Processament d'àudio

Helenca Duxans Barrobés
Marta Ruiz Costa-jussà

PID_00154785

Material docent de la UOC

UOC
Universitat Oberta de Catalunya

Helenca Duxans Barrobés

Marta Ruiz Costa-jussà

L'encàrrec i la creació d'aquest material docent han estat coordinats pel professor: David García Solórzano (2012)

Primera edició: febrer 2012
© Helenca Duxans Barrobés, Marta Ruiz Costa-jussà
Tots els drets reservats
© d'aquesta edició, FUOC, 2012
Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona
Disseny: Manel Andreu
Realització editorial: Eureca Media, SL
Dipòsit legal: B-3.153-2012

Els textos i imatges publicats en aquesta obra estan subjectes –llevat que s'indiqui el contrari– a una llicència de Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 Espanya de Creative Commons. Podeu copiar-los, distribuir-los i transmetre'ls públicament sempre que en citeu l'autor i la font (FUOC. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya), no en feu un ús comercial i no en feu obra derivada. La llicència completa es pot consultar a http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.ca

Introducció

Aquesta assignatura és una continuació de *Senyals i sistemes I i II*, i alhora es presenta com un complement perfecte de l'assignatura de *Processament d'imatge*, de manera que dota els estudiants d'uns coneixements transversals de l'àmbit del processament del senyal. Per tant, una assignatura com aquesta és fonamental per a tot enginyer graduat en l'itinerari d'Audiovisuals del grau de Tecnologies de Telecomunicació, que, de ben segur, farà sevir el coneixement adquirit al llarg d'aquest curs en algun moment de la vida professional.

El processament d'àudio inclou diferents aplicacions tecnològiques, com són la reproducció de música en alta fidelitat, el reconeixement de la parla o la síntesi de la parla. Aquesta assignatura, en concret, pretén combinar una explicació teòrica dels principals conceptes del processament d'àudio, i veure'n les aplicacions més rellevants, amb un vessant pràctic que permeti assolir més bé alguns dels conceptes exposats.

Finalment, hem de comentar que aquesta assignatura és una de les tres d'àudio que hi ha a l'itinerari d'Audiovisuals, juntament amb Acústica i Electroacústica. Per tant, en acabar el grau, l'estudiant tindrà un ampli coneixement de l'àmbit de l'àudio, que anirà des de tractar el senyal d'àudio (el veurem en aquesta assignatura) i condicionar espais (Acústica) fins a conèixer el funcionament de diversos dispositius de captació i transmissió del senyal acústic (Electroacústica).

Aquests apunts pretenen ser una introducció experimental al processament d'àudio. Estan organitzats en tres blocs principals i cada bloc està dividit en mòduls. Cada mòdul conté teoria, exemples, resums i exercicis. Així mateix, us presentem contínuament bibliografia de referència per si voleu ampliar coneixements.

El primer bloc presenta, en el primer mòdul, conceptes ja vistos sobre senyals i sistemes i, en el segon mòdul, explica el disseny de filtres.

El **primer mòdul** fa un repàs dels principals conceptes de senyals i sistemes que farem servir en aquesta assignatura. Bàsicament inclou els continguts següents: la definició i classificació de *senyal* i *sistema*; la caracterització de senyals i sistemes mitjançant la transformada de Fourier i la transformada Z; i la conversió entre el domini analògic i discret.

El **segon mòdul** explica el disseny de filtres. L'objectiu principal del mòdul és explicar la **teoria bàsica de disseny de filtres digitals i analògics**. Concretament, es vol donar a l'estudiant la capacitat d'aprendre a utilitzar qualsevol **programari** de disseny de filtres i que així pugui dissenyar els seus propis fil-

tres donades unes especificacions concretes. Així mateix, es combina la teoria i la pràctica del **disseny de filtres** amb l'estudi de diferents utilitats dels filtres digitals i analògics dins de l'àrea de processament del senyal d'àudio.

A continuació, entrem en el bloc 2, que se centra a desenvolupar conceptes d'àudio, i, per tant, és el bloc més llarg de tots tres. Aquest bloc inclou els mòduls 3, 4 i 5.

