

Akustika govora

Uvod

Obavijesne osobine glasnika

Komunikacija temeljena na akustici

Uvjeti jezične komunikacije koja se temelji na zvuku:

- proizvodnja zvuka
- medij koji provodi zvuk
- percepcija zvuka

Osnovna akustička svojstva govornih zvukova:

- frekvencija (percipira se kao ton, pitch)
- amplituda (glasnoća)
- trajanje (dužina)
- spektar: sastav i oblik (boja zvuka, voice quality, timbre)

Zašto se jezična komunikacija razvila u zvučnom mediju?

- uporaba ruku za druge poslove
- komunikacija noću
- ogib zvuka
- raznolikost znakova
- mogućnost kombiniranja više vrsta znakova u jednoj poruci (verbalni i neverbalni)
- brzo i zalihosno kodiranje

Što je zvuk?

- Koji događaji proizvode zvuk?
- pokreti – uzrokuju fluktuacije tlaka u zraku (mediju) – one dolaze do bubnjića – pokret – slušni sustav prevodi pokrete u neuralne impulse – doživljaj zvuka
- Zvuk – mehanički titraji (vibracije) koje čovjek može čuti
 - infrazvuk – ispod 16 titraja u sek.,
 - ultrazvuk – iznad 20.000 Hz)
- Dvije osobine mehaničkih titraja:
 - Brza izmjena kinetičke i potencijalne energije
 - Valno širenje kroz elastična tijela (kruta, tekuća, plinovita)

Širenje zvuka

- Zvučni val – snimak fluktuacije zraka (koje proizvode zvuk) u vremenu
- Akustički medij: zrak, voda, helij...
 - Osobine zvuka ovise o mediju
 - Medij treba biti elastičan (molekule se odmiču i primiču)
 - Zvučni val troši energiju na pomicanja molekula (u toplinu)
- Što je zvuk u materijalnom smislu?
- Kako se kreću molekule?
 - Longitudinalno/transverzalno?
 - Negativan tlak (refrakcija) i pozitivan tlak (kompresija)

Temeljne vrste zvuka

- Periodični (harmonični zvuk) i aperiodični (šumovi)
 - Periodični zvuk: uzorak se ponavlja u pravilnim intervalima (jednostavan i kompleksan)
 - Aperiodični: nema uzorka koji se ponavlja
- Jednostavan periodični zvuk: sinusoidni valovi
 - frekvencija – koliko se puta sinusoidni obrazac ponovi u vremenu, broj ciklusa u sekundi $f=1/T$
 - Ciklus – svako ponavljanje obrasca
 - Period – trajanje ciklusa (T)
 - Ako je $T=0,01s$, kolika je f ?
 - amplituda
 - faza

Fourierov teorem

- Kompleksni periodični zvonki
 - Fourierov teorem: svi kompleksni periodični zvonki mogu se dekomponirati na sinusoidne valove određene frekvencije, amplitude i odnosa faze
 - rezultat Fourierove analize je spektar

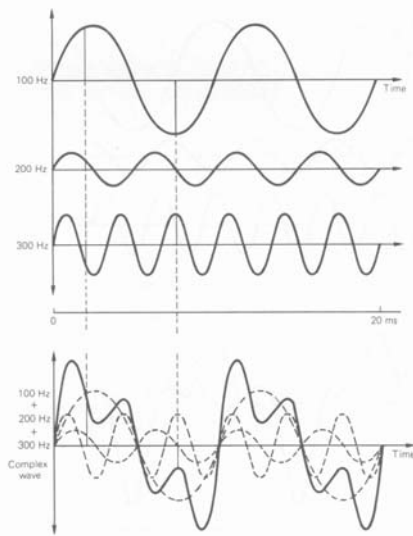


FIGURE 7.4.1 Complex wave with three sinusoidal components (100 Hz, 200 Hz, 300 Hz). Adapted from: Ladefoged 1962, p. 35.

FFT

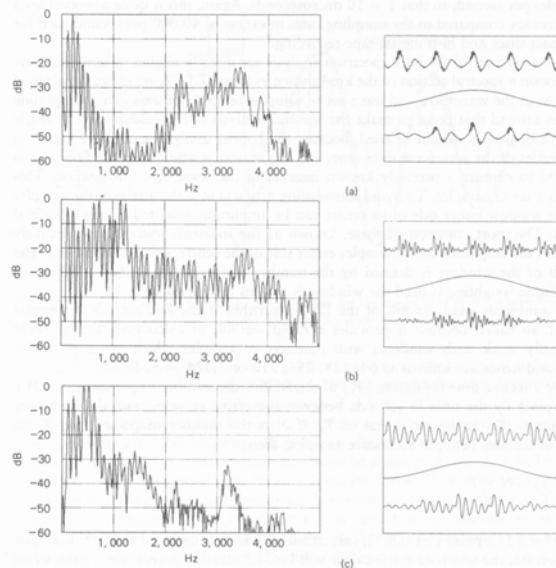


FIGURE 7.14.7 FFT analyses (512-point) of the vowels (a) [i:], (b) [a:]; (c) [ɔ:], together with their windowed waveforms used in the analysis

Osnovne vrste prikaza zvuka

Koje se vrijednosti očitavaju s apscise (x), a koje s ordinate (y)?

