

Aplicacions de filtratge adaptatiu

José Antonio Morán Moreno
Joan Claudi Socoró Carrié

PID_00211304



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>

Índex

Introducció.....	5
1. Identificació de sistemes.....	7
2. Equalització de canal.....	11
3. Predicció lineal.....	13
4. Cancel·lació de soroll.....	16
5. Cancel·ladors d'eco.....	18

Introducció

En aquest últim mòdul de l'assignatura es pretenen presentar diferents aplicacions de filtratge adaptatiu en aplicacions de processament de senyal. L'objectiu no serà entrar en el detall de la programació dels algorismes sinó conèixer àmbits d'aplicació en què el processament adaptatiu de senyal s'aplica de manera habitual en l'àmbit de les aplicacions de telecomunicació.

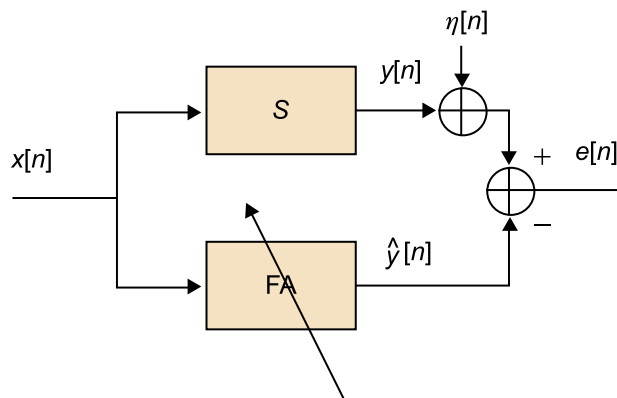
1. Identificació de sistemes

L'ús dels sistemes lineals i no lineals és un aspecte fonamental en el camp de l'enginyeria. Quan es pretén dissenyar un algorisme de processament de senyal o un controlador electrònic d'un determinat sistema hem de disposar d'una modelització d'aquest a fi de poder-lo tractar de manera matemàtica.

En l'enginyeria de control o en el camp del processament de senyal s'utilitza la identificació de sistemes amb l'objectiu de crear models matemàtics de sistemes dinàmics a partir de valors observats del sistema en funcionament. L'objectiu és obtenir un model matemàtic que sigui capaç de reproduir les característiques dinàmiques del procés o sistema objectiu amb prou exactitud i precisió per a les finalitats desitjades.

Hi ha diferents tècniques per a la identificació de sistemes, i es poden utilitzar tant tècniques lineals com no lineals. Pel que fa a aquesta assignatura, veurem com podem utilitzar les tècniques de processament adaptatiu a fi d'identificar sistemes.

Figura 1. Esquema d'un sistema d'identificació de sistemes basat en filtres adaptatius



Tal com s'observa en la figura 1, podem imaginar que disposem d'un sistema S del qual desconexem el funcionament. El sistema S pot ser un sistema físic com el canal de transmissió d'un sistema de comunicacions a una banda de freqüències concreta, un motor de rentadora, el dispositiu òptic d'una càmera fotogràfica, el comportament acústic d'una sala o qualsevol element que se'ns pugui ocórrer en una aplicació de processament de senyal.

A fi d'obtenir un model prou exacte del sistema, serà important fer-ne la caracterització mitjançant un conjunt de senyals d'entrada complet.

Exemple

Imaginem el cas, per exemple, de la modelització d'un sistema de comunicacions. Evidentment, en el cas de l'espectre radioelèctric serà impossible obtenir un model lineal que representi el sistema en tot el marge de freqüències disponibles, atès que el comportament de l'atmosfera a diferents freqüències és variant en freqüència i en el temps. Per a procedir a l'estimació haurem d'afitar l'escenari a aquelles freqüències concretes en les quals es vulgui fer el processament de senyal i nodrir el sistema d'entrenament amb un conjunt de senyals d'entrenament complet que ens permeti caracteritzar completament el subespai de senyal en el qual es pretén treballar.

Exemple de sistema d'entrenament

A manera d'exemple imaginem la modelització d'una sala acústica per a una aplicació d'àudio. Com és ben conegut per tots, la banda freqüencial de senyals audibles pels humans es troba entre els 20 Hz i els 18-20 kHz a causa de la resposta fisiològica de l'oïda. Al moment de desenvolupar la identificació del sistema, hem de pensar en dos aspectes fonamentals que determinaran la complexitat del sistema quan es tracta de filtres FIR. El primer serà l'ordre òptim del filtre, i el segon, les característiques dels senyals d'entrenament.

