

# Natančnost odčitavanja formantov pri digitalnem spektrografiranju na podlagi LPC-analize<sup>1</sup>

Peter Jurgec

Inštitut za slovenski jezik Frana Ramovša ZRC SAZU  
Novi trg 4, 1000 Ljubljana, Slovenija  
peter.jurcec@guest.arnes.si

## Povzetek

Prispevek obravnava napako pri odčitavanju formantov, določenih na podlagi LPC-analize. Posnetih je bilo 64 paroksitoniranih dvozložnic (tonemska govorka iz Ljubljane,  $F_0$  je okoli 200 Hz), odčitavalo pa je 11 anketirancev. Standardni odklon odčitkov narašča s frekvenco in je med 7 in 8 % za prve tri formante. Varianca narašča v absolutnem smislu pri  $F_1$  sorazmerno z odprtostno stopnjo, pri  $F_2$  in  $F_3$  pa je največja za /i:/ in /e:/, kar je tudi posledica pomanjkljive LPC-analize, nenatančnega odčitavanja in akustičnih značilnosti samoglasnikov. V pričujoči raziskavi nam ni uspelo v celoti odpraviti drugega dejavnika, kar je glavna pričakovana prednost polavtomatske analize formantov. Rezultati so v okvirih do sedaj ugotovljenega (Monsen in Engebretson, 1983) in večinoma nižji od diferencialnega praga za razlikovanje formantov oz. njemu enaki.

## Abstract

The article presents the error of LPC-analysis based formant readings. The collection of 64 Slovene two-syllable paroxitona (8 per each vowel of Standard Slovene) was recorded digitally, as spoken by female speaker from Ljubljana (contrasting lexical tone, fundamental frequency of approx. 200 Hz in average). 11 subjects measured the first four formants. Standard deviation of formant readings was between 7 and 8% for the first 3 formants. Variance of the  $F_1$  measurements increases in correspondence to openness of the vowel in absolute terms. Variance of  $F_2$  and  $F_3$  is considerably greater for high front unfounded vowels /i:/ in /e:/. This is the result of three variables: (1) the LPC-analysis error, (2) the error of the readings and (3) the acoustic characteristics of the vowels. In the present research, we were only able to lower the error of the readings considerably, but not entirely. The results confirm the previous conclusions in Monsen & Engebretson, 1983, and are lower than or equal to the auditory difference limens.

## 1 Uvod

Za področje govornih tehnologij (korpusa govora, razpoznavalnika in sintetizatorja govora) so nujne predhodne, predvsem pa novejšje in podrobnejše eksperimentalno (zlasti akustično) fonetične raziskave (Stabej, 1998: 100), saj manjkajo s področja nekatera temeljna dela (ali pa so izrazito zastarela), ki so bila za druge jezike narejena že v 20. stoletju, npr. klasična fonetika in fonologija slovenščine, raziskave osnovne frekvence oz. tonske višine za tipične slovenske (pokrajinske) govore, trajanje in jakost samoglasnikov glede na naglasno mesto in tonem, besedilna fonetika ipd., (tudi segmentne) raziskave narečij. Z novejšim besedjem in intenzivnimi medjezikovnimi vplivi pa prihaja v slovenščini do posameznih fonetičnih sprememb – npr. opaznejša aspiracija /k/, spremembe v trajanju (Srebot Rejec, 1988; Petek idr., 1996; Tivadar, 2004) in tonemu (Srebot Rejec, 1988), transfonemizacijske spremembe, sekundarni naglas ter fonoloških inovacij (Jurgec, 2004a).

V sodobni eksperimentalni fonetiki se vse bolj uveljavlja avtomatsko merjenje (trajanja, formantov, osnovne frekvence, jakosti idr.) posameznih spremenljivk digitaliziranega govora (npr. delo s t. i. skripti), vendar pa po prevladujočem mnenju (npr. Ladefoged, 2003) ni dovolj natančno za jezikoslovno rabo. Zato jezikoslovec fonetik še vedno največkrat odčitava ročno, lahko neposredno s spektrograma, največkrat pa s pomočjo LPC- ali FFT-analize, ki jo omogočajo posamezni

programi za fonetično analizo digitaliziranega govora (npr. *Praat*, *Speech filing system*, *Cool edit /pro/* in nasledniki, *Speech analyzer*). Pri tem je treba poznati bistvene lastnosti obeh postopkov tudi v računskem smislu (o tem jezikoslovcu prijazno npr. Ladefoged, 1962: 136 in s. s.) in se zavedati težav pri teh postopkih: nastajajo lahko lažni formanti <spurious formants>, sosednja formanta pri veliki pasovni širini <bandwidth> velikokrat sovpadeta v enega, težave pri določanju  $F_1$ , ko je manjši od  $F_0$ , ipd.

Namen pričujočega članka je na primeru gradiva iz govorjene standardne <knjižne> slovenščine določiti napako pri odčitavanju formantov, ki nastane zaradi variabilnosti segmenta za analizo.

### 1.1 Dosedanje raziskave

Lindblom (1962) je ocenil napako pri odčitavanju s spektrograma, ki da je v povprečju  $1/4 F_0$ , Monsen in Engebretson (1983) pa sta ocenila napako za nadzorovane spremenljivke sintetiziranega govora (različni  $F_0$ ,  $F_1$ ,  $F_2$  in  $F_3$  ter pasovna širina) pri meritvah formantov (90 primerov) na podlagi LPC-analize in z odčitavanjem s spektrograma (3 anketiranci fonetiki) na pribl.  $\pm 60$  Hz za  $F_1$  in  $F_2$  (pri  $F_0 < 300$  Hz) ter precej več,  $\pm 110$  Hz za  $F_3$ , pri katerem je bilo odčitavanje s spektrograma manj natančno. Napaka se precej poveča za višje osnovne frekvence, in kadar je razlika med formantoma, ponavadi  $F_1$  in  $F_2$ , manjša od 300 Hz (npr. pri zadnjih visokih samoglasnikih). Vallabha in Tuller (2002) sta ugotavljala različne značilne napake pri LPC-analizi, zlasti

<sup>1</sup> Krajšave: C – soglasnik, V – samoglasnik, L – nizek ton, M – srednji ton, H – visok ton. Izgovor zapisujem z znaki IPA (Šuštaršič idr., 1995; 1999), vendar z nekaterimi lastnimi popravki (Jurgec, 2004c: 16). Prevodi ali manj uveljavljeni izrazi so opremljeni z angleškim izrazom ali prevzeto besedo/besedno zvezo v lomljenih oklepajih. — Besedilo je bilo pripravljeno z vnašalnim sistemom ZRCola, ki ga je na Znanstvenoraziskovalnem centru SAZU v Ljubljani (<http://www.zrc-sazu.si>) razvil Peter Weiss.

kvantizacijo  $F_0$  (napaka je okoli 10 %  $F_0$ ) in nepravilne stopnje LP-filtra (hkrati predlagata rešitve, prim. še v nadaljevanju).

