Beszéd alapfrekvencia követés hatékony zöngésség detektálással

BÁRDI TAMÁS

Pázmány Péter Katolikus Egyetem, Információs Technológia Kar
bardi.tamas@itk.ppke.hu

Reviewed

Kulcsszavak: alapfrekvencia-meghatározás, autokorreláció, pitch detektor, periodicitás, vágási technikák

A beszédjel alapfrekvenciát meghatározó algoritmusok, más néven pitch detektorok helyes működése csak úgy lehetséges, ha az automatikus zöngés-zöngétlen megkülönböztetés is megbízható. Az alábbiakban ismertetjük pitch detektorunkat, melyben a zöngésség detektálása a konkurens módszereknél kisebb hibaszázalékkal működik. Algoritmusunk a jól ismert autokorrelációs módszeren alapszik. Algoritmusunk zöngésség detektáló erejét egy olyan adatbázison vizsgáltuk, mely a beszéddel szinkronban laryngográf jelet is rögzítette.

1. Bevezető

Az emberi hallás modern elméletei hitelt érdemlően megállapították, hogy a hangmagasság (pitch) észlelés nem mindig van egy-egy értelmű kapcsolatban az alapfrekvenciával (*F*0). Ennek ellenére a digitális beszéd-feldolgozásban az *F*0 becslő módszereket hagyományosan pitch detektor algoritmusoknak (PDA) nevezik. A tényleges beszéddallamot jól közelítő pitch kontúr sok alkalmazásban hasznosítható. Jelentős szerepe van a prozódikus elemzésekben. Ilyen például a mondat hangsúlyos helyeinek megtalálása a hanglejtés alapján, vagy a kérdő és kijelentő mondatok automatikus megkülönböztetése. A beszédfelismerés a tonális nyelveken, mint például a kínai vagy a vietnami, megoldhatatlan pitch detektor nélkül.

A szakirodalomban pitch detektor témában jó néhány módszer látott napvilágot az elmúlt évtizedekben [10], a legszélesebb körű áttekintésük Hess-nél olvasható [7]. A megoldások többsége mérsékelt teljesítményével elégedetlenségre adhat okot, de azért van néhány egészen jó is. Ilyen Bagshaw eSRPD [3,4] módszere, amely kevesebb, mint 1%-ban becsli rosszul az alapfrekvenciát, ha zönge van a beszédben. De a zöngés gerjesztés meglétét vagy hiányát már 3-4% hibával detektálja.

Általánosságban elmondható, hogy nyelvtani jelentéssel bíró pitch csak a zöngés szegmentumokon figyelhető meg. Ezért pitch frekvencia meghatározásának feltétele a jó zöngésség detekció. A zöngés-zöngétlen megkülönböztetés (V/UV – voiced/unvoiced) szerepe a beszédfelismerésben is jelentős, hiszen számos olyan szópár van, például köt - köd, melyek kiejtésben csak egyik mássalhangzójuk zöngésségében különböznek.

Egy zöngésség meghatározására szolgáló algoritmus (VDA – voicing determination algorithm) gyakran implicit része egy PDA-nak vagy beszédfelismerőnek, de megvalósítható különállóan is. Számos VDA született [7,12] már különféle elméletek bevetésével, közülük néhány igazán figyelemre méltó, jó teljesítményt azonban csak nagyon kevés mutat. A pitch detektoroknál általában a V/UV tévesztések nagyobb százalékban fordulnak elő, mint az *F*0 becslési hibák. Atal és Rabiner [1,2,8] öt döntési paramétert használó VDA-val próbálkozott statisztikus mintázat-felismerési megközelítést alkalmazva. Módszerük 4%-os hibaarányt adott egy nehezebb feladat megoldásában, nevezetesen a zöngés/zöngétlen/csendes (nincs beszéd) (V/U/S – voiced/unvoiced/silent) osztályozásban az egyszerűbb zöngés/zöngétlen (V/UV) döntés helyett.

Építettünk egy PDA-t, melyben hatékony beépített zöngésség detektor működik. Algoritmusunk az autokorreláció függvényen (ACF) alapszik. A zönge detekcióban módszerünk 2%-hoz közeli hibaarányt ért el. Az algoritmus, ha az ACF számításához FFT-t alkalmazunk, kevesebb, mint 2 megaflop per szekundum processzorigénnyel megvalósítható 8 kHz-es mintavételezés mellett.

Az alábbi szakaszok az algoritmus moduláris szerkezetének megfelelően szerveződtek. A 2. szakasz az előfeldolgozó részt tárgyalja. Preprocesszorunkat úgy terveztük, hogy a V/UV megkülönböztetést a lehető legjobban segítse, az említett hibaarány elérésében nélkülözhetetlen szerepet játszik.