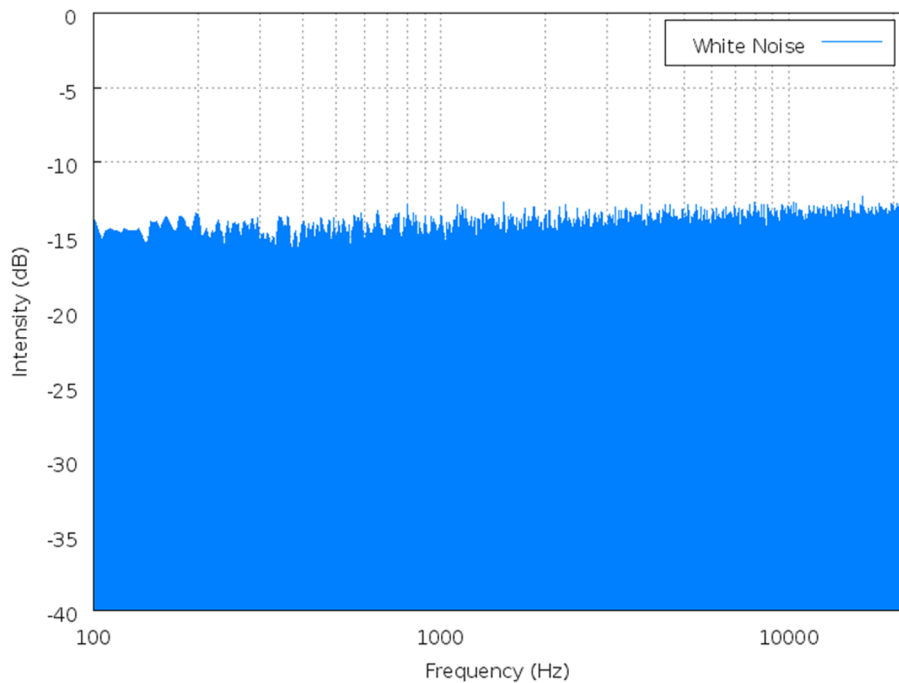
Serà necessari identificar tot l'espectre de freqüències? L'ordre del filtre dependrà del marge de freqüències per identificar? Quins senyals haurem d'utilitzar com a senyals d'entrenament? Com es pot observar, el plantejament d'aquestes qüestions inicials serà fonamental per al disseny de l'aplicació. Si es tracta de senyals d'àudio per a converses normals n'hi haurà prou de caracteritzar el canal per a la banda de freqüències 20 Hz - 3.400 Hz i es podria fer amb un filtre de longitud més curta; en canvi, si pretenem fer una caracterització per a més marge de freqüències, és possible que es necessiti incrementar la longitud del filtre, en poder haver-hi més nombre de rebots a la sala per a les altes freqüències, especialment si ens trobem en auditoris de grans dimensions.

Suposem que ens trobem en una aplicació de veu en què les freqüències estaran entre 20 Hz i 3.400 Hz aproximadament. **Quin tipus de senyal d'entrada utilitzarem per a fer l'entrenament?** Si ens ho mirem des del punt de vista freqüencial i si volem tenir una caracterització completa, necessitaríem utilitzar un senyal amb contingut freqüencial en tota la banda de freqüència útil. El primer tipus de senyal en el qual podríem pensar és en una funció delta de Dirac. Des d'un punt de vista matemàtic, es tracta d'una funció que té un espectre pla, de manera que la podríem utilitzar en qualsevol tipus de problema d'identificació de sistemes. El principal problema és com generar físicament una delta acústica. Com podem imaginar, això no és possible i haurem de recórrer a altres alternatives de senyals que s'utilitzen normalment en identificació de sistemes, com són el soroll tou gaussià o el soroll acolorit.

L'important d'aquests senyals en la seva funció d'entrenament del sistema és que posseeixen densitat espectral d'energia en totes les freqüències. Espectralment hi pot haver variacions, però totes les freqüències d'entrada s'exciten i permeten al sistema adaptatiu identificar el comportament per a totes les freqüències útils de l'aplicació. El problema podria sorgir en el cas d'utilitzar se-

