

Електроакустика

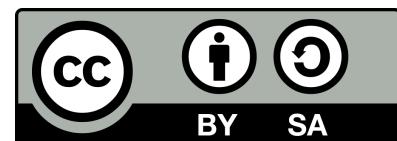
Бранислав Геразов

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

Електроакустика v0.91

© Copyright by Бранислав Геразов, 2015 – 2021 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

| | |
|--|-----------|
| 0 Вовед | 5 |
| 0.1 Сетило за слух | 5 |
| 0.2 Историја на акустиката | 5 |
| 0.3 Области во акустиката | 7 |
| 1 Основи на звукот | 10 |
| 1.1 Видови на звук | 10 |
| 1.2 Основни физички карактеристики на звучните бранови | 11 |
| 1.3 Запознавање со звучните форми | 17 |
| 2 Физика на звукот | 21 |
| 2.1 Еднодимензионални бранови | 21 |
| 2.2 Акустичка бранова равенка | 22 |
| 2.3 Рамнински бранови | 25 |
| 2.4 Брзина на простирање на звукот | 26 |
| 2.5 Брзина и поместување на воздушните честички | 26 |
| 2.6 Сферни бранови | 28 |
| 2.7 Специфична акустичка импеданса | 29 |
| 2.8 Интензитет на звук | 30 |
| 2.9 Акустичка моќност | 31 |
| 2.10 Акустички проток | 31 |
| 2.11 Акустичка импеданса | 32 |
| 2.12 Просторен агол на зрачење | 33 |
| 2.13 Крива на насоченост | 34 |
| 2.14 Рефлексија на звук | 35 |
| 2.15 Рефлексија на звук при коса инциденција | 38 |
| 2.16 Стоjni бранови | 39 |
| 2.17 Симулација на стоjни бранови | 41 |
| 2.18 Слабеење на звукот | 43 |
| 3 Музика и глас | 45 |
| 3.1 Музички инструменти | 45 |
| 3.2 Човечки глас и говор | 54 |
| 4 Електроакустички и електромеханички аналогии | 64 |
| 4.1 Елементи на акустичките системи | 64 |
| 4.2 Елементи на механичките системи | 66 |
| 5 Психоакустика | 67 |
| 5.1 Работа на човековото уво | 67 |
| 5.2 Поимање на амплитудата на звукот | 70 |
| 5.3 Поимање на фреквенцијата на звукот | 72 |
| 5.4 Поимање на спектарот на звукот | 73 |

| | |
|---|------------|
| 5.5 Запознавање со феномени во психоакустиката | 73 |
| 6 Акустика на простории | 79 |
| 6.1 Резонантни фреквенции - модови | 79 |
| 6.2 Број на модови во една просторија | 81 |
| 6.3 Пресметка на распределбата на модови | 82 |
| 6.4 Пресметка на звучно поле во просторија | 83 |
| 6.5 Влијание на модовите врз интензитетот на звукот | 84 |
| 6.6 Коефициент на апсорција | 85 |
| 6.7 Статистичка анализа на звучното поле | 86 |
| 6.8 Време на реверберација | 88 |
| 6.9 Средна должина на слободната патека на звукот | 89 |
| 6.10 Мерење на импулсниот одлив на просторија | 90 |
| 6.11 Мерење на импулсниот одлив на просторија | 91 |
| 7 Микрофони | 99 |
| 7.1 Електроакустички преобразувачи | 99 |
| 7.2 Основни карактеристики на микрофоните | 99 |
| 7.3 Поделба на микрофоните | 103 |
| 8 Звучници | 105 |
| 8.1 Основни карактеристики на звучниците | 105 |
| 9 Студиска аудиотехника | 111 |
| 9.1 Предзасилувачи | 111 |
| 9.2 Засилувачи на моќност | 113 |
| 9.3 Аудиопроцесори | 114 |
| 9.4 Аудиомиксери | 117 |
| Додаток А Слободен и отворен софтвер | 119 |
| A.1 Слободен софтвер | 119 |
| A.2 Четири слободи | 119 |
| A.3 Предности на слободниот софтвер | 120 |
| A.4 Одржливост | 121 |
| A.5 Слободен софтвер за инженерска и научна работа | 122 |
| Додаток Б Пајтон за процесирање на аудиосигналите | 125 |
| B.1 Основи поставки во ГНУ/Линукс | 125 |
| B.2 Основи на работата со Пајтон | 128 |
| B.3 Основи на Нумпај и Матплотлиб | 132 |

Поглавје 0

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 ἀκούστως (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.

0.1 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.

0.2 Историја на акустиката

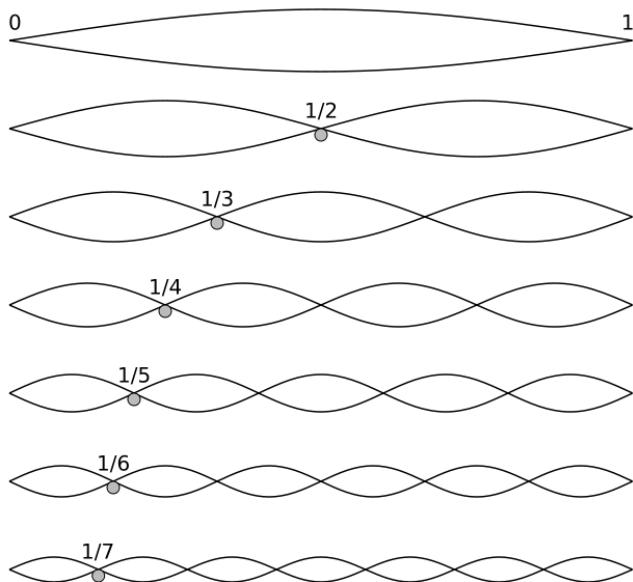
Акустиката е наука која, поради проблематиката која ја истражува, била актуелна низ целата човечка историја, од антиката па сè до денес. Еден од првите истражувачи во областа на акустиката бил **Питагора** кој живеел во VI век п.н.е. Тој открил дека за тоновите отсвирени на една жица да звучат убаво 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**.

Аристотел, 384 – 322 п.н.е.³ за првпат го описал **брановиот процес** на простирање на звучната појава како растегања и собирања на воздухот кои се пренесуваат на соседниот воздух.

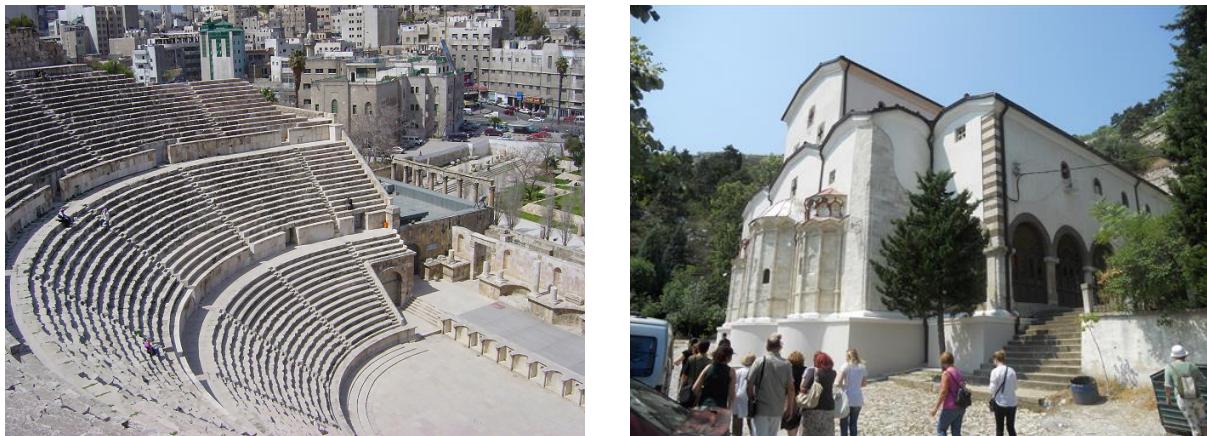
¹Wikipedia: Acoustics. <https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustics>

³Wikipedia: Aristotle <https://en.wikipedia.org/wiki/Aristotle>

³Wikipedia: Pythagorean tuning. https://en.wikipedia.org/wiki/Pythagorean_tuning



Слика 1: Основен и виши хармоници на една жица.²



Слика 2: Принципите на акустиката се применувани во градбата на амфитеатрите уште во римското царство (лево), а се користеле и при изработката на верските храмови на овие простори како во црквата „Св. Пантелејмон“ во Велес (десно).⁵

Римскиот архитект [Витрувиус, с. 80 – 70 до с. 15 п.н.е.](#)⁴ за првпат пишува за акустичките особини на античките театри, Сл. 2, што претставуваат почетоци на [архитектонската акустика](#). Во петтата од десетте книги од својата „За 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 целобройни соодноси како резонатори со цел хармонично да се засили звукот од сцената. На овие простори акустиката се запазувала при изградба на верските храмови. Така, во црквите биле вградувани грниња во сидовите, исполнети со апсорпционен материјал како памук или пепел, за да ја пригушат акустичката живост на просторијата, а со тоа да ја подобрат разбираливоста на говорењето за време на службата. Пример за ова во Македонија е соборниот храм „Св. Пантелејмон“ во Велес изграден од прочуениот Андреја Дамјанов во 1840 г. прикажан на Сл. 2.

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

⁵Римски амфитеатар во Аман, Јордан, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=663815>; Петар Печков – Капиталното дело на Дамјанов, црквата Св. Пантелејмон <http://www.tirekovmirece.com/>

По долго затишје во средниот век, Галилео Галилеј, 1564 – 1642⁶, и „таткото на акустиката“ Марин Мерсен, 1588 – 1648⁷, независно еден од друг ги откриваат комплетните закони на вибрација на жица. Галилео исто така за првпат го описал звукот како психолошки феномен кој се должи на физиолошките промени во сетилото за слух (треперењето на ушното тапанче) предизвикани од брановите создадени од вибрацијата на едно звучно тело. Мерсен е еден од неколкуте истражувачи кои во тој период за прв пат ја измериле брзината на звукот. Во истиот период Исак Њутон, 1642 – 1727⁸ во својата „Принципи“ (1687) ја извел и зависноста на брзината на простирање на брановите 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. Промinentни фигури во математичката акустика во XIX век биле Херман фон Хелмхолц⁹, кој ги оформил полето на физиолошката акустика, види Поглавје 5, и лордот Рейли¹⁰ 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 4.

Во XX век доаѓа до раширена практична примена на научните сознанија за акустиката. Волас Сабин¹¹ ја оформува областа архитектонска акустика, види Поглавје 6, 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 сè 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.

0.3 Области во акустиката

Акустиката опфаќа повеќе области. Акустичкото здружение на Америка¹² ги дефинира следните 13 области:

- **Археоакустика** – наука за звукот во археологијата која ги истражува акустичките својства на археолошките локалитети и артефакти, Сл. 3.
- **Аероакустика** – наука за бучавата предизвикана од движењето на воздухот и на движењето на звукот низ воздухот. Оваа област е важна во дизајнот на потивки летала и за разбирање на принципите на работа на дувачките музички инструменти.
- **Процесирање на акустички сигнали** – област која се занимава со активно потиснување на шум, дизајнот на слушни помагала и кохлеарни имплантни, поништување на ехо, перцептуално кодирање (mp3) итн.

Novost/Капиталното-дело-на-Дамјанов, --прквата-Св.-Пантелејмон-

⁶Wikipedia: Galileo Galilei. https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei

⁷Wikipedia: Marin Mersenne. https://en.wikipedia.org/wiki/Marin_Mersenne

⁸Wikipedia: 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](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

¹⁰Wikipedia: John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh. https://en.wikipedia.org/wiki/John_William_Strutt,_3rd_Baron_Rayleigh

¹¹Wikipedia: Wallace Clement Sabine. https://en.wikipedia.org/wiki/Wallace_Clement_Sabine

¹²англ. *The Acoustical Society of America (ASA)*.

¹³By dalbera from Paris, France - Flûte paléolithique (musée national de Slovénie, Ljubljana) Uploaded by sporti, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=27539503>; Македонски документи: Топчеста окарина <https://documents-mk.blogspot.com/2008/02/blog-post.html>



Слика 3: Палеолитска флејта направена од ножна коска на пештерска мечка пронајдена во Словенија, стара 41 100 години (лево) и неолитската окарина од теракота пронајдена во Велес, Македонија, стара 6 000 год. од локалитетот „Мрамор“ кај Чашка.¹³



Слика 4: Слика на фетус во 12^{ta} недела од бременоста добиена со ултразвук.¹⁴

- **Архитектонска акустика** – наука за постигнувањето на добар звук во простории. Вообично се занимава со проучување на разбираливоста на говорот, неговата приватност и квалитетот на музиката во изградената околина.
- **Биоакустика** – наука која го истражува слушањето и извиците на животните, како и влијанието на акустиката и звуците од околината врз нив.
- **Електроакустика** – наука која се занимава со снимањето, обработката и репродукцијата на звукот со употреба на електрониката. Има низа примени кои се движат од мобилни телефони, до озвучувања на јавни настани и системи за виртуелна реалност.
- **Бучава и звучни пејсажи** – наука која се занимава со бучавата и вибрациите предизвикани од железничкиот, патниот и авионскиот сообраќај, индустриската опрема и рекреационите активности. Главната цел е намалувањето на истата и нејзиното поволнно обликување преку дизајн на звучни пејсажи составени од зони со различна бучност во урбаниите средини.
- **Музичка акустика** – наука за физиката на музичките инструменти, но и за процесирањето на аудио во електронската музика, компјутерската анализа на музиката и композицијата.
- **Психоакустика** – наука за тоа како човекот го поима звукот.

¹⁴By This Photo was taken by Wolfgang Moroder - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=22110567>

- **Говорна акустика** – наука за произведувањето, процесирањето и перцепцијата на говорот. Тука спаѓаат областите на автоматско препознавање на говор и дигиталната синтеза на говор.
- **Ултразвучна акустика** – наука која ја истражува примената на ултразвукот во медицината, Сл. 4, хемијата, материјалите и под водата.
- **Подводна акустика** – наука за природните и вештачките звуци под површината на водата. Примените вклучуваат сонари за локирање на подморници, комуникација на китови, мерење на температурата на океаните, звучни оружја итн.
- **Акустика на вибрации и динамика** – наука за начинот на кој механичките системи вибрираат и за нивната интеракција со средината.

Поглавје 1

Основи на звукот

Звукот претставува нарушување на рамнотежната положба на честичките на дадена еластична средина, вообичаено воздухот, пропратено со промени во нејзината густина и притисокот. Местото на генерирање на овие нарушувања се нарекува [звукен извор](#), а нивното простирање во околната средина се нарекува [звукен бран](#). Еден пример за сферен звучен извор со предизвиканите згуснувања и разретчувања на воздушната средина е прикажан на [Сл. 1.1](#).

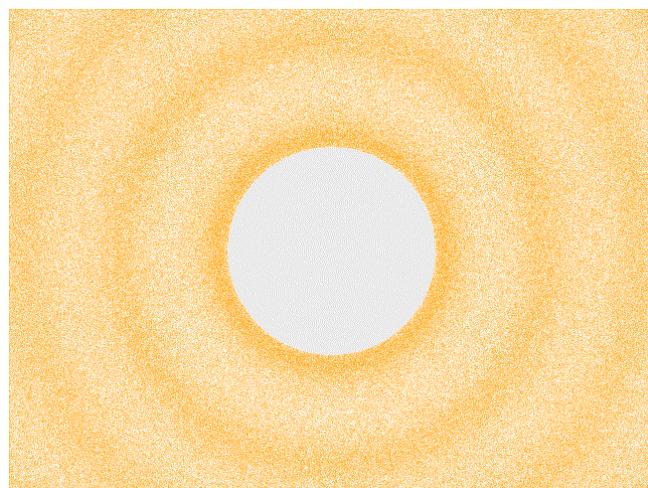
Звучните бранови во гасовите и течностите се од [лонгитудинална природа](#), односно поместувањето на честичките е во насоката на простирање на звучниот бран; додека во цврстите средини тие се [трансверзални](#), односно поместувањето е под прав агол на оската на простирање¹⁶.

Во физиологијата и психологијата, под поимот звук се подразбира приемот на таквите механички бранови со фреквенции во [слушајќи опсег](#) од 20 до 20 000 Hz и нивното поимање кај човекот.

1.1 Видови на звук

Во природата постојат три главни вида на звучни бранови:

- [периодични](#) – се делат на [прости](#) кои се нарекуваат и [простопериодични](#) и сложени звучни бранови,



Слика 1.1: Сферен звучен извор еmitува звук во слободен простор.¹⁵

¹⁵ Целата анимација тута: Thierry Dugnolle - Own work, CC0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18812489>

¹⁶ Анимација од овие два вида на простирање може да се види во натписот – Wikipedia: Sound <https://en.wikipedia.org/wiki/Sound>

- апериодични и
- мешани.

Периодичните звуци се карактеризираат со основна фреквенција на повторување, која се нарекува и висина односно тон. Апериодичните звуци пак, се со неправилна природа и немаат дефинирана висина, а човекот ги поима како шум. Простопериодичните се оние бранови кај кои промената на звучниот притисок се одвива според синусоидален закон. Сложените звучни бранови не можат да се описат со една едноставна синусоида, но можат да се разложат на сума од повеќе елементарни синусоиди. Дополнително, звучните бранови од мешан тип имаат и периодична и апериодична компонента. Пример за временските облици на промените на звучниот притисок на овие четири типови на бранови се прикажани на Сл. 1.2. Испртувањето на промените на звучниот притисок во време се нарекува **осцилограм**.

Осцилограмот ни го покажува настанувањето на звучниот бран, кое се нарекува и **онсет**, како и неговото втишување и исчезнување. На Сл. 1.2 може да забележиме дека некои звучни настани имаат нагол онсет, како звучната вилушка, додека некои како виолината имаат постепен, благ онсет. Исто така, одблиску можеме да ги видиме повторувањата во обликот на простите и сложените периодични звуци, како и грубиот нерегуларен бранов облик на апериодичните звуци. Кај мешаниот звучен бран, можеме да ги забележиме ударите на тапанот, а одблиску можеме да забележиме одредено регуларно повторување на кое е надодадена шумна компонента.

Во природата постојат само мал број на звучни извори кои генерираат прост звук, каква што е звучната вилушка која традиционално се употребува за штимање на симфонискиот оркестар.¹⁷ Вообично, звучните извори кои даваат периодични звуци, на пример поголем дел од музичките инструменти, даваат сложен периодичен звук поради самата физика на создавање на звукот преку резонанса и стојни бранови, види Поглавје 3.1. Некои од удирачките музички инструменти пак, како на пример чинелата, даваат апериодичен неправилен звук.

Сепак, речиси сите звучни извори во природата генерираат звучни бранови кои во себе содржат и периодични и апериодични компоненти, кои претставуваат звуци од мешан вид. На пример, ударот на тапанот има свој тон, т.е. музичка нота, како и останатите инструменти, иако главна намена му е да генерира шумна компонента - удар. Од друга страна пак, сите природни извори на сложен периодичен звук во периодот пред воспоставувањето на стабилниот музички тон, а некогаш и на неговиот завршеток, имаат апериодична компонента, т.е. шум, а кај некои нејзе ја има и за целото времетраење на музичкиот тон. Пример за првото е ударот со перцето по жиците на гитарата, додека за второто е шумот на кавалот при свирењето во нискиот „рез“ регистар.

1.2 Основни физички карактеристики на звучните бранови

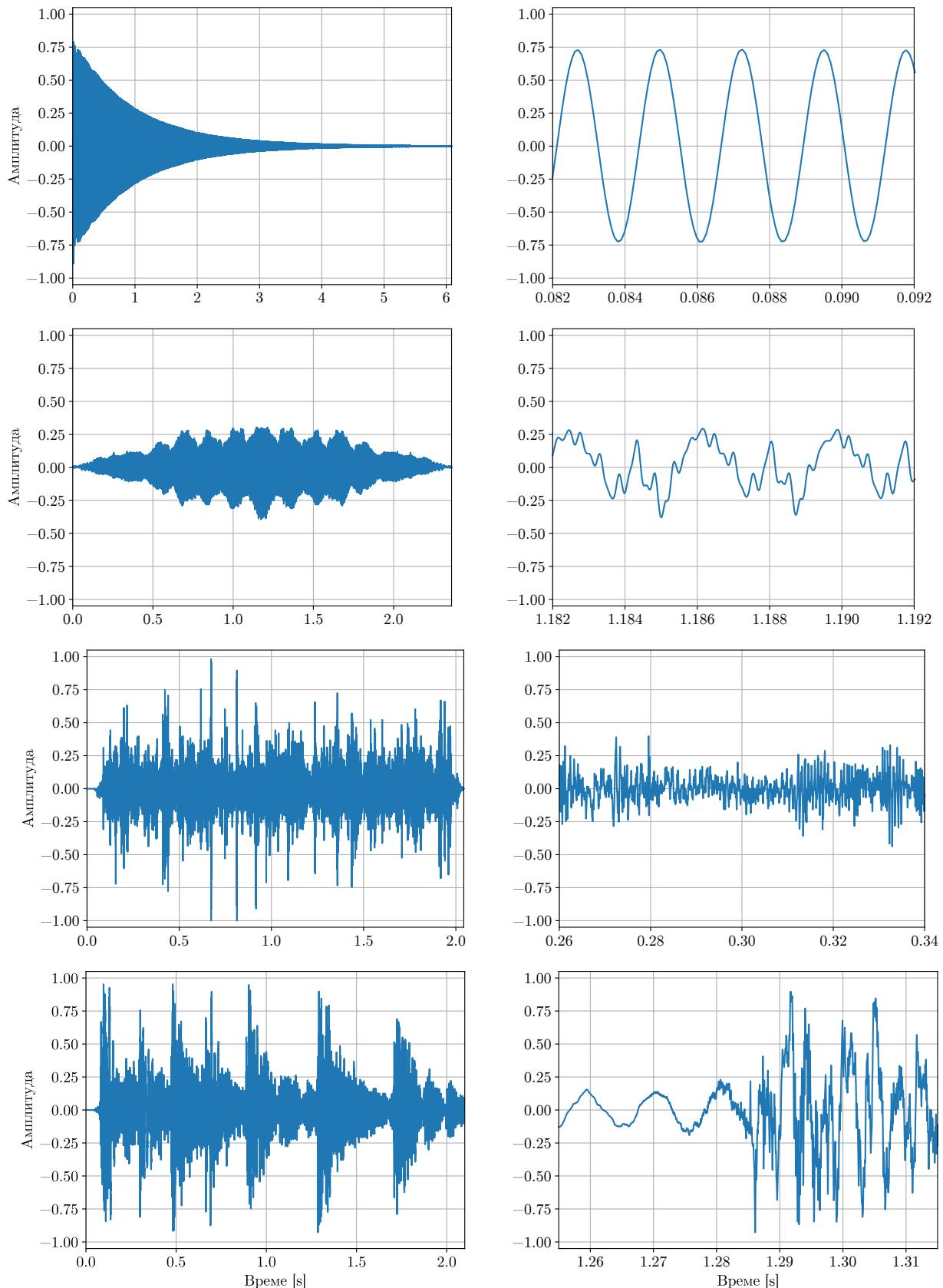
Звучните бранови можеме потполно да ги описеме преку мал број на физички својства. Во наједноставен случај, звучниот бран претставува простопериодична промена на воздушниот притисок p во време t прикажана на Сл. 1.2. Таа може да биде описана со равенството:

$$p(t) = A \cos(2\pi ft - \varphi), \quad (1.1)$$

каде:

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

¹⁷Свиркањето со уста исто така генерира близу прост звук меѓутоа при неговата анализа може да се забележи и слаб втор хармоник.



Слика 1.2: Временски облик оддалеку (лева колона) и одблиску (десна колона) на (од горе надолу): простопериодичен звучен бран добиен од звучна вилушка, сложен периодичен звучен бран од виолина, апериодичен звучен бран од течење на вода и мешан звучен бран од тапан.

Ако дополнително земеме дека звучниот бран се простира долж дадена оска x , тогаш во (1.1) се

јавува дополнителен член:

$$p(t, x) = A \cos(2\pi f t - \varphi - kx), \quad (1.2)$$

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

$$k = \frac{2\pi}{c T}. \quad (1.3)$$

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

$$T = \frac{1}{f}. \quad (1.4)$$

Производот $c T$ во (1.3) претставува патот кој го поминува звучниот бран за еден циклус, односно една периода на неговото осцилирање и уште се нарекува **бранова должина** λ .

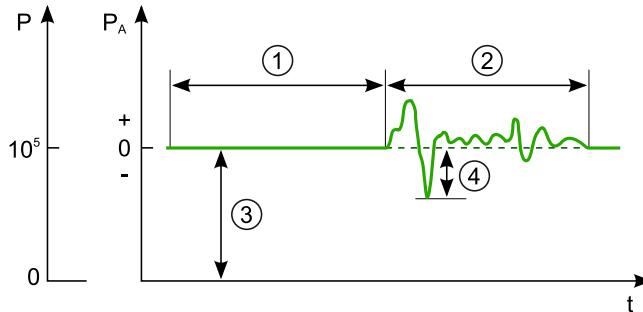
Амплитуда на звучните бранови

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

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

$$p_{tot} = p_{atm} + p. \quad (1.5)$$

Ова е прикажано на Сл. 1.3. Амплитудата на звучниот притисок се изразува во паскали (Pa) и



Слика 1.3: Звучен притисок суперпониран на атмосферскиот притисок: 1) тишина, 2) звук, 3) атмосферски притисок, и 4) звучен притисок.¹⁸

се движи од прагот на чујност, што претставува најтревкиот звук кој може да го слушне човекот, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa, па сè до прагот на болка од 200 Pa и во екстремни случаи над него. За споредба, амплитудата на атмосферскиот притисок p_{atm} изнесува 101,325 kPa.

Поради големиот опсег на вредности кои може да ги има звучниот притисок, како и поради нелинеарното чувство на гласност на звукот (види Поглавје 5), неговата амплитуда вообичаено се изразува преку **нивото на звучниот притисок** L дадено во децибели (dB):

$$L = 20 \log \frac{p}{p_0}. \quad (1.6)$$

Типични вредности на нивото на звучниот притисок за различни извори на звук се дадени во Табелата 1.1.

¹⁸By CLI - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9708905>

Табела 1.1: Ниво на звучниот притисок за различни извори на звук.

| Звучен извор | Ниво [dB] |
|----------------------|-------------------|
| праг на чујност | 0 |
| шум на лисја | 10 |
| тивка просторија | 20 – 30 |
| комарец | 40 |
| нормален разговор | 40 – 60 |
| правосмукалка | 70 |
| во автомобил | 60 – 80 |
| сообраќаен метеж | 80 – 90 |
| кршач на бетон | 100 |
| гром | 120 |
| плач на бебе | 122 |
| труба | 130 |
| рок концерт | 135 |
| праг на болка | 140 |
| огномет | 145 |
| пукање на балон | 155 |
| истрел на пушка | 171 |
| кашалот кит | 174 |
| син кит | 188 |
| метеорот во Тунгуска | 300 ¹⁹ |

Фреквенција на звучните бранови

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

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

Спектар на звучните бранови

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

$$p(t) = \frac{c_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \cos(2\pi k f_0 t + \theta_k), \quad (1.7)$$

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

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

осетливо на фазата на звукот, види [Поглавје 5](#).

Спектрите на звучните бранови, чии осцилограми беа прикажани на [Сл. 1.2](#), се прикажани на [Сл. 1.4](#). Може да забележиме дека кај простиот звук, спектарот содржи само една компонента во вид на импулс, која соодветствува на амплитудата и фреквенцијата на синусоидата со која е описан овој звук во равенството (1.1). Од друга страна, спектарот на сложениот периодичен звук содржи низа на компоненти од кои таа што е со најмала фреквенција, односно прва од лево на графиконот, соодветствува на основниот хармоник, а останатите на неговите виши хармоници. Основниот хармоник ја одредува висината односно музичкиот тон на сложениот звук, која соодветствува на отсвирената музичка нота. Во конкретниот пример, на виолина е отсвирен музичкиот тон C_4 , па основниот хармоник е со фреквенција 261,63 Hz, вториот хармоник е со фреквенција 523,25 Hz односно музички тон C_5 , а третиот хармоник – 783,99 Hz што соодветствува на G_5 , итн., види [Поглавје 3.1](#). Додека основниот хармоник ја одредува висината на тонот, вишите хармоници се тие кои ја одредуваат неговата боја. Според неа човекот може да ги разликува звучните извори меѓу себе. Во конкретниот пример, бојата на звукот ни кажува дека тонот C_4 е отсвирен на виолина, а не да речеме на зурла.

Апериодичните звучни бранови не можат да се опишат со збир на конечен број на елементарни простопериодични звуци. Напротив, за нивно претставување се потребни бесконечно многу вакви звуци. Поради тоа нивниот спектар не претставува дискретна сума на компоненти, туку континуиран интеграл даден со равенството:

$$p(t) = \int_0^{\infty} c(f) \cos(2\pi ft + \theta(f)) df. \quad (1.8)$$

Поради тоа спектарот на апериодичните звуци не е составен од низа на правилно распоредени импулси, туку тој е континуиран како што може да се види на [Сл. 1.4](#). Поради оваа распределеност на енергијата на звучниот бран во поширок фреквенциски опсег, амплитудата на спектарот на апериодичните звучни бранови е помала од онаа на периодичните звучни бранови.

Мешаните звучни бранови содржат и изразени импулси кои одговараат на фреквенцијата на повторување на периодичната компонента, и континуирани делови кои одговараат на шумната апериодична компонента. Мешаниот звучен бран на [Сл. 1.4](#) има една изразена периодична компонента во ниските фреквенции и континуиран дел во остатокот од спектарот.

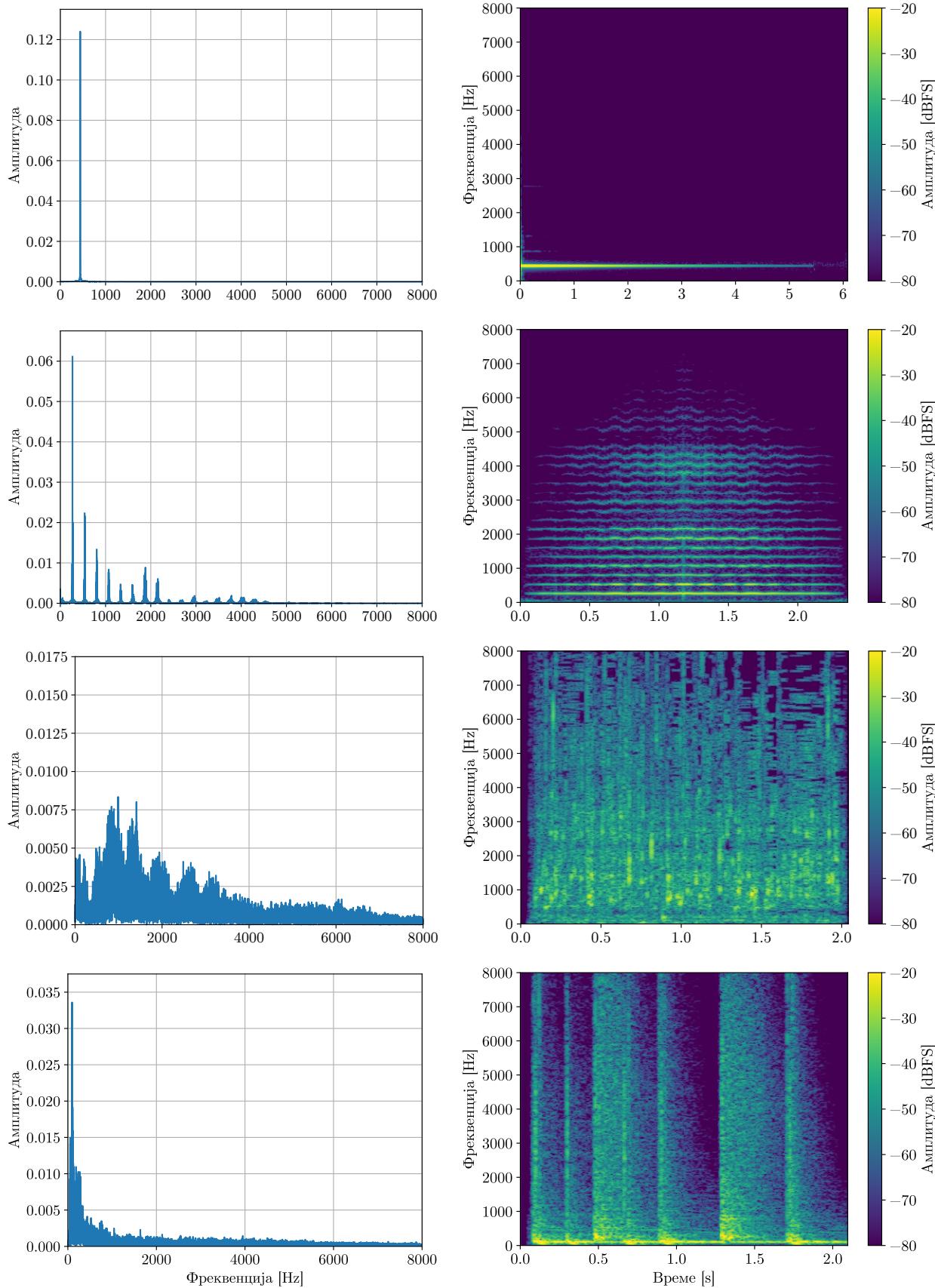
Спектrogram на звучните бранови

Иако спектарот на звучните бранови може многу да ни каже за нивната природа, во него не можеме да ги видиме нивните промени кои се јавуваат во текот на времето. Поради тоа, за анализа на фреквенциската, односно спектрална, содржина на звучните бранови вообично се употребува спектrogramот.

[Спектrogramот](#) е претстава која ни овозможува да видиме како се менува спектарот на звучниот бран во тек на времето. Тој претставува 2Д приказ на амплитудниот спектар во различни временски моменти од сигналот. На x оската од спектrogramот е прикажано време, на y оската фреквенција, а амплитудата на спектарот е прикажана со употреба на [колормапа](#) со која се врши мапирање од амплитуда во боја, односно различните вредности на амплитудата се претставени со различни нијанси на боја.²⁰ Со овој приказ може да видиме во кои временски моменти во кои делови од спектарот има највеќе енергија.

¹⁹Ова е поголем притисок од атмосферскиот притисок кој изнесува околу 195 dB, што значи дека полупериода ќе биде пресечена, односно ќе имаме нејзина дисторзија.

²⁰Постојат различни колормапи за приказ на нумерички вредности. Една од порано најкористените *jet* со боите на виножитото денес е исфрлена од употреба поради нејзината нелинеарност и неинтуитивност. На нејзино место, денес во употреба се линеарни колормапи кои го мапираат опсегот на нумерички вредности кој го прикажуваат во низа на нијанси кои се перцептуално линеарно распоредени. Повеќе за ова може да видите во видеото Nathaniel Smith and Stéfan van der Walt: A Better Default Colormap for Matplotlib, SciPy 2015 <https://www.youtube.com/watch?v=xAo1jeRJ3IU>



Слика 1.4: Амплитуден спектар (лева колона) и спектрограм (десна колона) на: простопериодичен звучен бран добиен од звучна вилушка, сложен периодичен звучен бран од виолина, апериодичен звучен бран од течење на вода и мешан звучен бран од тапан.

Спектрограмот на звучните бранови од Сл. 1.2 е прикажан на Сл. 1.4. Може да се види дека поединечните компоненти, односно импулси, коишто беа присутни во спектрите на простиот и

сложениот периодичен звук, во спектограмот се јавуваат во вид на хоризонтални линии. Кај простопериодичниот звук, тоа е единствена хоризонтална линија која соодветствува на основниот хармоник и е поставена на фреквенција f_0 , додека кај сложениот звук имаме множество на паралелни хоризонтални линии, од кои најниската, односно таа која е најдолу, соодветствува на основниот хармоник, а останатите на вишите хармоници. Исто така, за разлика од звучната вилушка, во спектограмот на тонот отсвирен со виолината можеме дополнително да видиме постепено засилување а потоа и втишување на сите компоненти, како и нивна фреквенциска варијација која соодветствува на музичко vibrato. Сите овие информации не беа видливи во спектарот на звучниот бран.

Кај спектограмот на апериодичниот звук може да се види отсуство на хоризонтални линии и континуирана распределба на амплитудата долж фреквенцискиот спектар. Конечно, кај мешаниот звучен бран можеме да ја издвоиме изразената хоризонтална линија која соодветствува на неговата периодична компонента, како и шумот кој соодветствува на неговата апериодична компонента. Дополнително можеме да ги издвоиме ударите на тапанот кои се јавуваат како вертикални линии во спектограмот. Оваа информација се гледаше и во осцилограмот, но не и во спектарот на мешаниот звучен бран. Ова ја потенцира предноста на спектограмот како комбиниран приказ на временската и спектралната содржина на звучните бранови.

Осцилограмот и спектограмот се двата основни прикази на звучните појави кои се користат при фонетска анализа на човековиот говор како што ќе видиме во [Поглавје 3.2](#).

Звучна боја

Бојата на звукот²¹, е субјективен начин на описување на спектралната содржина на различните звуци. Според неа човекот може да ги разликува звучните извори едни од други. Врз бојата на тонот влијаат постоењето или непостоењето на хармоници во спектарот, а особено фреквенцијата и амплитудата на тие хармоници, како и распределбата на нехармониска, односно апериодична енергија во него. На пример, со бојата на звукот можеме да одредиме дали звукот кој го слушаме потекнува од своно 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 генериралиот звук како промена во бојата. Звучната боја е клучна во разликувањето на гласовите во човековиот говор.

1.3 Запознавање со звучните форми

Практичен дел

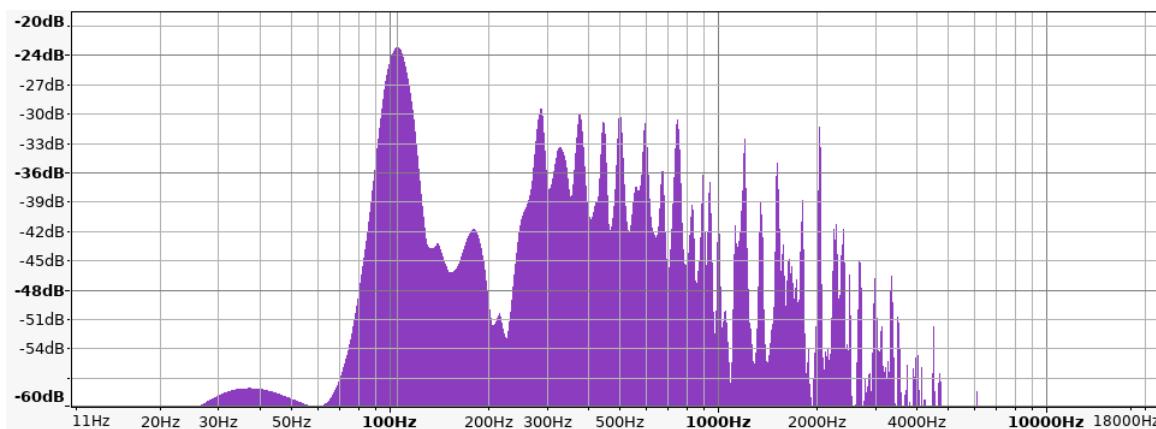
Во овој практичен дел ќе се запознаеме со основите на временскиот и фреквенциски облик на различни типови на звук. За таа цел, ќе се послужиме со софтверскиот пакет Аудасити (види [Додаток А](#)).

Основни особини на звукот

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

Со кликнувањето на аудио траката може да го позиционираме курсорот кој ни кажува на која локација сме во аудиото. Со притискање на `Space`, или со иконата `Play`, можеме да го чуеме фајлот. Во секое време курсорот ни кажува каде сме. Запирањето се врши на истиот начин. Амплитудната оска го прикажува нивото на сигналот од -1 до 1. Лево од аудио траката се наоѓа

²¹фран. *timbre*.



Слика 1.5: Спектар на аудио трака во Аудасити.

мал панел кој ги прикажува фреквенцијата на семплирање и резолуцијата на аудио сигналот. Овој панел може да се искористи при миксање на повеќе аудио траки за одредување на нивната амплитуда и позиција во стерео просторот. За да го смениме приказот на аудио траката може да кликнеме на менито со името на фајлот во овој панел.

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

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

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

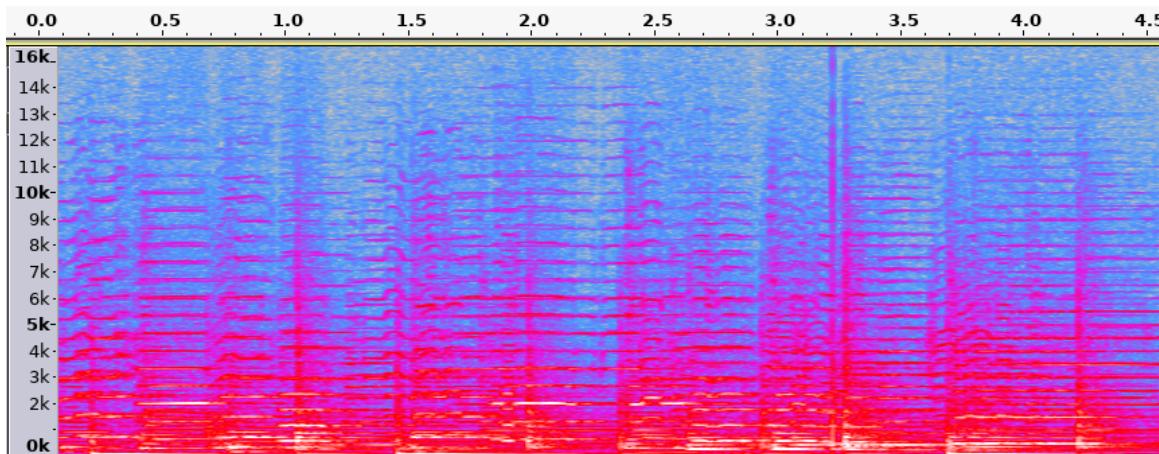
✓ **Задача за час.** Зумирајте до ниво на 0.1 ms и употребете го моливчето веднаш од алатникот за да нацртате дел од аудио фајлот според ваша желба. Ваквите можности се незамисливи во едитирањето на аналогното аудио!