Az előfeldolgozás után a beszédjelből rövid időtartamú szakaszok kerülnek a *basic extractor*-nak nevezett egységhez. Itt számítjuk az ACF-et, majd ebből nyerjük a V/UV döntéshez és az *F*0 becsléshez szükséges paramétereket. Ebből a részből „halszálka” módszer alkalmazása érdemel említést, amely az „*F*0 a felső limiten” típusú hibákat csökkenti. Mindezeket a 3. szakasz tárgyalja.

Az egyszerű, de hatékony beépített VDA részletezése és kiértékelése a 4. szakasz és egyben cikkünk fő tárgya. A V/UV döntés két paraméteren alapszik, mindkettőt egy-egy küszöbbel hasonlítjuk össze. Ez a kétküszöbös módszer szintén hozzájárult a hibaszázalék csökkenéséhez. A szakirodalomban szokásos az előállított pitch kontúrok utólagos simítására egy posztpro-

cesszort alkalmazni, melyet nem használtunk, mert a vizsgálatunk célja a beépített VDA képességének megítélése volt. A kiértékelésben a megbízható zöngésség detektálásra fókuszáltunk.

2. A beszédjel előfeldolgozó

Általában egy PDA három fő komponensből épül fel: 1) preprocesszor, 2) basic extractor, 3) posztprocesszor.

A preprocesszor fő feladata úgy transzformálni a beszédjelet, hogy utána az *F*0 becslés és a zönge detektálás könnyebb legyen.

A basic extractor rendszerint a beszédjelből vett tipikusan 20-50 milliszekundumos ablakokon dolgozik. A megkülönböztetés azonban, hogy mely műveletek tartoznak a preprocesszorhoz és melyek a basic extractor-hoz nagyon gyakran csak formális jelentőségű. Ha előbb kivesszük az ablakot a beszédjelből, majd azon futtatjuk a preprocesszort, akkor egyrészt fölöslegesen duplikálunk egy csomó számítást, ha az ablakok átfedik egymást, másrészt a preprocesszor és a basic extractor munkáját nehéz lesz külön-külön vizsgálni. Ha így teszünk, nem tudjuk például összefüggően meghallgatni a preprocesszorból kijövő jelet. A javaslatunk, hogy inkább futtassuk a preprocesszort a beszédjel teljes hosszában, majd ebből vegyünk ablakokat és küldjük őket a basic extractor-hoz elemzésre. Ha így teszünk, érzékszervileg megfigyelhetővé válik a rendszer egy belső állapotában. Érzékszervi ellenőrző pontok elhelyezése egy összetett beszédfeldolgozó rendszer belsejében segítheti az empirikusan optimálandó paraméterek szerencsés megválasztását. Előfeldolgozónkat részben fülre „optimáltuk”: finomhangolásakor a kimenetet mindig visszahallgatva néhány paraméterét addig állítgattuk, amíg a hangzás alapján úgy nem éreztük, hogy jó lesz.

Preprocesszorunkban alul-áteresztő szűrést és centerclipet, magyarul középre vágást használunk. Mindkettő igen elterjedt a pitch detektorok szakirodalmában [6,9,11]. Az aluláteresztő szűrőnk (Csebisev I-es típus) és a center clip karakterisztikáját az *1. ábra* mutatja.

Az adaptív középre vágás technikája időben változó vágási szintet alkalmaz, mely a jel amplitúdójának függvényében változik. Általában ez a változó középre vágási szint a beszédjel valamilyen burkolójának egy rögzített százaléka. A módszerünkben az újítás, hogy kombinálja a két lépést, az alul áteresztő szűrést és a középre vágást. A burkolót az eredeti beszédjel amplitúdójából számítjuk, majd ennek 40%-át alkalmazzuk változó középre vágási szintként, de már a szűrt jelen. Mivel a tisztán sztohasztikus gerjesztésű beszéd szegmentumokon általában ennél nagyobb a nagy frekvenciás komponensek részaránya, a módszerünk a zöngétlen mássalhangzókat gyakorlatilag mindenütt nullára redukálja.

