



Сл. 2.1: 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 (2.2), каде  $c$  е брзината на простирање на зависноста. Простирањето на истата зависност во негативната насока на  $x$ -оската е дадено со (2.3).

$$y = x \quad (2.1)$$

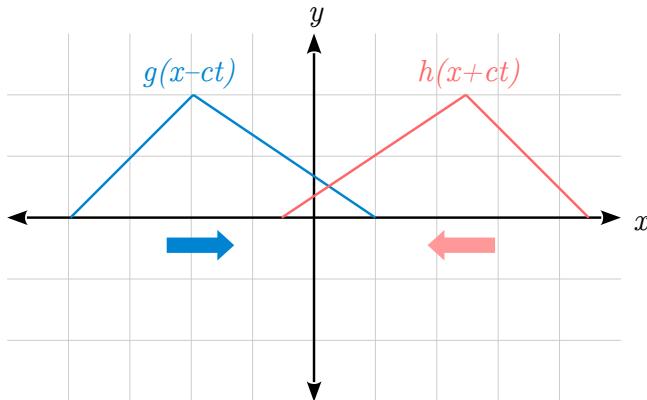
$$y = x - ct \quad (2.2)$$

$$y = x + ct \quad (2.3)$$

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

$$y(x, t) = g(x - ct) + h(x + ct), \quad (2.4)$$

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. 2.2 е прикажан пример каде  $g(x, t)$  и  $h(x, t)$  се огледални триаголни функции.



**Сл. 2.2:** 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:

$$y(x, t) = g(x - ct), \quad (2.5)$$

во кој бранот е составен само од компонента која се простира во позитивната насока на  $x$ -оската, или уште повеќе, ако обликот на  $g(x, t)$  е синусоида, тогаш имаме:

$$y(x, t) = A \cos k(x - ct) = A \cos(kx - kct) = A \cos(kx - \omega t). \quad (2.6)$$

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. Тука важи:

$$kct = \omega t = 2\pi ft, \quad (2.7)$$

каде  $\omega$  е **куружна фреквенција**, а  $f$  е **фреквенција** во Hz која што е врзана со **периодата**  $T$  според:

$$f = \frac{1}{T}. \quad (2.8)$$

За  $k$  имаме:

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{cT}, \quad (2.9)$$

каде  $cT$  е патот што го поминува бранот за една негова периоди и се нарекува **бранова должина**  $\lambda$ :

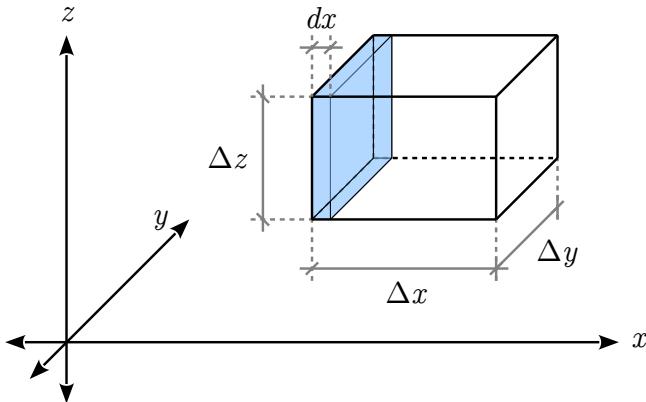
$$\lambda = cT = \frac{c}{f}, \quad (2.10)$$

па конечно:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (2.11)$$

## 2.2 Акустичка бранова равенка

Да замислиме во воздушната средина елементарен волумен  $\Delta V$  во облик на паралелопипед со страни  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и  $\Delta z$ , прикажан на Сл. 2.3. 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  $\Delta V$ .



**Сл. 2.3:** Елементарен волумен на воздух во облик на паралелопипед.

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

$$p_t = p_{atm} + p, \quad (2.12)$$

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

$$p \ll p_{atm}. \quad (2.13)$$

**Поместување на  $\Delta V$ .** 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:

$$F_x = p_t \Delta y \Delta z - \left( p_t + \frac{\partial p_t}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z \quad (2.14)$$

$$= -\frac{\partial p_t}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.15)$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial x} \Delta V. \quad (2.16)$$

Според II Ќутнов закон имаме:

$$F_x = -\frac{\partial p}{\partial x} \Delta V = ma, \quad (2.17)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} \Delta V = \rho \Delta V \frac{\partial v_x}{\partial t}, \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial v_x}{\partial t}. \quad (2.19)$$

За останатите димензии ова равенство може еквивалентно да се изведе:

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -\rho \frac{\partial v_y}{\partial t}, \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho \frac{\partial v_z}{\partial t}. \quad (2.21)$$

Во три димензии ова равенство го има следниот векторски облик:

$$\nabla p = -\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}, \quad (2.22)$$

каде со  $\nabla$  е означен градиентот на полето на притисокот кој претставува парцијален извод во трите просторни димензии:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i}_x + \frac{\partial}{\partial y} \vec{i}_y + \frac{\partial}{\partial z} \vec{i}_z. \quad (2.23)$$

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

$$dx = v_x dt, \quad (2.24)$$

а подалечната за:

$$dx = (v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} \Delta x) dt. \quad (2.25)$$

Промената на  $\Delta V$  во правец на  $x$ -оската ќе биде:

$$d\Delta V_x = \left( \left( v_x + \frac{\partial v_x}{\partial t} \Delta x \right) dt - v_x dt \right) \Delta y \Delta z = \frac{\partial v_x}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z dt = \frac{\partial v_x}{\partial x} \Delta V dt. \quad (2.26)$$

Во другите две оски еквивалентно се добива:

$$d\Delta V_y = \frac{\partial v_y}{\partial y} \Delta V dt, \quad (2.27)$$

$$d\Delta V_z = \frac{\partial v_z}{\partial z} \Delta V dt, \quad (2.28)$$

Односно збирно:

$$d\Delta V = \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \Delta V dt. \quad (2.29)$$

Сумата во (2.29) претставува дивергенција на брзината и може да се запише со помош на  $\nabla$  операторот за градиент, па за релативната промена на волуменот имаме:

$$\frac{d\Delta V}{\Delta V} = \operatorname{div} \vec{v} dt = \nabla \cdot \vec{v} dt. \quad (2.30)$$

**Промена на притисокот  $p$ .** Промената на волуменот може да ја поврзeme 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.<sup>1</sup> За адијабатски промени важи:

$$p_t \Delta V^\kappa = \text{const.} \quad (2.31)$$

Со диференцирање на овој израз добиваме:

$$p_t \kappa \Delta V^{\kappa-1} d\Delta V + dp_t \Delta V^\kappa = 0, \quad (2.32)$$

$$p_t \kappa \frac{\Delta V^\kappa}{\Delta V} d\Delta V = -\Delta V^\kappa dp_t, \quad (2.33)$$

$$\frac{d\Delta V}{\Delta V} = -\frac{1}{p_t \kappa} dp_t = -\frac{1}{p_t \kappa} dp. \quad (2.34)$$

Ако сега заменим за  $d\Delta V/\Delta V$  во (2.30), имаме:

$$-\frac{1}{p_t \kappa} dp = \nabla \cdot \vec{v} dt, \quad (2.35)$$

$$\frac{dp}{dt} \approx \frac{\partial p}{\partial t} = -p_t \kappa \nabla \cdot \vec{v}, \quad (2.36)$$

го добиваме второто равенство кое ги поврзува притисокот и брзината на воздушните честички заедно со (2.22). Сега можеме да ја елиминираме брзината од двете равенства. Најпрвин ќе го диференцираме уште еднаш (2.36):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -p_s \kappa \nabla \cdot \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}, \quad (2.37)$$

а потоа ќе земеме дивергенција од двете страни на (2.22):

$$\nabla \cdot \nabla p = \nabla^2 p = -\rho \nabla \cdot \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}, \quad (2.38)$$

каде  $p_t$  и  $\rho$  сме ги земале како константни, т.е.  $p_t = p_{atm}$ , а  $\nabla^2$  е лапласијанот.

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

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p, \quad (2.39)$$

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

$$c = \sqrt{\frac{p_{atm} \kappa}{\rho}}. \quad (2.40)$$

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

---

<sup>1</sup>Изотермички 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.

## 2.3 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  $x$ :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}, \quad (2.41)$$

За синусоидален звучен извор решението во фазорски облик ќе биде:

$$\underline{p}(x,t) = \underline{p}(x)e^{j\omega t}, \quad (2.42)$$

каде  $\underline{p}(x)$  е комплексна функција од  $x$ . Со замена на ова решение во (2.41), имаме:

$$\underline{p}(x)(j\omega)^2 e^{j\omega t} = c^2 e^{j\omega t} \frac{d^2 \underline{p}(x)}{dx^2}, \quad (2.43)$$

$$-\underline{p}(x)\omega^2 = c^2 \frac{d^2 \underline{p}(x)}{dx^2}, \quad (2.44)$$

$$\frac{d^2 \underline{p}(x)}{dx^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \underline{p}(x) = 0, \quad (2.45)$$

$$\frac{d^2 \underline{p}(x)}{dx^2} + k^2 \underline{p}(x) = 0, \quad (2.46)$$

$$(2.47)$$

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

$$\underline{p}(x) = \underline{A}_+ e^{-jkx} + \underline{A}_- e^{jkx}, \quad (2.48)$$

каде  $\underline{A}_+$  и  $\underline{A}_-$  се комплексни константи коишто зависат од почетните и граничните услови. Конечното решение кога ќе се внесе (2.42) ќе биде:

$$\underline{p}(x, t) = \underline{A}_+ e^{j(\omega t - kx)} + \underline{A}_- e^{j(\omega t + kx)}. \quad (2.49)$$

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 (2.40) навистина претставува брзина на простирање на звучниот 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 (2.49) се упростува во:

$$p = A e^{j(\omega t - kx)}, \quad (2.50)$$

чија што аналитичка форма:

$$p = A \cos(\omega t - kx), \quad (2.51)$$

е еквивалентна со (2.6).

## 2.4 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 (2.40):

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

каде  $p_{atm}$  е статичкиот атмосферски притисок,  $\kappa = 1,4$  е адијабатската константа, а  $\rho$  е густина на воздухот. За температура од  $T = 0$  °Создушниот притисок на ниво на морето е  $p_{atm} = 101,325$  kPa, а густина 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:

$$p_s V = nRT, \quad (2.52)$$

каде  $p_s$  е притисокот на гасот,  $V$  е неговиот волуменот,  $n$  е количеството материја во молови,  $R$  е универзалната гасна константа, а  $T$  е неговата апсолутна температура во К. Ако ги поделиме двете страни со густина на воздухот  $\rho$  ќе добиеме:

$$\frac{p_s V}{\rho} = \frac{nRT}{\rho}, \quad (2.53)$$

$$\frac{p_s}{\rho} = \frac{nRT}{\rho V} = \frac{nR}{m} = const \cdot T, \quad (2.54)$$

$$(2.55)$$

каде  $m$  е масата на гасот. Можеме да видиме дека односот  $p_s/\rho$  е константен за дадена температура. Од таму имаме:

$$c = \sqrt{\frac{p_{atm}\kappa}{\rho}} = \sqrt{const.\kappa T} = c_0 \sqrt{\frac{const \cdot T}{const \cdot T_0}} = c_0 \sqrt{\frac{T}{273}}, \quad (2.56)$$

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 °Скоја 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. 2.4. Во Табелата 2.1 се дадени брзини на простирање на звукот во различни материјални средини.



**Сл. 2.4:** Пробивање на звучен сид на брзина од 1 Mach.<sup>2</sup>

<sup>2</sup>By 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>

**Табела 2.1:** 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

## 2.5 Брзина и поместување на воздушните честички

Врската помеѓу притисокот и брзината на поместување на воздушните честички за простирање во една димензија беше дадена со (2.19):

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

Исто така од (2.36) може да ја изведеме и втората релација помеѓу притисокот и брзината на воздушните честички за една димензија:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} &= -p_t \kappa \nabla \cdot \vec{v} \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= -\rho c^2 \frac{\partial v_x}{\partial x}. \end{aligned} \quad (2.57)$$

Од релациите (2.19) и релацијата за поедноставениот случај за рамнински бран кој се простира во една димензија (2.50):

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

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:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\rho j \omega v, \quad (2.58)$$

$$v = j \frac{1}{\rho \omega} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{k}{\rho \omega} p = \frac{1}{\rho c} p. \quad (2.59)$$

Може да видиме дека како 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  $\xi$  кое за синусоидални звучни бранови изнесува:

$$\xi = \int v dt = \frac{v}{\omega}. \quad (2.60)$$

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

## 2.6 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. 2.5. Еден тродимензионален вектор  $\vec{M}$  дефиниран во правоаголен координатен систем со трите димензии  $(x, y, z)$ , во сферен координатен систем тој е дефиниран од растојанието од координатниот почеток  $r$  и аглите  $\phi$  – помеѓу проекцијата на векторот  $\vec{M}$  на  $xy$ -рамнината со  $x$ -оската, и  $\theta$  – помеѓу  $\vec{M}$  и  $z$ -оската. Ако изворот на звук се постави во средината на овој сферен координатен систем, поради симетријата на простирањето на звучниот бран може, очигледно е дека сите промени ќе бидат функција само од  $r$ . Па изгледот на брановата равенка (2.39) ќе се сведе на:

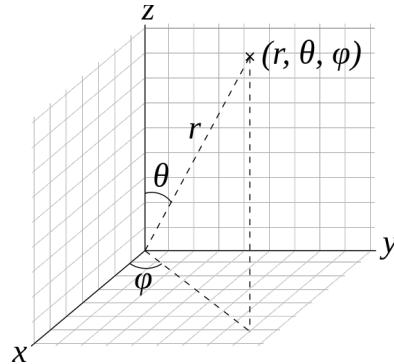
$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p = c^2 \left( \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = c^2 \frac{1}{r} \frac{\partial^2 (pr)}{\partial r^2}, \quad (2.61)$$

$$\frac{\partial^2 (pr)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 (pr)}{\partial r^2}, \quad (2.62)$$

каде е земено дека  $r$  не е функција од времето  $t$ . Бидејќи формата на оваа равенка е иста со онаа за рамнински бранови (2.41) и овде решението за синусоидална звучна побуда ќе има слична форма:

$$pr = A e^{j(\omega t - kx)}, \quad (2.63)$$

$$p = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kx)}. \quad (2.64)$$



**Сл. 2.5:** Сферен координатен систем.<sup>3</sup>

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

$$pr = \text{const}. \quad (2.65)$$

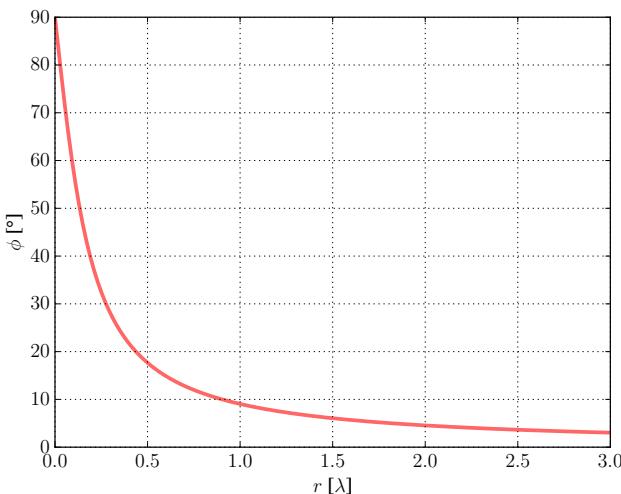
За брzinата на воздушните честички имаме:

$$v = j \frac{1}{\omega \rho} \frac{\partial p}{\partial r} = j \frac{1 + jkr}{j\omega \rho} \frac{A}{r^2} e^{j(\omega t - kx)}. \quad (2.66)$$

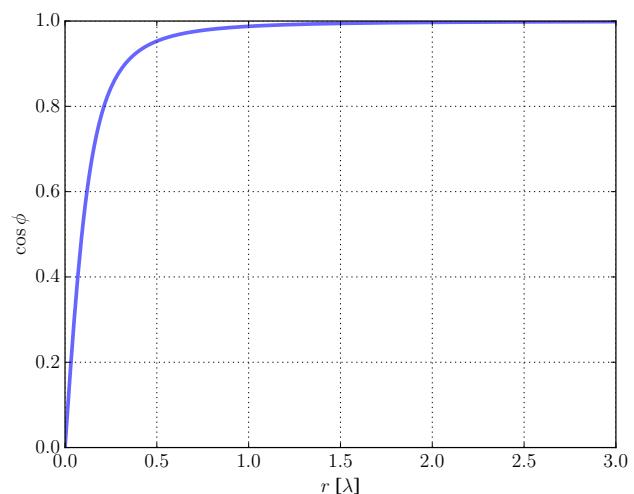
## 2.7 Специфична акустичка импеданса

Можеме да направиме аналогија помеѓу звучниот притисок и електричниот напон, како и помеѓу брзината на воздушните честички и струјата поради нивното браново

<sup>3</sup>By Andeggs - Own work, Public Domain. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7478049>



**Сл. 2.6:** Зависност на аголот  $\phi$  од растојанието  $r$  изразено во  $\lambda$ .



**Сл. 2.7:** Зависност на  $\cos \phi$  од растојанието  $r$  изразено во  $\lambda$ .

простирање. Според таа аналогија односот помеѓу притисокот и брзината се нарекува **специфична акустична импеданса**  $Z_s$ . За сферни бранови, специфичната акустичка импеданса ќе биде:

$$Z_s = \frac{p}{v} = \frac{j\rho c k r}{1 + jkr} = |Z_s| e^{j\phi}, \quad (2.67)$$

каде:

$$|Z_s| = \frac{\rho c k r}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} = \rho c \cos \phi, \quad (2.68)$$

$$\phi = \arctan \frac{1}{kr}. \quad (2.69)$$

Тука фазата на импедансата  $\phi$  е **фазната разлика** помеѓу притисокот и брзината на воздушните честички, а во (2.68) искористено е:

$$\frac{kr}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} = \cos \phi. \quad (2.70)$$

На Сл. 2.6 и 2.7 е прикажана зависност на аголот  $\phi$  и вредноста на  $\cos \phi$  во зависност од растојанието од изворот  $r$  изразено во  $\lambda$ . Можеме да видиме дека веќе за  $r = \lambda$  фазната разлика  $\phi$  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 (2.59):

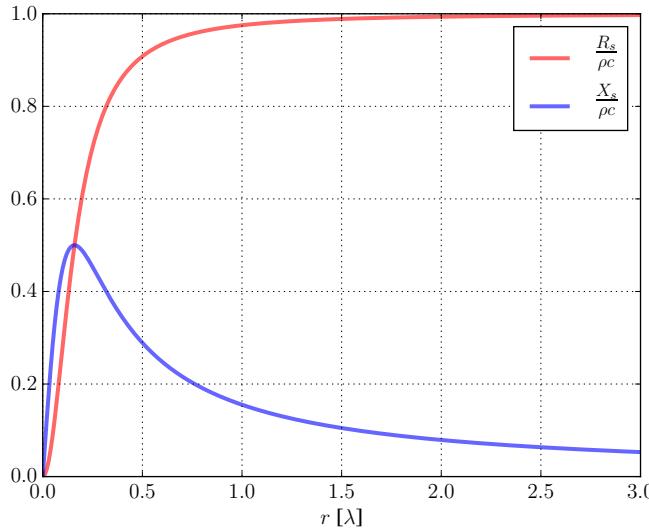
$$Z_s = \frac{p}{v} = \rho c. \quad (2.71)$$

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

Специфичната акустичка импеданса за сферни бранови (2.67) можеме да ја раздвоиме на нејзиниот реален и имагинарен дел:

$$Z_s = R_s + jX_s = \frac{j\rho c k r}{1 + jkr} \cdot \frac{1 - jkr}{1 + jkr} = \frac{\rho c k^2 r^2}{1 + k^2 r^2} + j \frac{\rho c k r}{1 + k^2 r^2}. \quad (2.72)$$

Бидејќи  $X_s$  е секогаш позитивна таа има особини на индуктанса. На Сл. 2.8 се исцртани нормализираните  $R_s/\rho c$  и  $X_s/\rho c$  во зависност од растојанието  $r$  кое е изразено во однос на  $\lambda$ . 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  $\lambda$ , а тежи кон 0 со зголемувањето на  $r$ .