Woodove (1989) ocene na podlagi naravnega bolgarskega govora so bile nekoliko nižje, Miller idr. (1991) pa so pri oceni natančnosti meritev za otroški govor uporabljali sintetizirane primere in v bistvu potrdili ugotovitve Monsena in Engebretsona (1983).

Cilj vseh omenjenih raziskav je bilo v prvi vrsti ugotoviti, ali je napaka pri merjenju formantov – in tu je šlo zlasti za algoritemsko napako, šele potem za ročno – nižja od diferencialnega praga za razlikovanje formantov (auditory difference limens). Tega je ocenil že Flanagan (1955) in naj bi bil 21 Hz za  $F_1$  in 50 Hz za  $F_2$  (oz. okoli 3,9 %; v Flanagan, 1965, 3–5 %). Po Marmelsteinu (1978) naj bi bile v povprečju 60 Hz za  $F_1$  in 176 za  $F_2$ , Stevens (1998) pa je diferencialni prag za razlikovanje formantov ocenil na 10–30 Hz za  $F_1$  in 20–100 za  $F_2$ . Kewley Port in Watson (1994) ugotavljata prag za izkušene poslušalce: 14 Hz za formantne frekvence pod 800 Hz in 1,5 % za višje.

Cilj pričujoče raziskave pa je drugačen: določiti napako pri odčitavanju računalniško generiranih formantnih potekov (LPC- ali FFT-analiza) – ne glede na to, da te zlasti fonetiki nejezikoslovci določajo avtomatično iz povprečja segmenta oz. določene točke (ponavadi srednje) v izbranem segmentu.

## 2 Metoda

Eksperiment je potekal v več fazah: najprej je bilo (i)zbrano gradivo in narejeni posnetki. Te so analizirali (izmerili) anketiranci. Sledi analiza rezultatov.

### 2.1 Gradivo

Gradivo sestavlja 32 besed, paroksitoniranih dvozložnic, in sicer po dva primera za vsako distribucijsko možnost za slovenščino (8 samoglasnikov in 2 tonema). Idealna zgradba je 'CV:CV(C), glasovno okolje pa je bilo za formantne poteke in segmentacijo kar najenostavnejše (najraje nezveneči zaporniki). Vsako besedo posebej (tj. brez stavčnega okvira) je v naključnem vrstnem redu izgovarjala tonemska govorka iz Ljubljane. Vsaka beseda je bila izgovorjena ločeno dvakrat, tako je nastalo skupno 64 enot za analizo. Značilnosti tipičnega ženskega govora so take, da pričakovano povečujejo napako pri oceni formantov: višja osnovna frekvenca in formanti, nižja jakost zlasti višjih frekvenc – prim. Monsen in Engebretson, 1983.

<p> <i>/i:/: hiša, kipi, piti, tisa</i>  <i>/e:/: dedek, kepa, pesem, tepih</i>  <i>/ɛ:/: peta, teta, žepar, žepen</i>  <i>/a:/: kača, kapa, kazen, papež</i>  <i>/ə:/: dežek, hrček, krpa, krzno</i>  <i>/ɔ:/: govor, kosa, koza, sobar</i>  <i>/o:/: boben, koča, kokos, toča</i>  <i>/u:/: bukev, guba, kuga, kuhar</i> </p>
---

Prikaz 1. Besede iz gradiva.

Studijski posnetek s frekvenco vzorčenja 44.100 Hz in 16-bitno kvantizacijo v enokanalnem načinu (mono) sem segmentiral na posamezne datoteke, ki so vsebovale po eno besedo; te so bile poimenovane (tip *hisa.wav*,

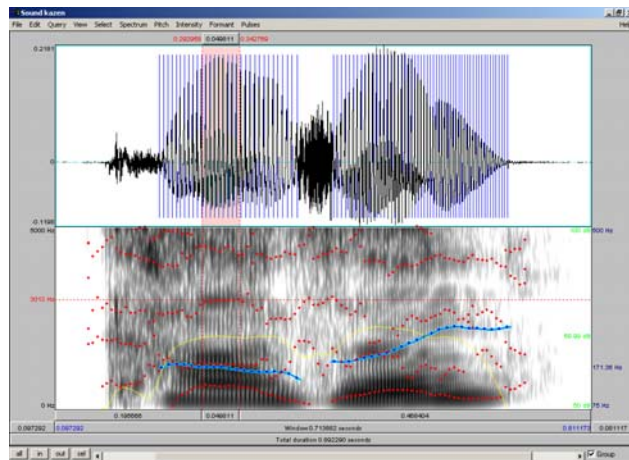
*hisa1.wav*, *kipi.wav*, *kipi1.wav* itd.) in shranjene na zgoščenko. Izbrane besede so v prikazu 1.

Akustična analiza posnetega gradiva pokaže, da je govorka besede (pričakovano) največkrat izgovarjala z izrazito rastočo intonacijo (torej gre za tonsko zaporedje LH oz. MH), ne glede na to, ali gre za akut ali cirkumfleks. V skladu z dosedaj ugotovljenim na področju slovenske eksperimentalno fonetične intonologije (Vodušek, 1961; Toporišič, 1967; 1968; Neweklowsky, 1973; Srebot Rejec, 1988) je osnovna frekvenca nekoliko nižja (in zato naraščanje izrazitejše) pri pričakovanih akutih. Osnovna frekvenca je večinoma okoli 200 Hz (vedno pa med 140 in 300 Hz).