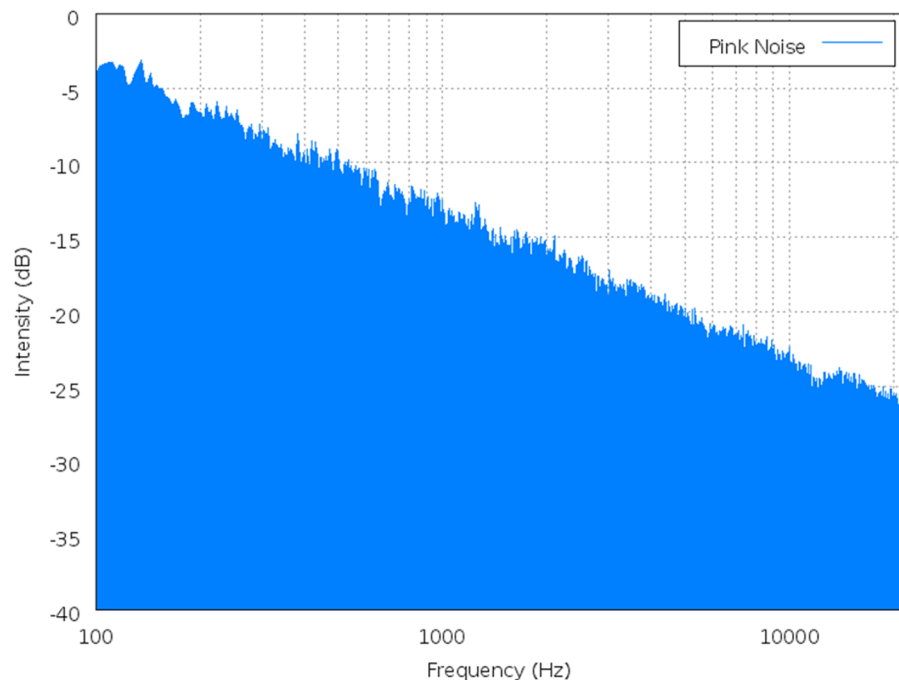
nyals d'entrenament que no tinguessin energia en alguna banda freqüencial, atès que llavors el sistema no seria capaç d'identificar les característiques en aquella banda concreta.

Figura 2. Densitat espectral de potència del soroll blanc



Font: Wikipedia

Figura 3. Densitat espectral de potència d'un soroll rosa



Font: Wikipedia

Les característiques del soroll blanc o acolorit són també excepcionals per a garantir una ràpida velocitat de convergència de l'algorisme adaptatiu. Recordem que el millor que pot passar per a tenir una convergència ràpida en els filtres adaptatius, i especialment en l'estimador LMS (*linear mean square*), és

tenir un senyal d'entrada descorrelacionat. El soroll blanc presenta una funció de correlació delta i el soroll acolorit també presenta bones característiques de descorrelació entre mostres. Això permet que els algorismes puguin convergir ràpidament, fins i tot si s'utilitza l'algorisme LMS.

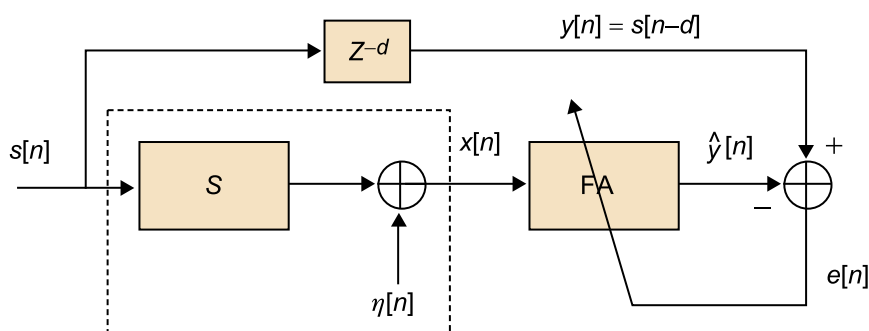
Finalment ens podríem qüestionar sobre quin algorisme adaptatiu cal utilitzar. **Podem utilitzar l'LMS i aprofitar-ne el baix cost computacional?, o hem de recórrer a versions computacionalment més costoses com l'RLS?** Com ha acabat sent comú al llarg de l'assignatura, la resposta és: depèn! Si estem en l'exemple d'identificació d'un canal acústic en què podem utilitzar tot el temps que necessitem, podem optar directament per un LMS i allargar l'entrenament el temps necessari, atès que només l'haurem de fer una vegada. Imaginem, en canvi, un altre escenari, com per exemple un cancel·lador d'eco en un canal altament variant; en aquest cas, l'entrenament s'haurà d'anar fent de manera recurrent al llarg del temps i és necessària una convergència ràpida a fi de no perdre eficiència del canal. En aquest cas, sí que convindria recórrer a versions més avançades per a garantir-ne una convergència ràpida.