Сл. 2.8: Реалната и имагинарната компонента на специфичната акустичка импеданса.

## 2.8 Иntenзитет на звук и акустичка моќност

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

$$J = pv \cos \phi, \quad (2.73)$$

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

$$[pv] = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} = \frac{\text{N m}}{\text{s m}^2} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}, \quad (2.74)$$

што значи дека добиваме моќност по површина. Со други зборови имаме непотполна аналогија помеѓу двете величини во акустички и двете величини во електричен домен. Изразот (2.73) всушност го дава **интензитетот на звукот**. За сферни и рамнински бранови неговиот облик е даден во Табелата 2.2. Може да забележиме дека во однос на  $p$  изразите за интензитетот на звукот се идентични па може да заклучиме дека интензитетот на звукот може да се добие за сите типови на бранови со:

$$J = \frac{p^2}{\rho c}. \quad (2.75)$$

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

$$P_a = \oint_S \vec{J} d\vec{S}, \quad (2.76)$$

**Табела 2.2:** Интензитет на звукот за различни типови на бранови.

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

каде  $\vec{J}$  е векторот на интензитетот на звукот,  $S$  е произволна површина која го потполно го 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  $S$ :

$$P_a = SJ, \quad (2.77)$$

односно за сферни бранови:

$$P_a = 4\pi r^2 J. \quad (2.78)$$

## 2.9 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:

$$q = \int_S \vec{v} d\vec{S}, \quad (2.79)$$

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

$$q = vS. \quad (2.80)$$

Димензиите во кои се изразува акустичкиот проток се  $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$  што го оправдува избраното име. Соодветните релации помеѓу акустичкиот проток и притисокот ќе ги добиеме со замена на  $v$  во (2.19) и (2.57):

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\rho}{S} \frac{\partial v_x}{\partial t}, \quad (2.81)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\rho c^2}{S} \frac{\partial v_x}{\partial x}. \quad (2.82)$$

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

$$P_a = pq. \quad (2.83)$$

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**  $Z_a$ :

$$Z_a = \frac{p}{q} = \frac{p}{vS} = \frac{Z_s}{S}. \quad (2.84)$$

Ако заменим за  $Z_s$  од (2.72) имаме:

$$Z_a = \frac{1}{4\pi r^2} \left( \frac{\rho c k^2 r^2}{1 + k^2 r^2} + j \frac{\rho c k r}{1 + k^2 r^2} \right) = R_a + jX_a, \quad (2.85)$$

па реалната акустичка моќност можеме да ја добијеме како:

$$P_a = q^2 R_a = q^2 \frac{\rho c k^2}{4\pi(1+k^2 r^2)}. \quad (2.86)$$

**Акустичката импеданса на зрачење** можеме да ја најдеме ако во (2.85) заменим за радиусот на изворот  $r_0$ :

$$Z_{a0} = \frac{1}{4\pi r_0^2} \left( \frac{\rho c k^2 r_0^2}{1+k^2 r_0^2} + j \frac{\rho c k r_0}{1+k^2 r_0^2} \right) = R_{a0} + j X_{a0}. \quad (2.87)$$

Користејќи го  $R_{a0}$  можеме со замена во (2.86) да ја најдеме акустичката моќност на изворот:

$$P_a = q_0^2 R_{a0} = q_0^2 \frac{\rho c k^2}{4\pi(1+k^2 r_0^2)}. \quad (2.88)$$

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

$$P_a = q_0^2 \frac{\rho c k^2}{4\pi}. \quad (2.89)$$

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  $\lambda$ , нивната вредност, нити па неговиот облик, нема влијание врз акустичката моќност.

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

$$P_a = q_0^2 \frac{\rho c}{4\pi r_0^2} = q_0^2 \frac{\rho c}{S_0}. \quad (2.90)$$

Значи за извор кој е многу поголем од брановата должина која ја зрачи, акустичката моќност зависи од неговата ефективна површина  $S_0$ , што наговестува дека сферниот извор создава рамнински бранови, па звучната моќност не зависи од неговиот облик туку само од неговата ефективна површина. Конечно можеме да заклучиме дека обликов на звучниот извор игра улога во зрачењето само за фреквенции за кои  $r_0 \approx \lambda$ .

За дискусија да заменим во (2.89) за брзината на воздушните честички и нивното движење:

$$P_a = q_0^2 \frac{\rho c k^2}{4\pi} = v_0^2 S_0^2 \frac{\rho c \omega^2}{4\pi c^2} = \frac{\omega^4 \xi_0^2 S_0^2 \rho}{4\pi c}. \quad (2.91)$$

Од равенството можеме да видиме дека акустичката моќност точkest извор е пропорционална на производот на неговата големина и движење, како и фреквенцијата 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 поголемо движење за да постигне иста акустичка моќност како извор со поголеми димензии. Ова исто така значи дека потребните димензии и движење на изворот за постигнување на одредена акустичка моќност 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 потребната големина на тапанот и фудбалското судиско свирче.

## 2.10 Просторен агол на зрачење

Ако замислиме точkest извор вграден во една бесконечно голема и крута површина, на пр. една мембрана 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 точkest извор во слободен простор (2.87) поради помалиот простор на зрачење на изворот. Така овојпат ќе имаме:

$$Z_{a0} = \frac{1}{2\pi r_0^2} Z_s = \frac{1}{2\pi r_0^2} \left( \frac{\rho c k^2 r_0^2}{1 + k^2 r_0^2} + j \frac{\rho c k r_0}{1 + k^2 r_0^2} \right) = \frac{\rho c k^2}{2\pi} + j \frac{\rho c k}{2\pi r_0}, \quad (2.92)$$

Или во општ случај може да запишеме:

$$Z_{a0} = \frac{1}{\Omega_z r_0^2} Z_s = \frac{\rho c k^2}{\Omega_z} + j \frac{\rho c k}{\Omega_z r_0} = R_{a0} + j X_{a0}, \quad (2.93)$$

каде  $\Omega_z$  е **просторниот агол на зрачење**. Ова значи и дека акустичката моќност на изворот зависи од аголот на зрачење:

$$P_a = q_0^2 \frac{\rho c k^2}{\Omega_z}, \quad (2.94)$$

а и интензитетот на звукот кој го генерира:

$$J = \frac{P_a}{\Omega_z r^2}. \quad (2.95)$$

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:

$$\frac{P_{a2}}{P_{a1}} = \frac{q_0^2 \frac{\rho c k^2}{\Omega_{z2}}}{q_0^2 \frac{\rho c k^2}{\Omega_{z1}}} = \frac{\Omega_{z1}}{\Omega_{z2}} = \frac{4\pi}{2\pi} = 2, \quad (2.96)$$

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:

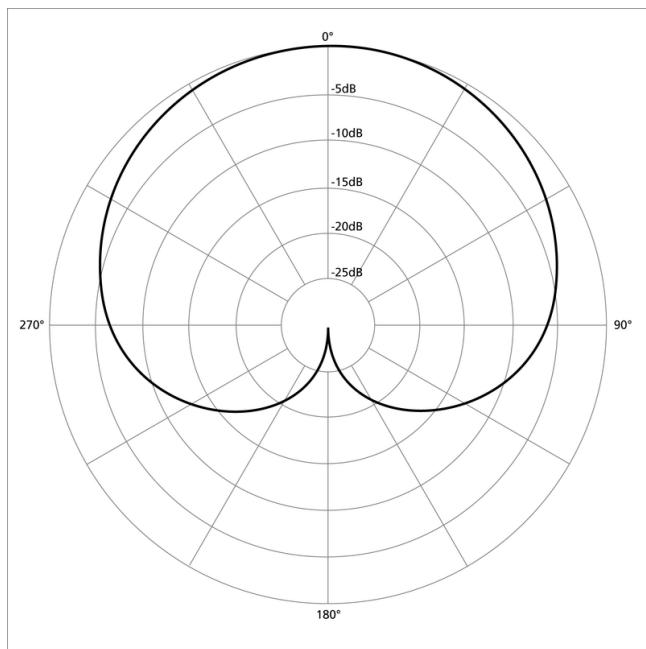
$$\frac{J_2}{J_1} = \frac{\frac{P_{a2}}{\Omega_{z2} r^2}}{\frac{P_{a1}}{\Omega_{z1} r^2}} = \frac{2\Omega_{z1}}{\Omega_{z2}} = \frac{2 \cdot 4\pi}{2\pi} = 4. \quad (2.97)$$

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 ѓонш<sup>4</sup>, како и кај довикувањето со поставување на рацете како инка на устата.

## 2.11 Крива на насоченост

Сферните звучни извори за кои заборувавме до сега имаат ненасочено зрачење. Во праксата изворите на звук имаат облици различни од сфера, па во нивната непосредна близина, релативно на брановата должина, звучното поле е во општ случај насочено.

<sup>4</sup>Ова успева само за ниските фреквенции, за кои изворот можеме да го сметаме за точkest, но и за кои можеме реално да го поставиме до сидот релативно на брановата должина на звукот.



**Сл. 2.9:** Крива на зрачење на звучен извор.<sup>5</sup>

Графичкиот приказ на насоченоста на звучниот извор се нарекува **кривата на насоченост**, Сл. 2.9. Таа во поларен координатен систем ја претставува насоченоста на звучниот извор како функција од аголот на зрачење  $\theta$  пресметан во однос на оската на зрачење:

$$\Gamma = \frac{p_\theta}{p_0}, \quad (2.98)$$

каде  $p_\theta$  е звучниот притисок генериран од изворот под агол  $\theta$ , 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 наликува на 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 2.76:

$$P_a = \oint_S J_\theta dS = J_0 \oint_S \frac{J_\theta}{J_0} dS = J_0 \oint_S \Gamma^2 dS = J_0 r^2 \oint_0^{4\pi} \Gamma^2 d\Omega, \quad (2.99)$$

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

$$\Omega_z = \oint_0^{4\pi} \Gamma^2 d\Omega, \quad (2.100)$$

Од таму имаме:

$$J_0 = \frac{P_a}{\Omega_z r^2}. \quad (2.101)$$

Споредено со (2.95) 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  $\Omega_z$ . За подобро изразување на ова се воведува **кофициентот на насоченост  $\gamma$** :

$$\gamma = \frac{4\pi}{\Omega_z}, \quad (2.102)$$

<sup>5</sup>Galak76 "Polar pattern cardioid" <https://en.wikipedia.org/wiki/Microphone>.

па за  $J_0$  имаме:

$$J_0 = \gamma \frac{P_a}{4\pi r^2}. \quad (2.103)$$

За произволен агол  $\theta$  од оската на зрачење, интензитетот на звукот ќе биде даден со:

$$J_\theta = \gamma \frac{P_a}{4\pi r^2} \Gamma^2. \quad (2.104)$$

## 2.12 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 описани со (2.49):

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

За брзината на воздушните честички според (2.59) имаме:

$$v = \frac{A_+}{\rho c} e^{j(\omega t - kx)} - \frac{A_-}{\rho c} e^{j(\omega t + kx)}. \quad (2.105)$$

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:

$$\left. \frac{p}{v} \right|_{x=0} = \rho c \frac{A_+ + A_-}{A_+ - A_-} = Z_s. \quad (2.106)$$

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

$$r = \frac{A_-}{A_+} = \frac{Z_s - \rho c}{Z_s + \rho c} = \beta e^{j\delta}, \quad (2.107)$$

каде  $\beta$  го дава односот на магнитудите на двата брана е  $\delta$  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.<sup>6</sup> За звуковод, посодветно е да ја искористиме акустичката импеданса за изразување на  $r$ :

$$r = \frac{Z_a - \frac{\rho c}{S}}{Z_s + \frac{\rho c}{S}}, \quad (2.108)$$

каде  $S$  е површината на напречниот пресек на звуководот.

За екстремниот случај кога  $Z_s \rightarrow \infty$ <sup>7</sup> 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 (2.49) ќе биде:

$$p(0, t) = 2A_+ e^{j\omega t}, \quad (2.109)$$

<sup>6</sup>Оваа појава е причината зошто во радиотехниката се поставува импеданса на крајот од водовите еднакви со онаа на самиот вод, наречена „терминатор“.

<sup>7</sup>Аналогно на отворен вод во електричен домен.

а брзината на воздушните честички според (2.105) ќе е:

$$v(0,t) = 0, \quad (2.110)$$

што е и логично за бесконечна импеданса.

Во случај пак, кога  $Z_s = 0^8$  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:

$$p(0,t) = 0, \quad (2.111)$$

$$v(0,t) = 2 \frac{A_+}{\rho c} e^{j\omega t}. \quad (2.112)$$

Во ошт 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:

$$r = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}. \quad (2.113)$$

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:

$$r = \frac{\frac{\rho_2 c_2}{S_2} - \frac{\rho_1 c_1}{S_1}}{\frac{\rho_2 c_2}{S_2} + \frac{\rho_1 c_1}{S_1}}. \quad (2.114)$$

Во случај кога во звуководот нема промена на средината, туку само на напречниот пресек, повторно ќе се јави рефлексија.<sup>9</sup> Во тој случај коефициентот на рефлексија ќе биде даден со:

$$r = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2}. \quad (2.115)$$

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 2.1. Во звуковод ова би било задоволено ако едниот негов крај е затворен.

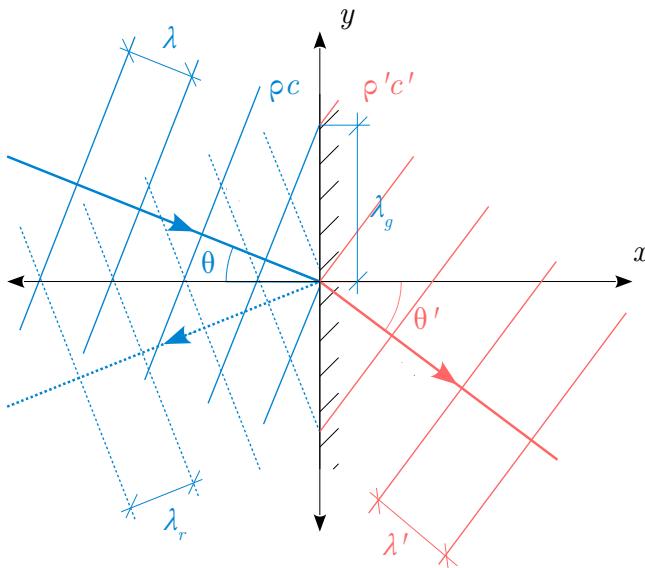
Спротивниот услов, т.е.  $Z_s \ll \rho c$  или  $\rho_2 c_2 \ll \rho_1 c_1$ , потешкото може да се реализира при простирање на звукот низ воздухот, но може да се сртне кога звучниот бран се простира во водата и доаѓа до нејзината површина. Во звуковод условот  $\rho_2 c_2 / S_2 \ll \rho_1 c_1 / S_1$  може да се задоволи кога  $S_2 \gg S_1$ , како на пример кога едниот негов крај е отворен во слободен простор.<sup>10</sup>

---

<sup>8</sup>Аналогно на куса врска во електричен домен.

<sup>9</sup>Ваков вид на рефлексија е суштински за обликувањето на преносната функција на вокалниот тракт при зборувањето.

<sup>10</sup>Во аналогијата со електричен вод, затворен звуковод одговара на отворен вод, а отворен звуковод одговара на кусо врзан вод.



Сл. 2.10: Рефлексија на звук при коса инциденција.

## 2.13 Рефлексија на звук при коса инциденција

При коса инциденција на звучен бран на гранична површина, прикажано на Сл. 2.10 може да се употребат законите на геометристката оптика ако граничната површина е со димензии поголеми од брановата должина  $\lambda$ . Еквивалентната област во акустиката се нарекува **геометристка акустика** и во неа се анализира простирањето на тенки спнопови акустичка енергија наречени **звукни зраци**.

Рефлектираниот бран при коса инциденција се движи со истата брзина  $c$  па за да ја задржи истата бранова должина  $\lambda$  аголот на одбивање  $\theta_r$  мора да е ист со оној на инциденција  $\theta$ . 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 двата брана на граничната површина  $\lambda_g$  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**:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta'} = \frac{\theta}{\theta'} . \quad (2.116)$$

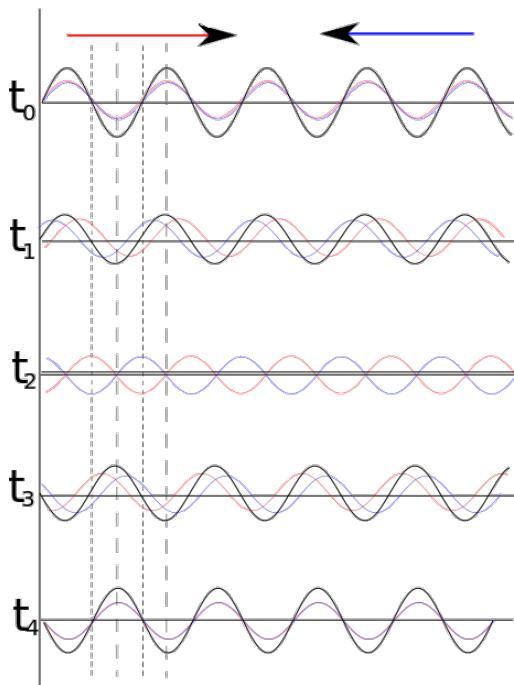
Може да се види дека кога брзината на простирање на звукот во втората средина е поголема, т.е.  $c' > c$ , тогаш и  $\theta' > \theta$ . Поради ова постои агол на инциденција за кој бранот кој продира во новата средина ќе биде под агол  $\theta' = \pi/2$ . Над овој агол, нема да има простирање во новата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

$$\sin \theta = \frac{c}{c'} . \quad (2.117)$$

## 2.14 Стојни бранови

Од изразот за коефициентот на рефлексија (2.107) и изразот за ендодимензионални бранови (2.49) можеме да го напишеме изразот за звучниот притисок при нормална инциденција:

$$p = A_+ (e^{j(\omega t - kx)} + \beta e^{j(\omega t + kx + \delta)}) . \quad (2.118)$$



**Сл. 2.11:** Стоен бран добиен како збир на два брана кои се простираат во спротивни насоки.<sup>11</sup>

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

$$\begin{aligned} p &= A_+ (e^{j(\omega t - kx)} + \beta e^{j(\omega t + kx + \delta)}) = \\ &= A_+ [\cos(-kx) + j \sin(-kx) + \cos(kx) + j \sin(kx)] e^{j\omega t} = \\ &= 2A_+ \cos kx e^{j\omega t}. \end{aligned} \quad (2.119)$$

Може да забележиме дека иако амплитудата зависи од растојанието  $x$ , звучниот бран описан со (2.119) 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 напазад, 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. 2.11.

За брзината на воздушните честички важи:

$$v = 2 \frac{A_+}{\rho c} \sin kx e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})}, \quad (2.120)$$

што значи дека повторно се работи за стоен бран, но кој е фазно поместен во однос на притисокот за  $\pi/2$ . Според (2.73), интензитетот на стојниот бран е:

$$J = pv \cos \phi = pv \cos \frac{\pi}{2} = 0. \quad (2.121)$$

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.