### 2.2 Meritve

Zgoščenko so skupaj z ustreznimi programi v prostem dostopu prejeli anketiranci, udeleženci osnovnega tečaja iz fonetične analize digitaliziranega govora<sup>2</sup> v njegovem zaključnem delu.

Formante naglašena (= prvega) samoglasnika so odčitavali s programom *Praat* (Boersma in Weenink, 2004), in sicer neposredno iz LPC-analize s privzetimi nastavitvami (po potrebi so jih lahko spreminjali): Gaussovo okno dolžine 25 ms, s časovno ločljivostjo 6,25 ms (= 25/4) in Burgovim algoritmom. To je mogoče odčitati neposredno s spektrograma (prikaz 2) in je izredno enostavno ter hitro, kar je pomembna prednost pred ostalimi podobnimi programi.



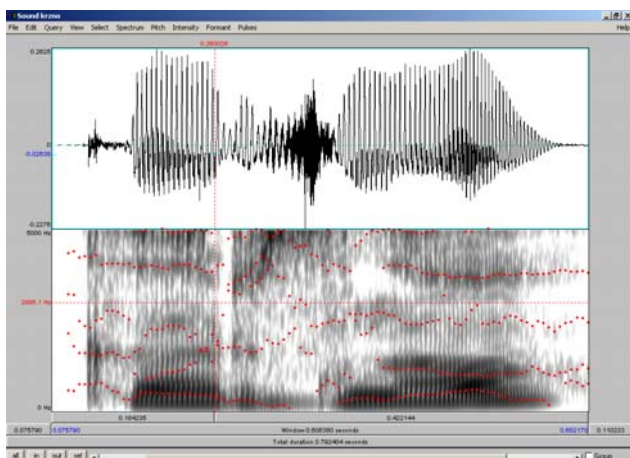
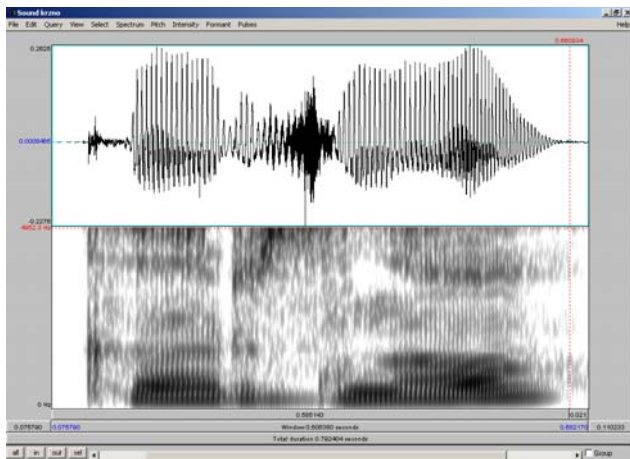
Prikaz 2. Osnovno delovno okno v praatu. Zgoraj valovna oblika <oscilogram, časovni potek, waveform>, spodaj spektrogram z označenimi osnovno frekvenco /modra oz. odebeljena črta/, jakostjo /tanka oz. rumena črta/ in formanti /rdeče pike/ za besedo *kazen* [ˈkʰaːzɛn].

Anketiranci so bili seznanjeni z osnovnimi pravili merjenja formantov (slušna in vidna analiza, strojna meritev in preverjanje), posebnostmi pri merjenju, osnovnimi značilnostmi LPC-analize, njenimi prednostmi in pomanjkljivostmi. Predstavljene so bile tri metode odčitavanja:

- v točki,
- za celoten segment,
- za (tipično) stabilno stanje.

<sup>2</sup> Šestnajsturni tečaj je potekal na Inštitutu za slovenski jezik Frana Ramovša ZRC SAZU od 16. aprila in 20. maja 2004. – Za vrnjene ankete se na tem mestu zahvaljujem udeležencem.

Poudarjene so bile lastnosti vseh treh in meje njihove uporabe, kot najboljša možnost pa je bila predlagana zadnja, saj naj bi po prevladujočem mnenju v stroki omogočala največjo natančnost (izvzemanje prehodov <tranzientov>) in primerljivost. Narejenih je bilo nekaj primerov odčitavanja in poudarjene nekatere tipične napake (npr. manjkajoči formanti).



Prikaza 3a (zgoraj) in 3b. Spektrogram in formanti na podlagi LPC-analize. Precej problematičen je  $F_2$  pri prvem samoglasniku; v takih primerih lahko odčitamo  $F_2$  neposredno s spektrograma, primerno točko LPC ali povprečje. Prikazana je beseda *krzno* ['k<sup>h</sup>ʒrno].

Pričakovana odstopanja pri odčitavanju bodo torej odvisna od izbire segmenta za meritev. To pa je odvisno od spektrogramskega prikaza in izračunanih formantov na podlagi LPC-analize. Najzahtevneje je izločiti lažne formante (ponavadi jih spremlja široka pasovna širina), ki so se, denimo, pojavljali pri sprednjih visokih samoglasnikih med  $F_1$  in  $F_2$ , in podvomiti o enotnem formantu, ki se je pojavljal namesto dveh, npr. namesto  $F_1$  in  $F_2$  pri zadnjih visokih samoglasnikih ali  $F_2$  in  $F_3$  pri sprednjih visokih. Težave se pojavljajo tudi tam, kjer ni enotnega stabilnega stanja, ampak prej zgolj enoten prehod, ali kjer formanti LPC-analize očitno nasprotujejo spektrogramu (prikaza 3a in 3b). – Vzrokov za pomanjkljivo LPC-analizo s stališča akustičnih modelov produkcije govora tu ne bom obravnaval.

### 3 Rezultati

Vrmenih in avtoriziranih je bilo 11 anket. Podatke sem primerjal in statistično obdelal. Formante sem za preverbo izmeril tudi sam in niso bistveno odstopali od povprečja (v tolerančnem okviru, gl. dalje).

V prikazu 4 so povprečja meritev za posamezne samoglasnike, njihov standardni odklon in razmik zaupanja.

