



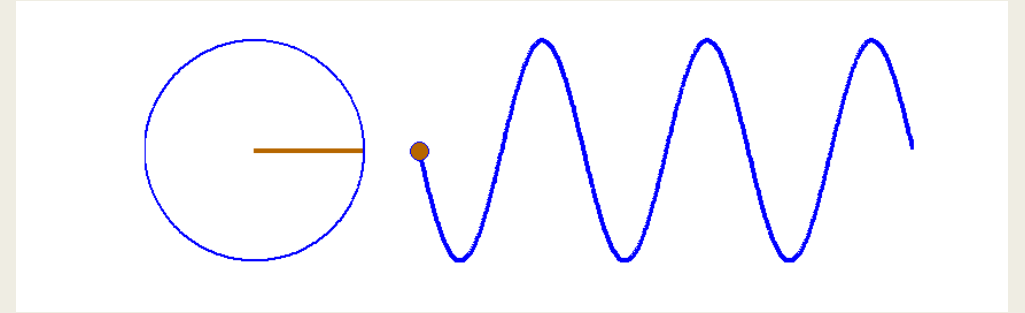
# LECTURE CONTENT: SOUND

- Sound acquisition
- Human auditory perception
  - Signal and noise
    - Digital sound
  - Frequency spectrum
  - Sound processing
  - Speech compression
- MPEG audio compression

Lecture 4



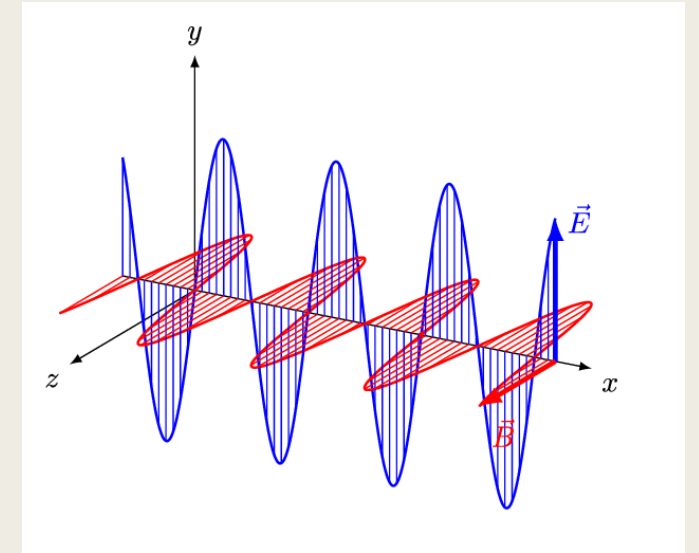
# Звук



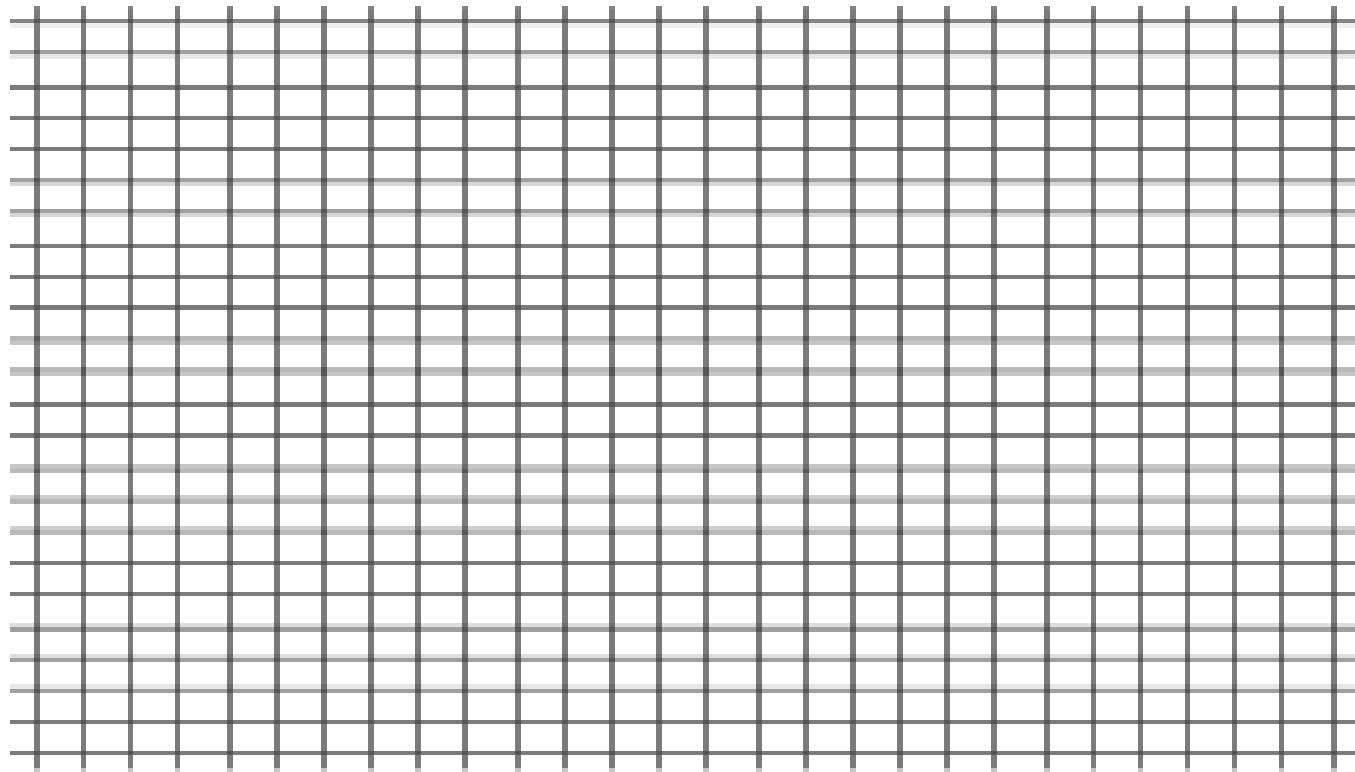
- Звук је слушним апаратом опазира механичка вибрација флуида која се шири у облику лонгитудиналних таласа захваљући еластичности флуида.
  - Звук је перцепција механичког осциловања честица неког еластичног медијума.
  - Осциловање се кроз медијум простире као лонгитудинални талас.
  - Еластичност је механичко својство материјала да се након изобличења врати у првобитно стање.

# Звук

- Звучни талас има механичку природу
  - Простире се кроз ваздух и воду.
    - Може се простирати и кроз чврста тела.
  - Честице осцилују у правцу кретања таласа, па се говори о *лонгитудиналној* природи звучних таласа
    - Трансверзални таласи пак простиру се нормално на правац кретања. Постоје само у чврстим телима и на површини течности.
  - Брзина простирања звука кроз ваздух на температури од 20 степени Целзијуса је 344 m/s
    - Што је материјал чвршћи, звук се простире дуже и брже

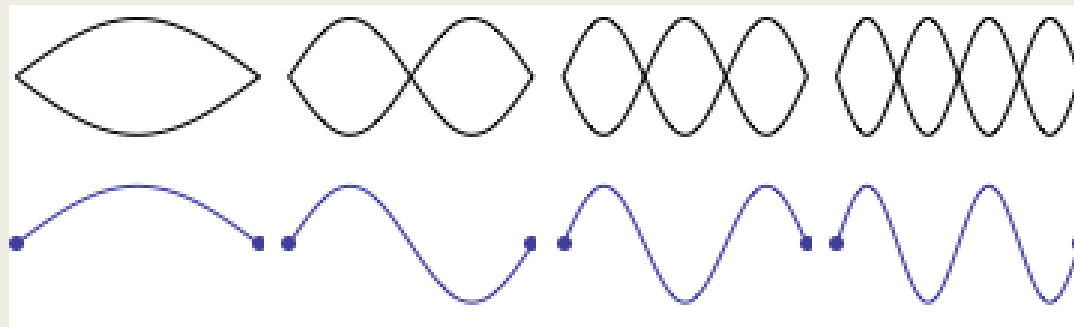


# Простирање лонгитудиналног таласа



# Звук

- Особине звука:
  - Фреквенција (или фреквенца)
    - Број таласа који прођу кроз једну тачку простора у јединици времена
    - Мери се у периодима у секунди, или у херцима.
    - Људи чују фреквенције између 20 Hz и 20 kHz
      - Ове фреквенције одговарају таласним дужинама од 17,2 m до 1,72 cm

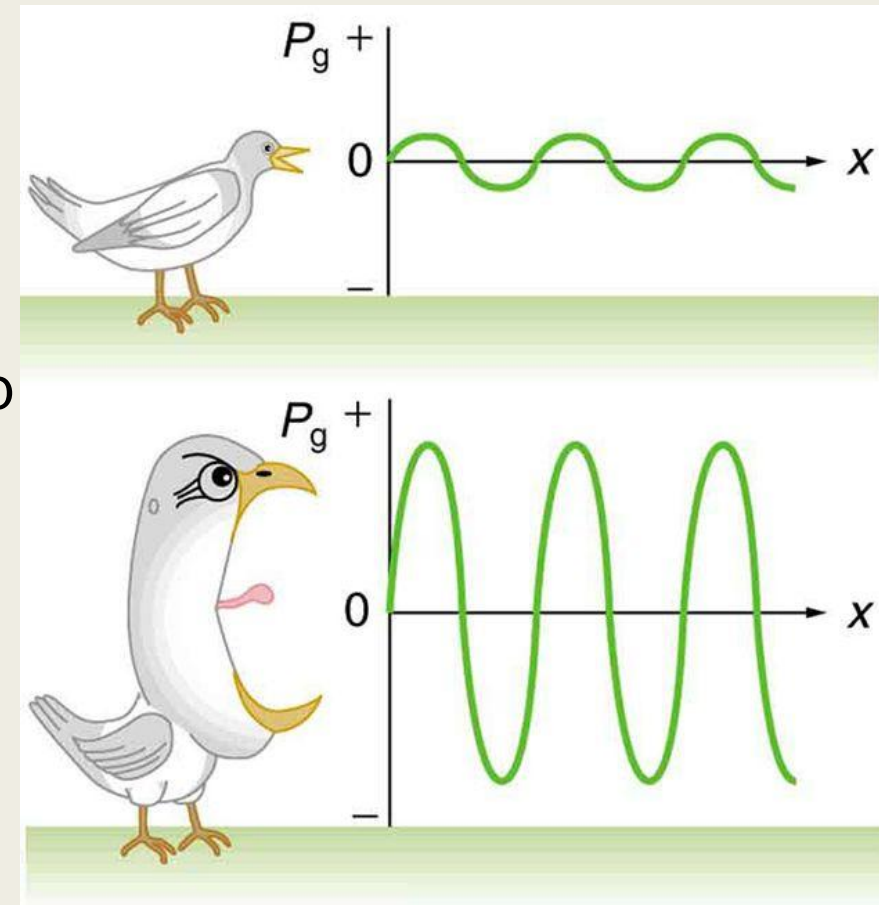


# Звук

- Особине звука:

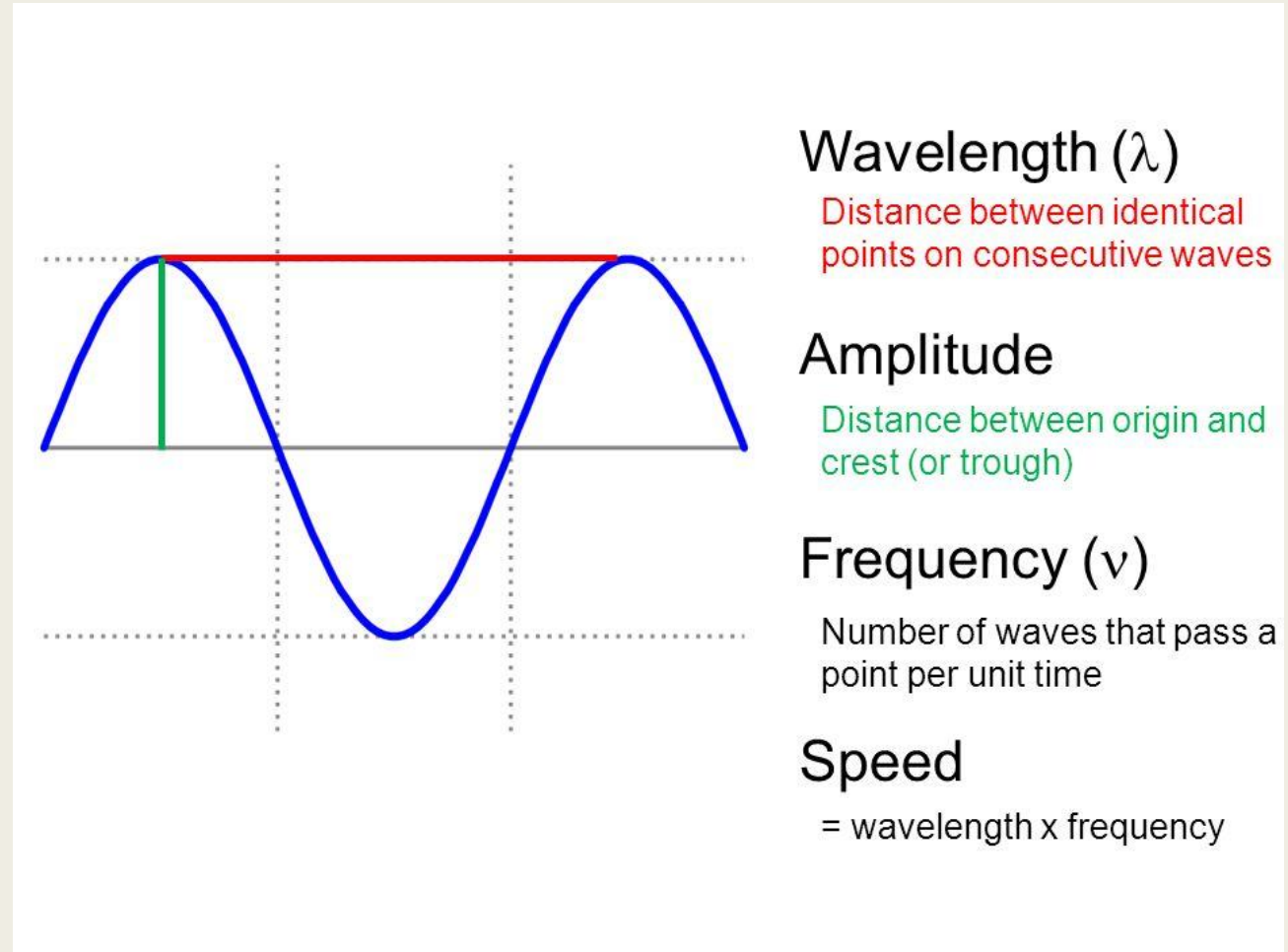
- Јачина

- Ниво звука или интенизитет притиска
    - Описује амплитуду таласа
      - Амплитуда је максимално одступање медијума од равнотежног положаја, то јест највећа промена притиска средине.
    - Људи реагују на звучне притиске од  $20 \mu\text{Pa}$  ( $20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$  или  $0 \text{ dB}$ , праг чујности) до  $20 \text{ Pa}$  ( $130 \text{ dB}$ , праг бола)



# Звук

- Особине звука:
  - Таласна дужина
    - Растојање између две амплитуде
    - Брзина таласа једнака је производу фреквенције звука и таласне дужине



# Перцепција звука

- Фреквенција - > тоналитет
  - Тон ла (а) такозване прве октаве има фреквенцију 440 Hz. Следећи тон ла, за једну октаву виши, има фреквенцију 880 Hz, то јест тачно два пута већу. Тонове за једну, односно две октаве ниже имају фреквенције 220 и 110 Hz. Октава је интервал између два тона, чије фреквенције су у саодносy 2:1.
- Јачина звука - > гласност



# Перцепција звука

Јачина звука различитих извора		
Звук у свету људи	Децибели	Звук у природи
Ракетни мотор	180	
Полећућа ракета	170	
<b>Праг изнад кога звук пробија бубну опну</b>		
турбореактивни мотор	160	
авион при узлетању, на 50 метара	150	ерупција вулкана
певач који виче у микрофон	140	
пнеуматичи чекић, митраљез	130	Грмљавина
<b>Праг изнад кога је звук болан</b>		
машинско одељење брода, штемовање бетона, труба	120	
Воз у непосредној близини, метро, моторна тестера, багер	110	
музика у дискотеци, хеликоптер	100	
камион с дизел мотором	90	слон
улица с великим прометом, фабрика	80	
усисивач, писаћа машина	70	
нормалан говор	60	Петао
канцеларија, фрижидер	50	гуска, патка, киша
библиотека	40	цвркут птица
човеков шапат	30	градски парк
празан студио	20	шум лишћа на дрвећу
зидни часовник	10	миш

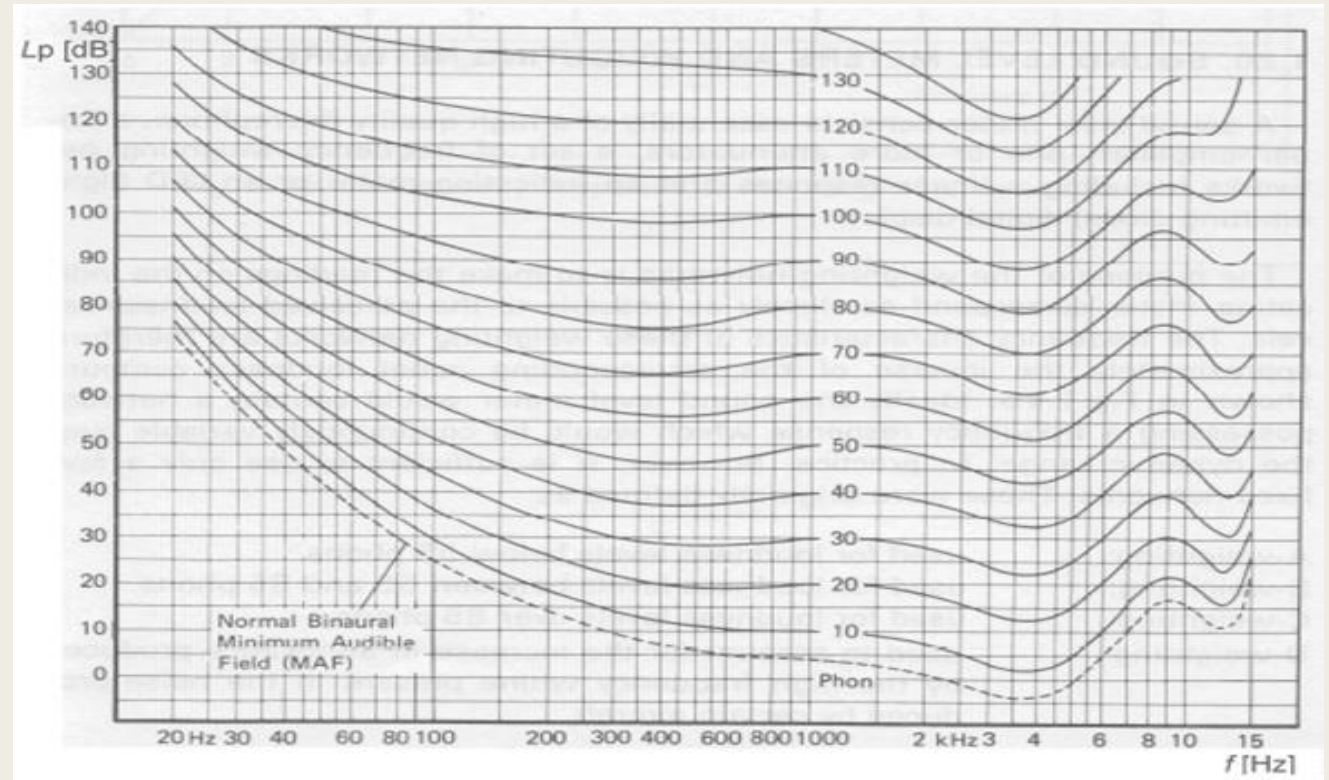
# Перцепција звука

- **Спектрална карактеристика - > боја звука**
  - Идеалан, поједностављен облик имају звуци синусоидалног облика, но на њих је у природи тешко наићи
  - Звуци могу бити периодични, што је случај код звукова које производе инструменти на којима се свира. Спектар периодичног звука анализом се може разложити на једну основну фреквенцију и више такозваних *хармоника*.
  - Звуци могу бити непериодични, што је случај код звукова попут удара, буке или жубора. Звук за који спектрална анализа показује да садржи све своје фреквенције у истој јачини назива се *бели шум*, по аналогији са белом светлошћу.