<sup>11</sup>By Wjh31 - File:Standing\_wave\_2.gif, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1030472287>.

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 оваа оска звучниот притисок ќе биде идентичен со оној на граничната површина при појавата на стојни бранови. Ова можеме да го искористиме за анализа на проблемот на рефлексија на звучните бранови преку представување на рефлектираниот бран како бран произведен од звучен извор симетрично поставен на оригиналниот во однос на граничната површина.

## 2.15 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 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:

$$J = J_0 e^{-mx}, \quad (2.122)$$

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:

$$J = J_0 \frac{r_0^2}{r^2} e^{-m(r-r_0)}, \quad (2.123)$$

или изразено преку притисокот:

$$p = p_0 \frac{r_0}{r} e^{-\frac{m(r-r_0)}{2}}. \quad (2.124)$$

Ако го пресметаме слабеењето во dB добиваме:

$$M = 20 \log \frac{p_0}{p} = 20 \log \frac{r}{r_0} + 4,34m(r - r_0). \quad (2.125)$$

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%.

## 2.16 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 Audacity.

#### 2.16.1 Audacity

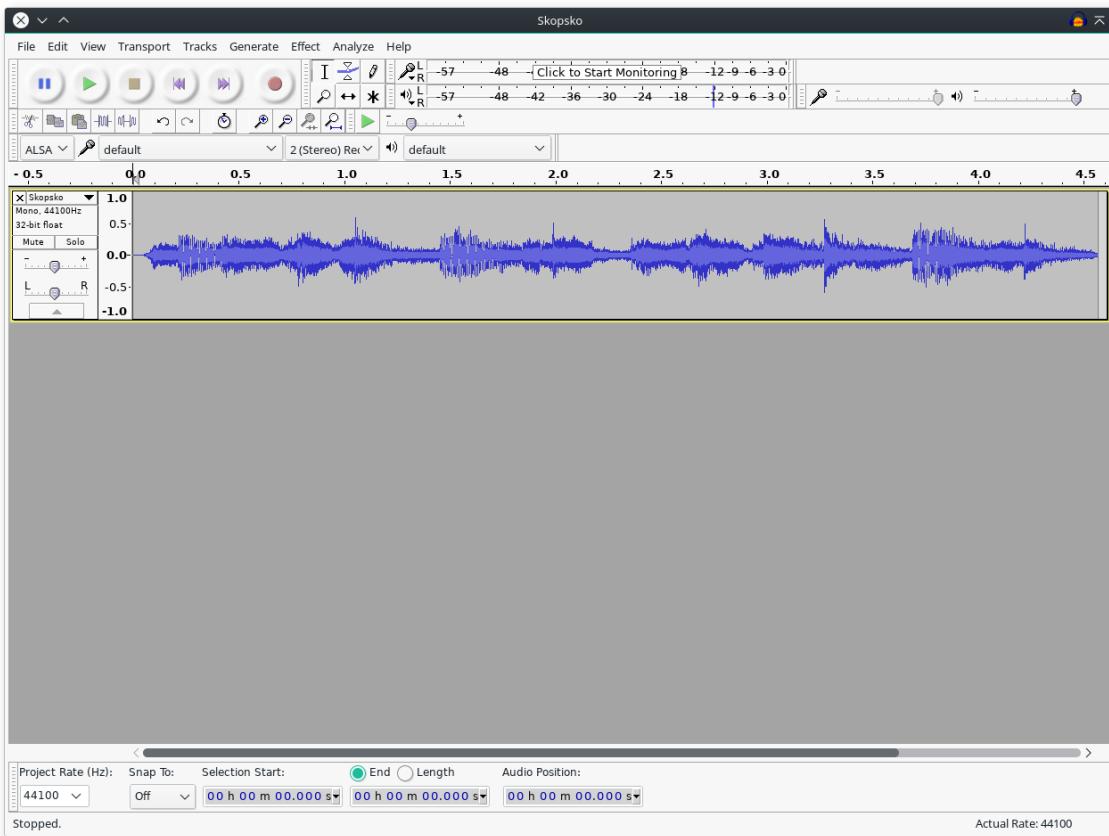
Audacity<sup>12</sup> е отворен софтвер за едитирање и снимање на дигитално аудио, достапен за сите оперативни системи, Сл. 2.12. Неговиот развој го започнале Доминик Мацони и Роџер Даненберг во 1999 во Универзитетот Карнеги Мелон и е иницијално објавен во 2000 како верзија 0.8. Од 2011, тој е 11-от најсимнуван софтвер на SourceForge, со 76,5 милиони симнувања. Audacity е добитник на наградата за најдобар проект за мултимедија од заедницата SourceForge 2007 и 2009. Во 2015 е преместен на FossHub каде за 4 месеци постигнува 10 милиони симнувања.<sup>13</sup>

Освен тоа што поддржува снимање од повеќе извори, Audacity може да се искористи за процесирање на сите типови на аудио, преку додавање на ефекти како нормализација, поткастрување, и прелевање (fading). 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 OCR (Oxford, Cambridge and RSA Examinations) во Обединетото Кралство. Главните особини на Audacity 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.

<sup>12</sup>Audacity. <http://www.audacityteam.org/>

<sup>13</sup>Wikipedia: Audacity (audio editor). [https://en.wikipedia.org/wiki/Audacity\\_\(audio\\_editor\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Audacity_(audio_editor))



**Сл. 2.12:** Отворен аудио файл во главниот прозорец на Audacity.

- 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.
- Спектрална анализа со употреба на FFT.
- Подршка 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 пресети.

## 2.16.2 Основни особини на звукот

Да го искористиме Audacity 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. 2.12.

Со кликувањето 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 смениме 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.

**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.

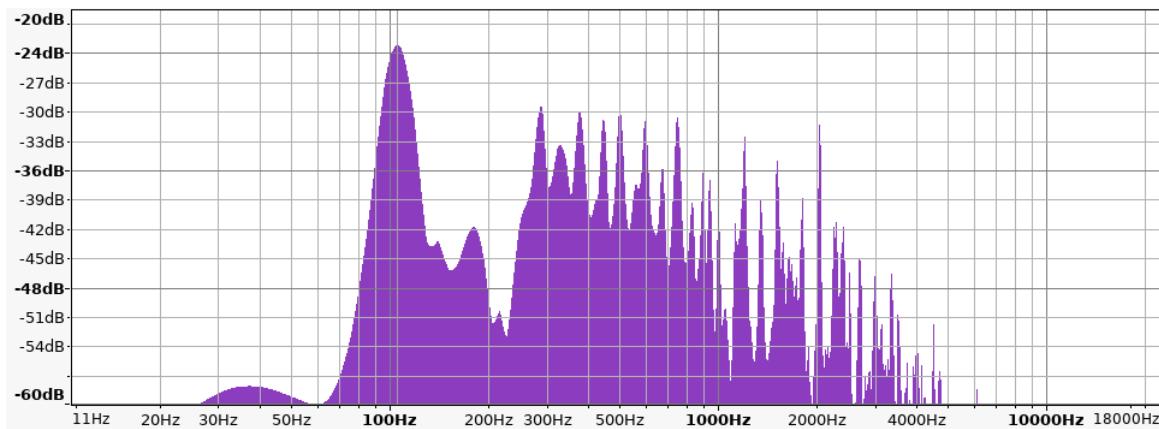
✓ **Задача за час.** Зумирајте дел од нашиот фајл до ниво на ms и нацртајте го неговиот временски облик! Зумирани на ова ниво можеме со пуштање на аудиото да ги видиме промените на притисокот кои ги „гледа“ ушното тапанче.

✓ **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.** Периодичните звучни бранови по Фурье, без оглед на нивниот временски облик, секогаш можат математички да се разложат на елементарни синусни функции и да се претстават со равенството:

$$p(t) = \frac{c_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(2\pi n f_0 t + \theta_n), \quad (2.126)$$

каде  $c_0, c_1, \dots, c_n$  се амплитудите на косинусите со фреквенции  $0, f_0, \dots, n f_0$  и фаза  $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_n$ , а  $f_0$  е основната фреквенција на звукот која се нарекува и **основен хармоник**. Останатите фреквенции се мултипили од оваа фреквенција и се нарекуваат **виши хармоники**.



Сл. 2.13: Спектар на аудио трaka во Audacity.

Ако промената во средината што ја внесува звучниот бран не е периодична, станува збор за апериодичен звук. Неговиот спектар според Фурье не е дискретен туку континуиран. Тој е даден во интегрална форма со равенството:

$$p(t) = \int_0^{\infty} c(f) \cos(2\pi ft + \theta(f)) df. \quad (2.127)$$

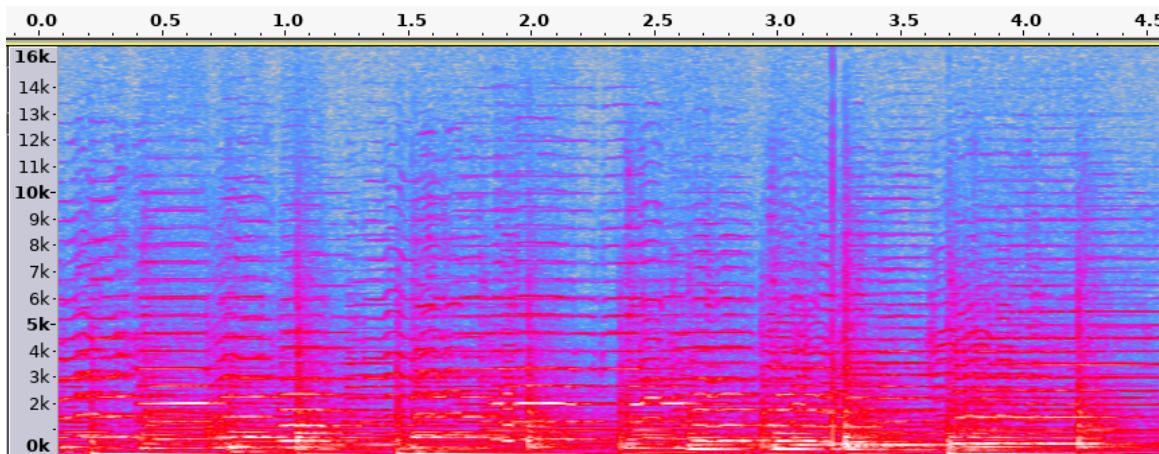
Амплитудите на елементарните синусоиди и нивните фази го определуваат амплитудниот односно фазниот фреквенциски спектар на звучниот притисок, соодветно. Овие спектри се исцртуваат на тој начин што на апсисата се нанесува фреквенција а на оординатата амплитудата (фазата) што соодветствува на секоја од фреквенциите. Најчесто вредностите за фреквенција и амплитуда се цртаат во log–log скала, односно логаритамски се распределени долж оските. Прикажувањето на спектарот во Audacity се прави со избор на Analyze > Plot Spectrum од менијата, Сл. 2.13. 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  $\Delta f$ , а колку временската резолуција ако претпоставиме 50% преклопување на прозорците и  $f_s = 44,1$  kHz?
- Анализирај ја целата аудио трaka Skopsko и нацртај го нејзиниот спектар!

За да видиме како се менува спектарот на аудио сигналот во времето се користи **спектрограмот** кој претставува 3D приказ кој на  $x$ -оската има време, на  $y$ -оската фреквенција, а на  $z$ -оската амплитуда, прикажан на Сл. 2.14. Со овој приказ може да видиме во кои временски моменти кои делови од спектарот се најактивни. За да го прикажеме може 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.



Сл. 2.14: Спектрограм на аудио трака во Audacity.

### 2.16.3 Анализа на прост, сложен и апериодичен звук

Постојат два главни вида на звучни бранови – **периодични** и **апериодични**. Периодичните понатаму се делат на **прости** и **сложени**. Во продолжение ќе го разгледаме обликот на фреквенциските спектри на секој од овие видови звук.

Наједноставниот пример за периодичен звук кој уште се нарекува и прост звук е оној чиј звучен притисок временски се менуваат простопериодично. Амплитудниот спектар на овој вид на звук е дискретен и се состои од единствен Дираков импулс поставен на фреквенцијата на синусната функција. Висината на импулсот ја покажува амплитудата на звучниот притисок. Освен звучната вилушка, извори на прост звук во природата не постојат.<sup>14</sup>

Периодичниот звук кој не е од простопериодична природа се нарекува сложен звук. Амплитудниот спектар е повторно дискретен и претставува низа од Диракови импулси. Дираковиот импулс со најниска фреквенција во спектарот соодветствува на основниот хармоник на звучниот бран, додека останатите соодветствуваат на вишите хармоници. Изворите на периодичен звук, во прв ред музичките инструменти, поради самата природа на создавање на звукот преку резонанса и стојни бранови, секогаш генерираат сложен звук со спектар кој содржи хармоници на основниот тон.

Апериодичните звуци имаат континуиран спектар и човекот ги поима како шум. Тие се важен и неразделен дел од сите звучни појави кои не опкружуваат, вклучувајќи ја и музиката. Во природата, звукот најчесто е комбинација од вторите два вида на звук – сложен звук и шум и се нарекува **мешан звук**. На пример, ударот на тапанот или тарабуката имаат своја висина како и останатите инструменти, иако главна намена им е да генерираат шумна компонента, т.е. удар. Од друга страна пак, сите природни извори на сложен звук во транзиентниот период пред и по воспоставувањето на стабилниот музички тон генерираат апериодична компонента, т.е. шум, а кај некои нејзе ја има и за целото времетраење на музичкиот тон. Пример за ова е ударот со перцето по жиците на гитарата или пак шуштењето при свирењето во ниската скала на кавалот.

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

✓ **Задача за час.** Со Audacity 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.

## 2.16.4 Анализа на звучна боја

Бојата на тонот, на француски *timbre*, е карактеристиката според која можеме да разликуваме кои звучните извори меѓу себе. На пример, со нејзина помош 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.

✓ **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 селектирајте дел со изразени хармоници, на пр. за време на некоја од самогласките.

## 2.16.5 Снимање на аудио

За да го видиме спектарот на вашиот глас, треба првин да направиме снимка. Audacity 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 трaka 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 средениот говорен сигнал со менито File > Export Selected Audio. Со помош на спектрограмот или спектарот анализирајте го вашиот глас и откријте која е вашата основна фреквенција  $f_0$ !

## Поглавје 3

# 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:

$$C = C'l, \quad (3.1)$$

каде  $C'$  е подолжната капацитивност на водот. Аналогно на него, еден звуковод со кратка должина чиј крај е затворен<sup>1</sup>, може да се претстави преку една концентрирана **акустичка капацитивност**  $C_a$ :

$$C_a = C'_a l = \frac{Sl}{\rho c^2} = \frac{V}{\rho c^2}, \quad (3.2)$$

каде  $V$  е волуменот на звуководот. Од (3.2) 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:

$$q_i = p_i \omega C_a, \quad (3.3)$$

односно:

$$p_i = \frac{1}{\omega C_a} q_i. \quad (3.4)$$

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:

$$L = L'l, \quad (3.5)$$

---

<sup>1</sup>Како 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.

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

$$m_a = m'_a l = \frac{\rho l}{S}. \quad (3.6)$$

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:

$$q_i = \frac{p_i}{\omega m_a}. \quad (3.7)$$

Важи и:

$$p_i = \omega L_a q_i. \quad (3.8)$$

Поради тоа што акустичкиот проток треба да ги придвижи и воздушните честички непосредно до отворот на кратката цевка, потребна е корекција на (3.6):

$$m_a = \frac{\rho l_{eff}}{S}, \quad (3.9)$$

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

$$l_{eff} = l + 0,85r_0, \quad (3.10)$$

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

$$l_{eff} = l + 2 \cdot 0,85r_0 = l + 1,7r_0. \quad (3.11)$$

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:

$$R_a = \frac{8\mu l}{r_0^4 \pi}, \quad \text{за } r_0 < \frac{2000}{\sqrt{f}}. \quad (3.12)$$

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

## 3.1 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:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F - r \frac{dx}{dt} - kx . \quad (3.13)$$

$$m \frac{dv}{dt} + rv + k \int v dt = F , \quad (3.14)$$

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:

$$L \frac{dI}{dt} + RI + \frac{1}{C} \int I dt = U . \quad (3.15)$$

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 4

## Психоакустика

**Психоакустиката** 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 2 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**.

### 4.1 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. 4.1 може да се подели на следните три дела:

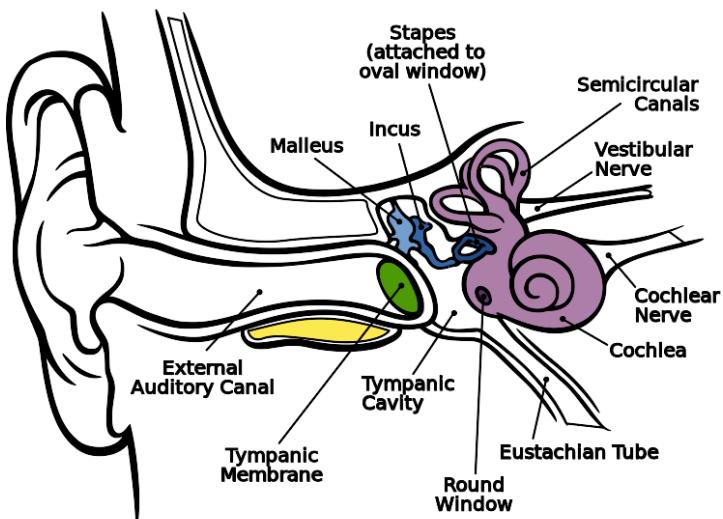
- **надворешно уво** – одговорно за примање на звучните осцилации од околната со ушната школка (*pinna*) и нивното насочување кон внатрешноста на увото преку надворешниот слушен канал. Обликот на ушната школка врши различно спектрално филтрирање во зависност од тоа од кој вертикалниот агол на инциденција на звучниот бран. Овие т.н. трансфер функции на главата (Head-Related Transfer Function HRTF) ги користи мозокот за одредување на насоката од која доаѓа звукот.<sup>1</sup> 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

---

<sup>1</sup>Ова и причината зошто не можеме да кажеме од која висина доаѓа звукот ако тој доаѓа од позади нас.

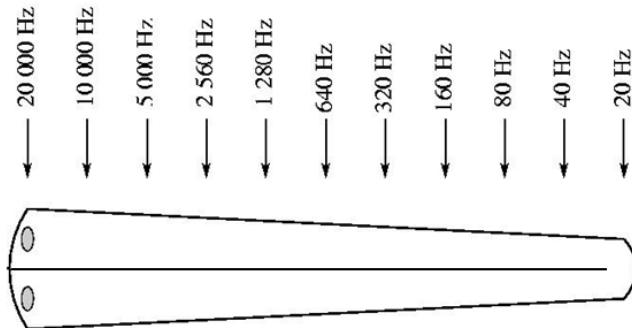
и овалниот прозорец, средното уво реализира прилагодување на акустичката импедансата помеѓу воздухот и течната средина во ушното полжавче.<sup>2</sup>

- **внатрешно уво** – одговорно за преобразба на акустичките осцилации од механички домен во невронски импулси преку ушното полжавче (cochlea); во внатрешното уво се поместени и полукружните канали одговорни за рамнотежа кај човекот.



Сл. 4.1: Состав на човековото уво.<sup>3</sup>

Ушното полжавче е составено од еден долг канал полн со лимфна течност во која се пренесуваат акустичките осцилации. Внатре во каналот се наоѓа базилијарната мембрана која е така направена што за различна фреквенција на акустичките осцилации, вибрира различен дел од нејзината должина. Така на пример, звучните бранови со повисока фреквенција предизвикуваат максимални осцилации во почетокот од каналот, додека тие со пониска фреквенција делуваат на неговиот крај, како што е прикажано на Сл. 4.2. На тој начин таа всушност претставува конвертор на фреквенција во растојание.