Povprečja meritev formantov so deloma primerljiva z dosedanjimi za slovenščino, čeprav zaradi majhnega števila vzorcev ne morejo biti statistično relevantna. Preseneča pa (pre)nizek  $F_2$  pri /ə/, kar je tudi v zvezi z dejstvom, da so bili izbrani primeri iz t. i. obstojne zveze (Toporišič, 2000: 72) /ər/, saj ustreznih drugih primerov v standardni slovenščini ni – velika večina jih je namreč variantnih po mestu naglasa ali se izgovarjajo z /ε/, kar je v govoru Ljubljancev veliko pogostejše. Izločena je bila tudi ena pojavitev za *dežek* (dezek1.wav), saj je bil izgovorjena kot [dɛːzək]. Precej nižji kot pri dosedanjih raziskavah o formantih standardne slovenščine (Lehiste, 1961; Toporišič, 1975; Petek idr., 1996; Ozbič, 1998; Tivadar, 2004) je tudi  $F_2$  pri /a/.

V razpredelnici so razvidni tudi standardni odkloni in razmiki zaupanja (določeni za stopnjo tveganja 0,05) za posamezni formant samoglasnika. Njihova primerjava pokaže več zakonitosti: odvisnost napake od frekvence in akustičnih lastnosti samoglasnika (porazdelitev formantov).

Posebej težavno je bilo – kot že predpostavljeno v razdelku 2.2 – določevanje  $F_2$  in  $F_3$  pri sprednjih visokih samoglasnikih /i/ in /e/. Standardni odklon za  $F_1$  narašča z odprtostno stopnjo: najmanjši je pri /i/ in /u/, največji pri /a/, v relativnem smislu je standardna napaka zelo majhna. Standardna napaka  $F_2$  je večja pri sprednjih samoglasnikih (največji je pri /e/), kar je povezano tudi s pojavom lažnih formantov: na eni strani je razlika med  $F_1$  in  $F_2$  v posnetem gradivu precejšnja (pri /i/ v povprečju skoraj 2500 Hz), hkrati pa je razlika med  $F_2$  in  $F_3$  pri sprednjih samoglasnikih načeloma manjša. Zato hitro pride do lažnih formantov, kar se je nedvomno zgodilo tudi v našem primeru. V prikazih 5a–č so histogrami vseh odčitkov za formante /i/.<sup>3</sup> Jasna dvovršnost in razpršenost rezultatov je posledica:

- (1) pomanjkljivosti LPC-analize (pojav lažnih formantov ali njihovo združevanje v enega, če sta blizu in/ali imata široko pasovno širino),
- (2) odčitavanja, ki bi moralo v takih primerih upoštevati sam spektrogram, torej zavrniti formantne vrednosti, pridobljene na podlagi avtomatične analize,
- (3) dejanske variance v formantnih vrednostih, ki so pri dovolj velikih vzorcih porazdeljene normalno, za kar pa je pričujoči vzorec premajhen.

Dejstvo, da so odčitki za /i/ precej bolj široko in celo dvovršno porazdeljeni kot za /o/ (prikazi 5d–f), pričajo v prid vsem trem točkam.

Konkretni odčitki za po eno meritev so v prikazih 6 in 7, kjer niso prikazane konkretne formantne vrednosti odčitkov, temveč njihovo razmerje do povprečja vseh meritev. Gre za dva popolnoma nasprotna rezultata polavtomatskega odčitavanja: prvi (6) je z izjemo  $F_1$  precej uspešen (razmiki zaupanja so  $\pm 20$ ,  $\pm 14$ ,  $\pm 32$  in  $\pm 42$

<sup>3</sup> Statistični prikazi so narejeni s programom SPSS.

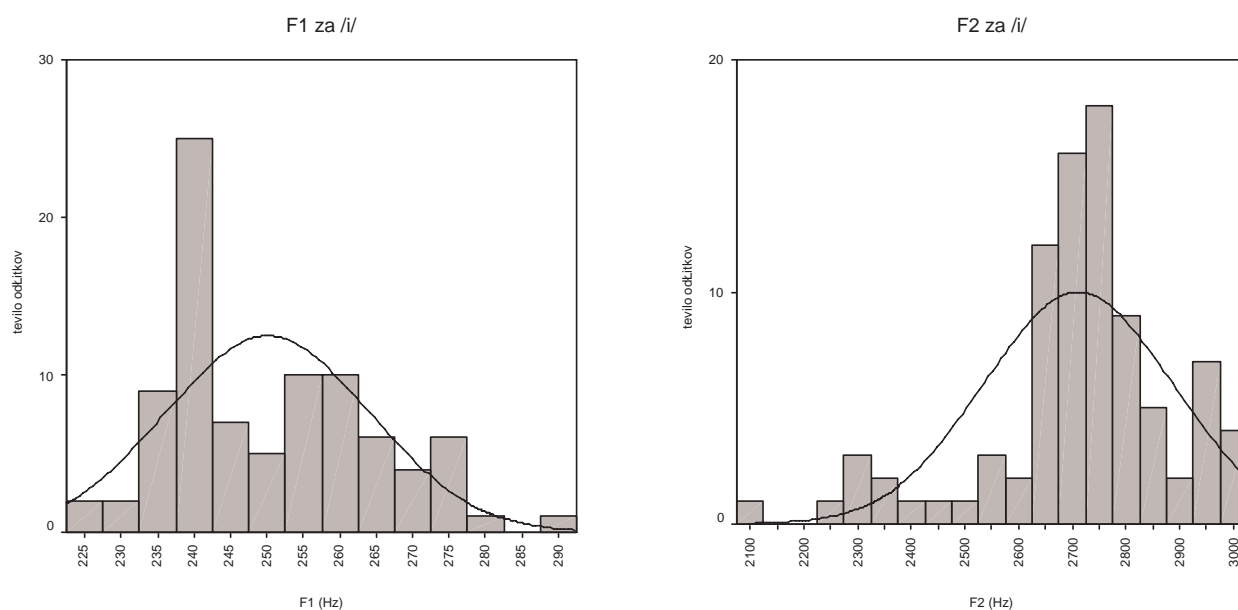
Hz), drugi (7) ravno nasprotno (razmiki zaupanja so  $\pm 1$ ,  $\pm 162$ ,  $\pm 255$ ,  $\pm 235$  Hz). Seveda so z izjemo sprednjih samoglasnikov tako nezanesljivi rezultati izrazito redki. V obeh primerih je vidno nasprotje med napako, ki nastane zaradi izbire intervala odčitka (v primeru kozal.wav za  $F_2$ - $F_4$  in pri piti.wav za  $F_1$ ), in napako, ki nastane zaradi pomanjkljive LPC-analize in neustreznega odčitavanja (v primeru piti.wav za  $F_2$ ,  $F_3$  in  $F_4$ ). Polavtomatska analiza je namenjena ravno izogibanju takim napakam, ki so razvidne iz priloženih LPC-analiz (ločljivost 12,5 ms,

okno 25 ms) v praatu. – Smisel polavtomatske analize je pravilno določiti take primere, vendar nam to na tem mestu ni povsem uspelo.