El **tercer mòdul** fa una introducció a l'acústica. Desenvolupem conceptes com què és el so, com el percebem, com el mesurem, com es genera i com es propaga. Concretament, estudiarem com funciona l'acústica fisiològica, és a dir, com percep el so l'orella humana, com emet el so el sistema de fonació humana i quina directivitat té la veu humana. Dins de les eines de percepció del so definirem les corbes isofòniques, els filtres de ponderació i el nivell de soroll de fons i dins del mesurament del so veurem el sonòmetre. També analitzarem la tipologia de fonts sonores que hi ha i el comportament que tenen en diferents tipus de recintes. Finalment, veurem com es propaga el so i què és la reverberació i la intel ligibilitat del so.

El **quart mòdul** presenta el procés de codificació que segueix el senyal d'àudio per a emmagatzemar-se o transmetre's digitalment. Veurem la quantificació digital i alguns conceptes que hi estan relacionats com el sobremostreig, el tramat (*dithering*) i la conformació del soroll (*noise shaping*). També coneixerem les codificacions principals que s'utilitzen per a l'àudio actualment, i distingirem entre codificadors d'àudio generalistes i codificadors específics per a la veu. En aquest mòdul veurem com s'utilitza la psicoacústica, és a dir, les característiques de la percepció del so en l'orella humana, per a millorar l'eficiència dels codificadors. Finalment, l'última part del quart mòdul està dedicada a presentar els formats de fitxers d'àudio més utilitzats en el món digital, sia per a emmagatzematge o per a transmissió, sobretot en l'àmbit de xarxes IP com és Internet.

En el **cinquè mòdul** veurem un exemple real de la manera com s'aplica la teoria vista en els mòduls anteriors en el camp del processament d'àudio: la creació d'efectes sonors. Després de presentar què és un efecte digital d'àudio fem una petita introducció als efectes digitals d'àudio més habituals, sobretot en el món de la producció musical, proporcionant, juntament amb les bases teòriques del processament digital del senyal dels sistemes que els generen, exemples i referenciant creacions musicals que us puguin ser fàcils de trobar.

El tercer bloc de l'assignatura presenta dues aplicacions de processament d'àudio, però centrades en l'àmbit de la parla: el reconeixement i la síntesi de la parla. Aquest bloc està format pels mòduls 6, 7 i 8.

El **sisè mòdul** és un mòdul introductori a les característiques de la parla que ens permetrà tenir els coneixements bàsics per a entendre els fonaments de les tècniques presentades en els mòduls següents. Primer de tot, veurem com

es produeix la veu en el sistema fonador humà i quines són les característiques acústiques de la veu. Finalment, farem el pas entre l'acústica i la fonètica, per presentar com es classifiquen fonèticament tots els sons que som capaços d'articular.

En el **setè mòdul** introduïm el concepte de reconeixement automàtic de la parla i fem un repàs de les tècniques més importants. Concretament, analitzem dues de les etapes dels reconeixedors: l'extracció de característiques acústiques sobre les quals es basarà el reconeixement i l'algoritme de reconeixement. Veurem com el reconeixement es pot transformar en un problema de cerca, utilitzant models acústics i models de llenguatge estimats prèviament per a reduir la complexitat de la cerca. Finalment, coneixerem les eines que ens permeten mesurar com és de "bo" un reconeixedor.

El **vuitè mòdul** està dedicat a la síntesi de la parla. Concretament, veurem els convertidors de text a veu, la finalitat dels quals és transformar en veu qualsevol text escrit. Dintre de totes les tècniques que hi ha per a sintetitzar veu, aquest mòdul focalitza el tema en els sistemes de síntesi per concatenació, ressaltant la importància que té el corpus (o base de dades) tant en la selecció dels segments que s'han de concatenar com en la qualitat final de la veu sintetitzada. Com en el mòdul setè, proporcionarem eines per a mesurar la qualitat dels convertidors de text a veu per tal de poder-los comparar entre si.

Activitats

Conceptes de senyals i sistemes

1. Dibuixeu un senyal analògic, un senyal discret en temps i un senyal digital.

2. Què pot ajudar a millorar la reconstrucció ideal si ens fixem en el convertidor A/D?

Disseny i anàlisi de filtres en processament d'àudio

3. Quina és la resposta impulsional del filtre passabaix ideal? Raoneu per què no és realitzable un filtre passabaix ideal.

