

Електроакустика

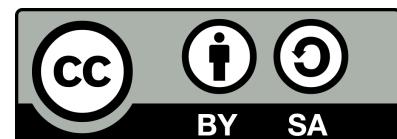
Бранислав Геразов

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

Електроакустика v0.72

© Copyright by Бранислав Геразов, 2015 – 2019 г.
Скрипта од предавањата по предметот Електроакустика
Институт за електроника
Факултет за електротехника и информациски технологии
Универзитет Св. Кирил и Методиј во Скопје, Македонија

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



Содржина

1 Вовед	5
1.1 Сетило за слух	5
1.2 Историја на акустиката	5
1.3 Области во акустиката	7
2 Зрачење и простирање на звукот	9
2.1 Еднодимензионални бранови	9
2.2 Акустичка бранова равенка	10
2.3 Рамнински бранови	13
2.4 Амплитуда на звучниот притисок	14
2.5 Брзина на простирање на звукот	15
2.6 Брзина и поместување на воздушните честички	15
2.7 Сферни бранови	17
2.8 Специфична акустичка импеданса	17
2.9 Интензитет на звук и акустичка моќност	18
2.10 Акустичка импеданса	20
2.11 Просторен агол на зрачење	21
2.12 Крива на насоченост	22
2.13 Рефлексија на звук	23
2.14 Рефлексија на звук при коса инциденција	25
2.15 Стоjni бранови	25
2.16 Слабеење на звукот	27
2.17 Запознавање со звучните форми	28
3 Електроакустички и електромеханички аналогии	32
3.1 Елементи на механичките системи	33
4 Психоакустика	34
4.1 Работа на човековото уво	34
4.2 Поимање на амплитудата на звукот	36
4.3 Поимање на фреквенцијата на звукот	38
4.4 Поимање на спектарот на звукот	38
4.5 Запознавање со феномени во психоакустиката	39
5 Акустика на простории	47
5.1 Резонантни фреквенции	47
5.2 Коефицент на апсорција	51
5.3 Статистичка анализа на звучното поле	52
5.4 Време на реверберација	55
5.5 Средна должина на слободната патека на звукот	56
5.6 Мерење на импулсниот одсив на просторија	56
6 Микрофони	67

6.1	Електроакустички преобразувачи	67
6.2	Основни карактеристики на микрофоните	67
6.3	Поделба на микрофоните	71
7	Звучници	73
7.1	Основни карактеристики на звучниците	73
Додаток А Слободен и отворен софтвер за инженерска и научна работа		79
A.1	Слободен софтвер	79
A.2	Четири слободи	79
A.3	Предности на слободниот софтвер	80
A.4	Одржливост	81
A.5	Слободен софтвер за инженерска и научна работа	82
Додаток А Питон за процесирање на аудиосигналите		85
A.1	Основи поставки во ГНУ/Линукс	85
A.2	Основи на работата со Питон	86
A.3	Основи на Нумпай и Матплотлиб	89

Поглавје 1

Вовед

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

1.1 Сетило за слух

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

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

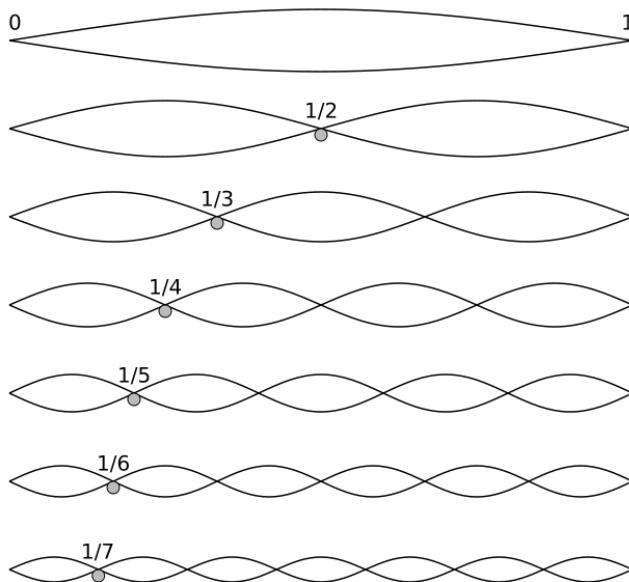
1.2 Историја на акустиката

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

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

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

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



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

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

По долго затишје во средниот век, [Галилео Галилеј, 1564 – 1642⁵](#), и „таткото на акустиката“ [Марин Мерсен, 1588 – 1648⁶](#), независно еден од друг ги откриваат комплетните закони на вибрација на жица. Галилео исто така за првпат го опишал звукот како психолошки феномен кој се должи на физиолошките промени во сетилото за слух (треперенето на ушното тапанче) предизвикани од брановите создадени од вибрацијата на едно звучно тело. Мерсен е еден од неколкуте истражувачи кои во тој период за прв пат ја измериле [брзината на звукот](#). Во истиот период [Исаак Ньютон, 1642 – 1727⁷](#) во својата „[Принципи“ \(1687\)](#) ја извел и зависноста на брзината на простирање на брановите во цврстите тела која е во основата на [физичката акустика](#), види Поглавје 2.

Голем напредок акустиката доживеала во XVIII век преку употребата на калкулусот за опишување на пропагацијата на звучните бранови. Проминентни фигури во математичката акустика во XIX век биле [Херман фон Хелмхолц⁸](#), кој ги оформил полето на [физиолошката акустика](#), види Поглавје 4, и [lordot Rejli⁹](#) кој го напишал капиталното дело „[Теорија на звукот“ \(1877\)](#). Во ова време [Витстоун, Ом и Хенри](#) ја развиле аналогијата помеѓу електротехниката и акустиката, види Поглавје 3.

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

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

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

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

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

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

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

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



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

Сабин¹⁰ 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** (ASA¹¹) 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 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 имплантни, поништување на ехо, перцептуално кодирање (mp3) итн.
4. **Архитектонска акустика** – наука за постигнувањето на добар звук во простории. Вообично се занимава со проучување на разбираливоста на говорот, неговата приватност и квалитетот на музиката во изградената околина.
5. **Биоакустика** – наука која го истражува слушањето и извиците на животните, како и влијанието на акустиката и звуците 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.

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

¹¹The Acoustical Society of America.

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

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.

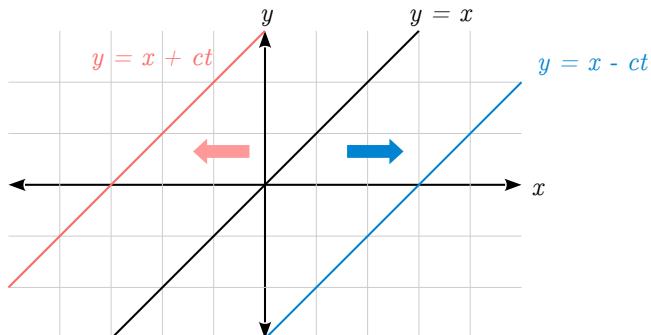
Поглавје 2

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 лонгитудинална природа, додека во цврстите средини тие се трансверзални. Во физиологијата и психологијата, под поимот звук се подразбира приемот на таквите механички бранови и нивното поимање во мозокот.

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).

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

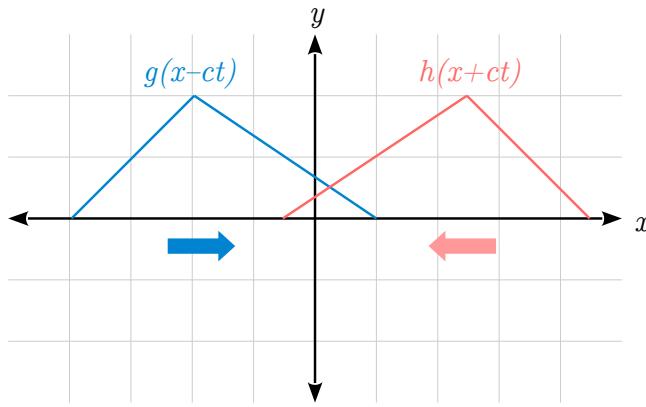
$$y = x - ct \quad (2.2)$$

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

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 ω 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** λ :

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

па конечно:

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

2.2 Акустичка бранова равенка

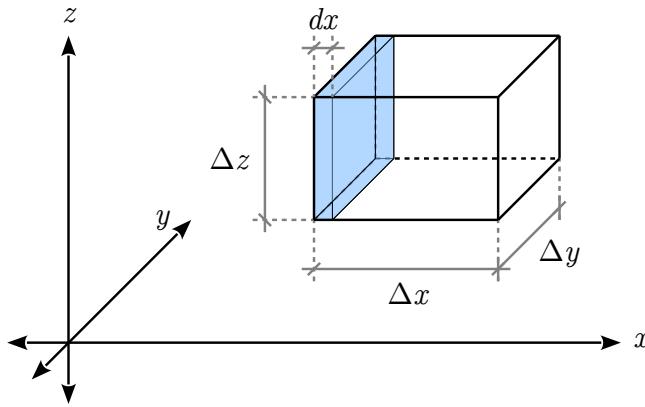
Да замислиме во воздушната средина елементарен волумен ΔV во облик на паралелопипед со страни Δx , Δy и Δz , прикажан на Сл. 2.3. На страните на овој паралелопипед делуваат сили кои се последица на притисокот во воздухот. Кога немаме звучни појави, притисокот е еднаков на атмосферскиот притисок p_{atm} во сите точки во овој простор, па затоа и сите сили се еднакви. Поради ова, немаме движење на елементарниот волумен ΔV .

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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:

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

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

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

а подалечната за:

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

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

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

За 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 ∇ 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 поврземе со промената на притисокот со помош на гасните закони. Во случајов се работи за адијабатска промена во волуменот, во која, поради нејзината брзина, немаме размена на топлина со соседната средина.¹ За адијабатски промени важи:

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

Тука κ е адијабатската константа што го дава односот помеѓу специфичната топлина при константен притисок и специфичната топлина при константен волумен, а p_t е вкупниот притисок дефиниран во (2.12). 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 замениме 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):

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

¹Изотермички промени во воздухот при простирањето на звукот се јавуваат само во специјални случаи кога средината ја држи температурата на воздухот константна, на пр. во тесни цевки или во порите на порозните материјали.

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

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

Тука p_t и ρ сме ги земале како константи, т.е. $p_t = p_{atm}$, што е оправдано кога е задоволен условот (2.13). ∇^2 пак, го означува лапласијанот.

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

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

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.

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 заменивме 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

звукниот бран. Конечно, ако земеме простирање на само еден бран во позитивната насока на x -оската, како и дека амплитудата на тој бран за $x = 0$ е дадена со A , тогаш (2.49) се упростува во:

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

чија што аналитичка форма:

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

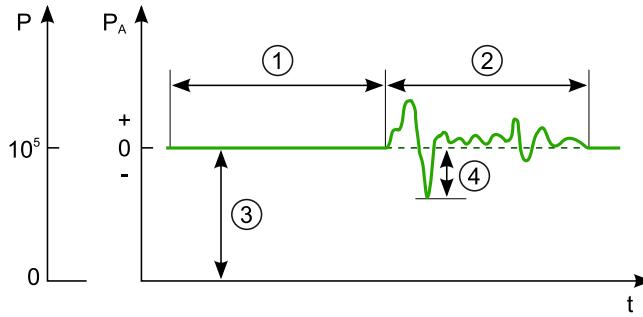
е еквивалентна со (2.6).

2.4 Амплитуда на звучниот притисок

Амплитудата на звучните бранови уште се нарекува и **звучен притисок p** . Таа зависи од интензитетот на нарушување на рамнотежната состојба предизвикан од изворот на звук. Како што кажавме погоре, звучниот притисок претставува само мал дел од вкупниот притисок во воздухот p_t кој е збир од атмосферскиот притисок p_{atm} и звучниот притисок (2.12):

$$p_t = p_{atm} + p.$$

Ова е прикажано на Сл. 2.4. Амплитудата на звучниот притисок се изразува во паскали (Pa) и



Сл. 2.4: Звучен притисок суперпониран на атмосферскиот притисок: 1) тишина, 2) звук, 3) атмосферски притисок, и 4) звучен притисок.²

се движи од прагот на чујност, што претставува најтревкиот звук кој може да го слушне човекот, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa, па сè до прагот на болка $p_t = 200$ Pa. Поради големиот опсег на вредности кои може да ги има звучниот притисок, како и поради нелинеарното чувство на гласност на звукот, неговата амплитуда вообичаено се изразува преку **нивото на звучниот притисок L** дадено со:

$$L = 20 \log \frac{p}{p_0}, \quad (2.52)$$

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

Фреквенција на звучните бранови

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

²By CLI - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9708905>

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

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

2.5 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 ρ е густината на воздухот. За температура од $T = 0^\circ\text{C}$ воздушниот притисок на ниво на морето е $p_{atm} = 101,325 \text{ kPa}$, па се добива дека брзината на звукот е $c = 331,4 \text{ m/s}$.

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

$$pV = nRT, \quad (2.53)$$

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

$$\frac{pV}{\rho} = \frac{nRT}{\rho}, \quad (2.54)$$

$$\frac{p}{\rho} = \frac{nRT}{\rho V} = \frac{nR}{m} = \text{const} \cdot T, \quad (2.55)$$

$$(2.56)$$

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

$$c = \sqrt{\frac{p_{atm}\kappa}{\rho}} = \sqrt{\text{const} \cdot \kappa T} = c_0 \sqrt{\frac{\text{const} \cdot T}{\text{const} \cdot T_0}} = c_0 \sqrt{\frac{T}{273}}, \quad (2.57)$$

каде c_0 е брзината на звукот за температура од 0°C . Од таму можеме да ја пресметаме брзината на звукот за температура од 20°C која изнесува $c_{20} = 343 \text{ m/s} = 1234 \text{ km/h} = 1 \text{ Mach}$. При движење на објект со оваа брзина притисокот од звучните бранови се концентрира пред објектот во вид на **звукен сид**, Сл. 2.5. Во Табелата 2.2 се дадени брзини на простирање на звукот во различни материјални средини.

2.6 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):

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

³By 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>



Сл. 2.5: Пробивање на звучен сид на брзина од 1 Mach.³

Табела 2.2: Брзина на звукот во различни средини.

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} &= -p_t \kappa \nabla \cdot \vec{v} \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= -\rho c^2 \frac{\partial v_x}{\partial x}. \end{aligned} \quad (2.58)$$

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:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\rho j \omega v, \quad (2.59)$$

$$v = j \frac{1}{\rho \omega} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{k}{\rho \omega} p = \frac{p}{\rho c}. \quad (2.60)$$

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

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

$$\xi = \int v dt = \frac{v}{\omega}. \quad (2.61)$$

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

2.7 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. 2.6. 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 ϕ – помеѓу проекцијата на векторот \vec{M} на xy -рамнината со x -оската, и θ – 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:

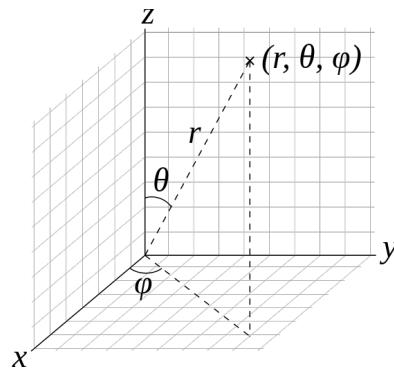
$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p = c^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = c^2 \frac{1}{r} \frac{\partial^2 (pr)}{\partial r^2}, \quad (2.62)$$

$$\frac{\partial^2 (pr)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 (pr)}{\partial r^2}, \quad (2.63)$$

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:

$$pr = A e^{j(\omega t - kx)}, \quad (2.64)$$

$$p = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kx)}. \quad (2.65)$$



Сл. 2.6: Сферен координатен систем.⁴

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

$$pr = const. \quad (2.66)$$

За брзината на воздушните честички имаме:

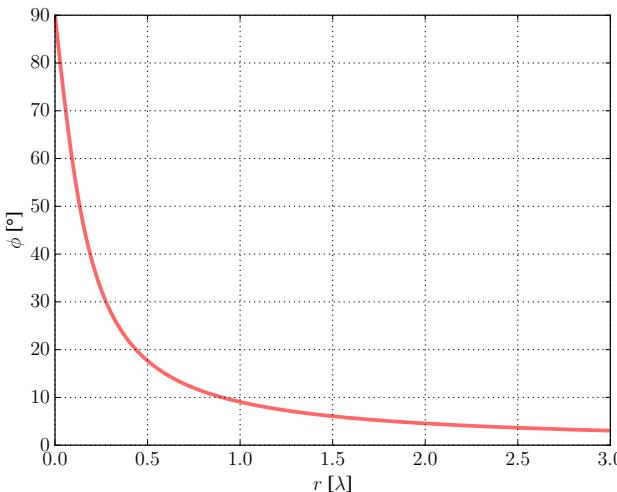
$$v = j \frac{1}{\omega \rho} \frac{\partial p}{\partial r} = j \frac{1 + jkr}{j\omega \rho} \frac{A}{r^2} e^{j(\omega t - kx)}. \quad (2.67)$$

2.8 Специфична акустичка импеданса

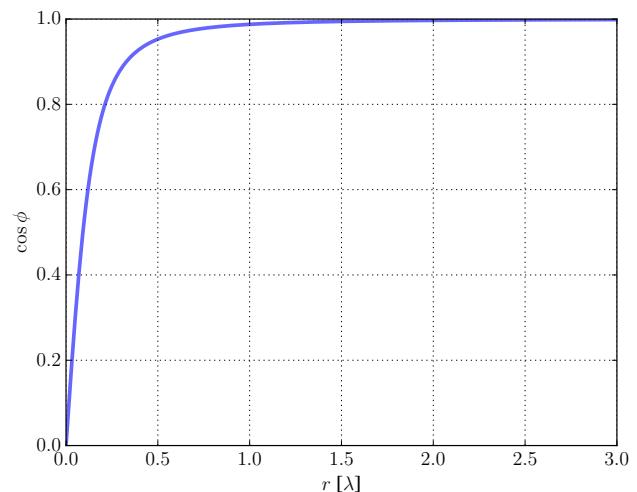
Можеме да направиме аналогија помеѓу звучниот притисок и електричниот напон, како и помеѓу брзината на воздушните честички и струјата поради нивното браново простирање. Според таа аналогија односот помеѓу притисокот и брзината се нарекува **специфична акустичка импеданса** Z_s . За сферни бранови, специфичната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

$$Z_s = \frac{p}{v} = \frac{j \rho c k r}{1 + jkr} = |Z_s| e^{j\phi}, \quad (2.68)$$

⁴By Andeggs - Own work, Public Domain. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7478049>



Сл. 2.7: Зависност на аголот ϕ од растојанието r изразено во λ .



Сл. 2.8: Зависност на $\cos \phi$ од растојанието r изразено во λ .