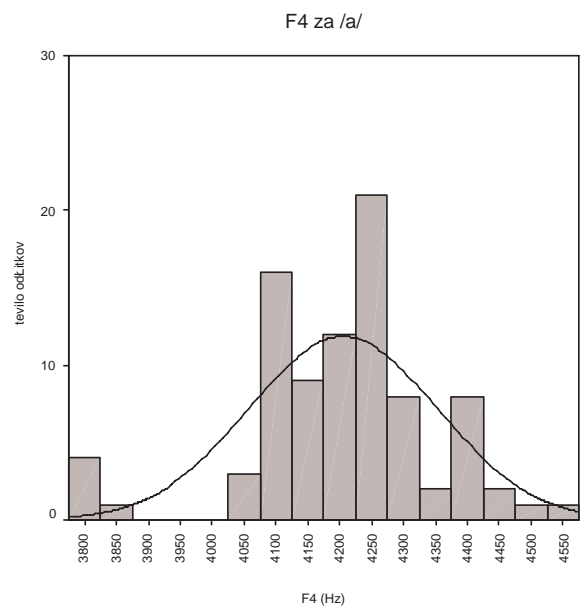
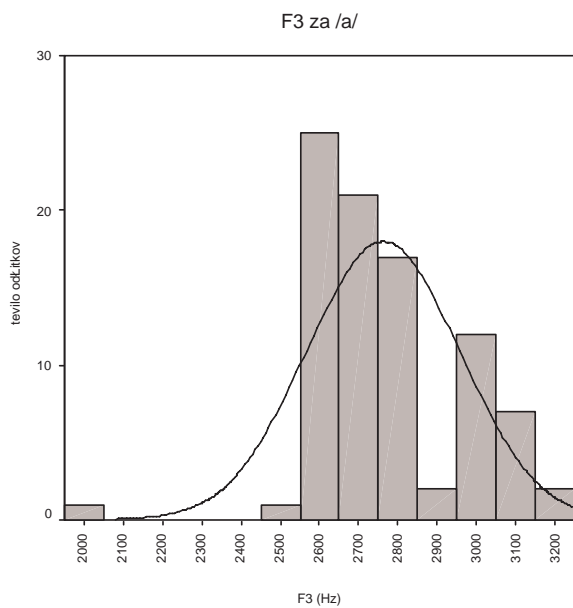
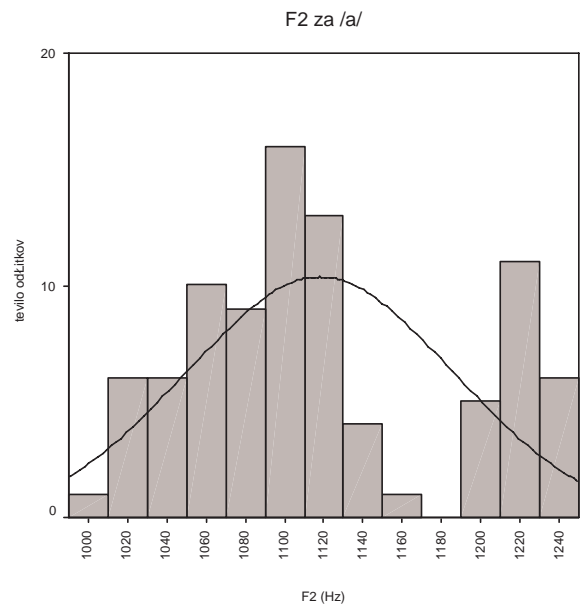
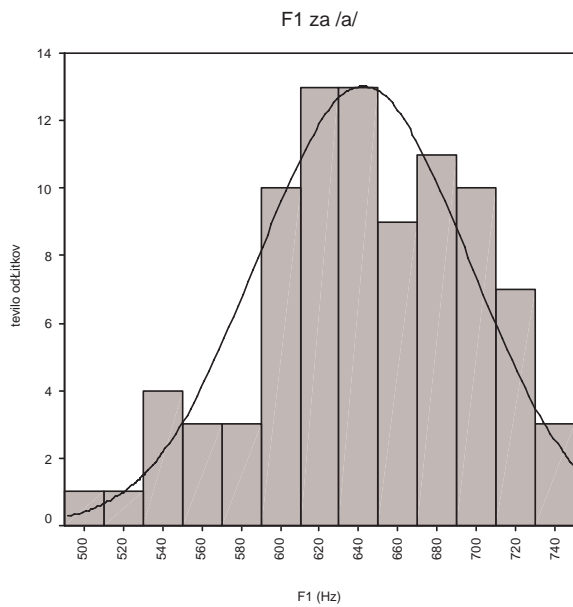
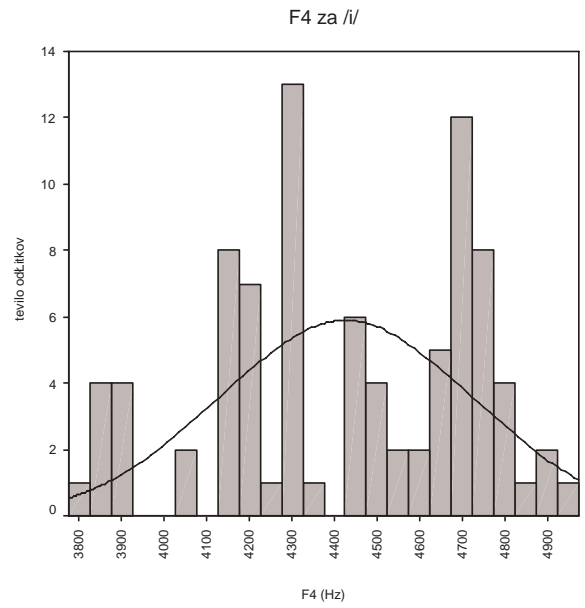
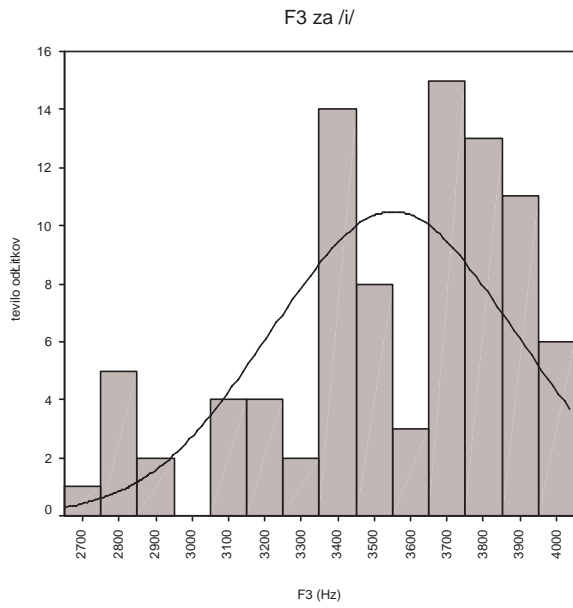
Povedano drugače: značilna napaka pri LPC-analizi sprednjih samoglasnikov je napačno določen  $F_2$  (in posledično lahko  $F_3$  in  $F_4$ ). Namen polavtomatske analize je to odpraviti. Tipična napaka ročnega odčitavanja vseh samoglasnikov pa je odvisna od izbire intervala stabilnega stanja (vidno pri  $F_1$  in  $F_4$  velike večine meritev), vendar je ta majhna (gl. dalje).