Спектар на звукот. Прикажувањето на спектарот во Аудасити се прави со избор на `Analyze > Plot Spectrum` од менијата, Сл. 1.5. 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 скопско и нацртај го нејзиниот спектар!

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



Слика 1.6: Спектрограм на аудио трака во Аудасити.

- ✓ **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

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

- звучна вилушка,
- виолина,
- тапан.

Анализа на звучна боја

- ✓ **Задача за час.** Вчитајте и исцртајте ги спектрите на следните аудио фајлови:
- `guitar_low` и `guitar_high`,
 - `kaval_low` и `kaval_high`,
 - `zurla` – забележете како се движи мелодијата отсвирена на првата зурла веднаш над статичниот тон од втората зурла,
 - `voice` – на која висина е гласот, т.е. која е неговата основна фреквенција f_0 ? За да го одредите тоа поточно со `Plot Spectrum` селектрирајте дел со изразени хармоники, 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 дома.** Вклучете го снимањето и снимете го сопствениот глас. Кажете неколку реченици и внимавајте за време на снимањето покажувачите на ниво на микрофонот да не влезат во црвено – тоа значи ќе настане пресекување на амплитудите во записот, наречено [клипување](#). Ако не е доволна јачината на сигналот може ќе треба да ги смените подесувањата на оперативниот систем.

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

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

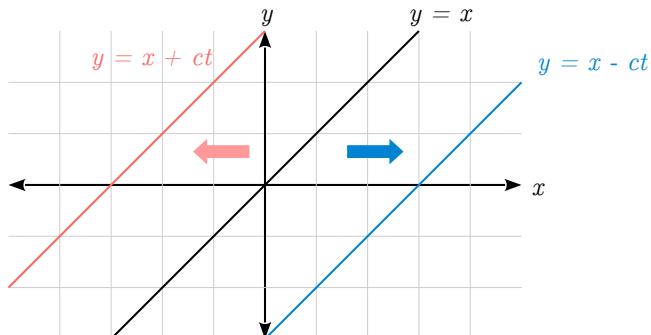
Поглавје 2

Физика на звукот

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

2.1 Еднодимензионални бранови

Во најопшт случај може да кажеме дека брановото простирање претставува пренос на информација од една точка до друга. На пример да ја земеме зависноста (2.1) претставена на Сл. 2.1.



Слика 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).

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

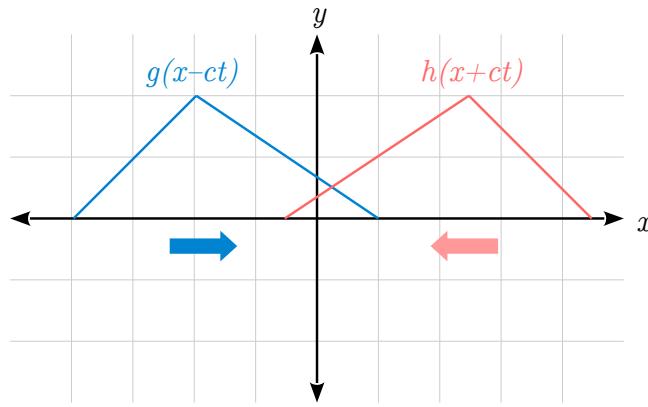
$$y = x - ct \quad (2.2)$$

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

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.



Слика 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:

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

тогаш бранот е составен само од компонента која се простира во позитивната насока на x -оската. Уште повеќе, ако земеме дека се работи за прост звук (види Поглавје 1), тогаш обликот на $g(x, t)$ е синусоида, па имаме:

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

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. Важи:

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

каде ω е кружна фреквенција, а f е фреквенција во Hz која што е врзана со периодата T според:

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

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 периода 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

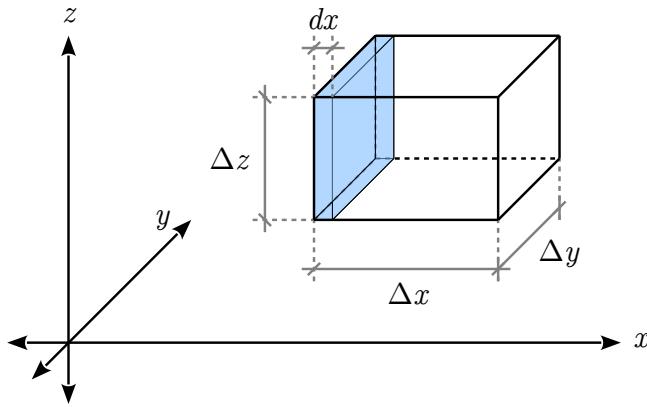
Да замислим во воздушната средина елементарен волумен ΔV во облик на паралелопипед со страни Δx , Δy и Δz , прикажан на Сл. 2.3. На страните на овој паралелопипед делуваат сили кои се последица на притисокот во воздухот. Кога немаме звучни појави, притисокот е еднаков на атмосферскиот притисок p_{atm} 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:

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



Слика 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 $\Delta y \times \Delta z$ 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 Љутнов закон имаме:

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

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

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

За останатите димензии ова равенство може еквивалентно да се изведе:

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

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

Во три димензии ова равенство го има следниот векторски облик:

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

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

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

Промена на ΔV . Покрај поместувањето во просторот, промената на притисокот предизвикува и промена на елементарниот волумен преку 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.²² 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):

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

²²Изотермички 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:

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

За синусоидален звучен извор решението во фазорски облик ќе биде:

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

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

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

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

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

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

$$(2.47)$$

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

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

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

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

Од изразите може да се види дека нашето почетно тврдење дека секој еднодимензионален бран може да се претстави како збир од два спротивно насочени бранови е точно. Исто така, може да се види дека вредноста c воведена со (2.40) навистина претставува брзина на простирање на

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:

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

чија што аналитичка форма:

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

е еквивалентна со (2.6).

2.4 Брзина на простирање на звукот

Брзината на простирање на звукот c која важи за сите гасови кога се работи за адијабатски процес, беше дадена со (2.40):

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

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

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

$$pV = nRT, \quad (2.52)$$

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

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

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

$$(2.55)$$

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

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

каде c_0 е брзината на звукот за температура од 0°C . Од таму можеме да ја пресметаме брзината на звукот за температура од 20°C која изнесува $c_{20} = 343 \text{ m/s} = 1234 \text{ km/h} = 1 \text{ Mach}$. При движење на објект со оваа брзина притисокот од звучните бранови се концентрира пред објектот во вид на **звучен сид**, Сл. 2.4. Во Табелата 2.1 се дадени брзини на простирање на звукот во различни материјални средини.

2.5 Брзина и поместување на воздушните честички

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

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

²³By Ensign John Gay, U.S. Navy - This Image was released by the United States Navy with the ID 990707-N-6483G-001. Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3890362>



Слика 2.4: Пробивање на звучен сид на брзина од 1 Mach.²³

Табела 2.1: Брзина на звукот во различни средини.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.6 Сферни бранови

Звучните бранови во слободен простор се простираат во вид на сферни бранови околу звучниот извор. За нивна анализа згодно е да се премине на сферен координатен систем даден на Сл. 2.5. Еден тродимензионален вектор \vec{M} е дефиниран во правоаголен координатен систем со трите димензии (x, y, z) , додека во сферен координатен систем тој е дефиниран со растојанието од координатниот почеток r и аглите φ – помеѓу проекцијата на векторот \vec{M} на xy -рамнината со x -оската, и θ – помеѓу \vec{M} и z -оската.²⁴

Ако изворот на звук се постави во средината на овој сферен координатен систем, поради симетријата на простирањето на звучниот бран, полната форма на лапласијанот во брановата равенка (2.39) ќе биде поедноставена функција од r :

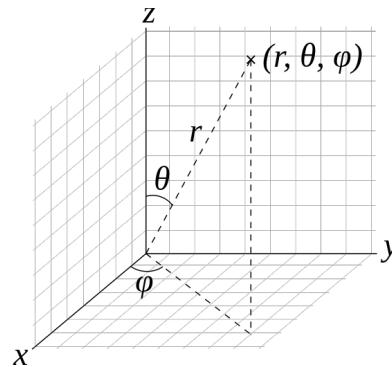
$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p = c^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = c^2 \frac{1}{r} \frac{\partial^2 (pr)}{\partial r^2}, \quad (2.61)$$

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

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

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

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



Слика 2.5: Сферен координатен систем.²⁵

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

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

²⁴За премин од правоаголен во сферен координатен систем важат равенствата:

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

додека, за премин назад во правоаголен координатен систем:

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

За брзината на воздушните честички имаме:

$$v = j \frac{1}{\omega \rho} \frac{\partial p}{\partial r} = j \frac{1}{\omega \rho} \left(\frac{(-jk)Ae^{j(\omega t - kr)} \cdot r - Ae^{j(\omega t - kr)} \cdot 1}{r^2} \right) = \frac{1 + jkr}{j\omega \rho} \frac{A}{r^2} e^{j(\omega t - kr)}, \quad (2.66)$$

за чие решавање сме го употребиле правилото за диференцирање на количник на две функции.²⁶

2.7 Специфична акустичка импеданса

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

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

каде:

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

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

Тука фазата на импедансата φ е **фазната разлика** помеѓу притисокот и брзината на воздушните честички, а во (2.68) сме замениле е:

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

На Сл. 2.6 и 2.7 е прикажана зависност на аголот φ и вредноста на $\cos \varphi$ 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 $\cos \varphi \approx 1$, го добива поедноставениот облик за рамнински бранови, до кој можевме да дојдеме и од (2.59):

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

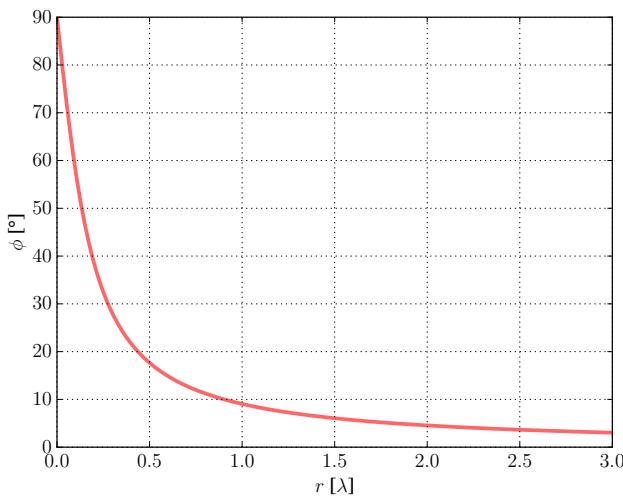
Вредноста на Z_s за рамнински звучни бранови кои се шират во воздух со температура од 20 °C изнесува $414 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$.

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

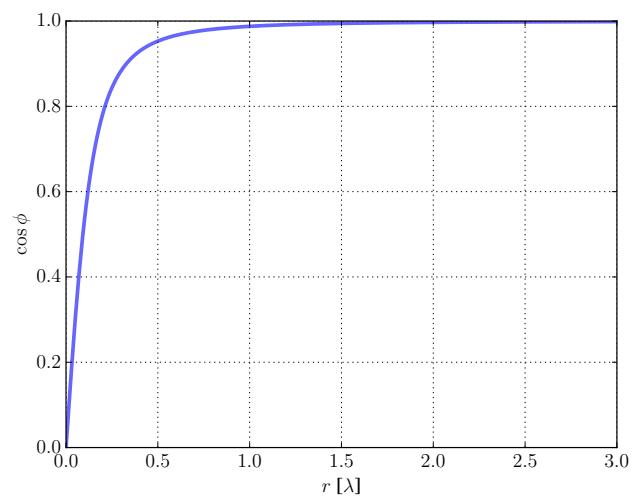
$$Z_s = R_s + jX_s = \frac{j\rho c k r}{1 + jkr} \cdot \frac{1 - jkr}{1 - jkr} = \frac{\rho c k^2 r^2}{1 + k^2 r^2} + j \frac{\rho c k r}{1 + k^2 r^2}. \quad (2.72)$$

Бидејќи X_s е секогаш позитивна таа има особини на индуктанса. На Сл. 2.8 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 .

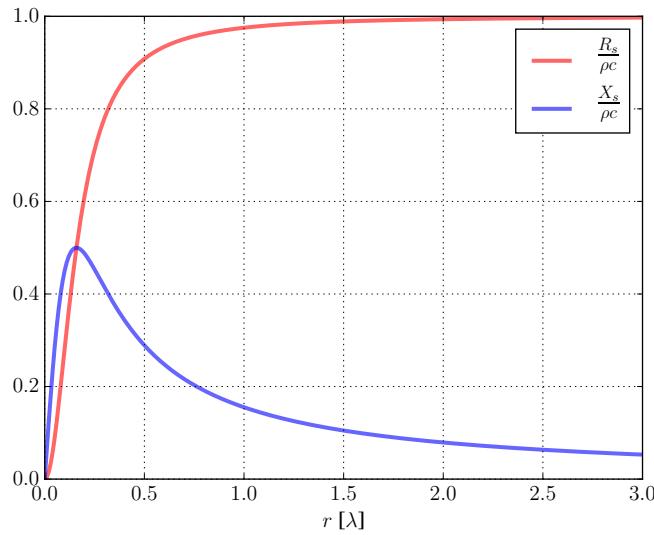
²⁶Според ова правило $\frac{d}{dx} \frac{g(x)}{h(x)} = \frac{g'(x)h(x) - g(x)h'(x)}{h(x)^2}$.



Слика 2.6: Зависност на аголот φ од растојанието r изразено во λ .



Слика 2.7: Зависност на $\cos \varphi$ од растојанието r изразено во λ .



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

2.8 Интензитет на звук

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

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

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

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

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

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

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

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

2.9 Акустичка моќност

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

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

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

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

односно за сферни бранови:

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

Од равенствата (2.75) и (2.78) можеме да го добиеме и следниот израз за акустичкиот притисок кај сферните бранови:

$$p = \sqrt{J\rho c} = \sqrt{\frac{P_a}{4\pi r^2} \rho c} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{P_a \rho c}{4\pi}}, \quad (2.79)$$

кое ни кажува на што е еднаква константата во изразот (2.65): $pr = const.$

2.10 Акустички проток

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

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

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

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 (2.72) имаме:

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

па реалната акустичка моќност можеме да ја добиеме како:

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

2.11 Акустичка импеданса

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

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

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 $kr_0 \gg 1$, па важи:

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

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

За дискусија, да ја изразиме акустичката моќност дадена со (2.90) преку ефективната површина на мембраната S_0 и брзината на нејзиното движење ξ_0 :

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

Од тука, можеме да видиме дека акустичката моќност на точkest извор, преку протокот, е правопропорционална на производот на квадратите на неговата ефективна површина и амплитудата на неговото движење, како и четвртиот степен од кружната фреквенција на звукот, т.е. $P_a \propto \omega^4 S_0^2 \xi_0^2$. Ова значи дека извор со помали димензии треба да има дотолку поголемо

движење за да постигне иста акустичка моќност, односно проток, како извор со поголеми димензии. Ова исто така значи дека потребните димензии и движење на изворот за постигнување на одредена акустичка моќност преку протокот зависат од фреквенцијата на звукот. Односно, за ниски фреквенции изворот треба да е многу поголем и да има поголемо движење за да постигне иста моќност со извор кој зрачи на високи фреквенции. Како пример споредете ја големината на мембраната на тапанот и големината на фудбалското судиско свирче.

2.12 Просторен агол на зрачење

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

$$\frac{P'_a}{P_a} = \frac{q_0^2 \frac{\rho c k^2}{\Omega'_z}}{q_0^2 \frac{\rho c k^2}{\Omega_z}} = \frac{\Omega_z}{\Omega'_z} = \frac{4\pi}{2\pi} = 2, \quad (2.97)$$

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

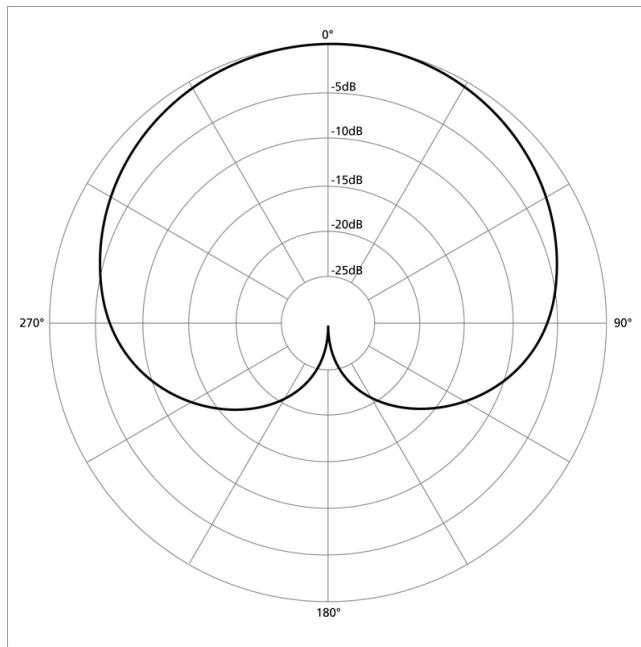
$$\frac{J'}{J} = \frac{\frac{P'_a}{\Omega'_z r^2}}{\frac{P_a}{\Omega_z r^2}} = \frac{\Omega_z}{\Omega'_z} = \frac{2 \cdot 4\pi}{2\pi} = 4, \quad (2.98)$$

а звучниот притисок пак ќе биде 2 пати поголем:

$$\frac{p'}{p} = \sqrt{\frac{J'}{J}} = 2. \quad (2.99)$$

Од друга страна, ако претпоставиме дека звучниот извор работи со константна акустичка моќност, промената на интензитетот ќе биде:

$$\frac{J'}{J} = \frac{\frac{P_a}{\Omega'_z r^2}}{\frac{P_a}{\Omega_z r^2}} = \frac{\Omega_z}{\Omega'_z} = 2, \quad (2.100)$$



Слика 2.9: Крива на зрачење на звучен извор.²⁹

а промената на притисокот ќе биде:

$$\frac{p'}{p} = \sqrt{\frac{\frac{P_a \rho c}{\Omega_z r^2}}{\frac{P_a \rho c}{\Omega'_z r^2}}} = \sqrt{\frac{\Omega'_z}{\Omega_z}} = \sqrt{2} = 1,4142 . \quad (2.101)$$

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 електроакустиката, на пр. кај мегафоните, хорните на звучниците²⁷, поставување на звучниците до сид, или уште повеќе во ќоп²⁸. Но исто така ова го користиме и при довикување со поставување на рацете како инка на устата.

2.13 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 **крива на насоченост**, Сл. 2.9. Таа во поларен координатен систем ја претставува насоченоста на звучниот извор како функција од аголот на зрачење θ пресметан во однос на оската на зрачење:

$$\Gamma = \frac{p_\theta}{p_0}, \quad (2.102)$$

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

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

²⁷Кај хорните исто така има и прилагодување на импедансата на зрачење за максимален пренос на акустичка енергија, види Поглавје 4.

²⁸Ова успева само за ниските фреквенции, за кои изворот можеме да го сметаме за точkest, но и за кои можеме да го поставиме доволно близку до сидот релативно на брановата должина на звукот.

²⁹Galak76 "Polar pattern cardioid" <https://en.wikipedia.org/wiki/Microphone>.

Моќноста на зрачење сега може да ја најдеме од општиот израз даден со 2.76:

$$P_a = \oint_S J_\theta dS = J_0 \oint_S \frac{J_\theta}{J_0} dS = J_0 \oint_S \Gamma^2 dS = J_0 r^2 \int_0^{4\pi} \Gamma^2 d\Omega, \quad (2.103)$$

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

$$\Omega_z = \int_0^{4\pi} \Gamma^2 d\Omega, \quad (2.104)$$

Од таму имаме:

$$J_0 = \frac{P_a}{\Omega_z r^2}. \quad (2.105)$$

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 изразување на оваа зависност математички се воведува **кофициентот на насоченост γ** :

$$\gamma = \frac{4\pi}{\Omega_z}, \quad (2.106)$$

па за J_0 имаме:

$$J_0 = \gamma \frac{P_a}{4\pi r^2}. \quad (2.107)$$

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

$$J_\theta = \gamma \frac{P_a}{4\pi r^2} \Gamma^2. \quad (2.108)$$

2.14 Рефлексија на звук

Во досегашните разгледувања го анализирањето 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, како на Сл. 2.10, па правилно е да се земат и прогресивниот и рефлектираниот бран описани со (2.49):

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

За брзината на воздушните честички според (2.59) имаме:

$$v = \frac{A_+}{\rho c} e^{j(\omega t - kx)} - \frac{A_-}{\rho c} e^{j(\omega t + kx)}, \quad (2.109)$$

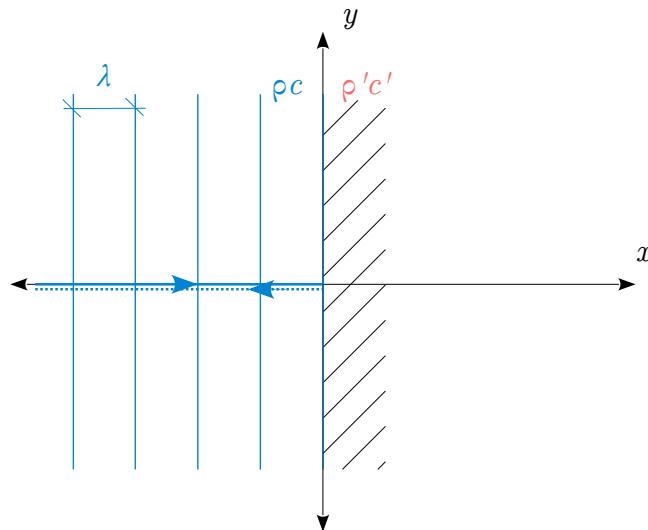
при што, уделите на двата брана во брзината се со спротивна насока, па тие се одземаат.

Ако претпоставиме дека звучниот бран се простира во идеална цевка, т.е. звуковод, Сл. 2.11, која на едниот крај е затворена со специфична импеданса $Z_s = \rho' c'$, тогаш ако го земеме координатниот почеток $x = 0$ на крајот од цевката, во таа точка за односот p/v добиваме:

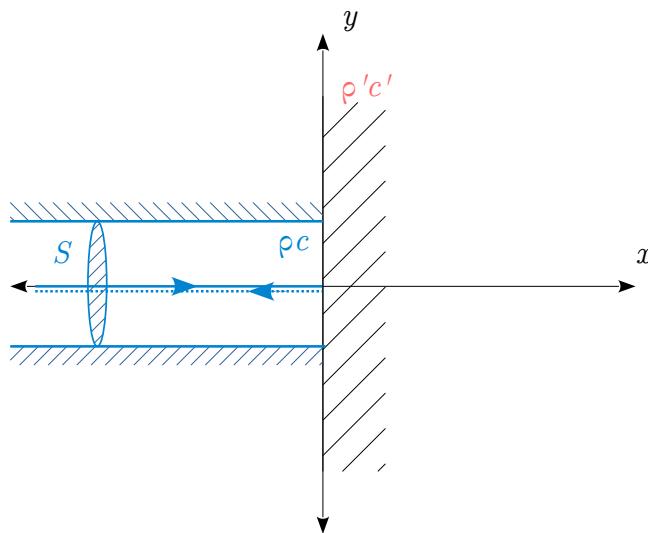
$$\left. \frac{p}{v} \right|_{x=0} = \rho c \frac{A_+ + A_-}{A_+ - A_-} = Z_s. \quad (2.110)$$

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

$$r = \frac{A_-}{A_+} = \frac{Z_s - \rho c}{Z_s + \rho c} = \beta e^{j\delta}, \quad (2.111)$$



Слика 2.10: Рефлексија на звучен бран при нормална инциденција.



Слика 2.11: Рефлексија на звучен бран при нормална инциденција во звуковод.

каде β го дава односот на магнитудите на двета 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.³⁰ Релацијата (2.111) важи и за рефлексијата на граничната површина во слободен простор прикажана на Сл. 2.10.

Во случајот на простирање на звук во звуковод, посоодветно е да ја искористиме акустичката импеданса за изразување на r :

$$r = \frac{Z_a - \frac{\rho c}{S}}{Z_a + \frac{\rho c}{S}}, \quad (2.112)$$

каде S е површината на напречниот пресек на звуководот.

За екстремниот случај кога $Z_s \rightarrow \infty$ ³¹ 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:

$$p(0,t) = 2A_+e^{j\omega t}, \quad (2.113)$$

³⁰Оваа појава е причината зошто во радиотехниката се поставува импеданса на крајот од водовите еднаква со онаа на самиот вод, наречена „терминатор“.

³¹Аналогно на отворен вод во електричен домен.

а брзината на воздушните честички според (2.109) ќе е:

$$v(0,t) = 0, \quad (2.114)$$

што е и логично за бесконечна импеданса.

Во случај пак, кога $Z_s = 0$ ³² 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:

$$p(0,t) = 0, \quad (2.115)$$

$$v(0,t) = 2 \frac{A_+}{\rho c} e^{j\omega t}. \quad (2.116)$$

Во општ случај, при нормална инциденција на звучен бран на гранична површина помеѓу две средини со различни специфични акустички импеданси, дадени со ρc и $\rho' c'$, соодветно, ќе важи:

$$r = \frac{\rho' c' - \rho c}{\rho' c' + \rho c}. \quad (2.117)$$

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.

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 $\rho' c' \gg \rho c$, што се јавува кога воздушната средина се граничи со средина која има поголема густина, но и поголема брзина на простирање на звукот. Вакви средини има многу, како што беше илустрирано во [Табелата 2.1](#). Во звуковод ова би било задоволено ако едниот негов крај е затворен.

Спротивниот услов, т.е. $Z_s \ll \rho c$ или $\rho' c' \ll \rho c$, потешко може да се реализира при простирање на звукот низ воздухот, но може да се сртне кога звучниот бран се простира во водата и доаѓа до нејзината површина.

Во звуководи, еквивалентниот израз даден во однос на акустичката импеданса на двете средини би бил:

$$r = \frac{\frac{\rho' c'}{S'} - \frac{\rho c}{S}}{\frac{\rho' c'}{S'} + \frac{\rho c}{S}}. \quad (2.118)$$

Во случај кога во звуководот нема промена на средината, туку само на напречниот пресек, како на [Сл. 2.12](#), повторно ќе се јави рефлексија.³³ Во тој случај коефициентот на рефлексија ќе биде даден со:

$$r = \frac{S - S'}{S + S'}. \quad (2.119)$$

Во ваков звуковод условот $\rho' c' / S' \ll \rho c / S$ може да се задоволи кога $S' \gg S$, како на пример кога едниот негов крај е отворен во слободен простор.³⁴

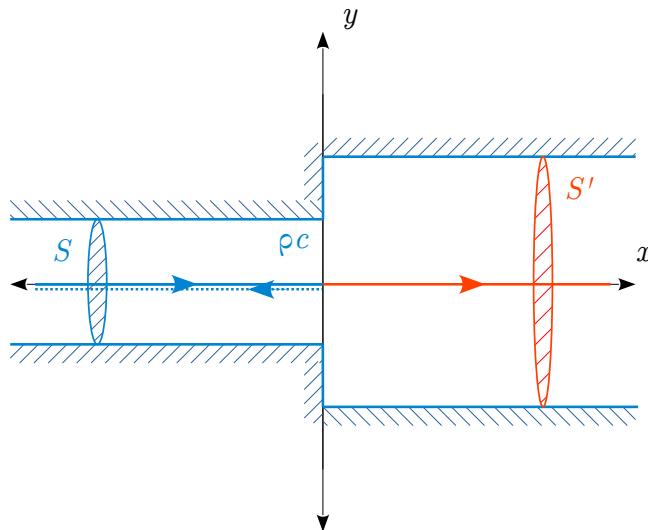
Во акустиката на простории ([Поглавје 6](#)), од особено значење е [коефициентот на апсорција](#) α кој ја одредува акустичката енергија апсорбирана во единица време при секое одбивање на звучниот бран од граничните површини:

$$\alpha = \frac{P_\alpha}{P_i}. \quad (2.120)$$

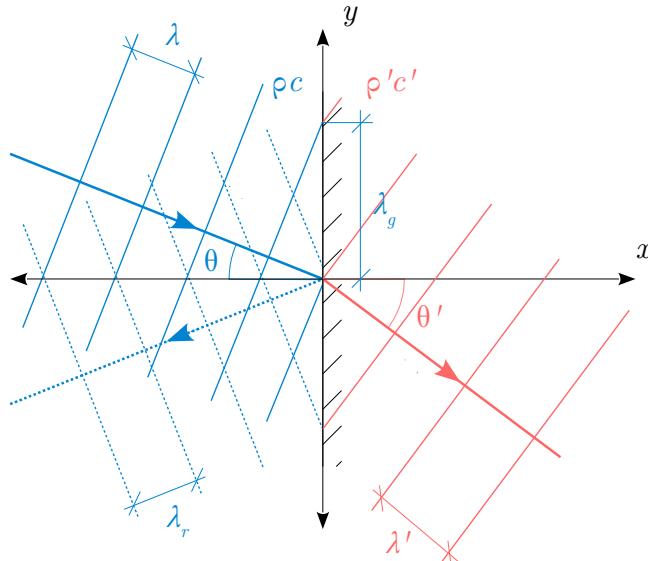
³²Аналогно на куса врска во електричен домен.

³³Ваков вид на рефлексија е суштински за обликувањето на преносната функција на вокалниот тракт при зборувањето.

³⁴Во аналогијата со електричен вод, затворен звуковод одговара на отворен вод, а отворен звуковод одговара на кусо врзан вод.



Слика 2.12: Рефлексија на звучен бран при нормална инциденција во звуковод со промена на напречниот пресек.



Слика 2.13: Рефлексија на звук при коса инциденција.

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 ќе го исористиме интензитетот на звукот кој бива рефлектиран J_r :

$$\alpha = 1 - \frac{J_r}{J_i} = 1 - \left| \frac{p_-}{p_+} \right|^2 = 1 - r^2, \quad (2.121)$$

каде r е факторот на рефлексија.

2.15 Рефлексија на звук при коса инциденција

При коса инциденција на звучен бран на гранична површина, прикажано на Сл. 2.13 може да се употребат законите на геометриската оптика ако граничната површина е со димензии поголеми од брановата должина λ . Еквивалентната област во акустиката се нарекува **геометриска акустика** и во неа се анализира простирањето на тенки спонови акустичка енергија наречени **звучни 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 двета брана на граничната површина λ_g мора да се поклопи, поради што аголот на бранот кој продира ќе биде различен од инцидентниот $\theta' \neq \theta$. Тој може да се пресмета користејќи го [Снеловиот закон](#):

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta'} = \frac{c}{c'} . \quad (2.122)$$

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:

$$\sin \theta = \frac{c}{c'} . \quad (2.123)$$

2.16 Стојни бранови

Од изразот за коефициентот на рефлексија (2.111) и изразите за еднодимензионални бранови (2.49) и (2.109) можеме да ги напишеме изразите за звучниот притисок и брзината на воздушните честички при нормална инциденција:

$$p = A_+(e^{j(\omega t - kx)} + \beta e^{j(\omega t + kx + \delta)}), v = A_+(e^{j(\omega t - kx)} - \beta e^{j(\omega t + kx + \delta)}) . \quad (2.124)$$

Тотална рефлексија за $Z_s \gg \rho c$

Кога $Z_s \gg \rho c$ имаме тотална рефлексија, па $r = 1$ а изразот за звучниот притисок се сведува на:

$$\begin{aligned} p &= A_+(e^{j(\omega t - kx)} + \beta e^{j(\omega t + kx + \delta)}) = \\ &= A_+[\cos(-kx) + j \sin(-kx) + \cos(kx) + j \sin(kx)]e^{j\omega t} = \\ &= 2A_+ \cos kx e^{j\omega t} . \end{aligned} \quad (2.125)$$

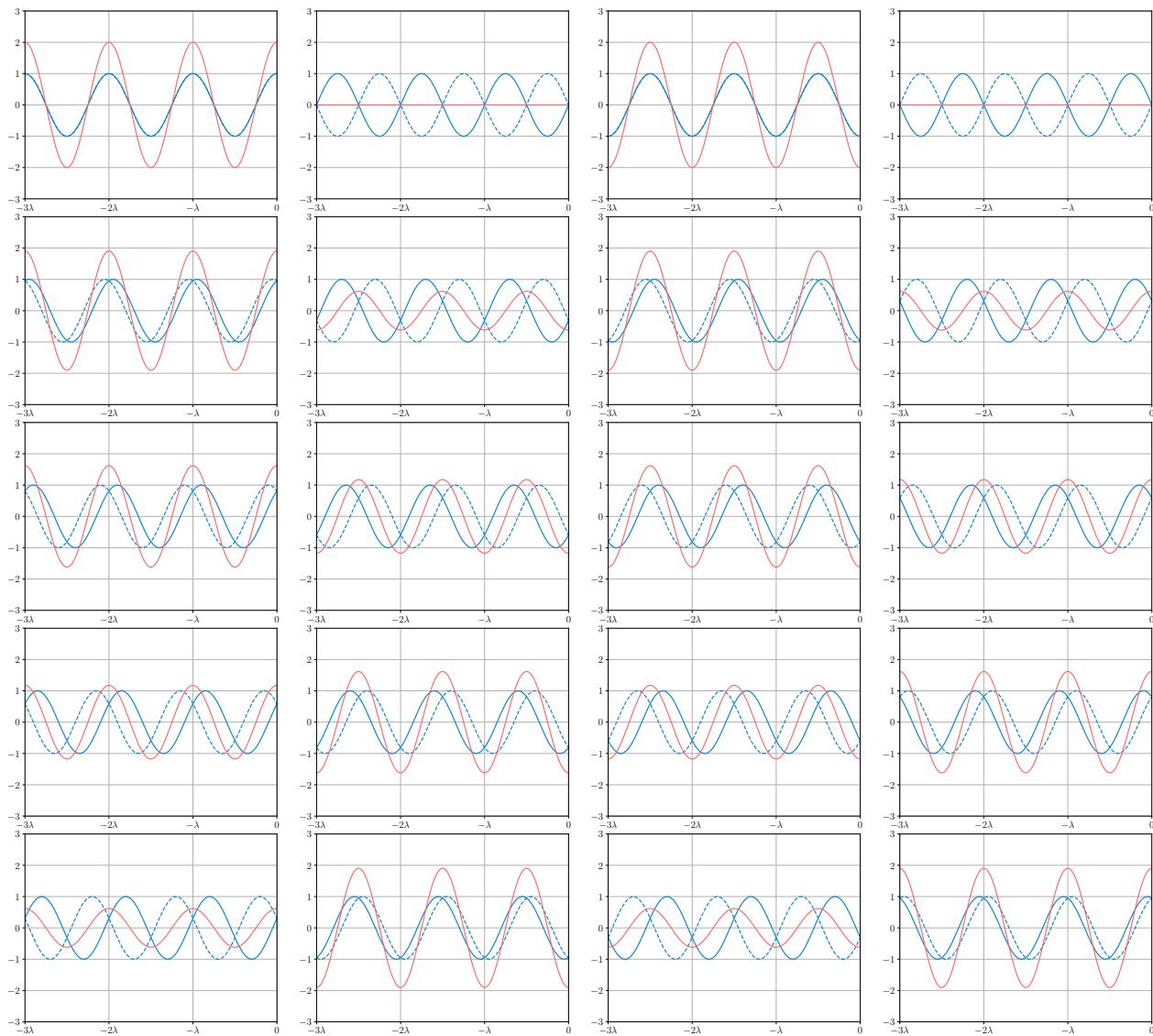
Може да забележиме дека иако амплитудата зависи од растојанието x , звучниот бран описан со (2.125) не се простира, односно преставува [стоен бран](#). Овој феномен е илустриран на [Сл. 2.14](#) на која се прикажани директниот, рефлектираниот и сумарниот бран за неколку различни вредности на t .

Неговата амплитуда е максимална и е двојно поголема од онаа на самиот прогресивен бран, на сите локации за кои $\cos kx = \cos \frac{2\pi}{\lambda} x = 1$. Овој услов е задоволен за $kx = 0, -\pi, -2\pi, -3\pi, \dots$, односно за: $x = 0, -\lambda/2, -\lambda, -3\lambda/2, \dots$ Спротивно, за сите позиции за кои $\cos kx = 0$, односно $x = -\lambda/4, -3\lambda/4, -5\lambda/4, \dots$ амплитудата на притисокот на стојниот бран ќе биде 0.

Така, ако се движиме долж x оската почнувајќи од граничната површина па наназад, ќе забележиме дека звукот со движењето се намалува сè додека сосема не се изгуби за $x = -\lambda/4$, за повторно да почне да се засилува до својот максимум за $x = -\lambda/2$, по што целиот процес се повторува. Ова е илустрирано на [Сл. 2.14](#) добиена со симулација на формирањето на стојните бранови во [Поглавјето 2.17](#).

За брзината на воздушните честички имаме:

$$\begin{aligned} v &= \frac{A_+}{\rho c} [\cos(-kx) + j \sin(-kx) - \cos(kx) - j \sin(kx)]e^{j\omega t} = \\ &= 2 \frac{A_+}{\rho c} (-j) \sin(kx) e^{j\omega t} = \\ &= 2 \frac{A_+}{\rho c} \sin kx e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})} , \end{aligned} \quad (2.126)$$



Слика 2.14: Стоен бран (црвено) добиен како збир на директен (сино – полна линија) и рефлектиран бран (сино – испрекината линија) прикажан во 20 еднакво одвоени временски моменти во рамките на една периода.

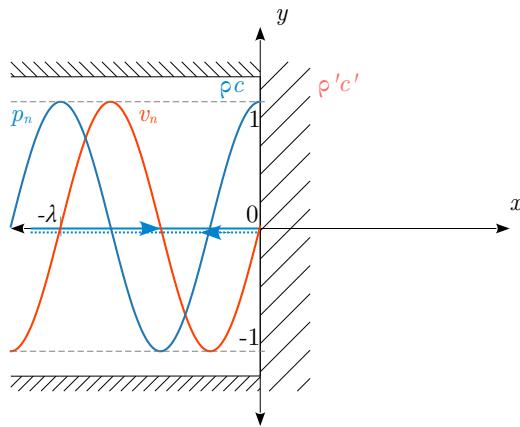
што значи дека повторно се работи за стоен бран, но кој е фазно поместен во однос на притисокот за $\pi/2$, како што е прикажано на [Сл. 2.15](#). Со тоа, брзината на воздушните честички ќе биде максимална на сите локации за кои $\sin kx = \sin \frac{2\pi}{\lambda}x = 1$. Овој услов е задоволен за $kx = -\pi/2, -3\pi/2, -5\pi/2, \dots$, односно за: $x = -\lambda/4, -3\lambda/4, -5\lambda/4, \dots$ Спротивно, за сите позиции за кои $\sin kx = \sin \frac{2\pi}{\lambda}x = 0$, а тие се: $kx = 0, -\pi, -2\pi, \dots$, односно $x = 0, -\lambda/2, -\lambda, \dots$ брзината на воздушните честички ќе биде 0, вклучително и на самата гранична површина каде тие и не можат да се движат.

Според (2.73), интензитетот на стојниот бран е:

$$J = pv \cos \varphi = pv \cos \frac{\pi}{2} = 0. \quad (2.127)$$

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 оној на граничната површина при појавата на стојни бранови. Ова



Слика 2.15: Стојни бранови на притисокот и брзината добиени на гранична површина со $Z_s \gg \rho c$. Притисокот и брзината се нормализирани со нивните максимални амплитуди: $p_n = \frac{p}{p_{\max}}$ и $v_n = \frac{v}{v_{\max}}$.

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.

Тотална рефлексија за $Z_s \ll \rho c$

Кога $Z_s \ll \rho c$, односно во отворен звуковод за $S' \gg S$, повторно имаме тотална рефлексија, но овој пат имаме инвертирање на фазата, па $r = -1$ а изразот за звучниот притисок се сведува на:

$$\begin{aligned} p &= A_+ (e^{j(\omega t-kx)} + \beta e^{j(\omega t+kx+\delta)}) = \\ &= A_+ [\cos(-kx) + j \sin(-kx) - \cos(kx) - j \sin(kx)] e^{j\omega t} = \\ &= A_+ (-j) \sin(kx) e^{j\omega t} = \\ &= 2A_+ \sin kx e^{j(\omega t-\frac{\pi}{2})}. \end{aligned} \quad (2.128)$$

За разлика од (2.125), амплитудата на звучниот притисок овој пат е максимална на сите локации за кои $\sin kx = \sin \frac{2\pi}{\lambda} x = 1$. Овој услов е задоволен за $kx = -\pi/2, -3\pi/2, -5\pi/2, \dots$, односно за: $x = -\lambda/4, -3\lambda/4, -5\lambda/4, \dots$ Спротивно, за сите позиции за кои $\sin kx = \sin \frac{2\pi}{\lambda} x = 0$, а тие се: $kx = 0, -\pi, -2\pi, \dots$, односно $x = 0, -\lambda/2, -\lambda, \dots$ амплитудата на притисокот на стојниот бран ќе биде 0.

За брзината на воздушните честички сега ќе имаме:

$$\begin{aligned} v &= \frac{A_+}{\rho c} [\cos(-kx) + j \sin(-kx) + \cos(kx) + j \sin(kx)] e^{j\omega t} = \\ &= 2 \frac{A_+}{\rho c} \cos kx e^{j\omega t}. \end{aligned} \quad (2.129)$$

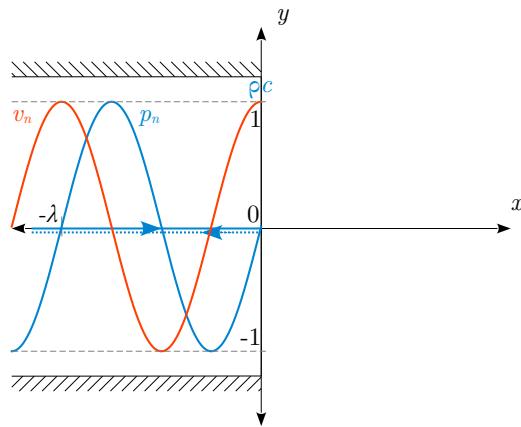
Таа ќе биде максимална за сите локации за кои $\cos kx = \cos \frac{2\pi}{\lambda} x = 1$. Овој услов е задоволен за $kx = 0, -\pi, -2\pi, -3\pi, \dots$, односно за: $x = 0, -\lambda/2, -\lambda, -3\lambda/2, \dots$ Спротивно, за сите позиции за кои $\cos kx = 0$, односно $x = -\lambda/4, -3\lambda/4, -5\lambda/4, \dots$ таа ќе биде 0.