2. Equalització de canal

El canal de comunicació és l'element distorsionador principal en un sistema de telecomunicacions. Des del punt de vista del dissenyador, busquem aplicacions en què el canal tingui un comportament neutre, és a dir, que provoqui la mínima distorsió sobre el senyal enviat. No obstant això, tots sabem que, en el millor dels casos, el canal provocarà una distorsió del senyal d'entrada i afegirà una interferència en forma de soroll. Podrem solucionar això amb un filtre en el receptor que faci una aproximació al filtre invers del canal, de manera que reconstrueixi el senyal enviat de la millor manera possible.

Quan treballem en aplicacions avançades i en entorns més agressius, com pot ser la telefonia mòbil o aplicacions en canals altament variants, el problema principal ja no és només la distorsió que produeix el canal, sinó la variabilitat d'aquest al llarg del temps. Davant aquestes situacions, el receptor no té més remei que anar fent estimacions a intervals de temps del nou comportament del canal i corregir el senyal rebut mitjançant un equalitzador.

Figura 4

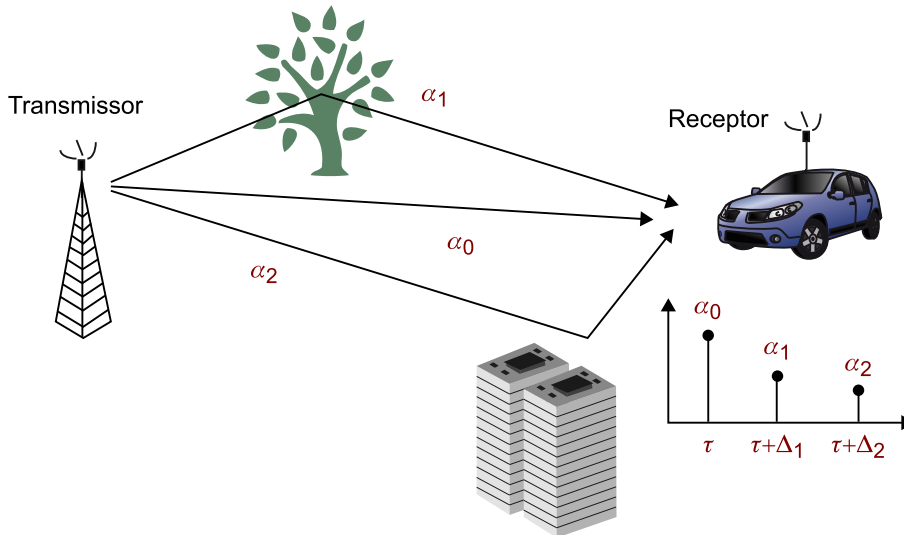


Hi ha d'haver un protocol de comunicació que identifiqui unes finestres de treball. Aquest protocol té una finestra de temps per a la transmissió d'informació útil i una finestra de temps petita per a l'estimació de canal i adaptació de l'equalitzador. En aquesta aplicació concreta, com més gran sigui el temps que utilitzem per a corregir el canal, més gran serà la pèrdua d'eficiència en la transmissió. Tenint en compte que el canal és un recurs escàs, el sistema s'haurà de dissenyar de manera que el temps dedicat a l'equalització sigui el mínim possible.

Cada quant de temps serà necessari fer una fase d'entrenament (*training*) de l'algorisme adaptatiu? Aquesta pregunta dependrà del canal i de la seva caracterització estadística. En general, en la modelització estadística de canals es parla del temps de coherència com d'aquell període de temps durant el qual el canal té un comportament més o menys estable. En canals mòbils, aquesta variabilitat està relacionada amb el multitrajecte i amb l'efecte de Doppler pels

moviments de l'emissor i el receptor. Una vegada conegut aquest paràmetre, haurem d'establir un període d'entrenament de l'algorisme no gaire superior al temps de coherència a fi de poder fer un seguiment de les variacions del canal.