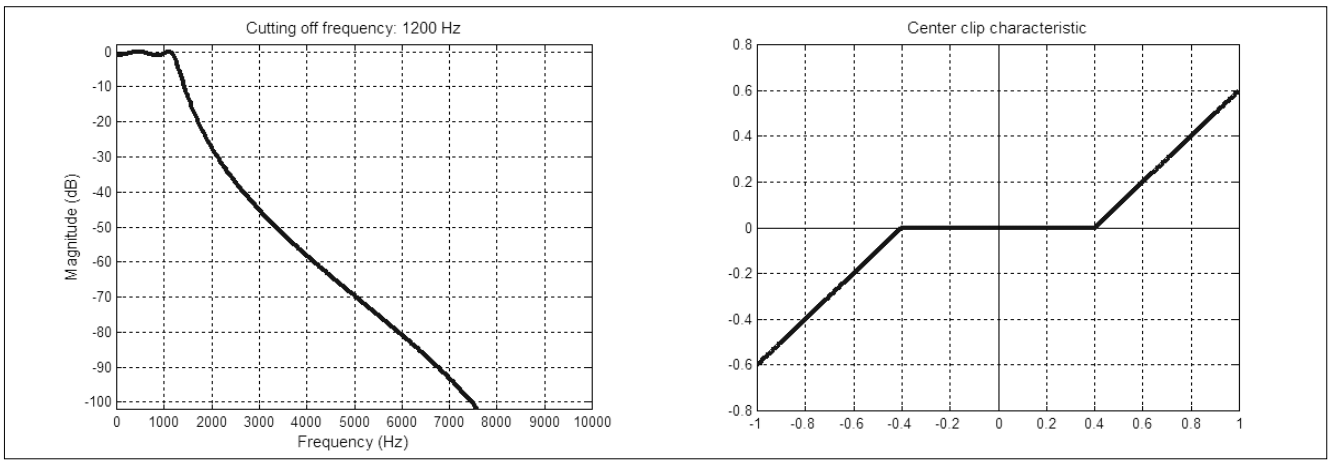
A *2, 3. és 4. ábrák* (a következő oldalon) mutatják a preprocesszorunk működését. A 4. ábrán látható, hogy a módszerünk növeli a jel periodikusságát a zöngés szegmentumon (az ACF nagyobb lesz az alapperiódus időnél), ugyanakkor nullává válik a kimenet a zöngétlenen. Ez az effektus jelentősen javítja az automatikus V/UV döntés esélyeit.

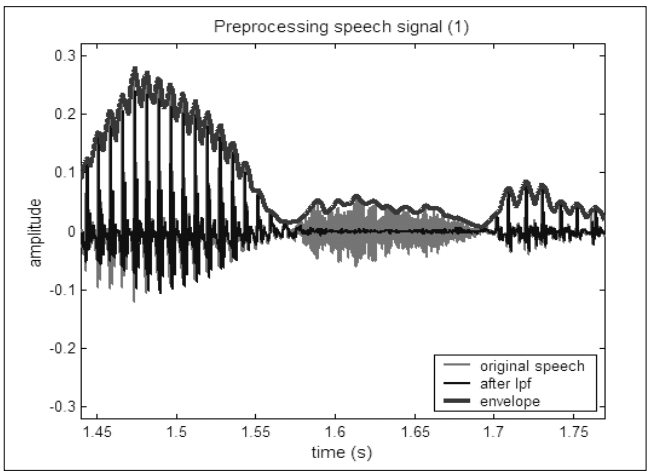
3. A basic extractor

A PDA-nak ez a része először a beszéd ablak autokorreláció függvényét számítja ki, majd az algoritmus az ACF „legjobb” csúcsát keresi meg. Az ACF értéke a kiválasztott csúcsnál, mint a periodicitás egy mértéke a zöngésség detektálására szolgál, a csúcs eltolási ideje pedig a periódus időt becsli. De hogy találjuk meg a „legjobb” csúcsot? Amint azt a későbbiekben látni fogjuk, a „legjobb” lokális maximum koránt sem feltétlenül globális is egyben.

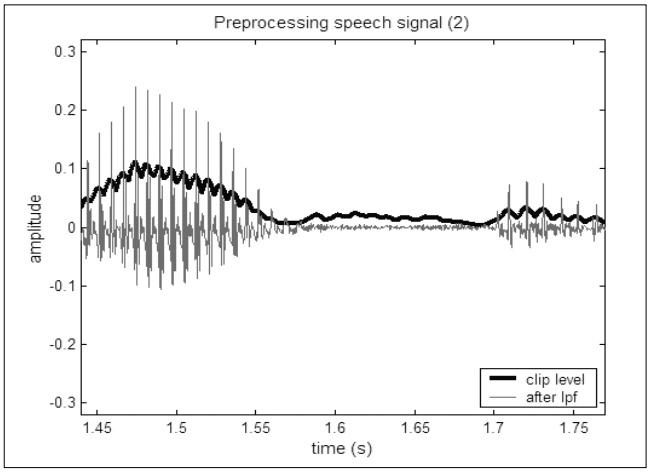
Elöljáróban megjegyezzük, hogy az összes itt leírt képletben az idő dimenziójú változók és konstansok *(τ, t, u, W)* másodpercben értendők, a beszédjel kezelése analóg: integrálokkal, folytonos idővel és amplitúdóval. Az amplitúdót a rendszerben feldolgozható maximális amplitúdó arányában jelöljük: $-1.0 \le x(t) \le 1.0$. A fenti jelölésekkel biztosítjuk a tárgyalás függetlenségét a mintavételi frekvenciától és bit-mélységtől.