- Oscilogram (x-vrijeme, y-amplituda)
- Spektar (x-frekvencija, y-amplituda)
- Spektrogram, sonogram (x-vrijeme, y-frekvencija, z-intenzitet – jačinom zatamnjenja)

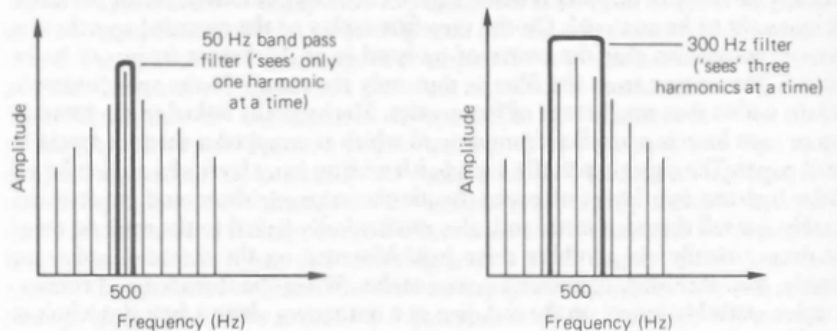
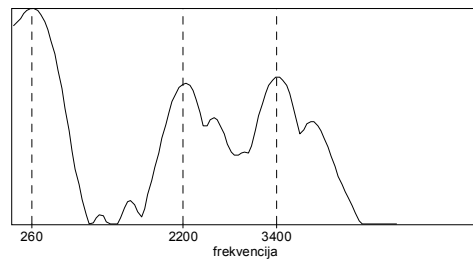
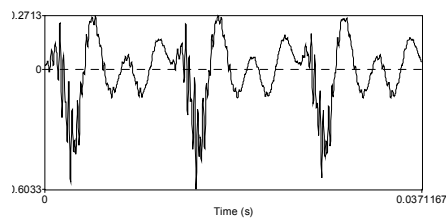
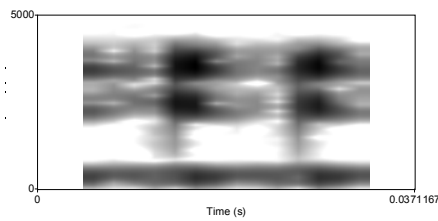


FIGURE 7.14.4 Effects of narrow (50 Hz) and broad (300 Hz) bandpass filters

Spektar, spektrogram i oscilogram vokala i (3 periode)



$F_1 = 260$ Hz
 $F_2 = 2200$ Hz
 $F_3 = 3400$ Hz



Opća fonetika: akustika govora

Elenmari Pletikos: 2006/07

11

Govorni zvuk: model izvora i filtra

Škarić izvor naziva primarnim, a filtar sekundarnim izvorom zvuka u izvoru nastaje, a zatim se pojačava i stišava na dijelovima spektra

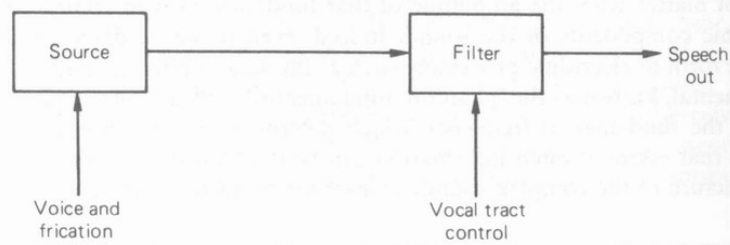


FIGURE 7.10.1 Source and filter model of speech production

Opća fonetika: akustika govora

Elenmari Pletikos: 2006/07

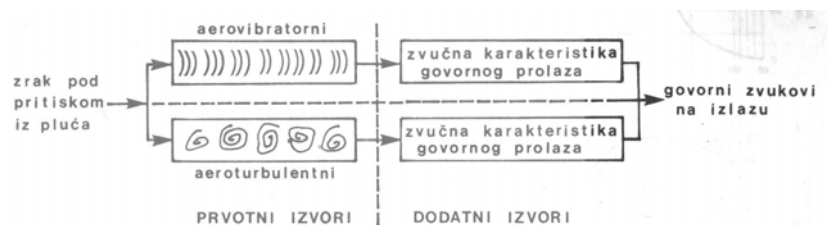
12

Govorni zvuk

- **Prvotni izvor zvuka**
 - zračno-treptavi (aerovibratorni) → periodični titraji, harmonični spektralni sastav, ton
 - zračno-vrtložni (aeroturbulentni) → aperiodični titraji, kaotični sastav, šum
- **Dodatni izvor zvuka (filtrar)**
 - pojačavanje
 - prigušivanje
 - rezonancije
 - antirezonancije