Figura 5. Multitrajecte i Doppler en comunicacions mòbils



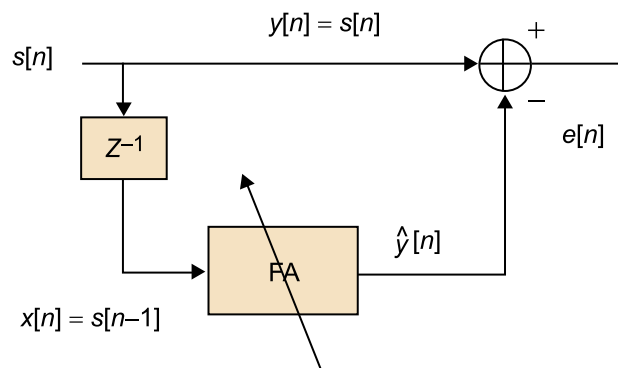
En la figura 5 es pot observar que el senyal rebut en el vehicle arriba per tres camins diferents amb retards variants en el temps a mesura que el vehicle es desplaça. El sistema, llavors, haurà d'utilitzar una finestra d'entrenament en què transmetrà una seqüència coneguda o d'entrenament a fi que el sistema adaptatiu pugui fer l'equalització del canal. Després d'aquest entrenament, el sistema anirà fent petits ajustos utilitzant l'error de descodificació per a fer un seguiment (*tracking*) de les petites variacions del canal. Passat el temps de coherència, caldrà fer una altra fase d'entrenament per a fer els ajustos a les variacions més severes que hagi pogut experimentar el canal. En aquest cas, atès que necessitem que el sistema faci l'adaptació en el menor temps possible, resulta fonamental utilitzar un algorisme de convergència ràpida, com podria ser un de basat en l'estructura de Gram-Schmidt o un RLS.

3. Predicció lineal

La predicció lineal ha estat una de les aplicacions més interessants en el camp del processament de senyal, especialment aplicada als models de comportament i la seva evolució futura. Tots imaginem el que representaria poder fer una predicció dels valors de la borsa. Lamentablement per a nosaltres, aquests valors no corresponen a un model lineal, de manera que les prediccions basades en aquest tipus de models solen estar plenes d'errors.

No obstant això, hi ha camps d'aplicació en l'àmbit del processament de senyal en què els algorismes de predicció de senyals tenen una gran utilitat, com per exemple en les tècniques de compressió i codificació de veu.