каде:

$$|Z_s| = \frac{\rho c k r}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} = \rho c \cos \phi, \quad (2.69)$$

$$\phi = \arctan \frac{1}{k r}. \quad (2.70)$$

Тука фазата на импедансата ϕ е [фазната разлика](#) помеѓу притисокот и брзината на воздушните честички, а во (2.69) искористено е:

$$\frac{k r}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} = \cos \phi. \quad (2.71)$$

На Сл. 2.7 и 2.8 е прикажана зависност на аголот ϕ и вредноста на $\cos \phi$ во зависност од растојанието од изворот r изразено во λ . Можеме да видиме дека веќе за $r = \lambda$ фазната разлика ϕ помеѓу притисокот и брзината на воздушните честички е занемарлива, па сферните бранови преминуваат во рамнински. Специфичната импеданса Z_s за $\cos \phi \approx 1$, го добива поедноставениот облик за рамнински бранови, до кој можевме да дојдеме и од (2.60):

$$Z_s = \frac{p}{v} = \rho c. \quad (2.72)$$

Вредноста на Z_s за рамнински звучни бранови кои се шират во воздух со температура од 20°C изнесува 414 kg/sm^2 .

Специфичната акустичка импеданса за сферни бранови (2.68) можеме да ја раздвоиме на нејзиниот реален и имагинарен дел:

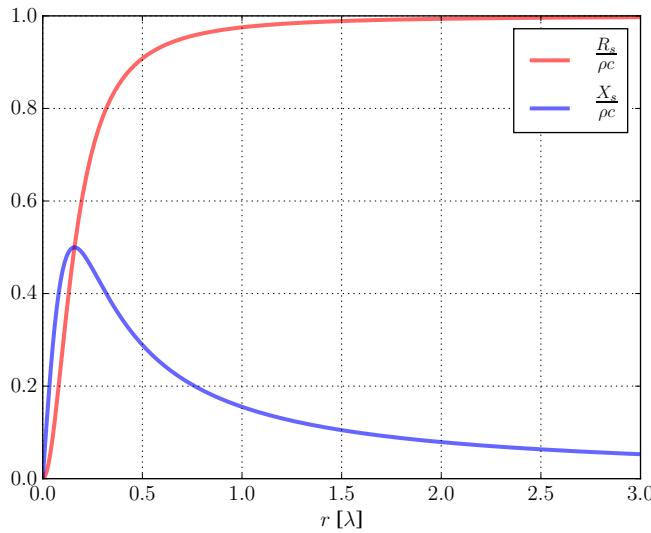
$$Z_s = R_s + j X_s = \frac{j \rho c k r}{1 + j k r} \cdot \frac{1 - j k r}{1 + j k r} = \frac{\rho c k^2 r^2}{1 + k^2 r^2} + j \frac{\rho c k r}{1 + k^2 r^2}. \quad (2.73)$$

Бидејќи X_s е секогаш позитивна таа има особини на индуктанса. На Сл. 2.9 се испртани нормализираните $R_s/\rho c$ и $X_s/\rho c$ во зависност од растојанието r кое е изразено во однос на λ . Можеме да видиме дека за $r = \lambda$ веќе R_s речиси ја постигнува својата максимална големина која ја има за рамнински бранови. Исто така може да се забележи дека X_s го надмашува R_s само за мали вредности на r во однос на λ , а тежи кон 0 со зголемувањето на r .

2.9 Интензитет 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:

$$J = p v \cos \phi, \quad (2.74)$$



Сл. 2.9: Реалната и имагинарната компонента на специфичната акустичка импеданса.

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

$$[pv] = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} = \frac{\text{N m}}{\text{s m}^2} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}, \quad (2.75)$$

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 (2.74) всушност го дава [интензитетот на звукот](#). За сферни и рамнински бранови неговиот облик е даден во Табелата 2.3. 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:

$$J = \frac{p^2}{\rho c}. \quad (2.76)$$

Табела 2.3: 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	$J = \frac{p^2}{\rho c}$	$J = v^2 \rho c$

Знаејќи го интензитетот на звукот можеме да ја пресметаме [акустичката моќност \$P_a\$](#) како:

$$P_a = \oint_S \vec{J} d\vec{S}, \quad (2.77)$$

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

$$P_a = SJ, \quad (2.78)$$

односно за сферни бранови:

$$P_a = 4\pi r^2 J. \quad (2.79)$$

2.10 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:

$$q = \int_S \vec{v} d\vec{S}, \quad (2.80)$$

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

$$q = vS. \quad (2.81)$$

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 (2.58):

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\rho}{S} \frac{\partial v_x}{\partial t}, \quad (2.82)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\rho c^2}{S} \frac{\partial v_x}{\partial x}. \quad (2.83)$$

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

$$P_a = pq. \quad (2.84)$$

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

$$Z_a = \frac{p}{q} = \frac{p}{vS} = \frac{Z_s}{S}. \quad (2.85)$$

Ако замениме за Z_s од (2.73) имаме:

$$Z_a = \frac{1}{4\pi r^2} \left(\frac{\rho c k^2 r^2}{1 + k^2 r^2} + j \frac{\rho c k r}{1 + k^2 r^2} \right) = R_a + jX_a, \quad (2.86)$$

па реалната акустичка моќност можеме да ја добиеме како:

$$P_a = q^2 R_a = q^2 \frac{\rho c k^2}{4\pi(1 + k^2 r^2)}. \quad (2.87)$$

Акустичката импеданса на зрачење можеме да ја најдеме ако во (2.86) замениме за радиусот на изворот r_0 :

$$Z_{a0} = \frac{1}{4\pi r_0^2} \left(\frac{\rho c k^2 r_0^2}{1 + k^2 r_0^2} + j \frac{\rho c k r_0}{1 + k^2 r_0^2} \right) = R_{a0} + jX_{a0}. \quad (2.88)$$

Користејќи го R_{a0} можеме со замена во (2.87) да ја најдеме акустичката моќност на изворот:

$$P_a = q_0^2 R_{a0} = q_0^2 \frac{\rho c k^2}{4\pi(1 + k^2 r_0^2)}. \quad (2.89)$$

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

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

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

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

$$P_a = q_0^2 \frac{\rho c}{4\pi r_0^2} = q_0^2 \frac{\rho c}{S_0}. \quad (2.91)$$

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 обликовот на звучниот извор игра улога во зрачењето само за фреквенции за кои $r_0 \approx \lambda$.

За дискусија да замениме во (2.90) за брзината на воздушните честички и нивното движење:

$$P_a = q_0^2 \frac{\rho c k^2}{4\pi} = v_0^2 S_0^2 \frac{\rho c \omega^2}{4\pi c^2} = \frac{\omega^4 \xi_0^2 S_0^2 \rho}{4\pi c}. \quad (2.92)$$

Од равенството можеме да видиме дека акустичката моќност точкест 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.

2.11 Просторен агол на зрачење

Ако замислиме точкест извор вграден во една бесконечно голема и крута површина, на пр. една мембра на со мали димензии во однос на брановата должина на звучните бранови вградена во цврст и гладок сид. Тогаш, специфичната акустичка импеданса Z_s нема да се промени затоа што таа зависи само од типот на звучните бранови, додека акустичката импеданса на зрачење Z_{a0} ќе биде различна од онаа дефинирана за точкест извор во слободен простор (2.88) поради помалиот простор на зрачење на изворот. Така овојпат ќе имаме:

$$Z_{a0} = \frac{1}{2\pi r_0^2} Z_s = \frac{1}{2\pi r_0^2} \left(\frac{\rho c k^2 r_0^2}{1 + k^2 r_0^2} + j \frac{\rho c k r_0}{1 + k^2 r_0^2} \right) = \frac{\rho c k^2}{2\pi} + j \frac{\rho c k}{2\pi r_0}, \quad (2.93)$$

Или во општ случај може да запишеме:

$$Z_{a0} = \frac{1}{\Omega_z r_0^2} Z_s = \frac{\rho c k^2}{\Omega_z} + j \frac{\rho c k}{\Omega_z r_0} = R_{a0} + j X_{a0}, \quad (2.94)$$

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

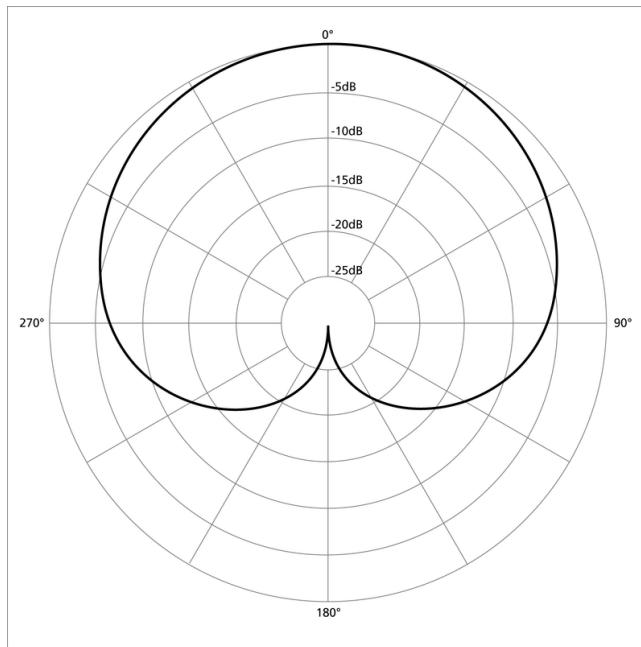
$$P_a = q_0^2 \frac{\rho c k^2}{\Omega_z}, \quad (2.95)$$

а и интензитетот на звукот кој го генерира:

$$J = \frac{P_a}{\Omega_z r^2}. \quad (2.96)$$

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

$$\frac{P_{a2}}{P_{a1}} = \frac{q_0^2 \frac{\rho c k^2}{\Omega_{z2}}}{q_0^2 \frac{\rho c k^2}{\Omega_{z1}}} = \frac{\Omega_{z1}}{\Omega_{z2}} = \frac{4\pi}{2\pi} = 2, \quad (2.97)$$



Сл. 2.10: Крива на зрачење на звучен извор.⁶

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:

$$\frac{J_2}{J_1} = \frac{\frac{P_{a2}}{\Omega_{z2} r^2}}{\frac{P_{a1}}{\Omega_{z1} r^2}} = \frac{2\Omega_{z1}}{\Omega_{z2}} = \frac{2 \cdot 4\pi}{2\pi} = 4. \quad (2.98)$$

Значи зголемување на моќноста и интензитетот на звукот на еден извор може да добиеме со намалување на неговиот просторен агол на зрачење. Ова често се користи во човековото секојдневие, на пр. кај мегафоните, хорните на звучниците, поставување на звучниците до сид, или уште повеќе во ќоп⁵, како и кај довикувањето со поставување на рацете како инка на устата.

2.12 Крива на насоченост

Сферните звучни извори за кои зборувавме 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. Графичкиот приказ на насоченоста на звучниот извор се нарекува [кривата на насоченост](#), Сл. 2.10. Таа во поларен координатен систем ја претставува насоченоста на звучниот извор како функција од аголот на зрачење θ пресметан во однос на оската на зрачење:

$$\Gamma = \frac{p_\theta}{p_0}, \quad (2.99)$$

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

Кривата на насоченост на звучните извори зависи од фреквенцијата на звукот. За ниски фреквенции, изворот 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 2.77:

$$P_a = \oint_S J_\theta dS = J_0 \oint_S \frac{J_\theta}{J_0} dS = J_0 \oint_S \Gamma^2 dS = J_0 r^2 \int_0^{4\pi} \Gamma^2 d\Omega, \quad (2.100)$$

⁵Ова 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.

⁶Galak76 "Polar pattern cardioid" <https://en.wikipedia.org/wiki/Microphone>.

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

$$\Omega_z = \oint_0^{4\pi} \Gamma^2 d\Omega, \quad (2.101)$$

Од таму имаме:

$$J_0 = \frac{P_a}{\Omega_z r^2}. \quad (2.102)$$

Споредено со (2.96) можеме да заклучиме дека насочен извор ќе го даде истиот интензитет долж оската J_0 како ненасочен извор на кој сме му го намалиле просторниот агол на зрачење на Ω_z . За подобро изразување на ова се воведува **кофициентот на насоченост γ** :

$$\gamma = \frac{4\pi}{\Omega_z}, \quad (2.103)$$

па за J_0 имаме:

$$J_0 = \gamma \frac{P_a}{4\pi r^2}. \quad (2.104)$$

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

$$J_\theta = \gamma \frac{P_a}{4\pi r^2} \Gamma^2. \quad (2.105)$$

2.13 Рефлексија на звук

Во досегашните разгледувања го анализираме простирањето на звучните бранови во неограничен слободен простор, па земавме дека звукот е потполно описан како прогресивен бран. Во реалноста на граничните површини на средината доаѓа до рефлексија на звукот, па правилно е да се земат и прогресивниот и рефлектиријниот бран описан со (2.49):

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

За брзината на воздушните честички според (2.60) имаме:

$$v = \frac{A_+}{\rho c} e^{j(\omega t - kx)} - \frac{A_-}{\rho c} e^{j(\omega t + kx)}. \quad (2.106)$$

Ако претпоставиме дека звучниот бран се простира во идеална цевка, т.е. звуковод, која на единиот 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:

$$\left. \frac{p}{v} \right|_{x=0} = \rho c \frac{A_+ + A_-}{A_+ - A_-} = Z_s. \quad (2.107)$$

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

$$r = \frac{A_-}{A_+} = \frac{Z_s - \rho c}{Z_s + \rho c} = \beta e^{j\delta}, \quad (2.108)$$

каде β го дава односот на магнитудите на двата брана е δ фазната разлика помеѓу брановите. Интересно е да се забележи дека рефлексија ќе немаме само ако $Z_s = \rho c$, односно ако специфичната импеданса на крајот на звуководот е иста со онаа на воздухот низ кој се простира звучниот бран.⁷ За звуковод, посодветно е да ја искористиме акустичката импеданса за изразување на r :

$$r = \frac{Z_a - \frac{\rho c}{S}}{Z_s + \frac{\rho c}{S}}, \quad (2.109)$$

⁷ Оваа појава е причината зошто во радиотехниката се поставува импеданса на крајот од водовите еднаква со онаа на самиот вод, наречена „терминатор“.

каде S е површината на напречниот пресек на звуководот.

За екстремниот случај кога $Z_s \rightarrow \infty$ ⁸ 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:

$$p(0,t) = 2A_+ e^{j\omega t}, \quad (2.110)$$

а брзината на воздушните честички според (2.106) ќе е:

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

што е и логично за бесконечна импеданса.

Во случај пак, кога $Z_s = 0$ ⁹ 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:

$$p(0,t) = 0, \quad (2.112)$$

$$v(0,t) = 2 \frac{A_+}{\rho c} e^{j\omega t}. \quad (2.113)$$

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

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

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

$$r = \frac{\frac{\rho_2 c_2}{S_2} - \frac{\rho_1 c_1}{S_1}}{\frac{\rho_2 c_2}{S_2} + \frac{\rho_1 c_1}{S_1}}. \quad (2.115)$$

Во случај кога во звуководот нема промена на средината, туку само на напречниот пресек, повторно ќе се јави рефлексија.¹⁰ Во тој случај коефициентот на рефлексија ќе биде даден со:

$$r = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2}. \quad (2.116)$$

Двата екстремни случаји, $Z_s \rightarrow \infty$ и $Z_s = 0$, во реалноста ретко можат да се појават, но добиените резултати важат и кога импедансите на двете средини се многу различни. Така, доволно е $Z_s \gg \rho c$, односно $\rho_2 c_2 \gg \rho_1 c_1$, што се јавува кога воздушната средина се граничи со средина која има поголема густина, но и поголема брзина на простирање на звукот. Вакви средини има многу, како што беше илустрирано во Табелата 2.2. Во звуковод ова би било задоволено ако единствот негов крај е затворен.

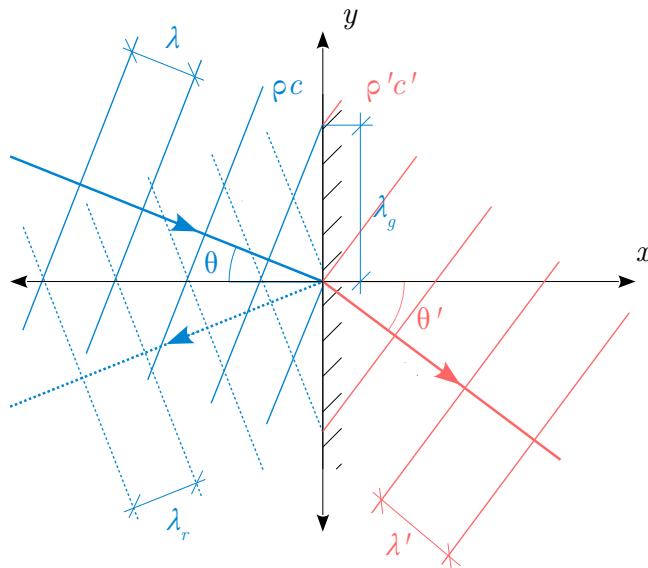
Спротивниот услов, т.е. $Z_s \ll \rho c$ или $\rho_2 c_2 \ll \rho_1 c_1$, потешкото може да се реализира при простирање на звукот низ воздухот, но може да се сртне кога звучниот бран се простира во водата и доаѓа до нејзината површина. Во звуковод условот $\rho_2 c_2 / S_2 \ll \rho_1 c_1 / S_1$ може да се задоволи кога $S_2 \gg S_1$, како на пример кога единствот негов крај е отворен во слободен простор.¹¹

⁸Аналогно на отворен вод во електричен домен.

⁹Аналогно на куса врска во електричен домен.

¹⁰Ваков вид на рефлексија е суштински за обликувањето на преносната функција на вокалниот тракт при зборувањето.

¹¹Во аналогијата со електричен вод, затворен звуковод одговара на отворен вод, а отворен звуковод одговара на кусо врзан вод.



Сл. 2.11: Рефлексија на звук при коса инциденција.

2.14 Рефлексија на звук при коса инциденција

При коса инциденција на звучен бран на гранична површина, прикажано на Сл. 2.11 може да се употребат законите на геометристката оптика ако граничната површина е со димензии поголеми од брановата должина λ . Еквивалентната област во акустиката се нарекува **геометристка акустика** и во неа се анализира простирањето на тенки спонови акустичка енергија наречени **звукни зраци**.