Dva načina nastanka zvuka

- U primarnom izvoru zvuk nastaje na 2 načina:
 - aerovibratornim, zračnotreptavim (glasnice) – harmoničan zvuk
 - aeroturbulentnim, zračnovrtložnim (suženje u vokalnom traktu) – šuman zvuk



Sl. 79. Shematski prikaz dvaput dvostrukih izvora govornih zvukova

Odnos fonacije i spektra

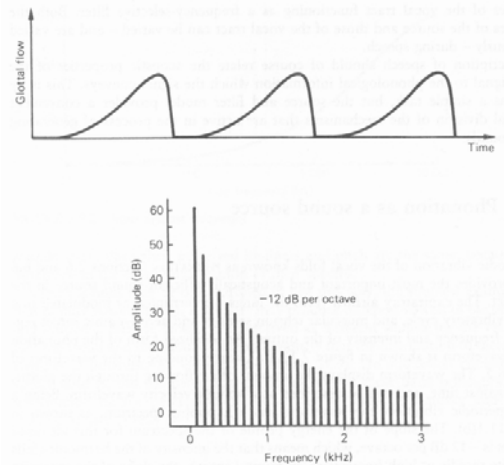


FIGURE 7.11.1 Phonation waveform and (idealized) spectrum
Adapted from: (b) Pickett 1980, p. 64.

Utjecaj načina fonacije na spektar

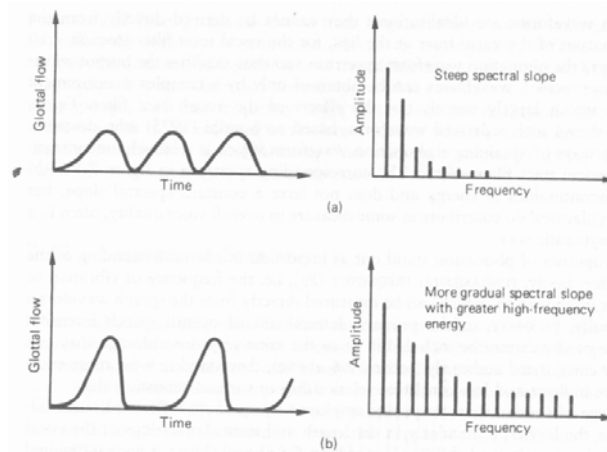
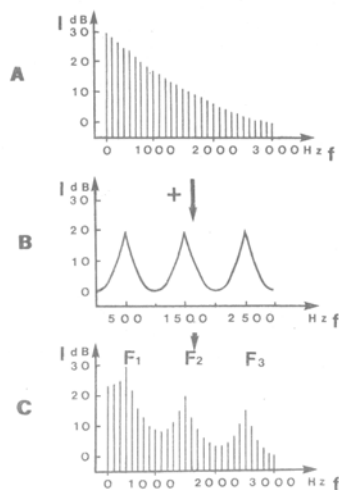


FIGURE 7.11.2 Phonation airflow (volume velocity) waveforms and their corresponding spectra: (a) breathy voice; (b) bright voice

Djelovanje rezonancijskog prostora na izvorni spektar



Izvor zvuka: ton

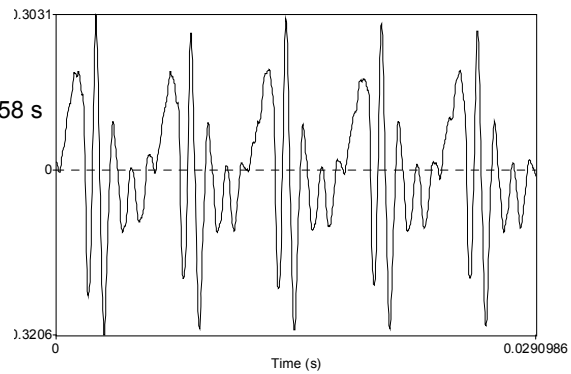
- Koja je prosječna fundamentalna frekvencija (f_0)
 - ženskog glasa
 - muškog glasa
 - dječjeg glasa

- Kako se f_0 može izračunati iz
 - oscilograma
 - sonogramske široke analize
 - sonogramske uske analize

f_0

■ Iz oscilograma:

- $f=1/T$
- $T=0,029/5 = 0,0058 \text{ s}$
- $f=1/0,0058$
- $f=172 \text{ Hz}$

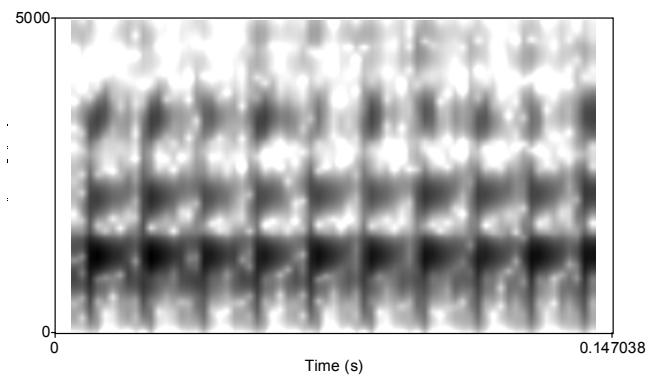


f_0

■ Iz sonogramske široke analize

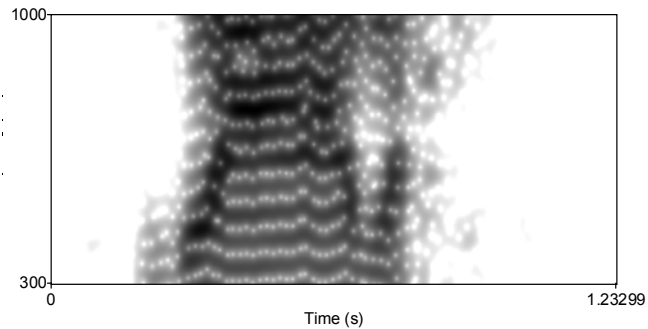
- $f_0=n/t$
- n =broj periodičnih titraja u određenom vremenu (okomite crte)
- t =vremenski isječak

- $f_0=10/0,147$
- $f_0=68 \text{ Hz}$



f_0

- Iz sonogramske uske analize
 - izbroje se svi harmonici (n) u određenom frekvencijskom rasponu (df) i taj raspon se podijeli s brojem harmonika
 - $f_0 = df/n$
 - Npr. $df=700$ Hz, $n=10$ harmonika, $f_0 = 70$ Hz



- Ako se iz spektra filtriranjem ukloni dio frekvencijskog spektra u kojem se nalazi osnovni ton (npr. sve ispod 500 Hz), možemo li čuti osnovni ton?

- eng. phantom fundamental

Zvučne osobine govora:

Koje tvore razliku među glasnicima:

(primarno, ali važne i u prozodiji)

- 1. spektralni oblik
- 2. spektralni sastav
- 3. promjene zvuka u vremenu

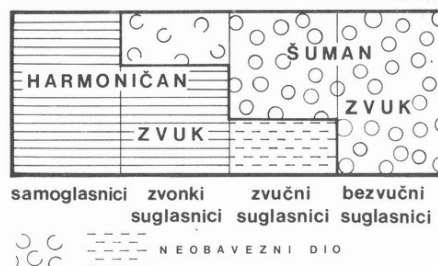
Koje tvore prozodiju:

(ali i kao redundantne informacije o glasnicima)

- 1. trajanje
- 2. jakost
- 3. učestalost periodičnih titraja

1. Spektralni sastav

- nastaje u prvotnom izvoru zvuka
- harmoničan ili šuman (periodičan ili aperiodičan)
- osnovna razlika vokala (poluvokala i sonanata) od konsonanata je u sastavu spektra
- kod parova zvučni/bezvučni: glasnici čiji je prvotni izvor zvuka na jednom suženju iznad grkljana do usana, dodatno se uključuje prvotni izvor zvuka na grkljanu

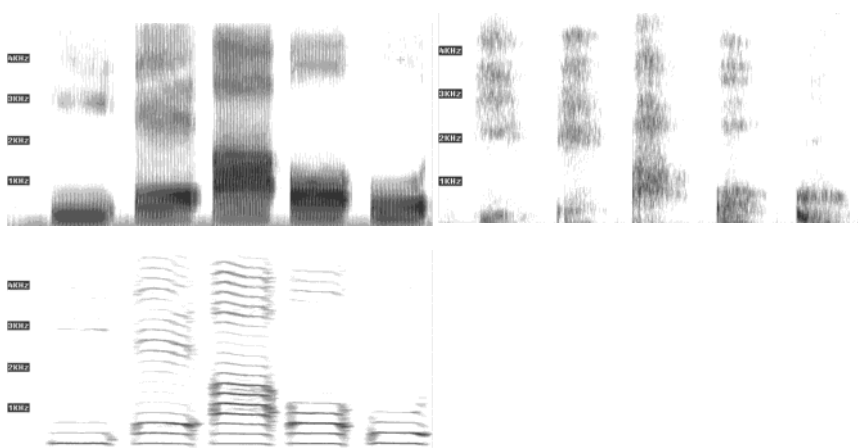


2. Spektralni oblik

- važni su odnosi jakosti spektralnih sastavnica (harmonika)
- prikazuje se krivuljom koja povezuje razmjerne jakosti spektralnih sastavnica
- čuje se kao boja (statična boja zvuka)
- najobavjesnija dimenzija glasnika
- na spektralnom prikazu vide se formanti – koji su rezultat rezonantnih frekvencija govornog zvuka
- za samoglasnike bitni F1, F2 i djelomično F3