Може да видиме дека на граничната површина за која важи $Z_s \ll \rho c$ максимум на стојниот бран ќе имаме за брзината на воздушните честички, додека стојниот бран на звучниот притисок е еднаков на 0, како што е прикажано за отворен звуковод на Сл. 2.16.

2.17 Симулација на стојни бранови

Практичен дел

За симулација на појавата на стојни бранови ќе се послужиме со програмскиот пакет Пајтон (види Додаток Б). Да го искористиме равенството (2.124) за да ја пресметаме вредноста на



Слика 2.16: Стојни бранови на притисокот и брзината добиени на гранична површина со $Z_a \ll \rho c$ – тута отворен звуковод. Притисокот и брзината се нормализирани со нивните максимални амплитуди: $p_n = \frac{p}{p_{\max}}$ и $v_n = \frac{v}{v_{\max}}$.

звукниот притисок на директен и рефлектиран бран во 1Д координатен систем кој е ограничен во интервалот $(-3\lambda, 0)$. Во истиот систем ќе ја пресметаме и сумата од двата брана, која поради тоталната рефлексија ќе биде стоен бран. Симулацијата ќе ја направиме во временски интервал од 5 s, а фреквенцијата на двата брана ќе ја поставиме на 0,5 Hz, за да можеме полесно да ја видиме промената на нивната амплитуда во време.

```

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

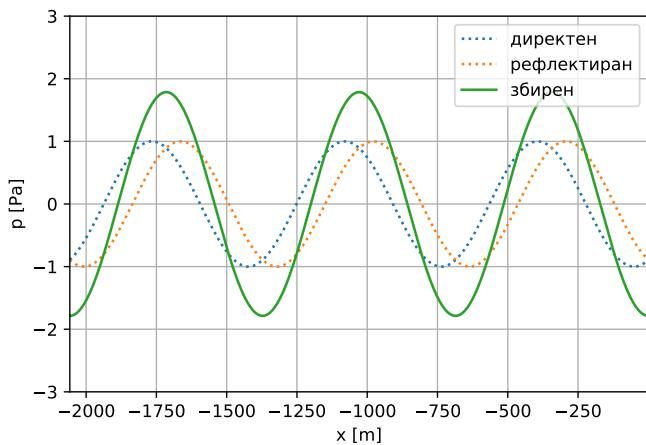
# %% иницијализации
f = .5 # Hz
c = 343 # m/s
lamda = c / f # m
k = 2*np.pi / lamda # m^-1
A_d = 1 # Pa
x = np.arange(-3*lamda, 0, 0.1) # m

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

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

```

На Сл. 2.17 е прикажан добиениот графикон. Од симулацијата може да видиме дека наистина



Слика 2.17: Симулација на појавата на стојни бранови при totalна рефлексија во 1Д координатен систем.

стојниот бран, кој се јавува како резултат од totalната рефлексија на директниот бран, не се движи долж x -оската иако неговата амплитуда се менува со текот на времето.³⁵

2.18 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 волуеми, 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 волуеми, 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:

$$J = J_0 e^{-mx}, \quad (2.130)$$

³⁵Забележете дека поради ниската фреквенција на бранот, т.е. големото λ растојанието се мери во стотици метри!

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:

$$J = J_0 \frac{r_0^2}{r^2} e^{-m(r-r_0)}, \quad (2.131)$$

или изразено преку притисокот:

$$p = p_0 \frac{r_0}{r} e^{-\frac{m(r-r_0)}{2}}. \quad (2.132)$$

Ако го пресметаме слабеењето во dB добиваме:

$$\Delta L = 10 \log \frac{J_0}{J} = 20 \log \frac{p_0}{p} = 20 \log \frac{r}{r_0} + 4,34m(r - r_0). \quad (2.133)$$

Првиот член ги опишува загубите поради ширењето на звукот, додека вториот го изразува слабеењето по единица должина. Вообичаено коефициентот $4,34m$ се изразува сумарно како дисипација изразена во dB/m . Може да се забележи дека првиот член внесува слабеење од 6 dB за секое удвоување на растојанието, додека вториот зависи линеарно од него. Така, за помали растојанија ќе доминира првиот член додека за поголеми вториот. Вредностите на m се такви што за дисипација во воздухот треба да се води сметка за фреквенции повисоки од 1000 Hz и растојанија над 100 m, ако влажноста на воздухот е околу 40%.

Поглавје 3

Музика и глас

Со создавањето и зрачењето на звукот кај музичките инструменти се занимава **музичката акустика**. Начинот на создавање на звукот се разликува кај различните видови на музички инструменти.³⁶ Човекот, исто така употребува различни начини на генерирање на звук за создавањето на низата на гласови кои го сочинуваат говорот. Со проучување на акустичките особини на овие гласови, како и начинот на нивното создавање, наречено **артикулација**, кај различните јазици се занимава **фонетиката**.

3.1 Музички инструменти

Музички инструмент е направа создадена или прилагодена за правење на музички звуци.³⁷ Во пракса, секој предмет кој може да создаде звук, може да биде искористен како музички инструмент. Историјата на музичките инструменти е врзана со почетоците на човекот. Инструментите биле употребувани како придружба на разни обреди, на пр. свирење на рог како сигнал за успешен лов, тапан за религиозни церемонии или гајда за лечење.³⁸ Со време човекот започнал да ги користи инструментите и за забава и уживање.

Најстариот пронајден инструмент е флејта направена од коска (фемур) на пештерска мечка откриена во Словенија, која е стара $43\ 100 \pm 100$ години.³⁹ Во Македонија, најстар пронајден инструмент е неолитската окарина направена од теракота, стара 6000 години, [Сл. 3.1.](#)⁴⁰ Најдена е во 1989 на локалитетот Чашка, близу Велес, Македонија. Окарината е целосно зачувана и на неа сеуште може да се свири.⁴¹

Поделба на музичките инструменти

Постојат навистина многу голем број на музичките инструменти во светот.⁴² За нивна категоризација најчесто се користи системот на Хорнбостел-Закс⁴³, предложен за првпат во 1914 г., а проширен со петата категорија во 1940 г.:

- **идиофони** – го произведуваат звукот преку вибрирање на телото на инструментот,
- **мембрanoфони** – го произведуваат звукот преку вибрација на оптегната мембрана,

³⁶ Интересна серија на предавања за акустиката на музичките инструменти е таа на Charles Taylor: Exploring music, The Royal Institution, 1989 <https://www.rigb.org/christmas-lectures/watch/1989/exploring-music>

³⁷ Wikipedia: Musical Instrument https://en.wikipedia.org/wiki/Musical_instrument

³⁸ Wikipedia: Ethnomusicology <https://en.wikipedia.org/wiki/Ethnomusicology>

³⁹ Wikipedia: Paleolithic flutes https://en.wikipedia.org/wiki/Paleolithic_flutes

⁴⁰ Македонски документи: Топчешта окарина <https://documents-mk.blogspot.com/2008/02/blog-post.html>

⁴¹ YouTube: Dragan Dautovski on OCARINA 6000 years old <https://www.youtube.com/watch?v=VAFhqthNJ-Y>

⁴² Една нецелосна листа може да најдете на страната – Wikipedia: List of musical instruments https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_musical_instruments

⁴³ Wikipedia: Hornbostel-Sachs <https://en.wikipedia.org/wiki/Hornbostel%E2%80%93Sachs>



Слика 3.1: Неолитската окарина од Велес стара 6000 год. од локалитетот „Мрамор” кај Чашка (Велес).

- **кордофони или жичани** – го произведуваат звукот преку вибрирање на една или повеќе жици;
- **аерофони или дувачки** – го произведуваат звукот преку вибрирање на воздушен столб,
- **електрофони** – го произведуваат звукот по електричен пат, како тереминот⁴⁴ и најразличните синтисајзери⁴⁵.

Музички тонови и музичките инструменти

Дел од музичките инструменти се направени да создаваат звук со периодична компонента. Основната фреквенција на оваа периодична компонента се нарекува и **музички тон**. Групите на музички тонови со строго дефиниран меѓусебен сооднос на фреквенции се нарекуваат **музички скали**. Некои соодноси се универзални за скалите во употреба од различните музички традиции. Тие кои можат да се опишат со целоброен сооднос на мали броеви звучат складно, односно се во **созвучје** или **консонанса**, нешто што за првпат го описал Питагора во VI век п.н.е. Попознати соодноси или **музички интервали** се:

- **октава** – однос од 2:1,
- **совршена квинта** – однос од 3:2,⁴⁶
- **голема терца** – однос од 5:4.

Спротивно на овие, интервалите кои соодветствуваат на целоброен сооднос од големи броеви како:

- **мала секунда** – однос од 16:15,

не се складни; појава која во музиката се нарекува **дисонанца**, односно **развучје**. Имињата на музичките интервали всушност доаѓаат од бројот на тонови кои тие ги содржат, имено октава = 8 тонови, квинта = 5, кварт = 4, терца = 3 и секунда = 2 тона.

Во западната темперирана музичка скала, интервалот од една октава е поделен на 12 еднакви полуостепени или полутонови [st].⁴⁷ Дополнително секој полуостепен е поделен на 100 центи: 1 st = 100 c. Полуостепените се рамномерно распоредени во логаритамската фреквенциска скала според формулата:

$$1 \text{ st} = \sqrt[12]{2} = 2^{\frac{1}{12}} \approx 1,059463. \quad (3.1)$$

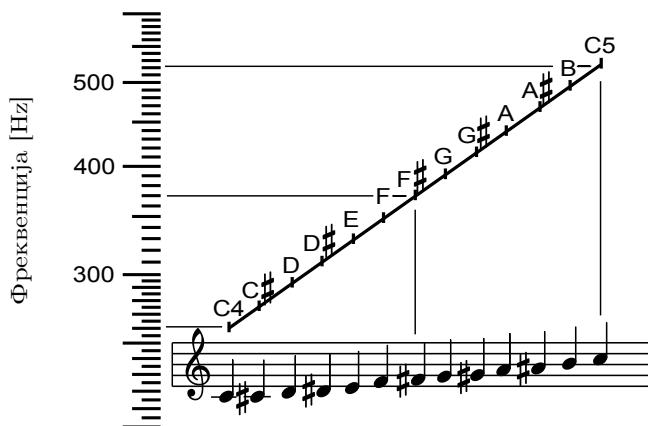
Во рамките на музичките скали, тоновите се означуваат преку дискретни симболи наречени и

⁴⁴YouTube: Leon Theremin playing his own instrument <https://www.youtube.com/watch?v=w5qf906c20o>

⁴⁵YouTube: Playing The Gummy Bear Song on gummy bears <https://www.youtube.com/watch?v=G6qVIxaDYDI>

⁴⁶Овој сооднос е во основата на Питагореевата музичка скала – Wikipedia: Pythagorean tuning https://en.wikipedia.org/wiki/Pythagorean_tuning

⁴⁷Wikipedia: Equal temperament https://en.wikipedia.org/wiki/Equal_temperament



Слика 3.2: Ноти, имиња и фреквенциите на 12^{te} полутонови во 4^{ta} октава на пијаното.⁵⁰

музички ноти.⁴⁸ Музичките ноти имаат различни имиња во различните музички традиции, при што тонови со фреквенции кои се разликуваат во сооднос од октава го носат истото име. Во западната музичка традиција, имињата на нотите се дефинирани според стандардната дијатонска скала, односно јонски модус, во кој полутонските интервали се максимално одвоени од целотонските, и кој може да се добие како низа од совршени квинти. Во употреба се неколку различни системи за именување на нотите⁴⁹:

- до - ре - ми - фа - сол - ла - си – солфеж именувањето е најзастапено во Европа и земјите кои зборуваат некој од романските јазици како: Италија, Португалија, Шпанија, Франција, Грција, Албанија, Бугарија, Турција, Русија и во Македонија,
- С - D - E - F - G - A - B – именувањето е застапено во земјите кои го зборуваат англискиот и холандскиот јазик, и
- С - D - E - F - G - A - H – во Германија, кое се користи и кај нас, а во кое тонот си се пишува како H додека неговата снижена верзија се означува со B,
- па - ву - га - ди - ке - зо - ни – византиска нотација, на грчки πα - βου - γα - δι - χε - ζω - νη, која кај нас се употребува во византиското црковно пеење.

Растојанијата во степени помеѓу тоновите во дијатонската C dur скала се: C – D – E F – G – A – B C, каде со „–“ е означен празен полустепен. Така, помеѓу C и D има 2 полустепени (1 цел степен), додека помеѓу E и F има 1 полустепен. Поради ова, терцата може да биде голема од 4 st, или мала од 3 st. Слично, разликуваме голема секунда = 2 st и мала секунда = 1 st.

Дополнително, кај латиничната нотација, може да се допише октавата во која се наоѓаат според октавите на стандардното пијано со клавијатура од 88 клавиши, на која овие „основни“ тонови се со бела боја. Така, со C₄ се означува тонот C од четвртата октава, кој е и средниот тон C на клавијатурата, а со C₅ се означува тонот C една октава повисоко. Првиот клавиш на клавијатурата на пијаното е A₀ со фреквенција од 27,5 Hz, од кого и започнува бележењето на белите клавиши со буквите на латиницата: A, B, C, D, E, F и G. Највисокиот клавиш на клавирот е C₈ со фреквенција од 4186,009 Hz. Овие основни тонови можат да бидат повишени ♯ или снижени ♭ за еден полустепен, па така имаме C♯ = D♭, односно E♯ = F♭ и F♯ = E. Клавишите за овие тонови се со црна боја на пијаното.

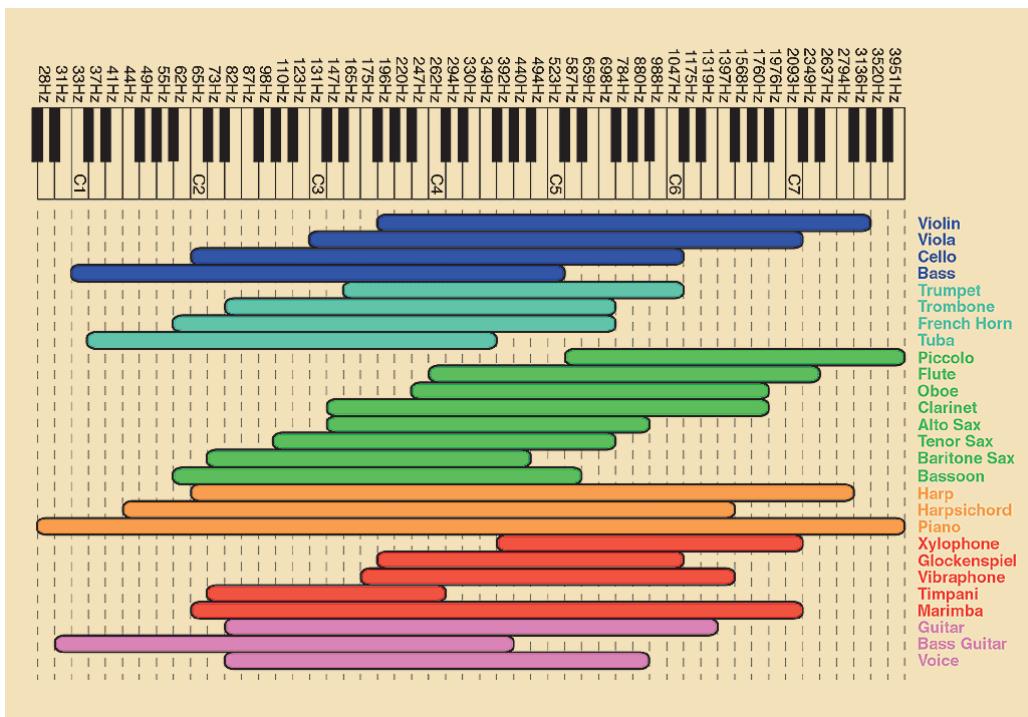
За да се пресмета фреквенцијата на било кој тон T_n може да се употреби равенството:

$$T_n = T_r \sqrt[12]{2}^{(n-r)}, \quad (3.2)$$

⁴⁸Во западната музика, нотите во петолинието дополнително го означуваат дискретизираното времетраење на музичките тонови.

⁴⁹Wikipedia: Musical note https://en.wikipedia.org/wiki/Musical_note

⁵⁰Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24694295>



Слика 3.3: Опсег на музичките тонови кои можат да бидат создадени со инструментите од западниот симфониски оркестар во споредба со тоновите на пијаното.⁵¹

каде T_r е фреквенцијата на познат референтен тон, а n и r се редните броеви на клавишите на двета тона. Најчесто, како референтен тон се зема А₄ која е 49^{ta} на клавијатурата и се штима на 440 Hz, традиционално со помош на звучна вилушка, види Поглавје 1. Така, фреквенцијата на тонот С₄ кој е 40^{ot} клавиш, може да се пресмета како:

$$T_{40} = 440 \sqrt[12]{2}^{(40-49)} \approx 261,626 \text{ Hz} \quad (3.3)$$

Ова равенство ќе го искористиме во Практичниот дел 5.5 за да ги проучиме феномените на консонанса и дисонанса во областа психоакустика обработена во Поглавјето 5. Нотниот запис, латиничните имиња и фреквенциите на 12^{te} полутонови кои ја сочинуваат хроматската скала во 4^{ta} октава на пијаното, се прикажани на Сл. 3.2.

Опсегот на музички тонови кој може да се создаде со инструментите од западниот симфониски оркестар се дадени на Сл. 3.3.

Стојни бранови кај музичките инструменти

Појавата на стојни бранови дискутирана во Поглавјето 2.16 е основниот принцип на работа на речиси сите музички инструменти, како и на човековиот говорен апарат. Комплексноста на овој феномен зависи од димензионалноста на резонаторот. Така, кај жичаните и дувачките инструменти резонаторот може да се апроксимира со еднодимензионален систем, кај мембрanoфоните и дел од идиофоните станува збор за систем со две димензии, додека кај некои идиофони, како и за просториите – види Поглавје 6.1, системот на резонирање е три-димензионален.

Жичани инструменти

Кај жичаните инструменти, жицата е прицврстена на двета краја на телото на инструментот, што значи дека таа не може да се движи во овие гранични точки поради простирање на звучен бран во неа. Поради тоа, овој систем може да го апроксимираме со звуковод затворен со

⁵¹http://4.bp.blogspot.com/_GD7kgG_0bkc/S7v43QQ9BEI/AAAAAAAATc/UeGyoixvjc/s1600/EQ2.gif

акустичка импеданса $Z_s = \infty$ односно $Z_s \gg \rho c'$, каде c' е брзината на простирањето на звукот во жицата. Во тој случај стојните бранови на звучниот притисок и брзината на поместување на жицата ќе бидат дадени со равенствата (2.125) и (2.126) :

$$\begin{aligned} p &= 2p_+ \cos kxe^{j\omega t}, \\ v &= 2\frac{p_+}{\rho c} \sin kxe^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})}. \end{aligned}$$

Може да видиме дека на крајот на овој еднодимензионален систем брзината на воздушните честички v е 0. Ако поставиме сега уште една гранична површина на растојание $-l_x$, брзината на воздушните честички и таму треба да биде 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 затворен од двете страни:

$$v = 2\frac{p_+}{\rho c} \sin k(-l_x)e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})} = 0, \quad (3.4)$$

$$\sin kl_x = 0, \quad (3.5)$$

$$kl_x = n\pi, \quad n \in \mathbb{N}, \quad (3.6)$$

$$k = \frac{\pi}{\frac{l_x}{n}}, \quad (3.7)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_n} = \frac{\pi}{\frac{l_x}{n}} \rightarrow \lambda_n = \frac{2l_x}{n}, \quad (3.8)$$

$$\frac{2c}{\lambda_n} = \frac{c}{\frac{l_x}{n}} \rightarrow f_n = n \frac{c}{2l_x}. \quad (3.9)$$

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 мултиплри 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 мултиплри се нарекуваат виши хармоници.⁵²

Кај жичаните инструменти, поради тоа што краевите на жицата не можат да се движат, имаме речиси целосна аналогија со разгледуваниот звуковод затворен на двета краја $x = 0$ и $x = -l_x$, со тоа што во овој случај станува збор за простирање на звучниот бран во цврста средина па тој ќе се манифестира како трансверзален – односно жицата ќе трепери во насока нормална на простирањето на бранот. Исто така, брзината на движење на звучниот бран c' ќе биде различна од c во воздухот, а ќе зависи од подолжната густина (масата по единица должина) μ и силата на затегање на жицата F со $c' = \sqrt{F/\mu}$, според законите на Мерсен.⁵³ Со тоа, фреквенциите на кои ќе се создадат стојни бранови во неа, според (3.27), ќе бидат одредени со:

$$\lambda_1 = 2l_x \rightarrow f_1 = \frac{c'}{\lambda_1} = \frac{c'}{2l_x}, \quad (3.10)$$

$$\lambda_2 = l_x \rightarrow f_2 = \frac{c'}{\lambda_2} = 2 \frac{c'}{2l_x} = 2f_1, \quad (3.11)$$

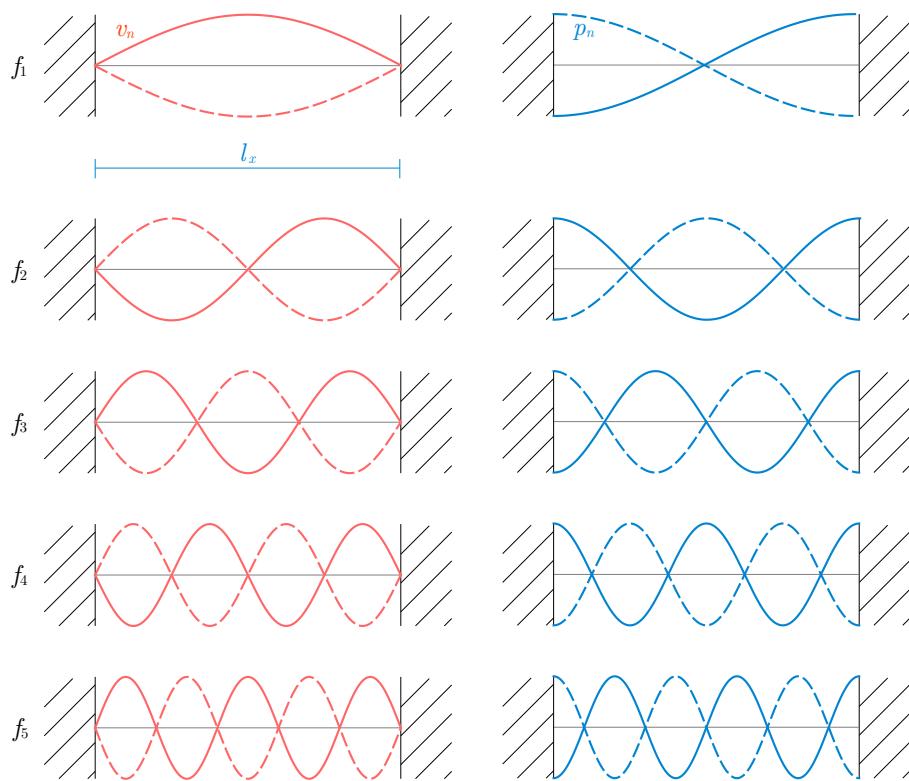
$$\lambda_3 = \frac{2l_x}{3} \rightarrow f_3 = \frac{c'}{\lambda_3} = 3 \frac{c'}{2l_x} = 3f_1, \quad (3.12)$$

$$\dots \quad \dots \quad (3.13)$$

$$\lambda_n = \frac{2l_x}{n} \rightarrow f_n = \frac{c'}{\lambda_n} = n \frac{c'}{2l_x} = nf_1 \quad n \in \mathbb{N}. \quad (3.14)$$

⁵²Понекогаш основниот хармоник се нарекува и нулти хармоник и се бележи и со f_0 како што направивме во Поглавјето 1 или со F_0 .

⁵³Wikipedia: Mersenne's laws https://en.wikipedia.org/wiki/Mersenne%27s_laws



Слика 3.4: Резонантни фреквенции на жица од основниот (најгоре) па сè до петтиот хармоник (најдолу).

При штимањето, основниот тон на секоја од жиците се нагодува со регулирање на нивната затегнатост. Потоа, при свирењето, музичкиот тон се одредува со промена на должината на жицата која ќе биде побудена да вибрира.

Може да забележиме дека кај музичките интервали за кои рековме дека се складни односно тоновите се во созвучје, всушност се природно присутни во спектарот генериран од хармониските резонатори, музичките инструменти и човековиот глас. Овие фреквенции се прикажани на сликата Сл. 3.4. Така, ако побудиме жица чиј основен хармоник е со фреквенција од 261,626 Hz која соодветствува на музичкиот тон C₄, тогаш таа ќе ги произведе истовремено и музичките тонови: C₅ – октава, G₅ – квинта (модуло октава), C₆ и E₆ – голема терца (модуло октава).

Треба да кажеме дека во реалноста вибрациите на жицата не се целосно рефлектиирани од кобилицата, односно гребенот или мостот, туку преку него се пренесуваат на телото на жичаниот инструмент кое има функција како резонатор да ги засили и одржи. Вибрациите од телото се пренесуваат и назад на жиците, со што не само што ќе биде одржана вибрацијата на отсвирената жица, туку и ќе бидат побудени сите жици кои вибрираат на основниот хармоник f_1 или на некој од вишите хармоници f_n .⁵⁴

Без преносот на вибрации на телото, звукот кој го создаваат самите жици е тивок и брзо ќе исчезне, како што може да се забележи кај електричните жичани инструменти, на пр. електричната гитара или виолина, кај кои вибрациите на жиците се фаќаат со низа на калеми, наречена и пикап, па се носат на електричен засилувач и звучник, за да можеме да ги чуеме.

⁵⁴The University of New South Wales – Music Acoustics: Strings, standing waves and harmonics <https://newt.phys.unsw.edu.au/jw/strings.html>.

✓ **Задача за дома.** Ефектот на пренос на вибрациите од една жица на друга, може да го видиме кај гитарата. Жиците на гитарата можат да бидат наштимани на различни начини, но преовладува стандардниот штим по кој жиците се наштимани на тоновите (од шестата најдебела, до првата најтенка): E_2 , A_2 , D_3 , G_3 , B_3 и E_4 . Кога ќе се побуди најдебелата, шеста жица, која се штима на тонот E_2 . Таа, преку кобилицата ќе ја стави во вибрација и втората најтенка жица од долу која се штима на тонот B_3 , кој пак има фреквенција три пати поголема од таа на тонот E_2 и е дел од вишите хармоници, односно е втор хармоник, на овој тон. Теоретски би требало да биде побудена и најтенката прва жица која се штима на тонот E_4 , но побудата е мала и едвај забележлива. Посилна побуда на првата жица може да добиеме ако го отсвириме тонот E_3 на вториот праг (полустепен) од четвртата жица од долу, која пак се штима на тонот D_3 .

Дувачки инструменти

Од аспект на појавата на стојните бранови во воздушниот столб на дувачките инструменти разликуваме два типа на инструменти:⁵⁵

- отворени на двета краја, како: флејта, кавал, шупелка итн. и
- затворени на едниот крај, како: кларинет, саксофон, дудук итн.

Отворени дувачки инструменти. Кај инструментите отворени од двета краја важи аналогијата на звуковод со отворен крај анализирана во [Поглавјето 2.16](#) опишана со равенствата (3.15) и (2.129):

$$p = 2p_+ \sin kx e^{j\omega t - \frac{\pi}{2}},$$

$$v = 2 \frac{p_+}{\rho c} \cos kx e^{j(\omega t)}.$$

Звучниот притисок на граничната површина е 0, додека брзината на воздушните честички е максимална.

Ако сега го отвориме звуководот и на другиот крај на растојание $-l_x$, звучниот притисок и таму треба да биде 0. Од овој услов, аналогно на (3.9), можеме да ги одредиме резонантните фреквенции f_n за кои ќе се јават стојни бранови во звуковод со должина l_x отворен од двете страни:

$$p = 2p_+ \sin k(-l_x) e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})} = 0, \quad (3.15)$$

$$\frac{2c}{\lambda_n} = \frac{c}{\frac{l_x}{n}} \quad n \in \mathbb{N}, \quad (3.16)$$

$$f_n = n \frac{c}{2l_x}. \quad (3.17)$$

Па, повторно, потполно аналогно со (3.14), за фреквенциите на кои ќе се создадат стојни бранови во овој воздушен столб ќе имаме:

$$\lambda_1 = 2l_x \rightarrow f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{c}{2l_x}, \quad (3.18)$$

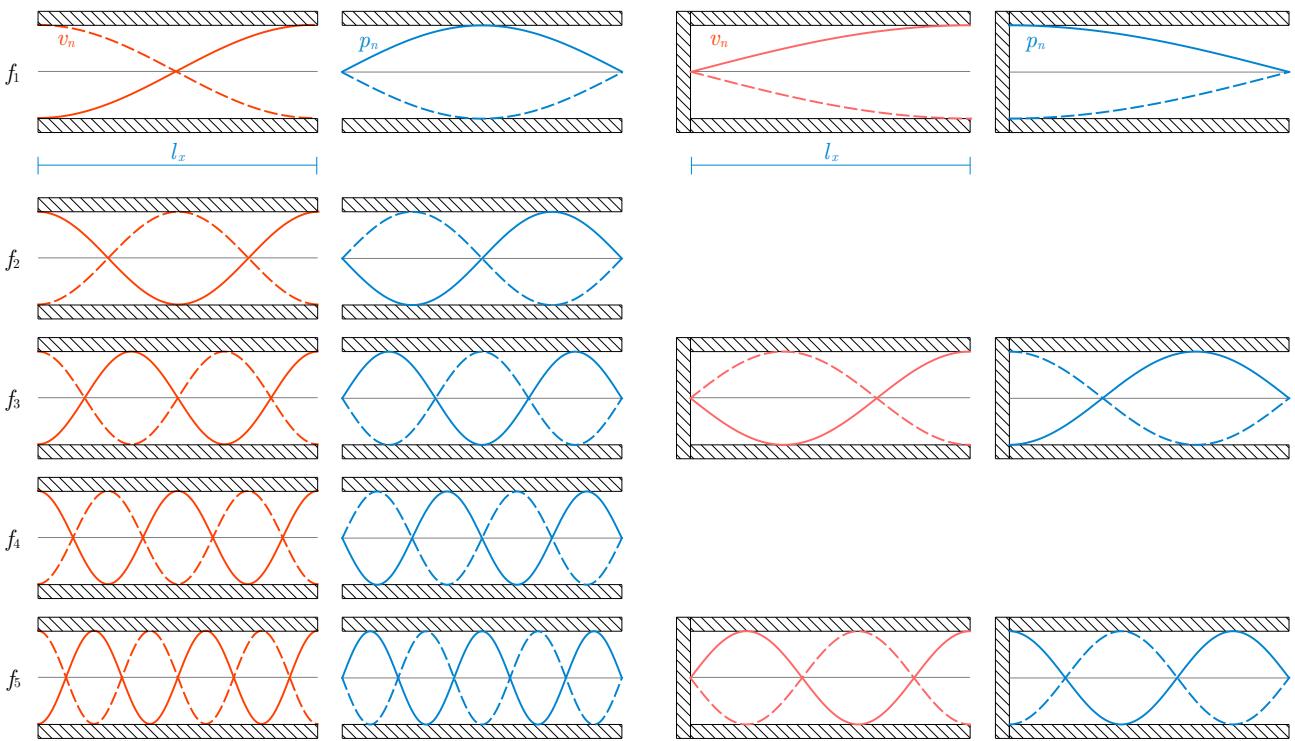
$$\lambda_2 = l_x \rightarrow f_2 = \frac{c}{\lambda_2} = 2 \frac{c}{2l_x} = 2f_1, \quad (3.19)$$

$$\lambda_3 = \frac{3l_x}{3} \rightarrow f_3 = \frac{c}{\lambda_3} = 3 \frac{c}{2l_x} = 3f_1, \quad (3.20)$$

$$\dots \quad \dots \quad (3.21)$$

$$\lambda_n = \frac{2l_x}{n} \rightarrow f_n = 2 \frac{c}{\lambda_n} = n \frac{c}{2l_x} = nf_1 \quad n \in \mathbb{N}, \quad (3.22)$$

⁵⁵The University of New South Wales – Open vs Closed pipes (Flutes vs Clarinets) <http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/flutes.v.clarinets.html>



Слика 3.5: Резонантни фреквенции на дувачки инструмент со отворени краеви (лево) и еден затворен край (десно) од нултиот (најгоре) па сè до петтиот хармоник (најдолу).

со таа разлика што брзината на звукот во овој случај ќе биде еднаква на таа во воздухот. Овие фреквенции се прикажани на сликата Сл. 3.5.

Затворени дувачки инструменти. Каде овие инструменти звучниот притисок на граничната површина е 0, а на другиот крај на растојание $-l_x$ тој е максимален. Спротивно, брзината на воздушните честички на граничната површина е максимална, а на другиот крај на растојание $-l_x$ таа е 0. Од вториот услов, аналогно на (3.9), можеме да ги одредиме резонантните фреквенции f_n за кои ќе се јават стојни бранови во звуковод со должина l_x затворен од едната страна:

$$v = 2 \frac{p_+}{\rho c} \cos k(-l_x) e^{j\omega t} = 0, \quad (3.23)$$

$$\cos kl_x = 0, \quad (3.24)$$

$$kl_x = n \frac{\pi}{2}, \quad n \in \{1, 3, 5, \dots, 2m + 1\}, m \in \mathbb{N}, \quad (3.25)$$

$$k = \frac{\pi}{2l_x}, \quad (3.26)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_n} = \frac{\pi}{2l_x} \rightarrow \lambda_n = \frac{2l_x}{n}, \quad (3.27)$$

$$\frac{2c}{\lambda_n} = \frac{c}{2l_x} \rightarrow f_n = n \frac{c}{2l_x}. \quad (3.28)$$

Од тука, сега, за разлика од (3.22), за фреквенциите на кои ќе се создадат стојни бранови во овој воздушен столб ќе имаме:

$$\lambda_1 = 2l_x \rightarrow f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{c}{2l_x} , \quad (3.29)$$

$$\lambda_3 = \frac{2l_x}{3} \rightarrow f_3 = \frac{c}{\lambda_3} = 3 \frac{c}{2l_x} = 3f_1 , \quad (3.30)$$

$$\dots \quad \dots \quad (3.31)$$

$$\lambda_n = \frac{2l_x}{n} \rightarrow f_n = \frac{c}{\lambda_n} = n \frac{c}{2l_x} = nf_1 \quad n \in \{1, 3, 5, \dots, 2m + 1\}, m \in \mathbb{N} . \quad (3.32)$$

Може да видиме дека дувачките инструменти со еден затворен крај можат да постигнат двојно понизок музички тон за дадена должина на воздушниот столб l_x . Уште позначајно за бојата на нивниот звук е тоа што во нивниот спектар не постојат парните хармоници, како што може да се види на Сл. 3.5.

Свирење Промената на должината на воздушниот столб l_x се прави со отворање и затворање на отворите на инструментот или директно со прстите на свирачот, како кај народните инструменти, или индиректно преку разни полуѓи и механизми, како кај некои од дупките кај дувачките инструменти од симфонискиот оркестар. Ова е речиси целосно точно за ниските тонови на инструментот, односно дупките кои се одалечени од свирачот. Кај високите тонови, немаме целосна рефлексија па воздушниот столб. Така, иако има пертурбација на местото на отворената дупка, ефективна должина на воздушниот столб продолжува понатаму долж инструментот. Поради овој феномен, во свирењето, т.н. прстомет, се употребуваат техники на нередоследно отворање на погорните дупки со кои се добиваат тонови од хроматската скала, т.е. полустепени, кои не можат да бидат отсвирени со редоследно отворање на дупките на инструментот. Исто така, со помош на специјализирани дупки може да се наметне јазол во вибрациите на воздушниот столб, со што може да се оневозможи резонанција на основниот хармоник, односно да се изврши селекција на еден од горните хармоници, а со тоа да се изврши промена на регистарот. Така, ако отворите дупка на половина од должината на воздушниот столб, тогаш наместо да се создадат осцилации на основниот хармоник ќе биде генериран вториот хармоник повисок за една октава.⁵⁶

Брзината на звукот е клучна во одредувањето на точната фреквенција на основниот тон. Во Поглавјето 2.4 видовме дека таа зависи од температурата на воздухот. Поради тоа, за компензација на температурните промени, кај најголем дел од дувачките инструменти постои мал простор за штимање. Тоа најчесто се изведува преку мало извлекување или вовлекување на деловите од дувачките инструменти кои го прават воздушниот столб, на пр. кај кларинетот тоа се прави со поместување на буренцето (краткиот дел пред делот кој ја држи писката, наречен пифла), кај саксофонот со поместување на пифлата, кај блех инструментите како трубата тоа се прави со поместување на устникот итн.⁵⁷ Од друга страна, кај дувачките инструменти кои не можат да се штимаат, на пр. кавалот, единствен начин да се постигне посакуваната висина на тонот е преку нивно доведување до собна температура пред настап.

Мембрanoфони и идиофони

Кај мембрanoфоните и идиофоните инструменти станува збор за посложен дводимензионален, односно тридимензионален систем во кој што се воспоставуваат стоечките бранови. Кај нив освен т.н. аксијални модови, односно резонантни фреквенции, се јавуваат и површински, па и просторни модови. Поради ова, во зависност од обликот на мембраната, односно 3Д структурата на идиофоните и нивниот состав, можат да се јават една или повеќе основни

⁵⁶The University of New South Wales – Flute acoustics: an introduction to how a flute works <http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/fluteacoustics.html>

⁵⁷Кај гајдата можно е штимање на најнискиот тон – последната дупка од гајдарката е обложена со восок кој вообично треба да се прилагоди пред настап.

хармоници, за разлика од поедноставните еднодимензионални системи. Анализата на вакви повеќедимензионални системи е аналогна на горенаправената анализа со тоа што истата треба да се направи со 3Д формата на брановата равенка (6.7). Ваква анализа за музичките инструменти е надвор од доменот на оваа книга, но на анализата на модови во 3Д ќе се вратиме во Поглавјето 6 кога ќе ги анализираме стојните бранови кои се јавуваат во просторија со паралелопипеден облик.⁵⁸

3.2 Човечки глас и говор

Човековиот говор се реализира како низа на гласови произведени од говорниот апарат, секој со различен и специфичен временско-спектрален отпечаток, односно временска и спектрална карактеристика. Поради неговата динамика, за анализа на звучните бранови на говорот вообичаено се користат осцилограмот и спектrogramот. Стандардно употребуван софтвер за фонетски анализи и истражувања е слободниот софтвер Praat.⁵⁹

На Сл. 3.6 е претставен пример говорен сигнал добиен со изговарање на исказот: „Тој секој ден трча на врв на Водно.“ Може да видиме дека говорниот сигнал е составен од непрекината низа на зборови од кои секој е составен од непрекината низа на гласови. Исто така, можеме да забележиме дека некои од гласовите се изразено периодични, односно имаат паралелни линии во спектrogramот, други се апериодични со исклучиво шумна компонента, а трети се од мешан тип. Најнискиот, основен хармоник, кај гласовите со периодична компонента, соодветствува на **висината** на гласот. Промените на висината на гласот во текот на времето се нарекуваат **интонација**. Нив можеме да ги видиме ако го исцртаме делот од спектrogramот одблиску како на сликата.

Создавање на човековиот глас

Кај човекот, звучните бранови се произведуваат во **говорниот апарат**, односно **вокалниот тракт** прикажан на Сл. 3.7. Движечка сила на овој процес се дијафрагмата и интеркосталните мускули на градниот кош со чија контракција во белите дробови се создава воздушен притисок, односно струење на воздухот, кое делува како побуда на вокалниот тракт.

Користејќи го овој притисок, човекот генерира звучни бранови преку употреба на:

1. **гласилките** – за создавање на сложени периодични звучни бранови, и
2. **прегради** – за создавање на апериодични звучни бранови.