1. ábra Az előfeldolgozóban alkalmazott alul-áteresztő szűrő és a center clip karakterisztikája

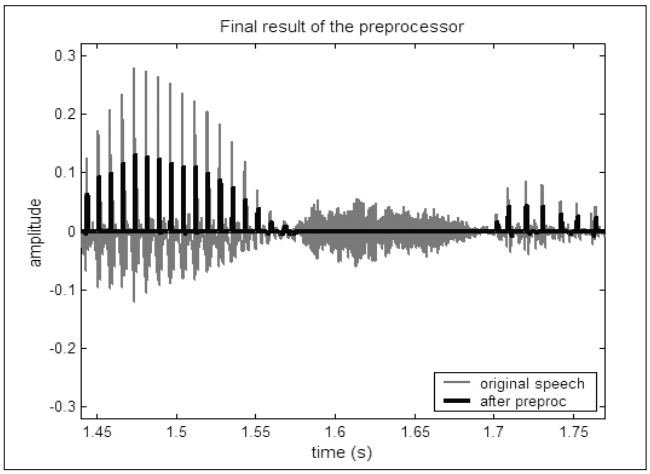




2. ábra Az eredeti beszédjel a burkolójával és a szűrt jel



3. ábra A szűrt jel és a változó középre vágási szint



4.ábra Az eredeti beszédjel és a preprocesszor kimenete

Konkrét alkalmazásban a mintavételi frekvencia és a minták számábrázolása ismeretében formuláink könnyen a megfelelő digitális változatra konvertálható.

A rövid távú autokorrelációnak a jelfeldolgozásban gyakran használt „rézsútos” (biased) definíciója helyett de Cheveigné [5] javaslata alapján annak „egyenes” (unbiased) definícióját használjuk, majd az ACF-et mesterségesen lejtősítjük. (*W* az ablak hossza, a vizsgálat során 32 ms-t használtunk)

$$r_t(\tau) = \frac{\int_{t-W/2}^{t+W/2} x(u)x(u-\tau)du}{\int_{t-W/2}^{t+W/2} x(u)^2\,du} \qquad (\tau, t, u, W \text{ szekundumban}) \quad (1)$$

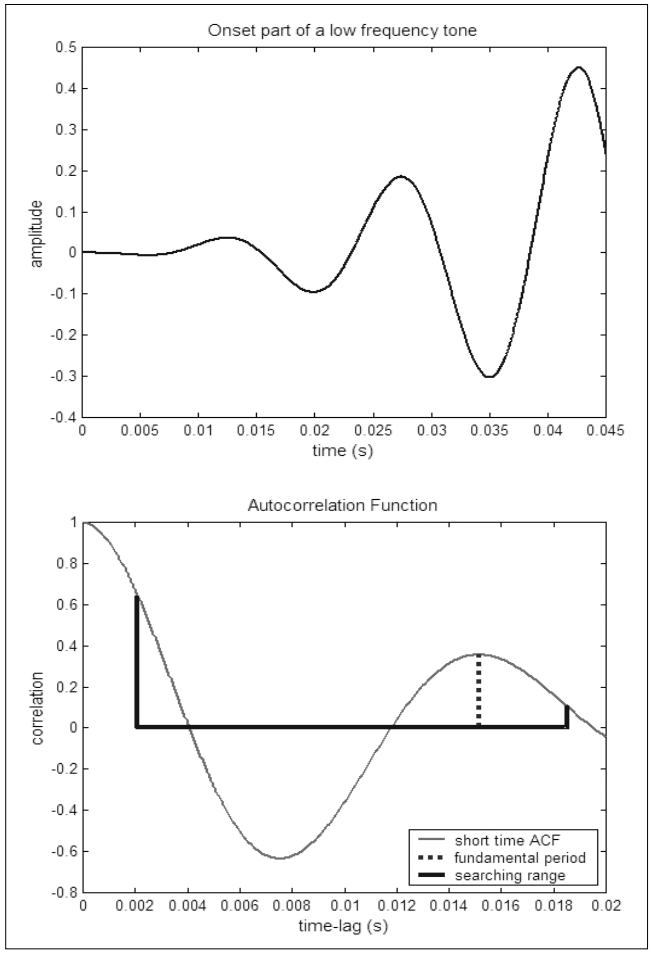
és a mesterséges lejtés
(a *gr* tényezővel szabályozhatjuk az erősségét):

$$r_t^{biased}(\tau) = r_t(\tau)\cdot(1-gr\cdot\tau) \quad (2)$$

Az ACF lejtése oktáv tévesztés elkerülése miatt fontos, így a tényleges alapperiódusnak előnyt biztosíthatunk a többszöröseivel szemben. A „rézsútos” definíció a lejtést automatikusan biztosítja, de ennek mértéke kizárólag *W*-től függ. A mesterséges lejtéssel az ablak hossz és a „lejtőszög” külön-külön hangolható.