Spektrogrami vokala izgovoreni modalnim i šaptavim glasom

Vokali u izgovoru sedmogodišnjeg djeteta u nizu /i/, /e/, /a/, /o/, /u/ širina analizatorskog filtra gore 300, dolje 40 Hz

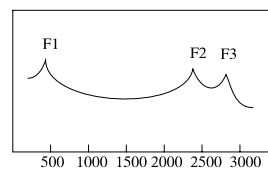
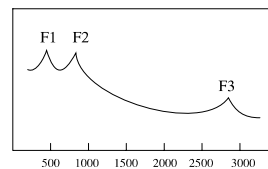


- vokali – određuju ih frekvencije prva tri formanta
- sonanti
- frikativi
- okluzivi i afrikate – locus (mekonepčani: najviši locus, a najniži šum)

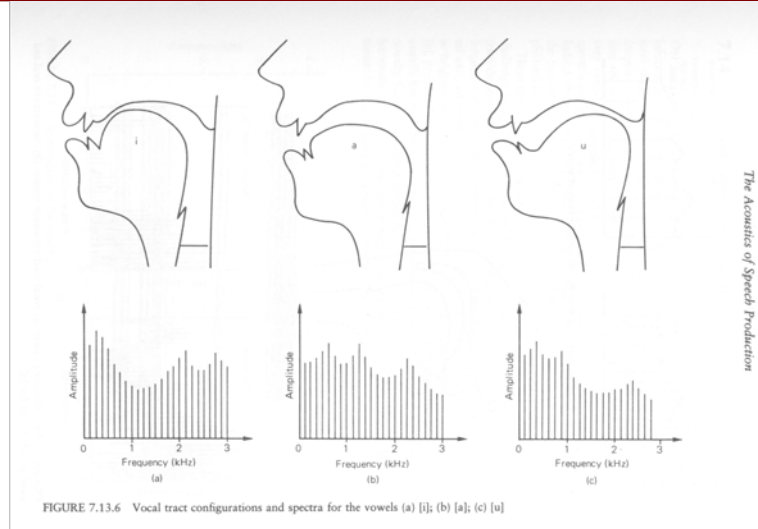
- izgovorno mjesto → u spektralni oblik → boja
 - gravisni – usneni, mekonepčani
 - akutni – zubni, nadzubni, tvrdonepčani
 - kompaktni – tvrdo i mekonepčani (zvuk je u sred. dijelu slušnog spektra)
 - difuzni – usneni, zubni, nadzubni (zvuk je raspršen na niske i visoke dijelove spektra)

Filtar: formanti

- Zbog frekvencijske karakteristike govornog prolaza zvuk se dalje modelira
- Rezonancijski prostor djeluje na izvorni spektar te nastaju formanti (ili pojačani dijelovi spektra u šumnom zvuku)
- Primjeri:
 - Spektar zvuka kojem su frekvencije formanta 300, 700 i 2800 Hz.
 - Spektar zvuka kojem su frekvencije formanta 300, 2300 i 2700 Hz.
- Koji bi to glasnici mogli biti?



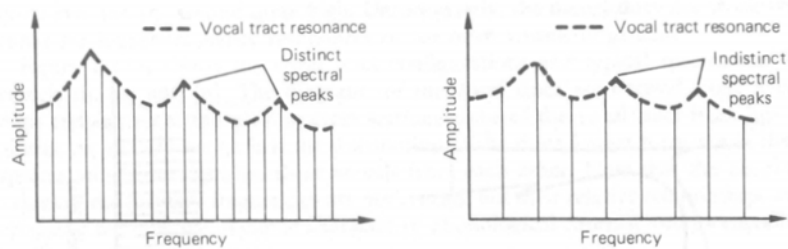
Konfiguracija vokalnog trakta
Spektar vokala: i, a, u



Filtar (dodatni izvor zvuka): formanti

252

The Acoustics of Speech Production



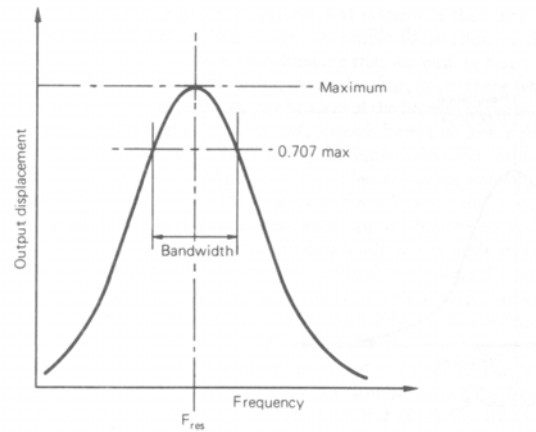


FIGURE 7.5.5 Method for determining bandwidth

Rezonancija

- frekvencije na spektru koje se rezoniranjem pojačavaju → formanti
- akustički zakoni koji određuju rezonantne frekvencije:
 - 1) rezonantne frekvencije cijevi ravnomjerne širine (od grkljana do izlaza iz usta) pri izgovoru neodređenoga samoglasnika e (tzv. šva) su one kojima se trbusi zvučnih valova nalaze na izlazu iz cijevi (na otvoru), a čvorovi na grkljanu (na zatvoru)

$$f_{(r)} = (n \cdot v) / 4 \cdot L$$
 - L = od 14 do 22 cm
 - ako bi duljina L bila 17 cm, F1=500, F2=1500, F3=2500
 - oni s kraćim govornim prolazom (djeca) imat će više, a oni s duljim prolazom niže formante