Притоа, под прегради подразбираме големи стеснувања кои предизвикуваат турбуленции или шум во воздушната струја, или нејзин потполен прекин. Според тоа дали гласовите се генериирани со употреба на гласилките, разликуваме два типа на гласови:

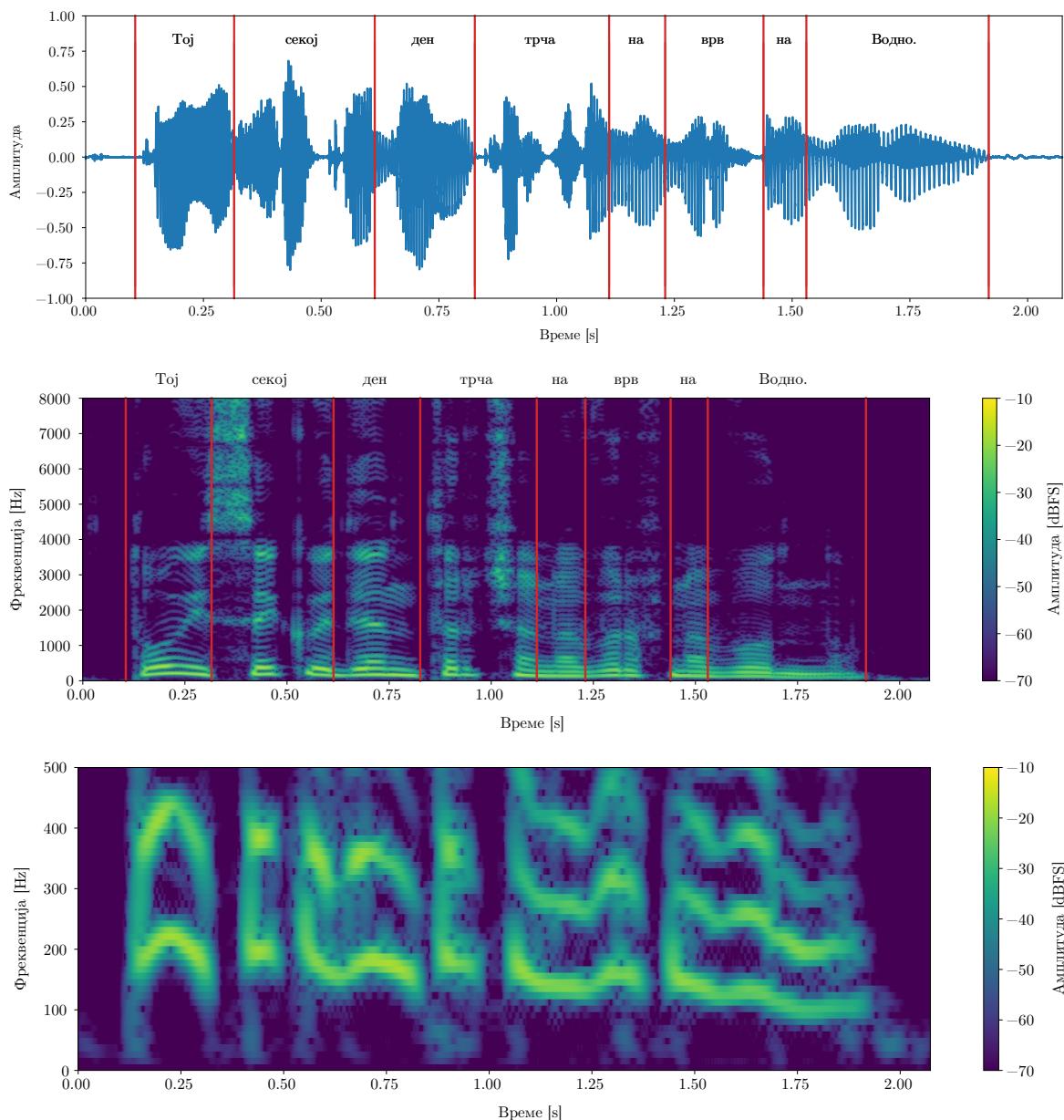
- **звукни** гласови – добиени со употреба на гласилките, и
- **беззвучни** гласови – добиени без нивна употреба.

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

- **самогласки** – добиени без преграда, туку само со употреба на гласилките, и
- **согласки** – добиени со употреба на преграда.

⁵⁸Обликот на стојните бранови кај дводимензионална мембра на може да се визуелизира со помош на плоча, гудало и сол Demonstrating Resonance with Chladni Figures - Christmas Lectures with Charles Taylor <https://www.youtube.com/watch?v=OLNFrXgMJ6E> или пак звучник на кој се прицврствува мембрата, функционски генератор за избор на фреквенција со која ќе се побуди звучникот и сол, вода, орган или струја Cymatics: Science vs. Music - Nigel Stanford <https://www.youtube.com/watch?v=Q3oItpVa9fs> Фигурите кои се создаваат за резонантните фреквенции ги прикажуваат јазовите кои се јавуваат за резонантните фреквенции.

⁵⁹Praat: doing phonetics by computer <https://www.fon.hum.uva.nl/praat/>

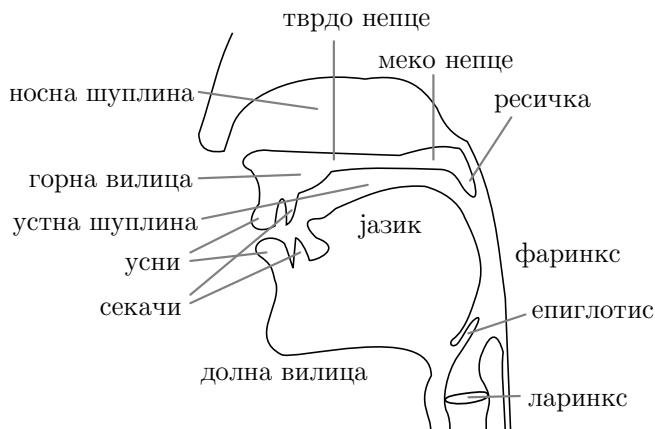


Слика 3.6: Осцилограм (горе), спектрограм (средина) и интонација (долу) на исказот: „Тој секој ден трча на врв на Водно.“

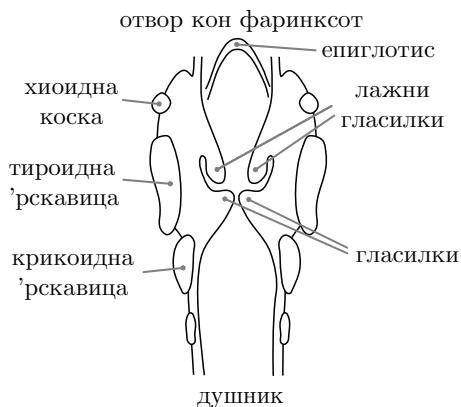
Освен самогласките, во звучни гласови спаѓаат и звучните согласки, кај кои освен активирањето на гласилките, исто така постои и преграда на вокалниот тракт како и кај беззвучните гласови. Преградите кај согласките можат да бидат од различен степен. Така, разликуваме гласови со целосни прегради, со изразени стеснувања и со помали стеснувања. Согласките кај кои стеснувањата не се изразени, немаат нагласена апериодична компонента и се нарекуваат и сонанти.

Науката која се занимава со акустичките карактеристики на гласовите се вика [фонетика](#). Како стандард за запишување на гласовите се употребува [Меѓународната фонетска азбука \(ИПА\)](#)⁶⁰. Таа вклучува симболи за запишување на сите варијации во изговорот на гласовите на сите светски јазици. Фонетската транскрипција направена со ИПА вообично се пишува со „/“. Така, изговорот на зборот „македонски“ во ИПА се транскрибира како /makedonski/.

⁶⁰ Wikipedia: International Phonetic Alphabet (IPA) https://en.wikipedia.org/wiki/International_Phonetic_Alphabet



Слика 3.7: Вокален тракт на човекот со артикулаторите.



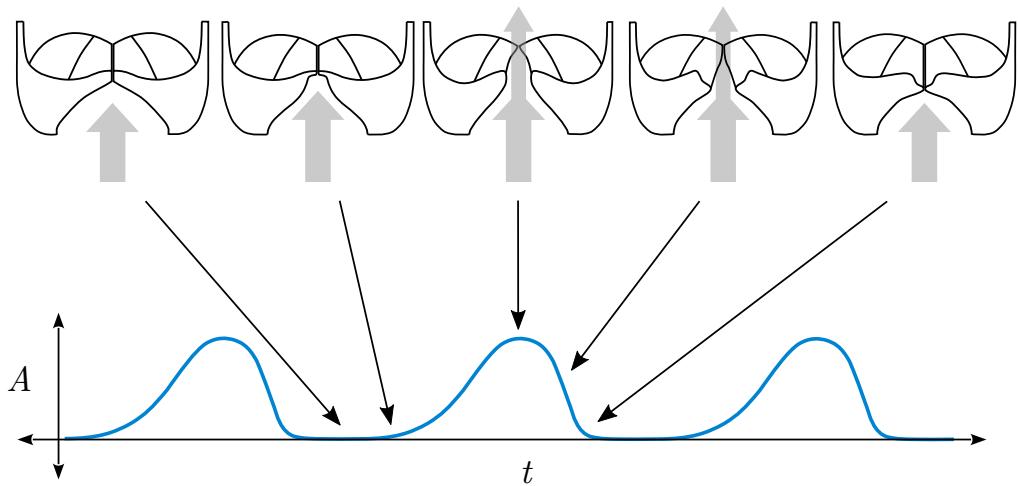
Слика 3.8: Поставеност на гласилките во напречниот пресек на гркланот.

Генерирање на звук со гласилките

Гласилките претставуваат пар еластични меки ткива поставени едно наспроти друго во гркланот, односно **ларинксот** на човекот, прикажани на Сл. 3.8. Под дејство на интеракцијата на нивната затегнатост, која се контролира со мускули внатре во гласилките и во ларинксот, и притисокот на воздухот од белите дробови, гласилките периодично се отвораат и затвораат. Со тоа тие вршат периодично модулирање на воздушната струја низ горниот, супраглотален, вокален тракт. Periodата на оваа модулација ја дава основната фреквенција, односно основниот хармоник, или **висината** на човековиот глас.

Процесот на треперење на гласилките започнува со нивно затворање поради активација на мускулите во ларинксот, како што е прикажано на Сл. 3.9. Во оваа нивна првична позиција доаѓа до зголемување на воздушниот притисок во белите дробови поради релаксација на дијафрагмата и надворешните интеркостални мускули на градниот кош, како и со дополнителна волева контракција на стомачните и внатрешните интеркостални мускули. Овој притисок, кој се нарекува и субглотален притисок, предизвикува постепено отворање на затворените гласилки и воспоставување на проток на воздух низ гркланот и вокалниот тракт. Како гласилките се отвораат сè повеќе и повеќе, така се зголемува протокот на воздух. Поради ова, а според Бернулиевиот принцип⁶¹, се намалува страничниот притисок на воздушниот столб кој ги држи гласилките отворени, па нивната затегнатост предизвикува нивно брзо затворање и прекин во протокот на воздух. По ова, субглоталниот притисок повторно расте и процесот се повторува, а бројот на повторувања во секунда ја определува основната фреквенција на човековиот глас.

⁶¹ Во динамика на флуидите, Бернулиевиот принцип вели дека зголемувањето на брзината на флуидот се случува истовремено со намалувањето на притисокот или намалувањето на потенцијалната енергија на флуидот. Принципот е наречен по Даниел Бернули кој го објавил во неговата книга Хидродинамика во 1738 г. Википедија: Бернулиев принцип https://mk.wikipedia.org/wiki/Бернулиев_принцип



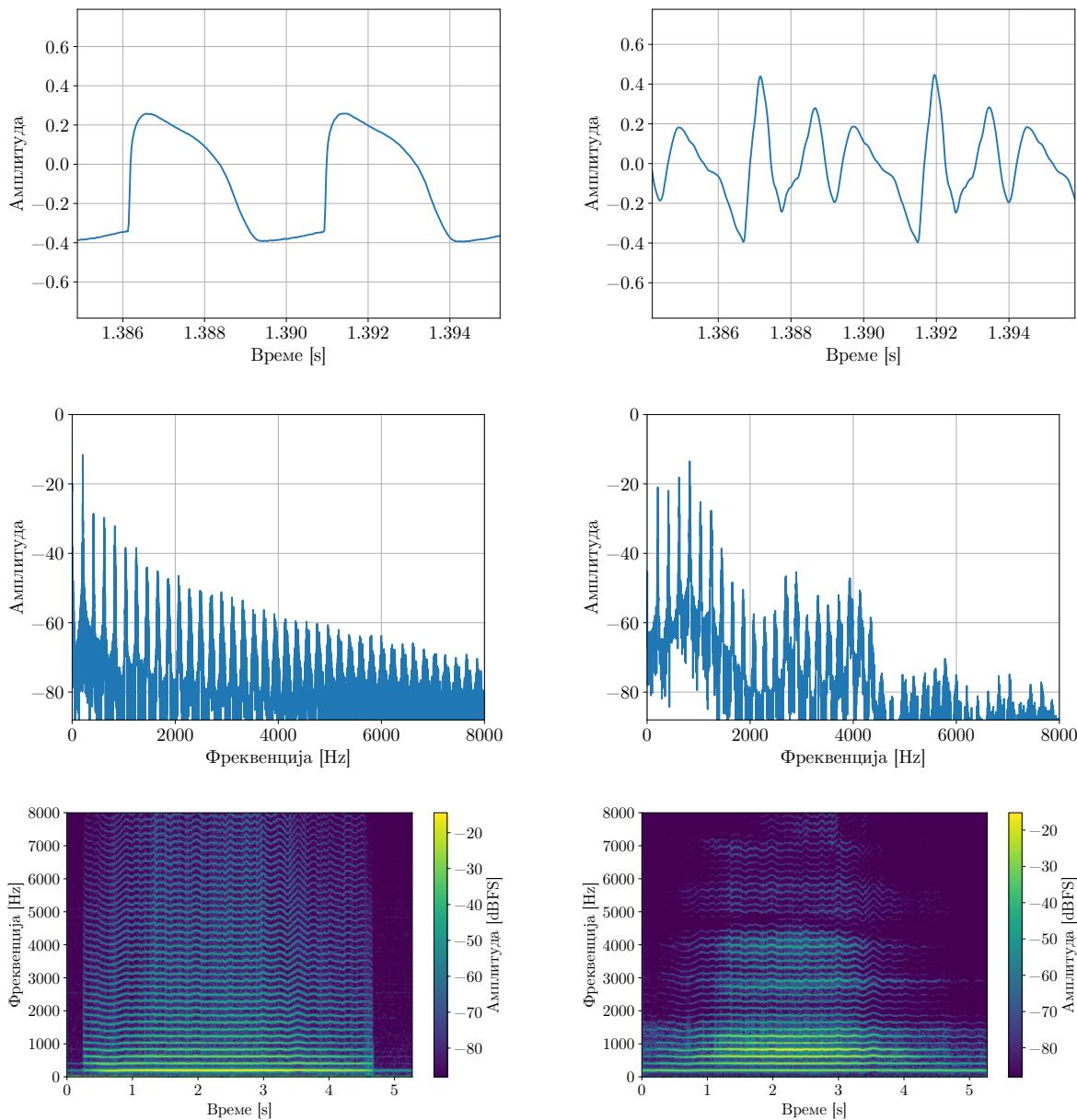
Слика 3.9: Отворање и затворање на гласилките за време на една периода.

Отворањето и затворањето на гласилките може да биде регистрирано со помош на Електрографот (ЕГГ), што претставува апарат за мерење на електричната проводност низ грканот со помош на две површински електроди. Отпорноста е помала кога гласилките се затворени, а е поголема кога тие се отворени. Осцилограмот на ЕГГ сигналот е прикажан на Сл. 3.10. Можеме да видиме дека тој е огледално симетричен на протокот на воздух низ грканот прикажан на Сл. 3.9. Поради ова спектарот на овој сигнал може да се искористи за апроксимација на спектарот на звучниот бран создаден од треперењето на гласилките. На Сл. 3.10 можеме да видиме дека тој се состои од збир на простопериодични компоненти, односно основен и виши хармоници. Исто така, може да се забележи дека амплитудата на вишите хармоници опаѓа рамномерно за повисоките фреквенции, односно нема опсези на фреквенции со помалку или повеќе изразена енергија.

Вообличувањето на спектарот на звукот на гласилките се врши во вокалниот тракт. Формата на вокалниот апарат, која човекот ја контролира преку позиционирање на артикулаторите, како јазикот, вилицата, мекото непце и усните, претставува акустички систем кој има резонанција на одредени фреквенции, засилувајќи ги за сметка на другите. Со тоа, тој го обликува рамномерниот спектар на звукот создаден со гласилките, давајќи му боја, односно фонетски карактер. Резонантните фреквенции на вокалниот тракт, а со тоа и неговата преносна карактеристика, можат да бидат пресметани преку апроксимирање на воздушниот простор на вокалниот тракт како низа од цилиндри, т.е. звуководи, на чиишто споеви се јавува рефлексија според анализата во Поглавјето 2.14. На овој принцип работи софтверот за симулација на вокалниот тракт VocalTractLab прикажан на Сл. 3.11.⁶²

Резонантни фреквенции на вокалниот тракт кај самогласките се нарекуваат и **форманти**. Зголеменото отворање на усната празнина предизвикува зголемување на фреквенцијата на првиот формант, додека пак вториот формант е повисок при преместување на местото на резонанција напред во усната празнина. Исто така, продолжувањето на должината на вокалниот тракт со издавање на усните, односно лабијализација, како кај /u/ и /o/ ја снижува фреквенцијата на вториот формант. Позицијата на формантите во спектарот на говорниот сигнал е всушност она што ни кажува за која самогласка се работи. Тоа може да се забележи во фреквенциската распределба на формантите кај петте македонски самогласки дадена во Табелата 3.1 и на Сл. 3.12.

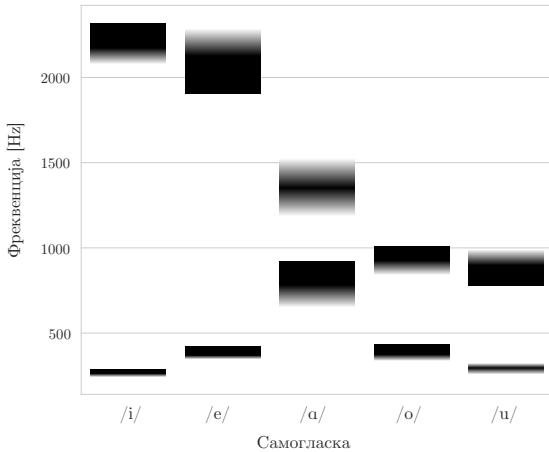
⁶²VocalTractLab: Towards high-quality articulatory speech synthesis <https://www.vocaltractlab.de/>



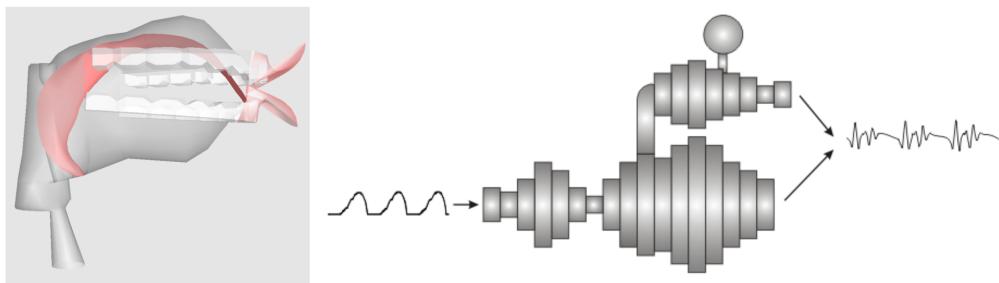
Слика 3.10: Временски облик (горе), амплитуден спектар (средина) и спектрограм (долу) на ЕГГ сигналот од гласилките (лева колона) и излезниот звучен сигнал – гласот /а/ (десна колона).

Табела 3.1: Средни вредности на првите два форманти F_1 и F_2 на македонските самогласки.

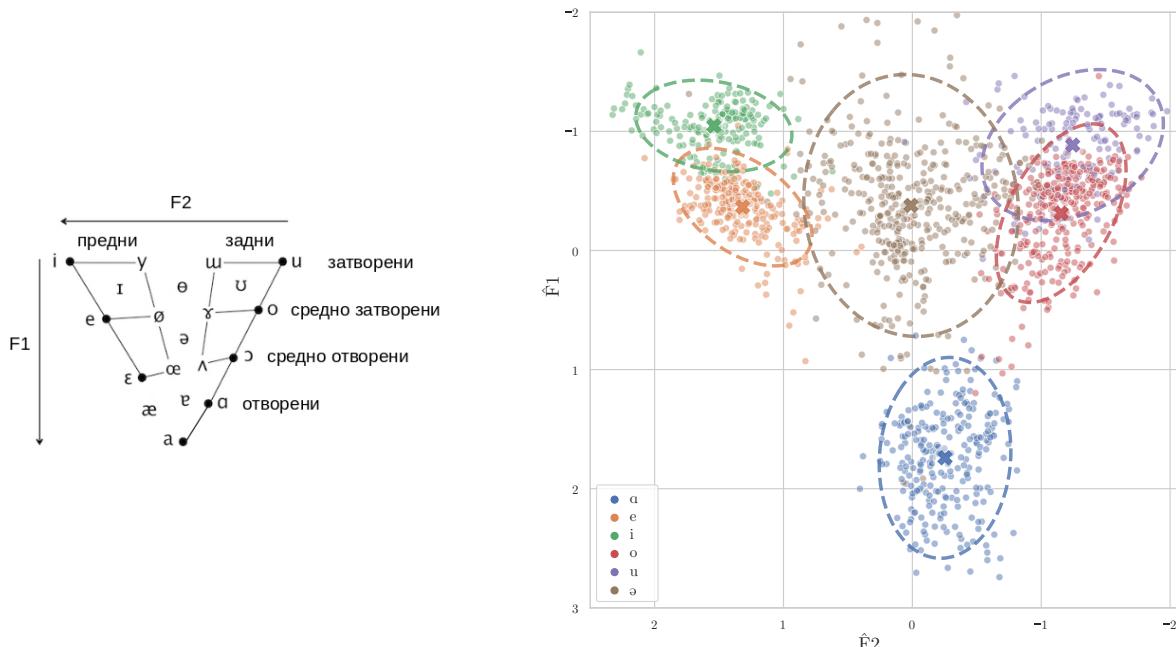
| Самогласка | F_1 [Hz] | F_2 [Hz] |
|------------|------------|------------|
| /a/ | 784 | 1367 |
| /e/ | 390 | 2092 |
| /i/ | 267 | 2189 |
| /o/ | 398 | 937 |
| /u/ | 293 | 892 |



Слика 3.12: Распределба на првите два форманти F_1 и F_2 на македонските самогласки.



Слика 3.11: Изглед на 3Д моделот на вокалниот тракт и неговата апроксимација како акустички систем на звуководи за синтеза на говор употребени во VocalTractLab.



Слика 3.13: Формантски простор⁶³ на самогласките (лево) и распределба на формантите на македонските самогласки во нормализираниот F_1 - F_2 формантски простор (десно).

Формантите во сите светски јазици, поради физиката на вокалниот тракт, се движат во рамките на триаголник во F_1 - F_2 просторот. Овој триаголник е илустриран на Сл. 3.13 со ознаките на ИПА за можните самогласки. На истата слика е прикажана распределбата на формантите на македонските самогласки во овој простор, придружени од темниот вокал /ə/ кој се среќава кај нас во рамките на вокалното „р“ /ɹ/, за четворица говорници (2 мажи и 2 жени). Поради тоа што се работи за мешана група на машки и женски говорници, распределбата е прикажана во нормализираниот формантен простор добиен со:

$$\hat{F}_i^t = \frac{F_i^t - \mu_i^t}{\sigma_i^t}, \quad (3.33)$$

каде F_i^t е фреквенцијата на формантот i на говорникот t , а μ_i^t и σ_i^t се средната фреквенција и стандардната девијација на формантот i за говорникот t за сите реализации на сите самогласки.

Формантите се забележлива карактеристика на самогласките, но се јавуваат и кај сонантите. Кај звучните опструенти се јавува само еден формант позициониран на фреквенцијата на основниот хармоник. Кај беззвучните согласки, не постои периодична компонента во спектарот, а со тоа нема ниту форманти. Кај овој тип на гласови во спектарот, има истакнати фреквенциски опсези од шумна апериодична енергија.

⁶³Geoff Lindsey, 2013. The Vowel Space <https://www.englishspeechservices.com/blog/the-vowel-space/>

Како илустрација на овој процес, на Сл. 3.10 е прикажан и звучниот бран добиен со микрофон за време на снимање на ЕГГ. Станува збор за продолжена артикулација на самогласката /а/. Во спектарот и спектограмот на овој сигнал можеме јасно да ги забележиме регионите на изразена енергија, односно формантите на фреквенција 740, 1200 и 2850 Hz.

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

§ Дополнително. Во некои музички традиции, посебно во соседните региони Тува, Алтаи, Сибир и Монголија, луѓето можат да ги контролираат лажните гласилки прикажани на Сл. 3.8 и да предизвикаат нивна вибрирање кое е со фреквенција двојно помала од фреквенцијата на вибрирање на обичните гласилки. Со оваа техника, ако еден длабок машки глас оди до фреквенција од 80 Hz, тие можат да произведат глас со фреквенција од 40 Hz! Уште повеќе, во овие музички традиции, пеачот го употребува вокалниот тракт како теснopoјасен филтер пропусник на опсег за да ги издвои поединечните виши хармонии. На тој начин, освен основниот хармоник, може јасно да се чуе и еден изразен хармоник на фреквенција која е мултипл од онаа на основниот, ефективно пејќи „од едно грло два гласа“. Овој начин на пеење се нарекува **грлено пеење**.⁶⁴

Генерирање на звук со препрека

Согласките се создаваат со помош на препрека во вокалниот тракт добиена со позиционирање на артикулаторите. Ова стеснување предизвикува турбуленции во протокот на воздухот низ вокалниот тракт кои звучат како шум и додаваат апериодична компонента во говорниот сигнал.

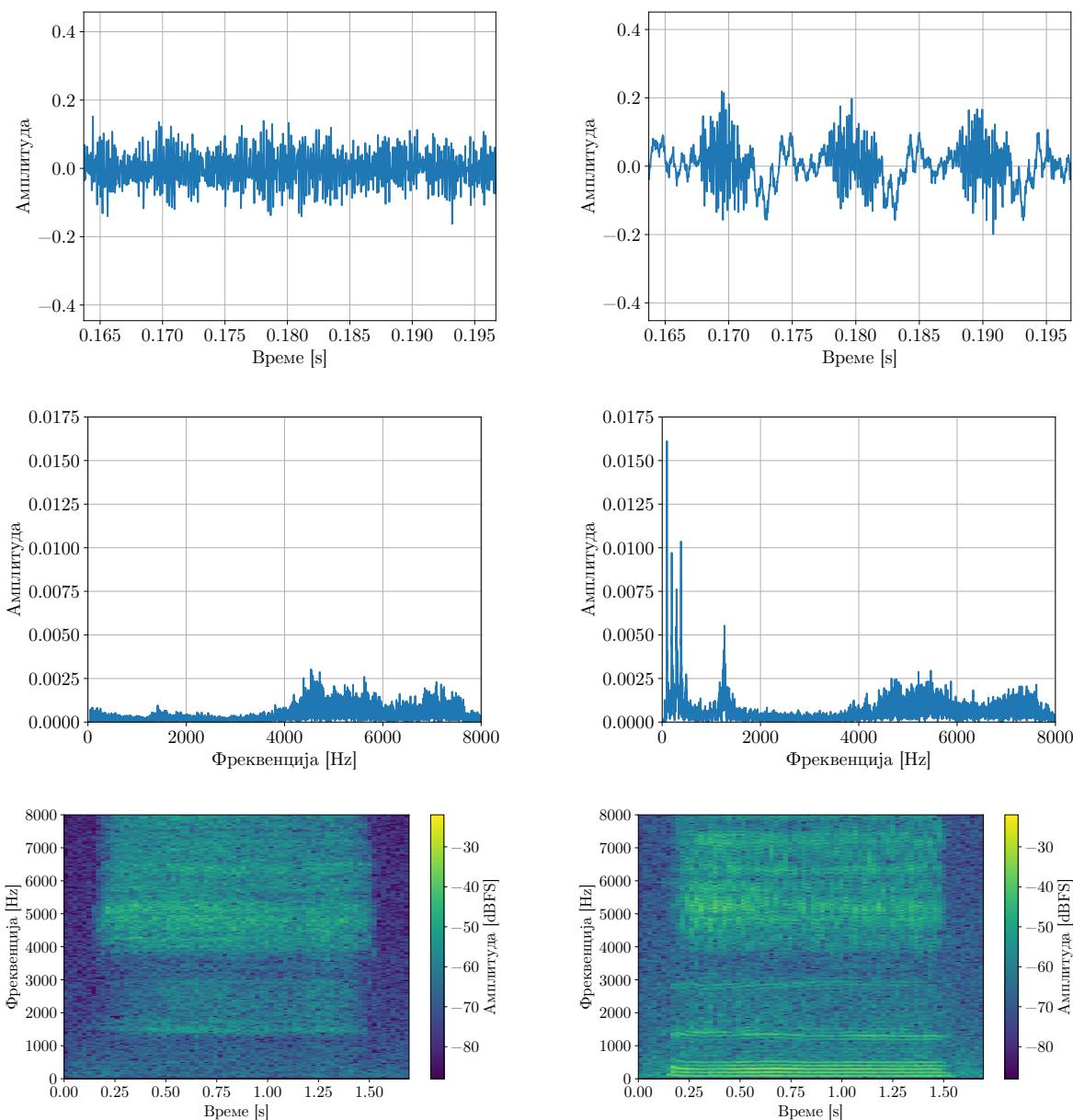
Локацијата на стеснувањето се нарекува и **место на артикулација**. Местото на артикулација ја дефинира бојата на создадениот звучен бран, односно неговиот фонетски карактер. Местото на артикулација го дели вокалниот тракт на два резонатора – преден и заден.

Како пример на овој тип на гласови, на Сл. 3.14 е прикажан временскиот облик, амплитудниот спектар и спектограмот на гласот „с“ /s/. Може да се види дека во него не постои периодичност, па соодветно не постојат изразени импулси во неговиот спектар. За дополнителна илустрација, покрај него е прикажан и неговиот звучен пар „з“ /z/ кој го има истото место на артикулација, но дополнително содржи активација на гласилките. Додадената периодичност може да се забележи во импулсите на спектарот и паралелните линии во спектограмот. Во овој случај станува збор за звук од мешан тип, поради тоа што содржи и периодична и апериодична компонента.

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

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

⁶⁴ Примери за неколку од стиловите на грлено пеење може да се види во видеото YouTube: Throat singing of different nations <https://www.youtube.com/watch?v=UnSd1ZHx-5Y>, а визуелно објаснување на техниката на филтрирање на вишите хармонии може да се види во видеото YouTube: polyphonic overtone singing - explained visually [https://www.youtube.com/watch?v=UHT\\$F_1\\$-IhuCo](https://www.youtube.com/watch?v=UHTF_1-IhuCo)



Слика 3.14: Временски облик (горе), амплитуден спектар (средина) и спектрограм (долу) на гласот /s/ (лева колона) и гласот /z/ (десна колона).

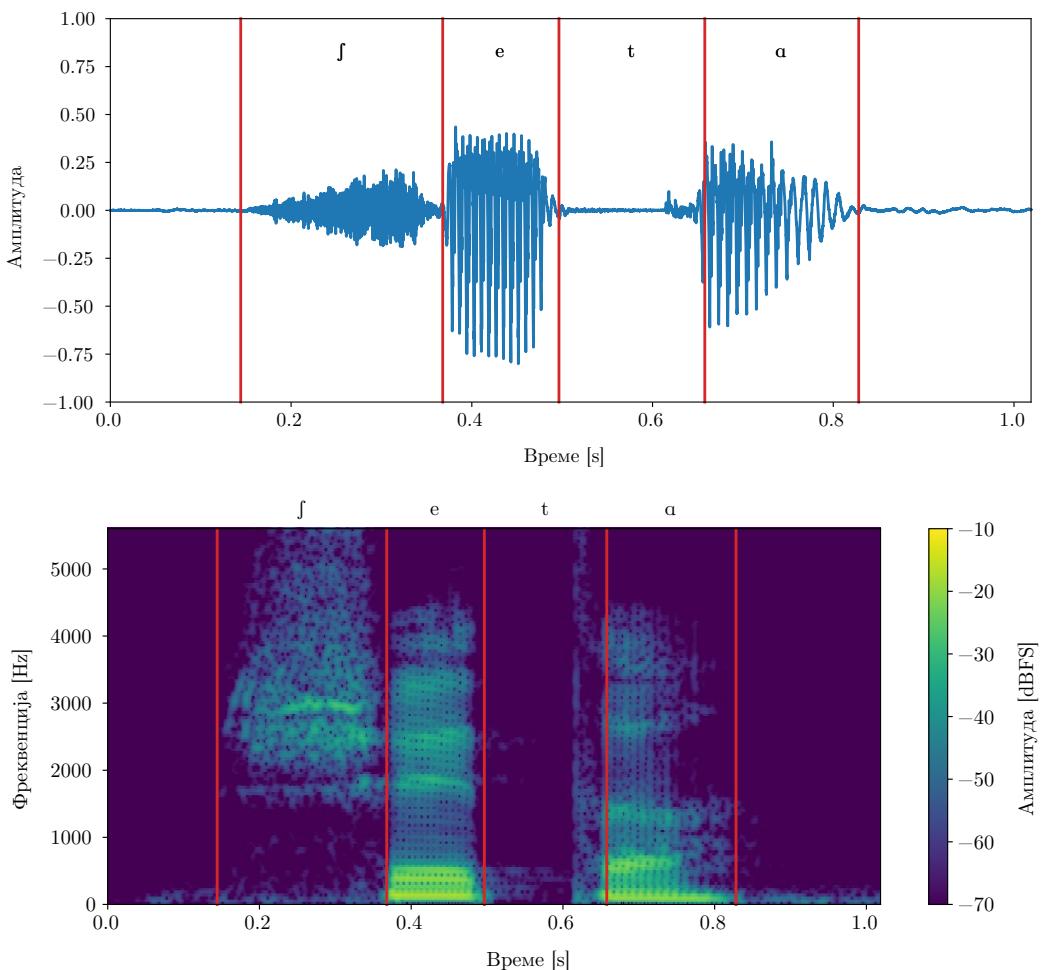
- **апроксиманти** – како „ј“ /j/, и
- **ликвиди** – како „р“ /r/ и „л“ /l/.

Транзиенти

Премините на вокалниот тракт од една до друга стабилна конфигурација, односно од артикулацијата на еден глас до артикулацијата на друг, се нарекуваат **транзиенти**. Овие промени се отсликуваат во временско-спектралниот облик на говорните сигнали.

Транзиентите се клучни во реализација на дел од согласките кои се реализираат со потполна преграда на вокалниот тракт. Кај овие гласови постојат две фази во изговорот:

- **фаза на затворање или оклузија** – целосна преграда на протокот на воздух на местото на артикулација која предизвикува генерирање на зголемен притисок во задниот дел од вокалниот апарат, и



Слика 3.15: Осцилограм и спектрограм на зборот „шета“ /ʃeta/

- **фаза на ослободување или плозија** – нагло отворање на вокалниот тракт на местото на артикулација и ослободување на протокот на воздух.

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

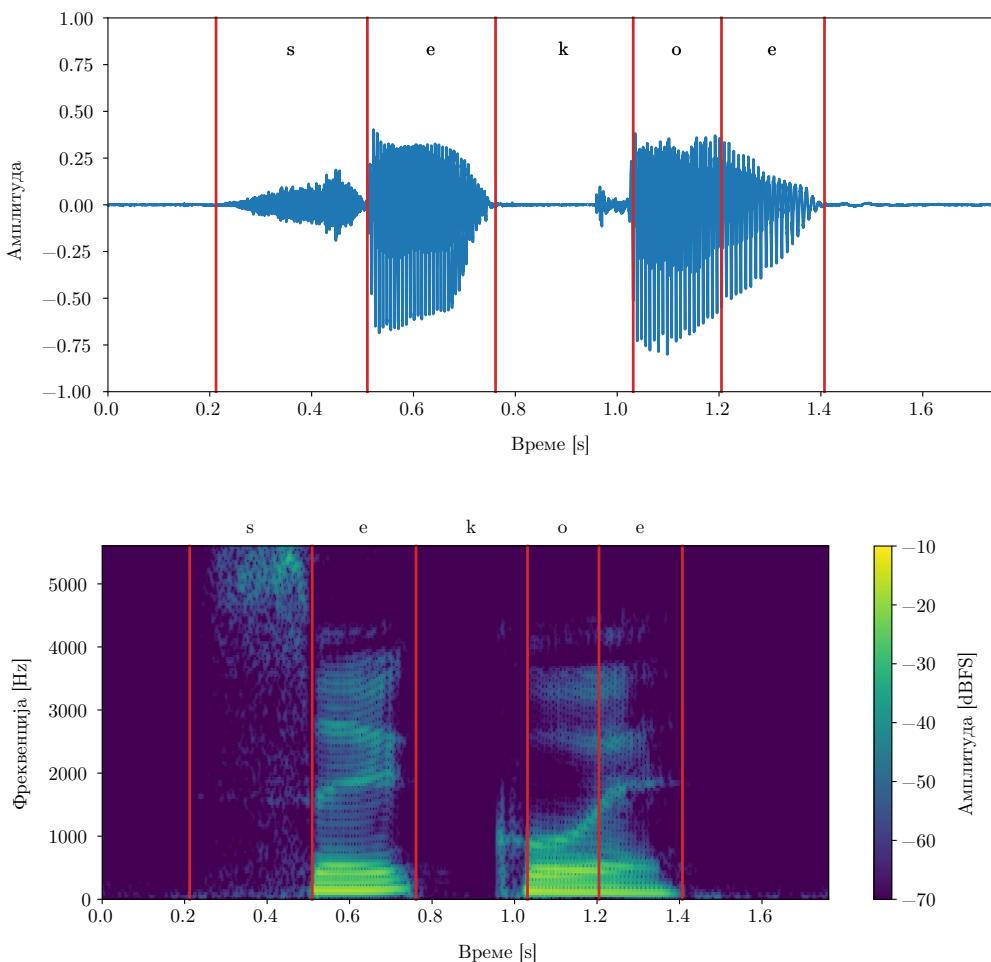
- **оклузиви** или **плозиви** – кои немаат продолжена апериодична компонента, и
- **африкати** – кои нејзе ја имаат во вид на фрикатив; тие може да се сметаат и како согласки составени од секвенца на оклузив и фрикатив.

Говор

За да видиме како говорниот сигнал е составен од низа на гласови како пример ќе го разгледаме осцилограмот и спектрограмот на зборот „шета“ прикажан на Сл. 3.15. На двата приказа се означени границите на гласовните сегменти и од нив може јасно да се воочи дека говорниот сигнал е создан од низа засебни акустички единки кои глатко се надоврзуваат. Овие единки се нарекуваат **фонеми**, а нивните акустички реализацији **гласови**⁶⁵.

Спектрограмот е прикажан со максимална фреквенција од околу 5 kHz што претставува фреквенциски опсег во кој е содржан поголемиот дел од енергијата на речиси сите гласови. Поставките за прикажување на спектрограмот во фонетските анализи го фаворизираат јасното прикажување на распределбата на енергијата, односно формантите за сметка на прикажување на засебните хармоници кои веќе не можат да се видат во форма на хоризонтални линии. Од нив само основниот хармоник F_0 може јасно да се забележи, а според него и да се одреди

⁶⁵анг. phones



Слика 3.16: Осцилограм и спектрограм на зборот „секое“ /sekoe/

звукноста на гласовите, односно постоењето на вибрации на гласилките. Така, во „шета“ може да забележиме дека звучни се само двете самогласки /e/ и /a/, додека согласките /ʃ/ и /t/ се беззвучни. Формантите и нивната промена во време може да се забележи во деловите од спектрограмот со поизразени амплитуди. Тука можат јасно да се воочат првите три форманти F_1 , F_2 и F_3 кај самогласките /e/ и /a/.

На спектрограмот дополнително можат да се видат и оклузијата и плозијата на плозивот /t/, како и шумот на фриклија на /ʃ/. Кај оклузијата на /t/ имаме регион на целосно исчезнување на гласот, кој е проследен со регион на брза плозија. Дополнително, помеѓу гласовите потребен е краток временски период во кој формантите на самогласките ќе дојдат до нивната стабилна вредност. Овој период на промена на формантите се нарекува транзиент. За појасно воочување на транзиентите ќе се послужиме со [Сл. 3.16](#) на која е претставен осцилограм и спектрограмот од зборот „секое“ каде што јасно можете да ги видите транзиентите:

- при преодот од /s/ во /e/ во кој формантите на /e/ доаѓаат до своите стабилни вредности,
- при глатката транзиција на формантите помеѓу нивните стабилни вредности за самогласките /o/ и /e/, во која посебно воочлива е промената на вториот формант F_2 .

Повторно можеме да ги забележиме основниот хармоник F_0 , и првите три форманти F_1 , F_2 и F_3 кај двете самогласки, шумот на фриклија кај гласот /s/ кој овој пат има изразена енергија на повисока фреквенција од онаа на гласот /ʃ/ според што човекот ги разликува, како и оклузијата, плозијата и транзиентот на гласот /k/.

Поглавје 4

Електроакустички и електромеханички аналогии

Воведените аналогии помеѓу акустичките и електрични големини, како и брановото простирање во звуковод со она во електричен вод во [Поглавјето 2](#), важат и за кола со концентрирани компоненти кога димензиите на акустичките системи се помали од брановата должина на звукот. Кај електричните кола, брзината на простирање на електромагнетниот бран е еднаква на брзината на светлината c па брановата должина за 50 Hz изнесува околу 6 000 km, што значи сите електрични кола кои работат на фреквенции помали од онаа на градската мрежа можат да се анализираат и проектираат како кола со концентрирани компоненти. Всушност, феноменот на простирање кај електричните кола, станува важен само кај уредите кои работат со сигнали со фреквенции кои се во подрачјето на GHz, какви што се електронските кола кај предавателите и приемниците во овој опсег, но и уредите кои работат со протоци на податоци со големи брзини, на пр. свичеви и рутери. Така, за фреквенции од 2,4 GHz брановата должина изнесува 12,5 cm, додека на 60 GHz таа веќе паѓа на 5 mm.