Figura 6. Esquema d'un predictor lineal

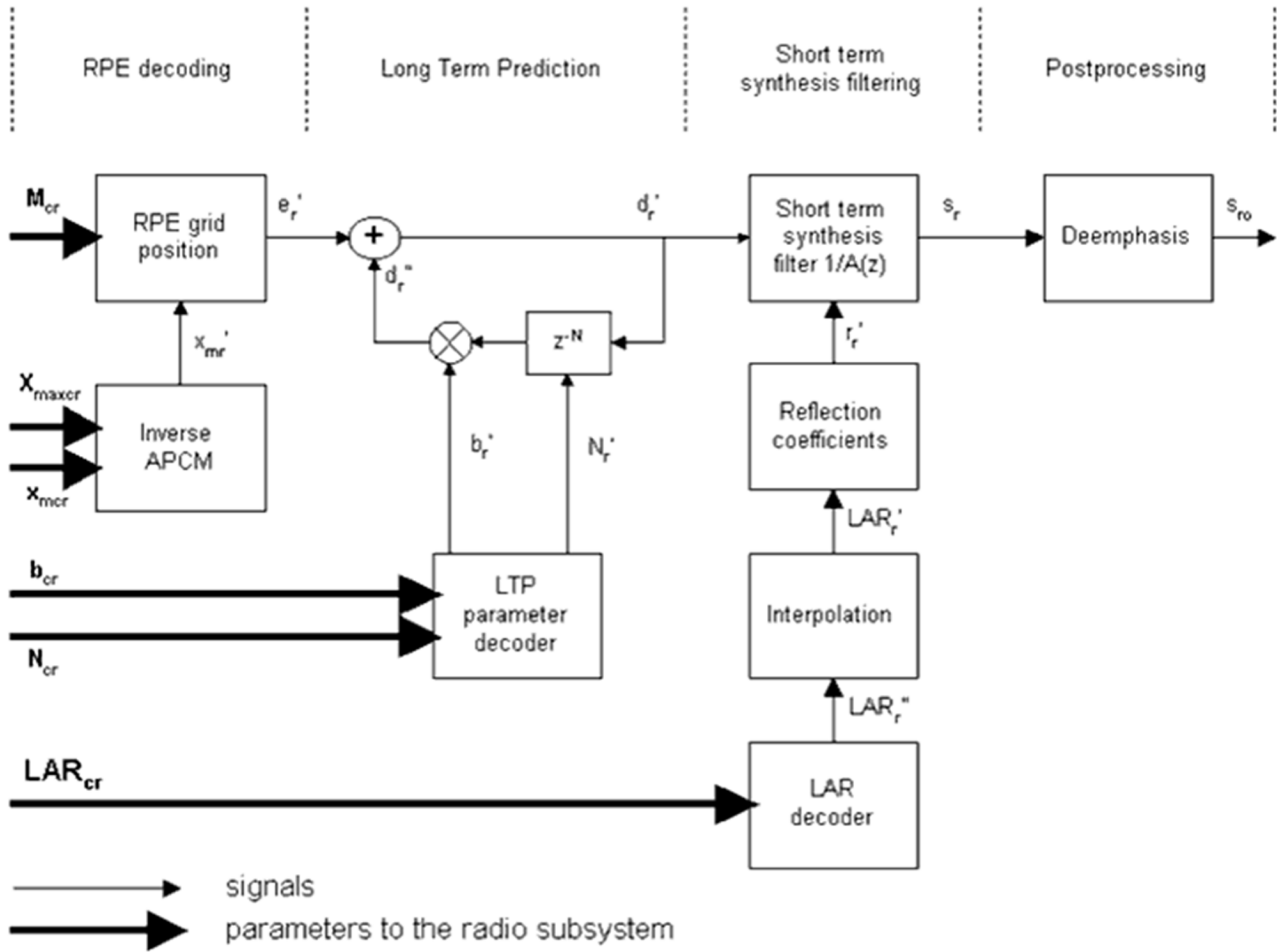


Si pensem en un sistema de comunicació de veu massiu com poden ser les comunicacions mòbils i que treballi amb senyals de veu en qualitat àudio seguint el criteri de Nyquist, hauríem de mostrejar a 8.000 Hz, i amb una resolució de 8 bits/mostra, tindríem un canal bàsic de veu de 64 kbit/s. El sistema GSM utilitza un algorisme de codificació de veu basat en un sistema predictiu lineal excitat que aconsegueix reduir les necessitats de transmissió a 13 kbit/s.

Fent un simple càlcul proporcional, veiem que hem aconseguit multiplicar gairebé per 5 la capacitat del canal pel simple fet de codificar apropiadament el senyal per transmetre, i en un sistema de gran escala podem imaginar el gran impacte d'aquest factor sobre la capacitat total del sistema.

La figura 7 mostra l'estructura del codificador de veu GSM. No és l'objectiu del curs comprendre la totalitat de l'esquema, atès que això cau fora del contingut, però sí que podem observar com el nucli d'aquest sistema de codificació es basa en un predictor LPC.

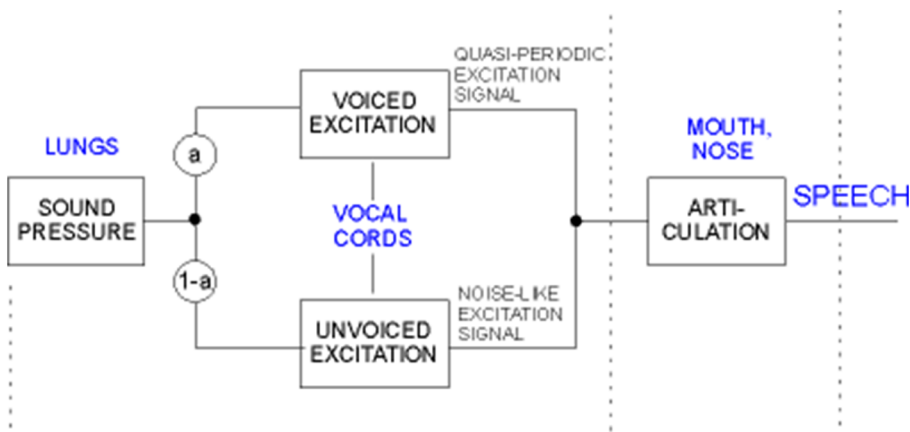
Figura 7. Esquema del codificador GSM RPE-LTP



Font: <http://edocs.soco.agilent.com/display/ads2011/about+GSM+Design+Library>

L'esquema es fonamenta en les característiques del senyal de veu i la modelització del tracte vocal.

Figura 8. Model matemàtic de la generació de veu



Font: http://www2.spisc.tugraz.at/add_material/courses/scl/vocoder/

La figura 8 ens mostra que el nostre sistema de producció de veu admet una modelització senzilla des del punt de vista acústic. Fonamentalment tenim dos tipus de sons, uns que corresponen a una excitació amb un senyal gairebé

periòdic, i uns altres que corresponen a una excitació similar al soroll blanc. Aquesta excitació passa pel tracte vocal i produeix els sons que finalment escoltem.