# Вебер-Флечерове криве

- показују у којој мери се субјективни осећај јачине звука разликује од његове објективне јачине у зависности од фреквенције

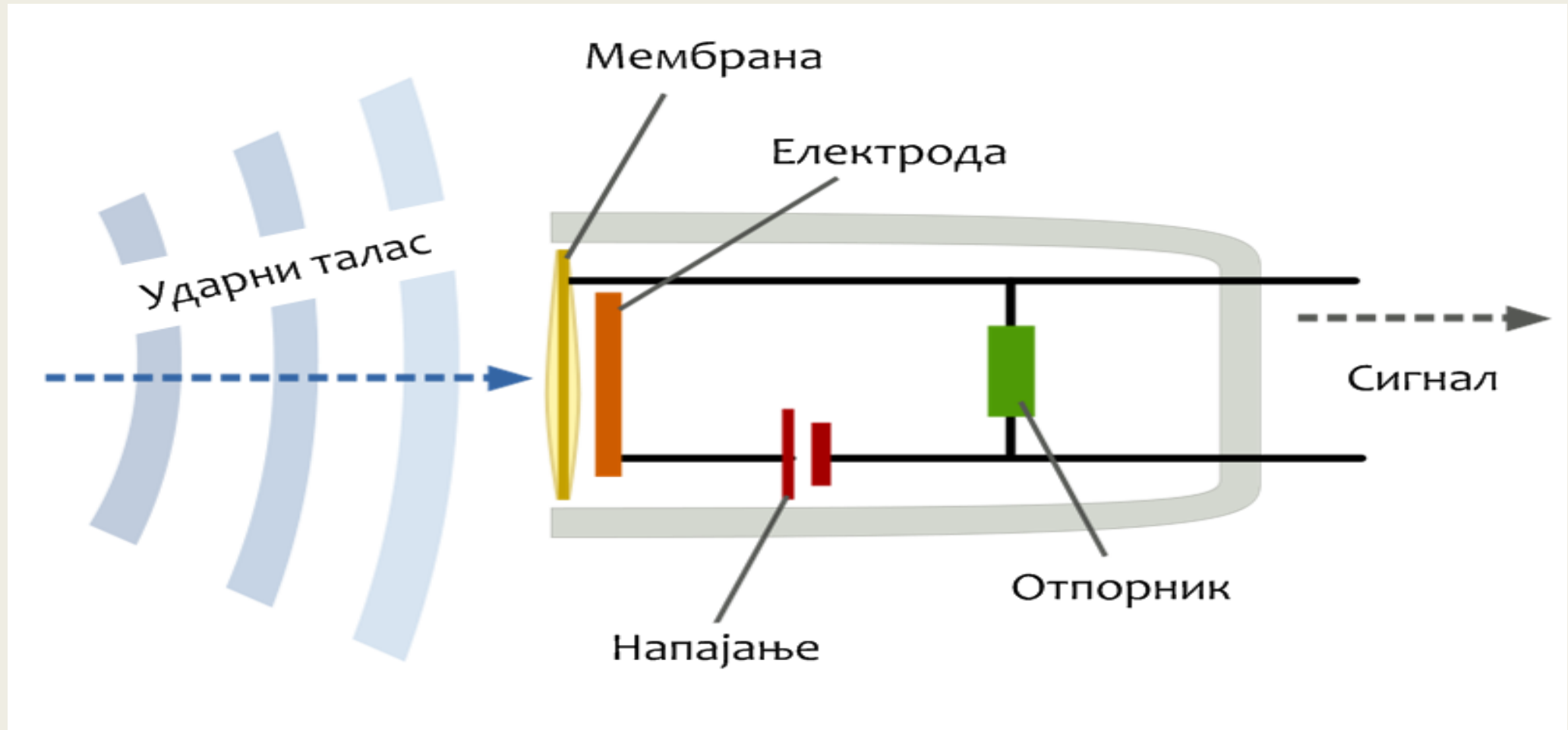
Криве које представљају исте јачине тонова као што је тон на 1000 Hz (испод и изнад 1000 Hz), настале су упређивањем субјективног утиска о јачини тонова различите учестаности - поређене са јачинама на 1000 Hz.



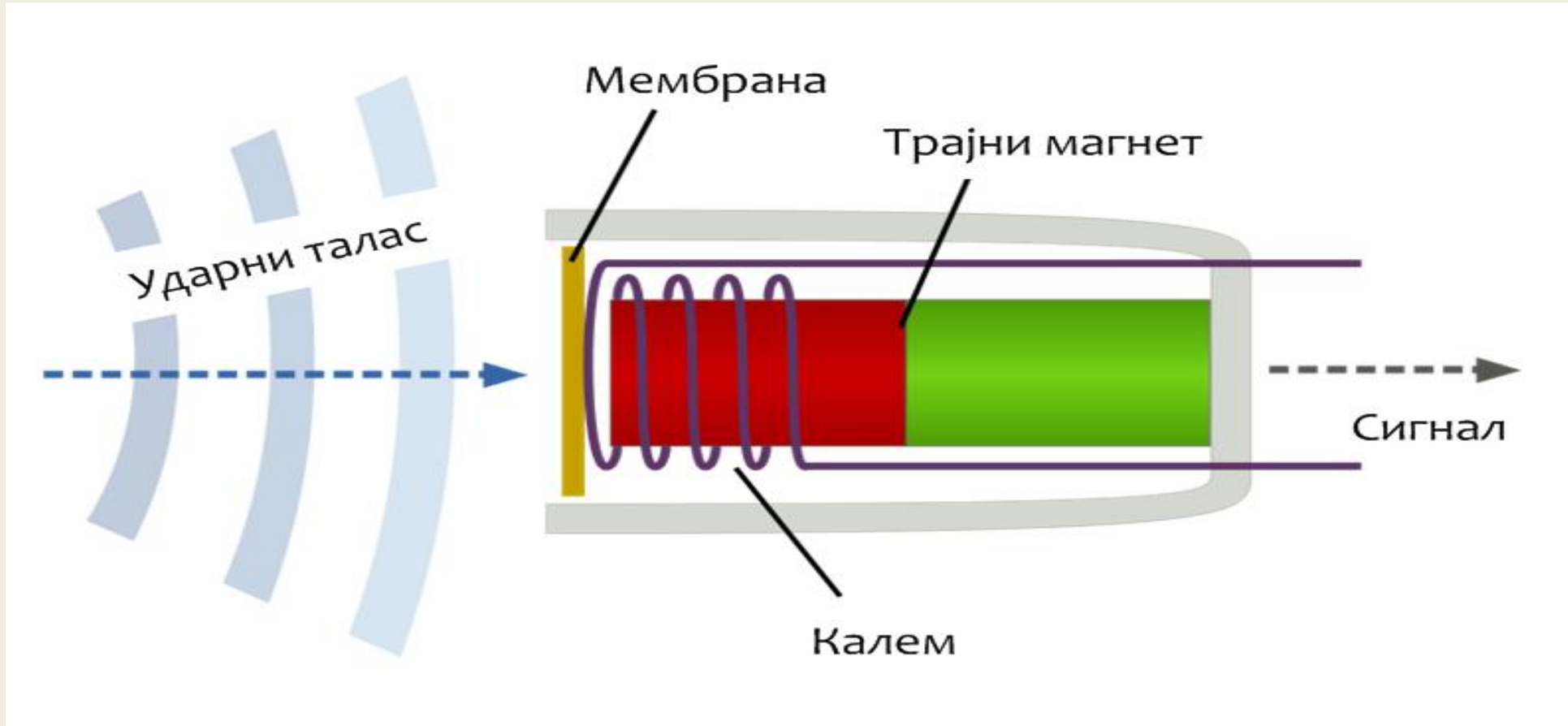
# Електроакустична трансформација

- Претварање звучног сигнала у аналогни електрични сигнал
  - *Прецизније, механичких осцилација у електричне*
- Врши се микрофонима, који се разликују по:
  - *Осетљивости и сопственом шуму*
  - *Принципу рада*
    - Кондензаторски, динамички, тракасти
  - *Усмерености*

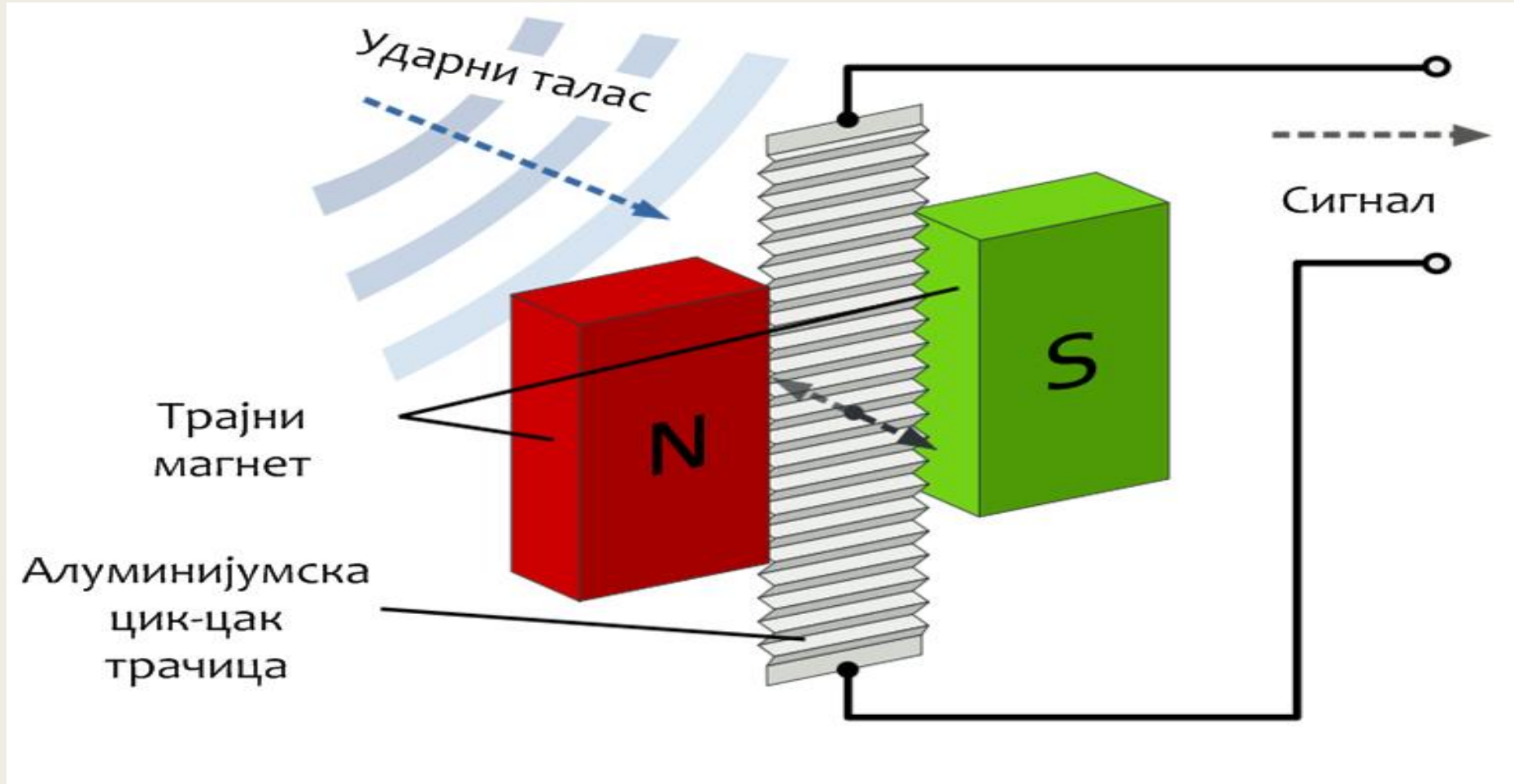
# Шема кондензаторског микрофона



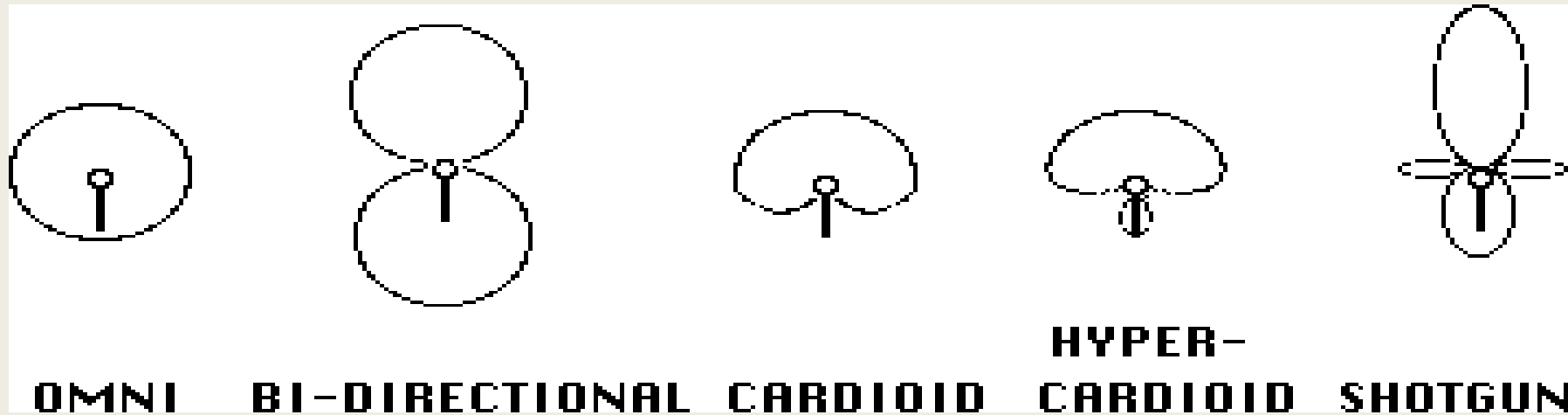
# Шема динамичког микрофона



# Шема тракастог микрофона



# Карактеристика усмерености микрофона

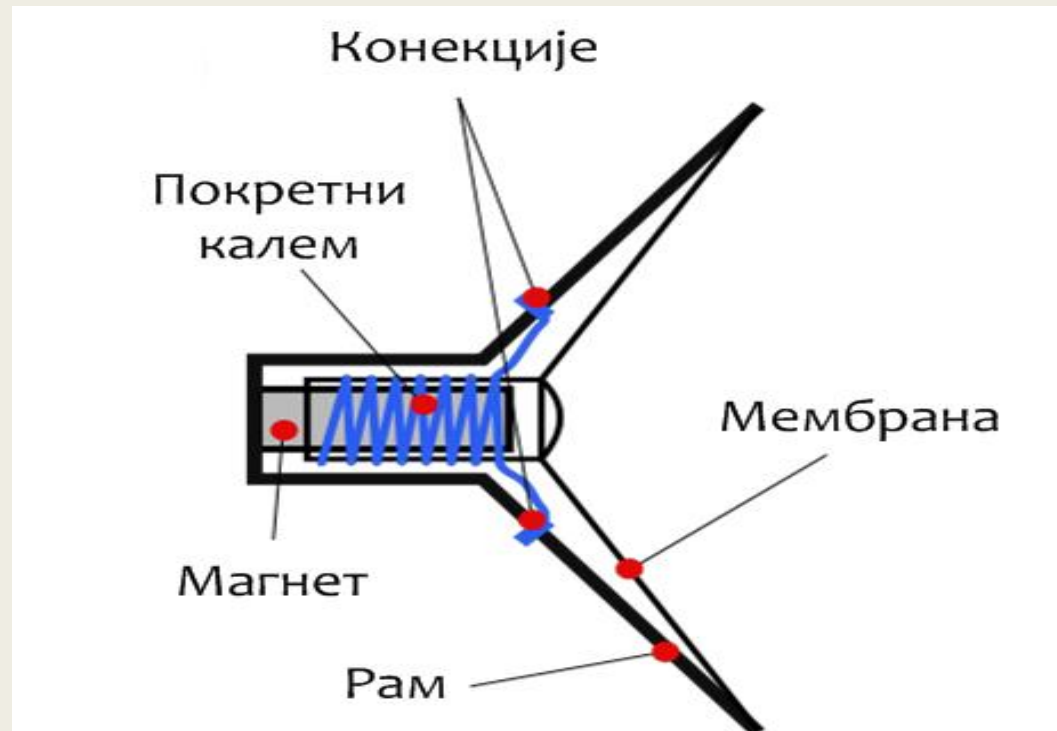


- Неусмерени (илити омниусмерени, пресиони), бидирекциони (илити двокружни), кардиоидни (илити једноструко усмерени), хиперкардиоидни и ултракардиоидни (илити пушчани)



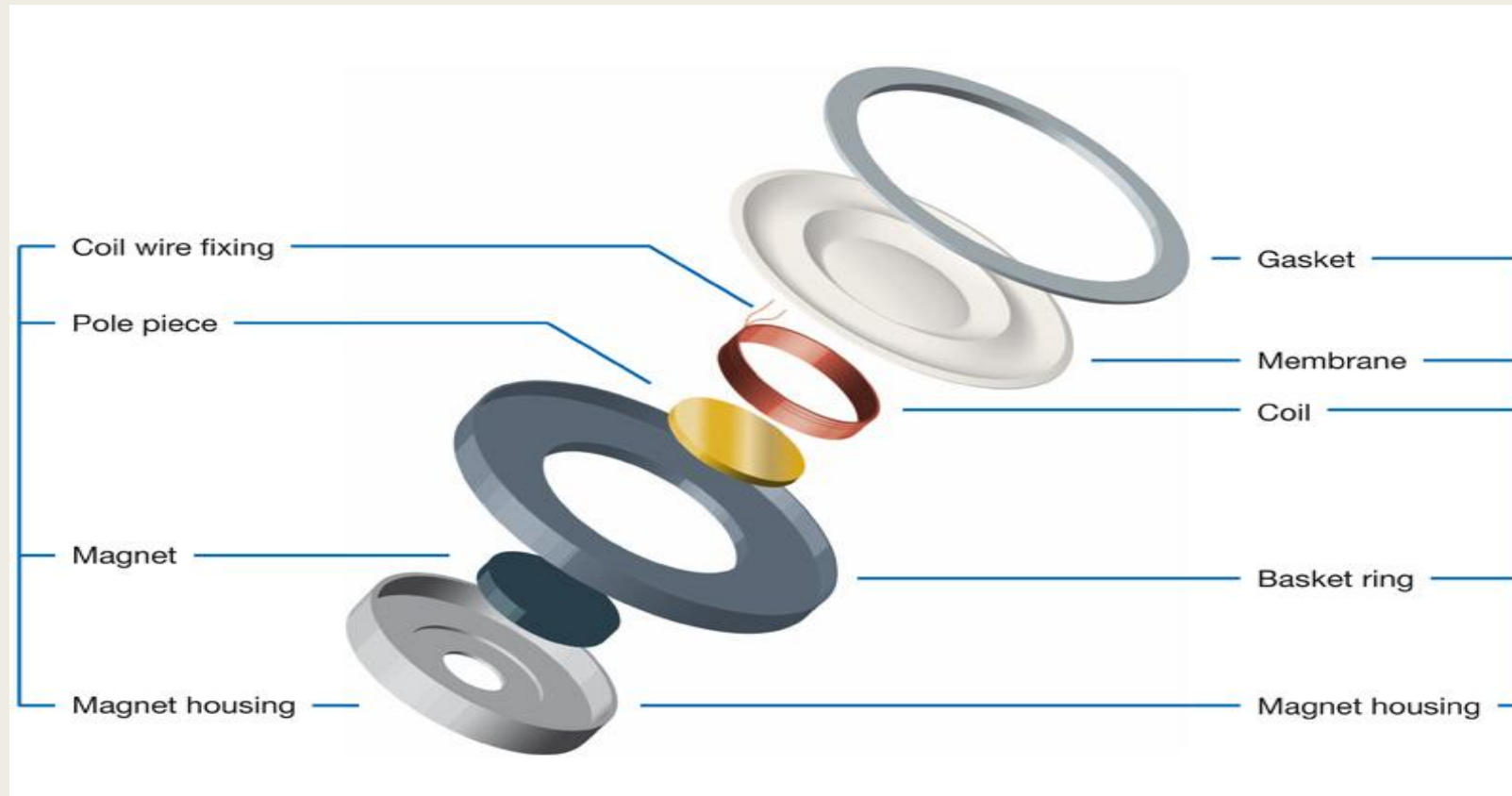
# Репродукција звука: звучник

- Пример:
  - Електромагнетни (динамички) купасте звучник



# Репродукција звука: звучник

- Пример:
  - *Минизвучник на мобилном телефону*
    - (исти принцип)



# Репродукција звука: звучник

- Системи звучника
  - *Различити звучници за различите таласне дужине*
- Постављање звучника у простору
  - *Прати природу простирања звукова различитих фреквенција:*
    - Звучници за ниже фреквенције (такозвани *вуфери*) могу бити постављени произвољније
    - Звучници за више фреквенције захтевају већу пажњу при одабиру места

# Репродукција звука: звучник

## ■ Квалитетни музички стубови

- *Захтевају још, често као засебне уређаје, претпојачало (појачава напон) и појачало (додаје снагу)*
  - Поред самог звучника и поред извора сигнала у виду радио тјунера, конекције на интернет, те читача компакт диска или флеш меморије
- *Звучници морају бити знатно веће снаге него што је излазна вредност снаге појачала*
  - У том случају се звук репродукује по приближно линеарним законитостима, то јест верно оригиналу
  - У супротном долази до механичких изобличења звука, на пример до појаве звука на фреквенцијама које нису у сигналу, а чије су вредности делиоци постојећих фреквенција
- *Пожељни су за слушање класичне и друге финије музике коју одликују изражени динамички распони јачине, нијансиране боје звука, и слично*
  - Овакву музику често не цене они слушаоци који покушају да је слушају без адекватног музичког стуба, то јест у непрецизном и изобличеном облику.