4. Feu un filtre passabaix d'ordre 2 seguint l'esquema de l'exemple [SLPF], amb coeficient $b_2 = 1$. Quina $y[n]$ s'obté?

5. Hem vist el disseny de dos grans tipus de filtres: FIR i IIR. En aquesta activitat volem comparar aquestes dues variants de filtres. La comparativa la farem utilitzant l'eina del FDAtool ajudats de l'exemple de l'apartat 5.2.2.

En primer lloc, es demana que dissenyeu amb l'FDAtool un filtre passabanda amb banda de pas entre 4 kHz i 8 kHz, i atenuació de 6 dB a les freqüències de 2 kHz i 10 kHz. Compareu diferents mètodes FIR i IIR. Quin és el mètode que requereix un ordre més baix per a complir les especificacions? Quin és aquest ordre? Visualitzeu la resposta impulsional.

En segon lloc, es demana que definiu unes especificacions per a un filtre passaalt. Utilitzeu novament l'FDAtool per a dissenyar un filtre IIR. Experimenteu quina aproximació (Butterworth,Txebyxev, invers de Txebyxev o Cauer) compleix les especificacions amb el mínim ordre i per què.

6. Demostreu que la resposta impulsional d'un filtre IIR té un nombre infinit de mostres diferents de zero.

Introducció a l'acústica

7. Dins del disseny acústic de teatres, auditoris o cinemes, és molt important tenir en compte els coeficients d'absorció dels materials (com ara butaques, cortines o moqueta) que es posen a les sales. Feu una cerca i poseu un exemple de material molt absorbent (amb un $\alpha > 0{,}7$), un material mitjanament absorbent ($0{,}2 < \alpha < 0{,}7$) i un material poc absorbent ($\alpha < 0{,}2$). Considereu com a freqüència 1 kHz.

8. Els fenòmens de reverberació i eco depenen de l'encavalcament del so directe i el reflectit. Analitzarem aquests conceptes amb un exemple pràctic. Si la velocitat del so és de 350 m/s, i l'objecte reflector introdueix un camí extra de 10 m respecte al camí directe, quin retard tindrà el senyal reflectit respecte al senyal directe? Es pot considerar eco o serà reverberació? Què passa si l'objecte reflector es troba a 50 m de la font? Feu la comprovació amb l'Audacity.

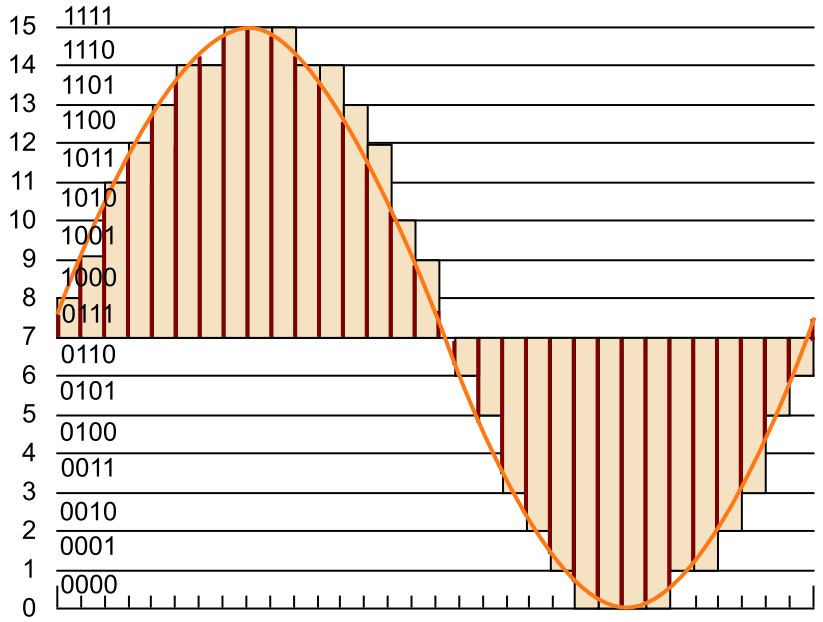
9. Sabem que hi ha diferents maneres de calcular el temps de reverberació. Les analitzarem i compararem amb un exemple pràctic.Tenim una sala rectangular de 3 × 4 × 5 m (altura × allargada × profunditat). El sostre és de fusta; les parets, de vidre, i el terra, de parquet. Calculeu el temps de reverberació per a les freqüències de 125 Hz, 250 Hz i 500 Hz segons Sabine, Eyring i Millington. Comenteu si els temps que s'obtenen són iguals o diferents i per què.