Aquest i altres sistemes de codificació de veu basats en predicció lineal pertanyen de la base que el tracte vocal es pot modelitzar mitjançant un filtre IIR amb la funció de transferència $H(z)$ següent:

$$H(z) = \frac{G}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_p z^{-p}}$$

Com observem, si el tracte vocal correspon a aquest model, el sistema invers correspon a un filtre FIR i la determinació dels coeficients de predicció del filtre pot servir per a fer una codificació eficient del senyal.

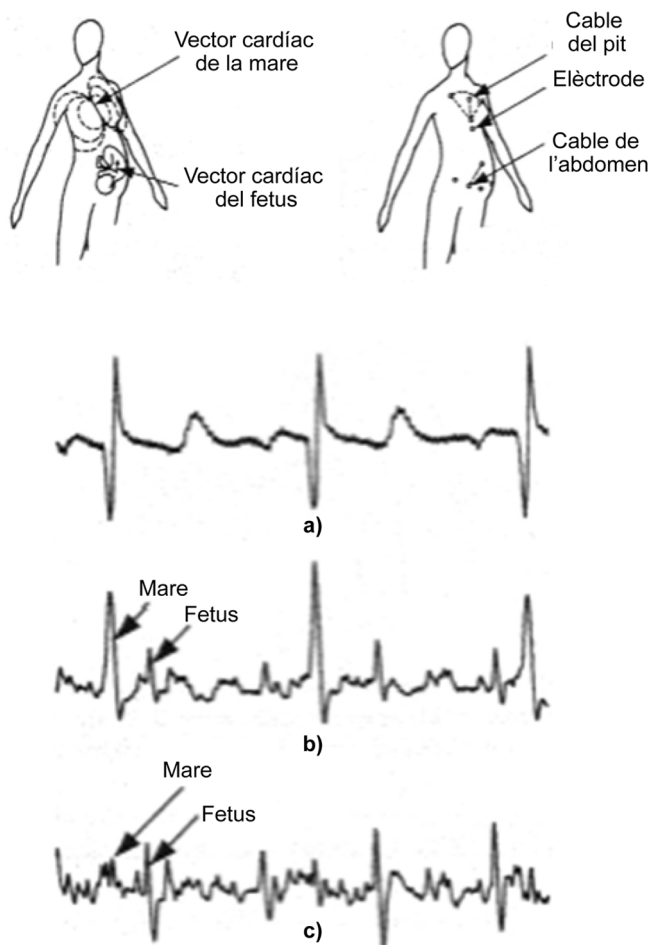
Veiem, doncs, com l'ús de filtres de predicció lineal pot ser molt útil en el disseny de sistemes de codificació de veu basats en models predictius, i s'aplica tant a tècniques de compressió com a tècniques de síntesi artificial de veu.

4. Cancel·lació de soroll

Una altra de les aplicacions de processament de senyal amb resultats més espectaculars en aplicacions biomèdiques són les tècniques de cancel·lació de soroll, sobretot quan hem de processar senyals contaminats per altres de més magnitud.

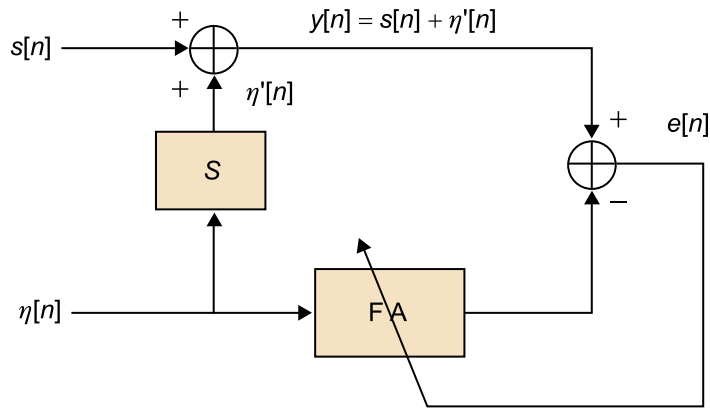
En mòduls anteriors s'ha posat com a exemple la cancel·lació de soroll a la cabina d'un helicòpter, però en aquest cas ens centrarem en aplicacions en el camp de la medicina, com per exemple l'electrocardiograma d'un fetus que es veu interferit pels impulsos cardíacs de la mare, que són de molta més intensitat, o pels efectes de la xarxa elèctrica. En aquests casos serà necessari eliminar del senyal mesurat el senyal interferent a fi d'obtenir un senyal de qualitat en un àmbit tan important com és les aplicacions biomèdiques.