4.1 Елементи на акустичките системи

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:

$$C = C' l, \quad (4.1)$$

каде C' е подолжната капацитивност на водот. Аналогно на него, еден звуковод со кратка должина чиј крај е затворен има акустички проток еднаков на нула во таа точка, па е аналоген на отворен вод, на чиј крај исто така нема течење на струја, [Сл. 4.1](#). Следејќи ја оваа аналогија, ваквиот звуковод може да се еквивалентира со една концентрирана **акустичка капацитивност** C_a :

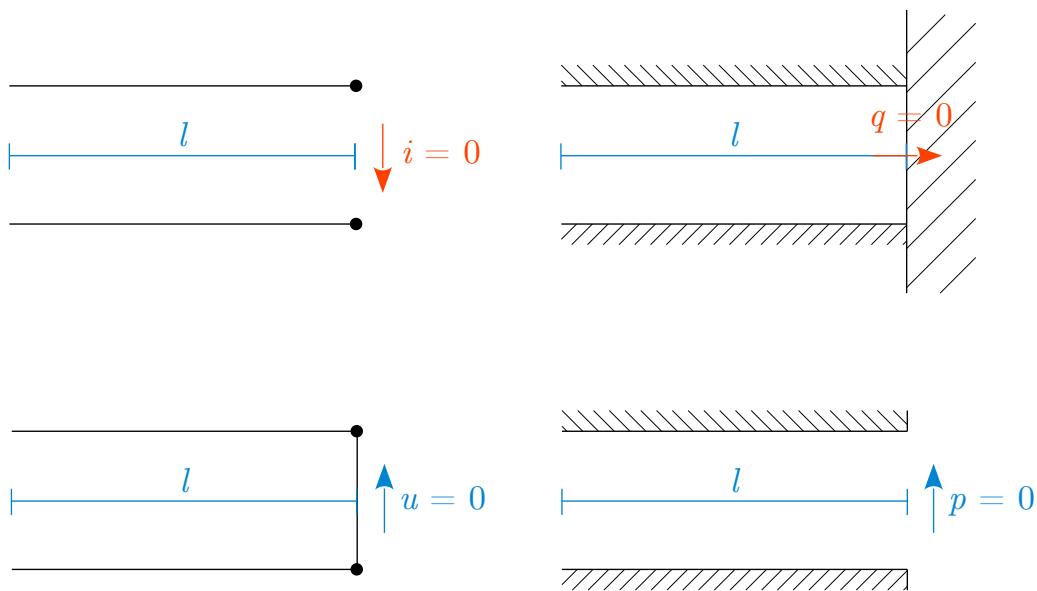
$$C_a = C'_a l = \frac{Sl}{\rho c^2} = \frac{V}{\rho c^2}, \quad (4.2)$$

каде V е волуменот на звуководот. Од (4.2) 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:

$$q_i = p_i \omega C_a, \quad (4.3)$$

односно:

$$p_i = \frac{1}{\omega C_a} q_i. \quad (4.4)$$



Слика 4.1: Аналогија помеѓу отворен електричен вод и затворен звуковод (горе) и затворен електричен вод и отворен звуковод (долу).

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

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

$$L = L'l, \quad (4.5)$$

каде L' е подолжната индуктивност. Аналогно, еден звуковод со кратка должина со отворен крај, во која точка притисокот е еднаков на нула, како и напонот кај кратко споениот електричен вод, Сл. 4.1, може да се еквивалентира со една **акустичка индуктивност** m_a :

$$m_a = m'_a l = \frac{\rho l}{S}. \quad (4.6)$$

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

$$q_i = \frac{p_i}{\omega m_a}. \quad (4.7)$$

Важи и:

$$p_i = \omega L_a q_i. \quad (4.8)$$

Поради тоа што акустичкиот проток треба да ги придвижи и воздушните честички непосредно до отворот на кратката цевка, потребна е корекција на (4.6):

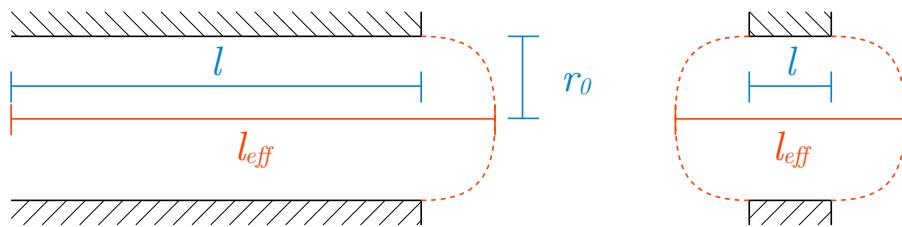
$$m_a = \frac{\rho l_{eff}}{S}, \quad (4.9)$$

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

$$l_{eff} = l + 0,85r_0, \quad (4.10)$$

каде r_0 е радиусот на цевката. Оваа корекција станува посебно важна кај звуководи со кратки должини, како на пример кај перфорирани плочи кои се составен дел на акустичките апсорбери. Ако цевката е отворена од двете страни, односно е дел од посложен акустички систем, тогаш оваа компензација треба да се примени на двета нејзини краеви:

$$l_{eff} = l + 2 \cdot 0,85r_0 = l + 1,7r_0. \quad (4.11)$$



Слика 4.2: Компензација на ефективната должина на звуковод отворен од едната (лево) и од двете страни (десно).

За добивање на аналогниот акустички елемент на електричниот отпорник треба да ги земеме во обзор загубите на акустичка енергија. Како што беше споменато во [Поглавјето 2](#), 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 ([Куртовик, 1982](#)) со добива следниот израз за [акустичката отпорност](#) R_a на тенка цевка:

$$R_a = \frac{8\mu l}{r_0^4 \pi}, \quad \text{за } r_0 < \frac{2000}{\sqrt{f}}. \quad (4.12)$$

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.

4.2 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](#), пружина т.е. [еластичност](#) и пригушувач т.е. [триење](#). Диференцијалната равенка која го опишува овој систем е од втор ред:

$$ma = F - rv - kx, \quad (4.13)$$

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F - r \frac{dx}{dt} - kx, \quad (4.14)$$

$$m \frac{dv}{dt} + rv + k \int v dt = F. \quad (4.15)$$

Тука, v е брзината на движење на масата, x е нејзиното поместување, F е надворешната сила која делува на масата, r е коефициентот на пригушување, а k е еластичноста на пружината. Може да видиме дека силата на пригушување е пропорционална на брзината на движење на масата.⁶⁶ Исто така, може да видиме дека силата со која делува пружината во системот преку затегнатоста е пропорционална на неговата компресија односно експанзија. Како и во акустичкиот домен, и во механичкиот домен постои аналогија помеѓу силата и електричниот напон и брзината на движење со струјата. Ако сега ја напишеме диференцијалната равенка која опишува едно сериско осцилаторно електрично коло, кое е исто така е составено од трите основни градбени елементи на електричните кола, имаме:

$$L \frac{dI}{dt} + RI + \frac{1}{C} \int I dt = U. \quad (4.16)$$

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.

⁶⁶Ова може да се почувствува ако се спореди отпорот на водата при одење и при трчање низ неа.

Поглавје 5

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](#).

5.1 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. 5.1 може да се подели на следните три дела:

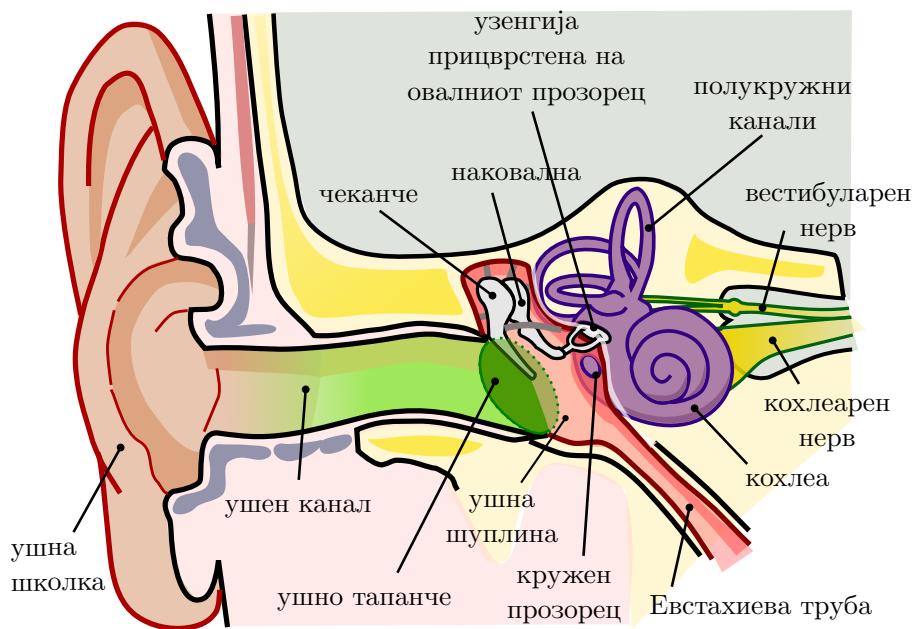
- [надворешно уво](#) – одговорно за собирање на звучните осцилации од околната со ушната школка (*pinna*) и нивното насочување кон внатрешноста на увото преку надворешниот слушен канал.
- [средно уво](#) – одговорно за преобразба на акустичките осцилации во механички преку ушното тапанче (*membrana tympani*) и нивно пренесување до овалниот прозорец од ушното полжавче преку трите ушни ковчиња: чеканче (*maleus*), наковална (*incus*) и стремен (*stapes*).
- [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.

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 главата⁶⁷ ги користи мозокот за одредување на насоката од која доаѓа звукот.⁶⁸ Ушниот канал пак, претставува акустички резонатор кој е одговорен за механичко засилување на звучните бранови на фреквенција околу 3 kHz,

За ушното тапанче да може да биде побудено од промените на притисокот предизвикани од звучните бранови, потребно е во средното уво да постои притисок еднаков на статичниот надворешен притисок, т.е. атмосферскиот притисок p_{atm} . Ова го овозможува Евстахиевата труба која ја поврзува празнината на средното уво со устната празнина.

⁶⁷анг. Head-Related Transfer Function (HRTF).

⁶⁸Ова е причината зошто не можеме од која висина доаѓа звукот ако тој доаѓа од позади нас.



Слика 5.1: Анатомија на човековото уво.⁶⁹

Начинот на работа на ковчињата во средното уво се базира на механиката на функционирање на лост. Заедно со 19-кратната разлика во површина помеѓу слушното тапанче и овалниот прозорец, ова му овозможува на средното уво да реализира прилагодување на акустичката импедансата помеѓу воздухот и течната средина во ушното полжавче. Без ова прилагодување на импедансите би била пренесена само 0,1% од акустичката енергија од воздухот во внатрешното уво.

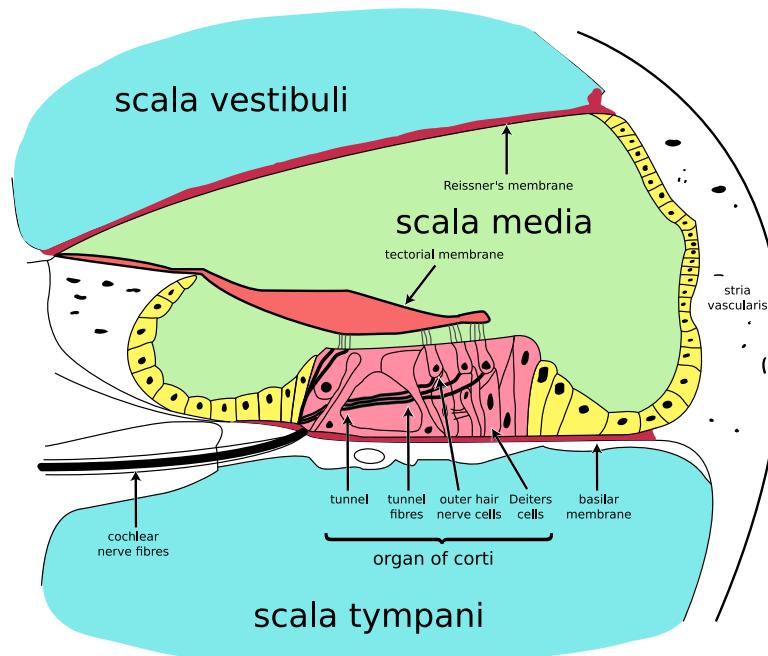
§ Дополнително. Евстахиевата труба ни е особено важна при големи и брзи промени во надворешниот притисок, на пр. при искачување или симнување од височина со автомобил или авион, односно при нуркање. При искачување, надворешниот притисок опаѓа, па притисокот во средното уво станува релативно повисок. Овој изразен диференцијал во притисокот предизвикува отворање на Евстахиевата труба на секои 15 mmHg, односно 2 000 Pa разлика во притисоците, што може да се почувствува како „пукanje“ во ушите. Знаејќи дека на промена од 100 m надморска височина одговара грубо на промена во атмосферскиот притисок од 1,2 kPa, добиваме дека Евстахиевата труба ќе се отвори на секои 167 m искачување. При симнувањето понекогаш е потребно човекот да помогне во отворањето на Евстахиевата труба со подголтнување или дување со затворање на носот.

Ушното полжавче е составено од канал долг околу 3 см кој е кружно завиткан 2 $\frac{3}{4}$ пати и е полн со лимфна течност долж која се пренесуваат акустичките осцилации. Каналот е поделен на три комори, прикажани на Сл. 5.2:

- вестибуларно, односно горно скалило (*scala vestibuli*) на чиј почеток е овалниот прозорец,
- тимпанично, односно долно скалило (*scala tympani*) на чиј крај е кружниот прозорец со неповрзаното секундарно ушно тапанче; неговата улога е да го овозможи ослободувањето на звучниот притисок,
- кохлеарно, односно средно скалило (*scala media*) која е изолирана и затворена; во неа е поместен **органот на Корти**.

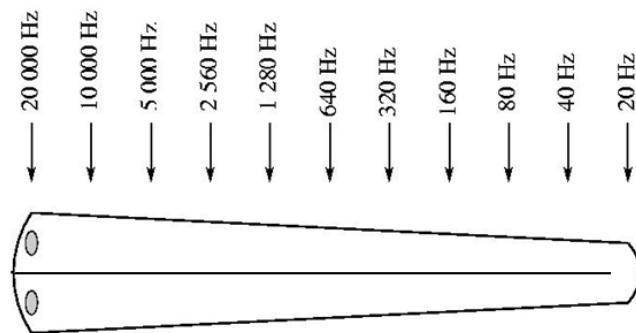
Звучните бранови во ушното полжавче се простираат почнувајќи од овалниот прозорец, низ вестибуларното скалило, па назад низ тимпаничното скалило и се ослободуваат низ кружниот прозорец.

⁶⁹Прилагодено од "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)



Слика 5.2: Напречен пресек на каналот на ушното полжавче.⁷⁰

Помеѓу средното и тимпаничното скалило се наоѓа **базиларната мембра**. Таа е главниот структурен елемент што ги одредува својствата на механичка пропагација на звучните бранови во кохлеата. Базиларната мембра станува прогресивно поширока и подебела кон крајот на каналот, поради што за различна фреквенција на акустичките осцилации вибрира различен дел од нејзината должина. Така, звучните бранови со повисока фреквенција предизвикуваат максимални осцилации на нејзиниот почеток (поблиску до овалниот прозорец), додека тие со пониска фреквенција делуваат на нејзиниот крај, како што е прикажано на Сл. 5.3. На тој начин, базиларната мембра всушност претставува конвертор на фреквенција во растојание. Оваа просторна распределба на прием на звукот се нарекува тонотопија.



Слика 5.3: Фреквенциска чувствителност на базиларната мембра.

На површината на базиларната мембра, а во средната скалило, се наоѓа **органот на Корти** долж кој се распоредени околу 15 500 **клетки влакна** кои се делат на надворешни и внатрешни.⁷¹ Надворешните клетки влакна, 12 000 на број, служат за механичко засилување на звучните вибрации. Имено, клетките влакна претставуваат електромеханички преобразувачи кои работат во обете насоки, па нивна стимулација од страна на нервите како и вибрациите на течноста во средното скалило, предизвикува нивна механичка вибрација која е во фаза со оригиналната акустичка побуда и ја засилува.⁷² Тие на овој начин играат улога на предзасилувачи на звучниот

⁷⁰By Original:OarihVector:Fred the Oyster - Own work based on: Cochlea-crosssection.png, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9851471>

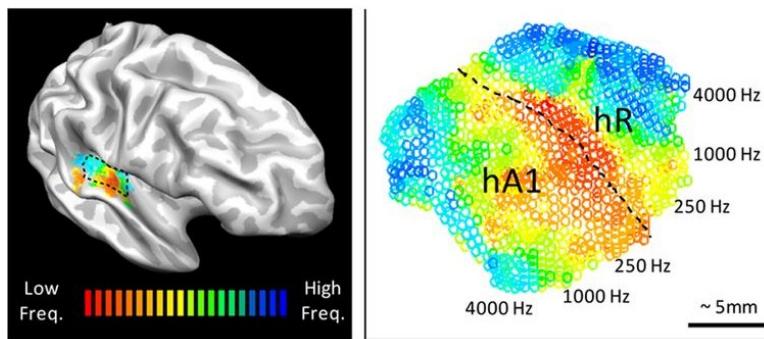
⁷¹Wikipedia: Hair cell https://en.wikipedia.org/wiki/Hair_cell

⁷²Овој интересен феномен може да се види во видеото: Fernando Cordova Tapia, *Dancing hair cell (ear)*, <https://www.youtube.com/watch?v=JyfXzrIwvqU>

сигнал. Засилувањето кое го прават надворешните клетки влакна е нелинеарно – тоа е поголемо за потивки звуци, а помало за посилни. Без него, осетливоста на аудиоторниот систем се намалува за околу 50 dB.

§ Дополнително. Понекогаш, овој механизам може да создаде механичка вибрација без да постои звучна побуда. Оваа вибрација притоа ќе се пренесе преку овалниот прозорец и ланецот на ковчиња во средното уво, сè до ушното тапанче, кое ќе еmitува звук. Овој процес се нарекува **отоакустична емисија**.⁷³ Спонтаната отоакустична емисија се јавува кај 35 – 50% од луѓето со стабилна фреквенција во опсегот 500 – 4 500 Hz и ниво од -30 – 10 dB SPL. Таа е знак за исправна работа на внатрешното уво. Повеќето луѓе не се свесни за нејзиното постоење, но кај 10% од луѓето е поизразена и им пречи, појава што се нарекува **тинитус**.

Внатрешните клетки влакна, 3 500 на број, се тие кои се поврзани со завршетоците на аудиторниот нерв. Поради разликата во механичките потенцијали помеѓу средната скалило и тимпаничното скалило, влакненцата на клетките влакна се виткаат и предизвикуваат хемиска реакција која предизвикува генерирање на нервни импулси во поврзаните неврони.⁷⁴ Овие импулси доаѓаат до **аудиторниот кортекс (A1)** во кој различните нервни завршетоци од кохлеата се мапирани во различни региони, кои со тоа се осетливи на различни фреквенции. Оваа распределба на конекциите во аудиторниот кортекс се нарекува **тонотопична мапа**, види Сл. ??.



Слика 5.4: Тонотопична мапа на аудиторниот кортекс A1. Превземено од (Da Costa et al., 2013).⁷⁵

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

5.2 Поимање на амплитудата на звукот

Осетливоста на човековото уво на амплитудата на звучниот притисок е нелинеарна како во однос на интензитетот на звукот, така и во однос на неговата фреквенција. Амплитудната нелинеарност се должи на одсивот на клетките влакна кои се почувствителни на мали отколку на големи звучни побуди. Тука, во игра влегува и нелинеарното засилување на звучните вибрации на надворешните клетки влакна. Конечно, мускулите прицврстени на ковчињата од средното уво се активираат при големи звучни притисоци внесувајќи нелинеарност во вид на заситување.

//www.youtube.com/watch?v=Xo9bwQuYrRo.

⁷³Wikipedia: Otoacoustic emission https://en.wikipedia.org/wiki/Otoacoustic_emission

⁷⁴Добра анимација на овој процес е претставена во видеото Hearing & Balance: Crash Course A&P #17 <https://www.youtube.com/watch?v=Ie2j7GpC4JU>

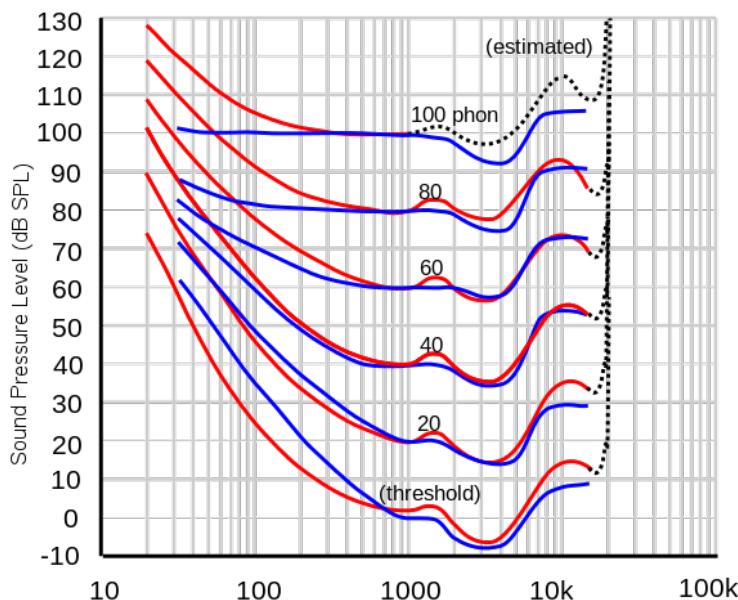
⁷⁵<https://www.jneurosci.org/content/33/5/1858>

Фреквенциската нелинеарност на поимањето на амплитудата пак е поврзана со нелинеарната распределба на фреквенциска осетливост на базиларната мембра.

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. 5.5, тие ја отсликуваат фреквенциска 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.



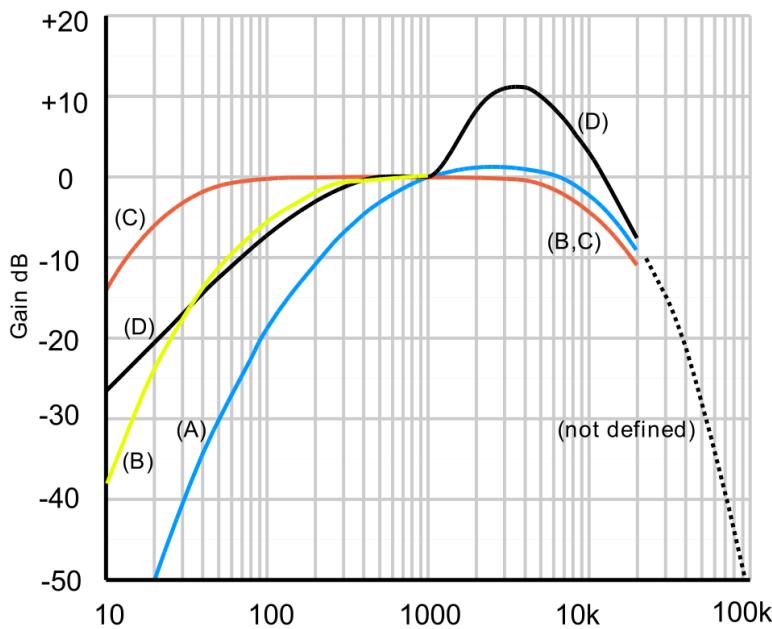
Слика 5.5: Криви на еднаква чујност, или изофонски криви, измерени според Флечер и Мунсон (сино) и стандардизирани според ISO стандардот (првено).⁷⁶

За да се земе во предвид нелинеарната 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. 5.6. Првата A-крива е и најкористена и се базира на кривата за 40 phon од графикот на Флечер и Мунсон, па мерењата со нејзе се најточни за ниски нивоа на бучава. 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.

Гласност на звук

⁷⁶"Lindos4" by Lindosland <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lindos4.svg#/media/File:Lindos4.svg>

⁷⁷"Acoustic weighting curves" by Lindosland https://en.wikipedia.org/wiki/File:Acoustic_weighting_curves_%2821%29.svg



Слика 5.6: Тежински криви за мерење на перцептуално ниво на бучава. ⁷⁷

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 со одредени девијации. Според него, гласноста ќе се менува линеарно кога звучниот притисок (интензитетот) ќе се менува за ист процент (експоненцијално). Овој закон е изразен со следново равенство:

$$d\Gamma = k \frac{dp}{p}, \quad (5.1)$$

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

$$\Gamma = k \ln \frac{p}{p_0}. \quad (5.2)$$

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

- 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,
- на гласност од 1 son одговара јачина од 40 phon.

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

$$\Gamma = 2^{\frac{\Lambda-40}{10}}, \quad (5.3)$$

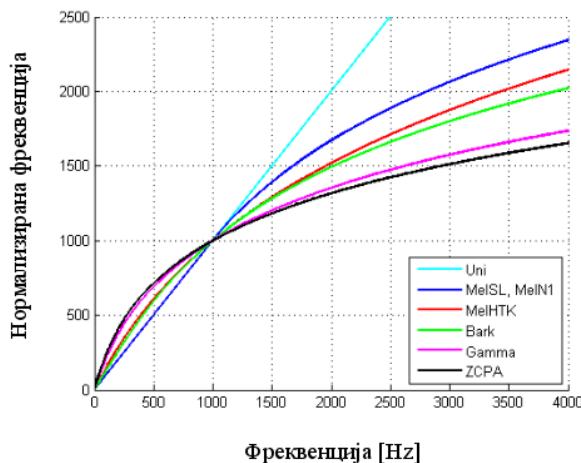
$$\Lambda = \frac{10}{\log 2} \log \Gamma + 40. \quad (5.4)$$

5.3 Поимање на фреквенцијата на звукот

Поради нерамномерната распределеност на фреквенциската осетливоста на базиларната мембра на прикажана на Сл. 5.3, кај увото постои нелинеарност во поимање на фреквенцијата на звукот. Психофизичката големина која ја рефлектира оваа нелинеарност се нарекува **висина**.

Таа е определена со фреквенцијата на звучните вибрации кај простите тонови, односно со фреквенцијата на основниот хармоник кај сложените тонови. И висината увото ја чувствува логаритамски. За мерење на висината се предложени неколку фреквенциски скали, во прв ред Мел скалата и Барк скалата, прикажани на Сл. 5.7. Мел скалата е добиена преку споредба на тонови за кои слушателите имале впечаток дека се еднакво одалечени. Поради тоа и го добила името *mel* од зборот „мелодија“. Може да се види дека се работи за компресија, односно како расте фреквенцијата, растојанијата во Hz се пресликуваат во сè помали растојанија во *mel*. Иако нема строго дефинирана формула за пресметување на *mel*, често се употребува следното равенство:

$$M = 2595 \log_{10} \left(1 + \frac{f}{700} \right). \quad (5.5)$$



Слика 5.7: Мел и другите фреквенциски скали за мерење на перцептуалната висина на звукот.

5.4 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 пример, 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“.

5.5 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 Пајтон (види Додаток Б).⁷⁸

Генерирање на звук во Пајтон

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

⁷⁸Делови од ова поглавје се адаптирани од материјалите за предметот Дигитално процесирање на аудио кој се предава на додипломски студии (VI семестар) на ФЕИТ. <https://github.com/FEEIT-FreeCourseWare/Digital-Audio-Systems/>

```

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.⁷⁹

```

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

```

`Sine.wav:`

```

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

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

```

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

Логаритамска осетливост на амплитуда

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

```

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

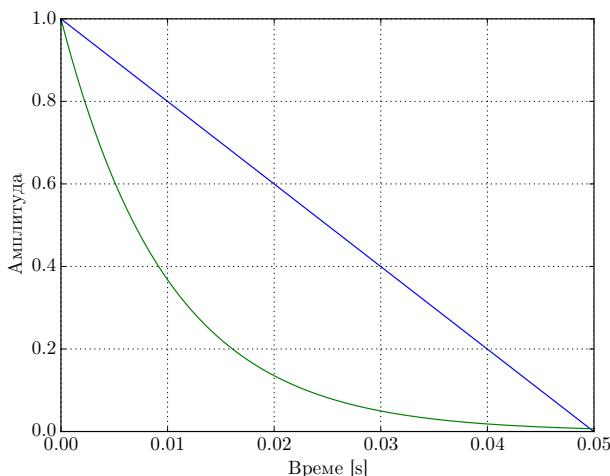
# generate sine
f = 440
fs = 44100
ts = 1 / fs
t = np.arange(0, 4, ts)
sine = np.sin(2*np.pi*f*t)

# 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

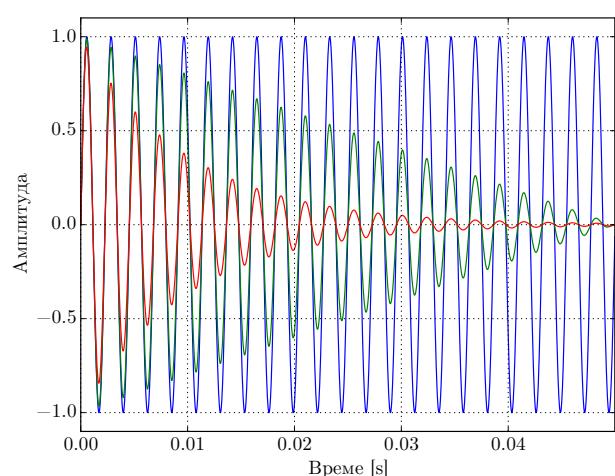
# plot curves

```

⁷⁹SoX е слободен софтвер за конвертирање, обработка, снимање и преслушување на аудио фајлови. <http://sox.sourceforge.net/>



Слика 5.8: Криви за втишување.



Слика 5.9: Линеарно (зелена) и експоненцијално (првена) втишување на синусен тон (сина).

```

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.int16(sine * 2**15))
os.system('play sine.wav')
wavfile.write('sine_lin.wav', fs, np.int16(sine_lin * 2**15))
os.system('play sine_lin.wav')
wavfile.write('sine_log.wav', fs, np.int16(sine_log * 2**15))
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 фреквенција⁸⁰, кој ќе го генерираме најпрвин со линеарна, а потоа и со логаритамска карактеристика.

```

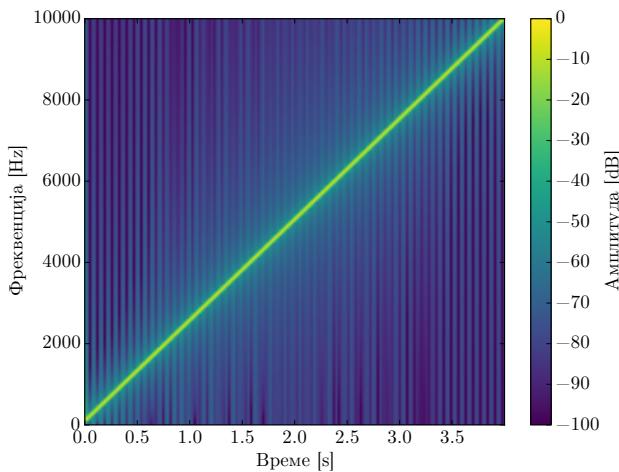
f = 440
fs = 44100
ts = 1 / fs
t = np.arange(0, 4, ts)
sound = sig.chirp(t, 100, t[-1], 10000)
sound_log = sig.chirp(t, 100, t[-1], 10000, method='logarithmic')

```

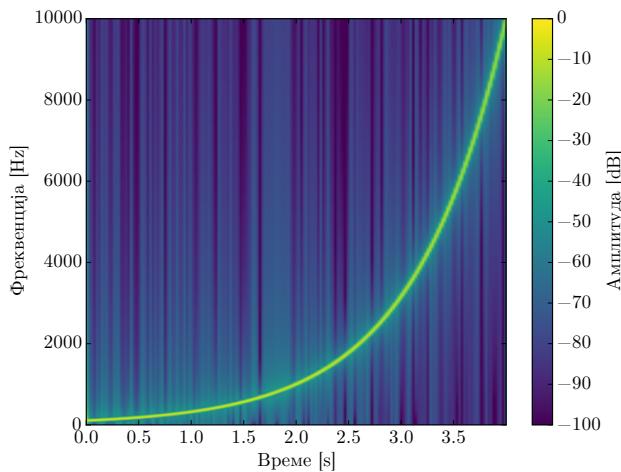
За прикажување на спектрограмот ќе се послужиме со функцијата `get_spectrogram` која е вклучена во `ea` модулот.⁸¹

⁸⁰анг. *sine sweep*.

⁸¹Функцијата `get_spectrogram` е всушност позајмена од модулот `da` од предметот Дигитално процесирање на



Слика 5.10: Синус со линеарна промена на фреквенцијата.



Слика 5.11: Синус со логаритамска промена на фреквенцијата.

```
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?

Фазна неосетливост на сетилото за слух

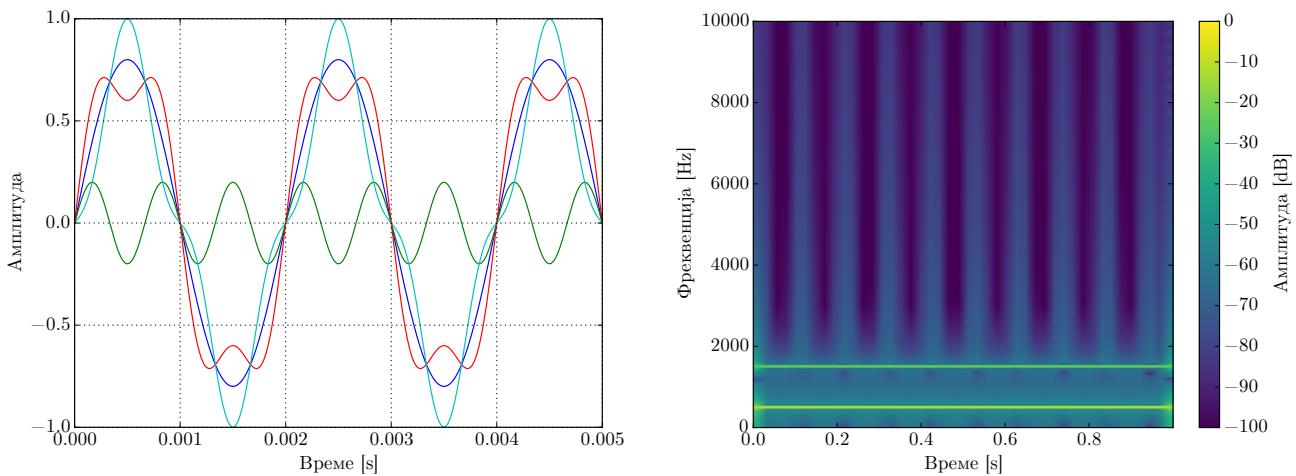
Една од карактеристиките на нашиот слух е тоа што тој не е осетлив на фазата на сигналот. Така ако собереме два простопериодични звуци со и без поместување на фазата на едниот од нив, резултантниот звук ќе биде ист иако двата сигнала имаат различен временски облик.

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

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

Консонанца и дисонанца

Во музиката под сложен, односно музички тон се подразбира мешавина од два или повеќе прости тонови. Зависно од тоновите од кои е составен сложениот тон, тој може да звучи пријатно или непријатно за слушателот. Така, како што беше дискутирано во [Поглавјето 3.1](#), 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. 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



Слика 5.12: Демонстрација на фазна неосетливост преку сума на две синусоиди со различна фазна поместеност.

16/15 (мала секунда), сложениот тон е непријатен за слушање. Оваа појава во музиката се нарекува [дисонанса](#), односно развучје.

Овој феномен ќе го илустрираме преку генерирање на тонови од C dur музичката скала почнувајќи од основниот тон C₄ на 261,6256 Hz. Дурските скали се карактеризираат со растојание од цел музички [степен](#), помеѓу сите тонови освен третиот и четвртиот и седмиот и осмиот (првиот) тон помеѓу кои разликата е [полустепен](#)⁸². Притоа, во една музичка октава, односно удвоување на фреквенцијата, на пр. помеѓу C₄ и C₅ (523,2511 Hz) се дефинираат 12 полустепени:

$$1 \text{ st} = \sqrt[12]{2}. \quad (5.6)$$

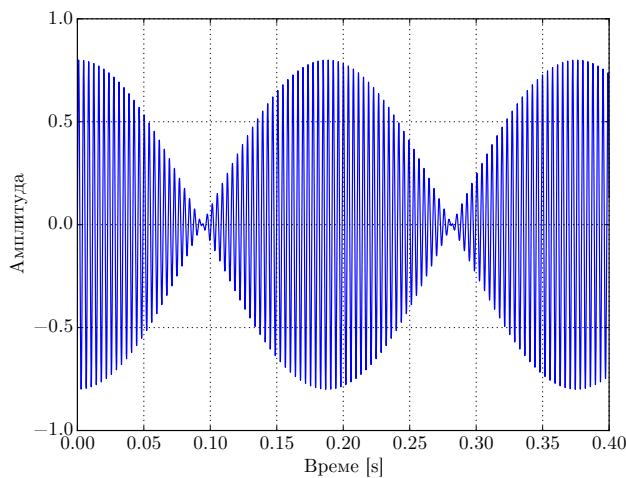
Растојанијата во степени помеѓу тоновите во C dur скалата се: C - D - E F - G - A - B C, каде со „-“ е означен празен полустепен. Така, помеѓу C и D има 2 полустепени (1 цел степен), додека помеѓу Е и F има 1 полустепен. Искористувајќи го C₄ како основа, да генерираме октава (C₅), квинта (G₄), кварт (F₄), голема терца (E₄), голема секунда (D₄) и мала секунда (C_{#4}) и да чуеме како звучат овие интервали.

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

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

Гледаме дека како се намалува растојанието меѓу фреквенциите, така созвучјето преминува во развучје, а развучјето преминува во пулсирање. Имено, кога двата прости тона се близу во фреквенција резултантниот звучен бран има амплитуда која ритмично ќе пулсира во

⁸²анг. *semitone*, што се означува како 1 st.



Слика 5.13: Илустрација на феноменот на звучно биење.

интензитет. Овој феномен се нарекува **биење** и музичарите го употребуваат при штимањето на инструментите.

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

Поглавје 6

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.

6.1 Резонантни фреквенции - модови

Во затворените простории ќе дојде до појава на стојни бранови исто како во еднодимензионалните системи анализирани во [Поглавјата 2.16](#) и [3.1](#). Таму за звуковод затворен со бесконечно крут сид со $Z_s = \infty$ за брзината на воздушните честички го добивме равенството ([2.126](#)):

$$v = 2 \frac{p_+}{\rho c} \sin kx e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})}. \quad (6.1)$$

Може да видиме дека на површината на препреката брзината v е 0. Како што видовме, ако поставиме препрека на растојание $-l_x$, брзината на воздушните честички и таму треба да е 0, со што за резонантните фреквенции f_n добивме:

$$v = 2 \frac{p_+}{\rho c} \sin k(-l_x) e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})} = 0, \quad (6.2)$$

$$\sin kl_x = 0, \quad (6.3)$$

$$kl_x = n\pi, \quad n \in \mathbb{N}, \quad (6.4)$$

$$k = \frac{n\pi}{l_x}, \quad (6.5)$$

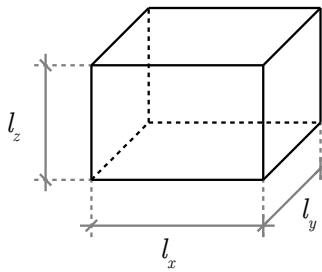
...

$$f_n = \frac{nc}{2l_x}. \quad (6.6)$$

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. 6.1](#).

Ќе започнеме од брановата равенка за три димензии:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p, \quad (6.7)$$



Слика 6.1: Затворена просторија со облик на паралелопипед.

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

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (6.8)$$

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:

$$p(x,y,z,t) = A\Psi(x,y,z)e^{j\omega t}, \quad (6.9)$$

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

$$\Psi(x,y,z) = X(x)Y(y)Z(z), \text{ или:} \quad (6.10)$$

$$\Psi = XYZ. \quad (6.11)$$

Со замена на овој израз во (6.9), а потоа во (6.7), добиваме:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} (A\Psi(x,y,z)e^{j\omega t}) = c^2 \nabla^2 A\Psi(x,y,z)e^{j\omega t}, \quad (6.12)$$

$$AXYZe^{j\omega t}(j\omega)^2 = c^2 Ae^{j\omega t} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} Y Z + \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} X Z + \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} X Y \right), \quad (6.13)$$

$$\frac{1}{X} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{1}{Y} \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + \frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = -\frac{\omega^2}{c^2} = -k^2. \quad (6.14)$$

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

$$\frac{1}{X} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} = -k_x^2, \quad (6.15)$$

$$\frac{1}{Y} \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} = -k_y^2, \quad (6.16)$$

$$\frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = -k_z^2. \quad (6.17)$$

$$(6.18)$$

Тогаш (6.14) преминува во:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2. \quad (6.19)$$

Граничните услови за звучното поле во оваа просторија велат дека:

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

Според (6.5) имаме:

$$k_x = \frac{n_x \pi}{l_x}, \quad n_x \in \mathbb{N}_0, \quad (6.20)$$

$$k_y = \frac{n_y \pi}{l_y}, \quad n_y \in \mathbb{N}_0, \quad (6.21)$$

$$k_z = \frac{n_z \pi}{l_z}, \quad n_z \in \mathbb{N}_0, \quad (6.22)$$

каде со \mathbb{N}_0 е означено множеството на природни броеви проширен со 0. Конечно од (6.19) за резонантните фреквенции на просторијата добиваме:

$$\frac{2\pi}{\lambda_N} = \pi \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}, \quad (6.23)$$

$$f_{\mathbf{n}} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}, \quad (6.24)$$

$$f_{\mathbf{n}} = \sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_z^2}. \quad (6.25)$$

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 :

$$\mathbf{n} = [n_x, n_y, n_z] \quad (6.26)$$

Секоја тројка \mathbf{n} претставува една резонантна фреквенција, или [мод](#), на оваа затворена просторија. 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 граничните површини, определена од тоа n кое има вредност 0. Најсложените [просторни стојни бранови](#) се описаны со тројки во кои сите n се различни од 0.

Од (6.24) може да се види дека најниската резонантна фреквенција за оваа просторија се добива за аксијалниот стоен 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:

$$f_{1,0,0} = \frac{c}{2l_x}, \quad (6.27)$$

што е еквивалентно со (6.6) за $n = 1$.

6.2 Број на модови во една просторија

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 $f_{1,1,1}$:

$$N_f \approx \frac{V_f}{V_0} = \frac{\frac{1}{8} \frac{4\pi f^3}{3}}{\frac{c}{2l_x} \frac{c}{2l_y} \frac{c}{2l_z}} = \frac{\frac{1}{8} \frac{4\pi f^3}{3}}{\frac{c^3}{8V}} = \frac{4\pi V f^3}{3c^3}. \quad (6.28)$$

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

$$N_f = \frac{4\pi V}{3c^3} f^3 + \frac{\pi S}{2c^2} f^2 + \frac{L}{8c} f, \quad (6.29)$$

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 (6.29) преминува во:

$$\Delta N_f = \left(\frac{4\pi V f^3}{3c^3} + \frac{\pi S f}{2c^2} + \frac{L}{8c} \right) \Delta f. \quad (6.30)$$

Иако сите равенства беа изведени за просторија со паралелопипеден облик, во изразите (6.29) и (6.30) 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.

6.3 Пресметка на распределбата на модови

Практичен дел

Да го искористиме равенството 6.23 за да ги пресметаме фреквенциите на модовите кои ги опфаќа коцката со ќош во точката (3, 3, 3) и координатниот почеток во k просторот на фреквенции:

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

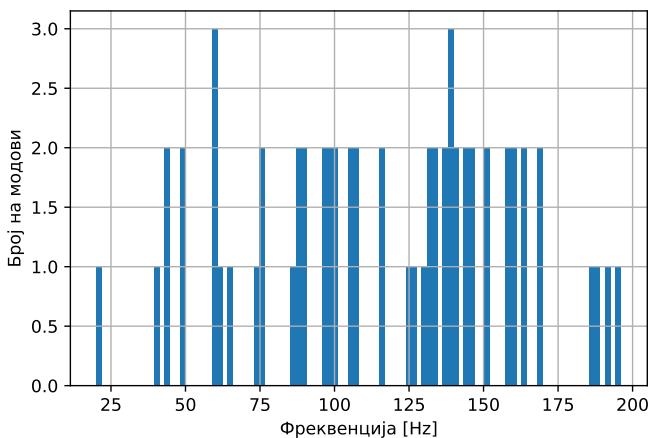
# %% иницијализации
c = 343 # m/s
dims = 8.5, 3.9, 3.9 # lx, ly, lz
n_max = 3
ns = itertools.product( # генерирај комбинации
    range(n_max+1),
    range(n_max+1),
    range(n_max+1)
)
ns = list(ns)[1:]

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

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

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

plt.figure()
```



Слика 6.2: Хистограм на распределбата на модовите за ниските фреквенции на една просторија.