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

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

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

$$\sin \theta = \frac{c}{c'}. \quad (2.118)$$

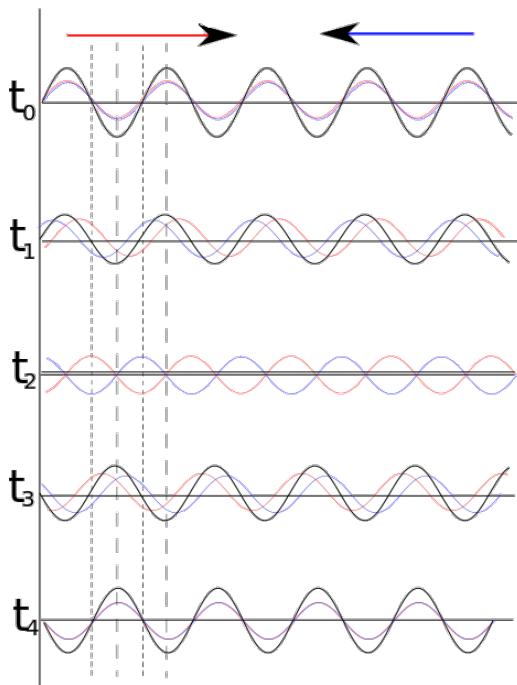
2.15 Стојни бранови

Од изразот за коефициентот на рефлексија (2.108) и изразот за еднодимензионални бранови (2.49) можеме да го напишеме изразот за звучниот притисок при нормална инциденција:

$$p = A_+ (e^{j(\omega t - kx)} + \beta e^{j(\omega t + kx + \delta)}). \quad (2.119)$$

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

$$\begin{aligned} p &= A_+ (e^{j(\omega t - kx)} + \beta e^{j(\omega t + kx + \delta)}) = \\ &= A_+ [\cos(-kx) + j \sin(-kx) + \cos(kx) + j \sin(kx)] e^{j\omega t} = \\ &= 2A_+ \cos kx e^{j\omega t}. \end{aligned} \quad (2.120)$$



Сл. 2.12: Стоен бран добиен како збир на два брана кои се простираат во спротивни насоки.¹²

Може да забележиме дека иако амплитудата зависи од растојанието x , звучниот бран описан со (2.120) не се простира, односно преставува **стоен бран**. Неговата амплитуда е максимална и е двојно поголема од онаа на самиот прогресивен бран, на сите локации за кои $\cos kx = 1$, односно за $x = 0, -\lambda/2, -\lambda, -3\lambda/2, \dots$ Спротивно, за сите позиции за кои $\cos kx = 0$, односно $x = -\lambda/4, -3\lambda/4, -5\lambda/4, \dots$ амплитудата на притисокот на стојниот бран ќе биде 0. Така ако се движиме долж x оската почнувајќи од граничната површина па напред, ќе забележиме дека звукот со движењето се намалува се 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. 2.12.

За брзината на воздушните честички важи:

$$v = 2 \frac{A_+}{\rho c} \sin kx e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})}, \quad (2.121)$$

што значи дека повторно се работи за стоен бран, но кој е фазно поместен во однос на притисокот за $\pi/2$. Според (2.74), интензитетот на стојниот бран е:

$$J = pv \cos \phi = pv \cos \frac{\pi}{2} = 0. \quad (2.122)$$

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

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 овој на граничната површина при појавата на стојни бранови. Ова можеме да го искористиме за анализа на проблемот на рефлексија на звучните бранови преку претставување на рефлектиралиот бран како бран произведен од звучен извор симетрично поставен на оригиналниот во однос на граничната површина.

¹²By Wjh31 - File:Standing_wave_2.gif, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=char%0304\relax0072287>.

2.16 Слабеење на звукот

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

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

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

$$J = J_0 e^{-mx}, \quad (2.123)$$

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

$$J = J_0 \frac{r_0^2}{r^2} e^{-m(r-r_0)}, \quad (2.124)$$

или изразено преку притисокот:

$$p = p_0 \frac{r_0}{r} e^{-\frac{m(r-r_0)}{2}}. \quad (2.125)$$

Ако го пресметаме слабеењето во dB добиваме:

$$M = 20 \log \frac{p_0}{p} = 20 \log \frac{r}{r_0} + 4,34m(r - r_0). \quad (2.126)$$

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

2.17 Запознавање со звучните форми

Практичен дел

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

Основни особини на звукот

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

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

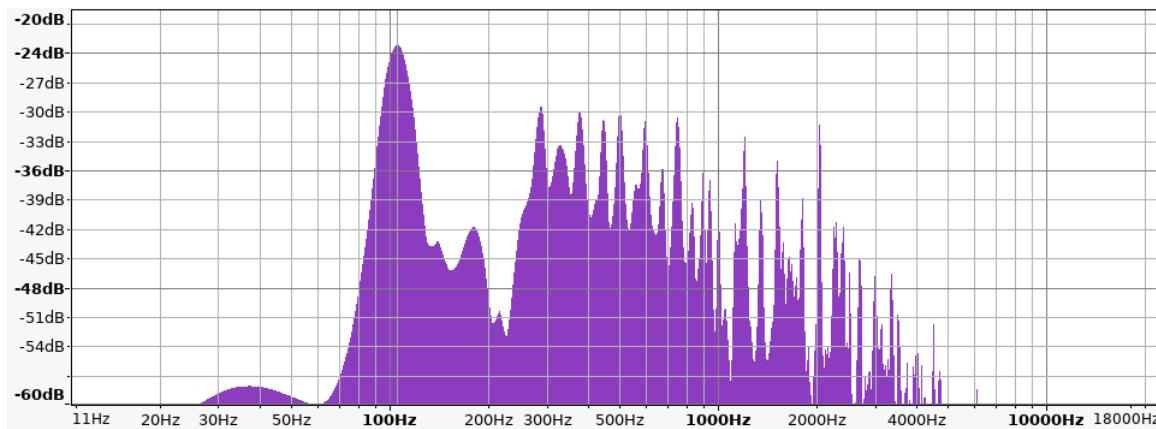
✓ **Задача за час.** Зумирајте до ниво на 0.1 ms и употребете го моливчето веднаш од алатникот за да нацртате дел од аудио фајлот според ваша желба. Ваквите можности се незамисливи во едитирањето на аналогното аудио!

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

$$p(t) = \frac{c_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(2\pi n f_0 t + \theta_n), \quad (2.127)$$

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 хармоници](#).

Ако промената во средината што ја внесува звучниот бран не е периодична, станува збор за апериодичен звук. Неговиот спектар според Фурие не е дискретен туку континуиран. Тој е



Сл. 2.13: Спектар на аудио трака во Аудасити.

даден во интегрална форма со равенството:

$$p(t) = \int_0^{\infty} c(f) \cos(2\pi ft + \theta(f)) df. \quad (2.128)$$

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

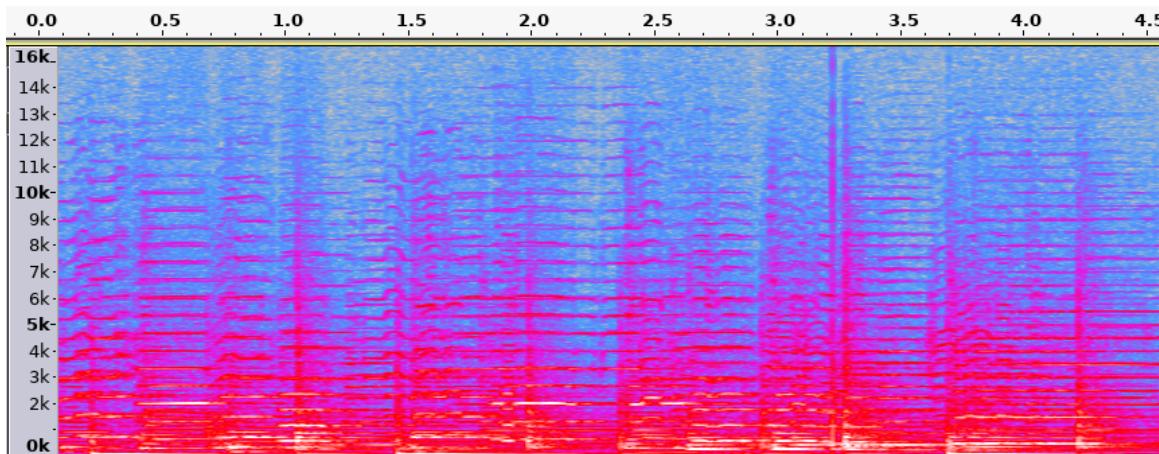
За да видиме како се менува спектарот на аудио сигналот во времето се користи **спектограмот** кој претставува 3D приказ кој на x -оската има време, на y -оската фреквенција, а на z -оската амплитуда, прикажан на Сл. 2.14. Со овој приказ може да видиме во кои временски моменти кои делови од спектарот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

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



Сл. 2.14: Спектрограм на аудио трака во Аудасити.

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.¹³

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 кaj 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.

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

- звучна вилушка,
- виолина,
- тапан.

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 свириат во високиот регистар, наспроти кога свириат 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 генерираниот звук како промена во бојата.

¹³Свиркањето со уста исто така генерира близу прост звук меѓутоа при неговата анализа може да се забележи и слаб втор хармоник.

✓ **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 фреквенција f_0 ? За да го одредите тоа поточно со `Plot Spectrum` селектирајте дел со изразени хармоници, на пр. за време на некоја од самогласките.

Снимање на аудио

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

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

За да го завршите снимањето притиснете на `Stop`. Снимениот говорен сигнал веќе ќе биде прикажан во нова аудио 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 средниот 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 затворен¹, 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:

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

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

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

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

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

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

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 посложен акустички систем, тогаш оваа компензација треба да се примени на двата нејзини краеви, па тогаш имаме:

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

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

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 механичките 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

Психодакустика

Психодакустиката 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](#).

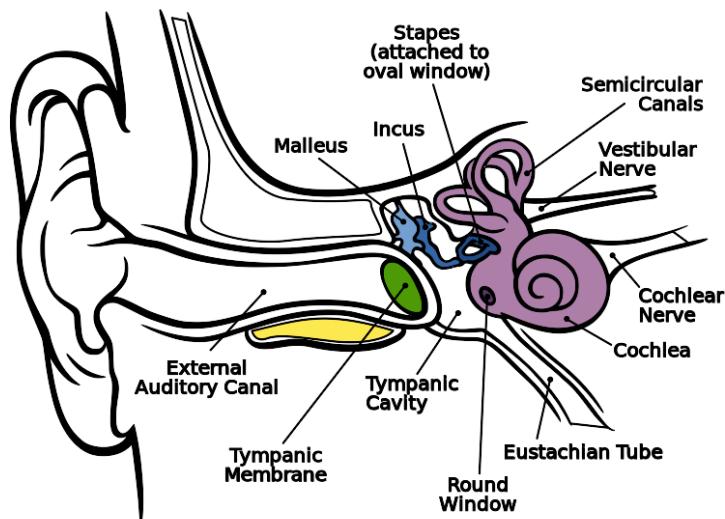
4.1 Работа на човековото уво

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.¹ 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 (malleus), наковална (incus) и стремен (stapes). Поради нивното функционирање како лост, како и поради 19-кратната разлика во површина помеѓу слушното тапанче и овалниот прозорец, средното уво реализира прилагодување на акустичката импедансата помеѓу воздухот и течната средина во ушното полжавче.²
- [внатрешно уво](#) – одговорно за преобразба на акустичките осцилации од механички домен во невронски импулси преку ушното полжавче (cochlea); во внатрешното уво се поместени и полукуружните канали одговорни за рамнотежа кај човекот.

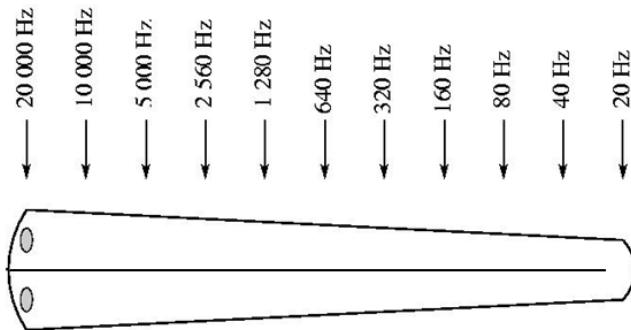
¹Ова и причината зошто не можеме да кажеме од која висина доаѓа звукот ако тој доаѓа од позади нас.

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



Сл. 4.1: Состав на човековото уво.³

Ушното полжавче е составено од еден долг канал полн со лимфна течност во која се пренесуваат акустичките осцилации. Внатре во каналот се наоѓа базилијарната мембра на 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 мембра на.

Во внатрешноста на базилијарната мембра се наоѓа органот на Корти кој содржи околу 15 000 клетки влакна, кои пак претставуваат завршетоци на аудиторниот нерв. Вибрациите на базилијарната мембра предизвикуваат испраќање на нервни импулси од овие клетки влакна. На овој начин ушното полжавче врши фреквенциска анализа на звучната појава, своевидна физиолошка Фурьеова 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.

³“Anatomy of the Human Ear en” by Chittka L, Brockmann [https://commons.wikimedia.org/wiki/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)

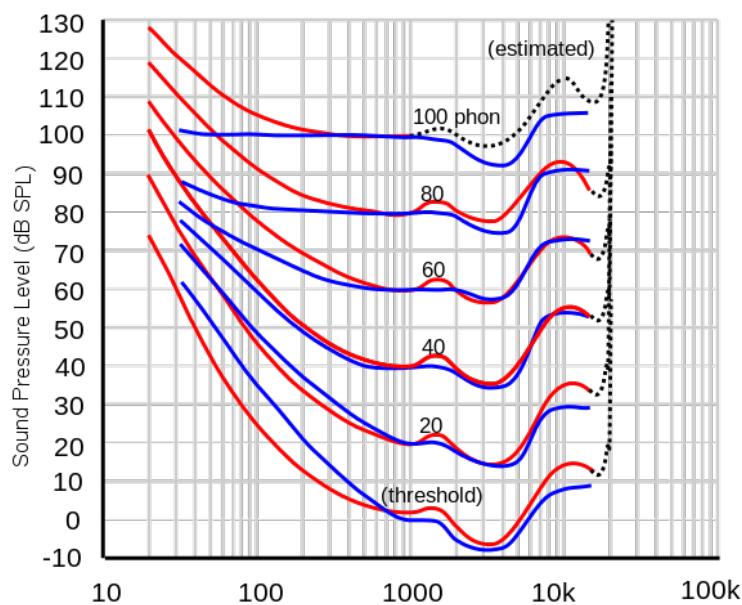
4.2 Поимање на амплитудата на звукот

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 почувствуваат на мали отколку на големи звучни побуди. Уште повеќе, надворешните клетки влакна играат улога на нелинеарни механички засилувачи на акустичките осцилации. Имено, клетките влакна претставуваат електромеханички преобразувачи кои работат во обете насоки, па нивна стимулација од страна на нервите предизвикува нивна механичка вибрација која во фаза со оригиналната акустичка побуда, ја засилува.⁴ Исто така, мускулите прицврстени на ковчињата од средното уво се активираат при големи звучни притисоци внесувајќи нелинеарност во вид на заситување. Фреквенциската нелинеарност на поимањето на амплитудата пак е поврзана со распределбата на нервните завршетоци на базилијарната мембрана.

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

Јачина на звук

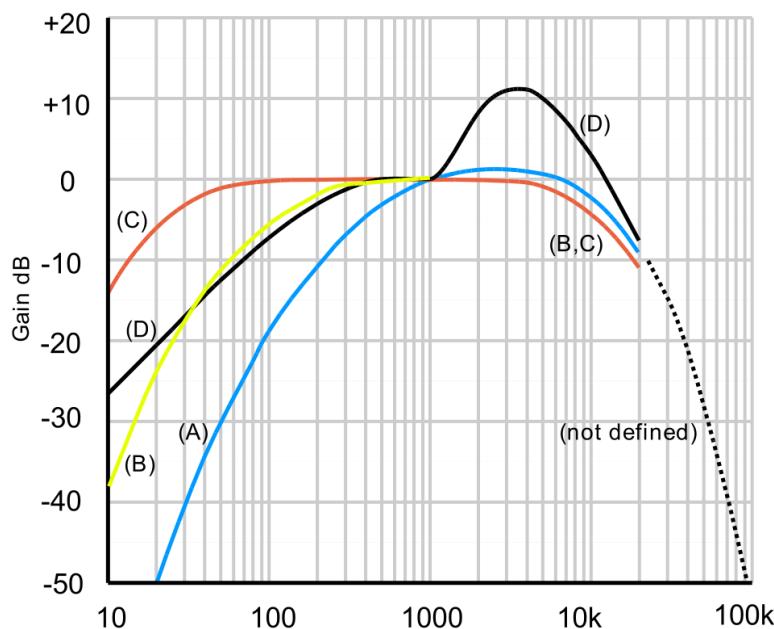
Јачината на звукот Λ изразена во фони (phon) ја квантизира фреквенциската нелинеарност на амплитудната осетливост на човековото уво. Поврзувањето на јачината на звукот и нивото на звукот се врши преку изофонските криви кои први ги измериле Флечер и Мунсон (1933), па потоа и Робинсон и Дадсон (1956). Денес тие се редефинирани со ISO стандардот 226:2003. Прикажани на Сл. 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 Λ [phon] и нивото на звукот L [dB] да се поклопуваат за фреквенција f од 1 kHz.



Сл. 4.3: Криви на еднаква чујност, или изофонски криви, измерени според Флечер и Мунсон (сино) и стандардизирани според ISO стандардот (црвено).⁵

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

За да се земе во предвид нелинеаната осетливост на слухот при мерење на субјективната јачина на некој звук, а посебно при мерењето на јачината на некоја бучава, уредите за мерење нудат перцептуална корекција на измереното ниво преку соодветно филтрирање на спектарот. Постојат неколку тежински криви за оваа цел: A, B, C, D и Z, прикажани на Сл. 4.4. Првата A-крива е и најкористена и се базира на кривата за 40 phon од графикот на Флечер и Мунсон, па мерењата со нејзе се најточни за ниски нивоа на бучава. Останатите Нивото измерено со оваа крива се дава во dB(A), односно dBA. Од другите криви во употреба е кривата C која се користи за поголеми нивоа на бучава.