Računanje rezonantnih frekvencija prema duljini vok. trakta

$$F_r = (n \cdot v) / (4 \cdot L)$$

“čvor” = mjesto najmanje brzine zračnih čestica, tj. mjesto najvećeg tlaka

“trbuh” = mjesto najveće brzine čestica, tj. najmanjeg tlaka

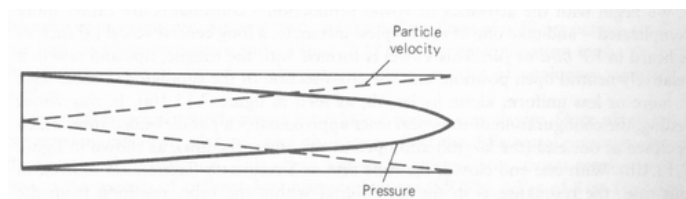
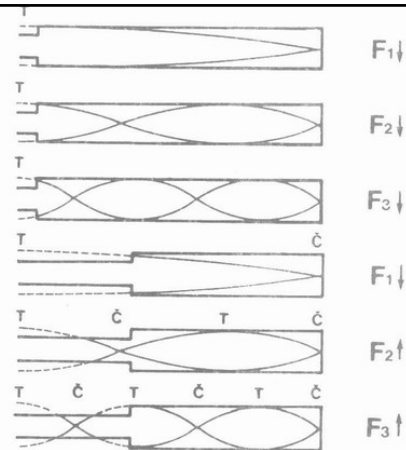
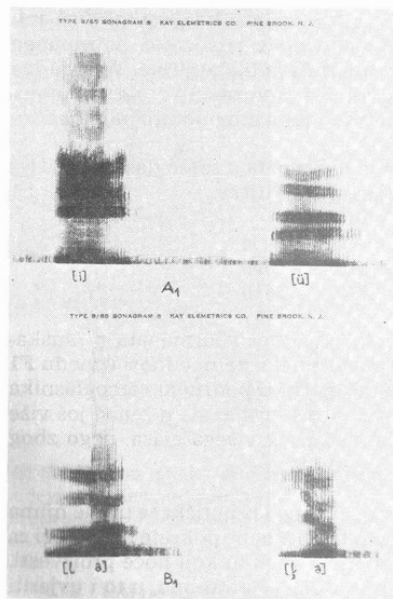


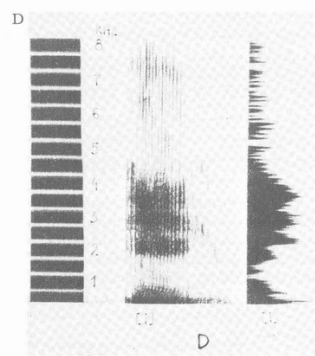
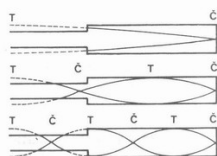
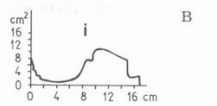
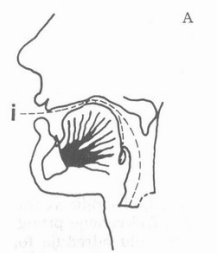
FIGURE 7.13.2 Quarter wave resonant frequency pressure and particle velocity patterns in a simple tube resonator

2) sužavanje na mjestu trbuha zvučnog vala utječe na snižavanje rezonantne frekvencije, a sužavanje na čvoru utječe na povišavanje rezonantne frekvencije