Сл. 4.2: Фреквенциска чувствителност на базилијарната мембрана.

Во внатрешноста на базилијарната мембрана се наоѓа органот на Корти кој содржи околу 15 000 клетки влакна, кои пак претставуваат завршетоци на аудиторниот нерв.

<sup>2</sup>Без ова прилагодување на импедансите би била пренесена само 0,1% од акустичката енергија од воздухот во внатрешното уво.

<sup>3</sup>"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](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anatomy_of_the_Human_Ear_en.svg#/media/File:Anatomy_of_the_Human_Ear_en.svg)

Вибрациите на базилијарната мембра на предизвикуваат испраќање на нервни импулси од овие клетки влакна. На овој начин ушното полжавче врши фреквенциска анализа на звучната појава, своевидна физиолошка Фуриеова трансформација, овозможувајќи ни да го „видиме“ спектарот на звукот. Ова ја објаснува неосетливоста на човекот кон временскиот облик на звучните појави (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 звукот.

## 4.2 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 почувствителни 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 на нервите предизвикува нивна механичка вибрација која во фаза со оригиналната акустичка побуда, ја засилува.<sup>4</sup> 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 мембра на.

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.

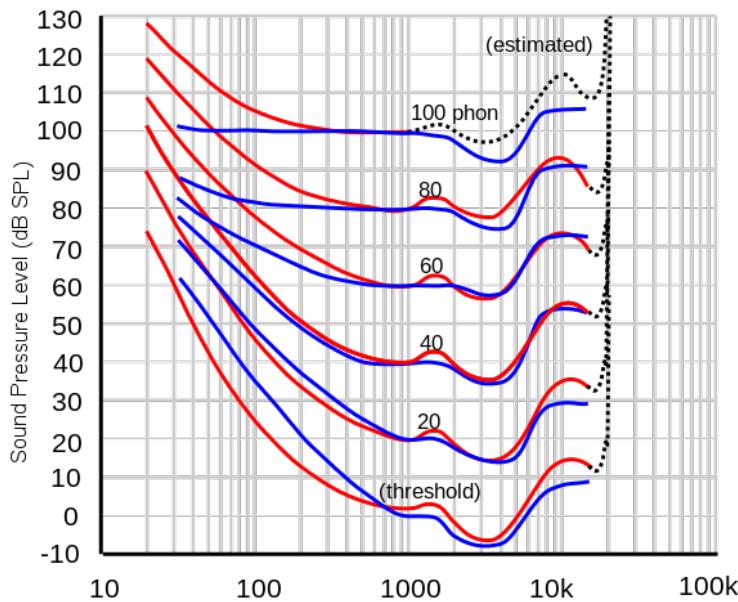
### 4.2.1 Јачина на звук

**Јачината на звукот  $\Lambda$**  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. 4.3, 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  $\Lambda$  [phon] и нивото на звукот  $L$  [dB] да се поклонуваат 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

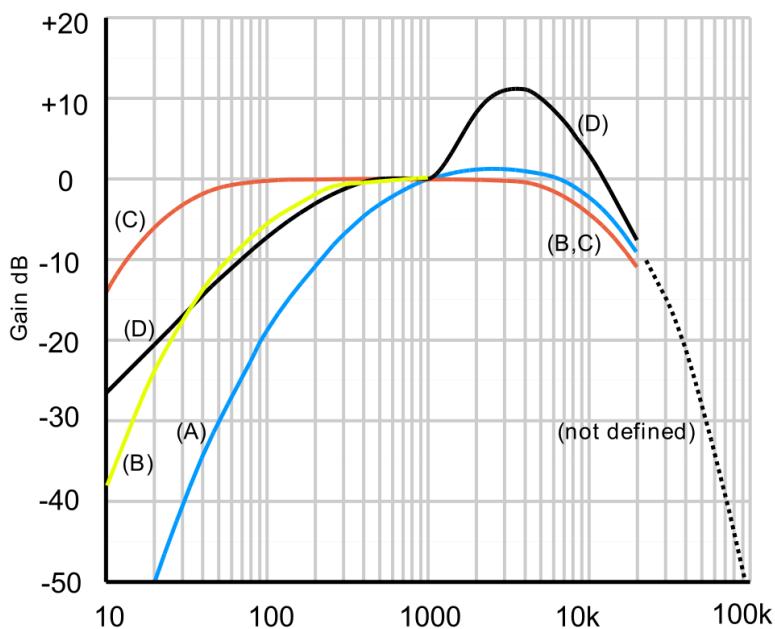
---

<sup>4</sup>Овој интересен феномен може да се види во видеото: Fernando Cordova Tapia, *Dancing hair cell (ear)*, <https://www.youtube.com/watch?v=Xo9bwQuYrRo>.



**Сл. 4.3:** Криви на еднаква чујност, или изофонски криви, измерени според Флечер и Мунсон (сино) и стандардизирани според ISO стандардот (првено).<sup>5</sup>

мерење нудат перцептуална корекција на измереното ниво преку соодветно филтрирање на спектарот. Постојат неколку тежински криви за оваа цел: А, В, С, Д и Z, прикажани на Сл. 4.4. Првата А-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 Нивото измерено со оваа крива се дава во dB(A), односно dBA. Од другите криви во употреба е кривата С која се користи за поголеми нивоа на бучава.



**Сл. 4.4:** Тежински криви за мерење на перцептуално ниво на бучава.<sup>6</sup>

<sup>5</sup>"Lindos4" by Lindosland <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lindos4.svg#/media/File:Lindos4.svg>

<sup>6</sup>"Acoustic weighting curves" by Lindosland [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Acoustic\\_weighting\\_curves\\_%281%29.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Acoustic_weighting_curves_%281%29.svg)

### 4.2.2 Гласност на звук

**Гласноста на звукот**  $\Gamma$  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 (интензитетот) ќе се менува за ист процент (експоненцијално). Овој закон е изразен со следново равенство:

$$d\Gamma = k \frac{dp}{p}, \quad (4.1)$$

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:

$$\Gamma = k \ln \frac{p_0}{p}. \quad (4.2)$$

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

- почувствувањата 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 изведуват следните равенки кои ја опишуваат нивната врска:

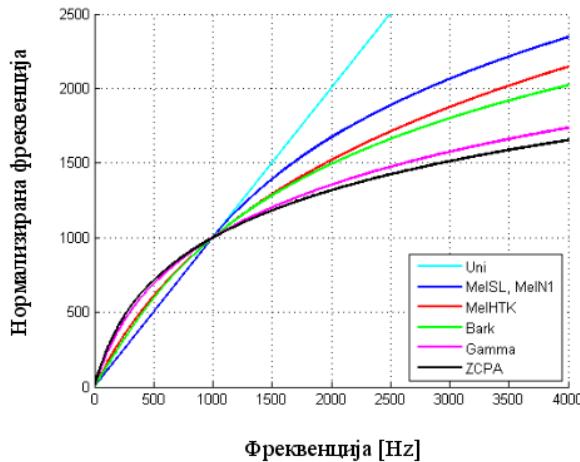
$$\Gamma = 2^{\frac{\Lambda-40}{10}}, \quad (4.3)$$

$$\Lambda = \frac{10}{\log 2} \log \Gamma + 40. \quad (4.4)$$

## 4.3 Поимање на фреквенцијата на звукот

Поради нерамномерната распределеност на фреквенциската осетливоста на базилијарната мембра на прикажана на Сл. 4.2, 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 логаритамски. За мерење на висината се предложени неколку фреквенциски скали, во прв ред Мел скалата и Барк скалата, прикажани на Сл. 4.5. 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 се помали растојанија во mel. Иако нема строго дефинирана формула за пресметување на mel, често се употребува следното равенство:

$$M = 2595 \log_{10} \left( 1 + \frac{f}{700} \right). \quad (4.5)$$



Сл. 4.5: Мел и другите фреквенциски скали за мерење на перцептуалната висина на звукот.

## 4.4 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“.

## 4.5 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 Python.<sup>7</sup>

#### 4.5.1 Слободен и отворен софтвер во научните истражувања

Со преминот на биомедицинските сигнали во **дигитален домен**, се отвораат вратите кон примена на различните техники на дигиталната обработка на сигналите за нивната обработка. Во многу области од биомедицинското инженерство, се работи на анализа на сликите добиени со различните технологии на диагностицирање, односно анализа на составот и работењето на човековото тело.

<sup>7</sup>Делови од текстот 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/>

Еден од најкористените пакети во научните истражувања е **Матлаб**<sup>8</sup>. Матлаб, или „Matrix Laboratory”, нуди големи можности за дигитална обработка на разнородни податоци и сигнали. Тој може да се употреби за развој на алгоритми во најразлични области од инженерската практика, меѓу кои во дигиталната обработка на биомедицинските сигнали.

Денес сè повеќе научници своето истражување го засноваат на платформи базирани на **отворен софтвер**<sup>9</sup>. Ова пред сè се должи на филозофијата на отворениот, а особено **слободниот софтвер**<sup>10</sup> основан од **Ричард Сталман**, како и поширокото **движење за отвореност**<sup>11</sup>, а тоа е заедништво во создавањето и напредувањето на технологијата и човештвото.<sup>12</sup> Од практичен аспект, отворениот софтвер има низа предnosti над затворениот софтвер и тоа:

- **нултата цена** – 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.<sup>13</sup>
- **безбедноста** – поради достапноста на изворниот код, не постои начин производителот на софтерот 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.<sup>14</sup>
- **слободата од производителот** – како корисници на отворениот софтвер, вие не сте затворени во екосистемот на производителот. Истиот тој софтвер може да биде превземен од друга заедница на програмери и да продолжи неговото одржување и развој во друга насока.<sup>15</sup>
- **подобар квалитет** – при воспоставување на критична големина на заедницата

---

<sup>8</sup>MATLAB®, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>

<sup>9</sup>Wikipedia. *Open-source software*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Open-source\\_software](https://en.wikipedia.org/wiki/Open-source_software)

<sup>10</sup>Wikipedia. *Free software movement*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Free\\_software\\_movement](https://en.wikipedia.org/wiki/Free_software_movement)

<sup>11</sup>Wikipedia. *Open-source*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Open\\_source](https://en.wikipedia.org/wiki/Open_source)

<sup>12</sup>Richard Stallman, *Free software, free society*, TEDxGeneva 2014. [https://www.youtube.com/watch?v=Ag1AK1l\\_2GM](https://www.youtube.com/watch?v=Ag1AK1l_2GM)

<sup>13</sup>Цената на комерцијалниот софтвер може да достигне многу големи суми, особено ако се работи за негова примена надвор од академската заедница. На пример, лиценца за основната инсталација на Матлаб, т.н. core, чини \$2.650 за индивидуални корисници, \$625 за академски корисници, а \$29 за студенти. Покрај неа, за вообичаена работа се потребни некои од специјализираните пакети, т.н. toolbox-и, на пр. Signal Processing Toolbox-от кој чини: \$1.250, \$250 и \$16 за трите типови на корисници, соодветно. Овие цени се наведени се моменталните дадени на <https://www.mathworks.com/pricing-licensing/index.html?intendeduse=comm&prodcode=ML>.

<sup>14</sup>На пример во Windows 10 производителот го задржува правото да ги чува вашите приватни податоци како што стои 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 ...” [1]

Истите механизми се додадени во претходните верзии на Windows преку автоматските апдејти, но можат да се исклучат [2].

[1] 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/>

[2] Ashley Allen, How to Stop Windows 7 and 8 From Spying on You.

<http://www.etechnix.com/stop-windows-7-8-spying/>

<sup>15</sup>Една од стратешките определби на Apple е да ги затворат своите корисници во својот екосистем [3].

[3] Alonso Canada, Take A Lesson from Apple: A Strategy to Keep Customers in Your Ecosystem, Forbes, Nov 12, 2012. <http://www.forbes.com/sites/jump/2012/11/12/take-a-lesson-from-apple-a-strategy-to-keep-customers-in-your-ecosystem/#252f975343fa>

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**<sup>16</sup>, кое во основата оперативниот систем **Линукс**<sup>17</sup> и 600-те **ГНУ/Линукс дистрибуции**<sup>18,19</sup>, првично напишано од **Линус Торвалдс**, денес претставува најголемиот здружен проект во историјата на човештвото со околу 6000 активни развивачи, над 20 милиони редови на код, и со проценета развојна вредност од над 2 милијарди евра.

#### 4.5.2 Употреба на Python за истражување

Во духот на слободниот софтвер, а следејќи ги светските научни трендови, во предметот ќе работиме со слободен/отворен софтвер. За процесирањето на дигиталните биомедицински сигнали ќе биде искористен програмскиот јазик **Python**<sup>20</sup> и тоа неговата постара верзија **2.7**<sup>21</sup>, заедно со библиотеките:

- **NumPy** – за работа со вектори и матрици,<sup>22</sup>
- **SciPy** – за дигитално процесирање на сигнали,<sup>23</sup>
- **Matplotlib** – за плотирање и приказ на слики.<sup>24</sup>

Освен овие постојат мноштво библиотеки за Python кои се користат во научните истражувања како на пример **SciKit-Image**<sup>25</sup> за обработка на слики, **Pandas**<sup>26</sup> за статистички анализи, **Sympy**<sup>27</sup> за симболичка математика, **SciKit-Learn**<sup>28</sup> за машинско учење итн.

Како интерфејс кон Python ќе ја користиме интерактивната конзола **IPython**<sup>29</sup> и научната развојна средина за Python **Spyder**<sup>30</sup> прикажана на Сл. 4.6.

#### 4.5.3 Воведни материјали за Python, NumPy, Matplotlib, SciPy, SciKit-Image

Добар вовед во програмскиот јазик **Python**, од аспект на неговата примена за истражување, може да се најде во книгата **Scipy Lecture Notes** (Varoquaux et al., 2015) која е во целост достапна на интернет. Оваа книга претставува отворен проект и во неа, благодарејќи на многуте автори и придонесувачи, се поместени основите за работа со

---

<sup>16</sup>Wikipedia. *Linux kernel*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Linux\\_kernel](https://en.wikipedia.org/wiki/Linux_kernel)

<sup>17</sup>Wikipedia. *Linux*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Linux>

<sup>18</sup>Wikipedia. *List of Linux distributions*. [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_Linux\\_distributions](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Linux_distributions)

<sup>19</sup>DistroWatch. <https://www.distrowatch.com/>

<sup>20</sup>Python <https://www.python.org/>

<sup>21</sup>Ова се должи на некомплетно завршеното портирање на пакети развиени од научната заедница за работа со Python.

<sup>22</sup>NumPy <http://www.numpy.org/>

<sup>23</sup>SciPy <http://www.scipy.org/>

<sup>24</sup>Matplotlib <http://matplotlib.org/>

<sup>25</sup>SciKit-Image <http://scikit-image.org/>

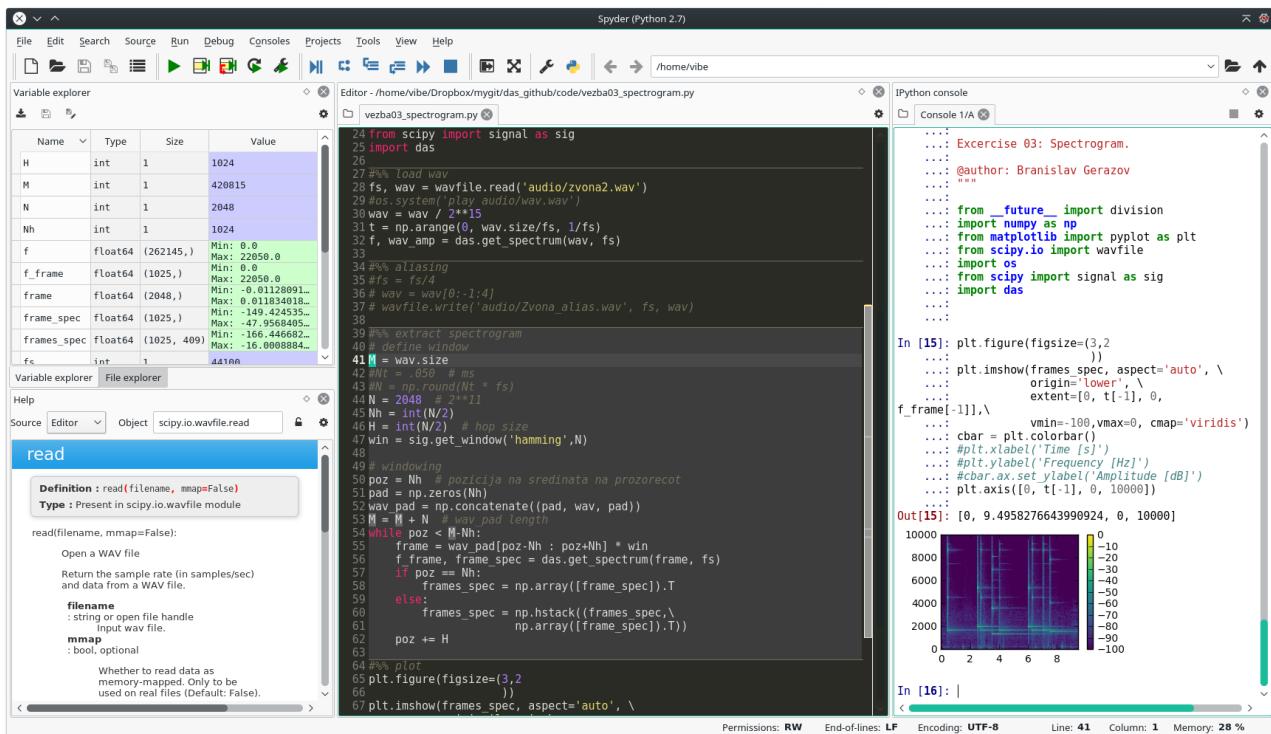
<sup>26</sup>Pandas <http://pandas.pydata.org/>

<sup>27</sup>Sympy <http://www.sympy.org/en/index.html>

<sup>28</sup>SciKit-Learn <http://scikit-learn.org/stable/>

<sup>29</sup>IPython Interactive Computing <http://ipython.org/>

<sup>30</sup>Spyder – The Scientific PYthon Development EnviRonment <https://github.com/spyder-ide/spyder>



Сл. 4.6: Изглед на работната средина Spyder.

Python, NumPy, SciPy, Matplotlib, SciKit-Image, како и SciKit-Learn, SymPy, па дури и Cython.