# Дигитализација звука

- Конверзија аналогног електричног сигнала у дигитални облик
- Врши се такозваним *одабирањем* (или *одмеравањем*) сигнала у једнаким временским интервалима и његовом квантизацијом:
  - *Дискретизација по времену*
  - *Дискретизација по амплитуди*
- Може укључивати и обраду звука

# Дискретизација по времену

- *Теорема одабирања*: Стопа одабирања треба да буде два пута већа од максималне фреквенције сигнала.
  - *Илити Најквистова теорема*: Ако се сигнал  $f(t)$  одабира у једнаким интервалима времена са стопом два пута већом од највеће значајне фреквенције сигнала, тада ће узорак садржати све информације оригиналног сигнала.

# Дискретизација по времену

- Примери:

- *Људски глас има највећу значајну фреквенцију од 3400 Hz, па ће фреквенца одмеравања бити:*
  - $2 * 3400 = 6800$  узорака у секунди
- *Фреквенција одмеравања за аудио снимке на компакт диску одабрана је тако да буде око два пута већа од горње границе опсега чујности и износи 44,1 kHz:*
  - $44,1 \text{ kHz} \approx 2 * 20 \text{ kHz}$

# Дискретизација по времену

- Изазови пред дискретизацијом по времену:
  - *Потребно је прецизно ударање ритма одабирања, иначе се, преко одређеног прага непрецизности, јавља треперење сигнала (или ти џитер, енгл. jitter)*
  - *Одабирање у ритму испод Најквистове фреквенце, такозвани алајасинг, изобличава звук*
  - *Одабирање у ритму који одговара фреквенцији звука доводи до грешке која се манифестује као тишина*



# Дискретизација по амплитуди

- *Квантизација* или дискретизација по амплитуди је конверзија јачине звучног сигнала на дискретан простор вредности.
- Најчешће се, на пример за аудио компакт диск, врши на простор од 65.536 нових квантизација, то јест записује се са два бајта
  - *Могућа је и квантизација од једног бајта, али је оправдана само изузетно, јер индукује приметан шум*
  - *Могућа је и квантизација од три бајта, која се користи у процесу прераде звука и у другим посебним околностима, те за формате SACD (Super Audio CD) и DVD-Audio*
    - За ове формате фреквенца одабирања често износи 96 kHz

# Дискретизација по времену и амплитуди

- Проток у секунди = ритам одабирања  $\times$  *финоћа квантизације у битовима*
  - *Подељен са 8 даје вредност протока у бајтовима*
- На основу протока у секунди (или *пропусног опсега*) једноставно се израчунава и величина меморије потребне за складиштење звучног записа
  - *Проток у секунди множи се са временом трајања записа*
- Стерео ефекат удвостручиће потребну количину података



# Дискретизација по времену и амплитуди

Quality	Sample Rate (Khz)	Bits per Sample	Mono / Stereo	Data Rate (uncompressed) (kB/sec)	Frequency Band (KHz)
Telephone	8	8	Mono	8	0.200-3.4
AM Radio	11.025	8	Mono	11.0	0.1-5.5
FM Radio	22.05	16	Stereo	88.2	0.02-11
CD	44.1	16	Stereo	176.4	0.005-20
DAT	48	16	Stereo	192.0	0.005-20
DVD Audio	192 (max)	24(max)	6 channels	1,200 (max)	0-96 (max)

# Дискретизација по времену и амплитуди

- (преорука:) Користити највећу могућу стопу одабирања и највећи могућ степен квантизације.
- Ако се жели уштедети, ефекат редукције у квалитету смањења нивоа квантизације је драстичније приметан од ефекта смањења у стопи одабирања  
*=> Боље је уштедети на стопи одабирања*

# 1 минут дигиталног звука, алтернативе

Sampling Rate	Resolution	Stereo or Mono	Bytes Needed for 1 Minute	Comments
44.1 kHz	16-bit	Stereo	10.5MB	CD-quality recording; the recognized standard of audio quality.
44.1 kHz	16-bit	Mono	5.25MB	A good trade-off for high-quality recordings of mono sources such as voice-overs.
44.1 kHz	8-bit	Stereo	5.25MB	Achieves highest playback quality on low-end devices such as most of the sound cards in Windows PCs.
44.1 kHz	8-bit	Mono	2.6MB	An appropriate trade-off for recording a mono source.
22.05 kHz	16-bit	Stereo	5.25MB	Darker sounding than CD-quality recording because of the lower sampling rate, but still full and "present" because of high bit resolution and stereo. Preferred for CD-ROM projects.
22.05 kHz	16-bit	Mono	2.5MB	Not a bad choice for speech, but better to trade some fidelity for a lot of disk space by dropping down to 8-bit.
22.05 kHz	8-bit	Stereo	2.6MB	A popular choice for reasonable stereo recording where full bandwidth playback is not possible.
22.05 kHz	8-bit	Mono	1.3MB	A thinner sound than the previous choice, but very usable. Any Macintosh or any MPC can play back this type of file. About as good as listening to your TV set.
11 kHz	8-bit	Stereo	1.3MB	At this low a sampling rate, there are few advantages to using stereo.
11 kHz	8-bit	Mono	650KB	In practice, probably as low as you can go and still get usable results; very dark and muffled.
5.5 kHz	8-bit	Stereo	650KB	Stereo not effective.
5.5 kHz	8-bit	Mono	325KB	About as good as a bad telephone connection.

# Дискретизација по времену и амплитуди

- Вонов закон мултимедијалног минимума:
  - *Постоји прихватљив минимални ниво прихватљивог квалитета који ће задовољити кориснике, чак и ако тај ниво није најбољи који могу понудити технологија, новац, време или улагање напора.*
    - Закон је направљен по аналогији са једним законом из домена антрополошке физиологије, који сугерише да се црте организама (на пример брзина или њух) више не развијају од тренутка када постану довољно добре.
    - Но, пре је реч о такозваној *доброј пракси*, коју треба следити, али која је и далеко од тога да буде опште важећи закон (висок квалитет често постане минимум).

# Дискретизација по времену и амплитуди

- Одабирања након одабирања нису једноставна, па их често ваља избећи
  - *На пример, комбиновање звукова из CD у DAT (енг. digital audio tape, дигитална аудио трака) формат захтева поновно одабирање*

# Обрада звука

- Неки од алгоритама чишћења звука омогућавају:
  - Одстрањивање шума (појасним филтерима *NF* и *VF*)
  - Одстрањивање звука електричних инсталација (ускопојасним филтером за 50 Hz или 60 Hz)
  - Уклањање ефеката изазваних превеликом близином микрофона извору звука (такозваним *De-Esser* филтером)
  - Одстрањивање пуцкетања звука дигитализованог са похабане винилне плоче (такозваним *Click repairer* филтером)



# Обрада звука

- Неки од алгоритама дотеривања звука омогућавају:
  - *Стварање еха или реверберације, ради утиска простора и природности, или ради импресивности*
    - (алгоритам *Reverb*)
  - *Балансирање фреквенцијских компоненти звука, на пример дубоких или високих тонова*
    - (преко базе филтера сврстаних у програме попут *Graphic Equalizer-a*)
  - *Постепено појачавање или смањивање звука или додавање периодичног осциловања звука*
    - (алгоритмима *Faders* и *Tremolo* сврстаним у програме за промену облика таласа, *Envelope Shaping*)
  - *Синхронизовање различитих звучних или пак звучних и видео сигнала*
    - (програмима са *Time Stretching* алгоритмима)

# Обрада звука

- Неки од алгоритама дотеривања звука омогућавају:
  - *Свирање уназад, што се користи, на пример, ради инспирације у осмишљавању мелодија*
    - *Логички релативно једноставни алгоритми*
  - *Комбиновање различитих трака, ради спајања независно снимљених звукова, надсинхронизације или постизања специјалних ефеката*

# Компресија звука

- Аналогија са компресијом слике?
- Аналогија у алгоритмима не постоји:
  - Нагле промене нису значајне за перцепцију слике (значајније су поступне промене)
  - Нагле промене јесу значајне за перцепцију звука
- Постоји аналогија у приступу:
  - У оба случаја алгоритми се прилагођавају перцептивним карактеристикама људских чула
  - У оба случаја циљ је максимална компресија уз минималну приметљивост

# Разлике у перцепцији звука и слике

- Компресија са губицима одбацује поједине елементе сигнала:
  - за слику: *нагле промене, нарочито у боји*
  - за звук: *нагле промене, нарочито сигнала звука високе фреквенције су значајне и незанемарљиве, па се одбацавање не може вршити по истом принципу као за слику, већ се на друге начине проналазе мање значајни елементи сигнала*

# Компандовање

- Компандовање (од енг. *Compadding* = *Compressing/Expanding*) је метод компресије говора за телефонски промет
- Телефонске линије имају врло ограничену пропусну моћ, но и људски говор покрива релативно узан спектар фреквенција
- Компресија се врши нелинеарно:
  - Тиши звук се репрезентује са више детаља од гласнијег
  - Виши квантизациони нивои су више раздвојени од нижих
    - Ова правила одговарају природи перцепције звука



# Диференцијална импулсно-кодна модулација

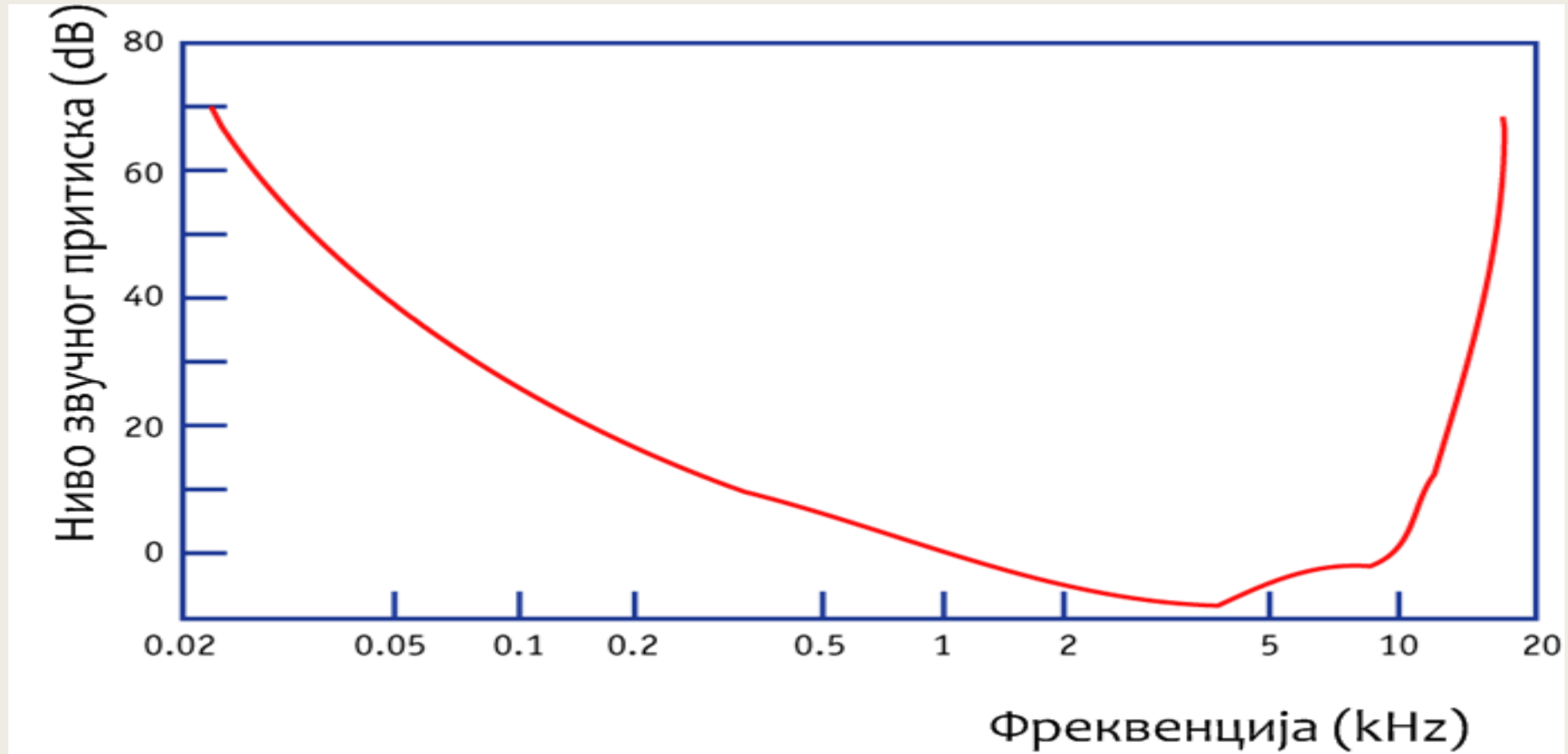
- *Израчунава се предвиђена вредност за следећи одабирак на основу претходних, па се меморише само разлика између предвиђене и стварне вредности*
- *Што је предикција боља, разлика ће бити мања*
- *У случају адаптивне диференцијалне импулсно-кодна модулације:*
  - *Динамички се варирају квантизациони нивои којима се кодирају разлике*
    - *За веће разлике користе се већи опсези квантизације, а за мање - мањи*

# Компресија MP3

Идентификују се и одбацују звуци који немају утицаја на перцепцију звука:

- 1) Одбацују се звуци испод прага чујности
- 2) Избацују се звуци који су маскирани
  - *Маскирање може бити у времену*
    - Претходни звук може маскирати наредни
      - *Све зависи од јачине, висине, али и трајања претходног тона*
    - *Маскирање може бити и по интензитету*
      - *Извацују се звуци маскирани јачим звуком сличне фреквенције*
        - На шта су посебно осетљиви виши тонови
- 3) Избацују се звуци који су близу у критичком опсегу, то јест које људско уво не разликује међусобно

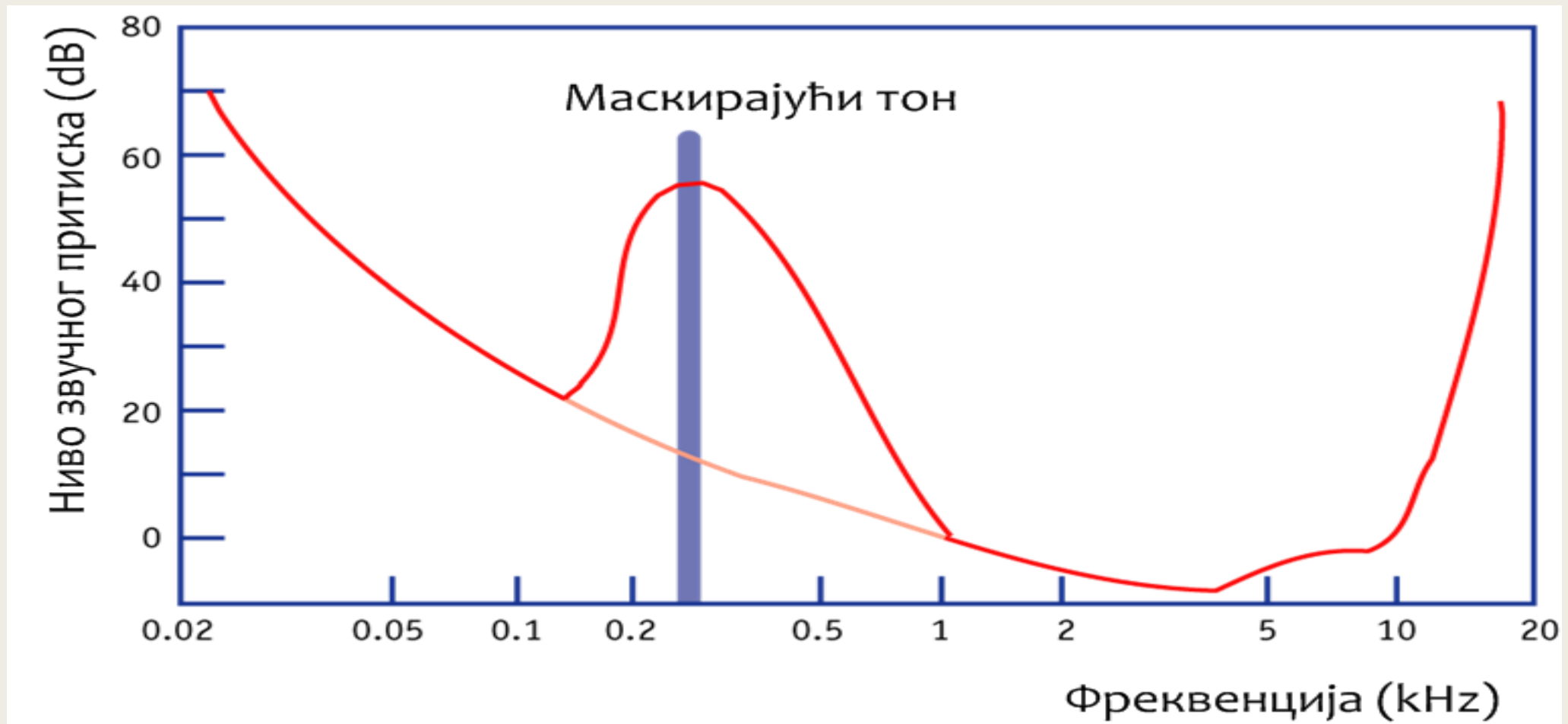
# Праг чујности





# Маскирајући тон

Маскирање је модификовање криве прага чујности у околини јаког сигнала.



# Компресија MP3

Поступак компресије:

Сигнал се подели на фреквенцијске опсеге помоћу филтера, на пример на 32 опсега.

На нивоу опсега постоје прагови чујност - појединачно се квантизирају звукови изнад прагова чујности.