La taula següent mostra els coeficients d'absorció dels diferents materials utilitzats:

Coeficient d'absorció	125 Hz	250 Hz	500 Hz
Fusta	0,15	0,11	0,10
Vidre	0,18	0,06	0,04
Parquet	0,04	0,04	0,07

Codificació de l'àudio

10. Escriviu la seqüència de 0 i 1 del senyal codificat de la figura següent:



11. Quins canvis introdueix la quantificació logarítimica en un quantificador uniforme per tal que aquest quantificador uniforme sigui no uniforme?

12. Penseu com afecta apujar el nombre de bits per mostra i la freqüència de mostreig a la quantitat de memòria necessària per a emmagatzemar l'àudio codificat. Feu aquestes comparacions per qualitat CD (16 bits per mostra i 44,1 kHz) i per 24 bits per mostra i 96 kHz:

a) 30 minuts de música estèreo.

b) I si ho guardàvem en format MP3, amb una taxa de bits de 128 kbps? Quin seria el factor de compressió?

Efectes digitals del senyal d'àudio

13. Identifiqueu els efectes següents:

Àudio original	Àudio amb efecte	Tipus d'efecte
1	1	
2	2	
3	3	

14. Quin és el diagrama de blocs d'un sistema digital que introdueix tres ecos en un àudio original i que aplica un trèmolo només a l'àudio original?

15. Genereu un efecte sonor amb l'Audacity. Obriu l'Audacity i graveu una paraula qualsevol. Seleccioneu el senyal gravat i afegiu-hi l'efecte eco. Podeu jugar amb el factor d'atenuació (invers del guany) i el temps de retard (sempre més gran de 50 mil·lisegons) per veure com es modifica el senyal. Ara afegiu-hi un eco amb un retard de menys de 50 mil·lisegons. Noteu alguna diferència?

Reconeixement automàtic de la parla

16. Els reconeixedors de paraules clau, anomenats també *word spotting*, es dissenyen per a detectar només les paraules que l'usuari indica al sistema, i per tant ignora la resta de veu. Entre les possibles implementacions d'aquests reconeixedors hi ha tota una família que es basa a fer models HMM de tota la paraula clau que s'ha de detectar. Aquests models, juntament amb models *filler* o *garbage*, que modelen tota la resta de veu que no és una paraula clau, s'utilitzen en el bloc de descodificació per a trobar una transcripció del tipus següent: paraula clau, *filler* + paraula clau, *filler* + paraula clau + *filler* o paraula clau + *filler*. Indiqueu els passos necessaris per a introduir una paraula clau nova en aquest tipus de sistemes.

17. Calculeu el percentatge d'error d'inserció, substitució i eliminació per a la transcripció següent. Quin és el valor de la WER?

- Transcripció de referència: "a la reunió van assistir deu persones"
- Transcripció automàtica: "la reunió van dir sí deu persones"

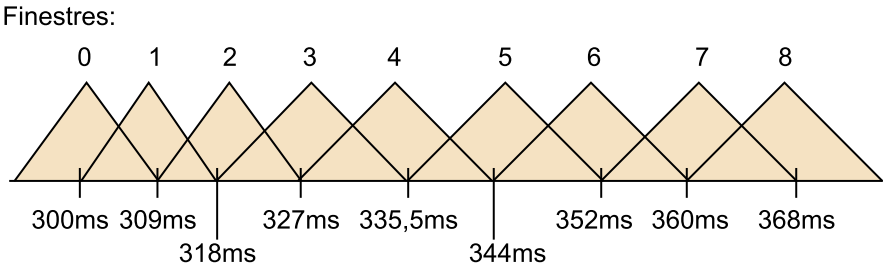
18. Busqueu dos reconeixedors de la parla que incloguin el castellà entre els idiomes que reconeixen.