Добар поопшт вовед во програмскиот јазик Python е и официјалниот туторијал кој може да се најде на неговата вебстраница.<sup>31</sup> Други добри книги со слободен пристап за основите на Python се:

- **Invent Your Own Computer Games with Python** (Sweigart, 2010).<sup>32</sup>
- **A byte of Python.**<sup>33</sup>

#### 4.5.4 Генерирање на звук во Python

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

<sup>31</sup>The Python Tutorial. <https://docs.python.org/2.7/tutorial/index.html>

<sup>32</sup><http://inventwithpython.com/>

<sup>33</sup>[http://files.swaroopch.com/python/byte\\_of\\_python.pdf](http://files.swaroopch.com/python/byte_of_python.pdf)

wav фајл, а потоа да ја искористиме системската play наредба од SoX.<sup>34</sup>

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

#### 4.5.5 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.

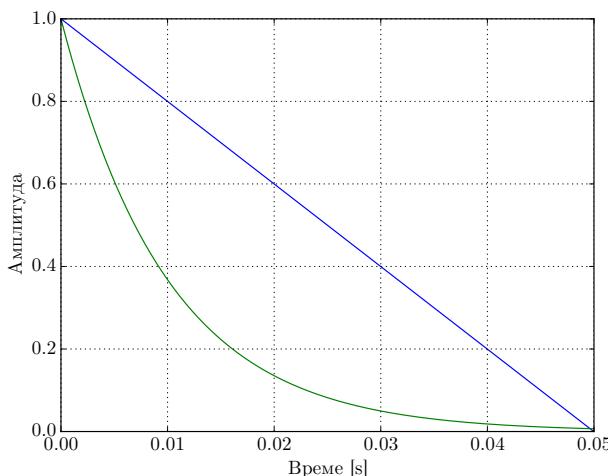
```
from __future__ import division
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
from scipy.io import wavfile
import os

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

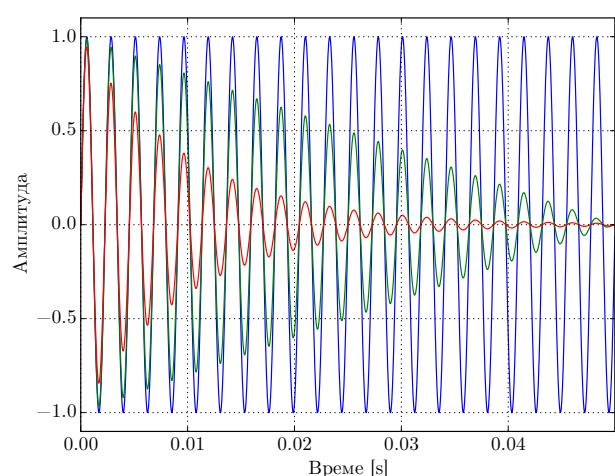
# fade out
lin_fade = np.linspace(1, 0, sine.size)
log_fade = np.exp((lin_fade-1)/.2)
sine_lin = sine * lin_fade
sine_log = sine * log_fade
```

---

<sup>34</sup>SoX е слободен софтвер за ковертирање, обработка, снимање и преслушување на аудио фајлови. <http://sox.sourceforge.net/>



Сл. 4.7: Криви за втишуваче.



Сл. 4.8: Линеарно (зелена) и експоненцијално (првена) втишуваче на синусен тон (сина).

```
# 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'])

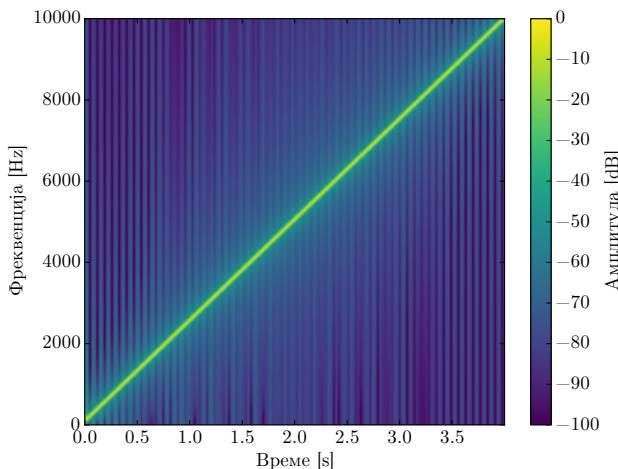
# play sines
wavfile.write('sine.wav', fs, np.array(sine * 2**15, dtype='int16'))
os.system('play sine.wav')
wavfile.write('sine_lin.wav', fs, np.array(sine_lin * 2**15, dtype='int16'))
os.system('play sine_lin.wav')
wavfile.write('sine_log.wav', fs, np.array(sine_log * 2**15, dtype='int16'))
os.system('play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

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

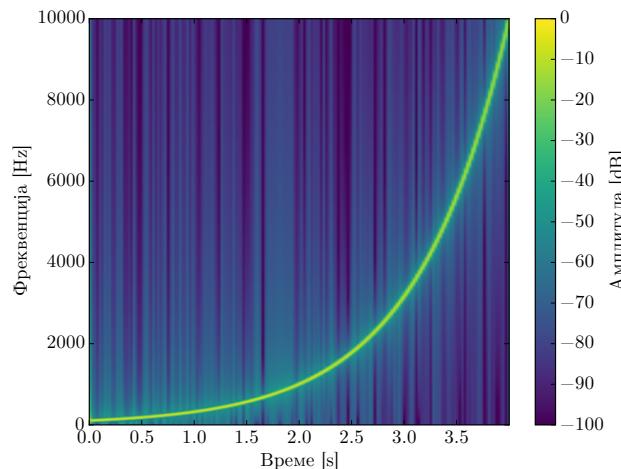
#### 4.5.6 Логаритамска осетливост на фреквенција

Овој феномен ќе го демонстрираме со синусен тон со променлива фреквенција, т.н. sine sweep, 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')
```



**Сл. 4.9:** Синус со линеарна промена на фреквенцијата.



**Сл. 4.10:** Синус со логаритамска промена на фреквенцијата.

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

```
import ea

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

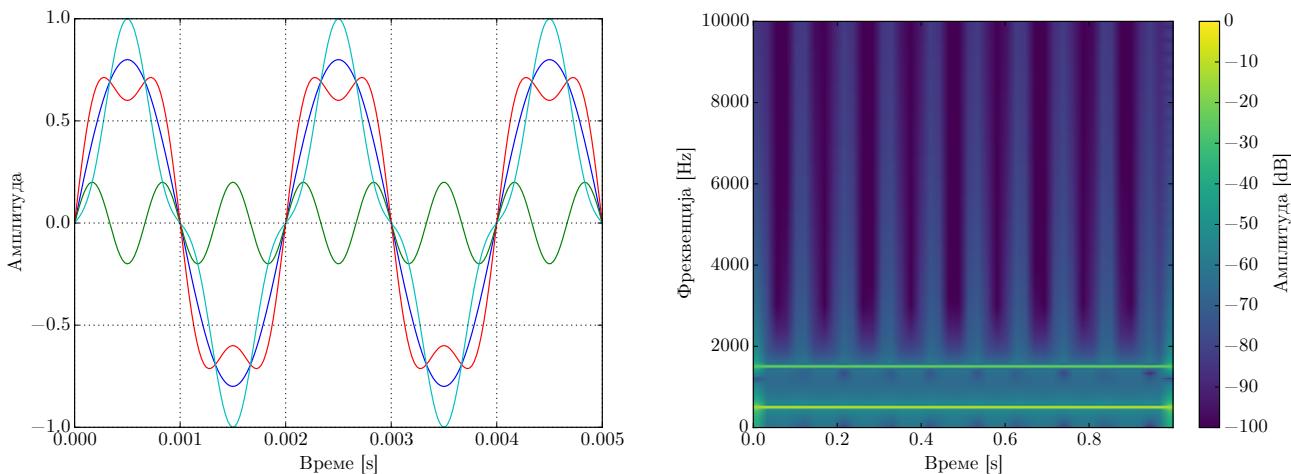
✓ **Задача за час.** Што можете да чуете? Кој од двата сигнала опаѓа порамномерно?

#### 4.5.7 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 едниот од нив, резултантниот звук ќе биде ист иако двата сигнала имаат различен временски облик.

```
f = 440
fs = 44100
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.** Испртајте и преслушајте ги звучните сигнали. Да ли можете да видите/чуете разлика? Прикажете го нивниот спектрограм.



**Сл. 4.11:** Демонстрација на фазна неосетливост преку сума на две синусоиди со различна фазна поместеност.

#### 4.5.8 Консонанса и дисонанса

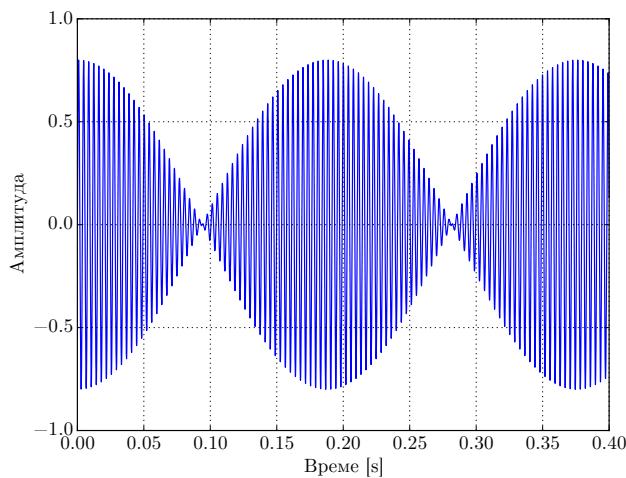
Во музиката под сложен, односно музички тон се подразбира мешавина од два или повеќе прости тонови. Зависно од тоновите од кои е составен сложениот тон, тој може да звучи пријатно или непријатно за слушателот. Така, кога сложениот тон е добиен од прости тонови со фреквенции во целоброен сооднос од мали 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 **консонанса**, 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 **дисонанса**, односно развучје.

Овој феномен ќе го демострираме со генерирање на тонови од музичката скала кој почнува од основниот тон С3 на 261 Hz.

```
fs = 44100
ts = 1 / fs
t = np.arange(0, 4, ts)
f = 261
sound_C3 = 0.8 * np.sin(2*np.pi*t*f)
sound_C4 = 0.8 * np.sin(2*np.pi*t*2*f) # oktava
sound_G3 = 0.8 * np.sin(2*np.pi*t*3/2*f) # kvinta
sound_E3 = 0.8 * np.sin(2*np.pi*t*5/4*f) # golema terca
sound_Cis3 = 0.8 * np.sin(2*np.pi*t*25/24*f) # mala sekunda

sound_oct = (sound_C3 + sound_C4)/2
sound_quint = (sound_C3 + sound_G3)/2
sound_terz = (sound_C3 + sound_E3)/2
sound_sec = (sound_C3 + sound_Cis3)/2
```

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 **биенje** и музичарите го употребуваат при штимањето на инструментите.



**Сл. 4.12:** Илустрација на феноменот на звучно биење.

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

# Поглавје 5

## Акустика на простории

Просторната акустика е една од најзначајните гранки на акустиката за човековото секојдневие. Со нејзина примена можат да се подобрат 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.

### 5.1 Резонантни фреквенции

Во затворените простории ќе дојде до појава на стојни бранови исто како во еднодимензионалните системи анализирани во Поглавје 2. Таму за звуковод затворен со бесконечно крут сид со  $Z_s = \infty$  за притисокот и брзината на воздушните честички добивме:

$$p = 2p_+ \cos kx e^{j\omega t}, \quad (5.1)$$

$$v = 2 \frac{p_+}{\rho c} \sin kx e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})}. \quad (5.2)$$

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  $l_x$ .

$$v = 2 \frac{p_+}{\rho c} \sin k(-l_x) e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})} = 0, \quad (5.3)$$

$$\sin kl_x = 0, \quad (5.4)$$

$$kl_x = n\pi, \quad n \in \mathbb{N}, \quad (5.5)$$

$$k = \frac{n\pi}{l_x}, \quad (5.6)$$

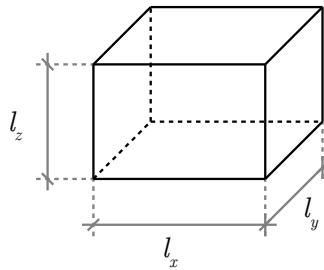
$$\frac{2\pi}{\lambda_n} = \frac{n\pi}{l_x}, \quad (5.7)$$

$$\frac{2c}{\lambda_n} = \frac{nc}{l_x}, \quad (5.8)$$

$$f_n = \frac{nc}{2l_x}. \quad (5.9)$$

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 мултикли 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 мултикли се нарекуваат виши хармоници.<sup>1</sup>

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. 5.1.



**Сл. 5.1:** Затворена просторија со облик на паралелопипед.

Ќе започнеме од брановата равенка за три димензии:

$$\frac{\delta^2 p}{\delta t^2} = c^2 \nabla^2 p, \quad (5.10)$$

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

$$\nabla^2 = \frac{\delta^2}{\delta x^2} + \frac{\delta^2}{\delta y^2} + \frac{\delta^2}{\delta z^2}. \quad (5.11)$$

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:

$$p(x,y,z,t) = A\Psi(x,y,z)e^{j\omega t}, \quad (5.12)$$

каде е константа, а  $\Psi$  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:

$$\Psi(x,y,z) = X(x)Y(y)Z(z), \text{ или:} \quad (5.13)$$

$$\Psi = XYZ. \quad (5.14)$$

Со замена на овој израз во (5.12), а потоа во (5.10), добиваме:

$$\frac{\delta^2}{\delta t^2} (A\Psi(x,y,z)e^{j\omega t}) = c^2 \nabla^2 A\Psi(x,y,z)e^{j\omega t}, \quad (5.15)$$

$$AXYZe^{j\omega t}(j\omega)^2 = c^2 A e^{j\omega t} \left( \frac{\delta^2 X}{\delta x^2} Y Z + \frac{\delta^2 Y}{\delta y^2} X Z + \frac{\delta^2 Z}{\delta z^2} X Y \right), \quad (5.16)$$

$$\frac{1}{X} \frac{\delta^2 X}{\delta x^2} + \frac{1}{Y} \frac{\delta^2 Y}{\delta y^2} + \frac{1}{Z} \frac{\delta^2 Z}{\delta z^2} = -\frac{\omega^2}{c^2} = -k^2. \quad (5.17)$$

<sup>1</sup>Основниот хармоник почесто се бележи  $f_0$  наместо  $f_1$ .

Бидејќи секој од трите членови од левата страна зависи само од една од координатите, тогаш ова равенство може да е точно само ако секој од овие членови е константа, па имаме:

$$\frac{1}{X} \frac{\delta^2 X}{\delta x^2} = -k_x^2, \quad (5.18)$$

$$\frac{1}{Y} \frac{\delta^2 Y}{\delta y^2} = -k_y^2, \quad (5.19)$$

$$\frac{1}{Z} \frac{\delta^2 Z}{\delta z^2} = -k_z^2. \quad (5.20)$$

$$(5.21)$$

Тогаш (5.17) преминува во:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2. \quad (5.22)$$

Границните услови за звучното поле во оваа просторија велат дека: Според (5.6) имаме:

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

$$k_x = \frac{n_x \pi}{l_x}, \quad n_x \in \mathbb{N}_0, \quad (5.23)$$

$$k_y = \frac{n_y \pi}{l_y}, \quad n_y \in \mathbb{N}_0, \quad (5.24)$$

$$k_z = \frac{n_z \pi}{l_z}, \quad n_z \in \mathbb{N}_0, \quad (5.25)$$

каде со  $\mathbb{N}_0$  е означеното множеството на природни броеви проширен со 0. Конечно од (5.22) за резонантните фреквенции на просторијата добиваме:

$$\frac{2\pi}{\lambda_N} = \pi \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}, \quad (5.26)$$

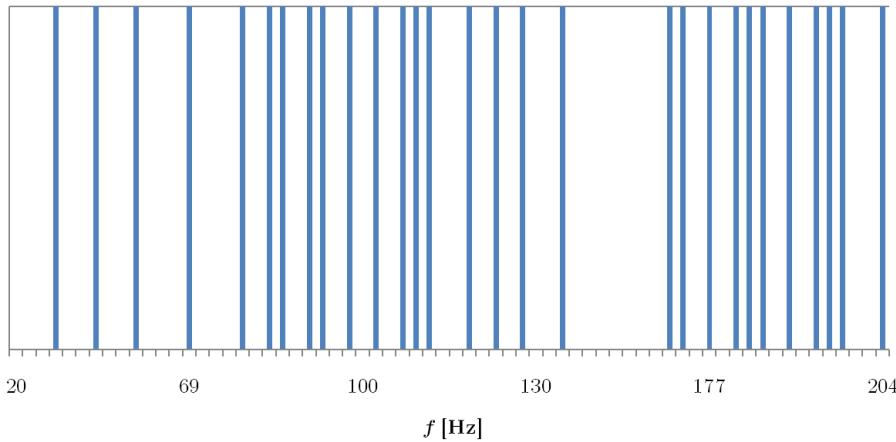
$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}, \quad (5.27)$$

$$f_n = \sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_z^2}. \quad (5.28)$$

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

$$\mathbf{n} = [n_x, n_y, n_z] \quad (5.29)$$

Секоја тројка  $N$  претставува една резонантна фреквенција, или **мод**, на оваа затворена просторија. На Сл. 5.2 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 еднодимензионите 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 границните површини, определена од тоа  $n$  кое има вредност



**Сл. 5.2:** Резонантни фреквенции пресметани во опсегот од 20 – 200 Hz за просторија со димензии  $5 \times 4 \times 2 \text{ m}^3$ .

0. Најсложените **просторни стојни бранови** се описани со тројки во кои сите  $n$  се различни од 0.

Од (5.27) може да се види дека најниската резонантна фреквенција за оваа просторија се добива за аксијалниот стоен бран кој е паралелен на најдлгата страна на просторијата. Ако тоа е на пр.  $l_x$ , тогаш најнискиот мод ќе биде  $f_{1,0,0}$  даден со:

$$f_{1,0,0} = \frac{c}{2l_x}, \quad (5.30)$$

што е еквивалентно со (5.9) 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  $f_{1,1,1}$ :

$$N_f \approx \frac{V_f}{V_0} = \frac{\frac{1}{8} \frac{4\pi f^3}{3}}{\frac{c}{2l_x} \frac{c}{2l_y} \frac{c}{2l_z}} = \frac{\frac{1}{8} \frac{4\pi f^3}{3}}{\frac{c^3}{8V}} = \frac{4\pi V f^3}{3c^3}. \quad (5.31)$$

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

$$N_f = \frac{4\pi V}{3c^3} f^3 + \frac{\pi S}{2c^2} f^2 + \frac{L}{8c} f, \quad (5.32)$$

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 (5.32) преминува во:

$$\Delta N_f = \left( \frac{4\pi V f^3}{3c^3} + \frac{\pi S f}{2c^2} + \frac{L}{8c} f \right) \Delta f. \quad (5.33)$$

Иако сите равенства беа изведени за просторија со паралелопипеден облик, во изразите (5.32) и (5.33) 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.

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:

$$p_i = p_{i0} e^{-\delta_i t}, \quad (5.34)$$

каде со  $\delta_i$  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:

$$J = \sum_i J_i = \sum_i J_{i0} e^{-2\delta_i t}. \quad (5.35)$$

Бидејќи  $\delta_i$  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. 5.3. 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 (5.36), како на Сл. 5.4. Тука  $\delta$  е среден коефициент на опаѓање, а  $J_0$  вкупен интензитет на звукот пред неговото исклучување даден со (5.37).