MP3 је примарно стандард компресије, па се компримован звук може чувати и у другим форматима

MP3 има свој властити формат датотеке у коме су подаци смештени у *кадровима*

Кадар има заглавље са подацима попут података о протоку података и фреквенцији одабирања

MP3 може садржати и мета-тагове са подацима као што су подаци о извођачу и наслову песме

# МИДИ стандард

- Дигитални интерфејс музичког инструмента (енг. *Musical Instrument Digital Interface*)
- Стандард синтетисања звука
- Омогућава описивање илито програмирање природе звука (инструмента који га изводи), тона (висине, трајања, брзине наступа – такозване *атаке*, *опадања...*), те низова тонова.
  - *Опис је нумерички и не представља звук у дигиталном облику, већ својеврсну партитуру*
  - *Опис је релативно мали, много мањи од записа истог звука у дигиталном облику*
  - *Аналогије:*
    - Дигитализован звук – растерска слика (настали одабирањем аналогног улаза)
    - *МИДИ* фајл – векторска слика (инструкције)

# МИДИ стандард, пример

**Table 9.1 General MIDI voice numbers**

1	Acoustic Grand Piano	44	Contrabass	87	Synth Lead~7
2	Bright Acoustic Piano	45	Tremolo Strings	88	Synth Lead~8
3	Electric Grand Piano	46	Pizzicato Strings	89	Synth Pad~1
4	Honky-tonk Piano	47	Orchestral Harp	90	Synth Pad~2
5	Rhodes Piano	48	Timpani	91	Synth Pad~3
6	Chorused Piano	49	Acoustic String Ensemble~1	92	Synth Pad~4
7	Harpsichord	50	Acoustic String Ensemble~2	93	Synth Pad~5
8	Clavinet	51	Synth Strings~1	94	Synth Pad~6
9	Celesta	52	Synth Strings~2	95	Synth Pad~7
10	Glockenspiel	53	Aah Choir	96	Synth Pad~8
11	Music Box	54	Ooh Choir	97	Ice Rain
12	Vibraphone	55	Synvox	98	Soundtracks
13	Marimba	56	Orchestra Hit	99	Crystal
14	Xylophone	57	Trumpet	100	Atmosphere
15	Tubular bells	58	Trombone	101	Bright
16	Dulcimer	59	Tuba	102	Goblin
17	Draw Organ	60	Muted Trumpet	103	Echoes
18	Percussive Organ	61	French Horn	104	Space
19	Rock Organ	62	Brass Section	105	Sitar
20	Church Organ	63	Synth Brass~1	106	Banjo
21	Reed Organ	64	Synth Brass~2	107	Shamisen
22	Accordion	65	Soprano Sax	108	Koto
23	Harmonica	66	Alto Sax	109	Kalimba
24	Tango Accordion	67	Tenor Sax	110	Bagpipe
25	Acoustic Nylon Guitar	68	Baritone Sax	111	Fiddle
26	Acoustic Steel Guitar	69	Oboe	112	Shanai
27	Electric Jazz Guitar	70	English Horn	113	Tinkle bell
28	Electric clean Guitar	71	Bassoon	114	Agogo
29	Electric Guitar muted	72	Clarinet	115	Steel Drums
30	Overdriven Guitar	73	Piccolo	116	Woodblock
31	Distortion Guitar	74	Flute	117	Taiko Drum
32	Guitar Harmonics	75	Recorder	118	Melodic Tom
33	Wood Bass	76	Pan Flute	119	Synth Tom
34	Electric Bass Fingered	77	Bottle blow	120	Reverse Cymbal
35	Electric Bass Picked	78	Shakuhachi	121	Guitar Fret Noise
36	Fretless Bass	79	Whistle	122	Breath Noise
37	Slap Bass~1	80	Ocarina	123	Seashore
38	Slap Bass~2	81	Square Lead	124	Bird Tweet
39	Synth Bass~1	82	Saw Lead	125	Telephone Ring
40	Synth Bass~2	83	Calliope	126	Helicopter
41	Violin	84	Chiffer	127	Applause
42	Viola	85	Synth Lead~5	128	Gunshot
43	Cello	86	Synth Lead~6		

# МИДИ стандард

- За рад са МИДИ технологијама користе се:
  - Софтвер за нотацију и компоновање:



- Синтисајзер – софтвер који производи звук,
- Секвенсер – софтвер за обраду синтетизованог звука, укључујући и комбиновање са ДИГИТАЛНИМ ЗВУКОМ:



# МИДИ стандард

## ■ Предности МИДИ фајлова:

- *Омогућавају најразличитије обраде и едитовања*
- *Мали су, и до 200 до 1000 пута мањи од дигиталних аудио фајлова, па се брже транспортују*
  - *Погодују мултимедијалним веб апликацијама*
- *Могу звучати и боље од дигиталних аудио фајлова*

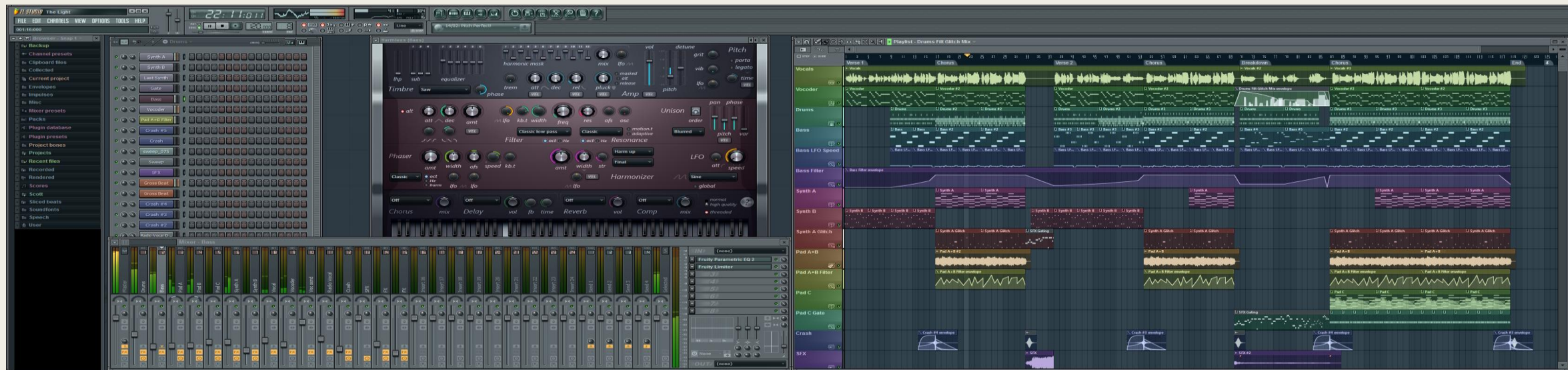
## ■ Мане МИДИ фајлова:

- *Звук партитуре зависи од софтвера који га синтетише*
  - *Може веома варирати од уређаја до уређаја*
    - *Поготово, на пример, ако се истим бројевима означавају различити инструменти*
  - *Дигитални аудио фајл, напротив, репродукује се прилично конзистентно*
- *Нису прикладни за синтетизацију говора*



# Систем за дигиталну аудио монтажу

- Систем за дигиталну аудио монтажу (енг. *digital audio workstation, DAW*) је савремено окружење за креирање и обраду аудио фајлова
  - На пример: *FL Studio*



# Систем за дигиталну аудио монтажу

- На пример: FL Studio

Our **Step Sequencer** is without equal, the fastest way to get a drum track, bass line or melody from your head to your speakers

**DirectWave** is a powerful and versatile sampler featuring a fully programmable synthesis section and inbuilt FX. It imports AKAI, Giga, Rex, Kontakt, SF2, ...

Mix your tracks with the **64 channel mixer** using the 25 professional quality included effects or use your favorite VST and DX plugin effects.

**EQ 2** is an advanced parametric equalizer with spectral analysis.

**Love Philter** can create complex delay, gating and filtering effects.

**Edison** is a fully integrated audio editing and recording tool.

Our **Pianoroll** is widely acclaimed as the best in the industry. Experience total freedom to enter, edit, manipulate and refine your melodies.

**Record**, edit or process any ASIO input using our new Audio and Automation clips. Rearrange, slice and stretch the clips in the Playlist tracks.

**Pattern Clips** can now be visualised & arranged in the playlist

**FPC (FL Pad Controller)** is a software plugin similar to the hardware Akai MPC unit.



# Звуци у апликацијама

- Системски звуци, део оперативног система
  - На пример start.wav, chimes.wav, chord.wav, ding.wav, logoff.wav, notify.wav, recycle.wav, tada.wav и Microsoft sound.wav из директоријума Windows\Media
    - *Могуће је мењати и подешавати ове звуке*

# Звуци у апликацијама

## ■ Могући кораци за додавање звука апликацији:

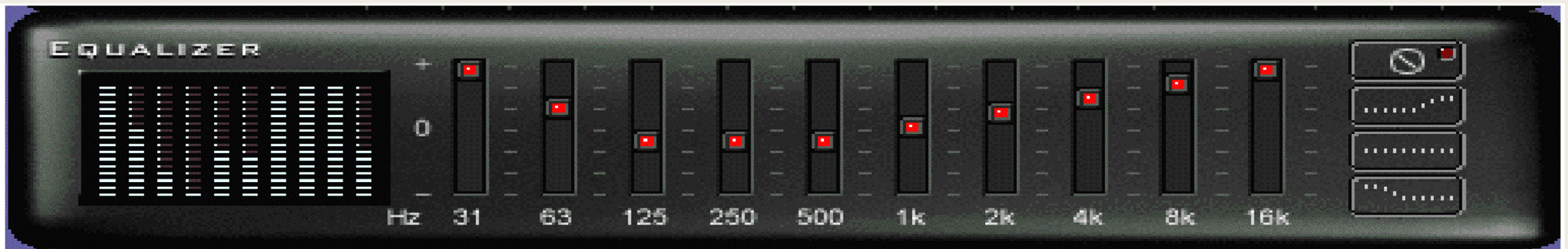
1. Одредити формате фајлова који су компатибилни са окружењем у коме се развија апликација
2. Проценити које могућности извођења звука нуди систем крајњег корисника
3. Одлучити какви звуци су потребни и у којим деловима апликације  
*Музика, специјални ефекти, изговорен дијалог или слично*
4. Изабрати дигитализован аудио звук, *MIDI* звук или обе врсте звука
5. Изабрати где и када користити звук
6. Обезбедити извор звука креирањем или набавком
7. Обрадити звуке да се уклопе у апликацију
8. Тестирати звук и по потреби се вратити на неки од почетних корака.

# Звуци у апликацијама

- Звук није део веб стране, већ посебан фајл са сопственом адресом на Интернету, која је наведена у опису стране.
  - На пример: `<a href="mysound.wav"> Click here to play MySound! </a>`
  - Корисник сетује браузер да свира или да не свира звуке

# Spektralni (frekvencijski) sadržaj signala

- Isak Njutn – spektar bijele svjetlosti – komponente različitih talasnih dužina
- Analizator spektra – vizuelizacija uticaja komponenata pojedinih frekvencija na oblik signala
- Ekvilajzer – frekvencijski selektivno filtriranje signala – pojačavanje ili slabljenje određenih komponenata



# Spektralna analiza signala

- Furije – svaka kontinualna periodična funkcija se može razložiti na prostoperiodične komponente
- Furijeov red

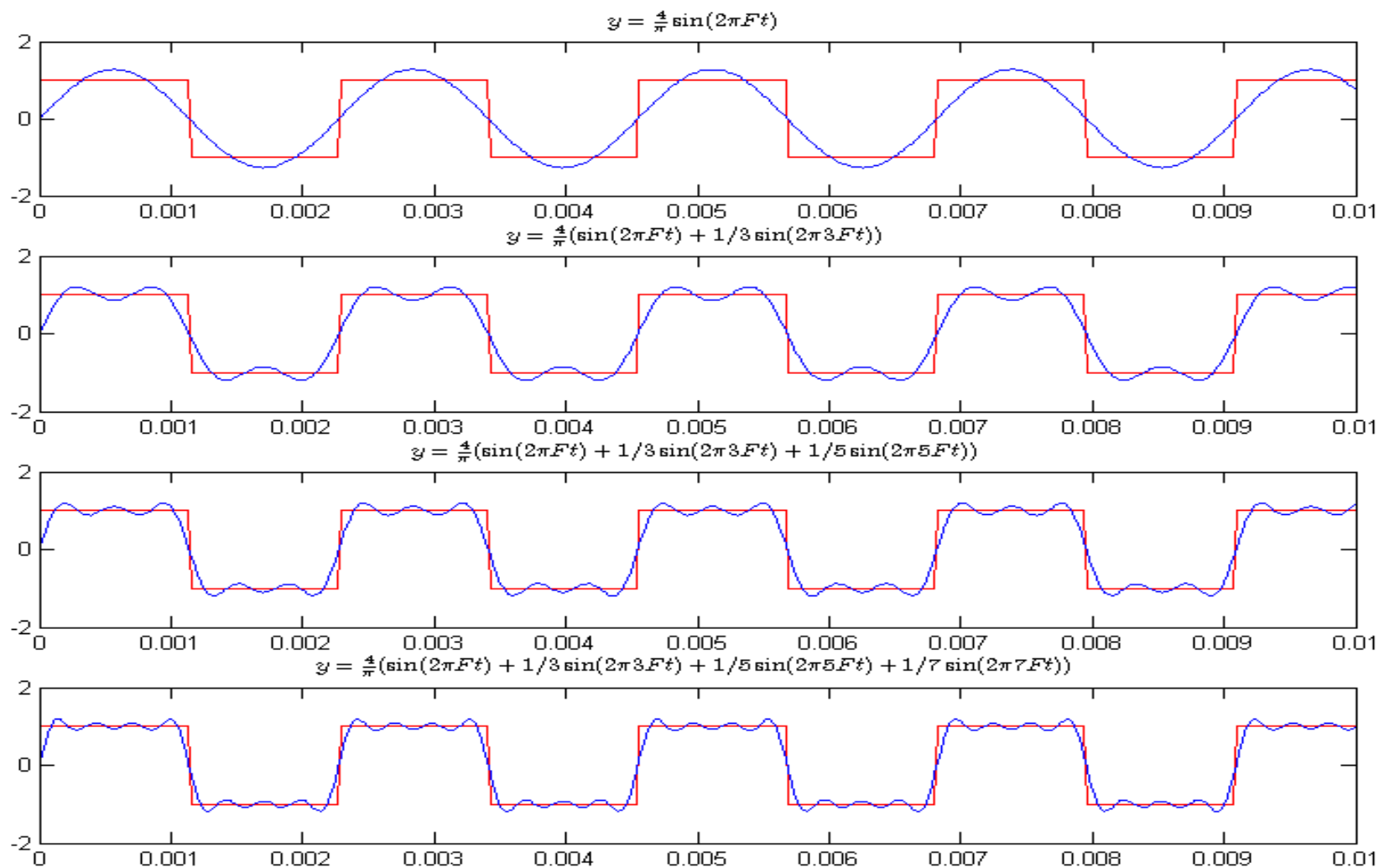
$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(k\Omega_0 t) + b_k \sin(k\Omega_0 t))$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(k\Omega_0 t) dt$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(k\Omega_0 t) dt$$

$T$  je period, a  $\Omega_0 = 2\pi/T$  je osnovna frekvencija signala.

# Апроксимација сигнала Фуријеовим редом



# Furijeov red u kompleksnom obliku

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{jk\Omega_0 t}$$

$$C_k = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-jk\Omega_0 t} dt$$

$T$  je period, a  $\Omega_0 = 2\pi/T$  je osnovna frekvencija signala.

- Koeficijenti  $C_k$  su kompleksni brojevi  $C_k = |C_k| e^{j\theta_k}$
- Moduli koeficijenata  $|C_k|$  čine **amplitudni spektar signala**
- Argumenti  $\theta_k$  koeficijenata čine **fazni spektar signala**

# Furijeova analiza signala

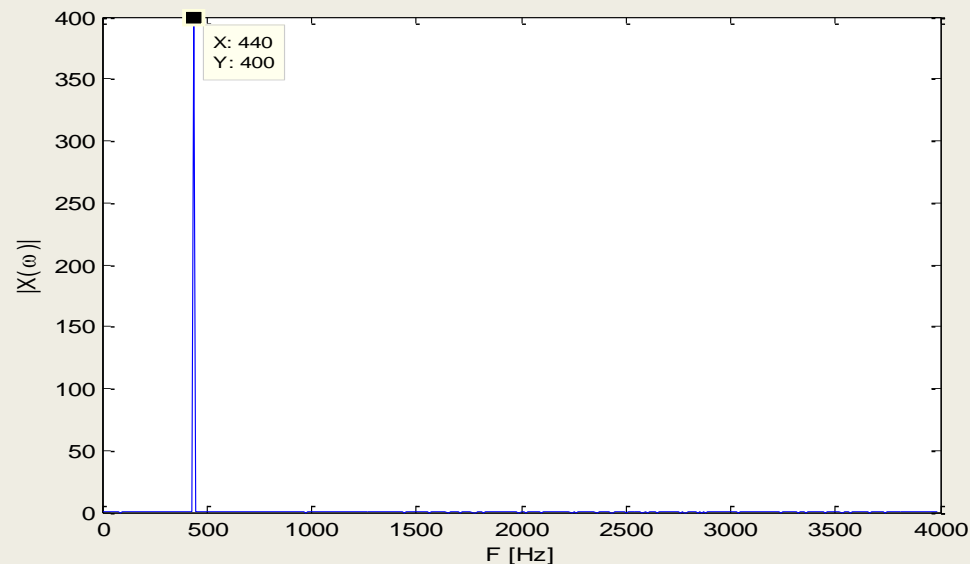
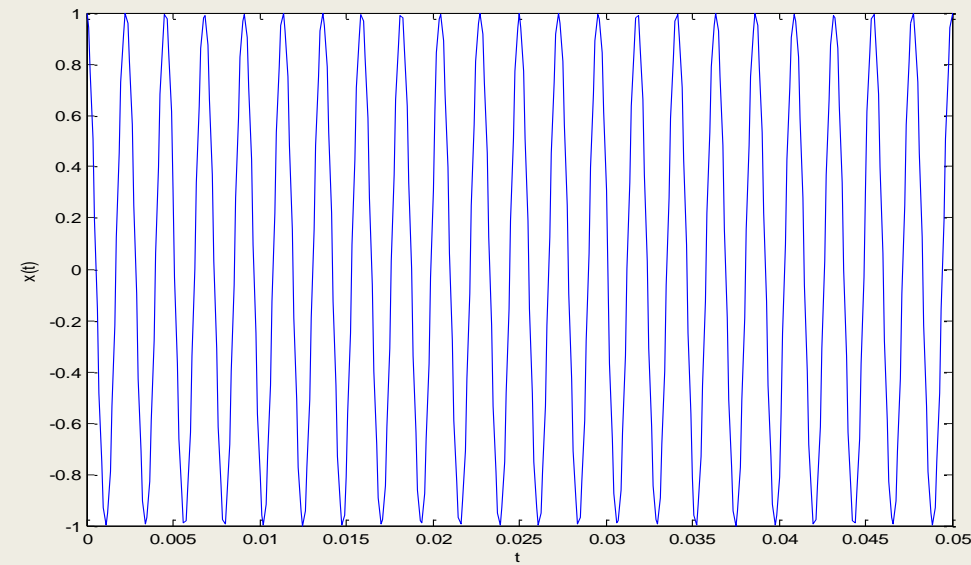
- Kako odrediti reprezentaciju signala u frekvencijskom domenu?
- Niz alata za određivanje spektra signala:
  - *Furijeov red*
  - *Furijeova transformacija*
  - *Diskretna Furijeova transformacija (FFT algoritam)*
  - *Diskretni Furijeov red*