Síntesi de la parla

19. Identifiqueu quins blocs d'un TTS basat en concatenació acústica s'han de modificar per a introduir una veu en un idioma nou. I si es vol introduir una veu nova, però en un idioma dels que ja existeixen?

20. Busqueu els punts de síntesi i la seqüència de finestres que s'han de concatenar per al senyal de veu següent, si es vol fer una modificació de velocitat constant d'1,4 (és a dir, una modificació de duració d'1 / 1,4) i una modificació d'altura tonal d'1,1.

Instants d'anàlisi: 300 ms, 309 ms, 318 ms, 327 ms, 335,5 ms, 344 ms, 352 ms, 360 ms,368 ms.



Solucionari

Conceptes de senyals i sistemes

2. Per exemple, utilitzar un quantificador de més bits.

Disseny i anàlisi de filtres en processament d'àudio

3. És una sinc centrada a l'origen. No és realitzable perquè la resposta impulsional és infinita.

4. y[n] = {1,3,6,9,12,15,18,21,24,27} (v(n) = [0;0], b = [1,1,1], M = 2)]

5. IIR el·líptic d'ordre 4.

Cauer requereix el mínim ordre perquè té un comportament amb arrissament d'amplitud constant a les bandes de pas i atenuada.

Introducció a l'acústica

7. Material molt absorbent: fibra de vidre.

Material mitjanament absorbent: catifa sobre ciment.

Material poc absorbent: marbre.

8. En el primer cas, el retard és de 28 ms; per tant, es considera reverberació.

En el segon cas, el retard és de 142 ms; per tant, es considera eco.

9.

TR (s)	125	250	500
Sabine	0,77	1,64	1,82
Eyring	0,73	1,58	1,76
Millington	0,71	1,57	1,75

Codificació de l'àudio

10.

0111 1001 1011 1100 1101 1110 1110 1111 1111 1111 1110 1110 1101 1100 1010 1001 0111 0110 0101 0011 0010 0001 0000 0000 0000 0000 0000 0001 0001 0010 0011 0101 0110

11. El quantificador logarítimic incorpora prèviament al quantificador uniforme una etapa de compressió i a la sortida del quantificador uniforme hi afegeix una expansió logarítmica que modifica el senyal.

12.

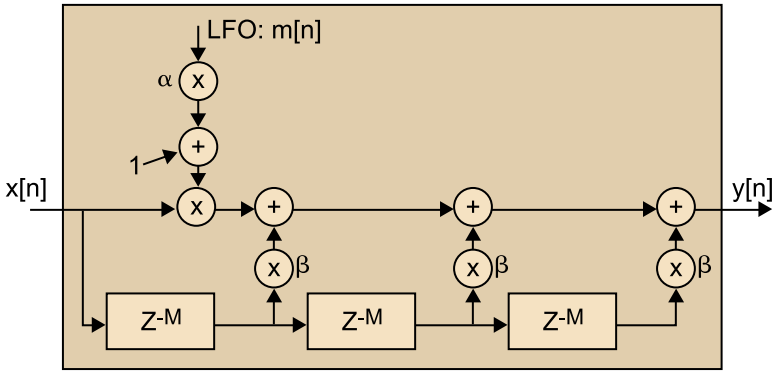
a) Qualitat CD: 2.540.160.000 bits; per a l'altra codificació: 4.147.200.000 bits.

b) 230.400.000 bits, factor de compressió per a qualitat CD 11,025; per a l'altra codificació: 18.

Efectes digitals del senyal d'àudio

13. *Wah-wah*, trèmolo, eco.

14.



15. Quan el temps de retard és més petit de 50 mil·lisegons, l'efecte que es percep és una reverberació.

Reconeixement automàtic de la parla

16.

1r. Generar la transcripció fonètica de la paraula clau.

2n. Incloure la paraula clau en el diccionari del model de llenguatge.