Сл. 4.4: Тежински криви за мерење на перцептуално ниво на бучава.⁶

Гласност на звук

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

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

⁶"Acoustic weighting curves" by Lindosland https://en.wikipedia.org/wiki/File:Acoustic_weighting_curves_%2821%29.svg

- 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:

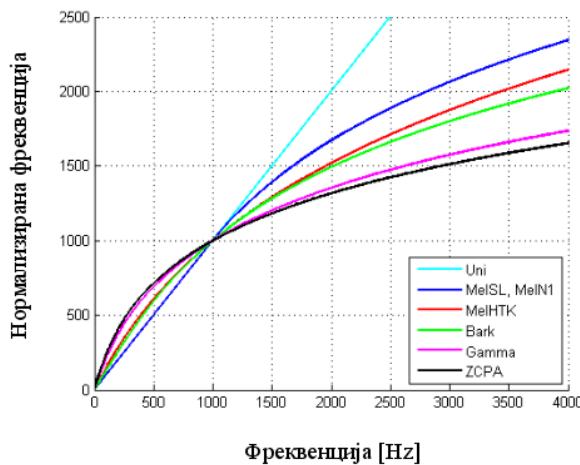
$$\Gamma = 2^{\frac{\Lambda-40}{10}}, \quad (4.3)$$

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

4.3 Поимање на фреквенцијата на звукот

Поради нерамномерната распределеност на фреквенциската осетливоста на базилијарната мембрана 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 перцентуалната 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 Питон (види [Додаток А](#)).⁷

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 wav фајл, а потоа да ја искористиме системската play наредба од SoX.⁸

```
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?

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.

⁷Делови од ова поглавје се адаптирани од материјалите за предметот Дигитални аудиосистеми кој се предава на додипломски студии (VI семестар) на ФЕИТ. <https://github.com/FEEIT-FreeCourseWare/Digital-Audio-Systems/>

⁸SoX е слободен софтвер за коверирање, обработка, снимање и преслушување на аудио фајлови. <http://sox.sourceforge.net/>

```

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

```

```

# 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'])

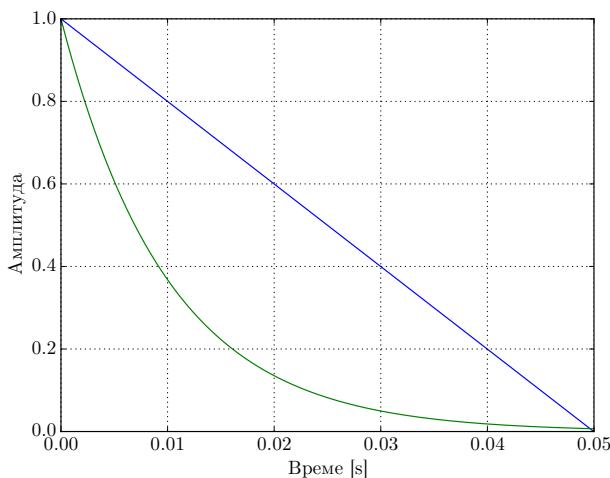
# play sines
wavfile.write('sine.wav',fs, np.array(sine * 2**15, dtype='int16'))
os.system('play sine.wav')
wavfile.write('sine_lin.wav', fs, np.array(sine_lin * 2**15, dtype='int16'))
os.system('play sine_lin.wav')
wavfile.write('sine_log.wav', fs, np.array(sine_log * 2**15, dtype='int16'))
os.system('play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

```

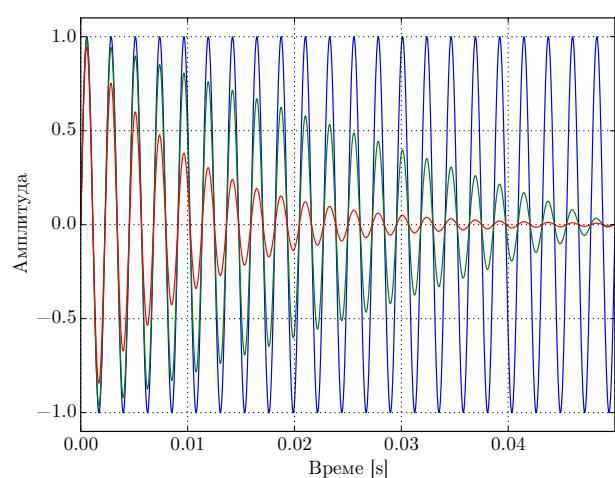
✓ **Задача за час.** Што можете да чуете? Кој од двата сигнала опаѓа порамномерно? Направете линеарно и логаритамско засилување на сигналот и споредете ги резултатите.

Логаритамска осетливост на фреквенција

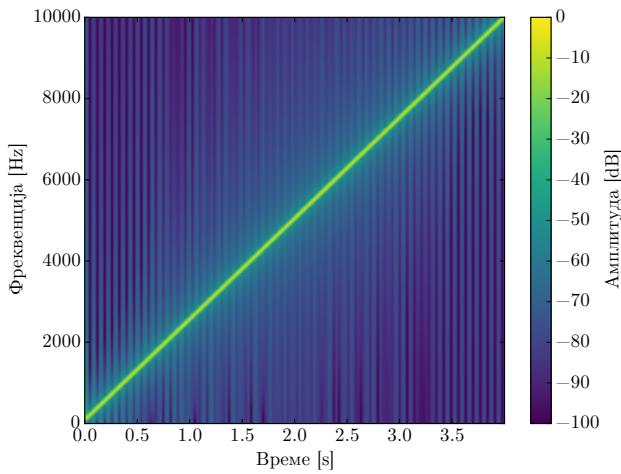
Овој феномен ќе го демонстрираме со синусен тон со променлива фреквенција, т.н. sine sweep, кој ќе го генерираме најпрвин со линеарна, а потоа и со логаритамска карактеристика.



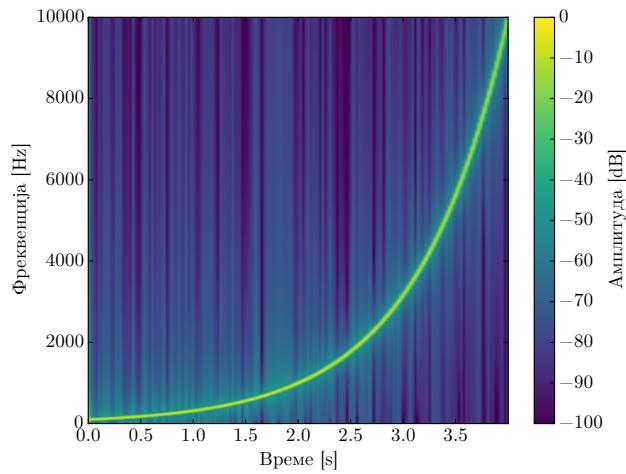
Сл. 4.6: Криви за втишување.



Сл. 4.7: Линеарно (зелена) и експоненцијално (првена) втишување на синусен тон (сина).



Сл. 4.8: Синус со линеарна промена на фреквенцијата.



Сл. 4.9: Синус со логаритамска промена на фреквенцијата.

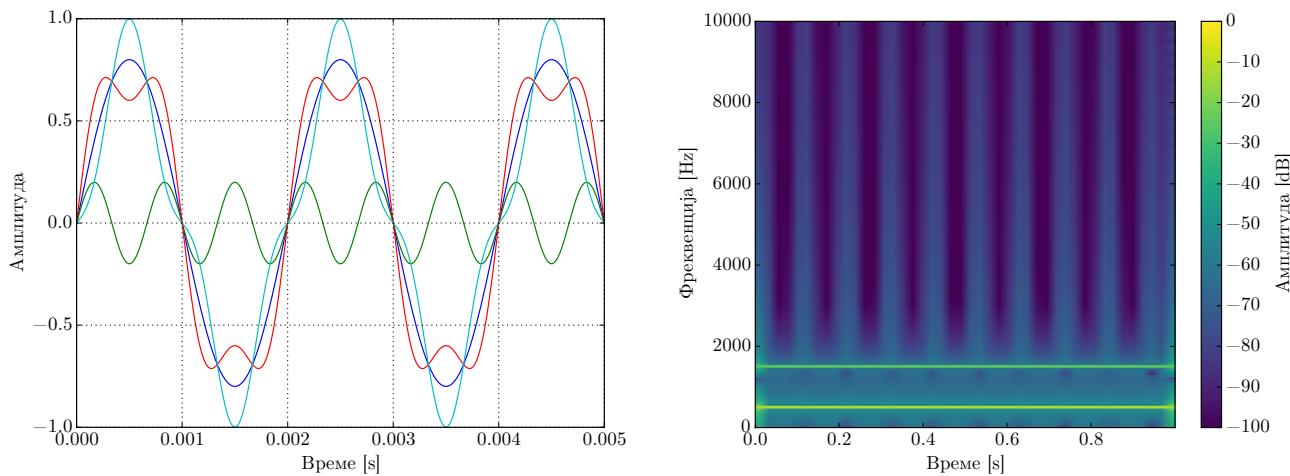
```
f = 440
fs = 44100
ts = 1 / fs
t = np.arange(0, 4, ts)
sound = sig.chirp(t, 100, t[-1], 10000)
sound_log = sig.chirp(t, 100, t[-1], 10000, method='logarithmic')
```

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

```
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 опфаќа порамномерно?



Сл. 4.10: Демонстрација на фазна неосетливост преку сума на две синусоиди со различна фазна поместеност.

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.

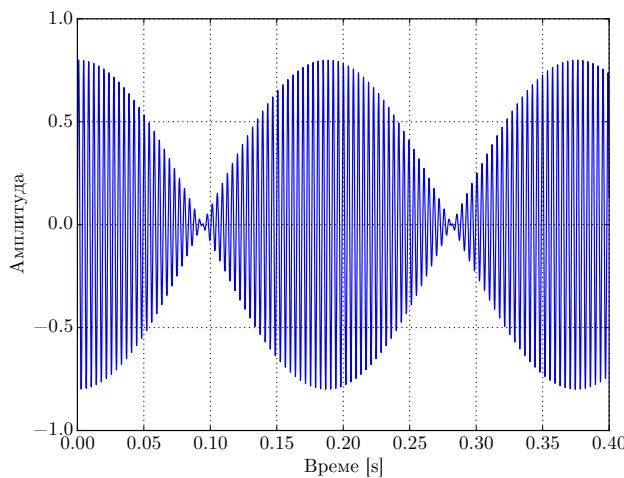
```
f = 440
fs = 44100
ts = 1 / fs
t = np.arange(0, 1, ts)
sound_500 = 0.8 * np.sin(2*np.pi*t*500)
sound_1500 = 0.2 * np.sin(2*np.pi*t*1500)
sound_sum1 = sound_500 + sound_1500
sound_sum2 = sound_500 - sound_1500
```

✓ Задача за час. Испртјајте и преслушајте ги звучните сигнали. Да ли можете да видите/чуете разлика? Прикажете го нивниот спектрограм.

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 раззвучје.

Овој феномен ќе го демострираме со генерирање на тонови од музичката скала кој почнува од основниот тон C3 на 261 Hz.



Сл. 4.11: Илустрација на феноменот на звучно биење.

```

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

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

Поглавје 5

Акустика на простории

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

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:

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

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

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 .

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

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

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

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

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

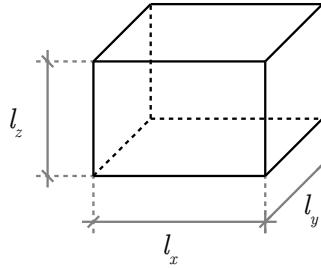
$$\frac{2c}{\lambda_n} = \frac{nc}{l_x}, \quad (5.8)$$

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

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 мултипли од најниската фреквенција f_1 за која половина од брановата должина е еднаква на должината на звуководот l_x . Оваа фреквенција се нарекува основна

фреквенција или основен хармоник, додека нејзините мултипили се нарекуваат виши хармоници.¹

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

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

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

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

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

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

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

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

¹Основниот хармоник почесто се бележи f_0 наместо f_1 .

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

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

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

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

$$(5.21)$$

Тогаш (5.17) преминува во:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

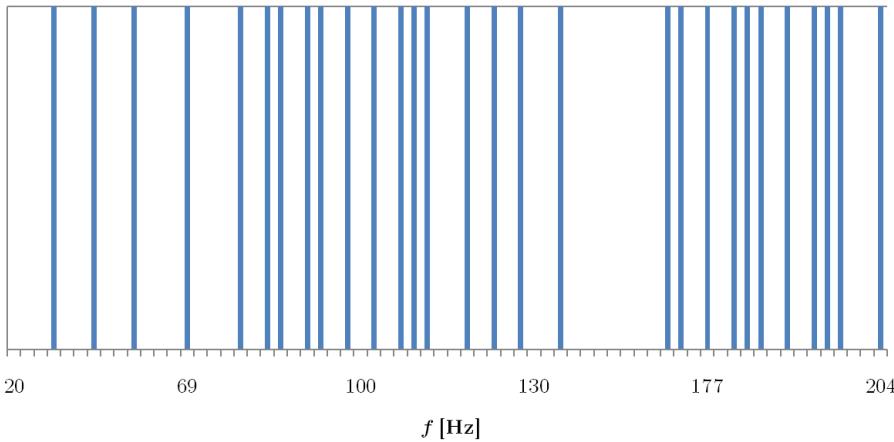
каде \mathbf{n} претставува вектор во просторот на резонантни фреквенции на просторијата одреден со тројка од вредности на n_x , n_y и n_z :

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

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 еднодимензионалните акустички средини како звуководите. Фреквенциите за кои две n се различни од нула се поврзани со **површинските стојни бранови** кои се паралелни на една од границите површини, определена од тоа n кое има вредност 0. Најсложените **просторни стојни бранови** се описани со тројки во кои сите n се различни од 0.

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

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



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

што е еквивалентно со (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:

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

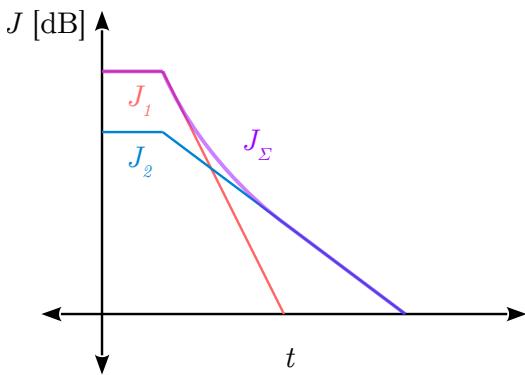
каде $S = 2(l_x l_y + l_x l_z + l_y l_z)$ е вкупната површина на просторијата, а $L = 4(l_x + l_y + l_z)$ е вкупната должина на сите ќошови. Во оваа сума првиот член одговара на просторните модови, вториот на површинските модови, а последниот на аксијалните модови. Може да се види дека последните играат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

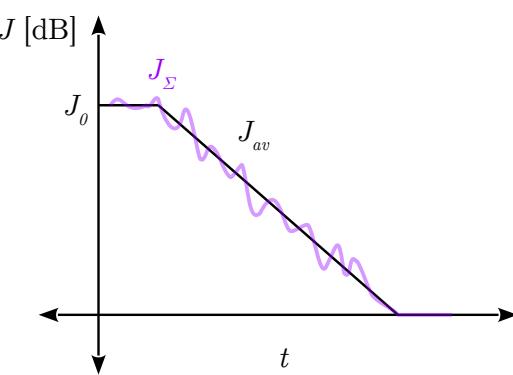
$$\Delta N_f = \left(\frac{4\pi V f^3}{3c^3} + \frac{\pi S f}{2c^2} + \frac{L}{8c} f \right) \Delta f. \quad (5.33)$$

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.



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



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

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

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

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

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

Бидејќи δ_i во општ случај се различни за секоја од резонантните фреквенции, опаѓањето на вкупниот интензитет на звукот во просторијата може да отстапува од експоненцијалниот закон, како што е илустрирано на Сл. 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 δ е среден коефициент на опаѓање, а J_0 вкупен интензитет на звукот пред неговото исклучување даден со (5.37).

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

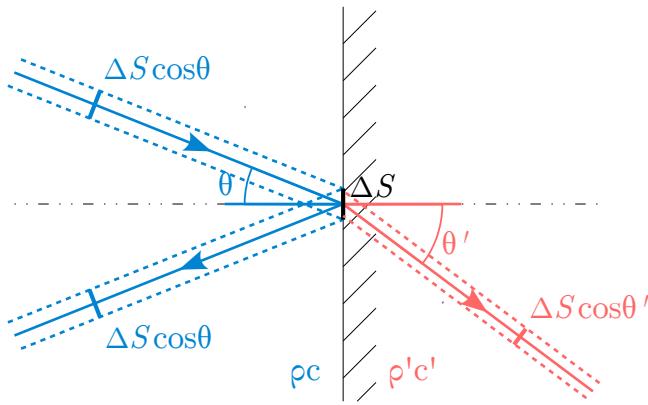
$$J_0 = \sum_i J_{i0} \quad (5.37)$$

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 описува со помош на коефициентот на апсорпција α даден со:

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

Тука со P_i е означена акустичката моќност на звучниот бран пред одбивањето, а со P_α е означена апсорбираната акустичка моќност во втората средина, која дел се претвора во топлина, а дел продолжува да се простира понатаму. За описување на коефициентот на апсорпција преку интензитетот на звукот треба да го земеме во обсир аголот на инциденција на звучниот бран θ ,



Сл. 5.5: Звучен сноп кој делумно се одбива од граничната површина ΔS , а делумно продолжува да се простира во втората средина.

илустриран на Сл. 5.5. Поради тоа што во втората средина бранот продолжува да се простира под агол θ' различен од θ според:

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

Пресекот на снопот ΔS_θ којшто удира во дадена гранична површина ΔS , 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 α_θ може да се пресмета користејќи ја нормалната импеданса на втората средина Z_n според:

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

Иако со употреба на (5.43) може да се дојде до средното α за сите агли на инциденција θ по теориски пат, во праксата вообичаено α за различните материјали се наоѓа со мерење.

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

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 рефлектирите звучни бранови. Во даден момент настанува рамнотежа помеѓу звучната енергија која ја дава изворот во звучното поле и енергијата апсорбирана во просторијата. Тогаш прирастот на вкупната енергија во просторијата W ќе биде 0:

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

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

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

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 рефлектиријаниот 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 истинското времетраење на звукот во просторијата кое може да се одреди со помош на сетилото за слух.² 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.³ Сепак, поради својата едноставност, формулата на Сабин се употребува и ден денес за проценка на времето на реверберација на некоја просторија за време на нејзиното проектирање. Кога станува збор за веќе постоечки простор, тогаш мерењето на времето на реверберација останува најточен метод за нејзино одредување.

За високи фреквенции слабеењето на звукот во воздухот не е занемарливо. Тоа може едноставно да се вклучи во формулата на Сабин. Во Поглавјето 2 беше кажано дека звукот слабее експоненцијално со коефициент m зависно од растојанието кое го поминува. Ако овој податок го внесеме во (5.59) добиваме:

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

²Wikipedia: Wallace Clement Sabine. https://en.wikipedia.org/wiki/Wallace_Clement_Sabine

³Ако замениме $\bar{\alpha} = 1$ нема да добијеме $T = 0$!

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 θ 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:

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

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:

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

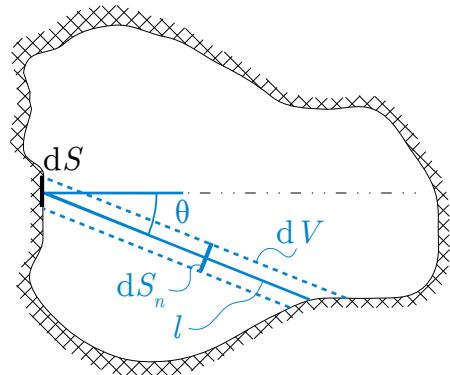
Конечно за средната должина на слободната патека добиваме:

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

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



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

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.⁴ 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.

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)**⁵ – 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 хармоници на изобличувањата внесени од звучникот, со што се намалува зависноста на резултатот од квалитетот на употребениот звучник, како што ќе видиме во Поглавјето .

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:

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

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

⁵Wikipedia: Maximum length sequence. https://en.wikipedia.org/wiki/Maximum_length_sequence

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

Генерирање на побудата

Иако во Поглавјето 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_ω е логаритам од односот на долната и горната крајна фреквенција на опсегот кој го изминува синусот ω_l и ω_h :

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

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')