# Spektar kontinualnog signala

## ■ Sinusoida

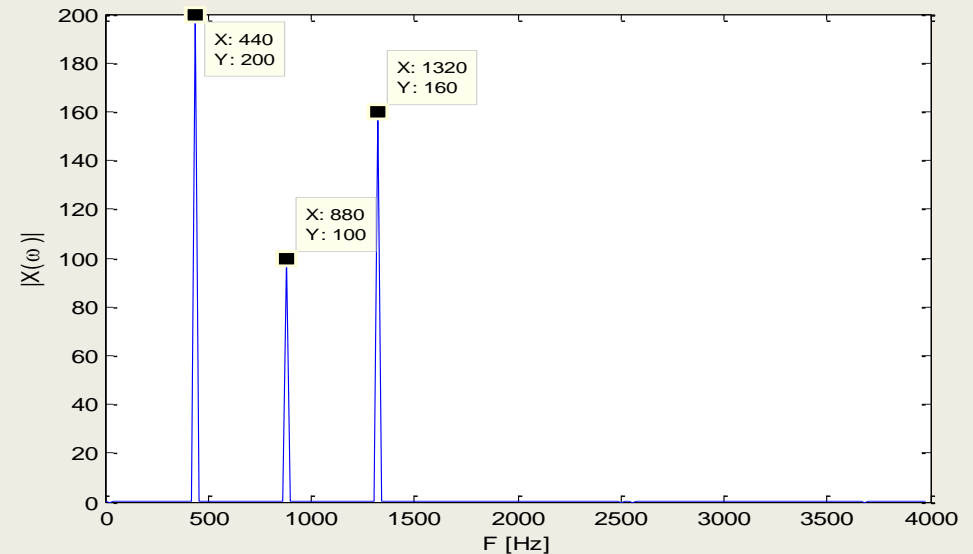
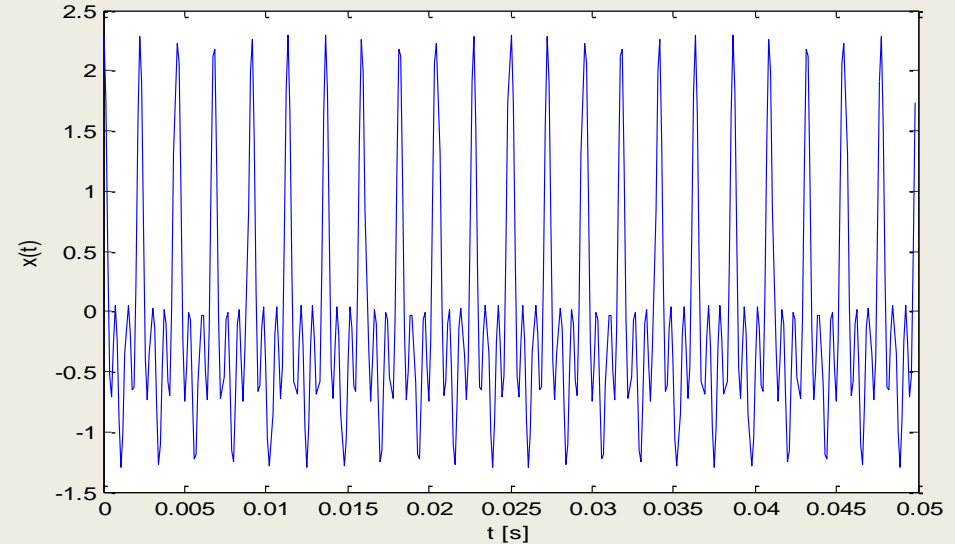
- $F = 440$  Hz
- $F_s = 8000$  Hz
- trajanje 0,05 s
- Broj tačaka DFT jednak broju odmjerača uzorka ( $N = 800$ )



# Spektar složenoperiodičnog signala

- Tri harmonika
- $F = 440$  Hz
- $F_S = 8000$  Hz

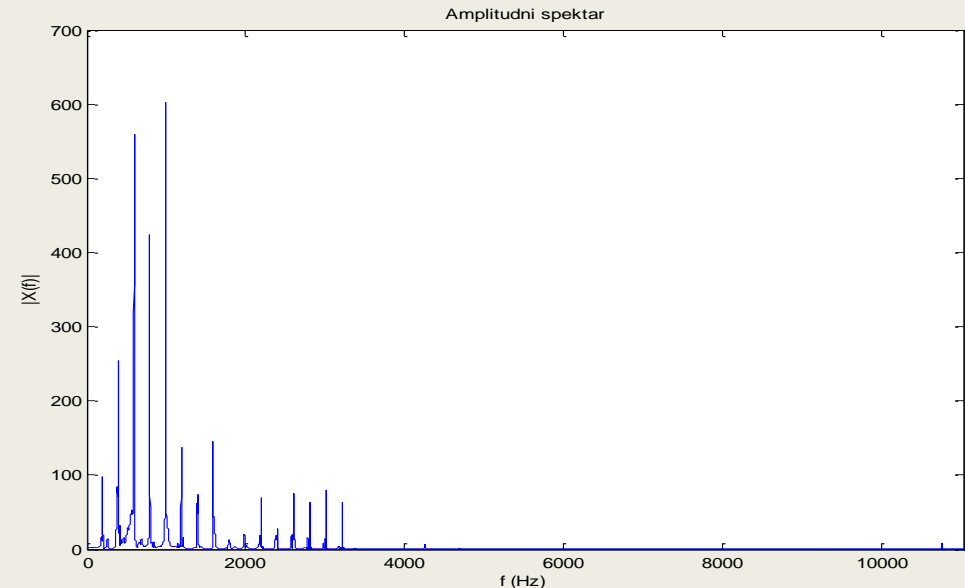
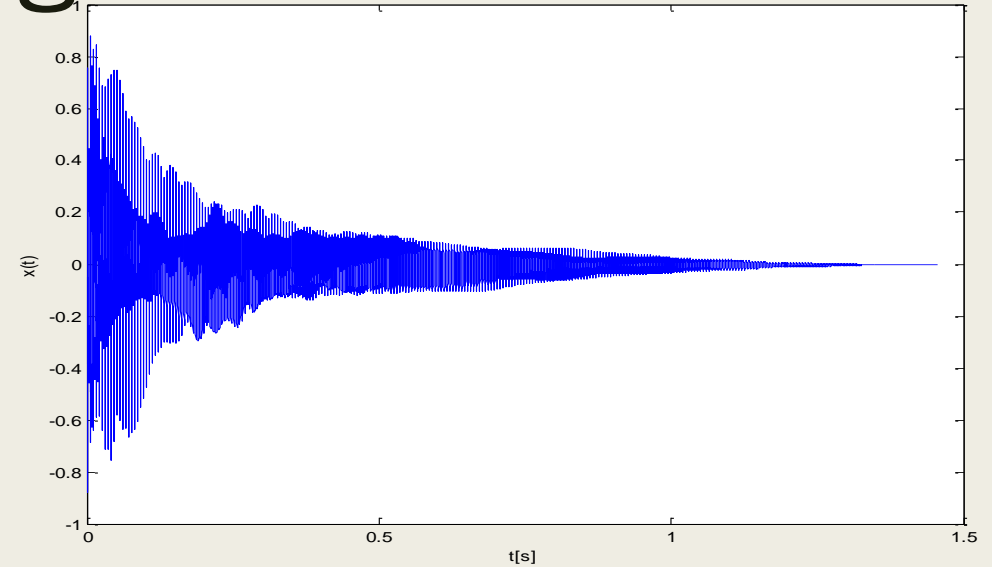
$$\begin{aligned}x(t) &= \cos(2\pi Ft) \\ &+ 0.5 \cos(2\pi 2Ft) \\ &+ 0.8 \cos(2\pi 3Ft)\end{aligned}$$



# Spektar tona muzičkog instrumenta

- Bendžo
- Linijska struktura spektra ukazuje na periodičnost analiziranog signala
- Razmak između linija (harmonika) odgovara fundamentalnoj frekvenciji tona
- Frekvencije u kojima je izračunat spektar su date sa

$$f_k = \frac{kF_s}{N}, k = 0 : N - 1$$



# Obrada audio signala

- Danas su digitalni audio efekti u osnovi muzičke produkcije
- Audio efekti se mogu primjeniti
  - *Kao dio sinteze zvuka*
  - *Na kraju audio lanca – dio produkcije/masteringa*
  - *Efekti se mogu primjeniti različitim redoslijedom*
  - *Redoslijed primjene efekata je bitan i rezultati mogu biti značajno različiti*
  - *Ne postoji neko pravilo za redoslijed primjene efekata*
  - *Primjer:*
    - *Compression → Distortion → EQ → Noise Redux → Amp Sim → Modulation → Delay → Reverb*

# Realizacija efekata

- Digitalni audio efekti se realizuju tehnikama digitalne obrade signala
- Efekti se mogu klasifikovati prema načinu obrade signala:
  - *Filtriranje: nisko/visokopropusni filtri, ekvilajzer*
  - *Vremenski promjenljivi filtri: Wah-wah, phaser*
  - *Kašnjenja: Vibrato, flanger, chorus, eho*
  - *Modulatori: Ring modulacija, tremolo, vibrato*
  - *Nelinearna obrada: Kompresija, limiter, distorzija*
  - *Specijalni efekti: Panning, reverb, surround*

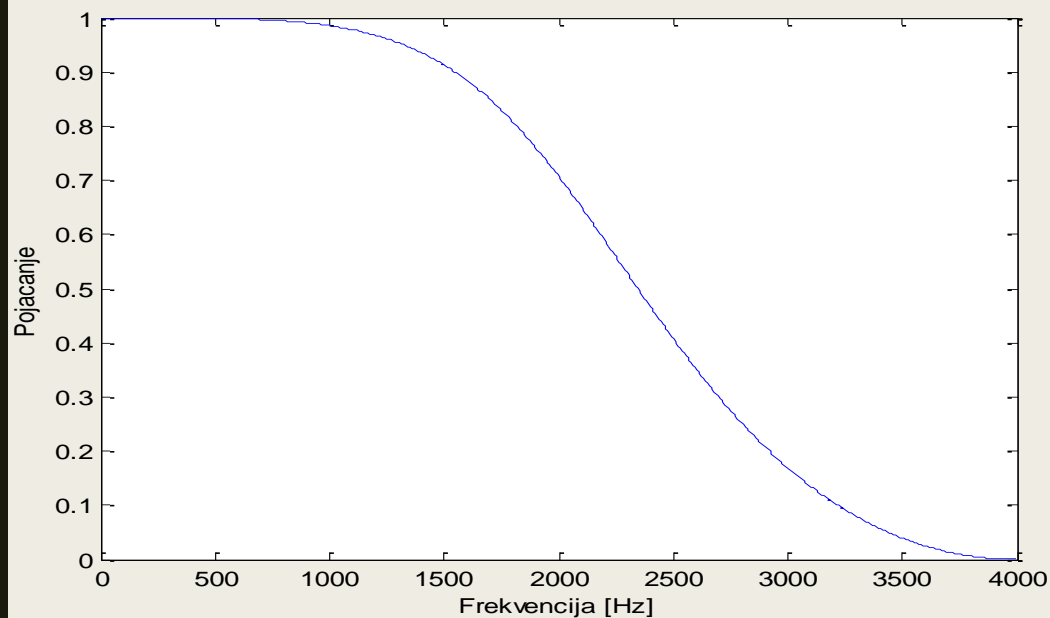
# Filtriranje

- Уklanjanje frekvencijskih komponenata iz nekog dijela spektra signala
  - *Niskopropusni filter – uklanja visoke frekvencije iz ulaznog signala, a ostavlja niske*
  - *Visokopropusni filter – uklanja niske frekvencije iz ulaznog signala, a ostavlja visoke*
  - *Filter propusnik opsega – uklanja frekvencije iz određenog opsega*
- Komponente najčešće nisu u potpunosti uklonjene već oslabljene

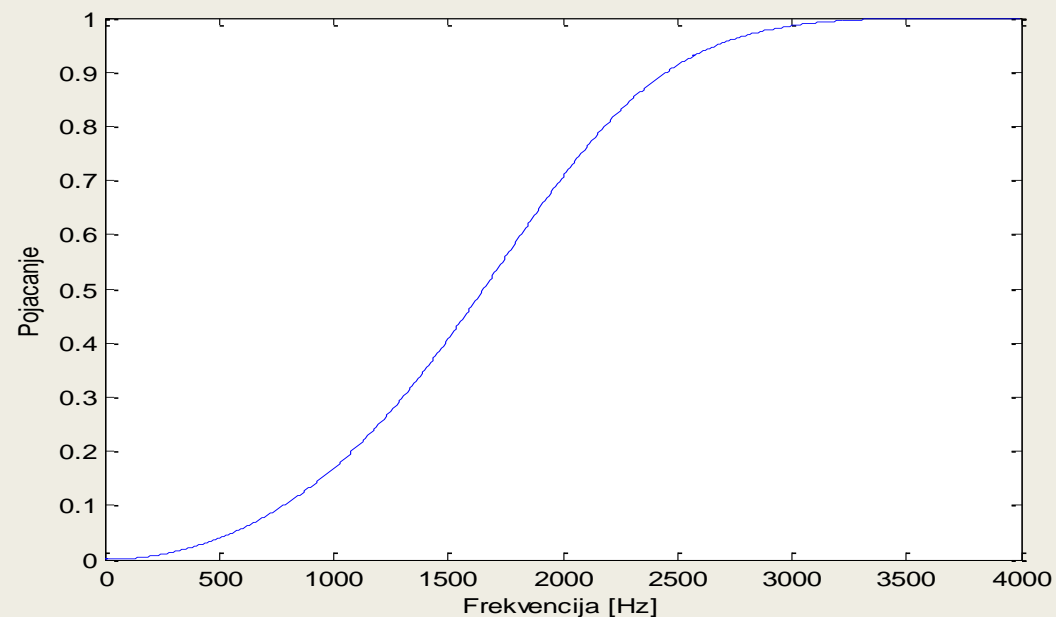
# Frekvencijska karakteristika

- Filtar je opisan **frekvencijskom karakteristikom**
- Frekvencijska karakteristika određuje kako će filter uticati na pojedine komponente (harmonike) signala

Niskopropusni filter



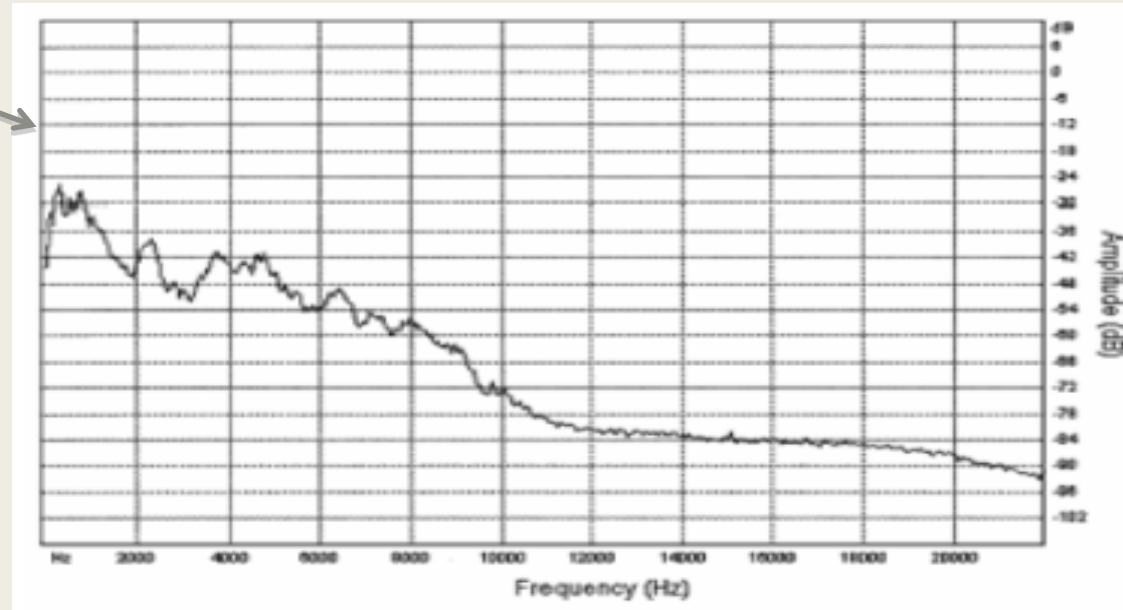
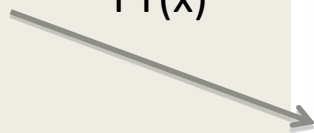
Visokopropusni filter



# Realizacija filtra

$x = \text{ulaz}$

$FT(x)$

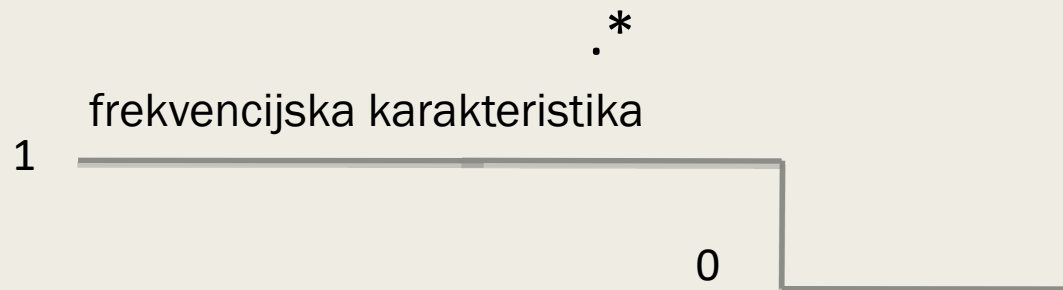
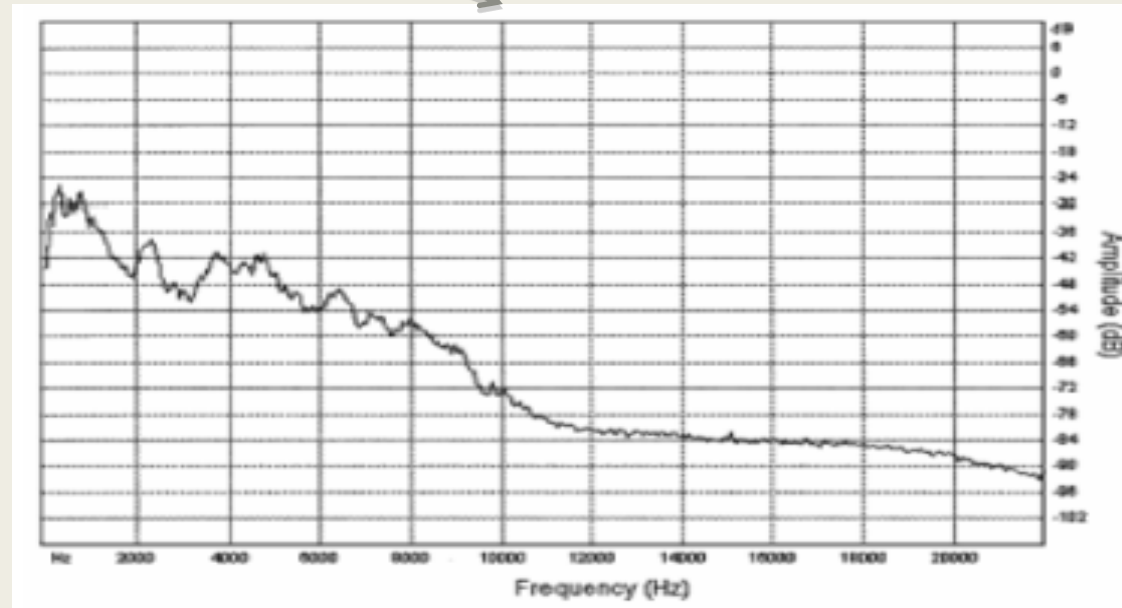