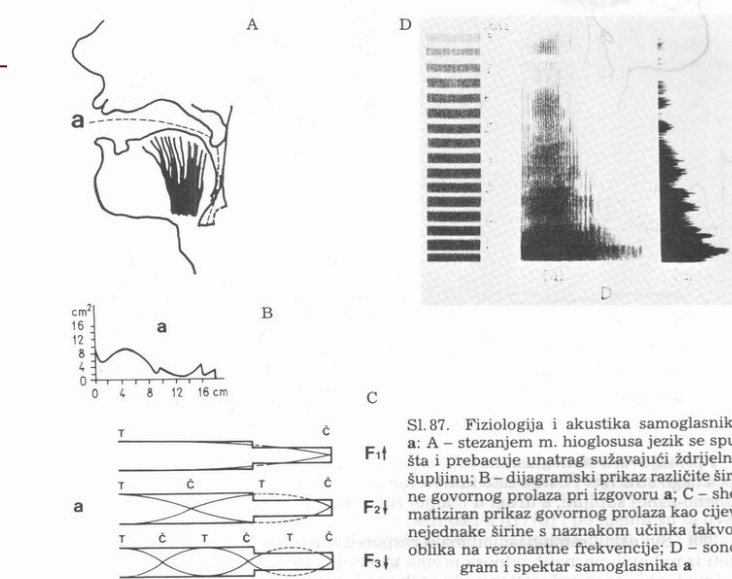
- labijalizacija zahvaća trbuhe svih rezonantnih frekvencija → snižava sve formante (sniženost, bemoliranost)
- palatalizacija (sužavanje na tvrdom nepcu) zahvaća trbuh F1 i čvorove F2 i F3 → daje dojam svjetlije, povišene, diezne boje



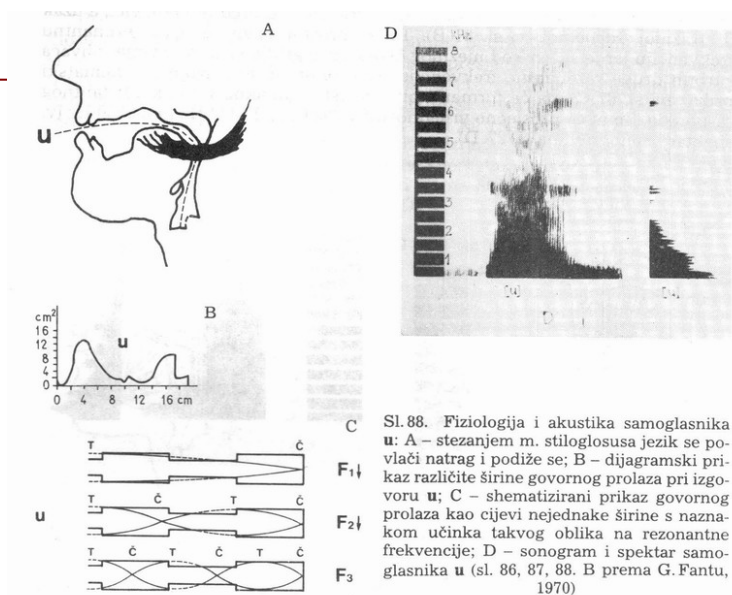
Sl. 84. A – shematiziran prikaz labijalizacije koja snižava formante jer sužavanje na usnama pogađa trbuhe rezonantnih frekvencija; A₁ – sonogram i i sniženog parnjaka \bar{i} ; B – shematiziran prikaz palataliziranosti pri kojoj sužavanje zahvaća trbuh F₁ pa ga i snižava te čvorove F₂ i F₃ koje zato povisuje; B₁ – sonogram \bar{i} i povišenog parnjaka \bar{i}



Sl. 86. Fiziologija i akustika samoglasnika i: A – stezanjem donjeg dijela m. genioglosusa jezik se prebacuje u prednji dio usta. B – dijagramski prikaz različite širine govornog prolaza pri izgovoru i; C – shematiziran prikaz govornog prolaza kao cijevi nejednake širine s naznakom učinka takvog oblika na rezonantne frekvencije; D – sonogram i i spektar samoglasnika i



Sl. 87. Fiziologija i akustika samoglasnika a: A – stezanjem m. hioglosusa jezik se spušta i prebacuje unatrag sužavajući ždrijelnu šupljinu; B – dijagramski prikaz različite širine govornog prolaza pri izgovoru a; C – shematiziran prikaz govornog prolaza kao cijevi nejednake širine s naznakom učinka takvog oblika na rezonantne frekvencije; D – sonogram i spektar samoglasnika a



Sl. 88. Fiziologija i akustika samoglasnika u: A – stezanjem m. stiloglosusa jezik se povlači natrag i podiže se; B – dijagramski prikaz različite širine govornog prolaza pri izgovoru u; C – shematizirani prikaz govornog prolaza kao cijevi nejednake širine s naznakom učinka takvog oblika na rezonantne frekvencije; D – sonogram i spektar samoglasnika u (sl. 86, 87, 88. B prema G. Fantu, 1970)

Rezonancije kod konsonanata

- svi prekidni glasnici (zatvoreni, poluzatvoreni i zatvoreni nosni) imaju dva rezonatora:
 - 1) od grkljana do zatvora
 - klizanje formanta od susjednog glasnika, klizni formanti (tranzijenti) koji smjeraju prema nekoj točki na spektru u vremenu zatvora, u tzv. locus (kraća rezonantna cijev – viši locus)
 - 2) od zatvora do usana
 - što je rezonator veći to je zvuk nižeg spektra
 - mekonepčani: najniži šum, najviši locus
 - zubni: najviši šum, srednji locus