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

На Сл. 6.2 е прикажан добиениот хистограм. Се гледа дека за одредени фреквенции постои преклопување на модовите, кое е дотолку поизразено поради тоа што разгледаната просторија⁸³ има еднаква ширина и висина. Поради ова, стојните бранови на овие фреквенции ќе бидат уште поизразени.

6.4 Пресметка на звучно поле во просторија

Практичен дел

За пресметка на звучно поле во просторија за дадена фреквенција ќе го искористиме алатникот SFS⁸⁴. Тој содржи функции за проценка на звучното поле во секоја точка од просторијата преку сума на звучните бранови емитирани од виртуелните слики на изворот со кои се претставени рефлектираните звучни бранови. Ќе ги внесеме истите димензии за просторијата, а ќе го поставиме звучниот извор да еmitира тон од 88 Hz од нејзината средина. Бројот на рефлексии од секој сид ќе го ограничиме на 20.

```
import numpy as np
import sfs

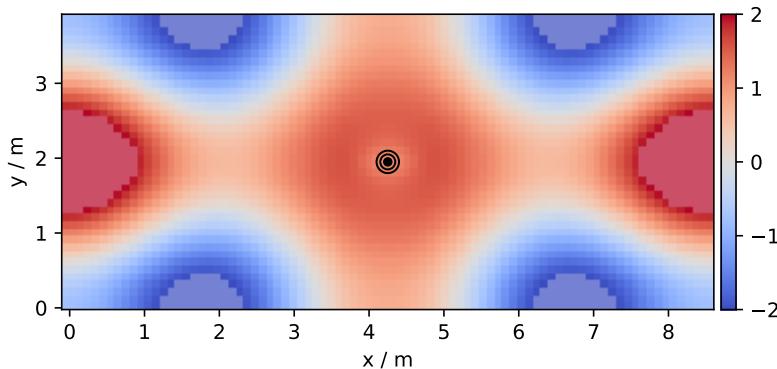
# %% иницијализација на просторијата
dims = 8.5, 3.9, 3.9 # l * w * h во m3
alpha = 0.01 # апсорпција на сидовите
n_order = 20 # максимален број на рефлексии
c = 343 # m/s

# %% исцртај го звучното поле
f = 88
omega = 2*np.pi*f
x0 = dims[0]/2, dims[1]/2, 1 # локација на изворот

grid = sfs.util.xyz_grid(
    (0, dims[0]),
    (0, dims[1]),
    dims[2] / 2,
    spacing=.1
)
```

⁸³Во случајов тоа е Лабораторијата за Дигитално процесирање на сигнали на ФЕИТ.

⁸⁴Sound Field Synthesis (SFS) Toolbox <https://github.com/sfstoolbox/sfs-python>



Слика 6.3: Распределба на звучното поле во просторијата добиено со извор поставен во нејзината средина кој еmitира звук со фреквенција од 88 Hz.

```
p = sfs.fd.source.point_modal(
    omega,
    x0,
    grid,
    dims,
    N=n_order,
    deltan=alpha,
)
p *= 0.05
sfs.plot2d.amplitude(p, grid)
sfs.plot2d.virtualsource(x0)
```

На Сл. 6.3 е прикажан добиеното звучно поле. Можеме да видиме дека за фреквенција од 88 Hz се јавуваат јасно изразени стојни бранови со врвови на работите од просторијата но и во нејзината средина. Ако слушателот се движи од левиот до десниот ѕид, ќе слушне промена во амплитудата на еmitуваниот тон и покрај тоа што изворот го зрачи со непроменета моќност.

6.5 Влијание на модовите врз интензитетот на звукот

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. Иако 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 дефиниран со:

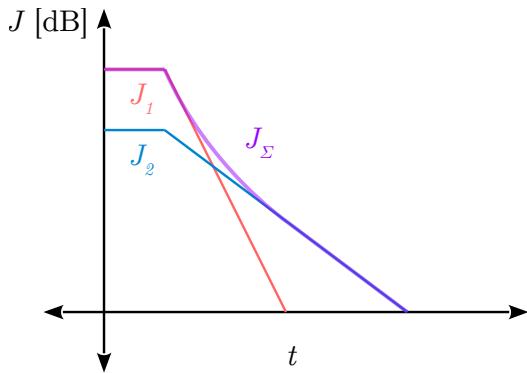
$$Q = \frac{f_r}{\Delta f}, \quad (6.31)$$

каде f_r е резонантната фреквенција, а Δf е фреквенцискиот опсег околу неа за кој вибрациите се поголеми од половината на нивната моќ на резонантната фреквенција, односно за кој преносната карактеристика на модот паѓа под -3 dB.

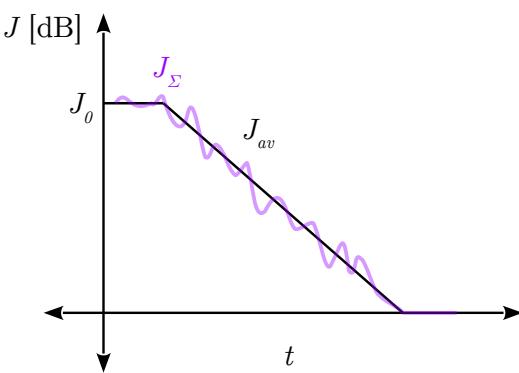
Поради тоа што сопствените фреквенции на просториите се густо распоредени, како и поради тоа што изворите на звук генерираат поширок спектар, вообичаено тие побудуваат поголем број на резонантни фреквенции. Изразеноста на дадени резонантни фреквенции над другите може да се забележи во областа на ниските фреквенции, за кои густината на сопствените фреквенции е помала. Ова е посебно изразено кога просторијата има правилни димензии, како кај квадратните и кружните простории.

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

$$p_i = p_{i0} e^{-\delta_i t}, \quad (6.32)$$



Слика 6.4: Интензитет на звукот во просторија со два извора со различна моќност и различен коефициент на опаѓање.



Слика 6.5: Интензитет на звукот во просторија со многу различни извори.

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

$$J = \sum_i J_i = \sum_i J_{i0} e^{-2\delta_i t}. \quad (6.33)$$

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. 6.4. 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:

$$J = J_0 e^{-2\delta t} \sum_i \frac{J_{i0}}{J_0} e^{-2(\delta_i - \delta)t}. \quad (6.34)$$

Тука δ е средниот коефициент на опаѓање, а J_0 е вкупниот интензитет на звукот пред неговото исклучување даден со:

$$J_0 = \sum_i J_{i0}. \quad (6.35)$$

Ова е илустрирано на Сл. 6.5.

6.6 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.⁸⁵ Оваа апсорпција се описува со помош на коефициентот на апсорпција α даден со:

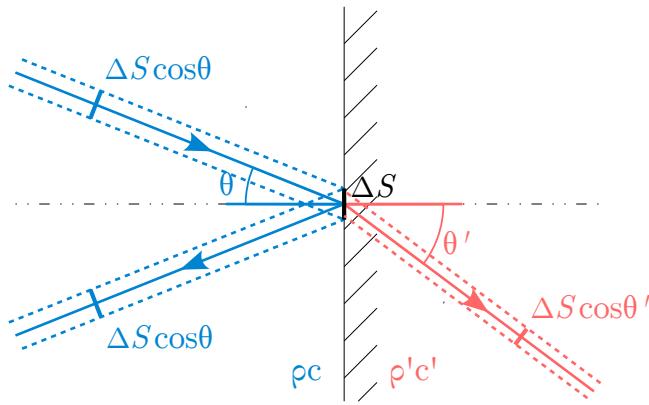
$$\alpha = \frac{P_\alpha}{P_i}. \quad (6.36)$$

Тука со P_i е означена акустичката моќност на звучниот бран пред одбивањето, а со P_α е означена апсорбираната акустичка моќност во втората средина, која дел се претвора во топлина, а дел продолжува да се простира понатаму. За описување на коефициентот на апсорпција преку интензитетот на звукот треба да го земеме во обсир аголот на инциденција на звучниот бран θ , илустриран на Сл. 6.6. Поради тоа што во втората средина бранот продолжува да се простира под агол θ' различен од θ според Снеловиот закон⁸⁶:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta'} = \frac{c}{c'}, \quad (6.37)$$

⁸⁵Исклучок од ова правило се големите простории во кои треба да земат во обсир и загубите поради простирање описаны во Поглавјето 2.18, особено за високите фреквенции.

⁸⁶Види Поглавје 2.15.



Слика 6.6: Звучен сноп кој делумно се одбива од граничната површина ΔS , а делумно продолжува да се простира во втората средина.

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

$$\Delta S_\theta = \Delta S \cos \theta, \quad (6.38)$$

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

$$\alpha_\theta = 1 - \frac{J_r}{J_i} = 1 - \left| \frac{p_-}{p_+} \right|^2 = 1 - r^2, \quad (6.39)$$

каде r е факторот на рефлексија.

За нормална инциденција важи:

$$\alpha_0 = 1 - \left| \frac{Z_s - \rho c}{Z_s + \rho c} \right|^2, \quad (6.40)$$

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:

$$\alpha_\theta = 1 - \left| \frac{Z_n - \frac{\rho c}{\cos \theta}}{Z_n + \frac{\rho c}{\cos \theta}} \right|^2. \quad (6.41)$$

Иако со употреба на (6.41) 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 прозорец“.

6.7 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 патеки, па имаат различни притисоци и фазни ставови. Притоа може да се претпостави дека во целата просторија звучното поле има еден ист среден интензитет.
2. **дифузност** - сите правци на простирање се рамноправно застапени.

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

$$\frac{dW}{dt} = P_a - P_\alpha = 0, \quad (6.42)$$

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:

$$\Delta P_i = \frac{J}{4} \Delta S. \quad (6.43)$$

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

$$\Delta P_\alpha = \alpha \Delta P_i. \quad (6.44)$$

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

$$P_\alpha = \sum_i \Delta P_{\alpha i} = \frac{J}{4} \sum_i \alpha_i \Delta S_i = \frac{J}{4} A, \quad (6.45)$$

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

$$A = \sum_i A_i = \sum_i \alpha_i \Delta S_i = \bar{\alpha} S. \quad (6.46)$$

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

$$W = EV, \quad (6.47)$$

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

$$E = \frac{J}{c}, \quad (6.48)$$

тогаш заменувајќи ги (6.47) и (6.45) во (6.42) добиваме:

$$\frac{dW}{dt} = P_a - \frac{J}{4} A, \quad (6.49)$$

$$\frac{dJ}{dt} = \frac{c}{V} P_a - \frac{cA}{V4} J. \quad (6.50)$$

Решението на оваа диференцијална равенка од прв ред е:

$$J = \frac{4P_a}{A} - Ce^{-\frac{A}{4V}ct}, \quad (6.51)$$

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 (6.51) ја добива следната форма:

$$J = \frac{4P_a}{A} \left(1 - e^{-\frac{A}{4V}ct} \right). \quad (6.52)$$

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:

$$J_0 = \frac{4P_a}{A}, \quad (6.53)$$

која можеше да се добие и директно од (6.49) со изедначување на 0.

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

$$J_0 = J_d + J_r, \quad (6.54)$$

за кои важи:

$$J_d = \gamma \frac{P_a}{4\pi r^2} = \bar{\alpha} J_0, \quad (6.55)$$

$$J_r = (1 - \bar{\alpha}) J_0. \quad (6.56)$$

За периодот по исклучување на изворот важи следниот почетен услов:

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

па од (6.51) имаме:

$$J = J_0 e^{-\frac{A}{4V} ct}. \quad (6.57)$$

6.8 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 нивото на звук во просторијата да опадне за 60 dB од моментот на исклучување на изворот. Овој пад на нивото го избрал Сабин затоа што толку приближно изнесува и вистинското времетраење на звукот во просторијата кое може да се одреди со помош на сетилото за слух.⁸⁷

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:

$$T = T_{60} = 2T_{30} = 3T_{20}. \quad (6.58)$$

Времето на реверберација може да го одредиме од (6.57) ако поставиме следниот услов:

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

⁸⁷Wikipedia: Wallace Clement Sabine. https://en.wikipedia.org/wiki/Wallace_Clement_Sabine

Имаме:

$$J_0 \cdot 10^{-6} = J_0 e^{-\frac{A}{4V} cT}, \quad (6.59)$$

$$10^{-6} = e^{-\frac{A}{4V} cT}, \quad (6.60)$$

$$\ln 10^{-6} = -\frac{A}{4V} cT, \quad (6.61)$$

$$\frac{\log 10^{-6}}{\log e} = -\frac{A}{4V} cT, \quad (6.62)$$

$$T = \frac{24V}{cA \log e}. \quad (6.63)$$

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

$$T = \frac{0,16V}{A} = \frac{0,16V}{\bar{\alpha}S}. \quad (6.64)$$

Ова равенство, во склад со почетните претпоставки што ги направивме во [Поглавјето 6.7](#), односно дека $\bar{\alpha}$ е мало, не важи сосема за простории со голема апсорпција.⁸⁸ 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 [\(6.57\)](#) добиваме:

$$J = J_0 e^{-\frac{A}{4V} ct} e^{-mct} = J_0 e^{-\frac{A+4mV}{4V} ct}, \quad (6.65)$$

па за T се добива:

$$T = \frac{0,16V}{A + 4mV}. \quad (6.66)$$

6.9 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. [6.7](#) 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:

$$dS_n = dS \cos \theta, \quad (6.67)$$

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

$$dV = l dS_n. \quad (6.68)$$

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:

$$2V = \oint_S l \cos \theta dS = \bar{l} \overline{\cos \theta} S. \quad (6.69)$$

⁸⁸Ако замениме $\bar{\alpha} = 1$ нема да добијеме $T = 0!$

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:

$$\overline{\cos \theta} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \sin \theta d\theta = \frac{1}{2}. \quad (6.70)$$

Конечно за средната должина на слободната патека добиваме:

$$\bar{l} = \frac{4V}{S}. \quad (6.71)$$

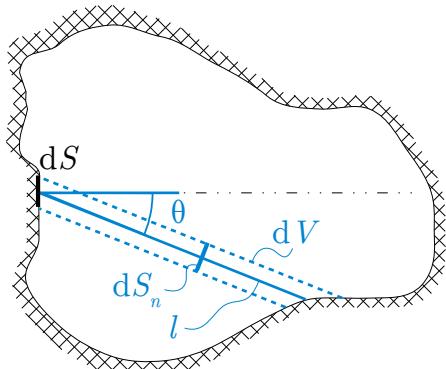
6.10 Мерење на импулсниот одсив на просторија

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

- **импулсна звучна побуда** – генерирана со пукнување на балон, пиштол или со воспоставување на електричен лак.
- **секвенца со максимална должина (MLS)⁸⁹** – псевдослучајна бинарна секвенца која има спектрална карактеристика на бел шум.
- **синусен тон со променлива фреквенција⁹⁰**.

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

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



Слика 6.7: Просторија со произволен облик и средна должина на слободната патека на звукот во неа.

⁸⁹Wikipedia: Maximum length sequence. https://en.wikipedia.org/wiki/Maximum_length_sequence

⁹⁰анг. *sine sweep*.

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 $h[n]$:

$$y[n] = h[n] * x[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h[m]x[n-m]. \quad (6.72)$$

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:

$$y[n] \star x[n] = h[n] * x[n] \star x[n] = h[n], \quad (6.73)$$

каде со \star е означенa корелацијата:

$$y[n] \star x[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} y[m]x[m+n]. \quad (6.74)$$

Споредувајќи ги (6.72) и (6.74) 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:

$$y[n] \star x[n] = h[n] * x[n] * \overleftarrow{x}[n] = h[n]. \quad (6.75)$$

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

$$y[n] * x^{-1}[n] = h[n] * x[n] * x^{-1}[n] = h[n], \quad (6.76)$$

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

$$Y[k] \cdot X^{-1}[k] = H[k] \cdot X[k] \cdot \frac{1}{X[k]} = H[k], \quad (6.77)$$

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

6.11 Мерење на импулсниот одсив на просторија

Практичен дел

Во овој практичен дел ќе искористиме синусна побуда за снимање на импулсниот одсив на Лабораторијата по Дигитално процесирање на сигнали на ФЕИТ.⁹¹ Валидноста на резултатите зависи од квалитетот на мерната опрема, но аматерско мерење може да направиме и со обичен микрофон и пар звучници. За таа цел, повторно ќе се послужиме со програмскиот пакет Пајтон.

Генерирање на побудата

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

$$x(t) = \sin \theta(t) = \sin \frac{\omega_l T}{r_\omega} (e^{-t \frac{r_\omega}{T}} - 1). \quad (6.78)$$

⁹¹Овој практичен дел е инспириран од соработката со проф. д-р Дејан Ђириќ од Електронскиот факултет на Универзитетот во Ниш, Србија и истоимената вежба од практикумот по предметот Акустика кој тој го води.

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

$$r_\omega = \ln \frac{\omega_l}{\omega_h}, \quad (6.79)$$

а T е времетраењето на синусниот сигнал.

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

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

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

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

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

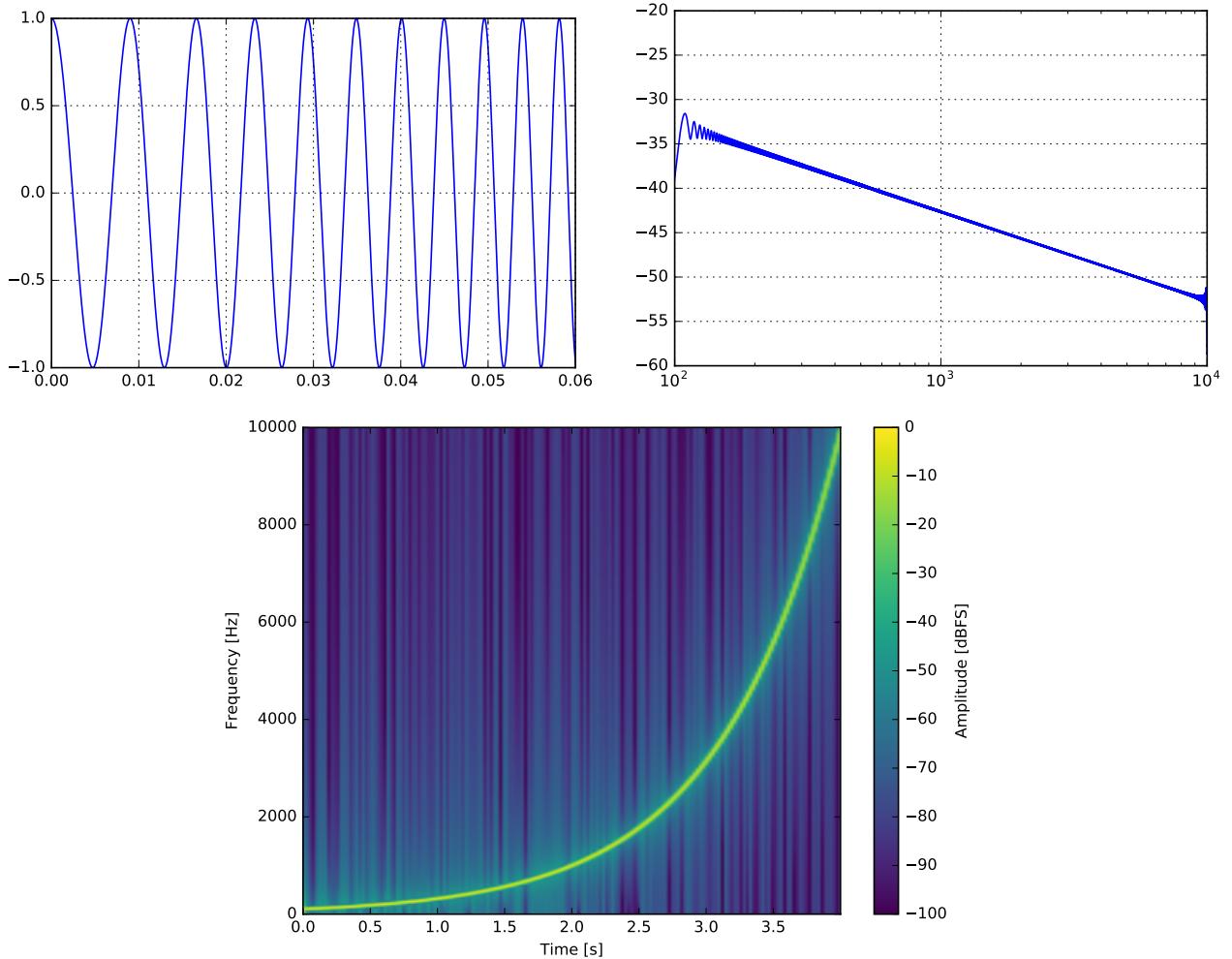
# %% play sound
wavfile.write('sweep.wav', fs, np.int16(sweep * 2**15))
os.system('play sweep.wav')
```

Добиениот сигнал на побуда е прикажан на Сл. 6.8 во временски и фреквенциски домен, како и преку спектограм.

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

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = -\omega_l e^{-t \frac{r_\omega}{T}}. \quad (6.80)$$

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



Слика 6.8: Побудниот синусен сигнал претставен во временски и спектрален домен и во вид на спектограм.

промената на фреквенцијата, односно ќе имаме:

$$E(t) \propto \frac{1}{\frac{d\omega(t)}{dt}} = \frac{T}{\omega_l r_\omega} e^{t \frac{r_\omega}{T}}. \quad (6.81)$$

Фуриевата трансформација на експоненцијална функција е дадена со:

$$\mathcal{F}\{e^{at}\} = \int_0^\infty e^{at} e^{-j\omega} dt = -\frac{1}{-a + j\omega} e^{-(a+j\omega)t} \Big|_0^\infty = \frac{1}{-a + j\omega}. \quad (6.82)$$

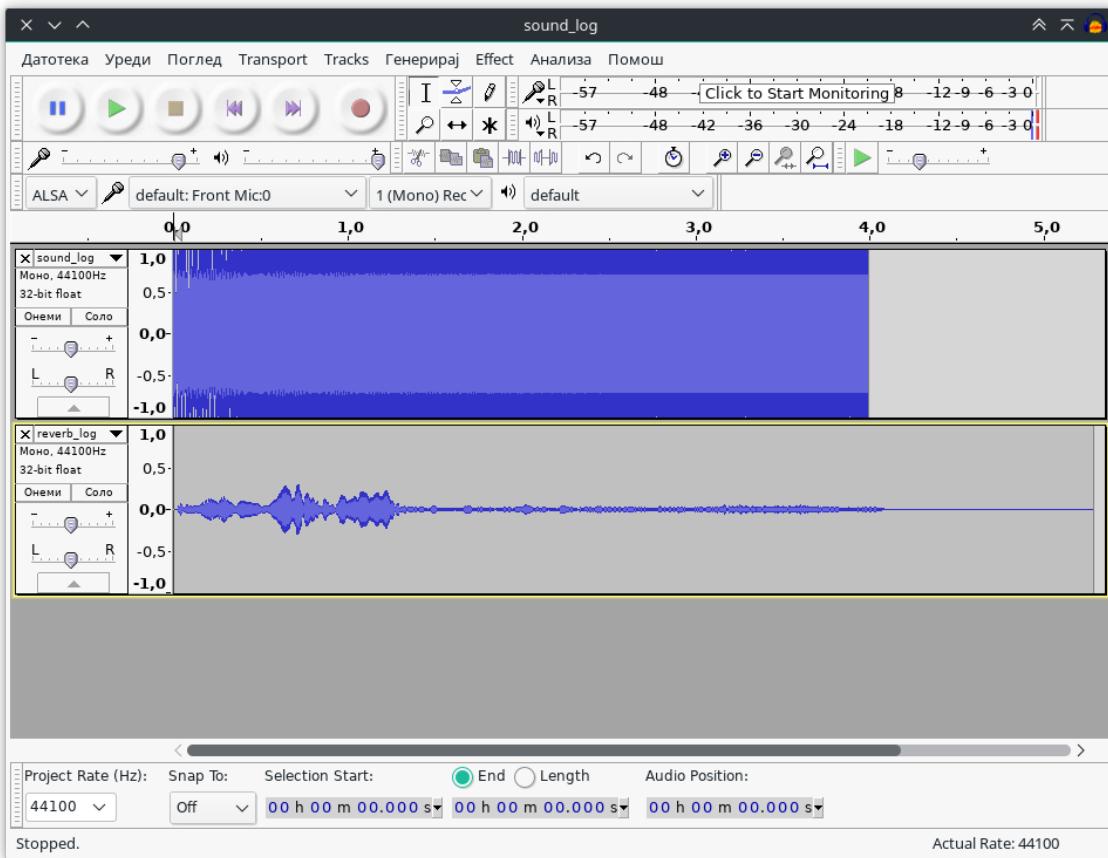
Оттука за (6.81) имаме:

$$E(j\omega) = k \frac{T}{\omega_l r_\omega} \cdot \frac{1}{-\frac{r_\omega}{T} + j\omega}, \quad (6.83)$$

каде со k е претставена константата на пропорционалност. Од 6.83 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. 6.8.

Снимање на реверберацијата на просторијата

Вака генериралиот сигнал на побуда треба да го пуштиме на звучниците и да го снимиме со микрофонот. За таа цел ќе го вчитаме во програмскиот пакет Аудасити со кој веќе се запознавме во Поглавјето . По вчитувањето доволно е да притиснеме на копчето за снимање и аудио фајлот ќе биде пуштен на звучниците при самото снимање. Резултатите на ваквото снимање, прикажани на Сл. 6.9, зачувајте ги во wav фајл.



Слика 6.9: Снимање на одсивот на просторијата во Аудасити.

Прикажување на снимениот одсив на просторијата

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

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

Од спектрограмот даден на Сл. 6.10 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 8.

Генерирање на инверзниот сигнал на побудата

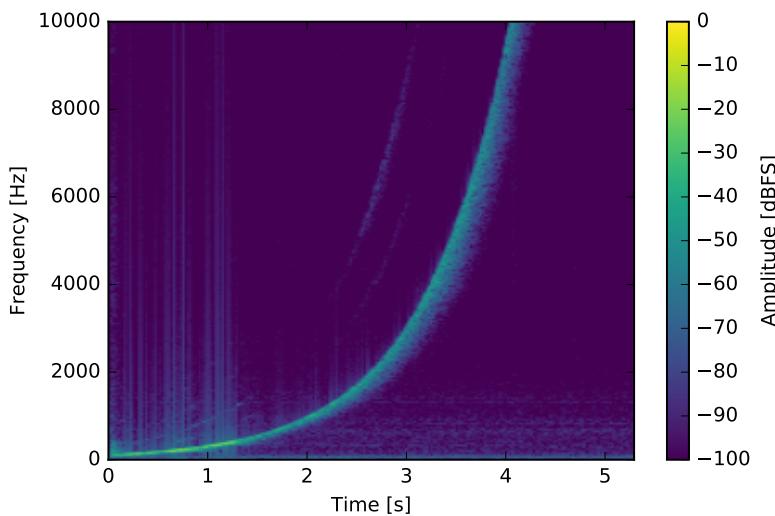
За конструкција на инверзниот сигнал на побудата, најпрвин ќе го превртиме временски генерираниот сигнал. Потоа ќе мора да го компенсираме падот на енергијата во зависност од фреквенцијата преку модулирање на превртениот сигнал со сигнал кој има еднаков раст на енергијата со фреквенцијата:

$$x_m(t) = \sin \theta_m(t), \quad (6.84)$$

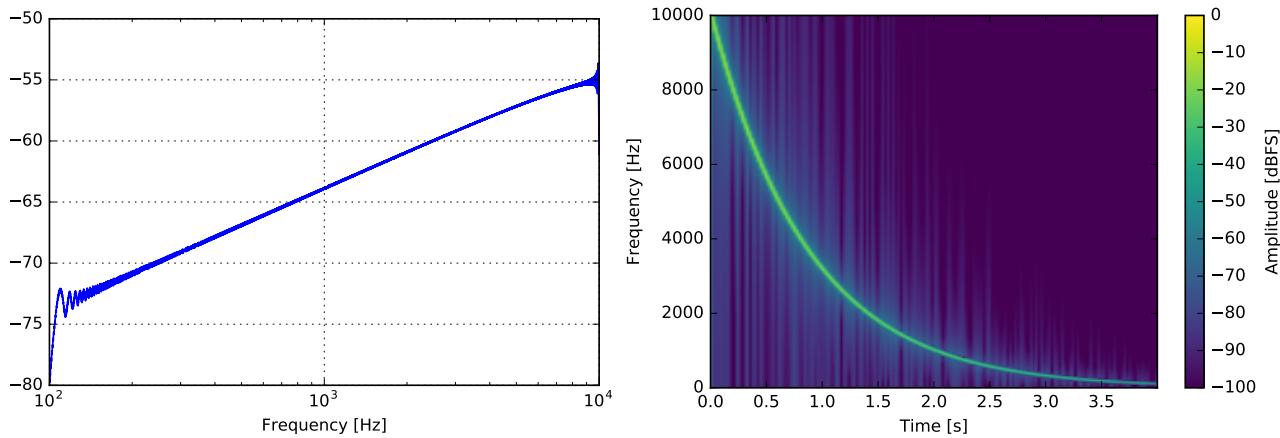
каде $\theta_m(t)$ е дадено со:

$$\theta_m(t) = \int \omega_m(t) dt = \int \frac{A}{\omega(t)} dt, \quad (6.85)$$

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



Слика 6.10: Спектрограм на снимената реверберација на просторијата.



Слика 6.11: Спектар и спектрограм на инверзниот сигнал.

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

$$\theta_m(t) = \int \frac{\omega_l}{-\omega_l e^{-t\frac{r_\omega}{T}}} dt = \int -e^{t\frac{r_\omega}{T}} dt = -\frac{T}{r_\omega} e^{t\frac{r_\omega}{T}}, \quad (6.86)$$

$$x^{-1}(t) = \overleftarrow{x}(t) \cdot \sin -\frac{T}{r_\omega} e^{t\frac{r_\omega}{T}}. \quad (6.87)$$

Да го генерираме овој сигнал во Пајтон.

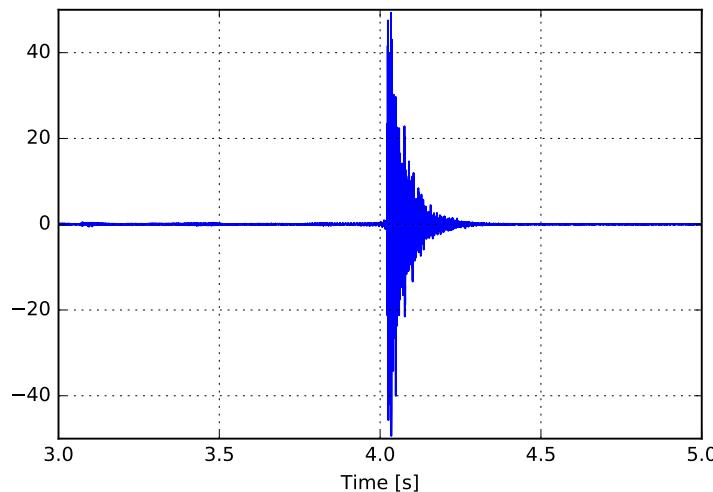
```
th_m = -T/r_w * np.exp(t*r_w/T)
modulation = np.sin(th_m)
inverse = sweep[::-1] * modulation

# %% 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. 6.11

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



Слика 6.12: Временски облик на пресметаниот импулсен одсив на просторијата.

одсив на собата и инверзниот сигнал на побудата. Така добиениот одсив е прикажан на Сл. 6.12. Сосема малку може да се забележат предехата предизвикани од хармониските изобличувања на звучникот. Поизразен приказ на оваа појава е даден во Поглавјето .

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

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

Следно ќе го изолираме делот од добиениот сигнал кој одговара на бараниот импулсен одсив на просторијата и ќе го прикажеме во вид на спектрограм и преку водопад дијаграм⁹². Од така изолираниот одсив ќе ја пресметаме и преносната функција на просторијата.

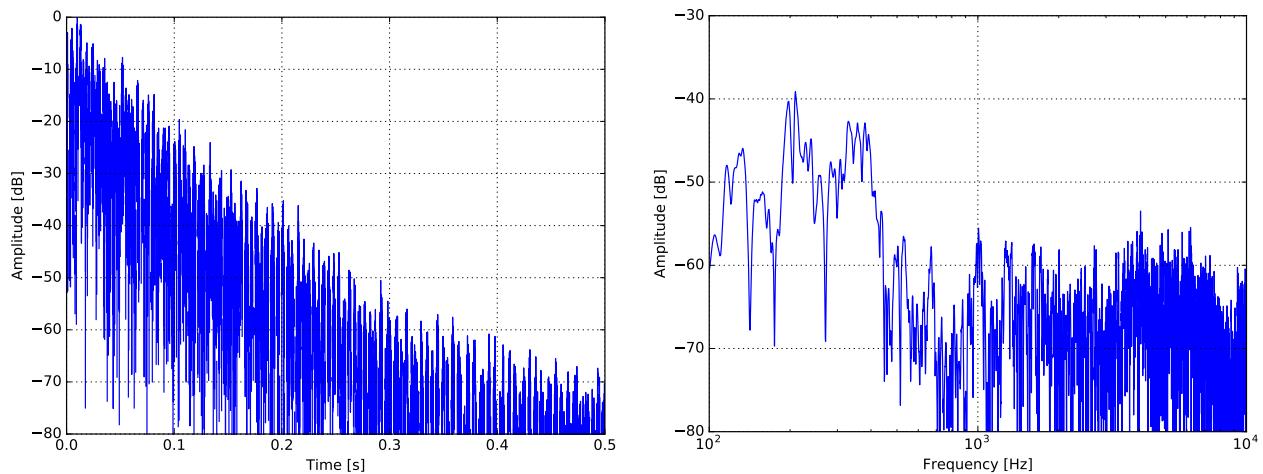
```
# %% isolate impulse response
room_response = room_response / np.max(np.abs(room_response))
max_ind = np.argmax(room_response)
t_minus = 0.01 # s
t_plus = 1 # s
room_response_trimmed = room_response[
    int(max_ind - t_minus*fs) : int(max_ind + t_plus*fs)
]

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

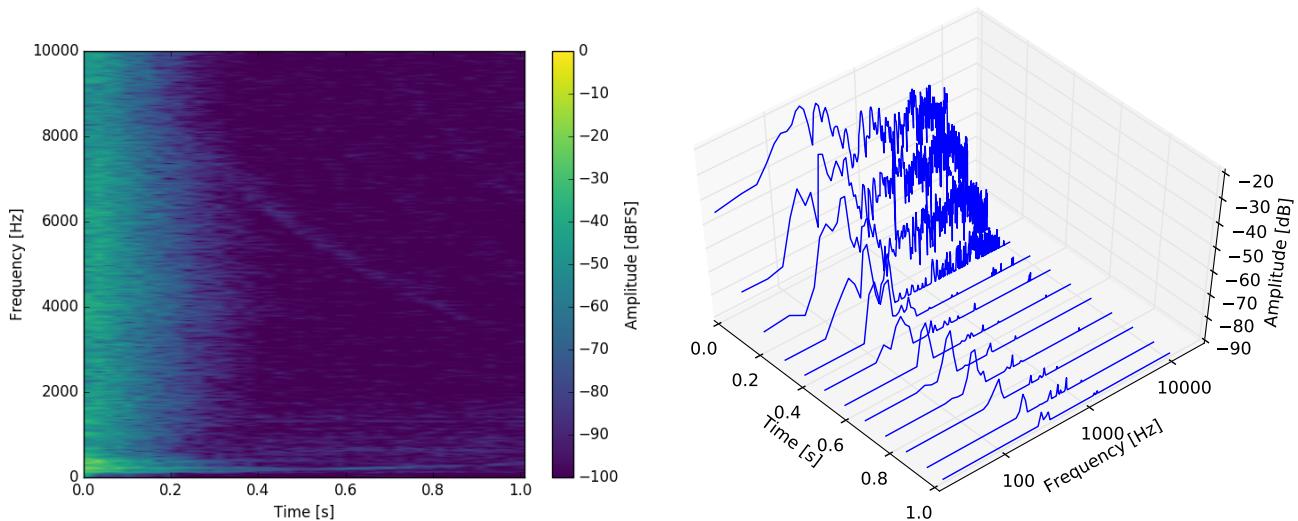
# %% transfer function (spectrum)
f, transfer_func = ea.get_spectrum(fs, room_response_trimmed)
plt.figure()
plt.plot(f, transfer_func)
plt.xscale('log')

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

⁹²анг. *waterfall diagram*.



Слика 6.13: Графички приказ на импулсниот одсив на просторијата преку неговиот временски облик во dB (лево) и спектралниот облик, т.е. преносната функција (десно).

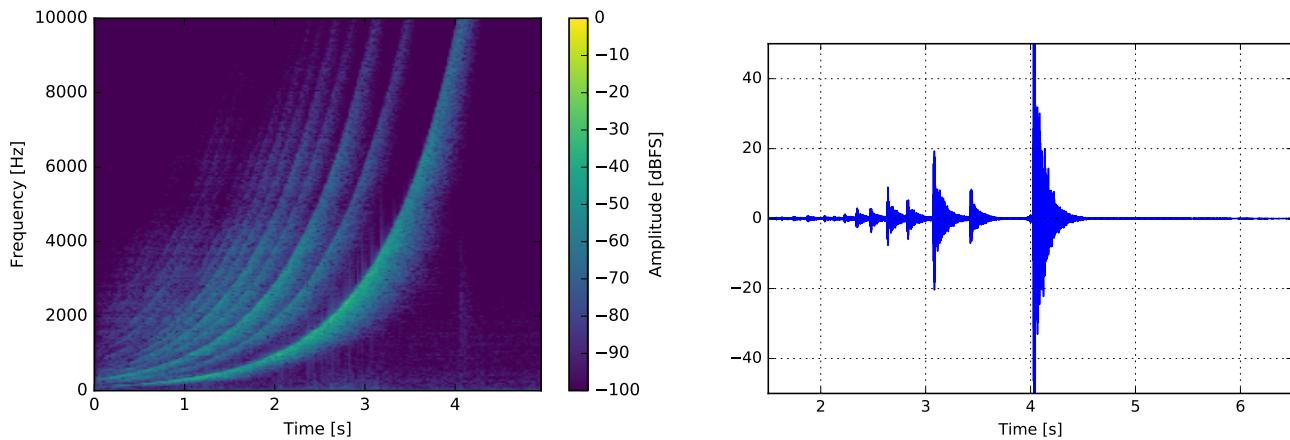


Слика 6.14: Графички приказ на импулсниот одсив на просторијата преку неговиот спектрограм (лево) и водопад дијаграм (десно).

```
# %% 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. 6.13 и 6.14. 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.



Слика 6.15: Спектрограм на снимената реверберација (лево) и временски облик на пресметаниот импулсен одсив (десно) на просторијата со употреба на неквалитетен звучник.

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 симена реверберација со неквалитетен звучник е прикажана на Сл. 6.15. На истата слика е прикажан и пресметаниот импулсен одсив во кој се јасно воочливи предеха предизвикани од изобличувањата на звучникот. Тие можат лесно да се отстранат од добиениот импулсен одсив со отсекување.

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

Поглавје 7

Микрофони

7.1 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.

7.2 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. 7.1, кој е еден од најпрочуените и најдобри кондензаторски микрофони во историјата на музичката индустрија, се дадени во Табела 7.1.

⁹³ Превземено од http://www.neumann.com/?lang=en&id=current_microphones&cid=u87_description



Слика 7.1: Кондензаторски микрофон Neumann U87.⁹³



Слика 7.2: Фреквенциска карактеристика на микрофонот Neumann U87.⁹⁴

Осетливост

Осетливоста T ⁹⁵ 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](#):

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

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](#):

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

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 7.1 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

⁹⁴ Превземено од http://www.neumann.com/download.php?download=copi0173_U87Ai_068820-A11_10-2014.pdf

⁹⁵ Факторот на претворање се обележува со T кај сите трансдусери.