# Realizacija filtra

$x = \text{ulaz}$

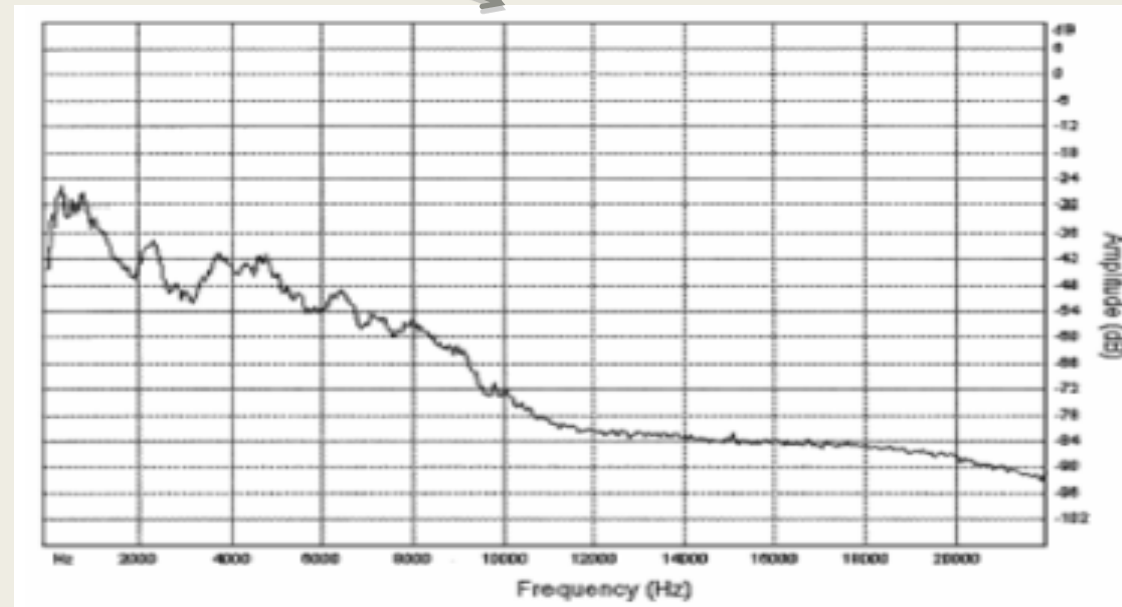
$FT(x)$



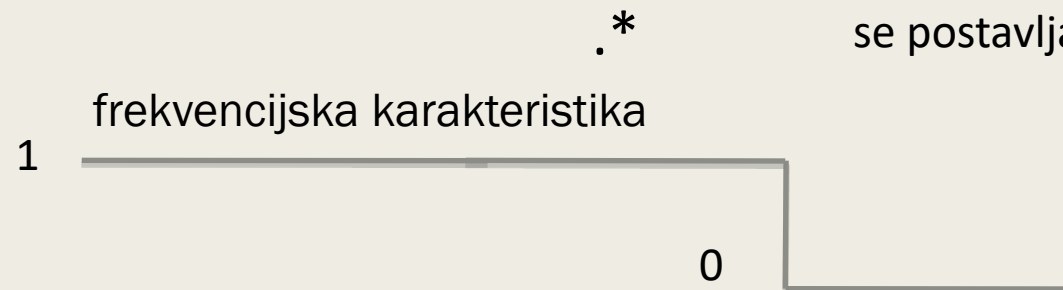
# Realizacija filtra pomoću FT i IFT

$x = \text{ulaz}$

$FT(x)$

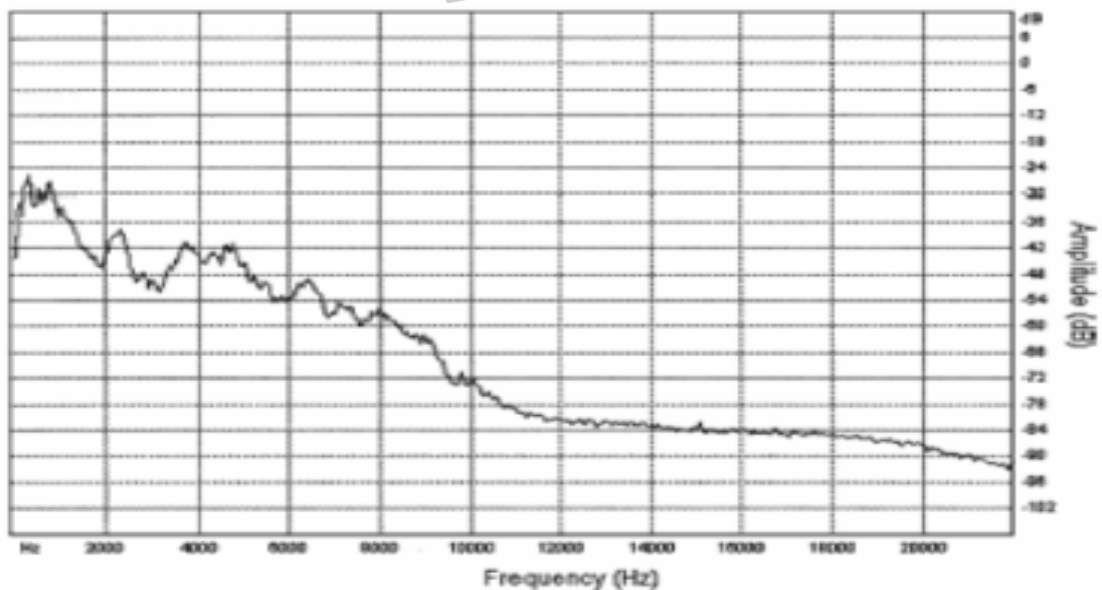


Neke frekvencijske komponente  
se postavljaju na nulu

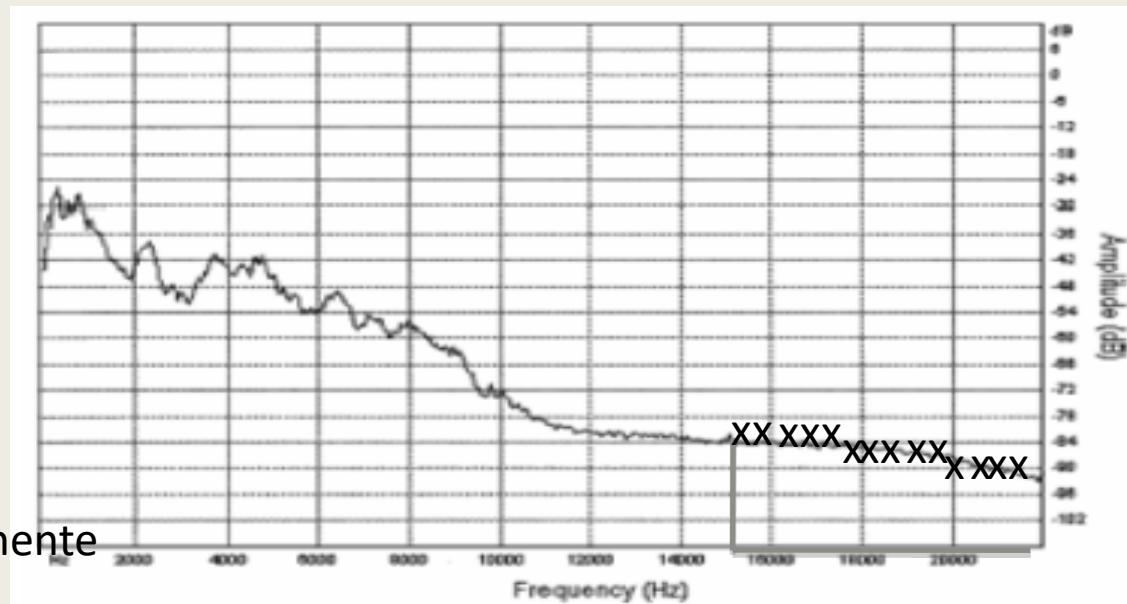


# Realizacija filtra pomoću FT i IFT

$x$  = ulaz



=



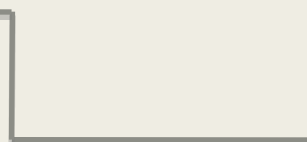
Neke frekvencijske komponente se postavljaju na nulu

\*

frekvencijska karakteristika

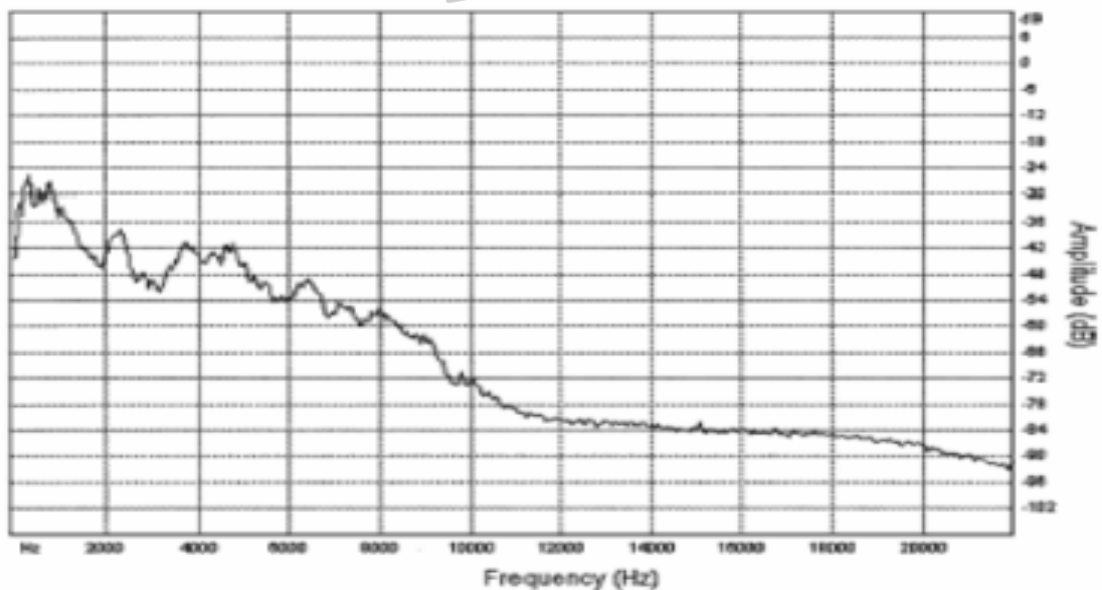
1

0

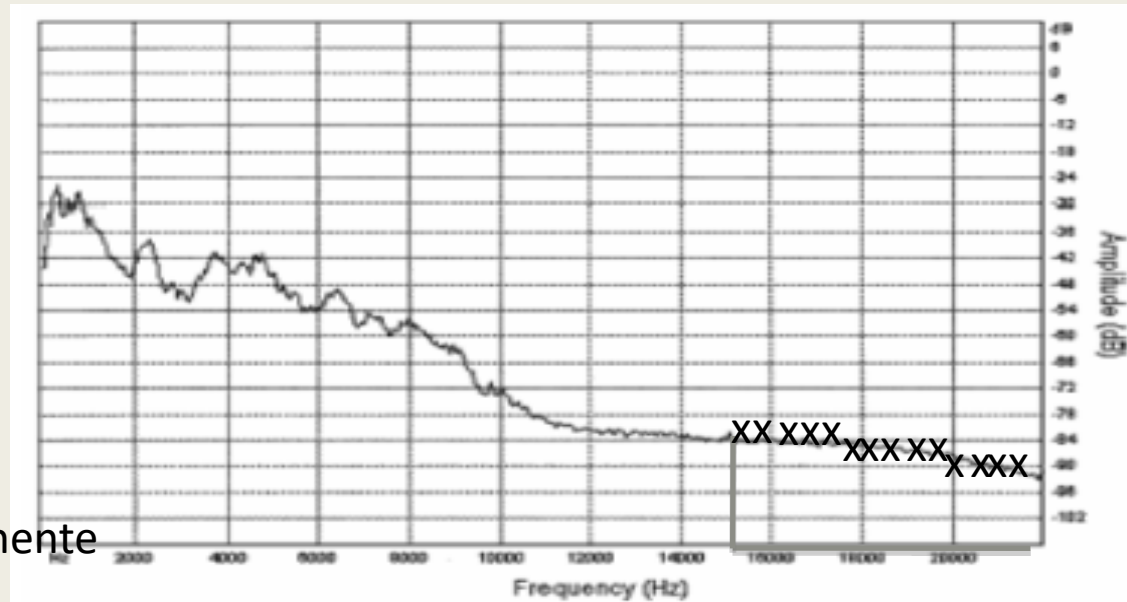


# Realizacija filtra pomoću FT i IFT

$x$  = ulaz



=



Neke frekvencijske komponente se postavljaju na nulu

1 \*  
frekvencijska karakteristika



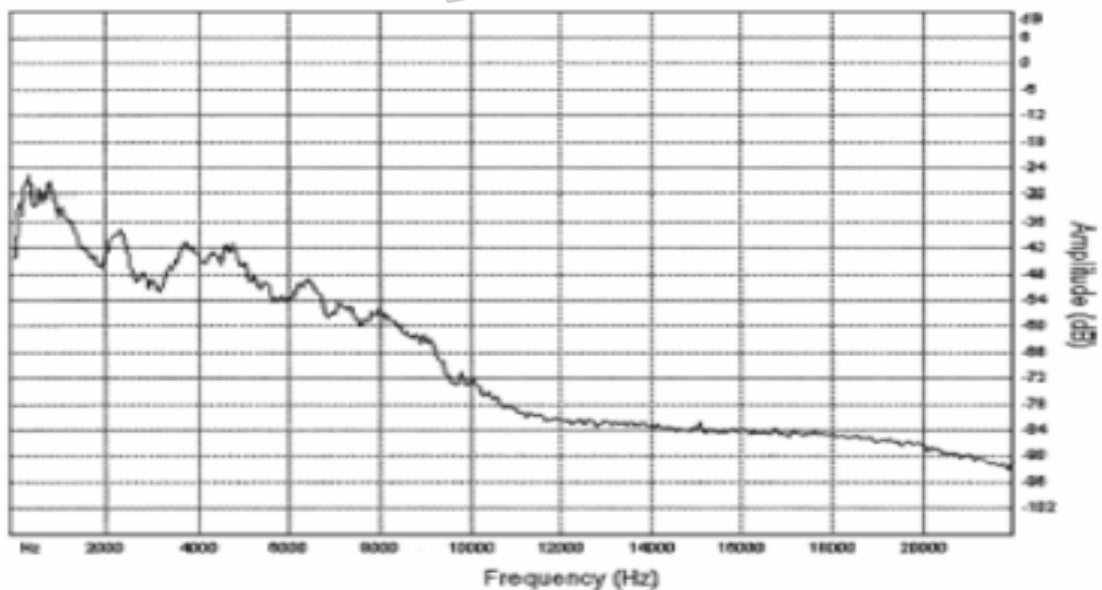
$y$  = frekvencijski ograničen izlaz

# Realizacija filtra pomoću FT i IFT

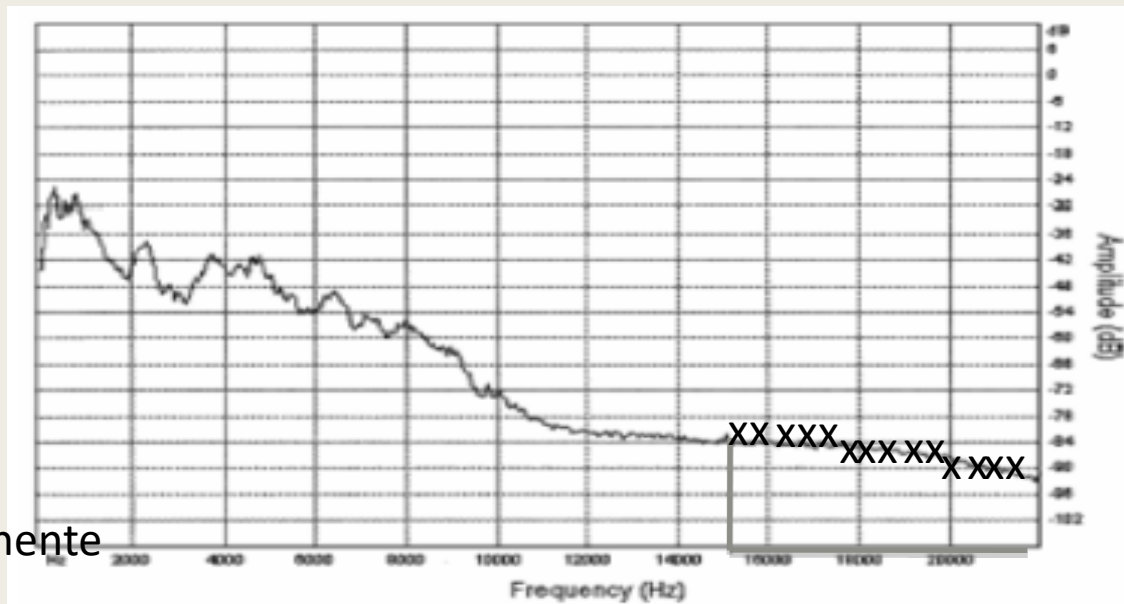
$x = \text{ulaz}$



Kakav je ovo filter?



=



Neke frekvencijske komponente se postavljaju na nulu

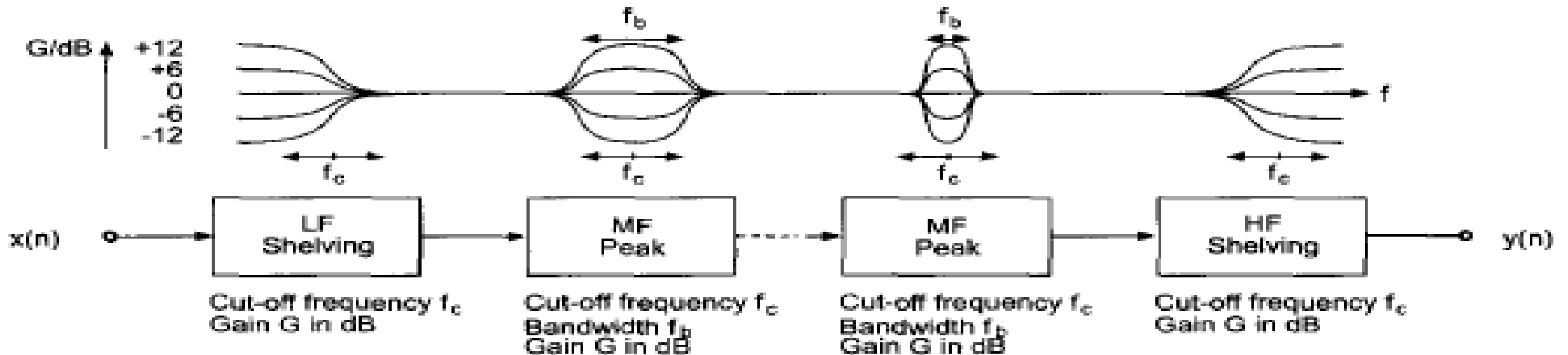
1 \*  
frekvencijska karakteristika



$y = \text{frekvencijski ograničen izlaz}$

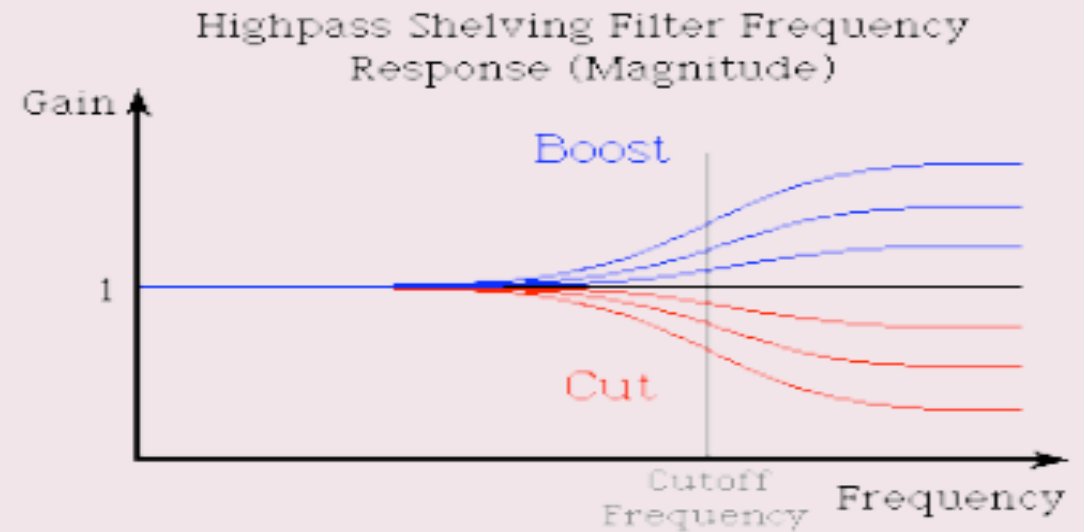
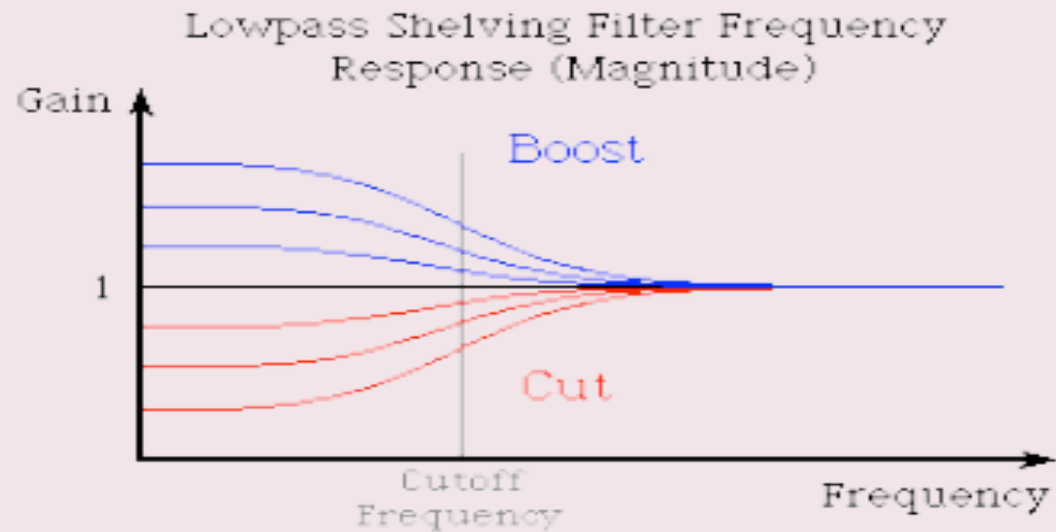
# Primjer