Mélyhangok kezdeti szakaszán az ACF maximuma gyakran a keresési intervallum szélére esik. Ez a jelenség okozza az „*F*0 a felső limiten” típusú hibákat, melyre az *5. ábrán* láthatunk egy példát.

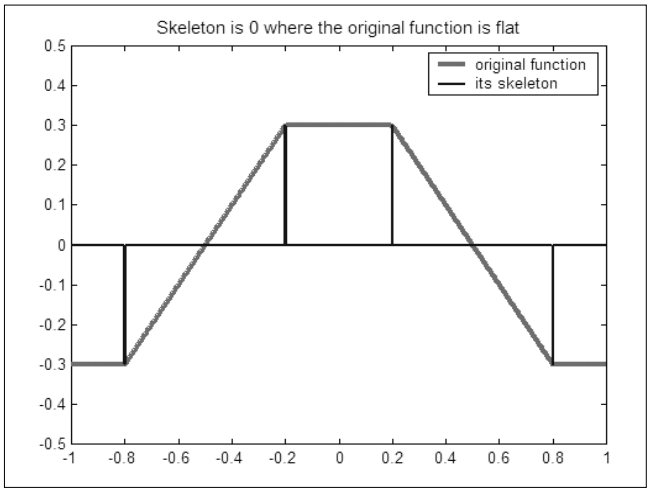
5. ábra
Egy alacsony frekvenciás (67 Hz) hang kezdeti szakasza és annak autokorrelációja. Az ACF nagyobb értéket vesz fel a keresési tartomány szélén, mint az alapperiódus időnél.



Megoldási javaslatunk a problémára a „halszálka” módszer, a szkeleton függvény alkalmazása. Egy függvény szkeletonja a függvény értékét veszi fel annak lo-

kális szélső értékeinél és nullát egyébként. Itt a céljainknak a lokális szélső érték szigorú és nem szigorú definíciói közötti átmenet felel meg. A *6. ábra* mutatja értelmezésünket.

6. ábra
A szkeleton függvény 0, ahol az eredetije vízszintes



Definíció: f : **R→R** valós függvénynek
lokális szélső értéke van *x*-ben,
ha f nem szigorúan monoton és nem sík x-ben.
Definíció: g = *skeleton*(f) akkor és csak akkor

$$g(x)=\begin{cases} f(x) & \text{ha } f\text{-nek lokális szélső értéke van } x\text{-ben,} \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases} \quad (3)$$

A mesterséges lejtés ellenére a tisztán zöngés hangok elhalkuló végein az ACF hajlamos a tényleges alapperiódus idő többszöröseinél egyre növekvő csúcsokat mutatni, amint az a *7. ábrán* látható.

Ez a jelenség csak olyankor fordulhat elő, ha az ACF a periódus időnél 1-hez közeli vagy afölötti értéket vesz fel. Ezért a probléma megoldására egy preferencia szint bevezetését javasoljuk.

Az algoritmus válassza az első csúcsot, ami a preferencia szintet meghaladja. Ha ilyen nincs, akkor a legmagasabb csúcsot.

Mi tapasztalati alapon 0,75-öt használtunk preferencia szintként.

Összegezve a basic extractor algoritmusunk lépései a korrekt végrehajtási sorrendben a következők:

Step 1: Az ACF kiszámítása (1) szerint.

Step 2: Szálkásítás:

$$sr_t(\tau) = skeleton(r_t(\tau))$$

Step 3: A keresési tartomány korlátozása (limited skeleton):

Legyen [$F0_{min}$;$F0_{max}$] a keresési intervallum,

$$srl_t(\tau)=\begin{cases} -0.5 & \text{ha } \tau < 1/F0_{max} \\ sr_t(\tau) & \text{ha } 1/F0_{max} \le \tau \le 1/F0_{min} \\ -0.5 & \text{ha } \tau > 1/F0_{min} \end{cases} \quad (4)$$

Step 4: Mesterséges lejtés:

$$srl_t^{biased}(\tau) = (1 - gr \cdot \tau) \cdot srl_t(\tau) \quad (5)$$

ahol gr =1,75

Step 5: $F0$ becslés.
Step 5/a: Preferencia szint alkalmazása:

$$\tau^* = \min\{\tau : srl_t^{biased}(\tau) \ge 0.75\} \quad (6)$$

Step 5/b: Ha 5/a sikertelen,
válasszuk a legmagasabb csúcsot:

$$\tau^* = \arg\max_{\tau}\{srl_t^{biased}(\tau)\} \quad (7)$$

ekkor az alapfrekvencia:

$$F0^* = \frac{1}{\tau^*} \quad (8)$$

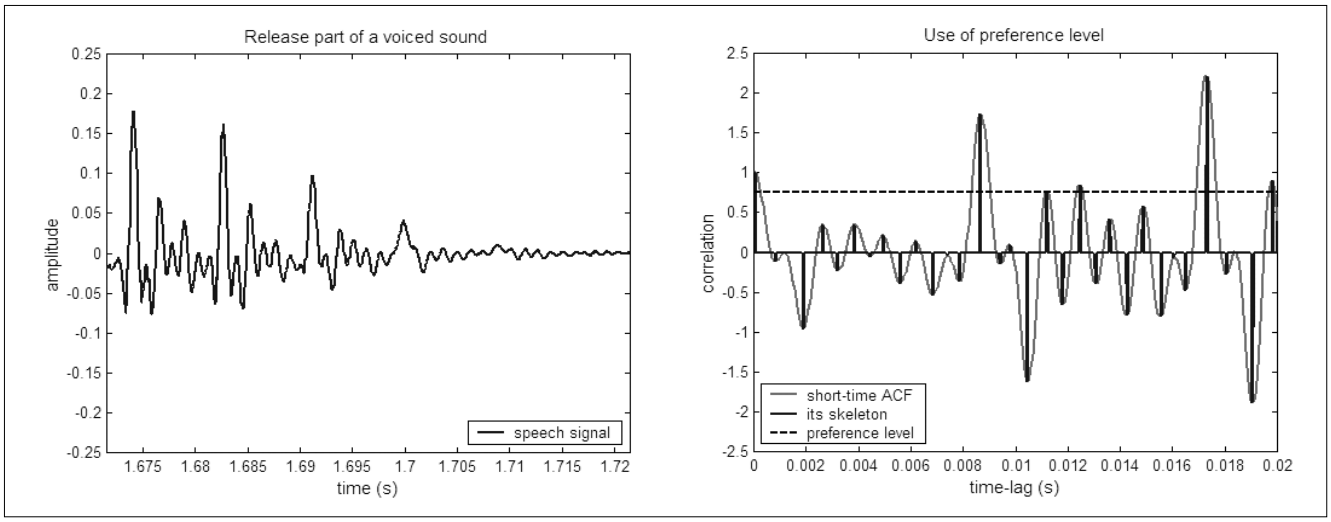
Step 6: A V/UV döntési paraméter:

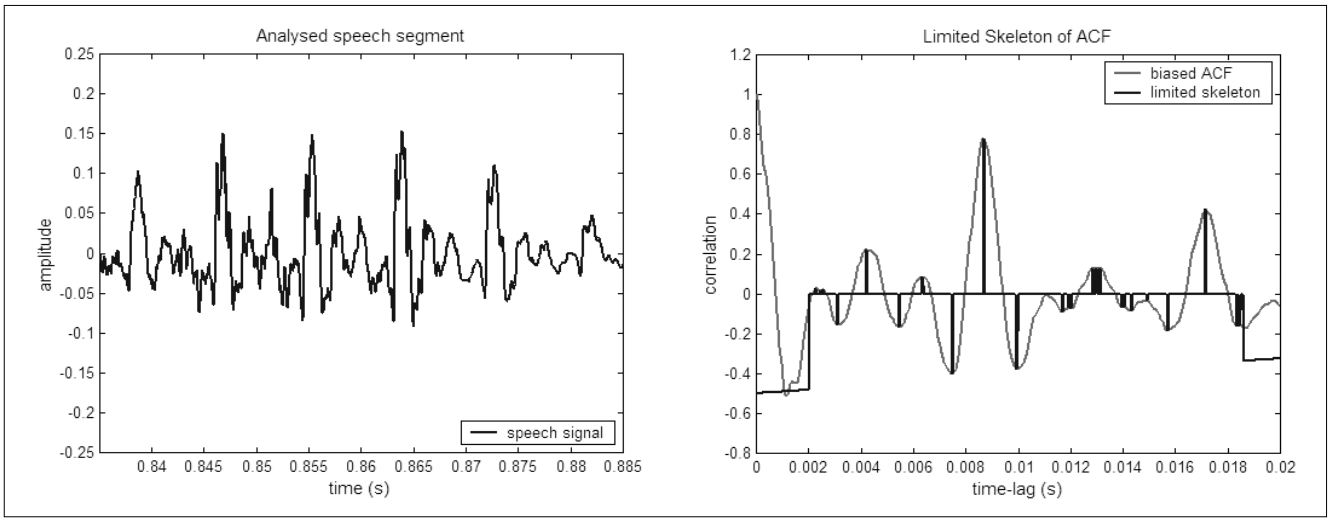
$$rm_t = srl_t(\tau^*) \quad (9)$$

az „egyenes” (unbiased)
korlátozott (limited) szkeletonból

A *8. ábra* (a következő oldalon) mutatja az algoritmus működését.