Табела 7.1: 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 kΩ |
| Equivalent noise level, CCIR | 26/23/25 dB |
| Equivalent noise level, A-weighted | 15/12/14 dB-A |
| Signal-to-noise ratio, CCIR (rel. 94 dB SPL) | 68/71/69 dB |
| Signal-to-noise ratio, A-weighted (rel. 94 dB SPL) | 79/82/80 dB |
| Maximum SPL for THD 0.5% | 117 dB (cardiod) |
| Maximum SPL for THD 0.5% with preattenuation | 127 dB |
| Maximum output voltage | 390 mV |
| Supply voltage (P48, IEC 61938) | 48 V ± 4 V |
| Current consumption (P48, IEC 61938) | 0.8 mA |
| Matching connectors | XLR3F |
| Weight | 500 g |
| Diameter | 56 mm |
| Length | 200 mm |

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 карактеристики на Neumann U87 е дадена на Сл. 7.2. 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 мембрраната. Притоа осетливоста се прикажува релативно во однос на референтната осетливост на микрофонот при нормална инциденција $\theta_0 = 0$ којашто е и најголема:

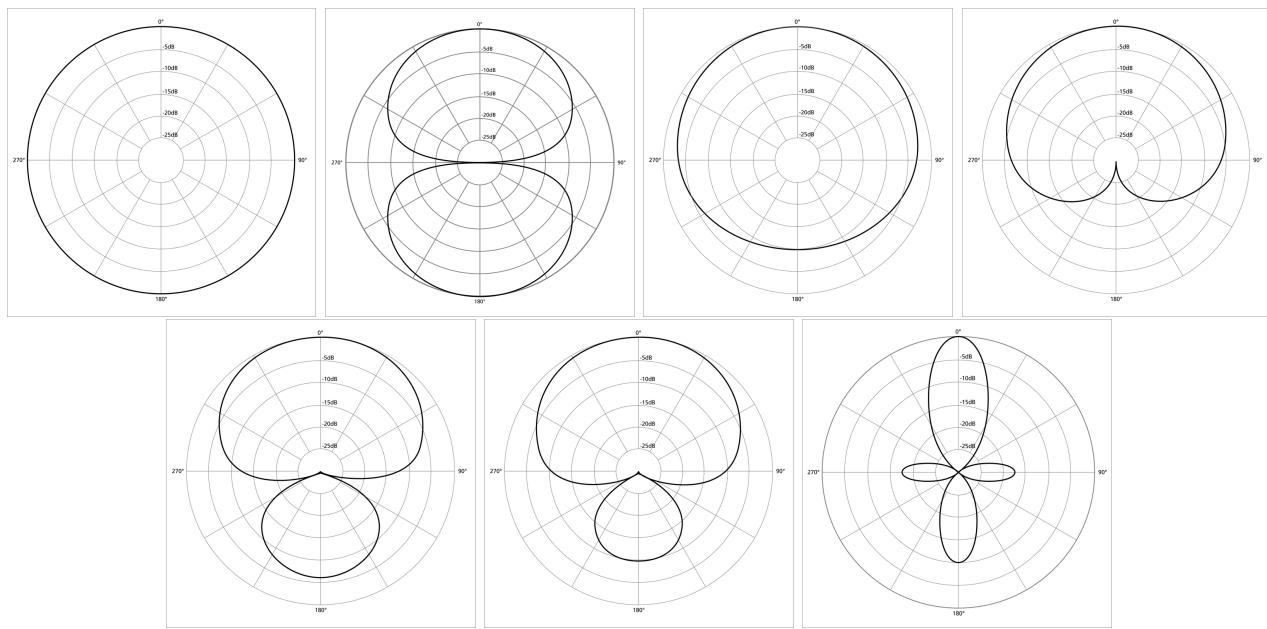
$$\Gamma(\theta) = \frac{T_\theta}{T_0}. \quad (7.3)$$

На графиците овој однос вообичаено се исцртува во dB.

Постојат различни типови на криви на насоченост кај микрофоните илустрирани на Сл. 7.3. 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. 7.4 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,

⁹⁶Galak76, "Polar pattern omnidirectional", "Polar pattern figure eight", "Polar pattern subcardioid", "Polar pattern cardioid", "Polar pattern hypercardioid", "Polar pattern supercardioid", "Polar pattern directional", <https://en.wikipedia.org/wiki/Microphone>.



Слика 7.3: Различни криви на насоченост на микрофоните (од горе надолу, од лево надесно): омнидирекционална, бидирекционална (осмица), субкардиоида, кардиоида, хиперкардиоида, суперкардиоида и супердирекционална.⁹⁶

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:

$$\gamma_m = \frac{4\pi}{\int_0^{4\pi} \Gamma^2 d\Omega} = \frac{4\pi}{\Omega_m}, \quad (7.4)$$

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:

$$\gamma_m [\text{dB}] = 10 \log \gamma_m. \quad (7.5)$$

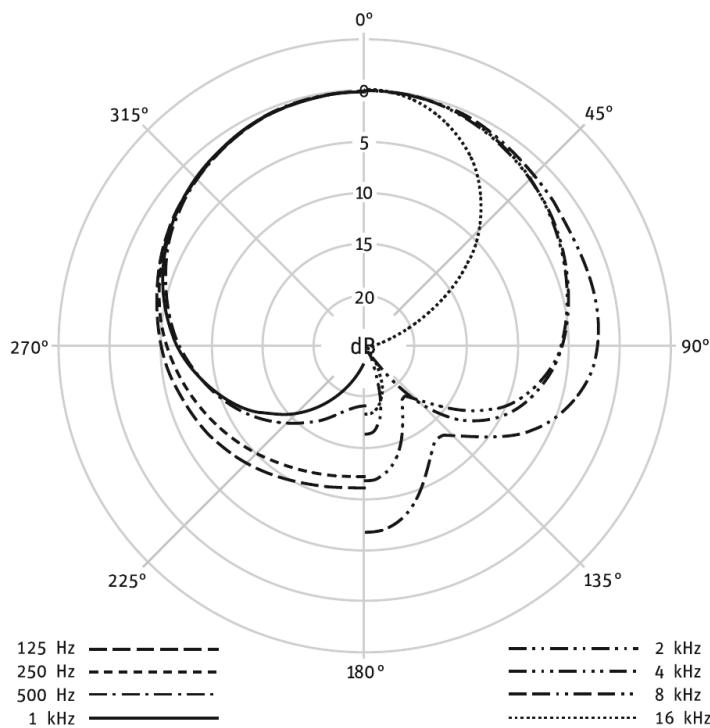
Динамички опсег

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:

$$u_n = \sqrt{1,64 \cdot 10^{-20} R \Delta f}, \quad (7.6)$$

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

⁹⁷Превземено од http://www.neumann.com/download.php?download=copi0173_U87Ai_068820-A11_10-2014.pdf



Слика 7.4: Крива на насоченост – кардиоида на Neumann U87 за различни фреквенции.⁹⁷

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 7.1 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.

7.3 Поделба на микрофоните

Типовите на микрофони можат да се поделат од две аспекти:

1. Акустичката поделба ги дели микрофоните според величината на звучното поле од која непосредно зависи силата која влијае на нивната мембра на. Така, постојат

притисочни, градиентни и комбинирани микрофони. Од акустичката поделба, зависи карактеристиката на насоченост на микрофоните. Така, притисочните микрофони се ненасочени, градиентните имаат крива во облик на осмица, а комбинираните кардиоида.

2. **Електричната поделба** ги дели микрофоните според начинот на кој добиените вибрации на мембрата се претвораат во електрични осцилации. Според неа, тие се делат на контактни, електромагнетни, електродинамички, електростатски, и пиезоелектрични.

Акустичка поделба на микрофоните

Притисочни микрофони

Притисочни микрофони се оние кај кои поместувањето или брзината на мембрата зависат од вредноста на звучниот притисок. Кај овие микрофони мембрата е изложена на дејството на звучните бранови само од едната своја страна. Со тоа силата која делува на мембрата изнесува:

$$F = pS, \quad (7.7)$$

каде p е звучниот притисок кој делува врз мембрата, додека S е нејзината површина.

Еквивалентното електрично коло на овој вид на микрофони претставува сериска помеѓу еластичноста C_{ekv} , масата на мембрата m_{ekv} , и отпорноста R_{ekv} . Притоа, еквивалентната капацитивност C_{ekv} во себе ги опфаќа и еластичноста со која мембрата е прицврстена за телото на микрофонот C_m и акустичката капацитивноста на затворениот волумен воздух зад мембрата C_a . Од друга страна, еквивалентната индуктивност m_{ekv} и еквивалентната отпорност R_{ekv} во себе ги опфаќаат масата на мембрата m , механичките загуби R_m и импедансата на зрачење Z_a .

Според тоа, брзината на движење на мембрата ќе биде дадена со:

$$v = \frac{pS}{\sqrt{R_{ekv}^2 + (\omega m_{ekv} - \frac{1}{\omega C_{ekv}})^2}}. \quad (7.8)$$

Резонантната фреквенција на ова коло е дадена со:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{m_{ekv}C_{ekv}}}, \quad (7.9)$$

при која брзината има постигнува најголема вредност дадена со:

$$v = \frac{pS}{R_{ekv}}. \quad (7.10)$$

Бидејќи брзината на мембрата е одредена само од еквивалентната отпорност, овој режим на работа се нарекува отпорничко кочење.

градиентни – кај кои тие се сразмерни на градиентот на притисокот, и

комбинирани – кај кои влијаат и вредноста на притисокот и неговиот градиент.

- **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 мембрата 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 8

Звучници

во соработка со Владимир Филевски⁹⁸

Звучниците се електроакустички преобразувачи со спротивната задача од микрофоните – да ги преобразат електричните осцилации во акустички. Со нив секојдневно се скрекаваме бидејќи тие претставуваат последната, а и најкритичната алка во секој електроакустички ланец. Како и микрофоните, звучниците содржат мембрана со која ги генерираат звучните бранови. Уште повеќе, поради еднаквоста на принципот на работа, секој звучник може да се употреби како микрофон и обратно. Сепак, за разлика од микрофоните, мембраната кај звучниците е многу поголема затоа што таа треба со својата моќност на зрачење да ги замени звучните извори, кои некогаш можат да бидат и цел филхармониски оркестар.

8.1 Основни карактеристики на звучниците

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

- фактор на преобразба,
- фреквенциска карактеристика,
- крива на насоченост,
- фактор на насоченост,
- импеданса,
- ефикасност,
- степен на искористување,
- номинална моќност и
- фактор на изобличување.

Карактеристиките на мониторскиот звучник Генелек⁹⁹ 8040B прикажан на Сл. 8.1, се дадени во

⁹⁸Дипл. инж. Владимир Филевски дипломирал на Електротехничкиот факултет (денешен ФЕИТ) во Скопје, насока електроника и телекомуникации. Член е на IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) и AES (Audio Engineering Society). Во 2007 год. ја оформува фирмата Аудио Експерт која се занимава исклучиво со аудиотехника. Тој е Генерален секретар на Националната асоцијација на пронаоѓачите на Македонија. Има патентирано 6 свои пронајдоци и е добитник на Сребрен медал за патентот „Мултимедија звучник“ на ЕУРЕКА 2004 – Светска изложба на патенти во Брисел, 2004 год и Златен медал за патентот „Засилувач за 50/60 Hz“ на ИЕНА 2010 – Меѓународна изложба на патенти во Нирнберг, 2010 год. За истиот патент е награден со признанието „Патент на годината“ што го доделува Државниот завод за заштита на индустриска сопственост на Македонија. Има објавено повеќе научни трудови од областа звучници во реномирани научни списанија и на низа меѓународни конференции.

⁹⁹Genelec



Слика 8.1: Мониторски звучник Генелек 8040B.¹⁰⁰

Табела 8.1.

Табела 8.1: Технички карактеристики на звучникот Генелек 8040B дадени од производителот.

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

Факторот на преобразба T го означува односот помеѓу излезната акустичка величина, најчесто звучниот притисок p , и влезната електрична величина, најчесто напонот u , кој вообичаено е константен на излез од засилувачите:

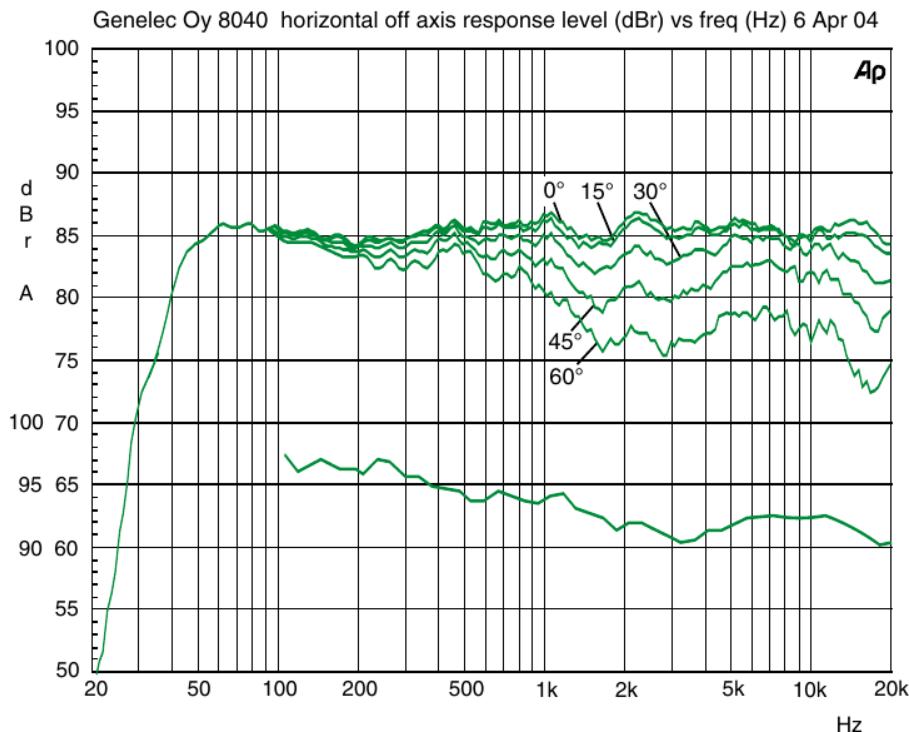
$$T = \frac{p}{u}. \quad (8.1)$$

Тука притисокот се дава вообичаено на 1 м растојание во правец на оската на звучникот. Слично како кај микрофоните, факторот на преобразба може да биде даден и во dB, т.н. [индекс на преобразба](#):

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

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

¹⁰⁰Превземено од <http://www.genelec.com/studio-monitors/8000-series-studio-monitors/8040b-studio-monitor>



Слика 8.2: Фреквенциска карактеристика и крива на насоченост на мониторскиот звучник Genelec 8040B.¹⁰¹

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:

$$\Gamma(\theta) = \frac{T_\theta}{T_0} = \frac{p_\theta}{p_0}. \quad (8.3)$$

За Генелек мониторските звучници, производителот ги дал овие карактеристики здружено на еден графикон прикажан на Сл. 8.2. Може да видиме дека за ниските фреквенции звучникот има омнидиреционална крива на насоченост, додека за високите таа станува се понасочена со порастот на фреквенцијата. Исто така може да забележиме дека во оската на зрачење звучникот има исклучително рамна фреквенциска карактеристика, што е неопходно за мониторските звучници кои се користат за преслушување на аудиосигналите за време на снимањето но и по него при нивната продукција во студиото.

Ефикасност, степен на искористување и номинална моќност

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

$$e = \frac{p}{\sqrt{P}} \quad (8.4)$$

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:

$$\eta = \frac{P_a}{P}. \quad (8.5)$$

¹⁰¹Превземено од <http://www.genelec.com/studio-monitors/8000-series-studio-monitors/8040b-studio-monitor>

Тој е особено важен при употреба на звучниците за озвучување на затворени простории, додека за озвучување на отворен простор поважни се ефикасноста и кривата на насоченост. Степенот на искористување може да се пресмета од ефикасноста и вообичаено е од редот на 1%.

Номиналната моќност на звучникот која ја дава производителот е електричната моќност која не смее да се надмине за дадените карактеристики на звучникот да не бидат нарушени. Некогаш се специфицира и т.н. **границна моќност**, над која производителот не гарантира дека нема да дојде до оштетување на звучникот. Кај професионалните звучници номиналната моќност се дава во W RMS (Root Mean Square) или т.н. синусна моќност, додека кај ефтините звучници за општа потрошувачка оваа моќност вообичаено се дава во W PMPO (Peak Music Power Output). Тоа претставува маркетингшки трик за вештачко прикажување на огромни моќности. Така, може лесно да се најдат малечки компјутерски звучници со моќност од 200 W (PMPO), иако вистинската (RMS) моќност им е од редот на 2 W. Од друга страна, бидејќи при реална употреба звучниците нема да емитуваат чист синусен тон со постојана амплитуда, а тие се толерантни на краткотрајни пречекорувања на номиналната моќност, професионалните компании уште специфицираат и т.н. музичка моќност.

Различните начини на мерење на електричната моќност може индиректно да се видат во Табелата 8.1. Така, производителот специфицирал максимален притисок во dB SPL за: *i*) краткотрајна синусна побуда (105 dB SPL), *ii*) долготраен RMS излез (99 dB SPL) и *iii*) музичка побуда на пар звучници, односно при вообичаено поставување и користење (115 dB SPL). Во случајов се дадени директно звучните притисоци поради тоа што се работи за **активна звучна кутија**, која се разликува од **пасивната** звучна кутија поради тоа што содржи вградено засилување на аудиосигналот.

Импеданса

Импедансата на звучниците е реактивна, што значи променлива со фреквенцијата, како што е прикажано на Сл. 8.3. На графиконот може да видиме дека звучникот има резонантна фреквенција од 40 Hz, за која се јавува врв во импедансата. Оваа фреквенија е важна за конструкција на звучничката кутија. Уште повеќе, ако се земе дека во една повеќесистемска звучна кутија имаме повеќе звучници врзани на свртница, која и самата содржи реактивни компоненти, пресметувањето на влезната импеданса станува уште посложно. Поради тоа, производителот специфицира номинална импеданса Z_{nom} на звучникот која треба со една вредност да ја опише неговата импедансата за целото фреквенциско работно подрачје. Вообичаено, Z_{nom} е стандардизирана на 4, 6, 8 и 16 Ω, при што треба да е задоволено:

$$Z_{\min} > 0,8 Z_{\text{nom}}, \quad (8.6)$$

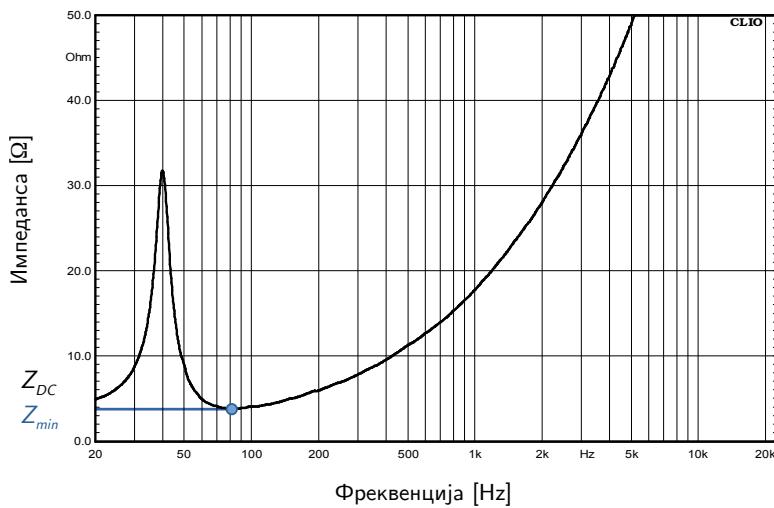
каде Z_{\min} е минималната вредност на импедансата, која вообичаено се јавува веднаш над резонантната фреквенција на звучникот.

Вредноста на Z_{nom} е важна за нивно правилно приклучување на излезот од аудиозасилувачите. Имено ако се поврзе звучник со помала импеданса од онаа за која е димензиониран засилувачот, тогаш тој ќе повлече повеќе струја, што може да предизвика нарушување на перформансите на засилувачот, па и да доведе до оштетувања.

Хармониски изобличувања

Хармониските изобличувања кои кај микрофоните беа занемарливи, се една од најважните карактеристики на звучниците, поради тоа што тие често се користат со максимални излезни моќности. Еден од изворите на овие изобличувања се нарушувањата во кругоста на мем branата односно нејзино деформирање. Тие се мерат во % THD¹⁰² при побуда на звучникот со синусен

¹⁰²анг. *Total Harmonic Distortion*.



Слика 8.3: Пример за зависноста на импедансата на еден звучник во слободно поле, т.е. надвор од кутија, од фреквенцијата.

тон според:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N A_i^2}}{A_1}, \quad (8.7)$$

каде A_1 е амплитудата на звучниот притисок кој одговара на фреквенцијата на синусниот тон, додека A_i се амплитудите на генерираните N виши хармоници поради изобличувањата внесени од звучникот. THD е мерка за нелинеарноста на звучникот.

Поделба на звучниците

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

- електродинамички звучници – најголем број на звучниците,
- електромагнетни звучници,
- електростатски звучници,
- пиеозелектрични звучници – во употреба како високотонци, и
- јонски звучници – високотонци без тврда мембра на.

Акустичката поделба на звучниците зависи од конструктивното решение на звучничката единица (драјвер), но и од начинот на кој таа е вградена во звучната кутија¹⁰³. Така, според бројот на звучнички единици во кутијата, разликуваме:

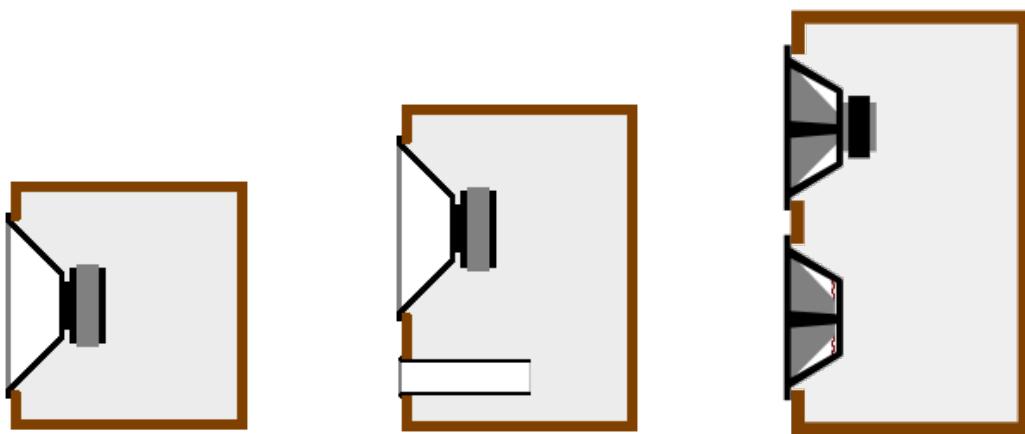
- едносистемски звучни кутии,
- двосистемски звучни кутии,
- трисистемски звучни кутии, односно
- повеќесистемски звучни кутии.

Од градбата на кутијата пак, разликуваме:

- компресиони звучни кутии,
- бас-рефлекс звучни кутии, односно звучни кутии со издув¹⁰⁴,

¹⁰³ Wikipedia: Loudspeaker enclosure, https://en.wikipedia.org/wiki/Loudspeaker_enclosure.

¹⁰⁴ Wikipedia: Bass reflex, https://en.wikipedia.org/wiki/Bass_reflex.



Слика 8.4: Примери за градба на звучни кутии: компресиона¹⁰⁶, бас-рефлекс¹⁰⁷, и звучна кутија со пасивна мембрана¹⁰⁸.

- звучни кутии со пасивна мембрана¹⁰⁵, односно
- звучни кутии од повисок ред.

Примери на овие изведби се прикажани на Сл. 8.4.

¹⁰⁵ Wikipedia: Passive radiator (speaker), [https://en.wikipedia.org/wiki/Passive_radiator_\(speaker\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Passive_radiator_(speaker)).

¹⁰⁸ CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=52702>

¹⁰⁸ CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=52694>

¹⁰⁸ By Passive_radiator_enclosure.gif: Maksimderivative work: Malyszkz (talk) - Passive_radiator_enclosure.gif, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15034223>

Поглавје 9

Студиска аудиотехника

Слободан Таневски¹⁰⁹

Студиската аудиотехника е посебен сегмент од аудиотехниката задолжен за засилување, обработка и снимање на звукот, главно во аудио и ТВ-студијата, но и на јавни манифестации или на терен. Во ова поглавје ќе бидат претставени Се одликува со многу висок квалитет и доверливост.

9.1 Предзасилувачи

Предзасилувачи¹¹⁰ се нарекуваат и засилувачи на мали сигнали бидејќи нивната основна функција е да обезбеди првично засилување на слаби аудиосигнали до линиско ниво¹¹¹. Притоа тие треба да внесат минимални изобличувања и шум во аудиосигналот. Линиското ниво е дефинирано во опсег од 0,1 V до 2 V. Во професионалната аудиотехника тоа изнесува +4 dBu = 1,23 V, а во полупрофессионалната аудитехника е -10 dBV = 316 mV. Освен засилувањето, предзасилувачите обезбедуваат напонско приспособување на импедансите, а можат да извршат и корекција на амплитудната фреквенциска карактеристика.

Разликуваме различни видови предзасилувачи според активниот елемент на кој се базирани, и тоа предзасилувачи базирани на:

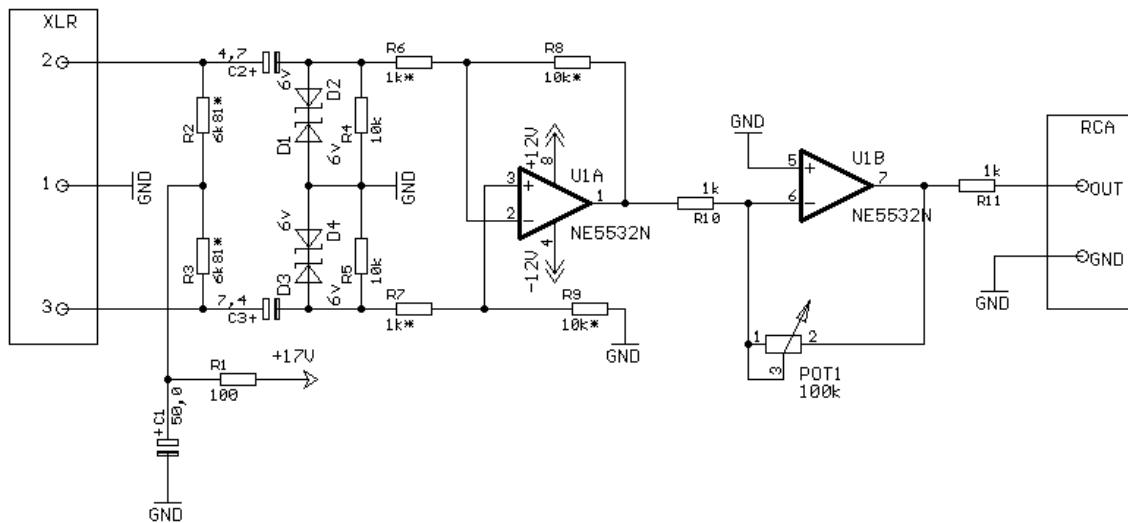
- интегрирани кола – операцијски засилувачи – најчесто користени предзасилувачи во последните 30 години заради едноставната конструкција и високиот квалитет,
- транзистори – денес во професионалната аудиотехника се користат ретко, а почесто се застапени во комерцијалната аудиотехника и други сфери од електрониката,
- електронски ламби – денес се користат ретко но се употребуваат заради специфичната боја на звукот која се должи на хармониските изобличувања кои ги внесуваат (види подолу), и
- хибридни – комбинација од претходните типови.

Според намената пак, разликуваме:

¹⁰⁹Слободан Таневски е дипл. инж. по електроника и телекомуникации. Работел како професор во средните електротехнички училишта „Орце Николов“, „Михајло Пупин“ и „Илинден“. Бил основач, технички раководител и главен уредник на првото независно радио во Македонија, Младинското радио „Клуб 100“ при УСО „Орце Николов“ (1987-1991), како и тонски снимател и продуцент во сопственото тонско студио Avalon Soundfix (1992-2001). Во 1995 год. го основа списанието за наука и техника „Емитер“, чиј главен уредник е до денес. Од 2007 год. е стручен соработник / предавач на Универзитетот за аудиовизуелни уметности ЕФТА, за предметите „Акустика и аудиотехника“ и „Филмска и ТВ-техника“. Поглавјето е адаптирано од предавањата на предметот „Акустика и аудиотехника“. Автор е на повеќе стручни и научно-популарни статии, како и на повеќе проекти од областа на електрониката и акустиката.

¹¹⁰анг. *preamplifiers, preamps*.

¹¹¹анг. *line level*.



Слика 9.1: Типична електрична шема на предзасилувач со операциски засилувачи.

- **микрофонски** – треба да го засилат слабиот сигнал од микрофонот кој вообичаено се движи во опсегот $0,1 - 10 \text{ mV/Pa}$, па затоа треба да имаат променливо засилување од 40 до 80 dB, линеарна фреквенциска карактеристика и влезна отпорност од околу $2 \text{ k}\Omega$. Заради малите влезни сигнали и големото засилување најосетливи се на појава на шум, па мора да бидат изработени од компоненти кои создаваат малку шум,
- **гитарски** – електричната гитара има $v_o = 1 - 100 \text{ mV}$ и $R_o = 5 - 500 \text{ k}\Omega$ па овој предзасилувач треба да има $R_i = 1 \text{ M}\Omega$ и променливо засилување од околу 20 до 60 dB, придружен со контрола на бојата на тонот – нелинеарна фреквенциска карактеристика.
- **грамофонски** – магнетната грамофонска глава има $v_o = 1 - 10 \text{ mV}$ и $R_o < 5 \text{ k}\Omega$ па предзасилувачот треба да има засилување околу 60 dB и $R_i = 47 \text{ k}\Omega$, со нелинеарна фреквенциска карактеристика која ги засилува басовите и ослабува високите фреквенции според RIAA стандардот¹¹²,
- **линиски** – изворите на линиски сигнал, на пр. електричните музички инструменти, ЦД/ДВД плеери, компјутер и сл., имаат $v_o = 0,1 - 2 \text{ V}$, $R_o < 5 \text{ k}\Omega$, па предзасилувачот треба да има мало засилување од околу 0 dB, влезна отпорност $R_i = 10 - 47 \text{ k}\Omega$ и рамна фреквенциска карактеристика.

Предзасилувач со операциски засилувачи

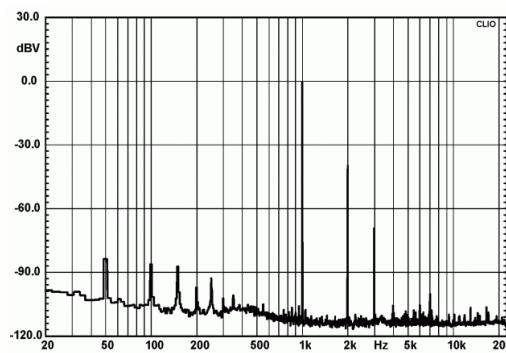
Една типична шема за предзасилувач со интегрирани кола, во случајов операциски засилувачи, е дадена на Сл. 9.1. Ова е микрофонски предзасилувач со балансиран (симетричен) влез со XLR конектор, а излезот е несиметричен со RCA конектор. Првиот степен е диференцијален засилувач со засилување од 10 пати (R_8/R_6), а вториот степен е инвертирачки засилувач со засилување од 1 до 100 пати (се нагодува со POT1). Со тоа вкупното засилување може да се нагодува од 10 до 1000 пати, т.е. од 20 до 60dB. R_4 и R_5 ја одредуваат влезната отпорност, а преку R_1 , R_2 и R_3 се обезбедува DC напон од 17 V за „фантомско напојување“ на кондензаторски микрофони. Зенер диодите служат за заштита од преголем влезен сигнал.

Предзасилувач со ламби

На Сл. 9.2 е даден предзасилувач со електронски ламби и неговата преносна карактеристика.¹¹³ Предзасилувачот има засилување од 0 до 7,5 пати, фреквенциски опсег 20 Hz – 20 kHz и однос

¹¹²Wikipedia: RIAA equalization https://en.wikipedia.org/wiki/RIAA_equalization

¹¹³Предзасилувачот е изработен според проектот за самоградба на аноден предзасилувач со ламба во научнопопуларното списание Емитер бр. 11/2010.



Слика 9.2: Изглед и преносна карактеристика на предзасилувач со електронски ламби.

сигнал-шум > 100 dB. Сепак можеме да видиме дека при синусна побуда од 1 kHz и излезен напон од 1 V, предзасилувачот внесува изразени хармониски изобличувања, при што најизразен е вториот хармоник на 2 kHz, а во помала мера и третиот хармоник на 3 kHz. Останатите хармониди не се значајно изразени. Изобличувањата кои тие ги внесуваат изразени во THD за секој од хармониците се $A_2 = 1\%$ и $A_3 = 0,04\%$ ($A_2 = 1,5\%$ и $A_3 = 0,07\%$ за $v_o = 2V$).

9.2 Засилувачи на моќност

Аудиозасилувачот на моќност е последниот засилувач во секој тонски ланец па затоа се нарекува и излезен засилувач.¹¹⁴ Тој има задача да го засили аудиосигналот на ниво кое е доволно за побуда на звучникот со цел да еmitува звук со соодветно ниво. Односно, засилувачот на моќност врши конверзија на аудиосигналот од средно ниво и средна импеданса – околу 1 V и десетици k Ω , во високо ниво и ниска импеданса – десетици V и m Ω , погодни за побуда на звучниците кои самите имаат мала импеданса – 4 или 8 Ω . Уште повеќе, поради малата ефикасност на звучниците за конверзија на електричната енергија во звучна, излезниот засилувач треба да биде во можност да даде големи струи и моќности.

Потребната излезна моќност зависи од намената, а опсезите во кои таа се движи се:

- 10 mW – 500 mW кај засилувачи за слушалки,
- 0,1 W – 10 W кај мали преносни уреди,
- 10 W – 100 W кај засилувачи за домашна и студиска употреба, и
- 100 W – 2000 W кај засилувачи за озвучување на големи простори.

Покрај основната задача да обезбеди соодветно засилување и моќност на аудиосигналот за побуда на звучниците, излезниот аудиозасилувач треба да обезбеди напонско приспособување од предзасилувачот или изворот на аудиосигнал – да има R_i од редот на десетици k Ω , да обезбеди напонско приспособување кон звучникот – да има R_o од редот на m Ω , како и да обезбеди рамна преносна карактеристика со минимални изобличувања и шум.

Како и кај предзасилувачите и тука разликуваме засилувачи со:

- **полупроводници**¹¹⁵ – овие се делат на засилувачи со:
 - **дискретна техника**¹¹⁶, односно транзисторски засилувачи – можат да бидат со биполарни транзистори (BJT), со униполарни транзистори (FET и MOSFET) или со биполарни транзистори со изолиран гејт (IGBT),
 - **интегрирани кола** (ИК), и

¹¹⁴анг. *power* или *output amplifier*.

¹¹⁵анг. *semiconductor* или *solid state amplifiers*.

¹¹⁶анг. *discrete amplifiers*.



Слика 9.3: Аудиозасилувач XA160.5 на Passlabs во класа А (лево) и M1 на Anthem во класа D (десно).

- **хиbridни полупроводнички засилувачи** – комбинација на ИК и транзистори во кои вообичаено побудниот степен е со ИК, а излезниот со транзистори,
- вакуумски електронски цевки¹¹⁷, и
- **хиbridни засилувачи** – комбинација на електронски цевки и полупроводници.

Класи на аудиозасилувачи на моќност

Во зависност од тоа колку време во текот на една периода на влезен синусен сигнал спроведува активниот елемент, аудиозасилувачите се поделени во следните класи:

- **Клас А** – активниот елемент спроведува 100% од периодата,
- **Класа В** – активниот елемент спроведува 50% од периодата, па потребни се најмалку два елеменети за да се пренесе и засили целиот сигнал,
- **Класа АВ** – преодна класа помеѓу класите А и В каде активниот елемент спроведува повеќе од 50% од периодата, повторно се потребни најмалку два елеменети за да се пренесе и засили целиот сигнал,
- **Класа D** – сигналот се дигитализира со импулсно-ширинска модулација (ИШМ) во низа на правоаголни импулси со променлива ширина, а активниот елемент работи во прекинувачки режим,
- **Класи G и H** – кои се подобрување на класите В и АВ во поглед на ефикасноста; користат два или повеќе напони за напојување така што при мал влезен сигнал засилувачот се напојува со мал напон и спротивно, при голем влезен сигнал со голем напон.

Во поглед на ефикасноста, на која е обратно пропорционална топлинската диспација, најефикасни се засилувачите во класа D (до 95%), па В, G и H (до 70%), по кои следат АВ (до 60%) и на крајот А (до 40%). Соодветно, по овој редослед аудиозасилувачите се подредени по цена и тежина од најниска за класа D до највисока за класа А. На пример, засилувачите на Сл. 9.3, двата за едноканален аудиосигнал, на излез даваат 160 W при потрошувачка од 600 W (класа А) наспроти 2700 W (класа D), а притоа тежините им се 60 kg наспроти 9 kg.

9.3 Аудиопроцесори

Аудиопроцесор¹¹⁸ е уред за обработка на аудиосигналот за промена на некои негови временски или спектрални карактеристики, како што се временски доцнења, модулирање на амплитудата, филтрирање на спектарот итн. Тие се делат на: временски, амплитудни и спектрални аудиопроцесори.¹¹⁹

¹¹⁷анг. *vacuum tube* или *valve amplifiers*.

¹¹⁸анг. *sound processor*.

¹¹⁹Повеќе за алгоритмите за процесирање на аудиосигналите и аудиоэффектите може да прочитате во скриптата од

Временски аудиопроцесори

Временските аудиопроцесори се уреди кои го обработуваат аудиосигналот во временски домен. Најзначајни претставници се уредите за вештачка реверберација (ревербератори) и уредите за доцнење и ехо. Во оваа категорија спаѓаат и уредите за специјални временски ефекти: хор, фазирање и флендерот.¹²⁰

Ревербератори Реверберацијата на звукот му дава просторност, длабочина, поголема гласност, побогата боја, што посебно доаѓа до израз кај акустички добро дизајнираните простории, на пр. концертна сала. Но многу често не можеме да имаме вакви идеални услови при снимање и репродукција на звук. Снимање вообичаено се врши во мала просторија – студио, со голема апсорција и мала природна реверберација. И кога се снима во големи простории, микрофоните се поставуваат близу до акустичките инструменти и вокалите, па во снимката доминира директниот звук, а природната реверберација на просторијата е потисната. Од друга страна, електричните и електронските инструменти, на пр. електрична гитара и синтисајзерот, често пати директно се врзуваат електрично со аудиосистемот. Конечно, репродукцијата на звукот најчесто се одвива во соби со мали димензии и висока апсорција, па и мала природна реверберација. Сите претходно наведени причини налагаат додавање на вештачка реверберација (а по потреба и ехо) со цел снимениот и репродуциран звук да добие соодветна просторност и звучен карактер.

Првите ревербератори биле акустичко-механички. Се употребувале специјали реверберациски простории со мал просечен коефициент на апсорција, акустички линии за доцнење, ревербератори со пружина, реверберациски плочи, магнетофонски системи итн. Во поново време ревербераторите се исклучиво дигитални електронски уреди. Аналогните ревербератори од 1970те како линија за доцнење користеле склоп за пренос на полнежкот¹²¹, но денес се користат ретко, главно од гитаристи. Од 1980те доминира употребата на дигиталните уреди за вештачка реверберација и ехо, како хардверски уреди, така и софтверски апликации во последните 2 децении.

Спектрални аудиопроцесори

Тоа се уреди (или компјутерски програми) кои го обработуваат аудиосигналот во фреквенциски домен, односно ја менуваат јачината на некои од компонентите во спектарот на аудиосигналот. Тоа значи дека преносната карактеристика на спектралните аудиопроцесори може да се нагодува според потребите. Процесот на нејзиното обликување се нарекува **еквализација** според првичната намена – израмнување односно изедначување на вкупната преносна карактеристика. Сепак денес, најчесто станува збор за изобличување на вкупната преносна карактеристика. Според видот на елементите разликуваме: пасивни и активни, според принципот на работа: аналогни и дигитални, а според нагодувањето: графички и параметарски.

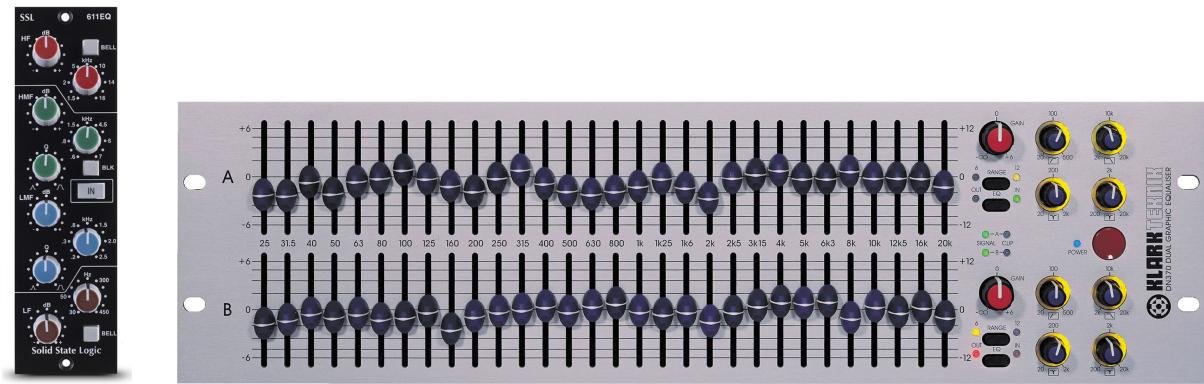
Основни склопови во еквализаторите се електричните **филтри**, во чиј состав влегуваат капацитивности и индуктивности. Филтрите, сочинети само од пасивни елементи можат само да ја намалат амплитудата на компонентите на сигналот во некој фреквенциски опсег, но не можат да ја зголемат. Доколку во филтрите има и активни елементи, тогаш тие можат да извршат и засилување на сигналите на одредени фреквенции. Според намената филтрите можат да бидат:

- **ниско пропусни** филтри (НП),
- **високо пропусни** филтри (ВП),
- **филтри пропусници на опсег** (ПО) и
- **филтри непропусници на опсег** (НО).