```

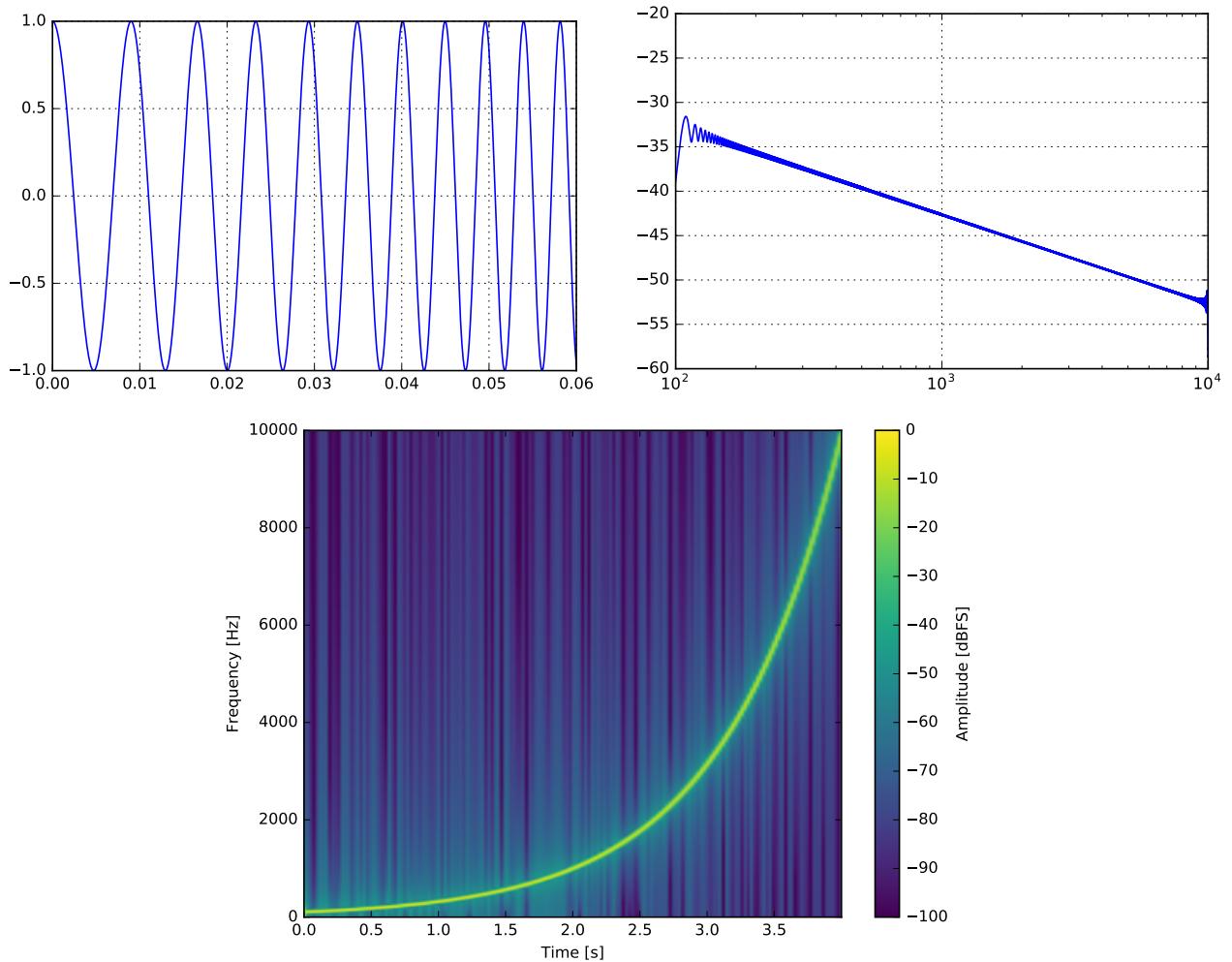
Добиениот сигнал на побуда е прикажан на Сл. 5.7 во временски и фреквенциски домен, како и преку спектрограм.

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:

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

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

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



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

Фуриеовата трансформација на експоненцијална функција е дадена со:

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

Оттука за (5.83) имаме:

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

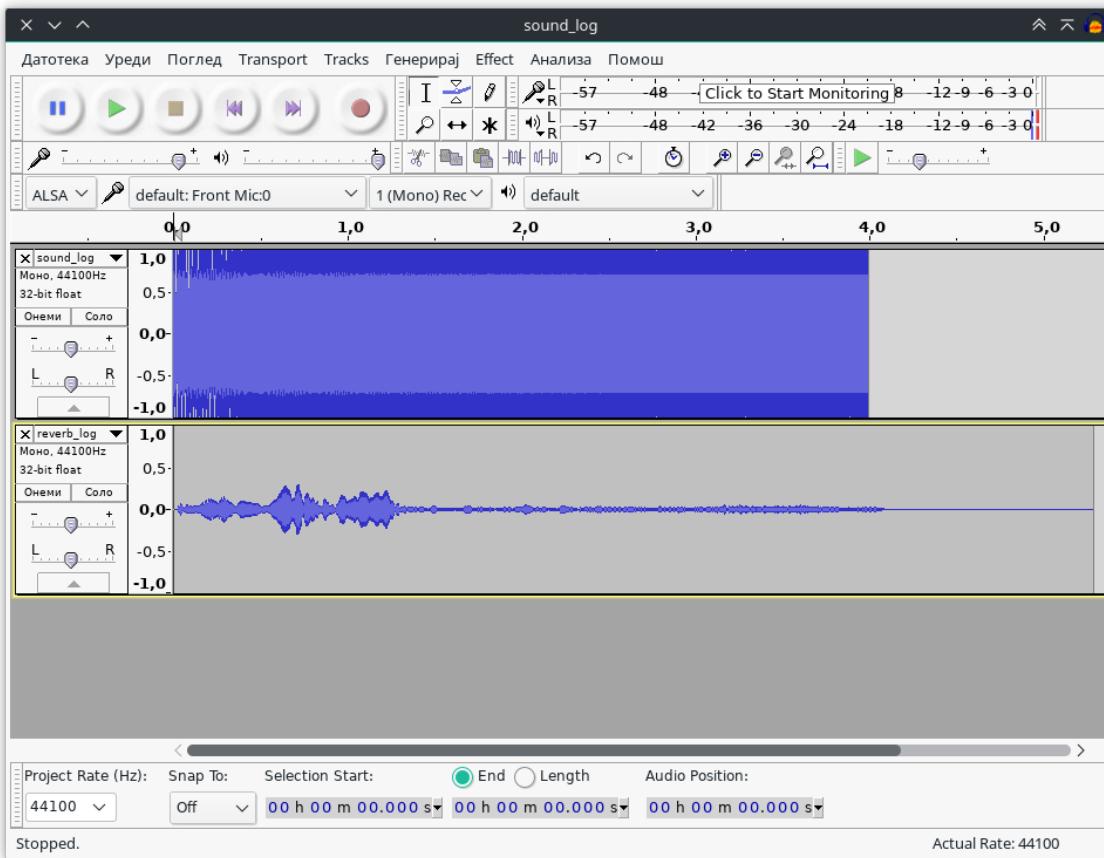
каде со k е претставена константата на пропорционалност. Од 5.85 може да видиме дека енергијата опаѓа инверзно со порастот на фреквенцијата. Така, за пораст на фреквенција од една декада, односно $\omega_2 = 10 \cdot \omega_1$ имаме пад на енергијата од $20 \log^{1/10} = 10$ dB, како што и можеше да се види на Сл. 5.7.

Снимање на реверберијата 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 . 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.

Прикажување на снимениот одсив на просторијата

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



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

```
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 .

Генерирање на инверзниот сигнал на побудата

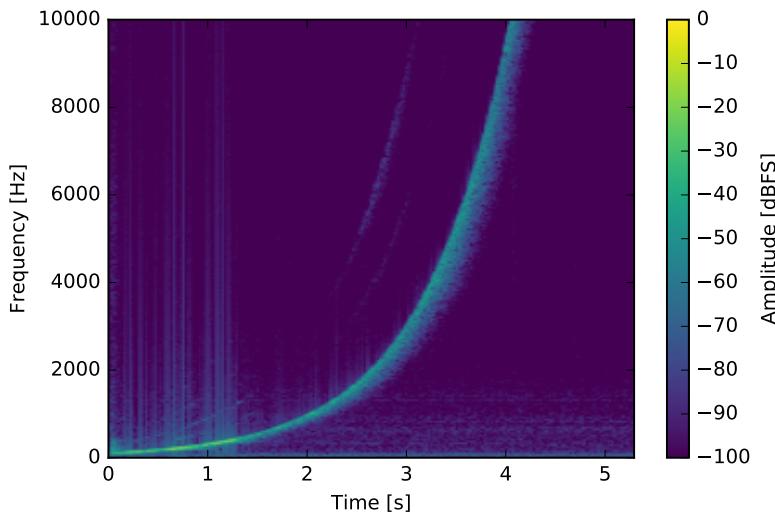
За конструкција на инверзниот сигнал на побудата, најпрвин ќе го превртиме временски генериираниот сигнал. Потоа ќе мора да го компенсираме падот на енергијата во зависност од фреквенцијата преку модулирање на превртениот сигнал со сигнал кој има еднаков раст на енергијата со фреквенцијата:

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

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



Сл. 5.9: Спектрограм на снимената реверберација на просторијата.

$A = \omega_l$, 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)
```

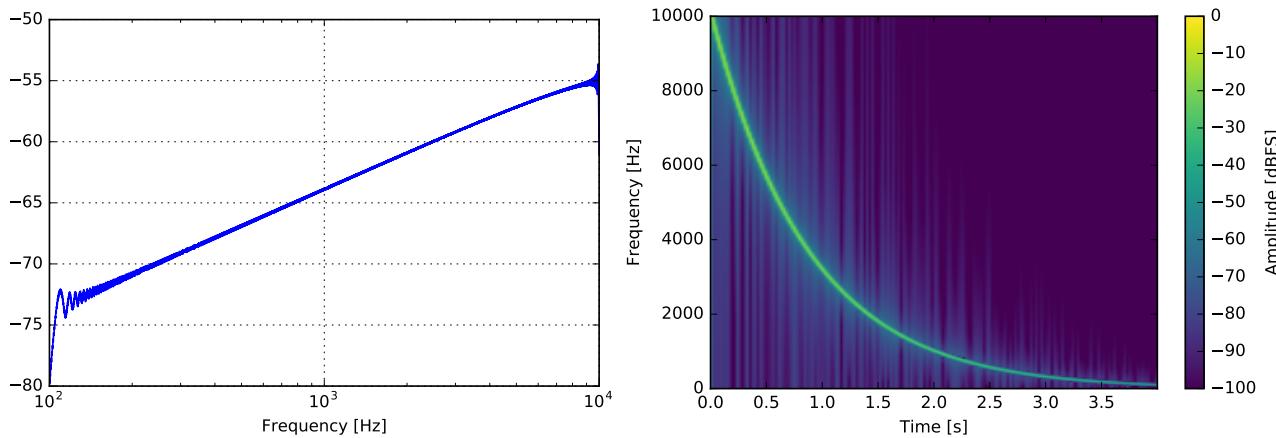
Спектарот на инверзниот сигнал и неговиот спектрограм се прикажани на Сл. 5.10

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 .

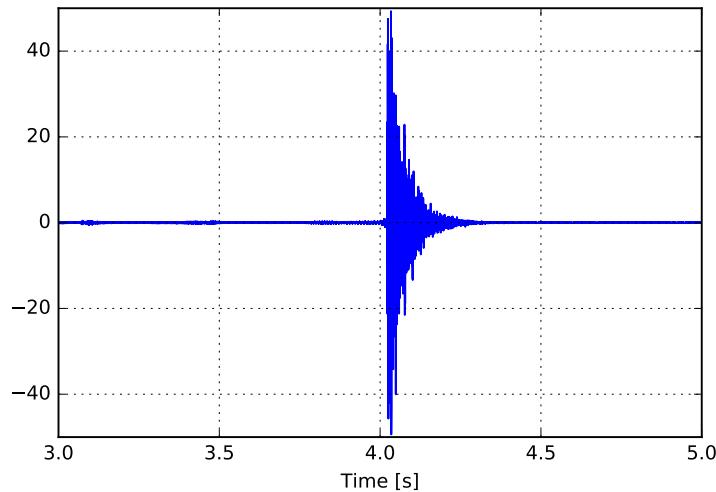
```
# %% convolve
room_response = sig.convolve(reverb_log, inverse)

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

Следно ќе го изолираме делот од добиениот сигнал кој одговара на бараниот импулсен одсив



Сл. 5.10: Спектар и спектрограм на инверзниот сигнал.



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

на просторијата и ќе го прикажеме во вид на спектрограм и преку водопад дијаграм⁶. Од така изолираниот одсив ќе ја пресметаме и преносната функција на просторијата.

⁶На англиски waterfall diagram.

```

#%%
# %% isolate impulse response
room_response = room_response / np.max(np.abs(room_response))
max_ind = np.argmax(room_response)
t_minus = 0.01 # s
t_plus = 1 # s
room_response_trimmed = room_response[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')