7. ábra Egy magánhangzó elhalkuló vége és annak autokorrelációja





8. ábra Az srl (limited skeleton) maximuma mutatja a beszéd ablak alapperiódusát

4. Zöngés-zöngétlen megkülönböztetés

Zöngésség detektorunk rm_t paramétert (9) használja döntése meghozatalában, valamint a jel energia logaritmusát:

$$p_t = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{1}{W}\int_{t-W/2}^{t+W/2} x(u)^2\,du\right) \qquad \text{[dB]} \quad (10)$$

A definícióból következik, hogy a maximális amplitúdójú négyszögjelre p_t = 0 dB.

Ezek után a VDA egyszerűen összehasonlítja a paramétereket egy-egy küszöbbel. A zöngésség indikátor függvény pedig:

$$voicing(t) = \begin{cases} 1 & \text{ha} \quad (rm_t > rmth)\,\&\,(p_t > pth) \\ 0 & \text{minden más esetben} \end{cases} \quad (11)$$

Ahol *rmth* és *pth* a küszöbök.

A kulcskérdés a továbbiakban a küszöbök optimális megválasztása.

A hangolási folyamatot egybe kötöttük a döntési hibaarány kiértékelésével. A kiértékelésre szolgáló adatbázist két részre osztottuk: az egyik felén a betanítást, a másik felén az ellenőrzést végezzük. Tanításkor a küszöböket optimáljuk az adatbázis első felén, a másik felén pedig ellenőrizzük a VDA-t az optimált küszöbökkel. Természetesen az adatbázis két fele nem tartalmazhat közös részt, ez meghamisítaná a kiértékelést. A tanító és a teszt halmazba vegyesen tettük a női és férfi beszéd felvételeket, hogy az optimalizáció lehető legnagyobb beszélőfüggetlenséget biztosítsa.

A döntési paramétereket a teszt során W = 32 ms ablakhosszal nyertük ki. Az $F0$ keresési tartomány 55 és 480 Hz között volt.

A *9/a. ábra* mutatja a paraméterek eloszlását a tanító halmazon. A világos pontok jelölik a zöngés, a sötétek a zöngétlen szakaszokból származó paraméter párokat. A köztük haladó egyenes vonalak a kétküszöbös döntési módszert (11) ábrázolják. A vonalakon túlra tévedt sötét és világos pöttyök mutatják, hogy ez a módszer sem tökéletes.

A kétváltozós várható hibaarány felület az eloszlásokból származik. A felület értéke az (*x,y*) pontban azt jelenti, hogy *rmth=x* és *pth=y* küszöböket választva ennyi a V/UV tévesztés aránya a tanító halmazon. A felület mélypontja jelöli az optimális küszöböket. A *9/b. ábrán* látható a várható hibaarány felület.

Az optimált küszöbök: *pht* = –55,2dB és *rmth* = 0,23. A hibafelület értéke ebben a pontban 1,95%. A kapott küszöböket teszteltük az adatbázis másik felén és a V/UV tévesztési arány: **2,13%**.

Ezt mint végeredményt tekinthetjük, ez az algoritmusunk teljesítménye.

5. Összegzés

Áttekintve az algoritmusunkat úgy látjuk, három jó részmegoldás játszott kulcsszerepet a 2,13%-os hibaarány elérésében.

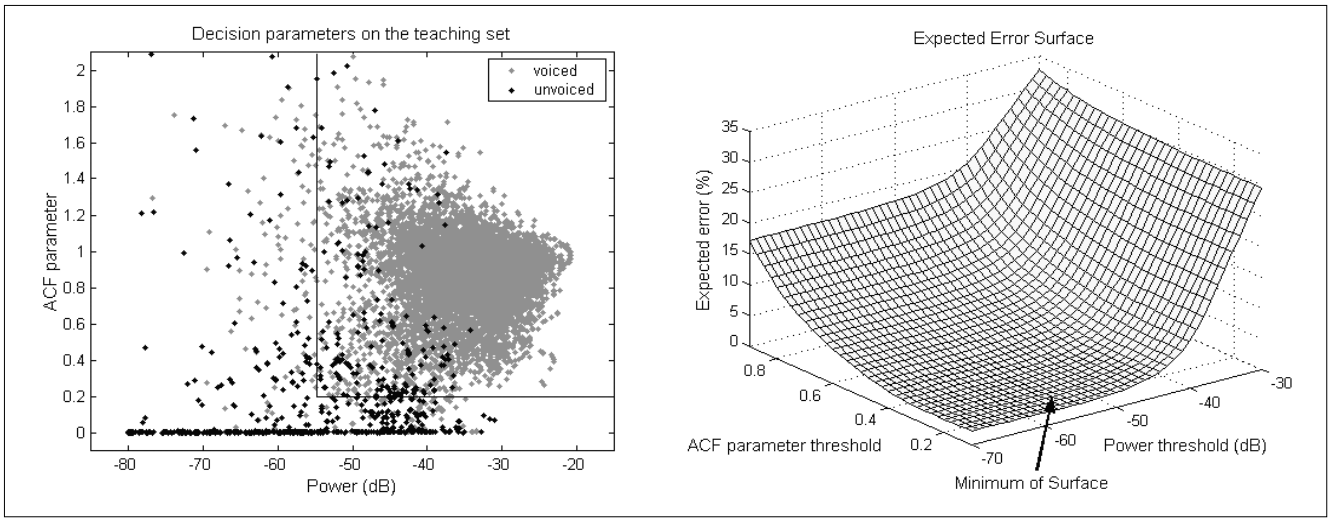
Az első az aluláteresztő szűrés kombinálása a center clippel, a másik szkeleton függvény használata a basic extractorban, a harmadik pedig a jel energia figyelembe vétele a zöngésség meghatározásban. A jel energia sokkal jobban jelzi a zöngét, ha azt az előfeldolgozó után mérjük, mintha az eredeti beszéden. Az algoritmus precíz megfogalmazása és a korrekt végrehajtási sorrend szintén lényeges.