3r. Generar l'HMM de la paraula clau. Si podem fer gravacions noves: fer múltiples gravacions amb diferents usuaris de la paraula clau, processar l'àudio i extreure els MFCC i entrenar un sol HMM. Si no podem fer gravacions noves: generar l'HMM concatenant els HMM dels trifonemes que formen la paraula clau.

4t. Incloure l'HMM generat en el model acústic del reconeixedor de paraules clau.

5è. Opcionalment, reestimar l'HMM *filler* o els HMM *filler*.

Tots els canvis en el reconeixedor de paraules clau es duen a terme en la fase d'entrenament. La fase d'execució del sistema continua igual.

17.

Percentatge d'error d'inserció: 1 / 7 * 100 = 14,29%

Percentatge d'error de substitució: 1 / 7 * 100 = 14,29%

Percentatge d'error d'omissió: 1 / 7 * 100 = 14,29%

WER = 42,86%

18.

Vegem-ne algun exemple:

Nuance

Loquendo

Microsoft

IBM

Verbio

Síntesi de la parla

19. Per a una veu nova en un idioma nou:

Tot el mòdul de processament de llenguatge natural: l'analitzador morfosintàctic, el transcriptor fonètic i el generador prosòdic. El corpus d'unitats acústiques (disseny del corpus + enregistrament + etiquetatge).

Per a una veu nova en un idioma que ja existeix:

El corpus d'unitats acústiques (enregistrament + etiquetatge).

20. Primer instant de síntesi: 300 ms.

Primera finestra: 0.

Segon instant de síntesi: 300 ms + (309 300) / 1,1 = 308,18 ms.

Instant virtual central de la segona finestra: 308,18 + (308,18 300) * 1,4 = 311,45 ms.

Segona finestra: 1 (finestra amb instant central més proper a 311,45 ms).

Tercer instant de síntesi: 308,18 + (318 309) / 1,1 = 316,36 ms.

Instant virtual central de la tercera finestra: 316,36 + (316,36 308,18) * 1,4 = 327,81 ms.

Tercera finestra: 3 (finestra amb instant central més proper a 327,81 ms).

Quart instant de síntesi: 316,36 + (335,5 327) / 1,1 = 324,09 ms.

Instant virtual central de la quarta finestra: 324,09 + (324,09 316,36) * 1,4 = 334,91 ms.

Quarta finestra: 4 (finestra amb instant central més proper a 334,91 ms).

Cinquè instant de síntesi: 324,09 + (344 335,5) / 1,1 = 331,82 ms.

Instant virtual central de la cinquena finestra: 331,82 + (331,82 324,09) * 1,4 = 342,64 ms.

Cinquena finestra: 5 (finestra amb instant central més proper a 342,64 ms).

Sisè instant de síntesi: 331,82 + (352 344) / 1,1 = 339,09 ms.

Instant virtual central de la sisena finestra: 339,09 + (339,09 331,82) * 1,4 = 349,27 ms.

Sisena finestra: 6 (finestra amb instant central més proper a 349,27 ms).

Setè instant de síntesi: 339,09 + (360 352) / 1,1 = 346,36 ms.

Instant virtual central de la setena finestra: 346,36 + (346,36 339,09) * 1,4 = 356,54 ms.

Setena finestra: 7 (finestra amb instant central més proper a 356,54 ms).

Continguts

Mòdul didàctic 1
Conceptes de senyals i sistemes
Marta Ruiz Costa-jussà i Helenca Duxans Barrobés
1. Senyals i sistemes
2. Transformació del domini temporal al domini freqüencial

Mòdul didàctic 2
Disseny i anàlisi de filtres en processament d'àudio
Marta Ruiz Costa-jussà i Helenca Duxans Barrobés
1. Concepte i tipus de filtres. Per què s'ha d'aprendre com funciona un filtre?
2. Conceptes bàsics per al disseny de filtres digitals
3. Filtres reals: plantilla d'especificació d'un filtre
4. Disseny de filtres digitals
5. De la teoria a la pràctica

Mòdul didàctic 3
Introducció a l'acústica
Marta Ruiz Costa-jussà i Helenca Duxans Barrobés
1. Definició i caracterització del so i del soroll
2. Percepció humana del so. Fenòmens sonors
3. Fonts sonores i propagació del so