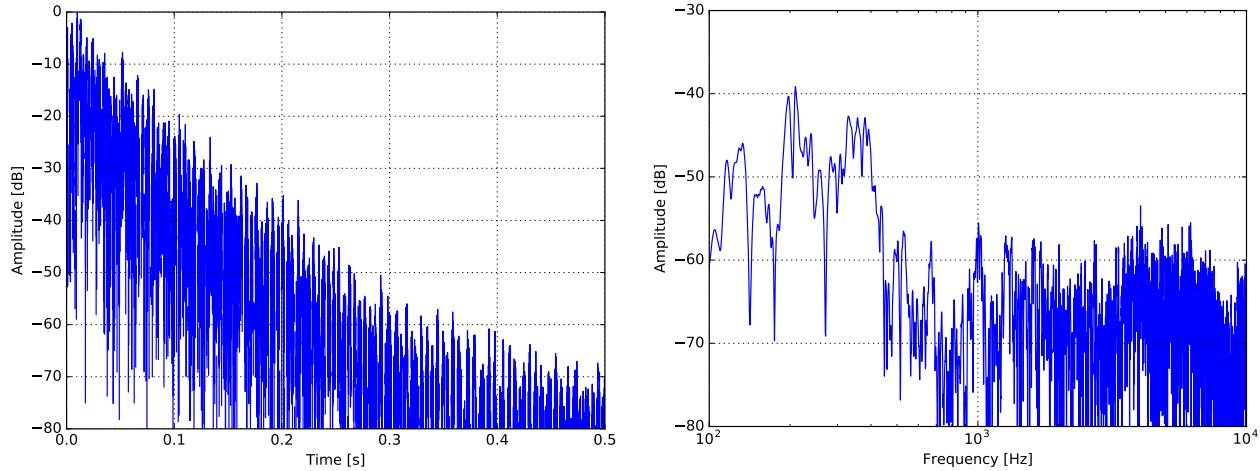
```

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

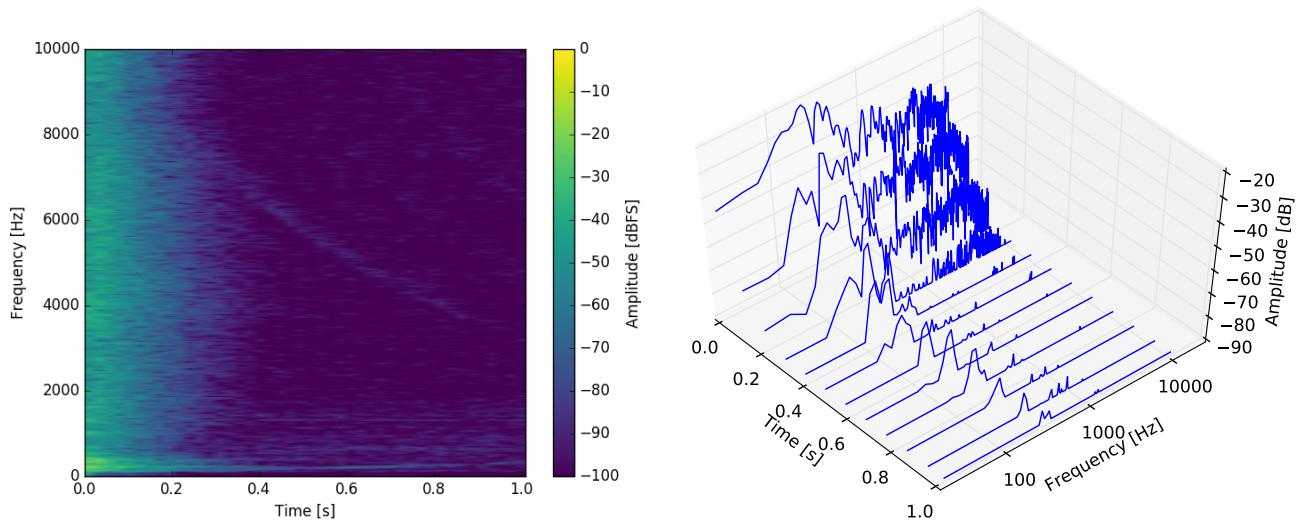
Изобличувања предизвикани од звучникот

Една од главните предности на употребата на синусна побуда за мерењето на 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 предизвикани од изобличувањата на звучникот. Тие можат лесно да се отстранат од добиениот импулсен одсив со отсекување.

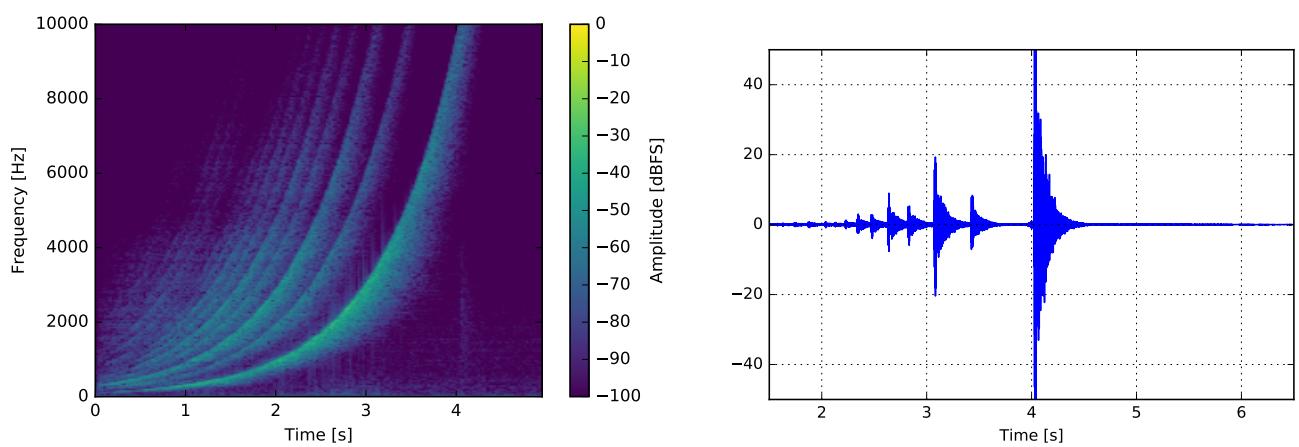
✓ Задача за дома. Измерете ја реверберацијата во вашиот дом.



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).



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.

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,
- 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.

¹ Превземено од http://www.neumann.com/?lang=en&id=current_microphones&cid=u87_description



Сл. 6.1: Кондензаторски микрофон Neumann U87.¹



Сл. 6.2: Фреквенциска карактеристика на микрофонот Neumann U87.²

Осетливост

Осетливоста T ³ 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 V/Pa , но од практични причини вообичаено се користи mV/Pa . Исто така, осетливоста често се изразува во dB со т.н. [индекс на осетливост](#):

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

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

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

Фреквенциска карактеристика

¹Превземено од http://www.neumann.com/download.php?download=copi0173_U87Ai_068820-A11_10-2014.pdf

²Факторот на претворање се обележува со T кај сите трансдусери.

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

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

Фреквенциската карактеристика на микрофонот ја дава зависноста на осетливоста од фреквенцијата. Оваа карактеристика се дава во dB, а како референтно ниво се користи осетливоста на 1 kHz. Обликот на оваа крива е можеби најкритичниот параметар кој ги издвојува високо квалитетните микрофони. Идеалниот микрофон има рамна фреквенциска карактеристика без нагласени отстапувања, но извесни отстапувања може да се посакувани во музичката индустрија затоа што тие поволно го филтрираат, т.е. „бојат“ звукот. Фреквенциските карактеристика на Neumann U87 е дадена на Сл. 6.2. Од фреквенциската крива може да се одреди и фреквенцискиот опсег на микрофонот.

Крива на насоченост

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

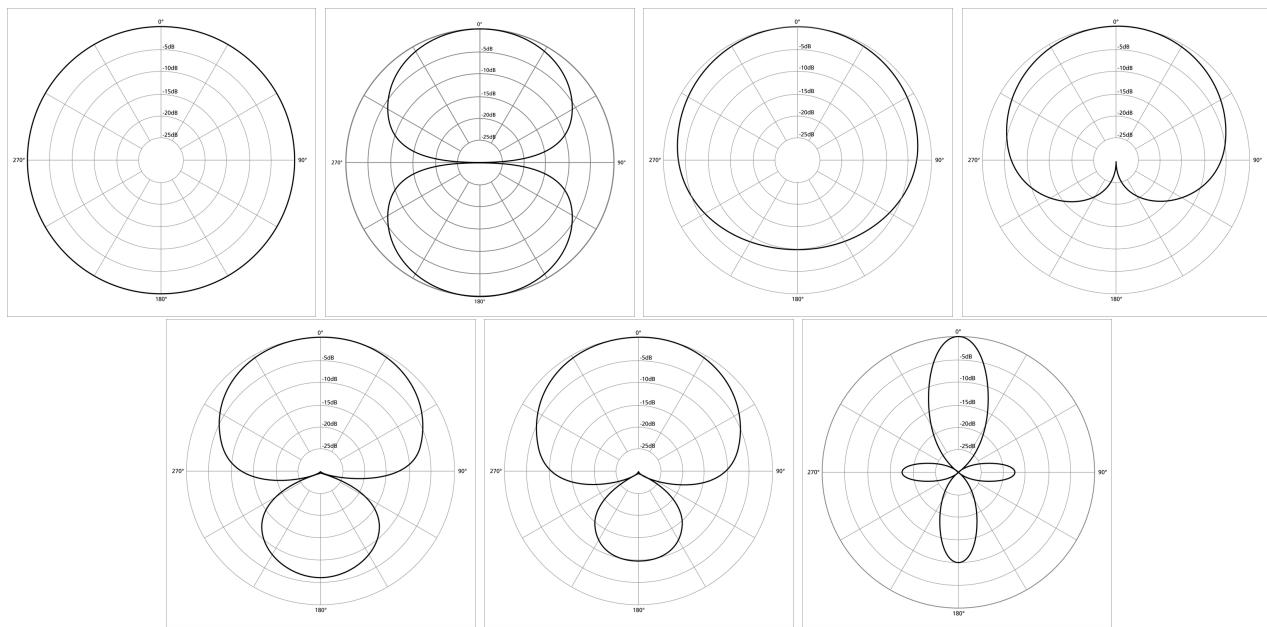
$$\Gamma(\theta) = \frac{T_\theta}{T_0}. \quad (6.3)$$

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,

⁴Galak76, "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. 6.3: Различни криви на насоченост на микрофоните (од горе надолу, од лево надесно): омнидирекционална, бидирекционална (осмица), субкардиоида, кардиоида, хиперкардиоида, суперкардиоида и супердирекционална.⁴

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

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

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

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

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

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

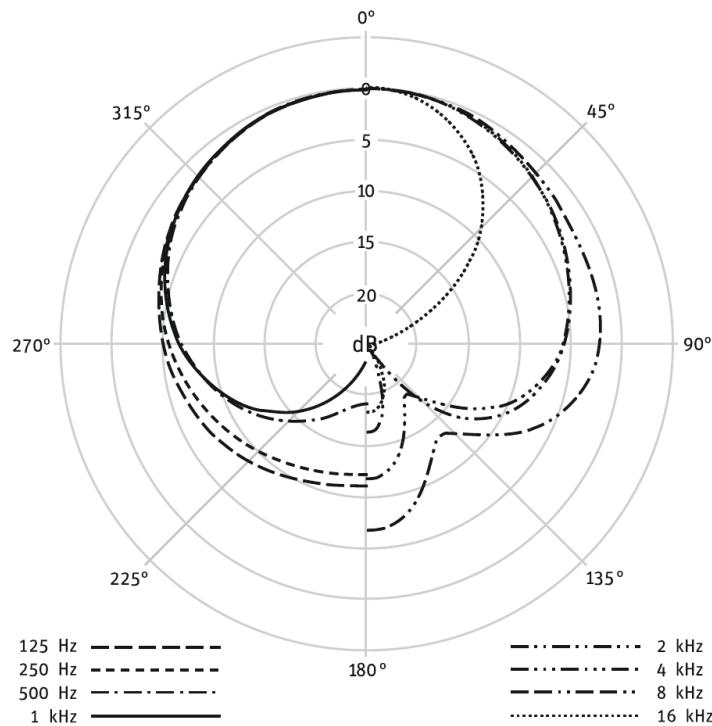
Динамички опсег

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

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

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

⁵Превземено од http://www.neumann.com/download.php?download=copi0173_U87Ai_068820-A11_10-2014.pdf



Сл. 6.4: Крива на насоченост – кардиоида на Neumann U87 за различни фреквенции.⁵

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

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

Од Табелата 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 тута следува дека динамичкиот опсег на овој микрофон изнесува 94 dB, како што и е дадено во табелата.

Импеданса

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

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 мембраната тие се делат на:

- **притисочни** – кај кои поместувањето или брзината на мемраната зависат од звучниот притисок,
- **градиентни** – кај кои тие се сразмерни на градиентот на притисокот, и
- **комбинирани** – кај кои влијаат и вредноста на притисокот и неговиот градиент.

Од оваа поделба зависи карактеристиката на насоченост на микрофонот. Притисочните микрофони се ненасочени, градиентните имаат крива во облик на осмица, а последните кардиоида.

2. **Електрична поделба.** Според начинот на кој добиените вибрации на мемраната се претвораат во електрични осцилации тие се делат на:

- **контактни** – кај кои се менува отпорноста поради менување на контактот на јаглеродните зрна,
- **електромагнетни** – кај кои се менува напонот поради промените на магнетниот флукс предизвикани од движењето на мемраната направена од феромагнетен материјал,
- **електродинамички** – кај кои се генерира струја поради движење на проводник во магнетно поле и
- **електростатички** – кај кои се генерира струја поради промените на капацитивноста.
- **пиезоелектрични** – кај кои се генерира напон поради деформирање на вградениот кристал.

Од овие пет најраспространети се електростатичките и електродинамичките микрофони.

Поглавје 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 поклонуваат 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 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](#)

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



Сл. 7.1: Мониторски звучник Genelec 8040B.¹

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

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

преобразба:

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

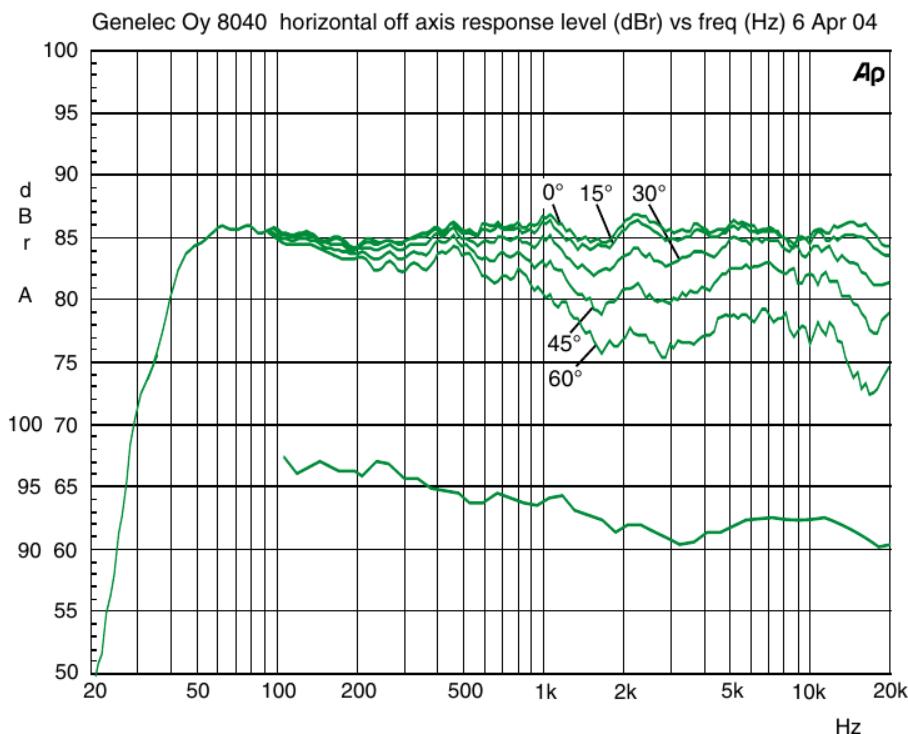
при што како референтна осетливост се зема 1 Pa/V .

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 омнидиреクционална 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



Сл. 7.2: Фреквенциска карактеристика и крива на насоченост на мониторскиот звучник Genelec 8040B.²

има исклучително рамна фреквенциска карактеристика, што е неопходно за мониторските звучници кои се користат за преслушување на аудиосигналите за време на снимањето но и по него при нивната продукција во студиото.

Ефикасност, степен на искористување и номинална моќност

Ефикасноста на звучникот е дефинирана како односот на звучниот притисок на 1 m во насока на оската во слободно поле и квадратниот корен од привидната електрична моќност:

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

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.

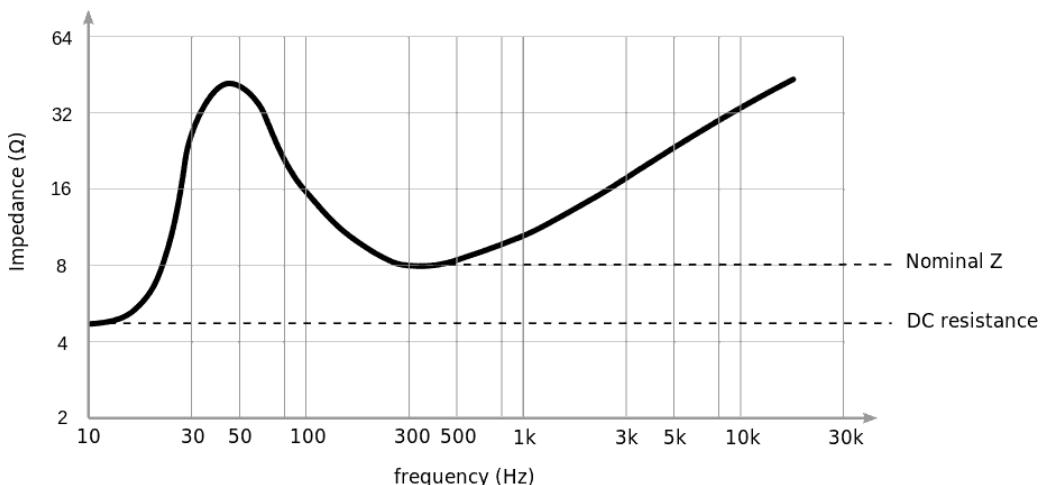
Степенот на искористување го дава односот помеѓу излезната акустичка моќност и влезната електрична моќност:

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

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 вообичаено е од редот на 1%.

Номиналната моќност на звучникот која ја дава производителот е електричната моќност која не смее да се надмине за дадените карактеристики на звучникот да не бидат нарушени. Некогаш се специфицира и т.н. **границна моќност**, над која производителот не гарантира дека нема да дојде до оштетување на звучникот. Кај професионалните звучници номиналната моќност се дава во W RMS (Root Mean Square) или т.н. синусна моќност, додека кај ефтините звучници за општа потрошувачка оваа моќност вообичаено се дава во W PMPO (Peak Music Power Output).

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



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

Тоа претставува маркетингшки трик за вештачко прикажување на огромни моќности. Така, може лесно да се најдат малечки компјутерски звучници со моќност од 200 W (PMPO), иако вистинската (RMS) моќност им е од редот на 2 W. Од друга страна, бидејќи при реална употреба звучниците нема да емитуваат чист синусен тон со постојана амплитуда, а тие се толерантни на краткотрајни пречекорувања на номиналната моќност, професионалните компании уште специфицираат и т.н. музичка моќност.

Различните начини на мерење на електричната моќност може индиректно да се видат во Табелата 7.1. Така, производителот специфицира максимален притисок во dB SPL за: *i*) краткотрајна синусна побуда (105 dB SPL), *ii*) долготраен RMS излез (99 dB SPL) и *iii*) музичка побуда на пар звучници, односно при вообичаено поставување и користење (115 dB SPL). Во случајов се дадени директно звучните притисоци поради тоа што се работи за [активна звучна кутија](#), која се разликува од [пасивната](#) звучна кутија поради тоа што содржи вградено засилување на аудиосигналот.

Импеданса

[Импедансата](#) на звучниците е реактивна, што значи променлива со фреквенцијата, како што е прикажано на Сл. 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. Вообичаено за неа се зема минимумот на импедансата измерен веднаш над резонантната фреквенција на звучникот и изнесува околу $4 - 8 \Omega$. 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.

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

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

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 виши хармоници поради изобличувањата внесени од звучникот. THD е мерка за нелинеарноста на звучникот.

Поделба на звучниците

Начинот на претворање на електричниот сигнал во акустички ја дава електрична поделба на звучниците. Таа речиси целосно соодветствува на поделбата на микрофоните. Така, разликуваме:

- електромагнетни звучници,
- електродинамички звучници,
- електростатички звучници и
- пиеозелектрични 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 кутија⁴. Така, според бројот на звучнички единици во кутијата, разликуваме:

- едносистемски звучни кутии,
- двосистемски звучни кутии,
- трисистемски звучни кутии, односно
- повеќесистемски звучни кутии.

Од градбата на кутијата пак, разликуваме:

- компресиони звучни кутии,
- бас-рефлекс звучни кутии, односно звучни кутии со издув⁵,
- звучни кутии со пасивна мембра⁶, односно
- звучни кутии од повисок ред.

Примери на овие изведби се прикажани на Сл. 7.4.

⁴Wikipedia: Loudspeaker enclosure, https://en.wikipedia.org/wiki/Loudspeaker_enclosure.

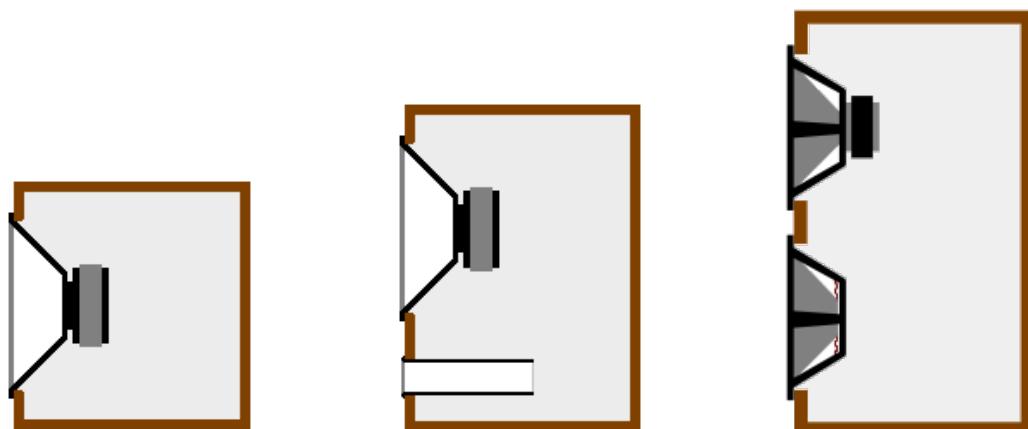
⁵Wikipedia: Bass reflex, https://en.wikipedia.org/wiki/Bass_reflex.

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

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

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

⁹By 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>



Сл. 7.4: Примери за градба на звучни кутии: компресиона⁷, бас-рефлекс⁸, и звучна кутија со пасивна мембрана⁹.

Додаток А

Слободен и отворен софтвер за инженерска и научна работа

Еден од најпрочуените софтверски пакети за нумериичка обработка е програмскиот пакет **Матлаб¹**. Матлаб, преку својата синтакса на високо ниво дозволува: лесна манипулација на матрици, исцртување на функции и податоци, имплементација на алгоритми, создавање на кориснички интерфејси, итн. Тој може да се употреби во најразлични области од инженерската практика, меѓу кои и во дигиталната обработка на звук, слика и видео. За првпат бил издаден во 1984 г., а во 2004 г. имал 1 милион корисници инженери, научници и економисти.

Сепак Матлаб, како комерцијален софтвер носи и низа од недостатоци, пред сè високата цена која го става вон дофат на студентите, истражувачите, малите компании, како и на научно истражувачките и образовните установи во поголем дел од светот. Други недостатоци на Матлаб се ограничната преносливост на кодот, како и неговата затвореност.

A.1 Слободен софтвер

Денес сè повеќе инженери и научници ја напуштаат употребата на комерцијалниот затворен софтвер и својата работа ја засноваат на платформи базирани на **слободен софтвер²**. Ова пред сè се должи на философијата на движењето за слободен софтвер започнато од **Ричард Сталман³** во 1983 г. со креирањето на ГНУ оперативниот систем⁴, а подоцна со воспоставување на Фондацијата за слободен софтвер⁵ во 1985 г., како и поширокото **движење за отвореност⁶**, а тоа е заедништво во создавањето и напредувањето на технологијата и човештвото.

A.2 Четири слободи

Слободниот софтвер е дефиниран со четирите слободи:⁷

¹MATLAB®Matrix Laboratory, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States. <http://www.mathworks.com/products/matlab>

²Wikipedia – Free software movement https://en.wikipedia.org/wiki/Free_software_movement

³Wikipedia – Richard Stallman https://en.wikipedia.org/wiki/Richard_Stallman

Предавање на Ричард Сталман за философијата на движењето за слободен софтвер – Richard Stallman – Free software, free society, TEDxGeneva 2014 https://www.youtube.com/watch?v=Ag1AKI1_2GM

⁴ГНУ е име на животно од саваните на Африка но и рекурзивна кратенка од GNU's Not Unix. Поопширно за неговото создавање и општо за движењето за слободен софтвер во документарниот филм Револуција ОС (Revolution OS) <https://www.youtube.com/watch?v=Eluzi700-P4>

⁵Wikipedia – Free Software Foundation https://en.wikipedia.org/wiki/Free_Software_Foundation

⁶Wikipedia – Open-source model https://en.wikipedia.org/wiki/Open-source_model

Nathan Seidle – How Open Hardware will Take Over the World, TEDxBoulder https://www.youtube.com/watch?v=xGhj_1LNtd0

⁷Превземено од вебстраницата на организацијата Слободен софтвер Македонија <https://slobodensoftver.org.mk/shto>

- **Слобода 0.** Слобода да ја користите програмата за било која намена.

Добавањето рестрикции за користење на слободен софтвер, како што се временските рестрикции („Пробен период од 30 дена“, „Лиценцата истекува на 1 јануари 2005“), рестрикции на целта („Дозволена е употреба за истражувачки и некомерцијални цели“) или рестрикции на географската област („Мора да се користи во земјата А“), ја прават програмата неслободна.

- **Слобода 1.** Слобода да проучите како работи програмата и како истата да ја адаптирате на сопствените потреби.

Добавањето легални или практични рестрикции на разбирањето или менувањето на програмата, како што се задолжително купување на специјални лиценци, потпишување на спогодба за неоткривање (Non-Disclosure-Agreement) или правењето изворниот код да биде недостапен, исто така ја прават програмата неслободна. Без слободата да се менува програмата, луѓето ќе останат на милост на единствен снабдувач.

- **Слобода 2.** Слобода да редистрибуирате копии за да му помогнете на вашиот сосед.