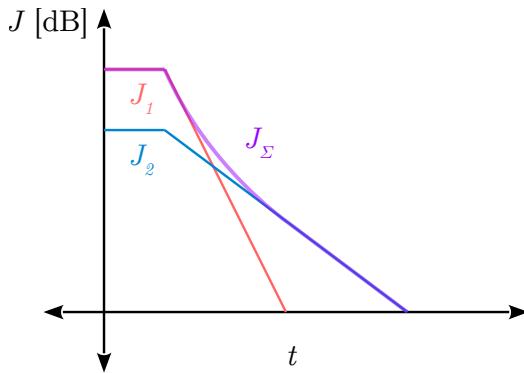
$$J = J_0 e^{-2\delta t} \sum_i \frac{J_{i0}}{J_0} e^{-2(\delta_i - \delta)t} \quad (5.36)$$

$$J_0 = \sum_i J_{i0} \quad (5.37)$$

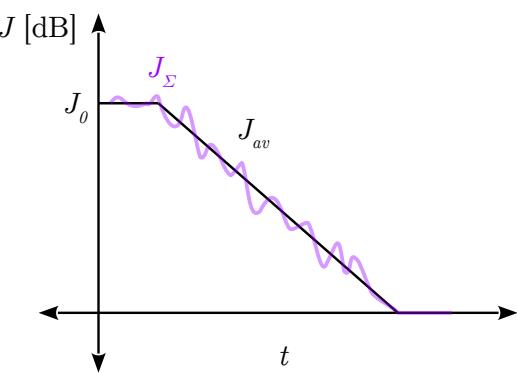
## 5.2 Коефициент на апсорпција

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 апсорпција се опишува со помош на коефициентот на апсорпција  $\alpha$  даден со:

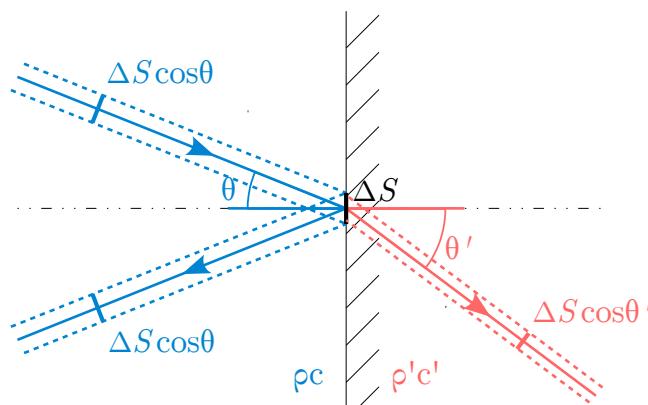
$$\alpha = \frac{P_\alpha}{P_i}. \quad (5.38)$$



**Сл. 5.3:** Интензитет на звукот во просторија со два извора со различна моќност и различен коефициент на опаѓање.



**Сл. 5.4:** Интензитет на звукот во просторија со многу различни извори.



**Сл. 5.5:** Звучен сноп кој делумно се одбива од граничната површина  $\Delta S$ , а делумно продолжува да се простира во втората средина.

Тука со  $P_i$  е означена акустичката моќност на звучниот бран пред одбивањето, а со  $P_\alpha$  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  $\theta$ , илустриран на Сл. 5.5. Поради тоа што во втората средина бранот продолжува да се простира под агол  $\theta'$  различен од  $\theta$  според:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta'} = \frac{c}{c'}, \quad (5.39)$$

Пресекот на снопот  $\Delta S_\theta$  којшто удира во дадена гранична површина  $\Delta S$ , даден со:

$$\Delta S_\theta = \Delta S \cos \theta, \quad (5.40)$$

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

$$\alpha_\theta = 1 - \frac{J_r}{J_i} = 1 - \left| \frac{p_-}{p_+} \right|^2 = 1 - r^2, \quad (5.41)$$

каде  $r$  е факторот на рефлексија.

За нормална инциденција важи:

$$\alpha_0 = 1 - \left| \frac{Z_s - \rho c}{Z_s + \rho c} \right|^2, \quad (5.42)$$

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

$$\alpha_\theta = 1 - \left| \frac{Z_n - \frac{\rho c}{\cos \theta}}{Z_n + \frac{\rho c}{\cos \theta}} \right|^2. \quad (5.43)$$

Иако со употреба на (5.43) може да се дојде до средното  $\alpha$  за сите агли на инциденција  $\theta$  по теориски пат, во праксата вообичаено  $\alpha$  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“.

### 5.3 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 рамнотежка 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:

$$\frac{dW}{dt} = P_a - P_\alpha = 0, \quad (5.44)$$

каде  $P_a$  е акустичката моќност на звучниот извор, а  $P_\alpha$  е акустичката моќност апсорбирана во просторијата. Може да се покаже (Куртовиќ, 1982) дека акустичката моќност  $\Delta P_i$  која удира на елементарна површина  $\Delta S$  е дадена со:

$$\Delta P_i = \frac{J}{4} \Delta S. \quad (5.45)$$

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

$$\Delta P_\alpha = \alpha \Delta P_i. \quad (5.46)$$

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

$$P_\alpha = \sum_i \Delta P_{\alpha i} = \frac{J}{4} \sum_i \alpha_i \Delta S_i = \frac{J}{4} A, \quad (5.47)$$

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:

$$A = \sum_i A_i = \sum_i \alpha_i \Delta S_i = \bar{\alpha} S. \quad (5.48)$$

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

$$W = EV, \quad (5.49)$$

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

$$E = \frac{J}{c}, \quad (5.50)$$

тогаш заменувајќи ги (5.49) и (5.47) во (5.44) добиваме:

$$\frac{dW}{dt} = P_a - \frac{J}{4} A, \quad (5.51)$$

$$\frac{dJ}{dt} = \frac{c}{V} P_a - \frac{cA}{V4} J. \quad (5.52)$$

Решението на оваа диференцијална равенка од прв ред е:

$$J = \frac{4P_a}{A} - Ce^{-\frac{A}{4V}ct}, \quad (5.53)$$

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 (5.53) ја добива следната форма:

$$J = \frac{4P_a}{A} \left( 1 - e^{-\frac{A}{4V}ct} \right). \quad (5.54)$$

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:

$$J_0 = \frac{4P_a}{A}, \quad (5.55)$$

која можеше да се добие со изедначување на (5.51) на 0.

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

$$J_0 = J_d + J_r, \quad (5.56)$$

за кои важи:

$$J_d = \gamma \frac{P_a}{4\pi r^2} = \bar{\alpha} J_0, \quad (5.57)$$

$$J_r = (1 - \bar{\alpha}) J_0. \quad (5.58)$$

За периодот по исклучување на изворот важи следниот почетен услов:

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

па од (5.53) имаме:

$$J = J_0 e^{-\frac{A}{4V}ct} . \quad (5.59)$$

## 5.4 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.<sup>2</sup> 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 времињата 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:

$$T = T_{60} = 2T_{30} = 3T_{20} . \quad (5.60)$$

Времето на реверберација може да го одредиме од (5.59) ако поставиме следниот услов:

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

Имаме:

$$J_0 \cdot 10^{-6} = J_0 e^{-\frac{A}{4V}cT} , \quad (5.61)$$

$$10^{-6} = e^{-\frac{A}{4V}cT} , \quad (5.62)$$

$$\ln 10^{-6} = -\frac{A}{4V}cT , \quad (5.63)$$

$$\frac{\log 10^{-6}}{\log e} = -\frac{A}{4V}cT , \quad (5.64)$$

$$T = \frac{24V}{cA \log e} . \quad (5.65)$$

Ако замениме за  $c$  и  $\log e$ , тогаш конечно ја добиваме **формулата на Сабин**:

$$T = \frac{0,16V}{A} = \frac{0,16V}{\bar{\alpha}S} . \quad (5.66)$$

Ова равенство, во склад со почетните претпоставки што ги направивме во Поглавјето 5.3, односно дека  $\bar{\alpha}$  е мало, не важи сосема за простории со голема апсорпција.<sup>3</sup> Сепак,

<sup>2</sup>Wikipedia: Wallace Clement Sabine. [https://en.wikipedia.org/wiki/Wallace\\_Clement\\_Sabine](https://en.wikipedia.org/wiki/Wallace_Clement_Sabine)

<sup>3</sup>Ако замениме  $\bar{\alpha} = 1$  нема да добиеме  $T = 0$ !

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 2 беше кажано дека звукот slabee експоненцијално со коефициент  $m$  зависно од растојанието кое го поминува. Ако овој податок го внесеме во (5.59) добиваме:

$$J = J_0 e^{-\frac{A}{4V}ct} e^{-mct} = J_0 e^{-\frac{A+4mV}{4V}ct}, \quad (5.67)$$

па за  $T$  се добива:

$$T = \frac{0,16V}{A + 4mV}. \quad (5.68)$$

## 5.5 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. 5.6 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:

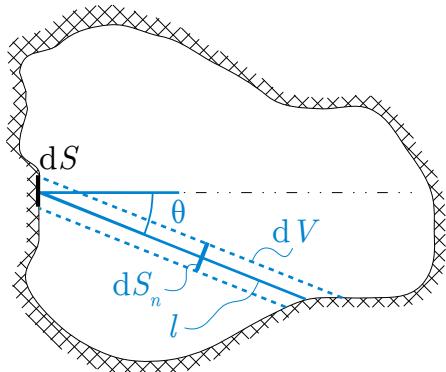
$$dS_n = dS \cos \theta, \quad (5.69)$$

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

$$dV = l dS_n. \quad (5.70)$$

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

$$2V = \oint_S l \cos \theta dS = \bar{l} \overline{\cos \theta} S. \quad (5.71)$$



**Сл. 5.6:** Просторија со произволен облик и средна должина на слободната патека на звукот во неа.

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:

$$\overline{\cos \theta} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \sin \theta d\theta = \frac{1}{2}. \quad (5.72)$$

Конечно за средната должина на слободната патека добиваме:

$$\bar{l} = \frac{4V}{S}. \quad (5.73)$$

## 5.6 Мерење на импулсниот одсив на просторија

### Практичен дел

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 мерењата. Во овој практичен дел ќе направиме практично мерење на акустичкиот импулсен одсив на една просторија.<sup>4</sup> Валидноста на резултатите сепак 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 Python.

#### 5.6.1 Звучни побуди за мерење на импулсниот одсив

За мерење на импулсниот одсив на една просторија 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 (Maximum Length Sequence – MLS)**<sup>5</sup> – псевдослучајна бинарна секвенца која има спектрална карактеристика на бел шум.
- **синусен тон со променлива фреквенција (sine sweep).**

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 5.6.6.

<sup>4</sup>Овој практичен дел е инспириран од соработката со проф. д-р Дејан Ќириќ од Електронскиот факултет на Универзитетот во Ниш, Србија и истиоимената вежба од практикумот по предметот Акустика кој тој го води.

<sup>5</sup>Wikipedia: Maximum length sequence. [https://en.wikipedia.org/wiki/Maximum\\_length\\_sequence](https://en.wikipedia.org/wiki/Maximum_length_sequence)

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  $h[n]$ :

$$y[n] = h[n] * x[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h[m]x[n-m]. \quad (5.74)$$

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:

$$y[n] \star x[n] = h[n] * x[n] \star x[n] = h[n], \quad (5.75)$$

каде со  $\star$  е означена корелацијата:

$$y[n] \star x[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} y[m]x[m+n]. \quad (5.76)$$

Споредувајќи ги (5.74) и (5.76) 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:

$$y[n] \star x[n] = h[n] * x[n] * \overleftarrow{x}[n] = h[n]. \quad (5.77)$$

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

$$y[n] * x^{-1}[n] = h[n] * x[n] * x^{-1}[n] = h[n], \quad (5.78)$$

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

$$Y[k] \cdot X^{-1}[k] = H[k] \cdot X[k] \cdot \frac{1}{X[k]} = H[k], \quad (5.79)$$

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.

Во овој практичен дел ќе ја искористиме токму синусната побуда. За неа ќе го генерираме и инверзниот сигнал, кој ќе го искористиме да го добиеме импулсниот одсив.

## 5.6.2 Генерирање на побудата

Иако во Поглавјето 4.5.6 синусниот тон со променлива фреквенција го генериравме со функцијата `chirp` од модулот `scipy.signal`, овој пат ќе ја генерираме според нејзината математичка дефиниција (Carson et al., 2009):

$$x(t) = \sin \theta(t) = \sin \frac{\omega_l T}{r_\omega} (e^{-t \frac{r_\omega}{T}} - 1). \quad (5.80)$$