- Еквилажер се састоји од каскадне везе фреквенцијски селективних филтара



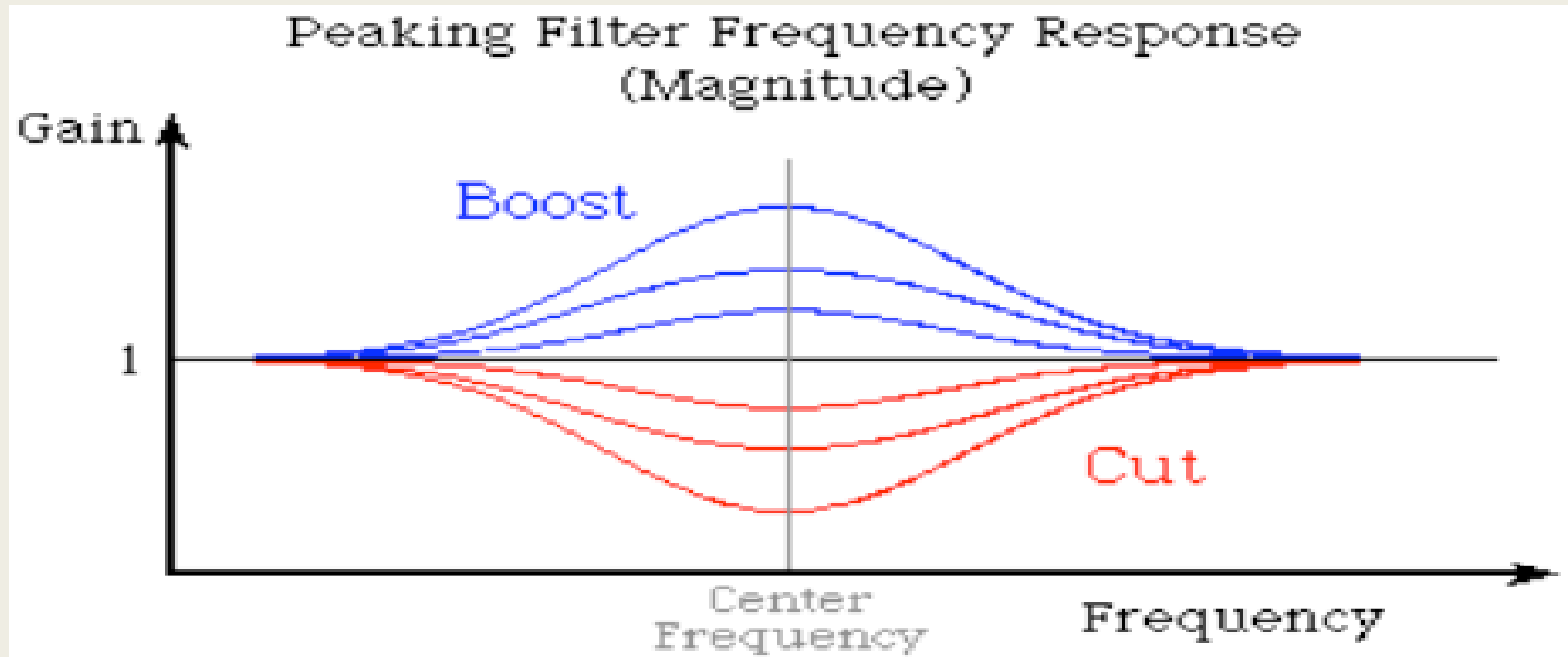
# Dijelovi ekvilajzera

- Nisko i visokopropusni shelving filtri
- Određeni su граничном frekvencijom  $F_c$  i pojačanjem  $G$



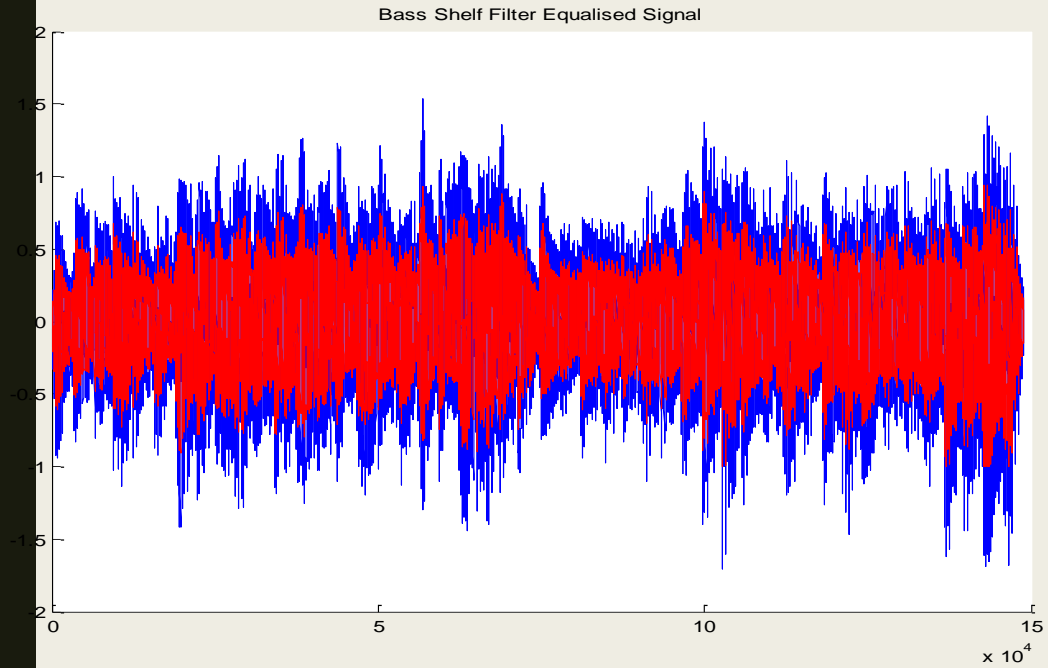
# Dijelovi ekvilajzera

- Peaking filter propusnik opsega
- Određen centralnom frekvencijom  $F_C$ , širinom propusnog opsega i pojačanjem

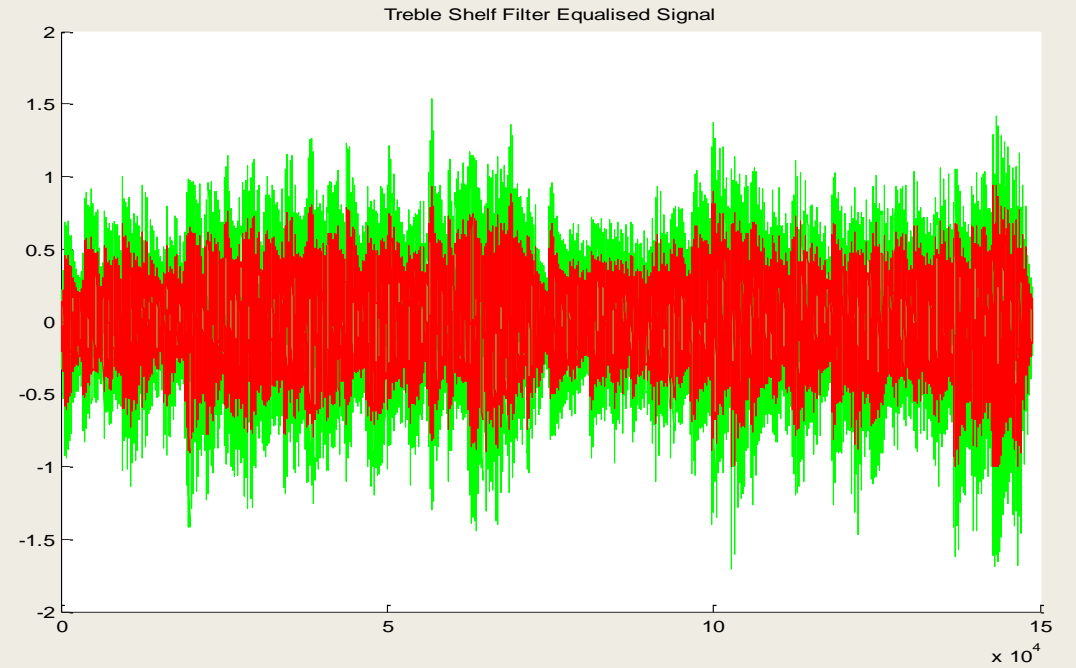




# Izlaz iz shelving filtra



Bass shelf filtrirani signal



Treble shelf filtrirani signal

Originalni signal

# Realizacija filtriranja

- Filtriranje se može realizovati konvolucijom signala i impulsnog odziva filtra

$$y(n) = x(n) * h(n)$$

- Primjenom konvolucione teoreme dobijamo

$$Y(\omega) = X(\omega)H(\omega)$$

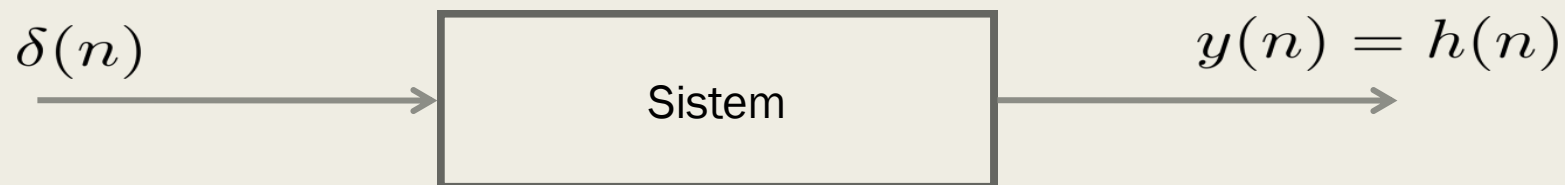
- Spektar izlaznog signala jednak je proizvodu spektra ulaznog signala i FT impulsnog odziva (**frekvencijske karakteristike**) filtra

# Impulsni odziv

- Odziv sistema na jedinični impuls je **impulsni odziv** sistema

$$\delta(n) = \begin{cases} 1 & n = 0 \\ 0 & n \neq 0 \end{cases}$$

- Impulsni odziv može biti:
  - *Beskonačan (Infinite Impulse Response, IIR)*
  - *Konačan (Finite Impulse Response, FIR)*



# Konvolucija

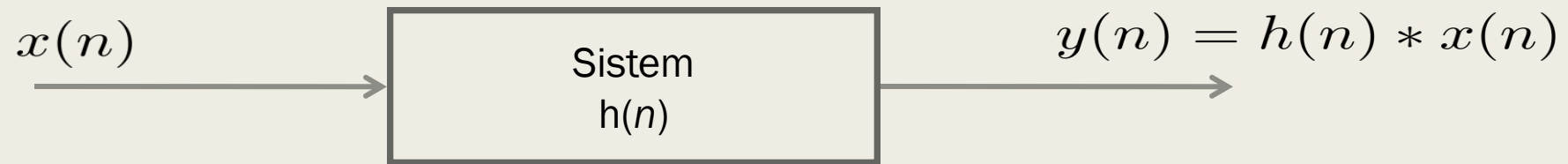
- Sistem je karakterisan impulsnim odzivom.
- Odziv na proizvoljnu pobudu je konvolucija ulaznog signala i impulsnog odziva:

$$y(n) = h(n) * x(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)x(n-k) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)h(n-k)$$

- Ako je sistem FIR tipa onda imamo:

$$y(n) = h(n) * x(n) = \sum_{k=0}^N h(k)x(n-k) = \sum_{k=0}^N x(k)h(n-k)$$

- $N$  je dužina impulsnog odziva



# Izračunavanje konvolucije

$$y(n) = h(n) * x(n) = \sum_{k=0}^N h(k)x(n-k) = \sum_{k=0}^N x(k)h(n-k)$$

signal

x =	1	3	2	5	3	2	4	5
-----	---	---	---	---	---	---	---	---

filter

h =	1/3	1/3	1/3
-----	-----	-----	-----

# Izračunavanje konvolucije

$$y(n) = h(n) * x(n) = \sum_{k=0}^N h(k)x(n-k) = \sum_{k=0}^N x(k)h(n-k)$$

	1	3	2	5	3	2	4	5
*	1/3	1/3	1/3					
=	-	2						

# Izračunavanje konvolucije

$$y(n) = h(n) * x(n) = \sum_{k=0}^N h(k)x(n-k) = \sum_{k=0}^N x(k)h(n-k)$$

	1	3	2	5	3	2	4	5
*		1/3	1/3	1/3				
=	-	2	10/3					

# Izračunavanje konvolucije

$$y(n) = h(n) * x(n) = \sum_{k=0}^N h(k)x(n-k) = \sum_{k=0}^N x(k)h(n-k)$$

	1	3	2	5	3	2	4	5
*			1/3	1/3	1/3			
=	-	2	10/3	10/3				



# Izračunavanje konvolucije

$$y(n) = h(n) * x(n) = \sum_{k=0}^N h(k)x(n-k) = \sum_{k=0}^N x(k)h(n-k)$$

	1	3	2	5	3	2	4	5
*				1/3	1/3	1/3		
=	-	2	10/3	10/3	10/3			

# Izračunavanje konvolucije

$$y(n) = h(n) * x(n) = \sum_{k=0}^N h(k)x(n-k) = \sum_{k=0}^N x(k)h(n-k)$$

	1	3	2	5	3	2	4	5
*					1/3	1/3	1/3	
=	-	2	10/3	10/3	10/3	3		

# Izračunavanje konvolucije

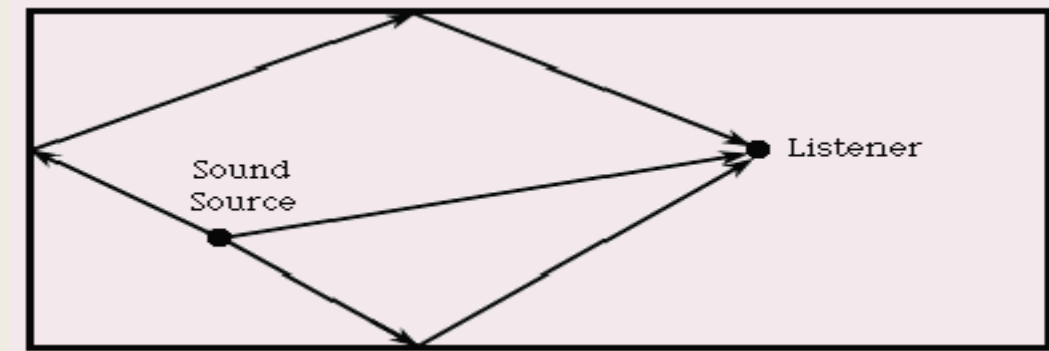
$$y(n) = h(n) * x(n) = \sum_{k=0}^N h(k)x(n-k) = \sum_{k=0}^N x(k)h(n-k)$$

	1	3	2	5	3	2	4	5	
*							1/3	1/3	1/3
=	-	2	10/3	10/3	10/3	3	11/3	-	

Šta radi ovaj filter?

# Reverberacije

- Jedan od najčešće korištenih audio-efekata
- Rezultat mnogobrojnih refleksija zvuka u zatvorenom prostoru
  - Od izvora, npr. zvučnika, obično postoji direktan put zvuka do slušaoca
  - Ali, zvučni talasi mogu do slušaoca doći i dužim putem, reflektujući se od zidova i plafona
  - Reflektovani talas će zakasniti i biće oslabljen
  - Reflektovani talasi se mogu odbiti više puta prije dolaska do slušaoca
  - Niz zakašnjelih i oslabljenih talasa predstavlja **reverberacije**
  - Daje prostorni osjećaj zvuku
  - Богатији звук се добија у већим просторима



# Reverberacije i kašnjenje

- Kašnjenje proizvodi sličan efekat ali
  - *Kod reverberacija brzina pristizanja refleksija se mijenja tokom vremena*
  - *Kašnjenje može simulirati refleksije sa fiksnim razmakom*
- Kod reverberacija postoji skup jasnih usmjerenih refleksija koje zavise od oblika i veličine prostorije, te položaja izvora i slušaoca – rane refleksije
- Nakon ranih refleksija brzina pristizanja se povećava i slučajno je raspoređena pa se teško povezuje sa fizičkim karakteristikama prostorije – kasne refleksije
  - *Značajne za percepciju prostora u zvuku*
  - *Eksponencijalno opadaju u koncertnim salama*

# Realizacija reverberacija

- Dvije klase realizacija:
  - *Pomoću filtera i linija za kašnjenje*
  - *Pomoću konvolucije i impulsnog odziva*  
(ovo ćemo razmotriti detaljnije)

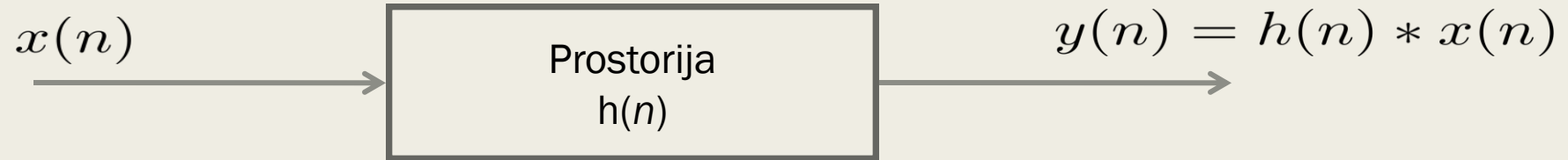
# Konvolucioni reverberator

- Ако је познат impulsni odziv prostorije vjerne reverberacije se mogu dobiti konvolucijom sa ulaznim signalom
- Diskretna konvolucija

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)h(n-k) = x(n) * h(n)$$

- Konvolucija se efikasno može računati pomoću brze Furijeove transformacije (FFT)

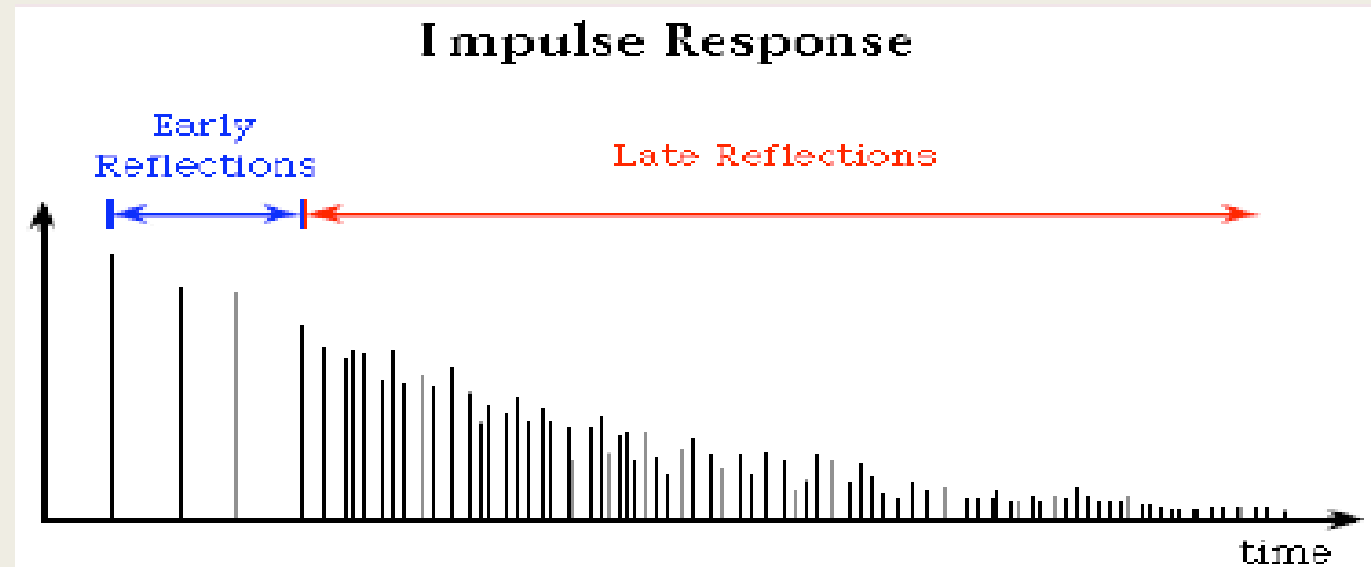
# Konvolucioni reverberator





# Impulsni odziv prostorije

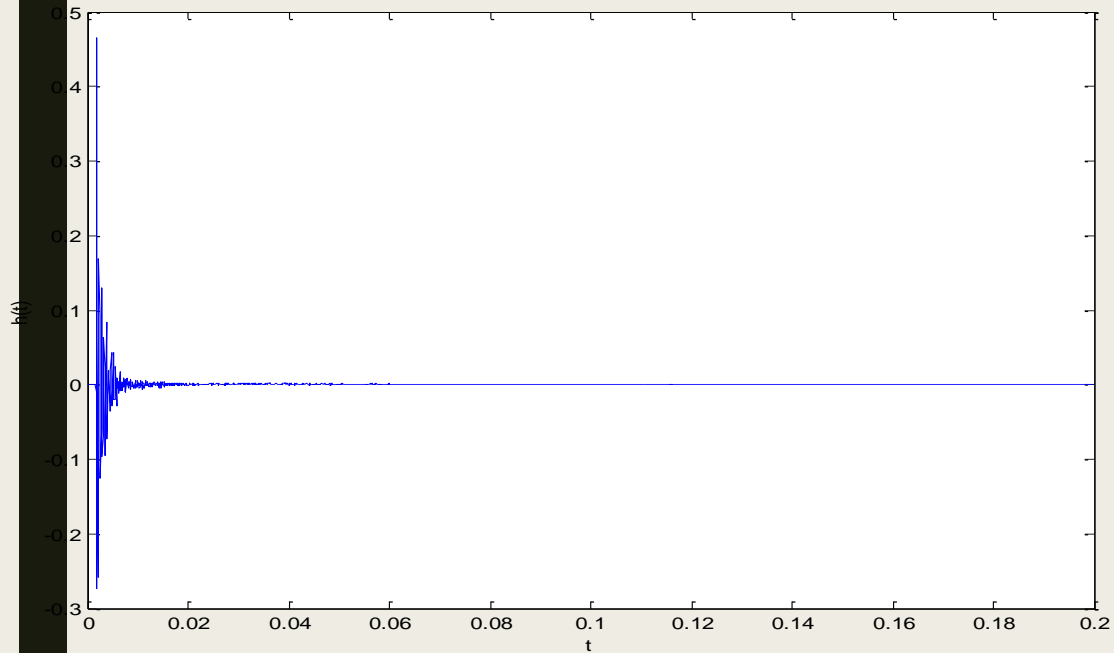
- Snimiti kratak impuls (pucanj, pljesak,...) u prostoriji
- Snimak sadrži impulsni odziv prostorije – reverberacione karakteristike
- Impulsni odziv se može i matematički modelirati