6. A kiértékelés adatbázisa

Algoritmusunkat a Fundamental Frequency Determination Algorithm (FDA) elnevezésű beszéd adatbázison ellenőriztük. Ezt a University of Edinburgh egyetem Centre for Speech Technology Research intézetében készítették. A szerzője Paul Christopher Bagshaw.

Az adatbázis letölthető az Internetről, az alábbi címen: *http://www.cstr.ed.ac.uk/~pcb/fda-eval.tar.gz*

Hét percnyi beszédet tartalmaz. 50 angol mondat, mindegyik egy férfi és egy női beszélő elmondásában.



9. ábra a) A döntési paraméterek eloszlása, b) Várható hibaarány felület

A teljes idő 37%-ában zöngés szegmentumok és 63%-ban zönge nélküliek (zöngétlen mássalhangzó és beszédszünet együtt). A beszédet laryngográf jellel szinkronban vették fel. Ez alapján cimkézték a zöngés és zönge nélküli szegmentumokat.

Köszönetnyilvánítás

A szerző szeretné köszönetét kifejezni témavezetőjének, Dr. Takács Györgynek az iránymutatásáért és segítségéért, a Pázmány Péter Katolikus Egyetem Információs Technológiai Kar doktori iskolája vezetőinek a bizalomért és a támogatásért, valamint Dr. Lajtha Györgynek a segítségéért.

Irodalom

[1] B. S. Atal and L. R. Rabiner:
"A Pattern Recognition Approach to Voiced-Unvoiced-Silence Classification with Applications to Speech Recognition"
IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. ASSP-24, pp.201–212., 1976.

[2] B. S. Atal and L. R. Rabiner:
"Voiced-unvoice decision without pitch detection"
J. Acoust. Soc. Am., Vol. 58, 1975.

[3] P. C. Bagshaw:
Automatic prosodic analysis for computer aided pronunciation teaching PhD Thesis,
University Edinburgh, 1994.

[4] P. C. Bagshaw, S. M. Hiller and M. A. Jack:
"Enhanced pitch tracking and the processing of *F*0 contours for computer aided intonation teaching"
Proc. 3rd European Conf. on Speech Comm. and Technology,
Vol. 2, pp.1003–1006., Berlin, 1993.

[5] A. de Cheveigné and H. Kawahara:
"YIN, a fundamental frequency estimator for speech and music"
Journal Acoust. Soc. Am., Vol. 111., Apr. 2002.

[6] J. R. Deller, J. H. L. Hansen and J. G. Proakis:
Discrete-Time Processing of Speech Signals,
Macmillan, New York, 1993.

[7] W. A. Hess:
Pitch Determination of Speech Signals,
Berlin, Springer-Verlag, 1983.

[8] L. R. Rabiner:
"Evaluation of a statistical approach to voiced-unvoiced-silence analysis for telephone quality speech"
Bell Syst. Tech. Journal, Vol. 56, pp.455–482., 1977.

[9] L. R. Rabiner:
"On the Use of Autocorrelation Analysis for Pitch Detection"
IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. ASSP-25, pp.24–33., 1977.

[10] L. R. Rabiner, M. J. Cheng, A. E. Rosenberg and C. A. McGonegal:
"A Comparative Performance Study of Several Pitch Detection Algorithms"
IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. ASSP-24, pp.399–418., 1976.

[11] L. R. Rabiner and R. W. Schafer:
Digital Processing of Speech Signals,
Prentice Hall, Engelwood Cliffs NJ, 1978.

[12] L. S. Smith:
"A Neurally Motivated Technique for Voicing Decision and F0 Estimation for Speech"
Centre for Cognitive and Computational Neuroscience, Tech. Report, Vol. CCCN-22,
University Stirling, Scotland, 1996.