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

$$r_\omega = \ln \frac{\omega_l}{\omega_h}, \quad (5.81)$$

а  $T$  е времетраењето на синусниот сигнал.

```
from __future__ import division
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()

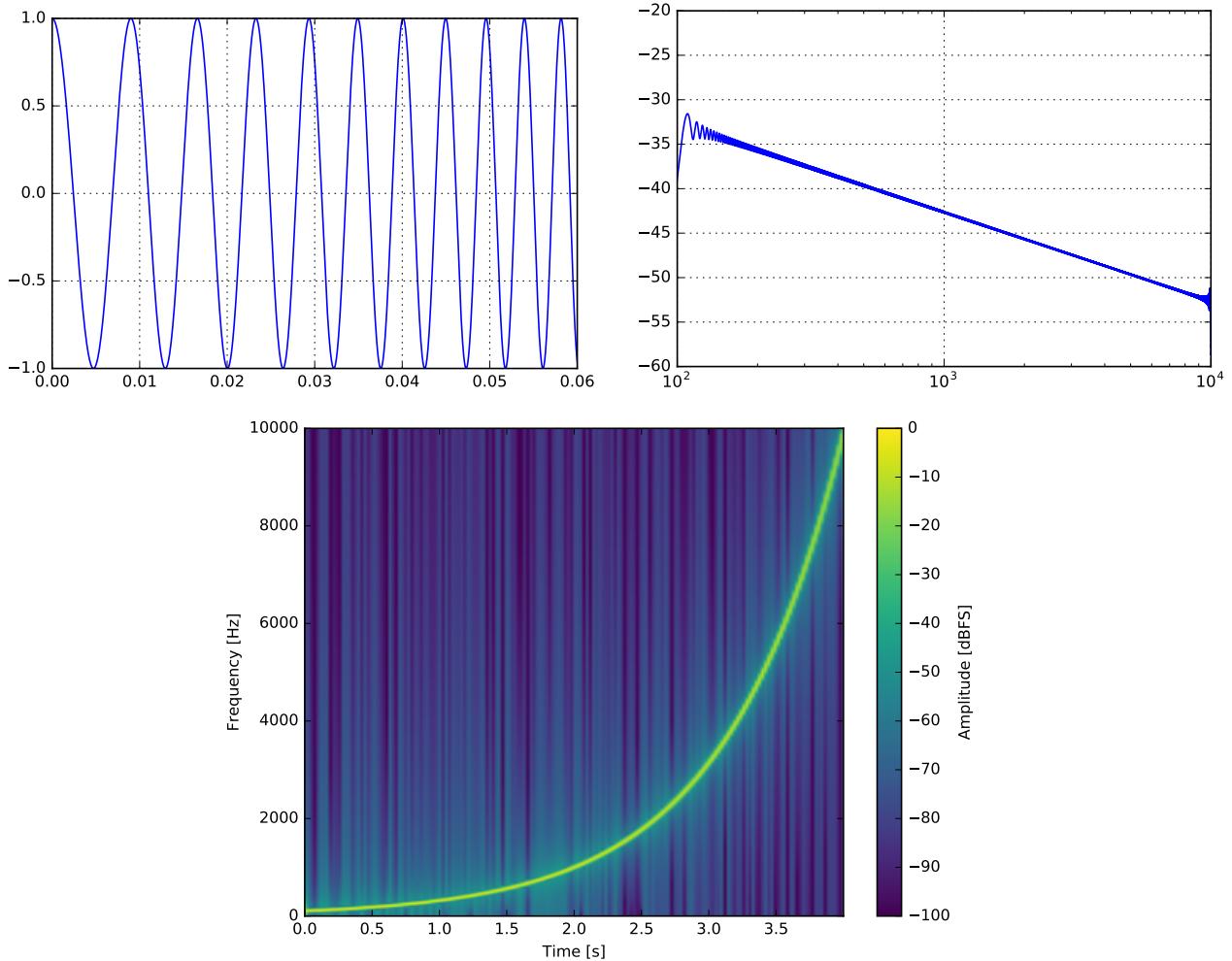
# %% plot spectrogram
spectrogram = ea.get_spectrogram(fs, sweep, 2048)

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

Добиениот сигнал на побуда е прикажан на Сл. 5.7 во временски и фреквенциски домен, како и преку спектрограм.

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:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = -\omega_l e^{-t\frac{r_\omega}{T}}. \quad (5.82)$$



**Сл. 5.7:** Побудниот синусен сигнал претставен во временски и спектрален домен и во вид на спектрограм.

Енергијата на сигналот во дадено време  $t$  ќе биде инверзно пропорционална на брзината на промената на фреквенцијата, односно ќе имаме:

$$E(t) \propto \frac{1}{\frac{d\omega(t)}{dt}} = \frac{T}{\omega_l r_\omega} e^{t \frac{r_\omega}{T}}. \quad (5.83)$$

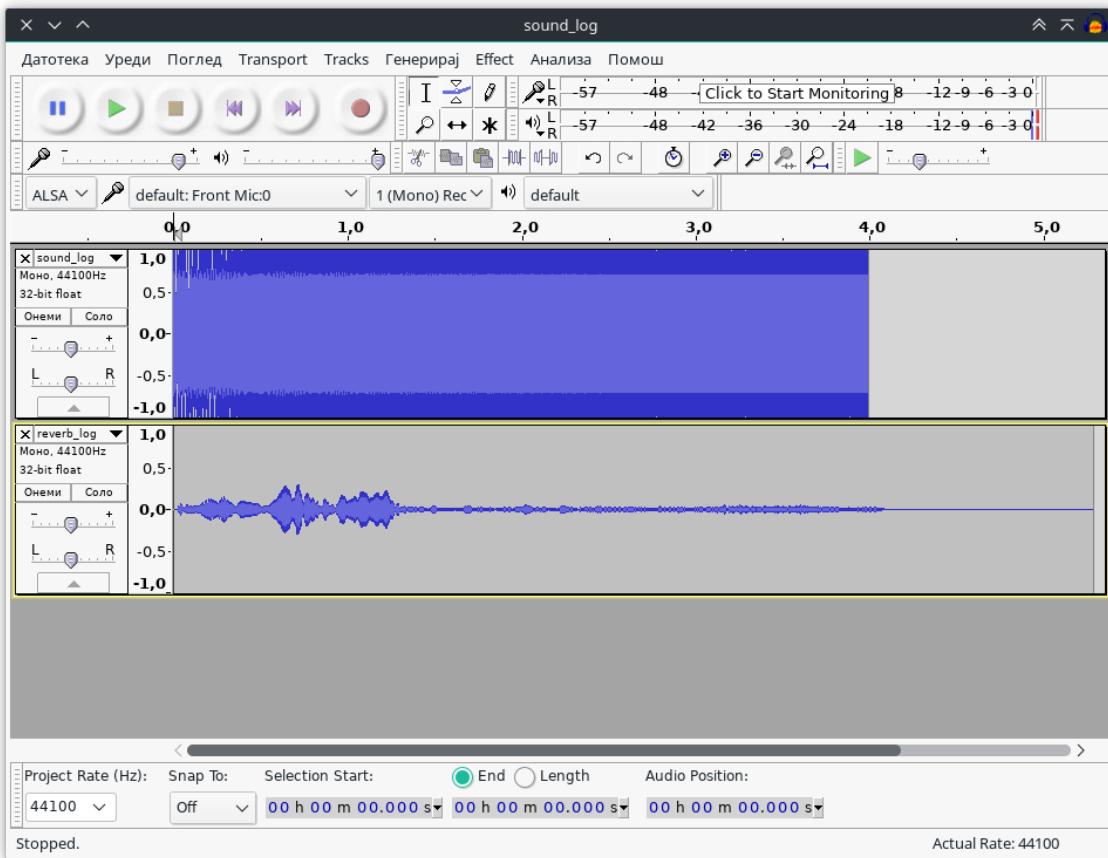
Фуриевата трансформација на експоненцијална функција е дадена со:

$$\mathcal{F}\{e^{at}\} = \int_0^\infty e^{at} e^{-j\omega} dt = -\frac{1}{-a + j\omega} e^{-(a+j\omega)t} \Big|_0^\infty = \frac{1}{-a + j\omega}. \quad (5.84)$$

Оттука за (5.83) имаме:

$$E(j\omega) = k \frac{T}{\omega_l r_\omega} \frac{1}{-\frac{r_\omega}{T} + j\omega}, \quad (5.85)$$

каде со  $k$  е претставена константата на пропорционалност. Од 5.85 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. 5.7.



Сл. 5.8: Снимање на одсивот на просторијата во Audacity.

### 5.6.3 Снимање на реверберацијата на просторијата

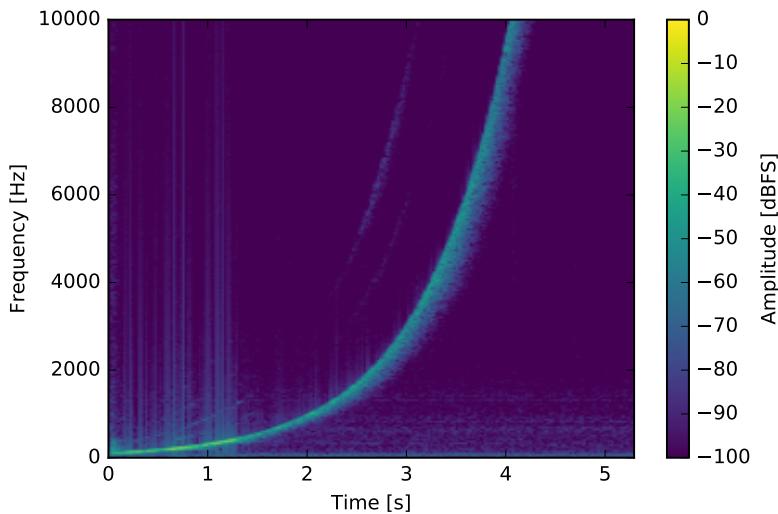
Вака генериралиот сигнал на побуда треба да го пуштиме на звучниците и да го снимиме со микрофонот. За таа цел ќе го вчитаме во програмскиот пакет Audacity со кој веќе се запознавме во Поглавјето 2.16.1. По вчитувањето доволно е да притиснеме на копчето за снимање и аудио фајлот ќе биде пуштен на звучниците при самото снимање. Резултатите на ваквото снимање, прикажани на Сл. 5.8, зачувајте ги во wav фајл.

### 5.6.4 Прикажување на снимениот одсив на просторијата

Снимениот одсив ќе го вчитаме во Python 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. 5.9 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 5.6.6.



**Сл. 5.9:** Спектрограм на снимената реверберација на просторијата.

### 5.6.5 Генерирање на инверзниот сигнал на побудата

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

$$x_m(t) = \sin \theta_m(t), \quad (5.86)$$

каде  $\theta_m(t)$  е дадено со:

$$\theta_m(t) = \int \omega_m(t) dt = \int \frac{A}{\omega(t)} dt, \quad (5.87)$$

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

$$\theta_m(t) = \int \frac{\omega_l}{-\omega_l e^{-t \frac{r_\omega}{T}}} dt = \int -e^{t \frac{r_\omega}{T}} dt = -\frac{T}{r_\omega} e^{t \frac{r_\omega}{T}}, \quad (5.88)$$

$$x^{-1}(t) = \overleftarrow{x}(t) \cdot \sin -\frac{T}{r_\omega} e^{t \frac{r_\omega}{T}}. \quad (5.89)$$

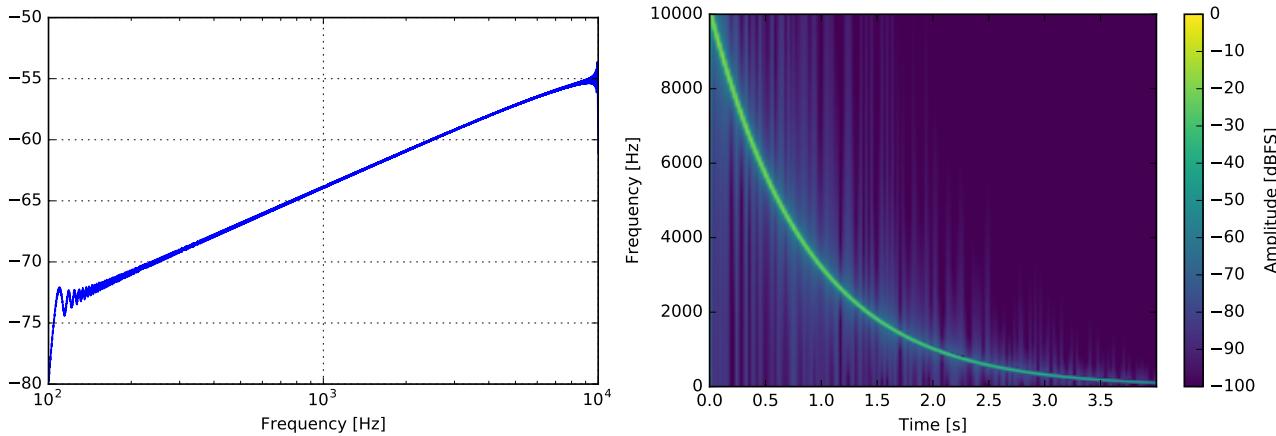
Да го генерираме овој сигнал во Python.

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

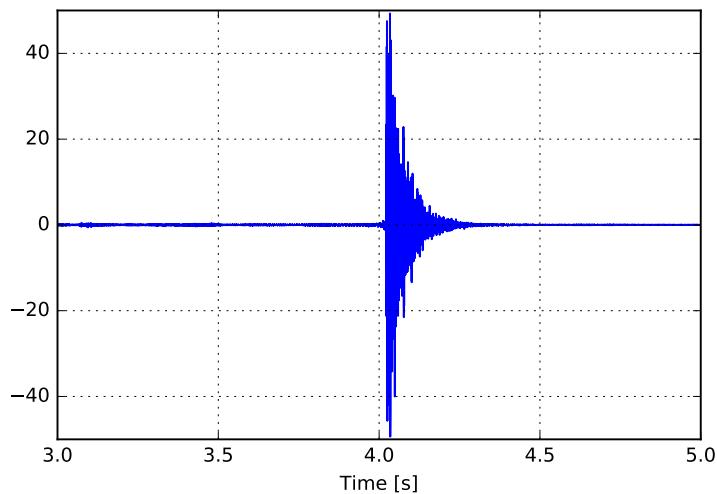
%%% plot spectrum
f, spec_inv = ea.get_spectrum(fs, inverse)
plt.figure()
plt.plot(f, spec_inv)
plt.xscale('log')
plt.grid()

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

Спектарот на инверзниот сигнал и неговиот спектрограм се прикажани на Сл. 5.10



Сл. 5.10: Спектар и спектрограм на инверзниот сигнал.



Сл. 5.11: Временски облик на пресметаниот импулсен одсив на просторијата.

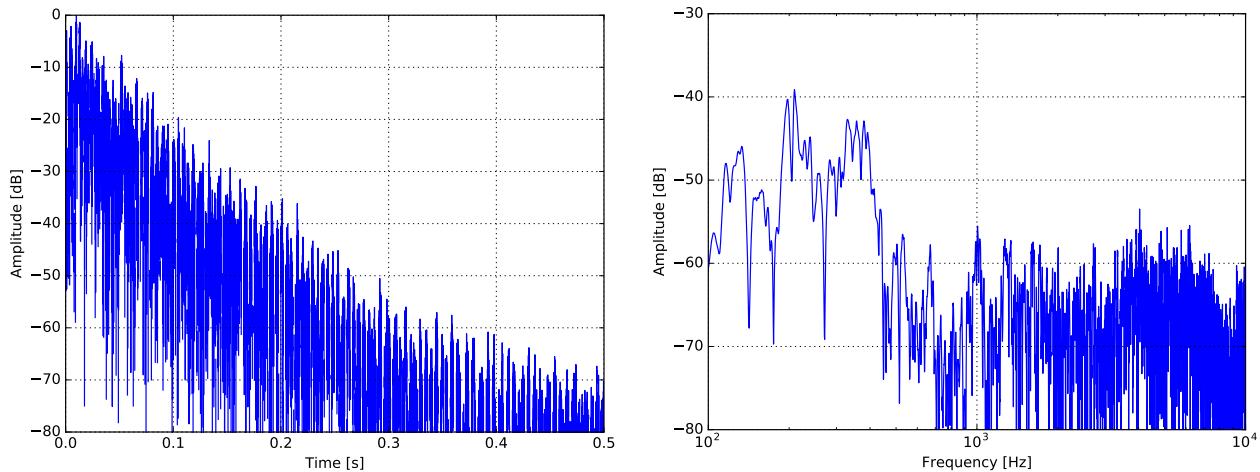
За да го добиеме импулсниот одсив на просторијата ќе направиме конволуција на снимениот одсив на собата и инверзниот сигнал на побудата. Така добиениот одсив е прикажан на Сл. 5.11. Сосема малку може да се забележат предехата предизвикани од хармониските изобличувања на звучникот. Поизразен приказ на оваа појава е даден во Поглавјето 5.6.6.

```
#%% 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 дијаграм<sup>6</sup>. Од така изолираниот одсив ќе ја пресметаме и преносната функција на просторијата.

<sup>6</sup>На англиски waterfall diagram.