# Primjeri konvolucione reverberacije

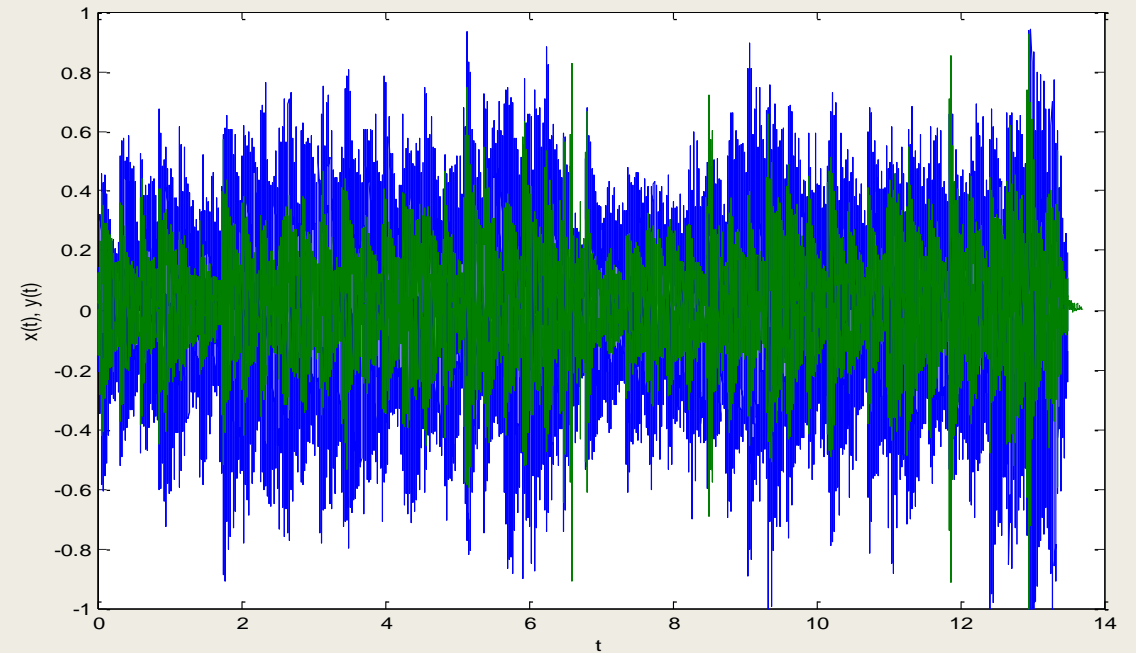
Soba

impulsni odziv



[Impulse\\_room.wav](#)

ulazni i izlazni signal

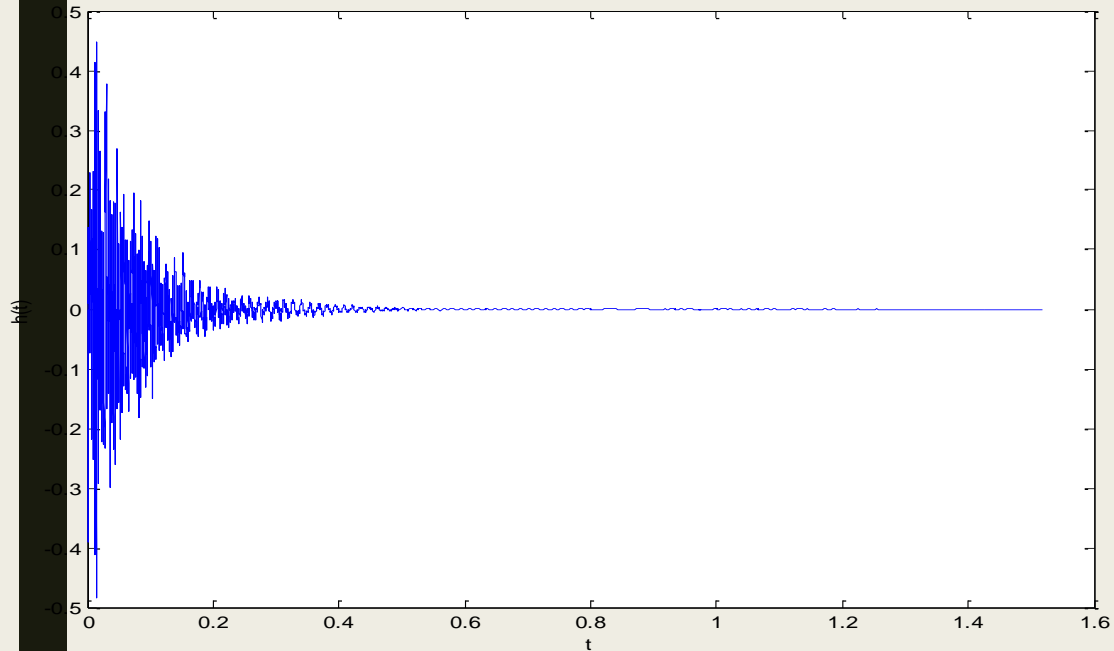


[out\\_convverb\\_room.wav](#)

# Primjeri konvolucione reverberacije

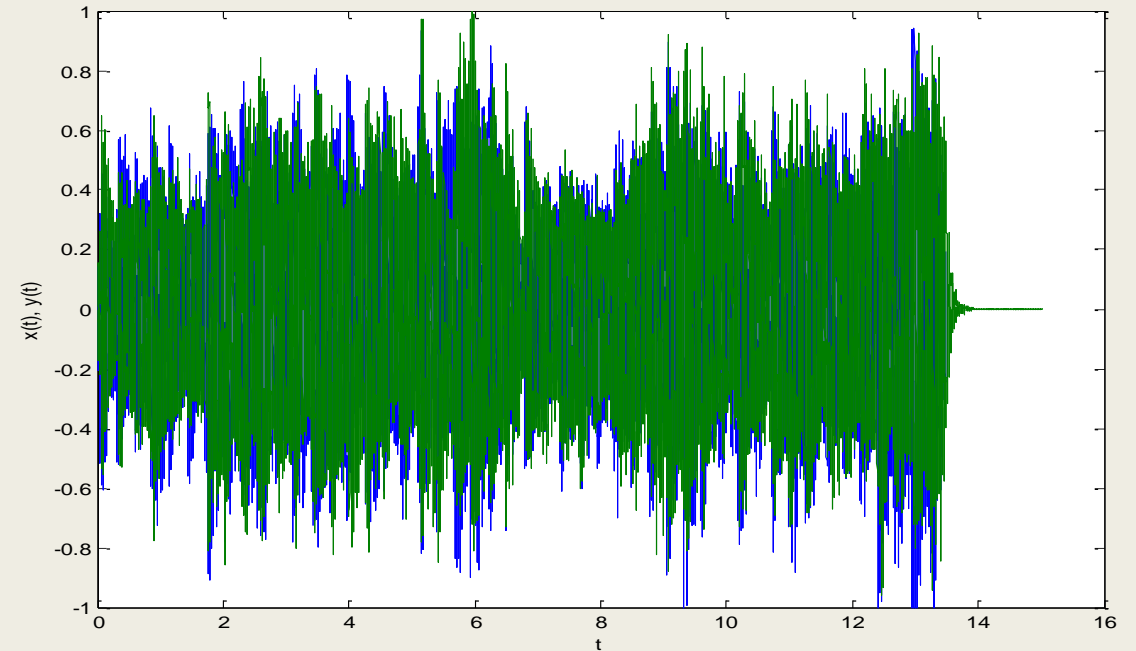
Kupatilo

impulsni odziv



[Impulse\\_bathroom.wav](#)

ulazni i izlazni signal

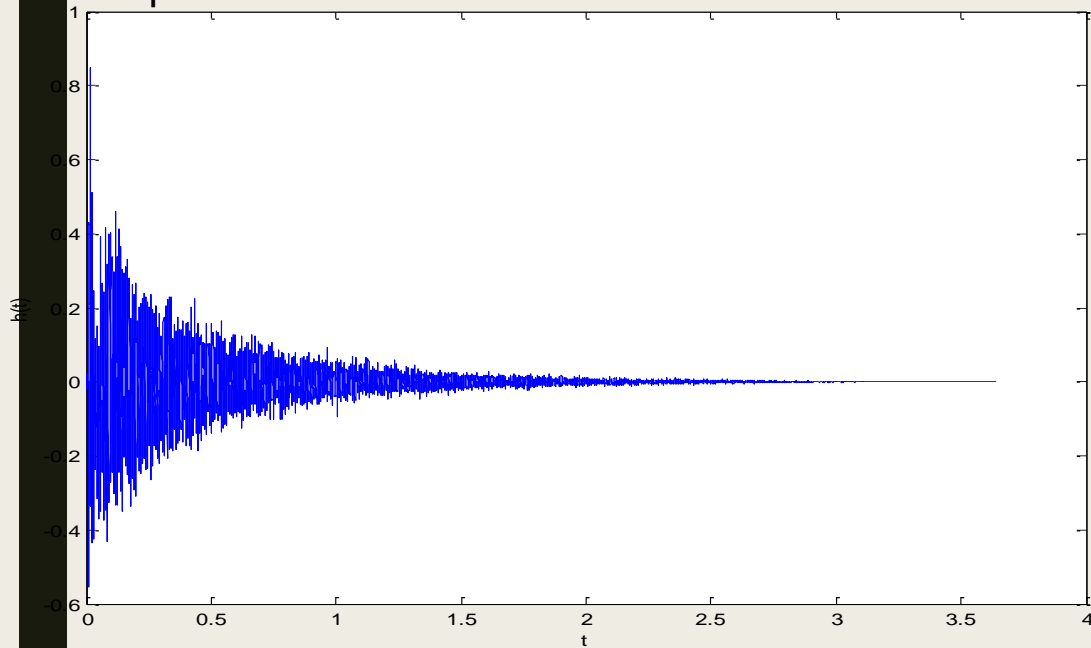


[Out\\_convreverb\\_bathroom.wav](#)

# Primjeri konvolucione reverberacije

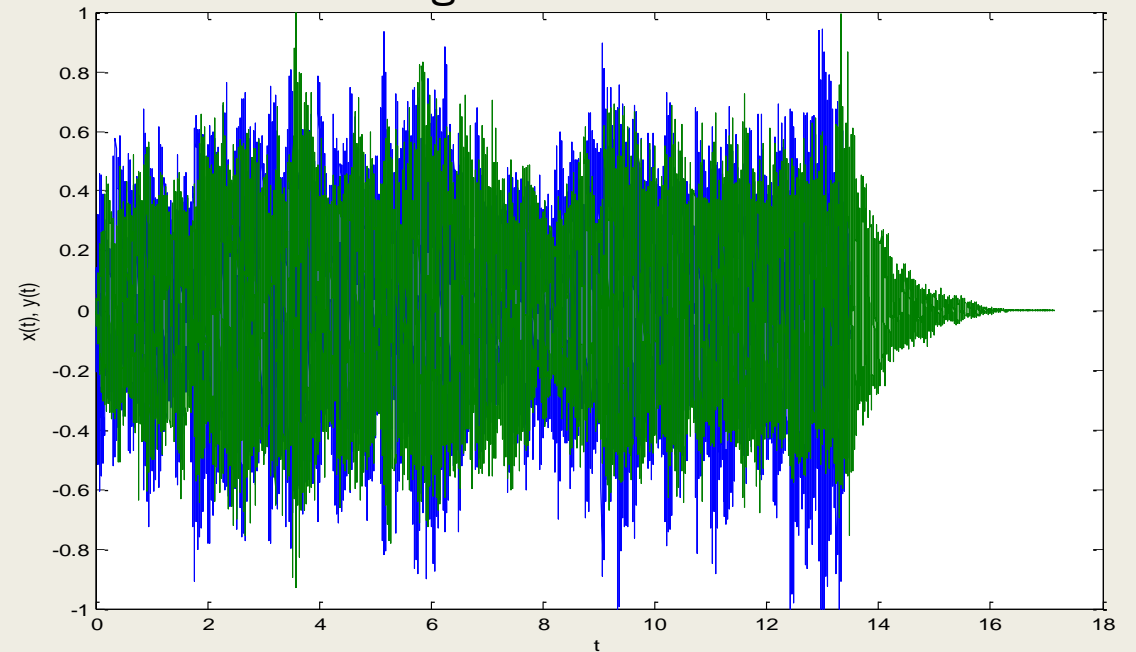
## Katedrala

impulsni odziv



[Impulse\\_cathedral.wav](#)

ulazni i izlazni signal

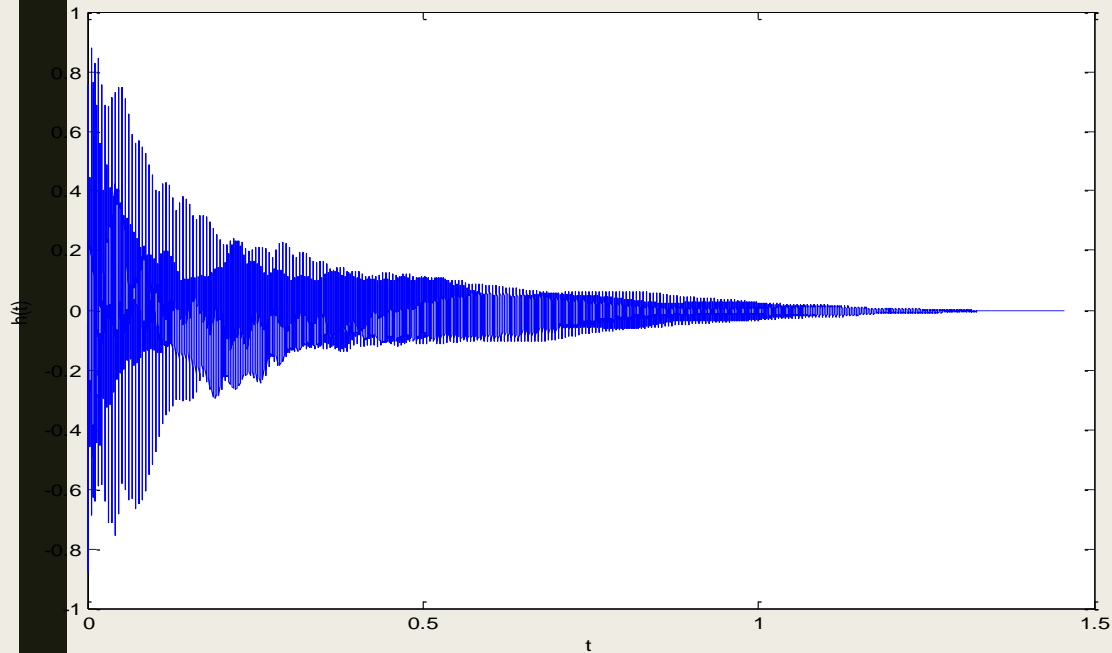


[out\\_convreverb\\_cathedral.wav](#)

# Zabavi nije kraj

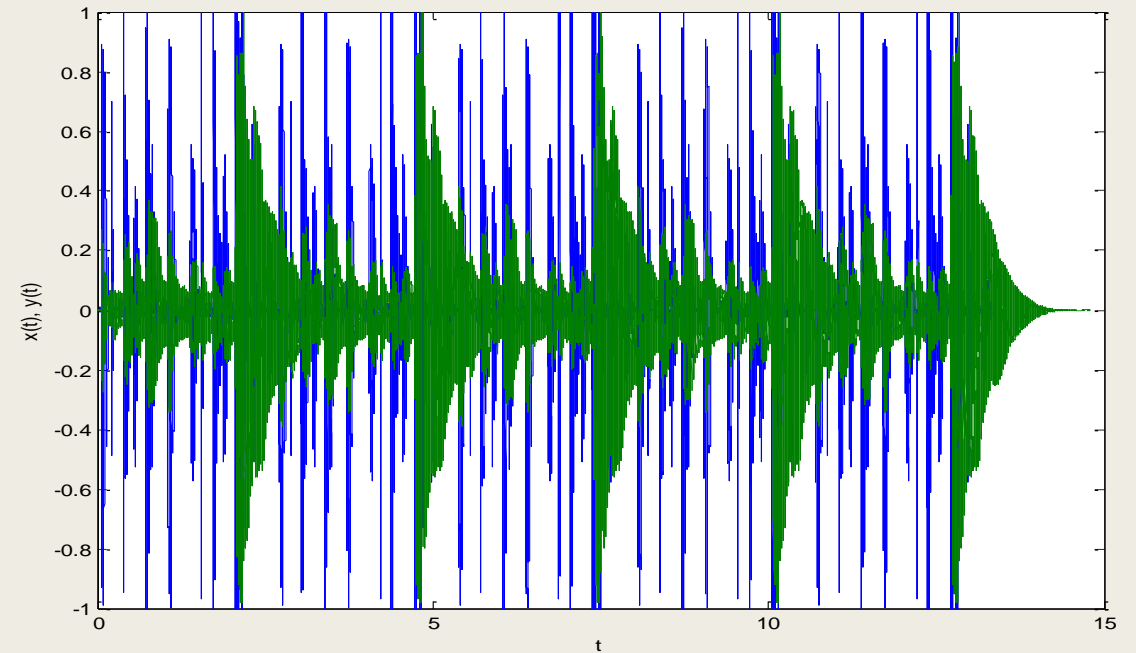
Može se računati konvolucija različitih signala

impulsni odziv



[Banjo.wav](#)

ulazni i izlazni signal



[Dnb5.wav](#)

[Dnb\\_banjo.wav](#)

# Komercijalni konvolucioni reverberatori

- [Altiverb](#) – jedan od prvih komercijalnih konvolucionih reverberatora
- Većina sintesajzera zasnovanih na semplovima (npr. Kontakt, Intakt) sadrže konvolucionu reverberaciju
- Specijalizovani softverski instrumenti kao što je [PianoTeq](#) klavir takođe koriste konvoluciju ne samo za reverberaciju već za simulaciju vibracija tijela instrumenata