fonem	F <sub>1</sub>		F <sub>2</sub>		F <sub>3</sub>		F <sub>4</sub>	
	standardni odklon	razmik zaupanja	standardni odklon	razmik zaupanja	standardni odklon	razmik zaupanja	standardni odklon	razmik zaupanja
/i:/	250		2711		3551		4427	
	14	$\pm 3$	175	$\pm 37$	334	$\pm 70$	298	$\pm 62$
/e:/	343		2691		3548		4425	
	21	$\pm 4$	218	$\pm 46$	343	$\pm 72$	242	$\pm 51$
/ɛ:/	585		2399		3370		4549	
	46	$\pm 10$	102	$\pm 21$	278	$\pm 58$	179	$\pm 37$
/a:/	642		1118		2762		4205	
	54	$\pm 11$	68	$\pm 14$	195	$\pm 41$	148	$\pm 31$
/ə/	491		1230		2353		3933	
	26	$\pm 6$	135	$\pm 30$	103	$\pm 23$	109	$\pm 24$
/ɔ:/	532		928		2747		3953	
	55	$\pm 12$	48	$\pm 10$	173	$\pm 36$	163	$\pm 34$
/o:/	359		735		2895		3800	
	42	$\pm 9$	84	$\pm 18$	192	$\pm 40$	328	$\pm 69$
/u:/	286		696		2552		3894	
	14	$\pm 3$	68	$\pm 14$	149	$\pm 31$	94	$\pm 20$
Σ	34	$\pm 24$	112	$\pm 78$	221	$\pm 153$	195	$\pm 135$

Prikaz 4. Povprečje izmerjenih formantov, standardni odklon po izmerjenih vrednostih in razmik <interval> zaupanja (če je stopnja tveganja 0,05), vse v Hz (po 88 meritev, le pri /ə/ 77). Spodaj povprečje standardnih odklonov in njegov razmik zaupanja.



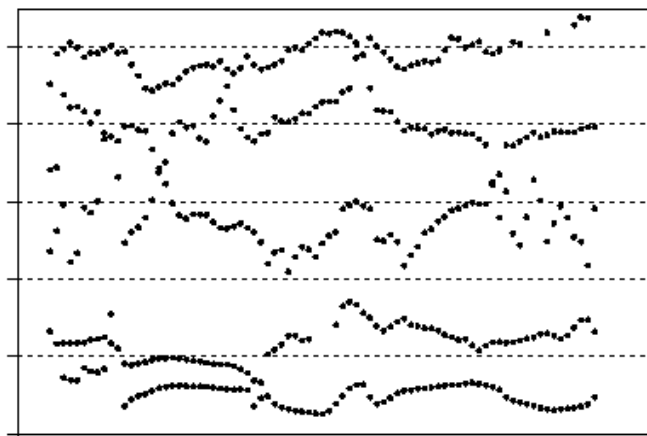
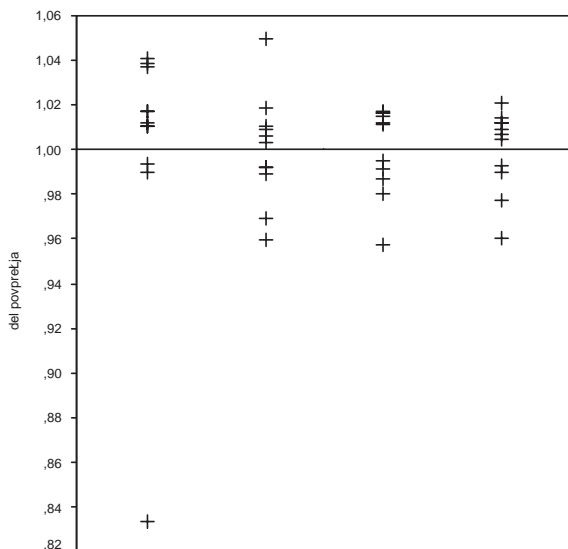
Prikaza 5a (levo) in 5b. Porazdelitve odčitkov za /i/ (F<sub>1</sub> in F<sub>2</sub>). Za komentar gl. besedilo (3).