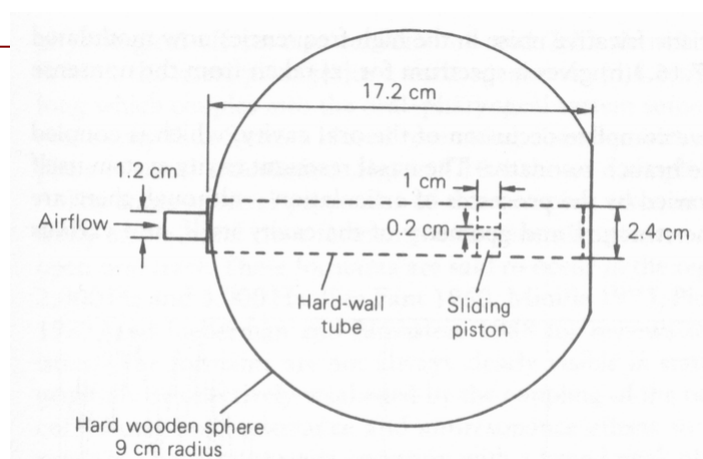


FIGURE 7.16.2 Model of fricative resonator system
Adapted from: Heinz 1958, p. 147.

Locus

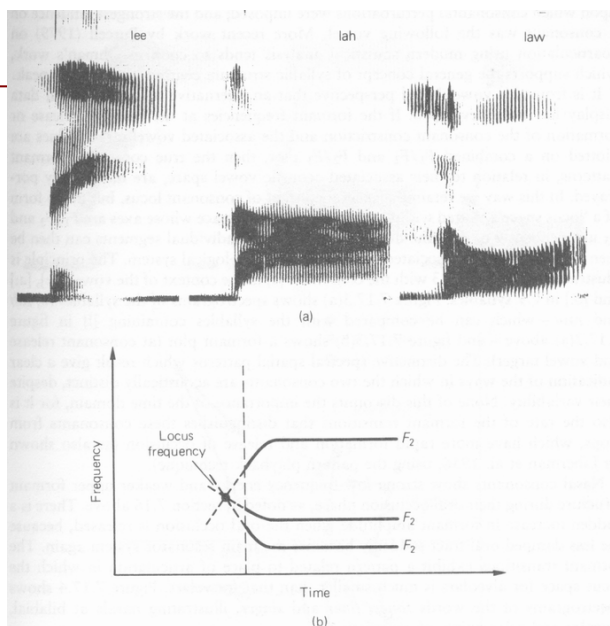


FIGURE 7.17.2 (a) Spectrograms of *lee*, *lah*, *law*; (b) locus effect of coarticulation on F_2

Promjene zvuka u vremenu

- jakost
 - male promjene kod nosnih i bočnih
 - veće kod treptajnih
 - najveće promjene kod poluzatvornih i zatvornih glasnika
- spektralni oblik
 - tranzijenti formantata u vokalima (npr. diftonzi)
 - locus okluziva (točka prema kojoj zakreće F_2 okolnih vokala)

Po kojoj se osobini glasnici najviše razlikuju:

uglavnom u jednoj, dvije ili u sve tri osobine?

- a) boja, b) spektralni sastav, c) promjene u vremenu

- s – š
- a – e
- z – s
- p – b
- u – f
- l – lj
- o – u
- š – ž
- p – k
- f – h
- z – t

Literatura:

Pročitati:

- Škarić (1991) str. 146-175.
Zvuk općenito
- Škarić (1991) str. 175-202.
Govorni zvukovi: uvod, spektralni oblik
- Škarić (1991) str. 202-220.
Govorni zvukovi: spektralni sastav i druge osobine glasnika

Dodatna literatura:

- Bakran, J. (1996). *Zvučna slika hrvatskoga govora*. Zagreb: Ibis grafika.
- Clark, J. i C. Yallop (1995). *An Introduction in Phonetics and Phonology*. Blackwell Publishing. Poglavlje: The Acoustic of Speech Production. Str. 206-300.

Temeljni pojmovi

- Oktava
- Osnovni ton (fundamentalna frekvencija)
- Harmonici, formanti
- Vibrato i tremeolo, jitter i shimmer

- Akustički filtri
- Rezonancija
- Apsorpcija
- Difrakcija (ogib) zvuka

- Zvuk u omeđenom prostoru
- Analize zvuka: kimograf, sonograf...

Temeljni pojmovi akustike

- Brzina kretanja zvuka (temp 20°C, tlak 1 atmosf.)
344 m/s
- Analogna pretvorba zvuka
- Digitalizacija zvuka (sempliranje, uzorkovanje)

- Jakost zvuka (intenzitet) – amplituda
- Razina intenziteta, razina zvučnog tlaka
- Što su dB?

- Što je spektar zvuka?
- Što je spektralni oblik?
- Široki i uski sonogramski prikaz