предметот Дигитални аудиосистеми <https://github.com/FEEIT-FreeCourseWare/Digital-Audio-Systems>

¹²⁰анг. соодветно *chorus*, *phaser*, и *flange*.

¹²¹анг. *bucket brigade device* – *BBD* или *Charge Transfer Device* – *CTD*



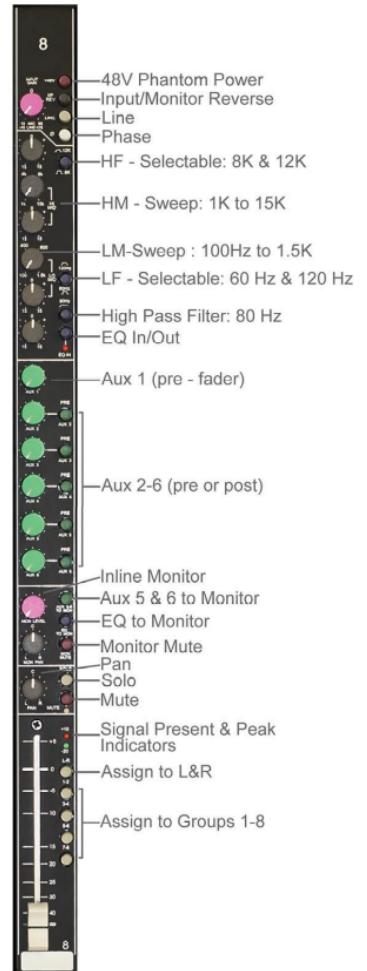
Слика 9.5: Параметарски еквализатор Solid State Logic 611EQ (лево) и графички еквализатор Klark Teknik DN370 (десно).

Најважни карактеристики на филтрите се: засилувањето во пропусниот опсег, слабеењето во непропусниот опсег, граничната фреквенција и стрмнината на преносната карактеристика во непропусниот опсег. ПО и НО филтрите имаат две гранични фреквенции; кај нив од значење е ширината на пропусниот опсег и централната фреквенција, со кои се дефинира Q -факторот. Филтрите НО со висок Q -фактор се нарекуваат и **ноч**¹²² филтри. Според вредноста на стрмнината филтрите можат да бидат: од I ред (-6 dB/oct), II ред (-12 dB/oct), III ред (-18 dB/oct), IV ред (-24 dB/oct) итн.

Еквализаторите кои се среќаваат во потрошувачката аудиотехника најчесто содржат само два филтри – еден НП и еден ВП, кои се нарекуваат **бас** и **требл** филтри. Во професионалната аудиопрема, на пр. аудиомиксерите, се вградени **параметарски еквализатори** прикажани на Сл. 9.5. Тие освен двата гранични филтри, вклучуваат уште 1 – 4 ПО/НО филтри за средните фреквенции, чии централни фреквенции и Q -фактор може да се нагодуваат.

Еквализаторите со повеќе филтри се изработуваат како засебни уреди и се нарекуваат **графички еквализатори**. Името им потекнува од тоа што положбата на нивните потенциометри приближно графички ја прикажуваат резултантната преносна карактеристика, Сл. 9.5. Потенциометрите вообичаено се лизгачки, а многу ретко вртливи. Секој од нив може да атенуира или да истакне одреден опсег фреквенции.

Графичкиот еквализатор е всушност банка на филтри ПО со ист Q -фактор. Централните фреквенции на филтрите се распоредени рамномерно на логаритамската скала на фреквенцијата. При распределбата, вообичаено се употребуваат музичките интервали – октави или терци. Така стандардизираните централни фреквенции за октавни опсези се (во Hz): 31, 63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k и 16k. Централните фреквенции за терцните филtri пак се: 25, 31, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1k, 1,25k, 1,6k, 2k, 2,5k, 3,15k, 4k, 5k, 6,3k, 8k, 10k, 12,5k, 16k и 20k.



Слика 9.4: Влезните канали на студиската миксера TOFT ATB 32.

¹²²анг. *notch*.



Слика 9.6: Студиски миксер SSL Duality SE 6000 во режијата на музичкото студио M1 во Македонската Радио Телевизија.

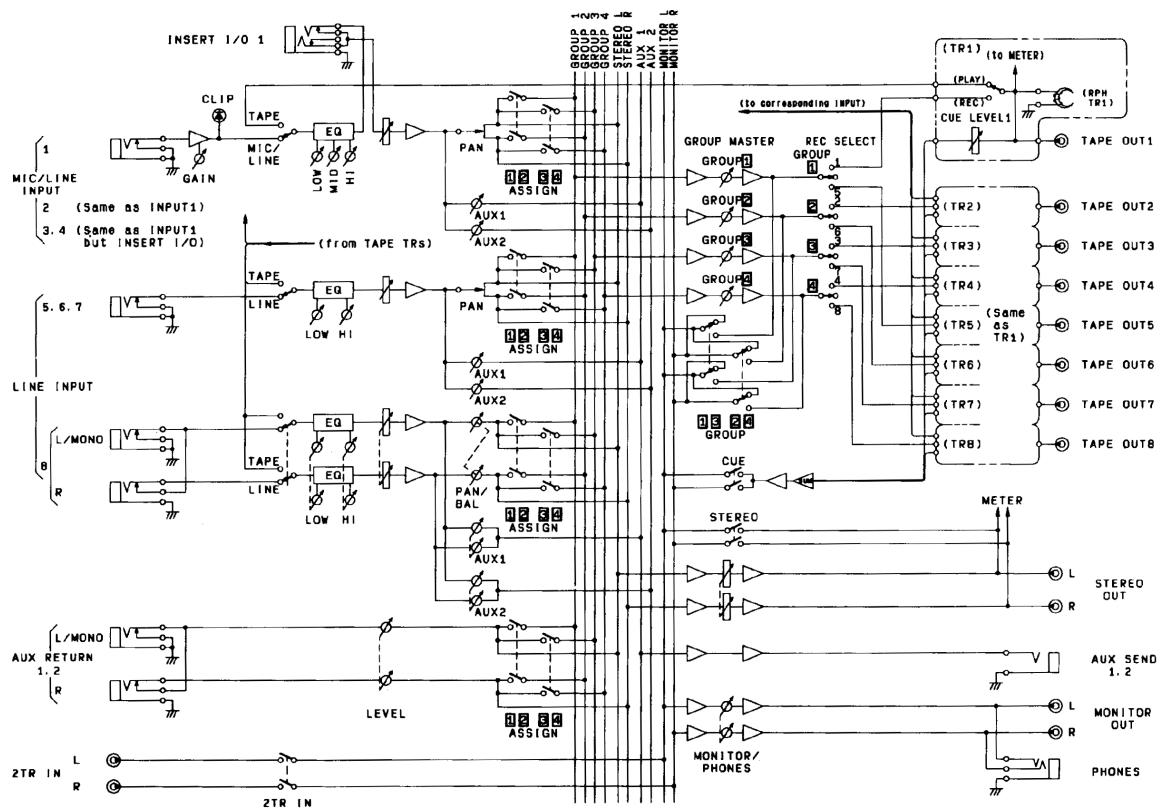
9.4 Аудиомиксери

Тонскиот **аудиомиксер**, уште наречен **миксета** или **миксер**, е електронски уред кој што служи за засилување, обработка и мешање на аудиосигнали добиени од различни извори. Според принципот на работа можат да бидат аналогни и дигитални, а според бројот на влезови, влезни канали, групи и мастер излези можни се најразлични комбинации, почнувајќи од најмалата миксета со 2 канали па се до концертни и студиски миксети со по 48 канали и повеќе со мноштво контролни копчиња на секој канал, Сл. 9.6. Според намената разликуваме:

- DJ миксета,
- радио миксер¹²³ – за еmitување на програма во живо,
- миксер за озвучување на **живи настани** – концерти, театарски претстави, конференции и др.,
- **продукциски** или **студиски** миксери – за повеќеканално снимање и креирање на музички снимки, радијски емисии, како и звук за филм и телевизија.

Пример за електрична шема на еден мал миксер е дадена на Сл. 9.7. На Сл. 9.4 пак, е даден описот на сегментите на еден влезен канал на студиска миксета.

¹²³анг. *broadcast mixer*.



Слика 9.7: Блок-шема на мал аудиомиксер.

Додаток А

Слободен и отворен софтвер

Еден од најпрочуените софтверски пакети за нумеричка обработка е програмскиот пакет **Матлаб¹²⁴**. Матлаб, преку својата синтакса на високо ниво дозволува: лесна манипулација на матрици, испртување 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 софтвер¹²⁵**. Ова пред сè се должи на философијата на движењето за слободен софтвер започнато од **Ричард Сталман¹²⁶** во 1983 г. со креирањето на ГНУ оперативниот систем¹²⁷, а подоцна со воспоставување на Фондацијата за слободен софтвер¹²⁸ во 1985 г., како и поширокото **движење за отвореност¹²⁹**, а тоа е заедништво во создавањето и напредувањето на технологијата и човештвото.

A.2 Четири слободи

Слободниот софтвер е дефиниран со четирите слободи:¹³⁰

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

¹²⁴MATLAB®Matrix Laboratory, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>

¹²⁵Wikipedia – Free software movement https://en.wikipedia.org/wiki/Free_software_movement

¹²⁶Wikipedia – 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

¹²⁷ГНУ 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>

¹²⁸Wikipedia – Free Software Foundation https://en.wikipedia.org/wiki/Free_Software_Foundation

¹²⁹Wikipedia – 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

¹³⁰Превземено од вебстраницата на организацијата Слободен софтвер Македонија <https://slobodensoftver.org.mk/shto>

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.^{131,132}
- **слободата од производителот** – како корисници на отворениот софтвер, вие не сте затворени во екосистемот на производителот.¹³³ Истиот тој софтвер може да биде превземен од друга заедница на програмери и да продолжи неговото одржување и развој во друга насока.

¹³¹ 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/>

¹³² 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/>

¹³³ 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/>

- подобар квалитет – при воспоставување на критична големина на заедницата околу еден отворен софтвер, развојот не може да се спореди со ресурсите кои ги поседува било која корпорација во светот. Така, развојот на [Линукс јадрото](#)¹³⁴, кое е во основата оперативниот систем [ГНУ/Линукс](#) познат и само како [Линукс](#)¹³⁵ и повеќе од 600-те [ГНУ/Линукс дистрибуции](#)¹³⁶, првично напишано од [Линус Торвалдс](#)¹³⁷, денес претставува најголемиот здружен проект во историјата на човештвото со околу 6000 активни разивачи, над 20 милиони редови на код, и со проценета развојна вредност од над 2 милијарди евра.¹³⁸

Сите овие придобивки заедно придонесуваат за широка распространетост на слободниот софтвер денес. Така, ГНУ/Линукс и ФриБСД¹³⁹ 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)¹⁴⁰, и 99 % од суперкомпјутерите¹⁴¹. 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 компанији – зад многу пакети слободен софтвер стојат компанији од чиј интерес е неговиот развојот, Најдобар пример за тоа е можеби самото Линукс јадро на кое работат инженери од многу компании од целиот свет, а најголемиот придонес го има компанијата Интел. Тука се и низа на ГНУ/Линукс дистрибуции меѓу кои Убунту¹⁴², Федора¹⁴³, и ОпенСусе¹⁴⁴, како и пакетите за длабоко учење Тензорфлоу¹⁴⁵ и Пајторч¹⁴⁶, исто така разивани од компанији,
- финансиска поддршка од јавно финансирање и грантови – голем број на слободни софтвери се плод на работата на инженери и научници финансирани од државите низ светот или од приватни фондации. Таков е на пример КиКАД софтверот за електронски дизајн и изработка на печатени плочи развиен во ЦЕРН¹⁴⁷, софтверот за обработка на аудио Аудасити започнат во Универзитет Карнеги Мелон¹⁴⁸, или пак пакетот за машинско учење Сајкитлрн започнат во Инриа¹⁴⁹,
- 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.¹⁵⁰ Ред Хет заработка преку продажба на поддршка за овој оперативен систем и во моментов е проценета на вредност од 38 милијарди УСД,
- финансиска поддршка од донацији – многу слободни софтвери егзистираат благодарејќи

¹³⁴Wikipedia – Linux kernel https://en.wikipedia.org/wiki/Linux_kernel

¹³⁵Wikipedia – Linux <https://en.wikipedia.org/wiki/Linux>

¹³⁶Wikipedia – List of Linux distributions https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Linux_distributions

¹³⁷Wikipedia – Linus Torvalds https://en.wikipedia.org/wiki/Linus_Torvalds

¹³⁸Добар документарен филм за рафањето и развојот на ГНУ/Линукс оперативниот систем е Revolution OS - 2001 <https://www.youtube.com/watch?v=Eluzi700-P4>

¹³⁹FreeBSD <https://www.freebsd.org/>

¹⁴⁰Оваа бројка е речиси 91 % ако се има в'предвид дека и iOS е базиран на Линукс јадрото.

¹⁴¹Linux is Running on Almost All of the Top 500 Supercomputers <https://itsfoss.com/linux-supercomputers-2017/>

¹⁴²Ubuntu <https://www.ubuntu.com/>

¹⁴³Fedora <https://getfedora.org/>

¹⁴⁴OpenSUSE <https://www.opensuse.org/>

¹⁴⁵TensorFlow – An end-to-end open source machine learning platform <https://www.tensorflow.org/>

¹⁴⁶PyTorch – from research to production <https://pytorch.org/>

¹⁴⁷KiCad EDA – A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite <http://kicad-pcb.org/>

¹⁴⁸Audacity – Free, open source, cross-platform audio software <https://www.audacityteam.org/>

¹⁴⁹scikit-learn – Machine Learning in Python <https://scikit-learn.org/stable/index.html>

¹⁵⁰Red Hat – The world's leading provider of open source solutions <https://www.redhat.com>

на донации направени од нивните корисници. Тука спаѓаат најголем број од ГНУ/Линукс дистрибуциите како на пример Манџаро¹⁵¹ или Минт¹⁵², а исто така СпајдерSpyder – The Scientific Python Development Environment <https://manjaro.org/> развојната средина за Пајтон 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 развиваачи 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 Октејв¹⁵³ 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.
- Сајлаб¹⁵⁴ е слободен софтвер за нумеричка обработка наменет за инженери и научници, во употреба од 1994 г. Сајлаб во себе вклучува и слободна замена за Симулинк пакетот на Матлаб, наречена Икскос¹⁵⁵.
- Пајтон¹⁵⁶ е широко распространет, повеќенаменски, интерпретиран и динамичен програмски јазик на високо ниво направен од Гуидо ван Росум¹⁵⁷ во 1989 г. Иако не е наменет строго за нумеричка анализа, елегантната и едноставна синтакса која овозможува лесна читливост, како и неговата широка распространетост во најразлични области, го прават Пајтон идеална основа за слободната работа и соработка на научната и образовната заедница широк светот. Навистина, Пајтон е број 1 јазикот на топ 10 листата на програмски јазици на светското здружение на инженери по електротехника IEEE последните 3 години со совершен скор од 100/100 бодови¹⁵⁸, пред сите други програмски јазици.¹⁵⁹ Исто така, во 2021 Пајтон изби на прво место на Тиобе индексот на програмски јазици¹⁶⁰ – прв јазик кој ги надминал Јава и С во последните 20 години.¹⁶¹
- Цулиа¹⁶² 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.

¹⁵¹Manjaro – Professional Linux at its best <https://manjaro.org/>

¹⁵²Linux Mint – From freedom came elegance <https://linuxmint.com/>

¹⁵³GNU Octave – Scientific Programming Language <https://www.gnu.org/software/octave/>

¹⁵⁴Scilab – Open source software for numerical computation <https://www.scilab.org/>

¹⁵⁵Xcos <https://www.scilab.org/software/xcos>

¹⁵⁶Python <https://www.python.org/>

¹⁵⁷Wikipedia – Guido van Rossum https://en.wikipedia.org/wiki/Guido_van_Rossum

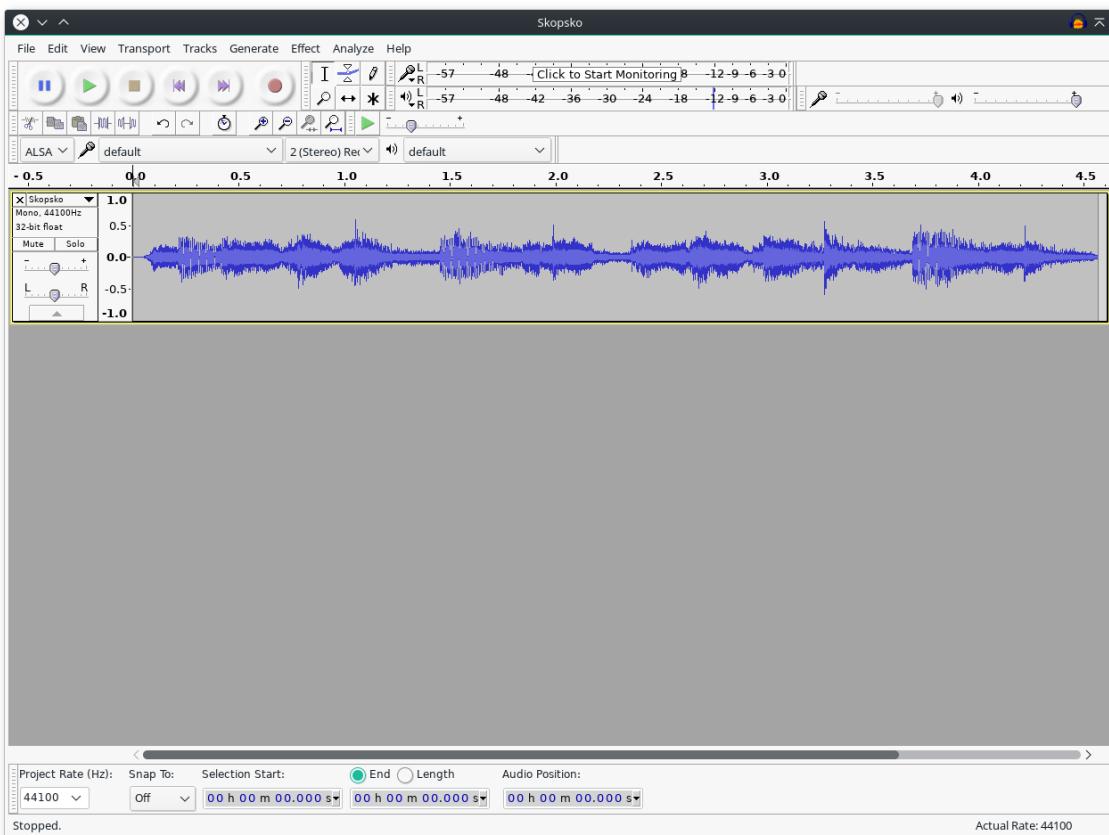
¹⁵⁸<https://spectrum.ieee.org/top-programming-languages-2021>

¹⁵⁹За споредба Матлаб последен пат се јавува на листата во 2020та како последен со скор 68.4/100. <https://spectrum.ieee.org/top-programming-language-2020>

¹⁶⁰<https://www.tiobe.com/tiobe-index/>

¹⁶¹За споредба во 2021 Матлаб е на 20^{то} место на листата.

¹⁶²The Julia Programming Language <https://julialang.org/>



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

Аудасити

Аудасити¹⁶³ е 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 Сурсфорц, со 76,5 милиони симнувања. Аудасити е добитник на наградата за најдобар проект за мултимедија од заедницата Сурсфорц во 2007 и 2009. Во 2015 е преместен на Фосуб каде за 4 месеци постигнува 10 милиони симнувања.¹⁶⁴ Препорачано е да се инсталира верзија не понова од 3.0.2, или пак еден од форковите како Тенасити¹⁶⁵, поради проблеми со новото раководство.¹⁶⁶

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 OCR¹⁶⁷ 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.

¹⁶³ Audacity. <http://www.audacityteam.org/>

¹⁶⁴ Wikipedia: Audacity (audio editor). [https://en.wikipedia.org/wiki/Audacity_\(audio_editor\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Audacity_(audio_editor))

¹⁶⁵ <https://github.com/tenacityteam/tenacity>

¹⁶⁶ За жал, компанијата која го купи Аудасити во 2021 направи неколку чекори во спротивност на начелата на слободниот софтвер, на пр. воведување телеметрија, што претставува грубо кршење на правата за приватност на корисниците. Бурната реакција од корисниците предизвика повлекување на телеметријата, односно нејзино ограничување на анонимизирана IP адреса, земја и оперативен систем. Сепак, контроверзите повикуваат на предострожност. <https://fosspost.org/audacity-developers-apologize-revise-controversial-privacy-policy/>

¹⁶⁷ Oxford, Cambridge and RSA Examinations

- 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.
- 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 Б

Пајтон за процесирање на аудиосигналите

За процесирањето на дигиталните аудиосигнали ќе биде искористен програмскиот јазик Пајтон и тоа неговата нова верзија 3, заедно со библиотеките:

- Нумпј – за работа со вектори и матрици,¹⁶⁸
- Сајпај – за дигитално процесирање на сигнали,¹⁶⁹
- Матплотлиб – за визуелизација.¹⁷⁰

Освен овие постојат мноштво библиотеки за Пајтон кои се користат во научните истражувања како на пример Пандас¹⁷¹ за статистички анализи, Симпај¹⁷² за симболичка математика, Сајкитлрн¹⁷³ за машинско учење итн.

Како интерфејс кон Пајтон ќе ја користиме интерактивната конзола ИПајтон¹⁷⁴ и научната развојна средина за Пајтон Спајдер¹⁷⁵.

Б.1 Основи поставки во ГНУ/Линукс

Иако користењето на Пајтон не е врзано со ГНУ/Линукс оперативниот систем, вежбите во овој предмет ќе се базираат на работа во ГНУ/Линукс. Ова е во склад со принципите на употреба на слободен софтвер, а е препорачано поради зголемената контрола на Пајтон инсталацијата и оперативниот систем воопшто, како и подобрата поддршка за Линукс за сите Пајтон модули, како и цел слободен софтвер воопшто.

Избор и инсталирање на ГНУ/Линукс дистрибуција и десктоп средина

Доколку веќе немате ГНУ/Линукс, истиот може да го инсталирате паралелно на постоечкиот оперативен систем.¹⁷⁶ Во најмала рака може да инсталирате ГНУ/Линукс во виртуелна машина, но ова може да искористи само дел од постоечките мемориски ресурси, па можат да се јават потешкотии во работата. За избор на тоа која Линукс дистрибуција ќе ја инсталирате, може

¹⁶⁸NumPy <http://www.numpy.org/>

¹⁶⁹SciPy <http://www.scipy.org/>

¹⁷⁰MatPlotLib <http://matplotlib.org/>

¹⁷¹Pandas <http://pandas.pydata.org/>

¹⁷²Sympy <http://www.sympy.org/en/index.html>

¹⁷³SciKit-Learn <http://scikit-learn.org/stable/>

¹⁷⁴IPython Interactive Computing <http://ipython.org/>

¹⁷⁵Spyder – The Scientific PYthon Development EnviRonment <https://github.com/spyder-ide/spyder>

¹⁷⁶анг. *dual-boot*

да ја искористите вебстраницата *DistroWatch*¹⁷⁷ која нуди информации за многу дистрибуции како и преглед на нивната популарност. За почеток добар избор е *Убунту*¹⁷⁸ поради големата заедница на корисници кои нудат поддршка за било какви прашања врзани со дистрибуцијата. Препорачана понапредна дистрибуција е *Арч*¹⁷⁹. Таа нуди низа предности, меѓу кои:

- нуди целосна покриеност на софтвер во трите репозитории на дистрибуцијата и додатното корисничко репозитори AUR (Arch User Repository), за разлика од Убунту каде за секој од софтверите кои не се покриени во главните репозитории мора да се даваат нови,
- користи режим на постојана надградба на оперативниот систем и сите софтверски пакети¹⁸⁰; тоа овозможува корисникот постојано да ги има најновите верзии од софтверите кои ги користи¹⁸¹, и ја елиминира потребата од големи концентрирани надградби на оперативниот систем, како што е случај кај Убунту дистрибуцијата,
- ја има најдобрата документација за сите делови од оперативниот систем како и најчестите софтверски пакети – ArchWiki.¹⁸²

Единствена потешкотија во инсталирањето на Арч е тоа што тој не нуди графички интерфејс за инсталирање. Како решение постојат неколку дистрибуции базирани на Арч кои нудат една од стандардните алатки за инсталирање на Линукс. Две од најпопуларните се *ЕНДЕВОРОС*¹⁸³ и *Манџаро*¹⁸⁴. Манџаро, дополнително врши уште една ревизија на надградбите на оперативниот систем од развиваите на Арч.¹⁸⁵

Уште еден важен избор при инсталирање на Кад ГНУ/Линукс оперативните системи е изборот на десктоп средина¹⁸⁶. Десктоп средините го одредуваат графичкиот интерфејс кој ќе го има инсталиралата дистрибуција. Постојат низа на различни десктоп средини, кои се разликуваат во поглед на изгледот и визуелните ефекти, наспроти мемориските и процесорски побарувања.¹⁸⁷ Тие исто така се разликуваат во поглед на степенот на контрола која му ја даваат на корисникот за нивно прилагодување. Една од најубавите, најмоќните и најприлагодливите десктоп средини е *KDE Plasma*¹⁸⁸. Уште една од визуелно помоќните средини е *GNOME*¹⁸⁹, која се стреми кон поедноставување на интерфејсот, за сметка на намалените можности за нејзино прилагодување. Од средините кои се со поедноставен но сеуште модерен изглед, а притоа немаат големи системски побарувања се *Xfce*¹⁹⁰ и *LXQt*¹⁹¹.

Десктоп средините во себе вклучуваат софтвер за логирање на корисници, управувач на прозорци¹⁹², панели, виџети итн. Вообично управувачите на прозорци поддржуваат „лебдечки“ режим¹⁹³, во кој димензиите и локацијата на прозорците може да се постави од корисникот. Овој режим на работа не го автоматизира поставувањето на ново-отворените прозорци, па речиси секогаш тие препокриваат делови од веќе постоечките прозорци. Исто така, овој режим на работа изискува честа употреба на глушецот за распоредување и димензионирање на прозорците.

¹⁷⁷ <http://distrowatch.com/>

¹⁷⁸ Ubuntu <https://ubuntu.com/>

¹⁷⁹ Arch <https://archlinux.org/>

¹⁸⁰ анг. rolling-release

¹⁸¹ анг. bleeding-edge

¹⁸² <https://wiki.archlinux.org/>

¹⁸³ <https://endeavouros.com/>

¹⁸⁴ <https://manjaro.org/>

¹⁸⁵ Внимавајте при инсталирање на Манџаро да изберете LibreOffice како замена за MS Office, наместо FreeOffice кој претставува комерцијален софтвер!

¹⁸⁶ анг. desktop environment

¹⁸⁷ Wikipedia: Desktop environment https://en.wikipedia.org/wiki/Desktop_environment

¹⁸⁸ <https://kde.org/>

¹⁸⁹ <https://www.gnome.org/>

¹⁹⁰ <https://xfce.org/>

¹⁹¹ <https://lxqt-project.org/>

¹⁹² анг. window manager

¹⁹³ анг. floating mode

Понареден режим на работа е „распределен” режим¹⁹⁴, во кој прозорците автоматски се прераспределуваат на еcranот за да се избегне нивно препокривање.¹⁹⁵ Некои од претходно наведените средини поддржуваат ваков режим на работа преку додатоци – кај Plasma тоа е Krohnkite¹⁹⁶, додека кај GNOME тоа е Pop Shell развиена од Pop!_OS¹⁹⁷. Постојат низа на управувачи на прозорци кои се дизајнирани за работа во распределен режим: awesome, i3wm, dwm, xmonad, Qtile и др.¹⁹⁸ Тие вообичаено не доаѓаат со целосна десктоп средина, но поголемите Линукс дистрибуции нудат веќе конфигурирана инсталација базирана на даден управувач.

За да ги задоволат потребите и побарувањата на поголем број на корисници, сите поголеми дистрибуции нудат повеќе десктоп средини за инсталирање.

Работа во командна линија

Единствениот модус на интеракција со компјутерот на повеќето корисници на компјутери денес е Графичкиот кориснички интерфејс (ГУИ). За жал иако едноставен за користење, графичката интеракција со системот е ограничена и неподобна за автоматизација. Командната линија сеуште останува најекспресивниот начин за комуникација со компјутерите. Се вели: „графичкиот интерфејс ги прави едноставните задачи едноставни, додека командната линија ги прави тешките задачи возможни.” (Shotts, 2019) Навистина, командната линија овозможува неограничена мок за интеракција и целосна контрола на оперативниот систем и компјутерот.¹⁹⁹

За работа со во командната линија ќе го искористиме БАШ²⁰⁰ кој е стандарден за сите дистрибуции на ГНУ/Линукс и МекОС.²⁰¹ Постојат и понапредни шел средини како на пример Z shell (Zsh) која нуди низа на подобрувања кои вклучуваат: боене на синтаксата, лесно враќање назад според внесените први букви, напредни автоматски предлози за комплетирање, интерактивна промена на фолдери со историја итн.²⁰² Таа исто така нуди визуелно модерен изглед на командната линија со можност за вклучување на информации за гит, виртуелната средина, потрошено време на извршување итн.²⁰³

За почеток треба во вашиот основен фолдер да отворите нова папка со името на предметот. Во ГНУ/Линукс основен фолдер на секој корисник е `/home/user_name/`, а кратенка за него е `~`. Вообичаена кратенка за отворање на нов терминал е `ctrl-alt-t`, или ако дистрибуцијата доаѓа со терминал на спуштање копчето `F12`.

```
~ $ mkdir ea
```

Следно, од страната на предметот Електроакустика на Гитлаб²⁰⁴ или Гитхаб²⁰⁵ клонирајте го фолдерот со звучни сегменти кои ќе ги користиме во вежбиве. Тоа можете да го направите на следниот начин:

¹⁹⁴анг. *tiling mode*

¹⁹⁵ThePrimeagen: My Developer Workflow - How I use i3, tmux, and vim <https://www.youtube.com/watch?v=bdumjiHabHQ>

¹⁹⁶<https://github.com/esjeon/krohnkite>

¹⁹⁷<https://pop.system76.com/>

¹⁹⁸DistroTube: A Comprehensive Guide To Tiling Window Managers <https://www.youtube.com/watch?v=0bfz9pp0DJU>

¹⁹⁹Вилијам Шотс во воведниот дел од својата книга посветена на Линукс командната линија вели: “Most likely you are a “power user” of some version of Microsoft Windows. [...] If you think you’re a “power user” now, just wait. You don’t know what real power is—yet.”

William Shotts The Linux Command Line: A Complete Introduction

²⁰⁰Bourne-Again Shell (BASH)

²⁰¹Добар вовед во употребата на БАШ претставува: Software Carpentry – The Unix Shell <http://swcarpentry.github.io/shell-novice/>

²⁰²Добар туторијал за инсталација на Zsh е 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>

²⁰³Spaceship Zsh <https://github.com/spaceship-prompt/spaceship-prompt>

²⁰⁴<https://gitlab.com/feeit-freecourseware/electroacoustics/>

²⁰⁵<https://github.com/FEEIT-FreeCourseWare/Electroacoustics>

```
~ $ cd ea
~/ea/ $ git clone https://gitlab.com/feeit-freecourseware/electroacoustics.git
~/ea/ $ cp -r electroacoustics/code/audio .
```

За да може да ги слушнеме овие аудиозаписи треба да го инсталраме [SoX²⁰⁶](#) 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 `sudo207`:

```
~/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
```

Повеќе за работа во командната линија, како и алатките кои се употребуваат во неа, вклучувајќи го Гит системот за верзионирање и колаборација и моќниот Вим едитор може да видите во серијата предавања од МИТ.^{208, 209}

Б.2 Основи на работата со Пајтон

Пајтон интерпретер

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

```
$ python
```

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

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

²⁰⁶SoX - Sound eXchange <http://sox.sourceforge.net/>

²⁰⁷Кратенка од *super user do*.

²⁰⁸MIT: The Missing Semester of Your CS Education <https://missing.csail.mit.edu/>

²⁰⁹Missing Semester IAP 2020 <https://www.youtube.com/playlist?list=PLyzOVJj3bHQuloKGG59rS43e29ro7I57J>

ИПајтон

Поради ограничениите можности на основниот Пајтон интерпретер, вообичаено со Пајтон се работи во интерактивната конзола [ИПајтон](#) која нуди низа на подобрувања. Нејзe може да ја инсталраме 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 ИПајтон се:

- пристап до стандардната помош во Пајтон, како на пример докстрингови на објекти и напатствието за Пајтон, 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 испишивање, преbarување 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,
- преbarување на претходно внесени наредби со стрелките и внесување на првите букви од саканата наредба, а со `ctrl-r` и со преbarување на целата содржина на претходните наредби,
- извршување на шел наредби со помош на `!`.

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

Дополнително, ИПајтон е основата зад [Јупјтер Кјутконзолата](#)²¹⁰ прикажана на Сл. Б.1, која е реализирана во Кјут технологијата и овозможува плотирање во самата конзола кое може да се активира со наредбата `%matplotlib inline`. Таа се стартира во терминалот со наредбата:

```
$ jupyter qtconsole
```

Виртуелни средини за Пајтон

Инсталирањето на Пајтон пакети, како што направивме со ИПајтон козолата, директно во оперативниот систем не е препорачливо. За избегнување на судир помеѓу системската инсталација на Пајтон на ГНУ/Линукс оперативниот систем, како и за изолирање на екосистемот од инсталирани модули на секој засебен проект, правилно е да направиме Пајтон виртуелна средина за процесирање на дигиталните аудиосигнали. Постојат низа пакети за создавање и

²¹⁰Jupyter QtConsole <https://github.com/jupyter/qtconsole>

```

File Edit View Kernel Window Help
Jupyter QtConsole 4.1.1
Python 2.7.10 (default, Oct 14 2015, 16:09:02)
Type "copyright", "credits" or "license" for more information.

IPython 4.0.3 -- An enhanced Interactive Python.
?           -> Introduction and overview of IPython's features.
%quickref -> Quick reference.
help        -> Python's own help system.
object?    -> Details about 'object', use 'object??' for extra details.
%uiref     -> A brief reference about the graphical user interface.

In [1]: from __future__ import division
...: import numpy as np
...: from scipy.io import wavfile
...: from matplotlib import pyplot as plt
...:

In [2]: %matplotlib inline

In [3]: plt.plot(np.arange(10))
Out[3]: []

```

In [3]:

Слика Б.1: Јупајтер Кјут конзолата нуди напредна интерактивност.

раководење со виртуелните средини во Пајтон, од кои `pipenv`²¹¹ е оној кој е препорачан од Телото за пакување на Пајтон²¹².

За инсталирање на `pipenv` треба да го инсталерираме користејќи го системскиот `pip`²¹³. Поради можноста на употреба на Пајтон 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

```

²¹¹Pipenv – Python Development Workflow for Humans <https://github.com/pypa/pipenv>

²¹²Python Packaging Authority PyPA <https://www.pypa.io/en/latest/>

²¹³Python Install Package (pip) <https://pypi.org/project/pip/>

```
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 Пајтон 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 Пајтон интерпретерот или да инсталлираме пакет со `pip`, тоа ќе се случува внатре во виртуелната средина:

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

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

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

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

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

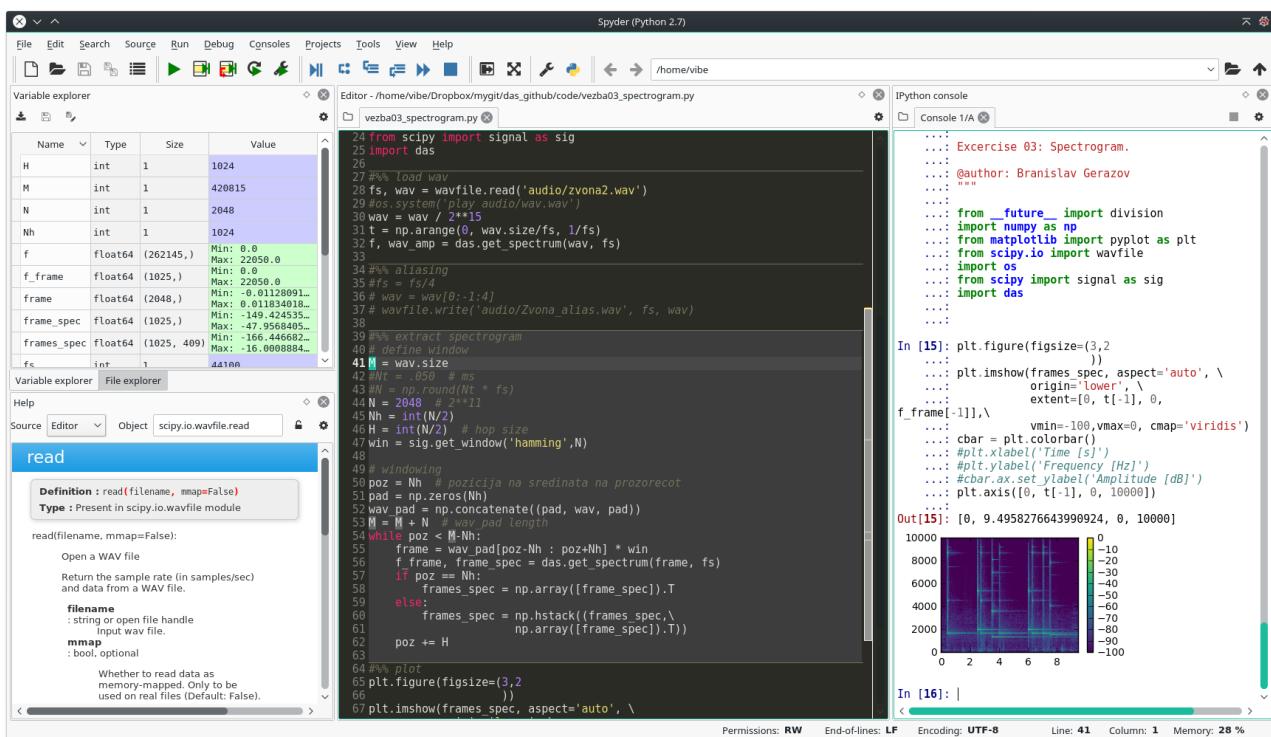
Гледаме дека `pipenv` ни дозначува дека сме во виртуелната средина со `(ea)` пред БАШ промптот. За да излеземе од неа повторно може да ја употребиме кратенката `ctrl-d` или да напишеме `exit`.

Спајдер

Наместо да работиме со ИПајтон конзолата во терминалот, во предметот електроакустика ќе ја употребиме развојната средина за Пајтон специјализирана за инженерска и научна работа **Спајдер**²¹⁴ прикажана на Сл. Б.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 Пајтон и иПајтон 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 генериирани со некој код.
- **Приказ на фајлови и фолдери.**
- **Историја на наредби.**

²¹⁴Spyder - The Scientific PYthon Development EnviRonment. <https://github.com/spyder-ide/spyder>



Слика Б.2: Спајдер развојната средина за Пајтон специјализирана за инженерска и научна работа.

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

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

Б.3 Основи на Нумпай и Матплотлиб

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

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

Сега може да ги повикаме во ИПајтон:

```
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 имиња²¹⁵, како и за зачувување на засебен простор со имиња за секој од импортирани модули. Ова овозможува и одлично автоматско надополнување на започнатото

²¹⁵ Добрата структурираност на просторите на имиња (namespaces) е една од важните одлики на Пајтон како што е и наведено во стиховите на Зенот на Пајтон кој може да го прочитате ако напишете `import this`.

име на модул, функција или променлива во Пајтон.²¹⁶ Со наредбата `%matplotlib` се овозможува интерактивното плотирање во ИПајтон конзолата.

Добар вовед во програмскиот јазик Пајтон во рамки на екосистемот за научна работа е даден во *Скриптата за Сајпај* (Varoquaux et al., 2015)²¹⁷ која е достапна под слободна лиценца²¹⁸. Оваа книга претставува отворен проект и во неа, благодарејќи на многуте автори и придонесувачи, се поместени основите за работа не само со Пајтон, Нумпај, Матплотлиб и Сајпај, туку и Пандас, Симпај, Сајкитимиџ, Сајкитлрн, па дури и Цајтон²¹⁹.

За запознавање со основите на програмскиот јазик Пајтон можат да послужат мноштво на материјали, каков што е *официјалниот туторијал за Пајтон* на вебстраницата на Пајтон²²⁰ и Викикнигата *Програмирање во Пајтон*²²¹, обете во употребува на МИТ.

²¹⁶ Автоматското надополнување се активира со притискање на `Tab`.

²¹⁷ Scipy Lecture Notes <http://scipy-lectures.org/>

²¹⁸ Creative Commons <https://creativecommons.org/>

²¹⁹ Cython <https://cython.org/>

²²⁰ The Python Tutorial. <https://docs.python.org/3/tutorial/index.html>

²²¹ Python 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.

Sandra Da Costa, Wietske van der Zwaag, Lee M Miller, Stephanie Clarke, and Melissa Saenz. Tuning in to sound: frequency-selective attentional filter in human primary auditory cortex. *Journal of Neuroscience*, 33(5):1858–1863, 2013.

William Shotts. *The Linux command line: a complete introduction*, 2nd Ed. No Starch Press, 2019.

Gael Varoquaux, Valentin Haenel, Emmanuelle Gouillart, Zbigniew Jędrzejewski-Szmek, Ralf Gommers, Fabian Pedregosa, Olav Vahtras, Pierre de Buyl, Gert-Ludwig Ingold, Nicolas P. Rougier, and et al. *scipy-lecture-notes: Release 2015.1 beta*. Zenodo, 2015. doi: 10.5281/zenodo.31521. URL <http://www.scipy-lectures.org/>.

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