Figura 9. Exemple d'un sistema de mesura d'un electrocardiograma d'un fetus



En l'exemple es pot observar com per a fer aquesta aplicació serà necessari disposar de dos sistemes de mesura, un sensor a la zona del fetus i un sensor a la zona cardíaca de la mare. La intensitat més gran de l'impuls elèctric cardíac de la mare fa que el sensor de mesura del fetus es vegi interferit per un senyal de més intensitat.

Figura 10. Esquema proposat de l'aplicació



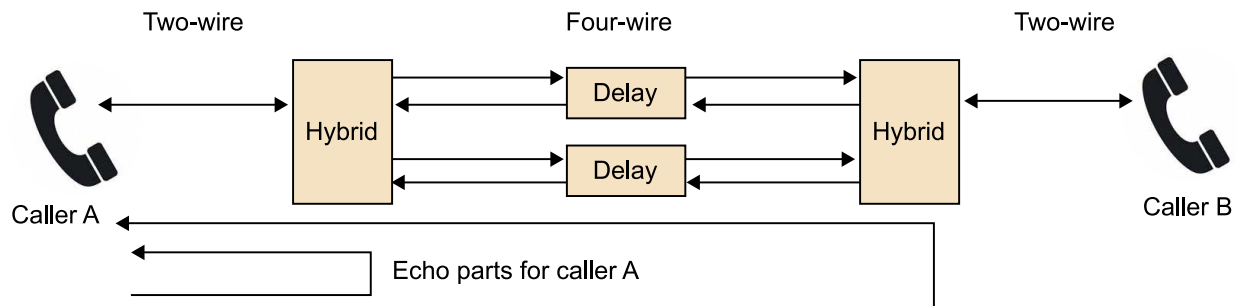
En l'esquema proposat per a aquesta aplicació s'observa que el senyal $y[n]$ seria la mesura a la zona abdominal en què es troba el fetus i $\eta[n]$ serà la mesura de la zona cardíaca de la mare. El senyal $y[n]$ està compost per dos components, la part de senyal corresponent al fetus $s[n]$ més la interferència produïda per la mare, que serà el senyal d'origen transformat pel sistema S, que representa la variació que experimentarà el senyal per a arribar des del cor fins a la zona de mesura abdominal.

L'objectiu del sistema serà fer la cancel·lació del senyal interferent, que en aquest cas correspon al senyal matern, per a poder deixar un senyal d'error que correspongui únicament al senyal de l'electrocardiograma del bebè. El problema principal d'aquesta aplicació és el fet que la potència del senyal interferent en aquest cas és molt superior a la del senyal desitjat, tal com hem pogut veure en la figura 9. D'altra banda, en compartir tots dos senyals la mateixa banda freqüencial no resulta possible fer un filtratge clàssic i hem de recórrer a un filtratge estadístic. Atès que els senyals varien amb el temps, haurem de recórrer a versions adaptatives per a poder obtenir els resultats desitjats.

5. Cancel·ladors d'eco

Els sistemes de cancel·lació d'eco van sorgir inicialment en aplicacions telefòniques quan el senyal enviat es reflectia en el transformador i tornava cap a l'emissor. Aquest problema de doble bucle feia incòmoda la comunicació, especialment quan ens trobàvem en comunicacions de llarga distància en què el retard podia ser clarament apreciable en el receptor. Els sistemes de telefonia originals van solucionar aquest problema amb els coneguts *cancel·ladors d'eco*, que feien la seva funció també en els mòdems analògics de transmissió de dades.

Figura 11. Esquema d'un cancel·lador d'eco analògic



Aquest problema va quedar aparentment resolt amb l'aparició dels sistemes de telefonia digitals, però l'era de la informàtica i l'aparició de sistemes de videoconferència ha fet reaparèixer aquesta problemàtica fins i tot en sistemes digitals. Això fa que els sistemes de videoconferència actuals com poden ser l'Skype o el Google Talk, es puguin enfrontar a problemes d'eco en la comunicació si no s'utilitzen auriculars, un problema que es podria minimitzar fàcilment amb la inclusió d'algorismes de cancel·lació d'eco. De fet, hi ha productes comercials per a evitar aquest problema en conferències amb mans lliures via Bluetooth en vehicles o en sales de videoconferència.

A la figura 12 es pot observar que en tenir una conversa amb les mans lliures, els altaveus emeten un senyal que el micròfon tornarà a capturar. Si volem evitar que aquesta informació retorni cap a l'altre extrem, hem de procedir a cancel·lar-lo.

Figura 12. Esquema d'un cancel·lador d'eco en un sistema de videoconferència