Prikazi 5c–g. Porazdelitve odčitkov za /i/ (5a–č) in /a/ (5d–g).

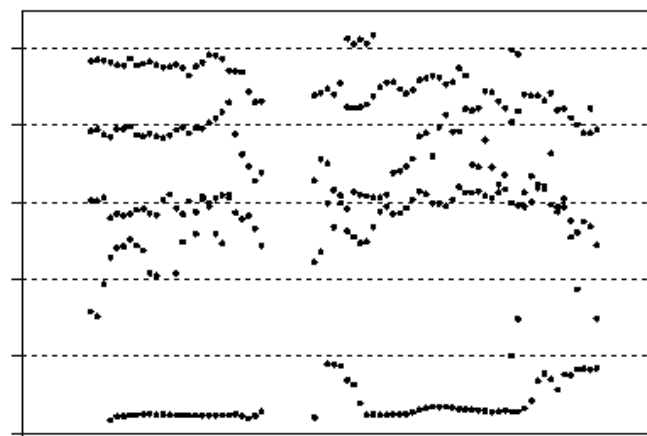
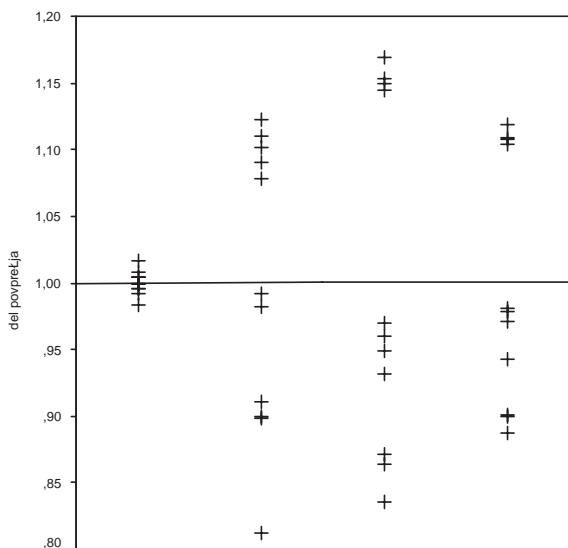


Odčitki za [O] v koza1.wav



Prikaza 6a (levo) in 6b. Levo odčitki za [ʔ:] v koza1.wav v razmerju do povprečja (na vodoravni osi so posamezni formanti, tako da naraščajo proti desni). Desno prvih pet formantov za celotno besedo, kakor so določeni z LPC-analizo v praatu (frekvenčno območje 0–5500 Hz).

Odčitki za [i] v piti.wav



Prikaza 7a (levo) in 7b. Levo odčitki za [i:] v piti.wav v razmerju do povprečja (na vodoravni osi so posamezni formanti, tako da naraščajo proti desni). Desno prvih pet formantov za celotno besedo, kakor so določeni z LPC-analizo v praatu (frekvenčno območje 0–5500 Hz).

Povprečni standardni odklon pri meritvah je 34 Hz za  $F_1$ , 112 Hz za  $F_2$ , 221 Hz za  $F_3$  in 195 Hz za  $F_4$ , kar glede na povprečne izmerjene vrednosti za posamezne samoglasnike pomeni 7,8 % za  $F_1$ , 7,2 % za  $F_2$ , 7,4 % za  $F_3$  in najmanj, 4,7 %, za  $F_4$ . Standardni odklon je relativno nižji le za  $F_4$ , kar je povezano tudi z dejstvom, da je največkrat stabilen, medtem ko sta zlasti  $F_2$  in  $F_3$  precej prehodna, nestabilna, lahko se tudi križata.

Visok odstotek pri za odčitavanje načeloma neproblematičnem  $F_1$  lahko upravičimo predvsem z najnižjimi frekvencami v absolutnem smislu, hkrati pa je očitno dovolj variabilen, da prihaja do variance pri odčitavanju (glede na izbrani časovni interval). Nekaj pa seveda prispeva tudi sama napaka LPC-analize. Vendar pa

bi bilo podatke potrebno preveriti na večjem vzorcu, da bi bili lahko zanesljivi (prim. visok razmik zaupanja).

#### 4 Sklep

Dobljeni rezultati so referenčni okvir za nadaljnje jezikoslovno fonetične raziskave slovenščine (standardne, pogovorne in narečij), ki bodo temeljile na kombinaciji avtomatične LPC-analize, odčitavanju s spektrograma in polavtomatskem odčitavanju LPC- (v prostem dostopu Praat, Speech filing system, Speech analyzer) oz. FFT-analize (Speech filing system, Speech analyzer), kar je sorazmerno dobra kombinacija natančnosti in časovnega izkoristka. Natančnost med 7 in 8 % je primerljiva z

dosedanjimi rezultati oz. še nekoliko boljša, še posebej za  $F_1$  ( $\pm 60$  Hz v Monsen in Engebretson, 1983). Večinoma je približno enaka diferencialnemu pragu za razlikovanje formantov oz. je od njega manjša (za podatke gl. razdelek 1.1 in tam dalje). Ta napaka seveda že vključuje računsko napako LPC-analize (Monsen in Engebretson, 1983). Ob pravilnem izločanju lažnih formantov in ločevanja bližnjih sosednjih lahko napako še dodatno zmanjšamo.

Znotraj v fonetični literaturi največkrat navajane splošne napake spektrografiranja in v skladu z ugotovitvami pričujoče raziskave so tudi različni rezultati za standardno slovenščino, dobljeni na podlagi klasične ali digitalne spektrografije (Lehiste, 1961; Toporišič, 1975; Petek idr., 1996; Ozbič, 1998; Tivadar, 2004). Polavtomatska LPC-analiza govora je bila uporabljena tudi v Jurgec 2004b, vendar na bistveno večjem vzorcu (več kot 23000 enot), tako da so že zato rezultati bistveno bolj zanesljivi.

V nadaljevanju bi bilo treba narediti podobne analize na večjem vzorcu (gradiva, anketirancev), kar bi pripomoglo k natančnejšim rezultatom pri polavtomatski analizi govora za fonetično rabo.