**Сл. 5.12:** Графички приказ на импулсниот одсив на просторијата преку неговиот временски облик во dB (лево) и спектралниот облик, т.е. преносната функција (десно).

```

%% 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[max_ind - t_minus*fs : 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))

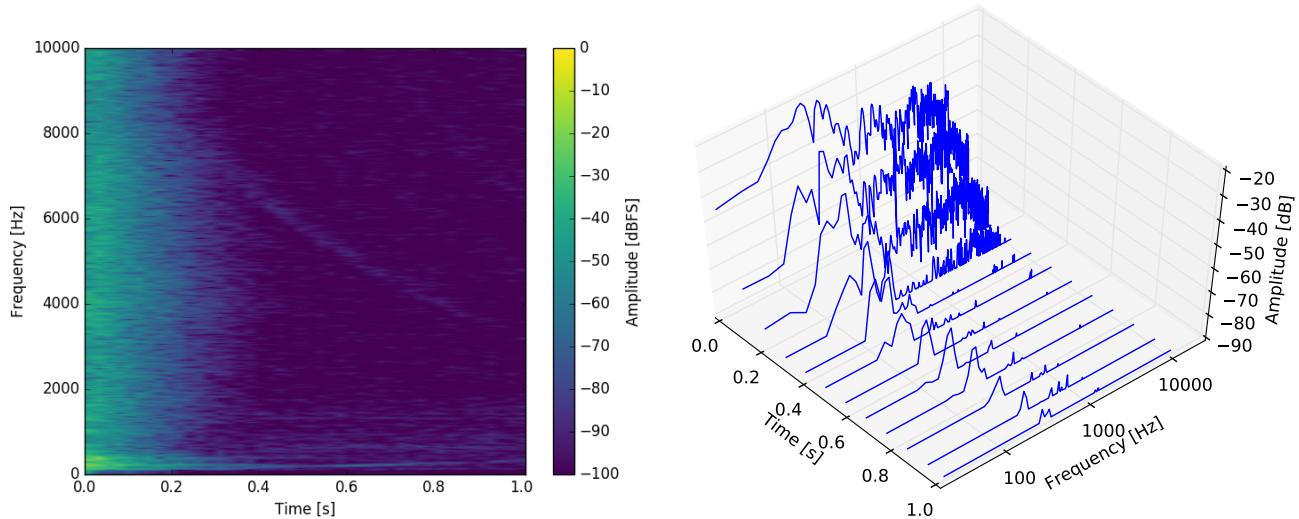
%% transfer function (spectrum)
f, transfer_func = ea.get_spectrum(fs, room_response_trimmed)
plt.figure()
plt.plot(f, transfer_func)
plt.xscale('log')

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

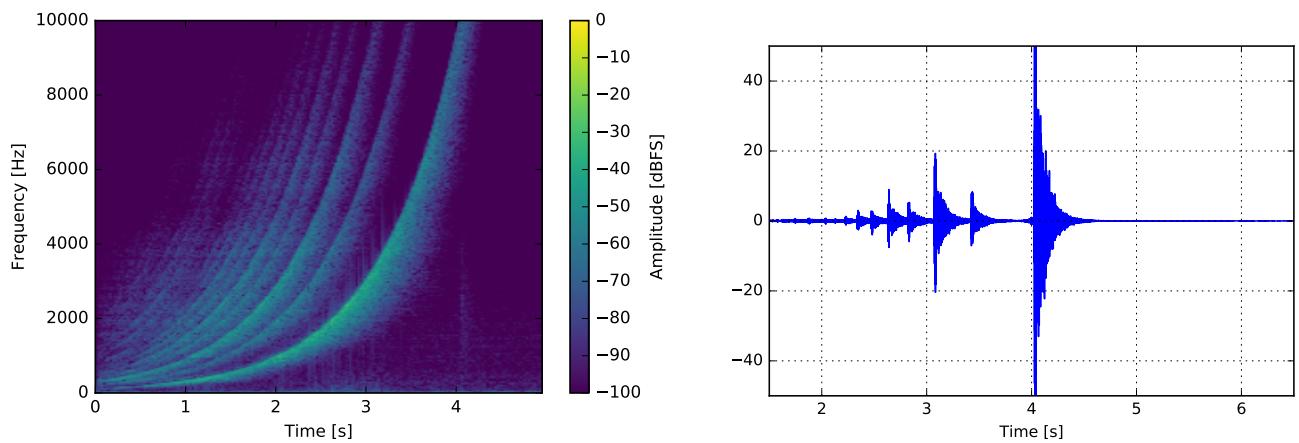
%% waterfall diagram
from mpl_toolkits.mplot3d import axes3d
fig = plt.figure()
ax = fig.gca(projection='3d')
X, Y = np.meshgrid(t_frame, np.log10(f[:512]))
ax.plot_wireframe(X, Y, frames_spec[:512,:,:], rstride=0, cstride=4)

%% 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. 5.12 и 5.13. Од временскиот облик во dB може да се прочита времето на ревербација 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.



**Сл. 5.13:** Графички приказ на импулсниот одсив на просторијата преку неговиот спектрограм (лево) и водопад дијаграм (десно).



**Сл. 5.14:** Спектрограм на снимената реверберација (лево) и временски облик на пресметаниот импулсен одсив (десно) на просторијата со употреба на неквалитетен звучник.

### 5.6.6 Изобличувања предизвикани од звучникот

Една од главните предности на употребата на синусна побуда за мерењето на реверберацијата е можноста да се отстранат изобличувањата на звучникот од аудиосигналот. Еден спектрограм од снимена реверберација со неквалитетен звучник е прикажана на Сл. 5.14. На истата слика е прикажан и пресметаниот импулсен одсив во кој се јасно воочливи предеха предизвикани од изобличувањата на звучникот. Тие можат лесно да се отстранат од добиениот импулсен одсив со отсекување.

✓ **Задача за дома.** Измерете ја реверберацијата во вашиот дом.

# Поглавје 6

## Микрофони

### 6.1 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.

### 6.2 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,



**Сл. 6.1:** Кондензаторски микрофон Neumann U87.<sup>1</sup>

- динамичкиот опсег и
- импедансата.

Карактеристиките на микрофонот Neumann U87 прикажан на Сл. 6.1, кој е еден од најпрочуените и најдобри кондензаторски микрофони во историјата на музичката индустрија, се дадени во Табела 6.1.

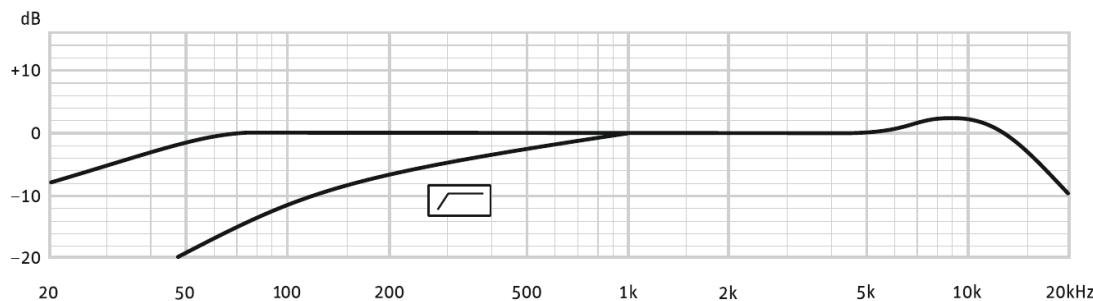
**Табела 6.1:** Технички карактеристики на микрофонот Neumann U87 дадени од производителот.

Acoustical operating principle	Pressure gradient transducer
Directional pattern	omnidirectional/cardioïd/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 kΩ
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 (cardioïd)
Maximum SPL for THD 0.5% with preattenuation	127 dB
Maximum output voltage	390 mV
Supply voltage (P48, IEC 61938)	48 V ± 4 V
Current consumption (P48, IEC 61938)	0.8 mA
Matching connectors	XLR3F
Weight	500 g
Diameter	56 mm
Length	200 mm

## 6.2.1 Осетливост

<sup>1</sup>Превземено од [http://www.neumann.com/?lang=en&id=current\\_microphones&cid=u87\\_description](http://www.neumann.com/?lang=en&id=current_microphones&cid=u87_description)

<sup>2</sup>Превземено од [http://www.neumann.com/download.php?download=copi0173\\_U87Ai\\_068820-A11-10-2014.pdf](http://www.neumann.com/download.php?download=copi0173_U87Ai_068820-A11-10-2014.pdf)



Сл. 6.2: Фреквенциска карактеристика на микрофонот Neumann U87.<sup>2</sup>

**Осетливоста**  $T$ <sup>3</sup> 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**:

$$T = \frac{u}{p}. \quad (6.1)$$

Единицата мерка за осетливост е  $\text{V/Pa}$ , но од практични причини вообичаено се користи  $\text{mV/Pa}$ . Исто така, осетливоста често се изразува во dB со т.н. **индекс на осетливост**:

$$T[\text{dB}] = 20 \log \frac{u}{p}, \quad (6.2)$$

при што како референтна осетливост се зема  $1 \text{ V/Pa}$ . 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  $1 \text{ V}$ , а звуците со релативно голем интензитет имаат амплитуда од редот на  $1 \text{ Pa}$ , односно  $94 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ , осетливоста всушност го означува приближно потребното засилувањето на сигналот кој се добива од микрофонот.

Во Табела 6.1 може да се види дека осетливоста на микрофонот Neumann U87 зависи од типот на карактеристиката на насоченост и мерена на  $1 \text{ kHz}$  и  $1 \text{ k}\Omega$  изнесува  $20$ ,  $28$ , односно  $22 \text{ mV/Pa}$ . Во dB овие изнесуваат  $-34$ ,  $-31$  и  $-33 \text{ dB}$ .

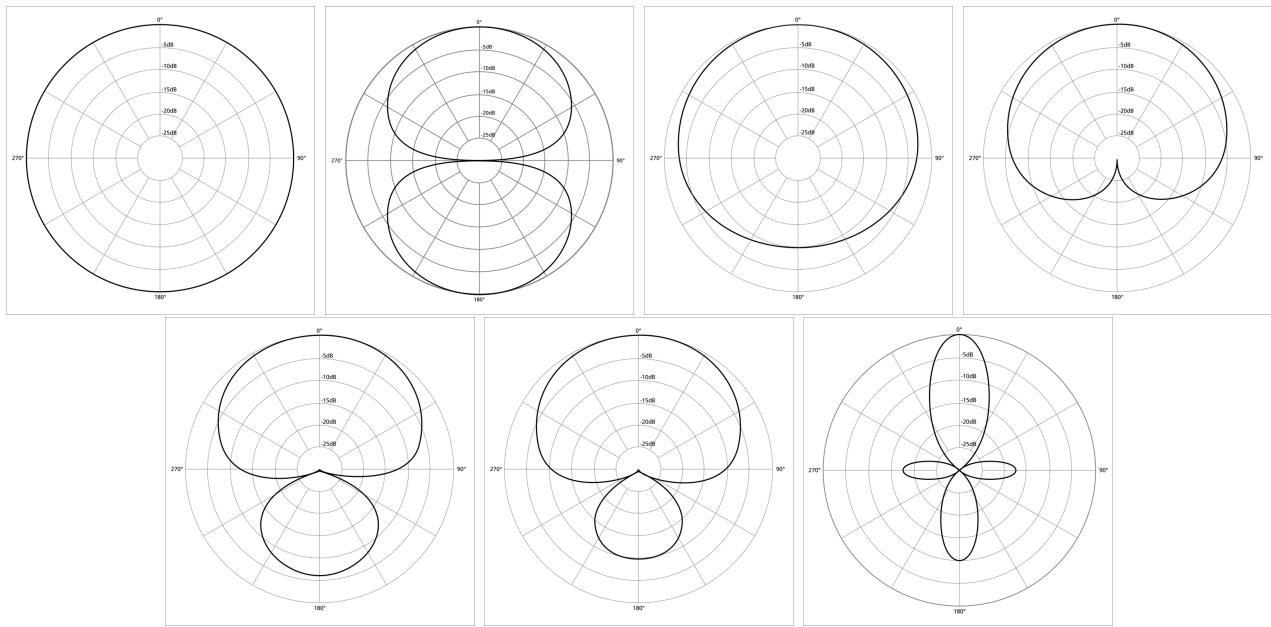
## 6.2.2 Фреквенциска карактеристика

**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  $1 \text{ kHz}$ . Обликот на оваа крива е можеби најкритичниот параметар кој ги издвојува високо квалитетните микрофони. Идеалниот микрофон има рамна фреквенциска карактеристика без нагласени отстапувања, но известни отстапувања може да се посакувани во музичката индустрија затоа што тие поволно го филтрираат, т.е. „бојат“ звукот. Фреквенциските карактеристики на Neumann U87 е дадена на Сл. 6.2. Од фреквенциската крива може да се одреди и фреквенцискиот опсег на микрофонот.

## 6.2.3 Крива на насоченост

**Кривата на насоченост**  $\Gamma(\theta)$  ја опишува промената на осетливоста во зависност од аголот на инциденција на звучниот бран  $\theta$  во однос на нормалната оска на мембраната.

<sup>3</sup>Факторот на претворање се обележува со  $T$  кај сите трансдусери.



**Сл. 6.3:** Различни криви на насоченост на микрофоните (од горе надолу, од лево надесно): омнидирекционална, бидирекционална (осмица), субкардиоида, кардиоида, хиперкардиоида, суперкардиоида и супердирекционална.<sup>4</sup>

Притоа осетливоста се прикажува релативно во однос на референтната осетливост на микрофонот при нормална инциденција  $\theta_0 = 0$  којашто е и најголема:

$$\Gamma(\theta) = \frac{T_\theta}{T_0}. \quad (6.3)$$

На графиците овој однос вообичаено се исцртува во dB.

Постојат различни типови на криви на насоченост кај микрофоните илустрирани на Сл. 6.3. 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.

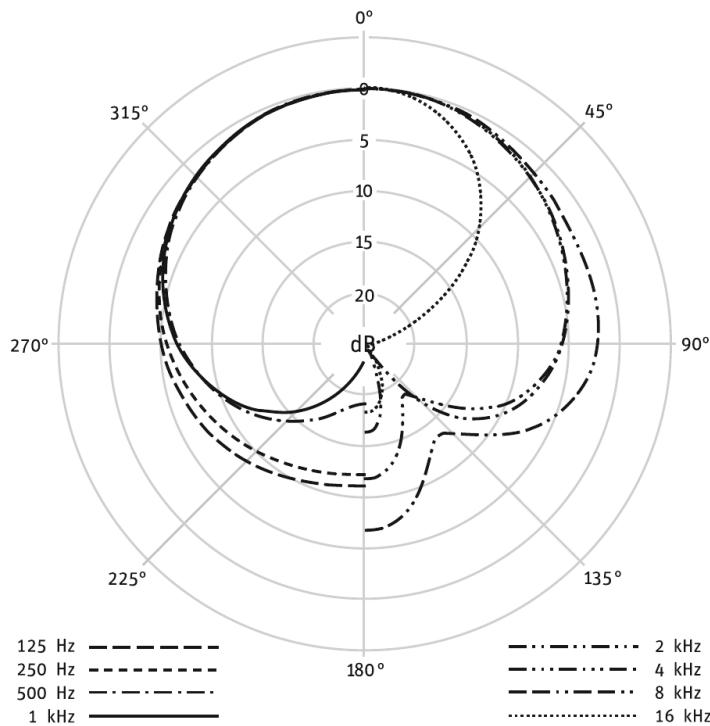
Кривата на насоченост зависи и од фреквенцијата на звукот. Имено микрофоните секогаш се повеќе насочени за повисоките фреквенции, а помалку за пониските. На Сл. 6.4 е прикажана промената на обликот на кардиоидата на Neumann U87 за различни фреквенции на звукот. Може да се види дека за пониските фреквенции карактеристиката преминува во омнидирекционална, додека за повисоките преминува во осмица. Ова доаѓа од релативните димензии на мембраната 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 мембраната.

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

$$\gamma_m = \frac{4\pi}{\int_0^{4\pi} \Gamma^2 d\Omega} = \frac{4\pi}{\Omega_m}, \quad (6.4)$$

<sup>4</sup>Galak76, "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>.



**Сл. 6.4:** Крива на насоченост – кардиоида на Neumann U87 за различни фреквенции.<sup>5</sup>

каде  $\Omega_m$  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:

$$\gamma_m[\text{dB}] = 10 \log \gamma_m. \quad (6.5)$$

#### 6.2.4 Динамички опсег

**Динамичкиот опсег** на микрофонот е одреден од најсилниот и најтврдиот 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:

$$u_n = \sqrt{1,64 \cdot 10^{-20} R \Delta f}, \quad (6.6)$$

каде  $R$  е внатрешната реална, но и реактивна отпорност на микрофонот, а  $\Delta f$  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 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

<sup>5</sup>Превземено од [http://www.neumann.com/download.php?download=copi0173\\_U87Ai\\_068820-A11\\_10-2014.pdf](http://www.neumann.com/download.php?download=copi0173_U87Ai_068820-A11_10-2014.pdf)

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 6.1 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 тука следува дека динамичкиот опсег на овој микрофон изнесува 94 dB, како што и е дадено во табелата.

### 6.2.5 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.

## 6.3 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 мемраната 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 7

## Звучници

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, мембраницата 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.

### 7.1 Основни карактеристики на звучниците

Основните електроакустички карактеристики кај звучниците во голема мера се поклопуваат со оние на микрофоните:

- фактор на преобразба,
- фреквенциската карактеристика,
- крива на насоченост,
- факторот на насоченост,
- импедансата,
- ефикасноста,
- степенот на искористување,
- номиналната моќност и
- факторот на изобличување.

Карактеристиките на мониторскиот звучник Genelec 8040B прикажан на Сл. 7.1, се дадени во Табела 7.1.

**Факторот на преобразба  $T$**  го означува односот помеѓу излезната акустичка величина, најчесто звучниот притисок  $p$ , и влезната електрична величина, најчесто напонот  $u$ , кој

---

<sup>1</sup>Превземено од <http://www.genelec.com/studio-monitors/8000-series-studio-monitors/8040b-studio-monitor>



**Сл. 7.1:** Мониторски звучник Genelec 8040B.<sup>1</sup>

вообичаено е константен на излез од засилувачите:

$$T = \frac{p}{u}. \quad (7.1)$$

Тука притисокот се дава вообичаено на 1 m растојние 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**:

$$T[\text{dB}] = 20 \log \frac{p}{u}, \quad (7.2)$$

при што како референтна осетливост се зема 1 Pa/v.

### 7.1.1 Фреквенциска карактеристика и крива на насоченост

**Фреквенциската карактеристика** и **кривата на насоченост** на звучникот ги даваат еквивалентните карактеристики разгледани кај микрофоните. Имено и тута важи:

$$\Gamma(\theta) = \frac{T_\theta}{T_0} = \frac{p_\theta}{p_0}. \quad (7.3)$$

За Genelec мониторските звучници, производителот ги дал овие карактеристики здружено на еден график прикажан на Сл. 7.2. Може да видиме дека за ниските фреквенции звучникот има омнидирекционална 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.

### 7.1.2 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

---

<sup>2</sup>Превземено од <http://www.genelec.com/studio-monitors/8000-series-studio-monitors/8040b-studio-monitor>

**Табела 7.1:** Технички карактеристики на звучникот Genelec 8040B дадени од производителот.

Lower cut-off frequency, -3 dB	$\leq 45$ Hz
Upper cut-off frequency, -3 dB	$\geq 20$ kHz
Free field frequency response of system ( $\pm 2.0$ dB)	48 Hz – 20 kHz
Maximum short term sine wave acoustic output on axis in half space, averaged from 100 Hz to 3 kHz	$\geq 105$ dB SPL @ 1 m $\geq 111$ dB SPL @ 0.5 m
Maximum long term RMS acoustic output in same conditions with IEC weighted noise (limited by driver unit protection circuit)	$\geq 99$ dB SPL @ 1 m
Maximum peak acoustic output per pair above console top, @ 1 m from the listening position with music material	$\geq 115$ dB SPL
Self generated noise level in free field @ 1m on axis (A-weighted)	$\leq 10$ dB
Harmonic distortion at 90 dB SPL @ 1m on axis	< 2% (50 – 100 Hz) < 0.5% (> 100 Hz)
Drivers – Bass cone	165 mm ( $6\frac{1}{2}$ "")
Drivers – Treble metal dome	19 mm ( $\frac{3}{4}$ "")
Crossover frequency, Bass/Treble	3.0 kHz
Weight	8.6 kg (18.9 lbs)
Height	350 mm ( $13\frac{13}{16}$ "")
Width	237 mm ( $9\frac{3}{8}$ "")
Depth	223 mm ( $8\frac{13}{16}$ "")

моќност:

$$e = \frac{p}{P} \quad (7.4)$$

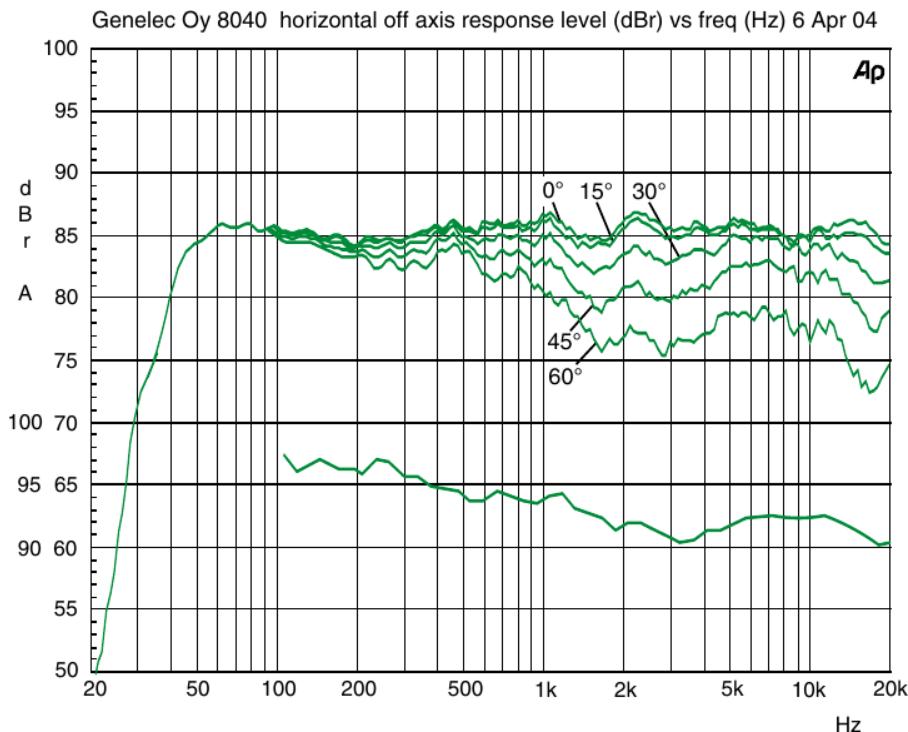
и се мери во единици  $\text{Pa}/\sqrt{\text{W}}$ . Со други зборови ефикасноста ја дава вредноста на звучниот притисок на 1 m за дадена влезна електрична моќност. Со помош на овој податок можеме да го пресметаме максималниот звучен притисок кој може да го даде еден звучник користејќи ја неговата номинална, т.е. максимална, електрична моќност.

**Степенот на искористување** го дава односот помеѓу излезната акустичка моќност и влезната електрична моќност:

$$\eta = \frac{P_a}{P}. \quad (7.5)$$

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 вообично 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 вообично 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),



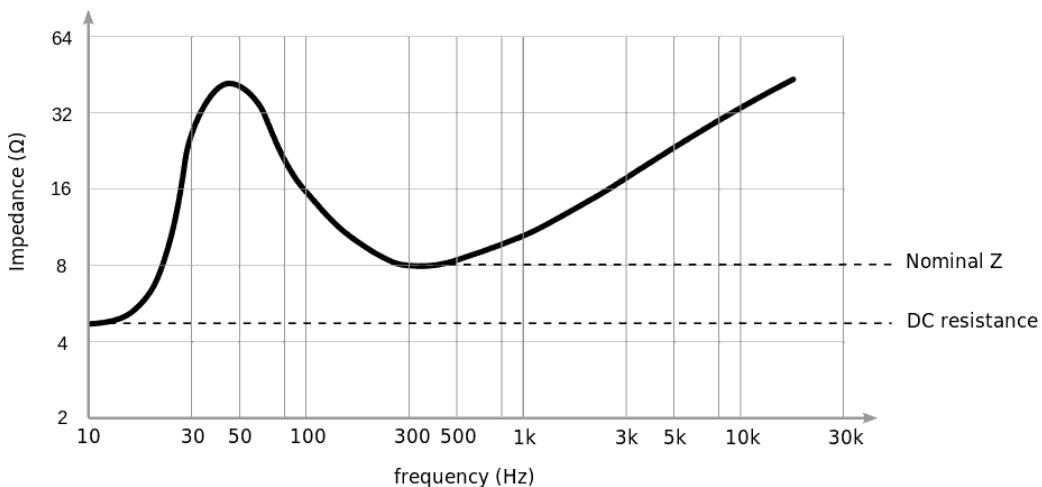
**Сл. 7.2:** Фреквенциска карактеристика и крива на насоченост на мониторскиот звучник Genelec 8040B.<sup>2</sup>

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 7.1. 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 вообично 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.

### 7.1.3 Импеданса

**Импедансата** на звучниците е реактивна, што значи променлива со фреквенцијата, како што е прикажано на Сл. 7.3. Уште повеќе, ако се земе дека во една повеќе-системска 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 отпорност на звучникот која треба со една вредност да ја опише неговата импедансата за целото фреквенциско работно подрачје. Вообично за неа се зема минимумот на импедансата измерен веднаш над резонантната фреквенција на звучникот и изнесува околу 4 – 8 Ω. Импедансата на звучниците 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.



**Сл. 7.3:** Пример за зависноста на еден звучник во слободно поле, т.е. надвор од кутија, од фреквенцијата.<sup>3</sup>

#### 7.1.4 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 мембраната односно нејзино деформирање. Тие се мерат во % THD (Total Harmonic Distortion) при побуда на звучникот со синусен тон според:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N p_i^2}}{p_1}, \quad (7.6)$$

каде  $p_1$  е амплитудата на звучниот притисок кој одговара на фреквенцијата на синусниот тон, додека  $p_i$  се амплитудите на генерираните  $N$  вишви хармоници поради изобличувањата внесени од звучникот. THD е мерка за нелинеарноста на звучникот.

#### 7.1.5 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:

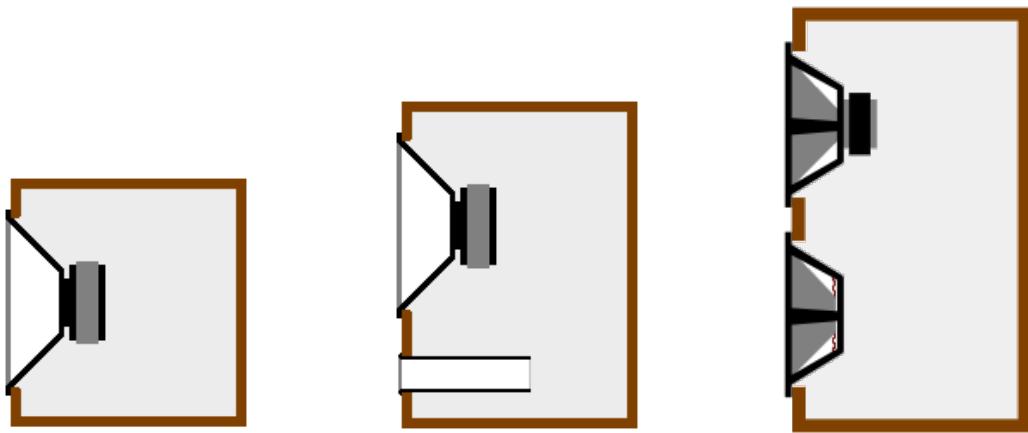
- **електромагнетни звучници,**
- **електродинамички звучници,**
- **електростатички звучници** и
- **пиеzоелектрични звучници.**

Од овие четири најраспространети се електродинамичките звучници.

Акустичката поделба на звучниците зависи од конструктивното решение на звучничката единица (драјвер), но и од начинот на кој таа е вградена во звучната кутија<sup>4</sup>. Така, според бројот на звучнички единици во кутијата, разликуваме:

<sup>3</sup>By Courtesy Spinningspark at Wikipedia, CC BY-SA 3.0, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=24571804>

<sup>4</sup>Wikipedia: Loudspeaker enclosure, [https://en.wikipedia.org/wiki/Loudspeaker\\_enclosure](https://en.wikipedia.org/wiki/Loudspeaker_enclosure).



**Сл. 7.4:** Примери за градба на звучни кутии: компресиона<sup>7</sup>, бас-рефлекс<sup>8</sup>, и звучна кутија со пасивна мембрана<sup>9</sup>.

- **едносистемски звучни кутии,**
- **дvosистемски звучни кутии,**
- **тросистемски звучни кутии**, односно
- **повеќесистемски звучни кутии.**

Од градбата на кутијата пак, разликуваме:

- **компресиони звучни кутии,**
- **бас-рефлекс звучни кутии**, односно **звучни кутии со издув**<sup>5</sup>,
- **звучни кутии со пасивна мембрана**<sup>6</sup>, односно
- **звучни кутии од повисок ред.**

Примери на овие изведби се прикажани на Сл. 7.4.

<sup>5</sup>Wikipedia: Bass reflex, [https://en.wikipedia.org/wiki/Bass\\_reflex](https://en.wikipedia.org/wiki/Bass_reflex).

<sup>6</sup>Wikipedia: Passive radiator (speaker), [https://en.wikipedia.org/wiki/Passive\\_radiator\\_\(speaker\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Passive_radiator_(speaker)).

<sup>9</sup>CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=52702>

<sup>9</sup>CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=52694>

<sup>9</sup>By 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>

# 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](http://web.uvic.ca/~hgiesbre/ELEC499/Elec499_ProgressRep2.pdf).

Albert Sweigart. *Invent Your Own Computer Games with Python: A Beginner's Guide to Computer Programming in Python*. Al Sweigart, 2010. ISBN 9780982106013. URL <http://inventwithpython.com/>.

Gael Varoquaux, Valentin Haenel, Emmanuelle Gouillart, Zbigniew Jędrzejewski-Szmacik, 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, 2015. URL <http://www.scipy-lectures.org/>.

Хуснија ІІІ. Куртовац. *Основи техничке акустике*. Научна Књига, Београд, 1982.