Mòdul didàctic 4
Codificació de l'àudio
Marta Ruiz Costa-jussà i Helenca Duxans Barrobés
1. Introducció a l'àudio digital
2. Quantificació
3. Quantificació inversa
4. Processos de l'àudio digital
5. Classificació dels codificadors d'àudio
6. Codificadors de forma d'ona
7. Codificadors perceptius
8. Codificacions específiques per a veu
9. Formats de fitxers d'àudio

Mòdul didàctic 5
Efectes digitals del senyal d'àudio
Helenca Duxans Barrobés i Marta Ruiz Costa-jussà
1. Introducció i classificació dels efectes digitals d'àudio
2. Efectes sonors basats en retardadors
3. Efectes sonors basats en moduladors
4. Efectes sonors basats en sistemes lineals

5. Efectes sonors basats en sistemes no lineals
6. Altres tipus d'efectes

Mòdul didàctic 6

Introducció a la parla

Helenca Duxans Barrobés i Marta Ruiz Costa-jussà

1. Introducció a les tecnologies de la parla
2. La producció de la veu en tres passos
3. Propietats acústiques del senyal de veu
4. Classificació fonètica dels sons
5. Unitats acústiques utilitzades en les tecnologies de la parla

Mòdul didàctic 7

Reconeixement automàtic de la parla

Helenca Duxans Barrobés i Marta Ruiz Costa-jussà

1. Introducció al reconeixement automàtic de la parla
2. Aplicacions dels reconeixedors automàtics de la parla
3. Funcionament bàsic dels reconeixedors
4. El mòdul d'extracció de característiques
5. El mòdul de descodificació
6. Tècniques d'adaptació
7. Avaluació de la transcripció automàtica

Mòdul didàctic 8

Síntesi de la parla

Helenca Duxans Barrobés i Marta Ruiz Costa-jussà

1. Introducció a la síntesi de la parla
2. Aplicacions dels convertidors de text a veu
3. Els convertidors de text a veu
4. Síntesi per concatenació
5. Modificacions prosòdiques
6. Mesures de qualitat de la veu sintetitzada

Bibliografia

Carrión Isbert, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Edicions UPC.

Cremer, L.; Muller, H. A. (1982). *Principles and Applications of Room Acoustics* (vol. 1). Londres: Applied Science Publishers.

ETSI ES 202 050 V1.1.1 (2002-2010). "Speech processing, transmission and quality aspects (STQ); distributed speech recognition; advanced front-end feature extraction algorithm; compression algorithms" (ref. DES/STQ-00008)

Franco Contadini, Maxim (2010). "Oversampling with averaging to increase ADC resolution".

Gonzalez, M. D. (2006). "Comparación de filtros FIR de fase lineal, por Método Óptimo y de Ventanas".

Iosu, D. (1999). "Análisis de Fourier".

Irizar Picón, A. (2002). "TratamientoDigital deSeñal".

Kompis, M.; Dillier, N. (1993). "Simulating transfer functions in a reverberant room including source directivity and head-shadow effects".*JASA* (núm. 93, pàg. 2779-2787).

Lamba, D. (2010). . "Audio Signal Filtering".

Mariño, J. B. i altres (1999). *Tratamiento digital de la señal: una introducción experimental*. Barcelona: Edicions UPC.

McClellan, J. H.; Parks, T. W. (març del 2005). "A personal history of the Parks-McClellan algorithm". Signal Processing Magazine*, IEEE* (vol. 22, núm. 2, pàg. 82-86). Atlanta, GA, EUA: Georgia Institute of Technology.

Molina, R. (2008). . "Cuantificación Escalar".

Moreno, A. (2003). "Cuantificación". Universitat Politècnica de Catalunya.

Wagner, B.; Barr, M. (2007). "Filtres FIR i IIR".

Proakis, J. G.; Manolakis, D. G. (2007). *Tratamiento digital de señales*. Madrid: Pearson Prentice Hall.

Smith, J. O. (2008, octubre). "Spectral Audio Signal Processing".

Smith, J. O. (2011). . "Amplitude response".

wikipedia.org (2012). . "Filtres analògics".

Zawistowski, T.; Shah, P. (2005). "An Introduction to Sampling Theory".