Софтверот може да се копира/дистрибуира скоро без никакви трошоци. Ако не смеете да му дадете некоја програма на некој човек кому таа му треба, тоа ја прави програмата неслободна. Се разбира, доколку сакате, за ваквите активности можете да наплатите.

- **Слобода 3** Слобода да ја подобрувате програмата и да ги издадете вашите подобрувања во јавноста, од што корист ќе има целата заедница.

Сите луѓе не се подеднакво добри програмери. Некои луѓе пак воопшто не знаат да програмираат. Оваа слобода им дозволува на оние луѓе кои немаат време или знаење да решат некој проблем индиректно да пристапат до слободата за менување на програмата. Се разбира, доколку сакате, за ваквите активности можете да наплатите.

Доколку софтверот не ги исполнува сите горни услови, тогаш тој не е слободен софтвер.

A.3 Предности на слободниот софтвер

Од практичен аспект, отворениот софтвер има низа предности над затворениот софтвер и тоа:

- **достапноста** – поради основната премиса на давање на изворниот код, со цел да се овозможи неговиот развој од заедницата, отворениот софтвер е *de facto* и бесплатен софтвер. Така, повеќето производители на слободниот софтвер живеат од донацији, но и од продавање поддршка за нивниот производ.
- **безбедноста** – поради достапноста на изворниот код, не постои начин производителот на софтверот да прави нешто скриено од вас, а секој спорен дел од кодот е подложен на промена од заедницата. Кај затворениот софтвер тоа не е случај.^{8,9}
- **слободата од производителот** – како корисници на отворениот софтвер, вие не сте затворени во екосистемот на производителот.¹⁰ Истиот тој софтвер може да биде превземен од друга

⁸ Во Windows 10 производителот го задржува правото да ги чува вашите приватни податоци како што вели во изјавата за приватност: “Finally, we will access, disclose and preserve personal data, including your content (such as the content of your emails, other private communications or files in private folders), when we have a good faith belief that doing so is necessary ...”

Истите механизми се додадени во претходните верзии на Windows преку автоматските надградби.

Zach Epstein, Windows 10 is spying on almost everything you do – here’s how to opt out, Jul 31, 2015, <http://bgr.com/2015/07/31/windows-10-upgrade-spying-how-to-opt-out/>

Ashley Allen, How to Stop Windows 7 and 8 From Spying on You <http://www.etechnix.com/stop-windows-7-8-spying/>

⁹ Епл и Самсунг ги забавија телефоните на корисниците преку нивното редовно ажурирање <https://www.cnet.com/news/apple-and-samsung-fined-for-slowing-down-phones-with-updates/>

¹⁰ Don Reisinger – Steve Jobs wanted to ‘further lock customers’ into Apple’s ‘ecosystem’ <https://www.cnet.com/news/steve-jobs-wanted-to-further-lock-customers-into-apples-ecosystem/>

заедница на програмери и да продолжи неговото одржување и развој во друга насока.

- **подобар квалитет** – при воспоставување на критична големина на заедницата околу еден отворен софтвер, развојот не може да се спореди со ресурсите кои ги поседува било која корпорација во светот. Така, развојот на [Линукс јадрото¹¹](#), кое е во основата оперативниот систем [ГНУ/Линукс](#) познат и само како [Линукс¹²](#) и повеќе од 600-те [ГНУ/Линукс дистрибуции¹³](#), првично напишано од [Линус Торвалдс¹⁴](#), денес претставува најголемиот здружен проект во историјата на човештвото со околу 6000 активни разиввачи, над 20 милиони редови на код, и со проценета развојна вредност од над 2 милијарди евра.¹⁵

Сите овие придобивки заедно придонесуваат за широка распространетост на слободниот софтвер денес. Така, ГНУ/Линукс и ФриБСД¹⁶ оперативните системи се во употреба во 98,27 % од серверите на интернет (споредено со 1,73 % со Виндоус), 79,3 % од паметните телефони (Андроид оперативниот систем)¹⁷, и 99 % од суперкомпјутерите¹⁸. Сепак, неговиот пробив во персоналните компјутери засега е незначителен – 2,1 % (наспроти 87 % на Виндоус и 9,7 % на МекОС).

A.4 Одржливост

Постојат различни начини на кои се реализира финансиската поддршка на слободниот софтвер и покрај бесплатноста и тоа:

- финансиска поддршка од компании – зад многу пакети слободен софтвер стојат компании од чиј интерес е неговиот развој, Најдобар пример за тоа е можеби самото Линукс јадро на кое работат инженери од многу компании од целиот свет, а најголемиот придонес го има компанијата Интел. Тука се и низа на ГНУ/Линукс дистрибуции меѓу кои Убунту¹⁹, Федора²⁰, и ОпенСусе²¹, како и пакетите за длабоко учење Тензорфлоу²² и Пајторч²³, исто така разиввани од компании,
- финансиска поддршка од јавно финансирање и грантови – голем број на слободни софтвери се плод на работата на инженери и научници финансиирани од државите низ светот или од приватни фондации. Таков е на пример КиКАД софтверот за електронски дизајн и изработка на печатени плочи развиен во ЦЕРН²⁴, софтверот за обработка на аудио Аудасити започнат во Универзитет Карнеги Мелон²⁵, или пак пакетот за машинско учење Сајкитлрн започнат во Инриа²⁶,
- бизнис модел базиран на поддршка – најголемата компанија која денес работи исклучиво со слободен софтвер е Ред Хет чиј ГНУ/Линукс оперативен систем е еден од најзастапените на интернет серверите.²⁷ Ред Хет заработува преку продажба на поддршка за овој оперативен систем и во моментов е проценета на вредност од 38 милијарди USD,

¹¹ Wikipedia – Linux kernel https://en.wikipedia.org/wiki/Linux_kernel

¹² Wikipedia – Linux <https://en.wikipedia.org/wiki/Linux>

¹³ Wikipedia – List of Linux distributions https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Linux_distributions

¹⁴ Wikipedia – Linus Torvalds https://en.wikipedia.org/wiki/Linus_Torvalds

¹⁵ Добар документарен филм за раѓањето и развојот на ГНУ/Линукс оперативниот систем е Revolution OS - 2001 <https://www.youtube.com/watch?v=Eluzi700-P4>

¹⁶ FreeBSD <https://www.freebsd.org/>

¹⁷ Оваа бројка е речиси 91 % ако се има в' предвид дека и iOS е базиран на Линукс јадрото.

¹⁸ Linux is Running on Almost All of the Top 500 Supercomputers <https://itsfoss.com/linux-supercomputers-2017/>

¹⁹ Ubuntu <https://www.ubuntu.com/>

²⁰ Fedora <https://getfedora.org/>

²¹ OpenSUSE <https://www.opensuse.org/>

²² TensorFlow – An end-to-end open source machine learning platform <https://www.tensorflow.org/>

²³ PyTorch – from research to production <https://pytorch.org/>

²⁴ KiCad EDA – A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite <http://kicad-pcb.org/>

²⁵ Audacity – Free, open source, cross-platform audio software <https://www.audacityteam.org/>

²⁶ scikit-learn – Machine Learning in Python <https://scikit-learn.org/stable/index.html>

²⁷ Red Hat – The world's leading provider of open source solutions <https://www.redhat.com>

- финансиска поддршка од донацији – многу слободни софтвери егзистираат благодарејќи на донацији направени од нивните корисници. Тука спаѓаат најголем број од ГНУ/Линукс дистрибуциите како на пример Манџаро²⁸ или Минт²⁹, а исто така СпајдерSpyder – The Scientific Python Development Environment <https://manjaro.org/> развојната средина за Питон која ќе ја користиме во предметов,
- ентузијазам – мотивот нешто да се создаде или подобри и да се сподели со целиот свет понекогаш е доволен мотив за развој на слободниот софтвер. Постојат низа пакети со заедници на развивачи кои немаат финансиски придобивки од нивната работа на проектот, но сепак продолжуваат да работат на него водени од сопствените убедувања и стремеж кон повисоки вредности.

A.5 Слободен софтвер за инженерска и научна работа

Постојат низа на слободни софтвери кои можат да бидат искористени за обработка на нумерички податоци.

- **ГНУ Октејв**³⁰ има синтакса направена да биде во голема мера компатибилна со онаа на Матлаб. Во Октејв се реализирани голем број на пакети кои можат да се искористат за обработка на најразлични типови на сигнали. Проблемот со Октејв е во неговата мала брзина на извршување, поради што највеќе се употребува во образоването како замена за Матлаб.
- **Сајлаб**³¹ е слободен софтвер за нумеричка обработка наменет за инженери и научници, во употреба од 1994 г. Сајлаб во себе вклучува и слободна замена за Симуллинк пакетот на Матлаб, наречена Икскос³².
- **Питон**³³ е широко распространет, повеќенаменски, интерпретиран и динамичен програмски јазик на високо ниво направен од Гуидо ван Росум³⁴ во 1989 г. Иако не е наменет строго за нумеричка анализа, елегантната и једноставна синтакса која овозможува лесна читливост, како и неговата широка распространетост во најразлични области, го прават Питон идеална основа за слободната работа и соработка на научната и образовната заедница широк светот.
- **Цулиа**³⁵ е јазик за нумеричко процесирање со компајлирање направен на МИТ, кој иако има синтакса на високо ниво како онаа на Матлаб, работи речиси еднакво брзо со код напишан во С. И покрај големиот потенцијал на Цулија, за сега неговата примена останува ограничена во области во кои е неопходна голема процесирачка моќ.

Аудасити

Аудасити³⁶ е уште еден слободен софтвер кој ќе ни биде од корист во анализата, едитирањето и снимањето на дигитално аудио, прикажан на Сл. А.1. Неговиот развој го започнале Доминик Мацони и Роџер Даненберг во 1999 во Универзитетот Карнеги Мелон и е иницијално објавен во 2000 како верзија 0.8. Од 2011, тој е 11-от најсимнуван софтвер на Сорсфорџ, со 76,5 милиони симнувања. Аудасити е добитник на наградата за најдобар проект за мултимедија од заедницата Сорсфорџ во 2007 и 2009. Во 2015 е преместен на Фосуб каде за 4 месеци постигнува 10 милиони симнувања.³⁷

²⁸Manjaro – Professional Linux at its best <https://manjaro.org/>

²⁹Linux Mint – From freedom came elegance <https://linuxmint.com/>

³⁰GNU Octave – Scientific Programming Language <https://www.gnu.org/software/octave/>

³¹Scilab – Open source software for numerical computation <https://www.scilab.org/>

³²Xcos <https://www.scilab.org/software/xcos>

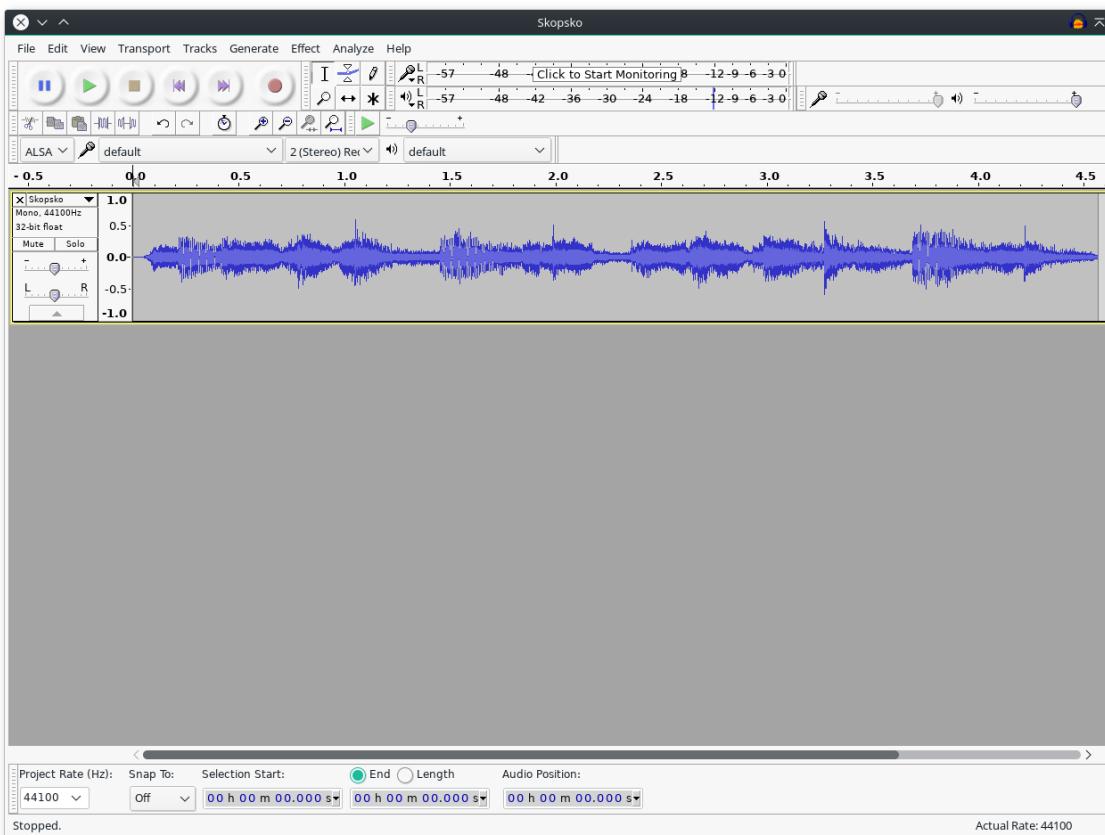
³³Python <https://www.python.org/>

³⁴Wikipedia – Guido van Rossum https://en.wikipedia.org/wiki/Guido_van_Rossum

³⁵The Julia Programming Language <https://julialang.org/>

³⁶Audacity. <http://www.audacityteam.org/>

³⁷Wikipedia: Audacity (audio editor). [https://en.wikipedia.org/wiki/Audacity_\(audio_editor\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Audacity_(audio_editor))



Сл. А.1: Отворен аудио файл во главниот прозорец на Аудасити.

Освен тоа што поддржува снимање од повеќе извори, Аудасити може да се искористи за процесирање на сите типови на аудио, преку додавање на ефекти како нормализација, поткастрување, и прелевање. Тој може да се користи за снимање и миксање на цели албуми, како што е случајот со групата Tune-Yards. Тој е во употреба и во националниот курс за ICT ниво 2 на OCR³⁸ во Велика Британија. Главните особини на Аудасити вклучуваат:

- Читување и снимање на различни типови на аудио формати, како WAV, AIFF, MP3, Ogg Vorbis, FLAC, WMA, AAC, AMR и AC3.
- Снимање и репродукција на звук.
- Едитирање со неограничен број на undo.
- Автоматска поделба на аудио траки на дигитализирани снимки од касети или грамофонски плочи.
- Повеќеканално миксање.
- Голем број на аудио ефекти и плагини. Додатни ефекти можат да се напишат во Nyquist кој е диалект на Lisp, а поддржани се плагини направени во отворениот LV2 стандард, како и VST плагини.
- Едитирање на амплитудната анвелопа.
- Намалување на шумот.
- Намалување на вокалите.
- Спектрална анализа со употреба на FFT.

³⁸Oxford, Cambridge and RSA Examinations

- Поддршка на повеќеканално дигитално аудио со фреквенција на семплирање до 96 kHz и резолуција до 32 bit.
- Прецизно нагодување на брзината на аудиото без промена во фреквенцијата на звукот.
- Нагодување на висината на тонот без промена на брзината.
- Можности за модерно повеќеканално едитирање.
- Работа на повеќе платформи.
- Приказ на ефектите базирани на LADSPA, VST (32-bit) и Audio Unit (OS X) во реално време.
- Зачувување и вчитување на кориснички предпоставувања.

Тој исто така работи на сите оперативни системи.

Додаток А

Питон за процесирање на аудиосигналите

За процесирањето на дигиталните аудиосигнали ќе биде искористен програмскиот јазик Питон и тоа неговата нова верзија [3](#), заедно со библиотеките:

- [Нумпай](#) – за работа со вектори и матрици,¹
- [Сајпаж](#) – за дигитално процесирање на сигнали,²
- [Матплотлиб](#) – за визуелизација.³

Освен овие постојат мноштво библиотеки за Питон кои се користат во научните истражувања како на пример [Пандас](#)⁴ за статистички анализи, [Симпаж](#)⁵ за симболичка математика, [Сајкитлрн](#)⁶ за машинско учење итн.

Како интерфејс кон Питон ќе ја користиме интерактивната конзола [ИПитон](#)⁷ и научната развојна средина за Питон [Спајдер](#)⁸.

A.1 Основи поставки во ГНУ/Линукс

Иако користењето на [Питон](#) не е врзано со ГНУ/Линукс оперативниот систем, вежбите во овој предмет ќе се базираат на работа под ГНУ/Линукс. Доколку веќе немате ГНУ/Линукс, истиот се препорачува да го инсталirate паралелно на постоечкиот оперативен систем. Во најмала рака може да инсталirate ГНУ/Линукс во виртуелна машина, но ова може да ги ограничи постоечките ресурси за процесирање на сигналите.⁹ Во Лабораторијата за дигитално процесирање на сигнали ќе работиме со [Убунту Мате](#)¹⁰ кој е базиран на [Убунту](#), а ја користи десктоп средината [Мате](#) чиј изглед е базиран на [Гном 2](#), а е имплементиран во [Гном 3](#).¹¹

¹NumPy <http://www.numpy.org/>

²SciPy <http://www.scipy.org/>

³Matplotlib <http://matplotlib.org/>

⁴Pandas <http://pandas.pydata.org/>

⁵Sympy <http://www.sympy.org/en/index.html>

⁶SciKit-Learn <http://scikit-learn.org/stable/>

⁷IPython Interactive Computing <http://ipython.org/>

⁸Spyder – The Scientific PYthon Development EnviRonment <https://github.com/spyder-ide/spyder>

⁹Добар преглед на популарноста на различните Линукс дистрибуции, како и повеќе информации за истите може да најдете на вебстраницата [Distrowatch](#). <http://distrowatch.com/>

¹⁰Ubuntu MATE. <https://ubuntu-mate.org/>

¹¹Кај ГНУ/Линукс оперативните системи можат да се користат различни десктоп средини како GNOME и MATE, но уште и KDE Plasma, Xfce, LXQt, Cinnamon, Pantheon, итн.

За работа со ГНУ/Линукс можеме да го искористиме стандардниот БАШ терминал.¹² Вообичаена кратенка за отворање на нов терминал е `ctrl-alt-t`, или ако дистрибуцијата доаѓа со терминал на спуштање копчето `F12`.

За почеток треба во вашиот основен фолдер¹³ да отворите нова папка со името на предметот. Тоа може да го направите преку фајл експлорерот, или преку терминалот:

```
~ $ mkdir ea
```

Следно, од Гитхаб страната на предметот Електроакустика¹⁴ превземете го фолдерот со звучни сегменти кои ќе ги користиме во вежбиве. Тоа можете да го направите на следниот начин:

```
~ $ cd ea
~/ea/ $ git clone https://github.com/FEEIT-FreeCourseWare/Digital-Audio-Systems.git
~/ea/ $ cp -r Digital-Audio-Systems/code/audio .
```

За да може да ги слушнеме овие аудиозаписи треба да го инсталлираме `SoX`¹⁵ кој претставува моќна алатка за конверзија на аудиофајлови од еден формат во друг, но може да се искористи и за додавање на различни аудиоэффекти, како и снимање и преслушување на аудиофајлови. За инсталирање и надградба на софтверот и самиот оперативен систем во Линукс е одговорен менаџерот на пакети. Кај дистрибуциите од фамилијата на Убунту како менаџер се користи `apt-get` или на повисоко ниво `apt`. Поради безбедносни причини во Линукс при секое менување на инсталираниот софтвер и системските фајлови мора да се повикаме на администраторски привилегии преку наредбата `sudo`¹⁶:

```
~/ea/ $ sudo apt install sox
```

По што може да преслушаме некој од аудиофајловите:

```
~/ea/ $ play audio/Solzi.wav
```

`Solzi.wav`:

```
File Size: 345k      Bit Rate: 714k
Encoding: Signed PCM
Channels: 1 @ 16-bit
Samplerate: 44100Hz
Replaygain: off
Duration: 00:00:03.87

In:52.8% 00:00:02.04 [00:00:01.83] Out:90.1k [ -==|=--- ]           Clip:0
```

A.2 Основи на работата со Питон

Питон интерпретер

За работа со Питон може да ја искористиме стандардната инсталацијата на Питон која доаѓа со секоја ГНУ/Линукс дистрибуција. Питон интерпретерот можеме да го повикаме во стандардниот

¹²Bourne-Again Shell (BASH) средината е стандардна за сите дистрибуции на ГНУ/Линукс и МекОС. Добро напатstвие за нејзина употреба претставува: Software Carpentry – The Unix Shell <http://swcarpentry.github.io/shell-novice/>

Постојат и понапредни шел средини како на пример Z shell – скратено Zsh. Еве еден туторијал за нејзина инсталација: Oh-My-Zsh! A Work of CLI Magic—Tutorial for Ubuntu <https://medium.com/wearetheledger/oh-my-zsh-made-for-cli-lovers-installation-guide-3131ca5491fb>

¹³Бо ГНУ/Линукс основен фолдер на секој корисник е `/home/user_name/`, а кратенка за него е `~`.

¹⁴<https://github.com/FEEIT-FreeCourseWare/Electroacoustics>

¹⁵SoX - Sound eXchange. <http://sox.sourceforge.net/>

¹⁶Кратенка од *super user do*.

БАШ терминал со:

```
$ python

Python 3.7.2 (default, Jan 10 2019, 23:51:51)
[GCC 8.2.1 20181127] on linux
Type "help", "copyright", "credits" or "license" for more information.
>>> print('hello world')
hello world
```

За излегување од Питон конзолата треба да ја притиснеме стандардната кратенка `ctrl-d` или да напишеме `exit()`.

ИПитон

Поради ограничените можности на основниот Питон интерпретер, вообичаено со Питон се работи во интерактивната конзола **ИПитон** која нуди низа на подобрувања. Нејзe може да ја инсталлираме со:

```
$ sudo apt install ipython
```

а по инсталацијата може да ја повикаме со:

```
$ ipython
```

```
Python 3.7.2 (default, Jan 10 2019, 23:51:51)
Type 'copyright', 'credits' or 'license' for more information
IPython 7.3.0 -- An enhanced Interactive Python. Type '?' for help.

In [1]: print('hello world')
hello world
```

Некои од главните придобивки кои ги носи ИПитон се:

- пристап до стандардната помош во Питон, како на пример докстрингови на објекти и напатствието за Питон, преку наредбата `help`,
- низа од специјални наредби, наречени и „магии“, како на пример `%timeit` за мерење на времето потребно за извршување на една наредба, `%matplotlib` за овозможување на интерактивно исцртување, или `%history` за испишуваче, пребарување или запишување на историјата на извршените наредби; повеќе за овие наредби може да се види со наредбата `%magic`,
- информации за секој објект преку употреба на `?` наредбата,
- автоматско комплетирање на имињата на објектите и променливите од локалниот простор на имиња, како и имиња од локалниот фолдер, со употреба на `Tab` копчето,
- пребарување на претходно внесени наредби со стрелките и внесување на првите букви од саканата наредба, а со `ctrl-r` и со пребарување на целата содржина на претходните наредби,
- извршување на шел наредби со помош на `!` .

За да ги видите сите можности кои ги нуди ИПитон напишете `?` или `%quickref` во интерактивната конзола.

Дополнително, ИПитон е основата зад **Јупајтер Кјутконзолата**¹⁷ прикажана на Сл. А.1, која е реализирана во Кјут технологијата и овозможува плотирање во самата конзола кое

¹⁷Jupyter QtConsole <https://github.com/jupyter/qtconsole>

Сл. А.1: Јупајтер Кјут конзолата нуди напредна интерактивност.

може да се активира со наредбата `%matplotlib inline`. Таа се стартува во терминалот со наредбата:

```
$ jupyter qtconsole
```

Виртуелни средини за Питон

Инсталирањето на Питон пакети, како што направивме со ИПитон козолата, директно во оперативниот систем не е препорачливо. За избегнување на судир помеѓу системската инсталација на Питон на ГНУ/Линукс оперативниот систем, како и за изолирање на екосистемот од инсталирани модули на секој засебен проект, правилно е да направиме Питон виртуелна средина за процесирање на дигиталните аудиосигнали. Постојат низа пакети за создавање и раководење со виртуелните средини во Питон, од кои `pipenv`¹⁸ е оној кој е препорачан од Телото за пакување на Питон¹⁹.

За инсталирање на `pipenv` треба да го инсталраме користејќи го системскиот `pip`²⁰. Поради можноста на употреба на Питон 2 како стандарден во инсталрираната ГНУ/Линукс дистрибуција, најдобро е да напишеме:

```
$ sudo pip3 install pipenv
```

А доколку системот го нема `pip3`, истиот може да се инсталира како:

```
$ sudo apt install python3-pip
```

За креирање на виртуелна средина во фолдерот за овој предмет ќе напишеме:

```
$ mkdir ea
$ pipenv --python 3
```

```
Creating a virtualenv for this project...
Pipfile: /tmp/ea/Pipfile
Using /usr/bin/python3 (3.7.2) to create virtualenv...
Creating virtual environment...Using base prefix '/usr'
New python executable in ~/.local/share/virtualenvs/ea-aWLbLjVf/bin/python3
Also creating executable in ~/.local/share/virtualenvs/ea-aWLbLjVf/bin/python
Installing setuptools, pip, wheel...
done.
Running virtualenv with interpreter /usr/bin/python3

Successfully created virtual environment!
Virtualenv location: ~/.local/share/virtualenvs/ea-aWLbLjVf
Creating a Pipfile for this project...
```

Со ова `pipenv` креира нова виртуелна средина во локален фолдер во нашиот кориснички фолдер, во неа го копира системскиот Питон 3 и `pip`. За активирање на виртуелната средина може да ја искористиме наредбата `pipenv shell` која ја става патеката на виртуелната средина како прва во листата на системски патеки. Така следниот пат кога ќе сакаме да го повикаме Питон интерпретерот или да инсталраме пакет со `pip`, тоа ќе се случува внатре во виртуелната средина:

¹⁸Pipenv – Python Development Workflow for Humans <https://github.com/pypa/pipenv>

¹⁹Python Packaging Authority PyPA <https://www.pypa.io/en/latest/>

²⁰Python Install Package (pip) <https://pypi.org/project/pip/>

```
$ which pip
/usr/bin/pip

$ echo $PATH
/usr/local/sbin:/usr/local/bin:/usr/bin ...

$ pipenv shell
Launching subshell in virtual environment...
. ~/local/share/virtualenvs/ea-aWLbLjVf/bin/activate

(ea) $ echo $PATH
~/local/share/virtualenvs/ea-aWLbLjVf/bin:/usr/local/sbin:/usr/local/bin:...

(ea) $ which pip
~/local/share/virtualenvs/ea-aWLbLjVf/bin/pip
```

Гледаме дека `pipenv` ни дозначува дека сме во виртуелната средина со `(ea)` пред БАШ промптот. За да излеземе од неа повторно може да ја употребиме кратенката `ctrl-d` или да напишеме `exit`.

Спајдер

Наместо да работиме со ИПитон конзолата во терминалот, во предметот електроакустика ќе ја употребиме развојната средина за Питон специјализирана за инженерска и научна работа **Спајдер**²¹ прикажана на Сл. А.2. Спајдер во себе вклучува:

- **Едитор** – со вклучен прелистувач на функции/класи, можности за анализа на код, автоматско завршување на код, и вчитување на дефиниции.
- **Интерактивна конзола** – интегрирани Питон и иПитон конзоли со работни простори и поддршка за дебагирање и поддршка за Матплотлиб, овозможуваат инстантна евалуација на кодот напишан во едиторот.
- **Документација** – покажување на документацијата на било која класа или функција повикана во едиторот или конзолата.
- **Приказ на променливи** – овозможува брза анализа на променливите генерирали со некој код.
- **Приказ на фајлови и фолдери.**
- **Историја на наредби.**

Спајдер можеме да го инсталлираме во виртуелната средина која ја креиравме во работниот фолддер `ea`:

```
(ea) $ pip install spyder
```

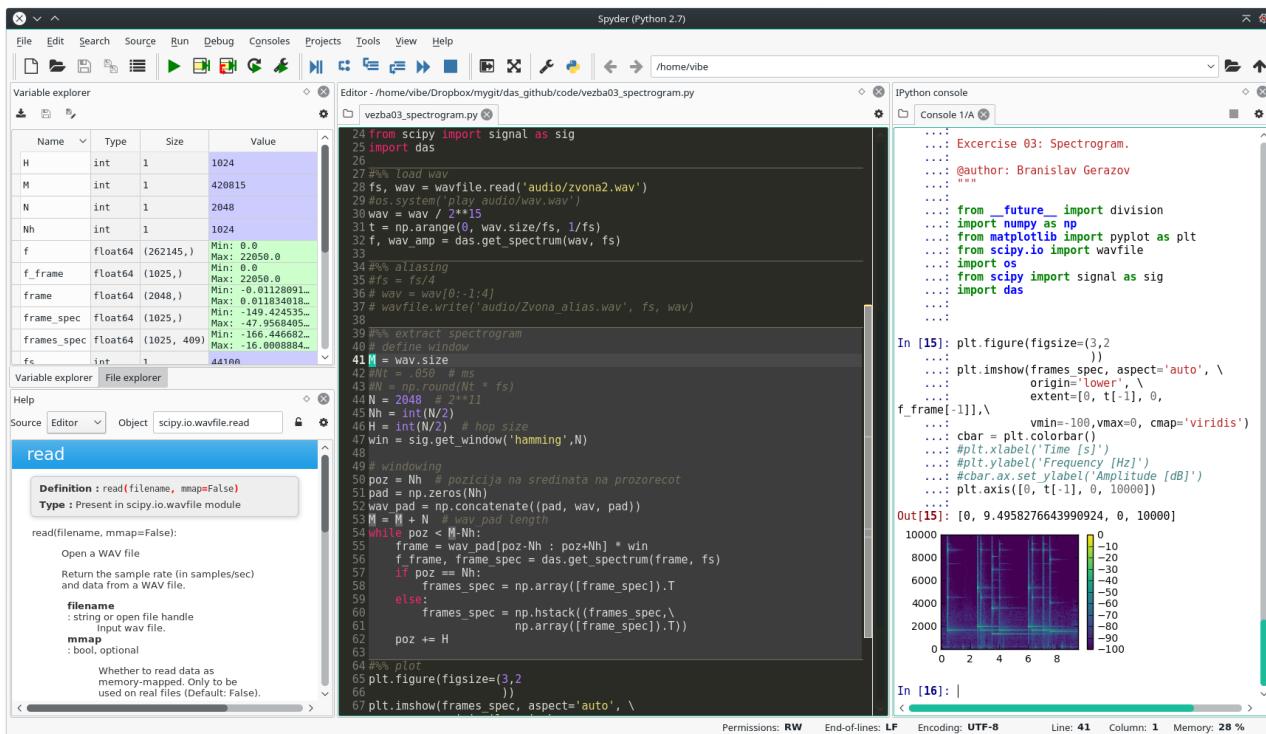
А.3 Основи на Нумпај и Матплотлиб

За да ги инсталлираме потребните модули во новата виртуелна средина ќе напишеме:

```
(ea) $ pip install numpy matplotlib scipy
```

Сега може да ги повикаме во ИПитон:

²¹Spyder - The Scientific PYthon Development EnviRonment. <https://github.com/spyder-ide/spyder>



Сл. А.2: Спајдер развојната средина за Питон специјализирана за инженерска и научна работа.

```
In [1]: import numpy as np
In [2]: from matplotlib import pyplot as plt
In [3]: x = np.linspace(0, 2*np.pi, 100)
In [4]: y = np.sin(x)
In [5]: %matplotlib
Using matplotlib backend: Qt5Agg

In [6]: plt.plot(x, y)
Out[6]: [<matplotlib.lines.Line2D at 0x7fcbb448ffd0>]
```

Забележете дека го импортираме Нумпай со `import numpy as np` наместо со `from numpy import *`. Ова е препорачана практика за избегнување на оптеретување на постоечките функции во основниот простор на имиња²², како и за зачувување на засебен простор со имиња за секој од импортирани модули. Ова овозможува и одлично автоматско надополнување на започнатото име на модул, функција или променлива во Питон.²³ Со наредбата `%matplotlib` се овозможува интерактивното плотирање во ИПитон конзолата.

Добар вовед во програмскиот јазик Питон во рамки на екосистемот за научна работа е даден во [Скриптата за Сајпай \(Varoquaux et al., 2015\)](#)²⁴ која е достапна под слободна лиценца²⁵. Оваа книга претставува отворен проект и во неа, благодарејќи на многуте автори и придонесувачи, се поместени основите за работа не само со Питон, Нумпай, Матплотлиб и Сајпай, туку и Пандас, Симпай, Сајкитимиц, Сајкитлрн, па дури и Џајтон²⁶.

За запознавање со основите на програмскиот јазик Питон можат да послужат мноштво на материјали, каков што е [официјалниот туторијал за Питон](#) на вебстраницата на Питон²⁷ и

²²Добрата структурираност на просторите на имиња (namespaces) е една од важните одлики на Питон како што е и наведено во стиховите на [Зенот на Питон](#) кој може да го прочитате ако напишете `import this`.

²³Автоматското надополнување се активира со притискање на `Tab`.

²⁴Scipy Lecture Notes <http://scipy-lectures.org/>

²⁵Creative Commons <https://creativecommons.org/>

²⁶Cython <https://cython.org/>

²⁷The Python Tutorial. <https://docs.python.org/3/tutorial/index.html>

Викикнигата [Програмирање во Питон](#)²⁸, обете во употребува на МИТ.

²⁸Python Programming https://en.wikibooks.org/wiki/Python_Programming

Литература

Madeline Carson, Hudson Giesbrecht, Tim Perry, and Peter Driesssen. Surround sound impulse response. *Victoria*, 2009. URL 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-Szmeik, Ralf Gommers, Fabian Pedregosa, Olav Vahtras, Pierre de Buyl, Gert-Ludwig Ingold, Nicolas P. Rougier, and et al. *scipy-lecture-notes*: Release 2015.1 beta, 2015. URL <http://www.scipy-lectures.org/>.

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