## 5 Navedenke

- Boersma, P., in Weenink, D., 2004. *Praat: doing phonetics by computer*. Različica 4.2.01. [Http://www.fon.hum.uva.nl/praat/](http://www.fon.hum.uva.nl/praat/).  
Cool edit pro. Različica 2.0. Syntrillium software corporation, 2002.
- Flanagan, J. L., 1955. A difference limen for vowel formant frequency. *Journal of the acoustical society of America*, 27: 613–617.
- Flanagan, J. L., 1965. *Speech analysis, synthesis and perception*. New York: Academic press inc. publishers.
- Hackvale, M., 2004. *Speech filing system*. Različica 4.5/Windows, SFSWin 1.4. University college London. [Http://www.phon.ucl.ac.uk/resource/sfs/](http://www.phon.ucl.ac.uk/resource/sfs/).
- Jurjec, P., 2004a. Fonološke značilnosti novejšega slovenskega besedja. 40. seminar slovenskega jezika, literature in kulture, *Moderno v slovenskem jeziku, literaturi in kulturi, zbornik predavanj*. 179–181.
- Jurjec, P., 2004b. *Formanti slovenskih samoglasnikov*. Ljubljana.
- Jurjec, P., 2004c. *Samoglasniški nizi v slovenščini: Fonološko-fonetična analiza*. Ljubljana: Rokus in Slavistično društvo Slovenije (Slavistična knjižnica, 8). V tisku.
- Kewley - Port, D., Watson, C. S., 1994. Formant-frequency discrimination for isolated English vowels. *Journal of the acoustical society of America* 95: 485–496.
- Ladefoged, P., 1962. *Elements of acoustic phonetics*. Chicago in London: The University of Chicago press.
- Ladefoged, P., 2003. *Phonetic data analysis: An introduction to fieldwork and instrumental techniques*. Malden [...]: Blackwell publishing.
- Lehiste, I., 1961. The phonemes of Slovene. *International journal of Slavic linguistics and poetics*, 4: 48–66.
- Lindblom, B., 1962. Accuracy and limitations of sonagraph measurements. *Proceedings of the 4th International congress of phonetic sciences, Helsinki, 1961*. The Hague.
- Marmelstein, P., 1978. Difference limens for formant frequencies of steady-state and consonant-bound vowels. *Journal of the acoustical society of America*, 63: 572–580.
- Miller, C. J., Roussel, N., Daniloff, R., Hoffman, P., 1991. Estimation of formant frequency in synthetic infant CV tokens. *Clinical linguistics and phonetics*, 5: 283–296.
- Monsen, R. B., in Engebretson, A. M., 1983. The accuracy of formant frequency measurements: A comparison of spectrographic analysis and linear prediction. *Journal of speech and hearing research*, 26: 89–97.
- Neweklowsky, G., 1973. *Slowenische Akzentstudien: Akustische und linguistische Untersuchungen am Material Slowenischer Mundarten aus Kärnten mit 46 Abbildungen und 76 Figuren in Text*. Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.
- Ozbič, M., 1998. Akustična spektralna FFT[-]analiza samoglasniškega sistema slovenskega jezika. *Jezikovne tehnologije za slovenski jezik: Mednarodna multi-konferenca Informacijska družba [...]*. Ljubljana: Institut Jožef Stefan, 55–59.
- Petek, B., Šuštaršič, R., in Komar, S., 1996. An acoustic analysis of contemporary vowels of the standard Slovenian language. *Proceedings ICSLP 96: Fourth international conference on spoken language processing, October 3–6, 1996, Philadelphia, PA, USA*. Wilmington (DE): University of Delaware, Applied science and engineering laboratories, Alfred I. du Point Institute, 133–136.
- Speech analyzer. Različica 1.5. Summer institute of linguistics, 2002. [Http://www.sil.org/computing/spechttools/spechanalyzer.htm](http://www.sil.org/computing/spechttools/spechanalyzer.htm).
- SPSS. Različica 11.0.0. SPSS inc., 2001. [Http://www.spss.com](http://www.spss.com).
- Srebot Rejec, T., 1988. *Word accent and vowel duration in Standard Slovene: An acoustic and linguistic investigation*. München: Otto Sagner (Slavistische Beiträge, 226).
- Stabej, M., 1998. Besedilnovrstna sestava korpusa Fida. *Uporabno jezikoslovje*, 6: 98–106.
- Stevens, Kenneth N., 1998. *Acoustic phonetics*. Cambridge, MA, in London: The MIT press (Current studies in linguistics, 30).
- Šuštaršič, R., Komar, S., in Petek, B., 1995. Slovene: Illustrations of the IPA. *Journal of the International phonetic association* 25: 86–90.
- Šuštaršič, R., Komar, S., in Petek, B., 1999. Slovene. *Handbook of the International phonetic association*. Cambridge: Cambridge University Press, 135–139.
- Tivadar, H., 2004. Fonetično-fonološke lastnosti samoglasnikov v sodobnem knjižnem jeziku. *Slavistična revija* 52: 31–48.
- Toporišič, J., 1967. Pojmovanje tonemičnosti slovenskega jezika. *Slavistična revija* 15: 64–108.
- Toporišič, J., 1968. Liki slovenskih tonemov. *Slavistična revija* 16: 315–393.
- Toporišič, J., 1975. Formanti slovenskega knjižnega jezika. *Slavistična revija* 23: 153–196.
- Toporišič, J., 2000. *Slovenska slovnica*. Maribor: Obzorja.
- Traumüller, H., in Eriksson, A., 1997. A method of measuring formant frequencies at high fundamental frequencies. *Proceedings of EuroSpeech '97, 1*: 477–480.
- Vallabha, G. K., in Tuller, B., 2002. Systematic errors in the formant analysis of steady-state vowels. *Speech communication* 38: 141–160.

- Vodušek, B., 1961. Grundsätzliche Betrachtungen über den melodischen Verlauf der Wortakzente in den zentralen Slowenischen Mundarten. *Linguistica* 4: 20–38.
- Wood, S., 1989. The precision of formant frequency measurement from spectrograms and by linear prediction. *STL-QPSR*, 1: 91–93.