

Aplicaciones de filtrado adaptativo

José Antonio Morán Moreno
Joan Claudi Socoró Carrié

PID_00211308



Los textos e imágenes publicados en esta obra están sujetos –excepto que se indique lo contrario– a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 España de Creative Commons. Podéis copiarlos, distribuirlos y transmitirlos públicamente siempre que citéis el autor y la fuente (FUOC. Fundació per la Universitat Oberta de Catalunya), no hagáis de ellos un uso comercial y ni obra derivada. La licencia completa se puede consultar en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.es>

Índice

Introducción.....	5
1. Identificación de sistemas.....	7
2. Ecualización de canal.....	11
3. Predicción lineal.....	13
4. Cancelación de ruido.....	16
5. Canceladores de ECO.....	18

Introducción

En este último módulo de la asignatura se pretende presentar diferentes aplicaciones de filtrado adaptativo en aplicaciones de procesamiento de señal. El objetivo no será entrar en el detalle de la programación de los algoritmos, sino conocer ámbitos de aplicación donde el procesamiento adaptativo de señal se aplica de forma habitual en el ámbito de las aplicaciones de telecomunicación.

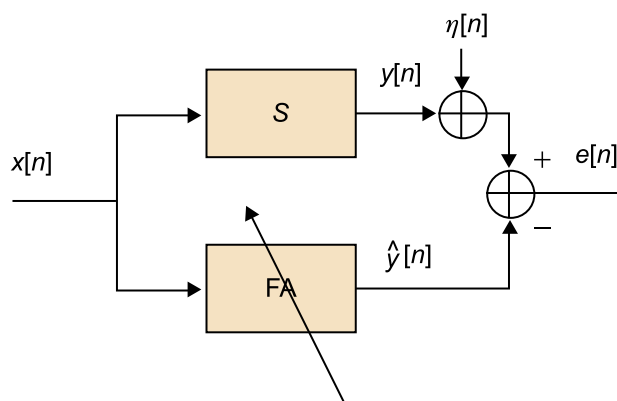
1. Identificación de sistemas

El uso de los sistemas lineales y no lineales es un aspecto fundamental en el campo de la ingeniería. Cuando se pretende diseñar un algoritmo de procesamiento de señal o un controlador electrónico de un determinado sistema, debemos disponer de una modelización del mismo a fin de poderlo tratar de forma matemática.

En la ingeniería de control o en el campo del procesamiento de señal se utiliza la identificación de sistemas con el objetivo de crear modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de valores observados del sistema en funcionamiento. El objetivo es obtener un modelo matemático que sea capaz de reproducir con suficiente exactitud y precisión, para los fines deseados, las características dinámicas del proceso o sistema objetivo.

Existen diferentes técnicas para realizar la identificación de sistemas, y para ello se pueden utilizar tanto técnicas lineales como no lineales. En lo que se refiere a esta asignatura, veremos cómo podemos utilizar las técnicas de procesamiento adaptativo a fin de identificar sistemas.

Figura 1. Esquema de un sistema de identificación de sistemas basado en filtros adaptativos



Tal y como se observa en la figura 1, podemos imaginar que disponemos de un sistema S del cual desconocemos su funcionamiento. El sistema S puede ser un sistema físico, como el canal de transmisión de un sistema de comunicaciones a una banda de frecuencias concreta, un motor de lavadora, el dispositivo óptico de una cámara fotográfica, el comportamiento acústico de una sala o cualquier elemento que se nos pueda ocurrir en una aplicación de procesamiento de señal.

A fin de obtener un modelo suficientemente completo del sistema, será importante realizar su caracterización mediante un conjunto de señales de entrada lo bastante global que garantice disponer de un modelo por entero.

Ejemplo

Imaginemos el caso, por ejemplo, del modelado de un sistema de comunicaciones. Evidentemente, en el caso del espectro radioeléctrico será imposible obtener un modelo lineal que represente el sistema en todo el margen de frecuencias disponibles, dado que el comportamiento de la atmósfera a diferentes frecuencias es variante en frecuencia y en el tiempo. Para proceder a la estimación deberemos acotar el escenario a aquellas frecuencias concretas en las que se desee realizar el procesamiento de señal y nutrir al sistema de entrenamiento con un set de señales de entrenamiento completo que nos permita caracterizar completamente el subespacio de señal en el que se pretende trabajar.

Ejemplo

A modo de ejemplo, imaginemos el modelado de una sala acústica para una aplicación de audio. Como es bien conocido por todos, la banda frecuencial de señales audibles por los humanos se encuentra entre los 20 Hz y los 18-20 KHz debido a la respuesta fisiológica del oído. En el momento de desarrollar la identificación del sistema, debemos pensar en dos aspectos fundamentales que determinarán la complejidad del mismo cuando se trata de filtros FIR. El primero de ellos será el orden óptimo del filtro, y el segundo, las características de las señales de entrenamiento.

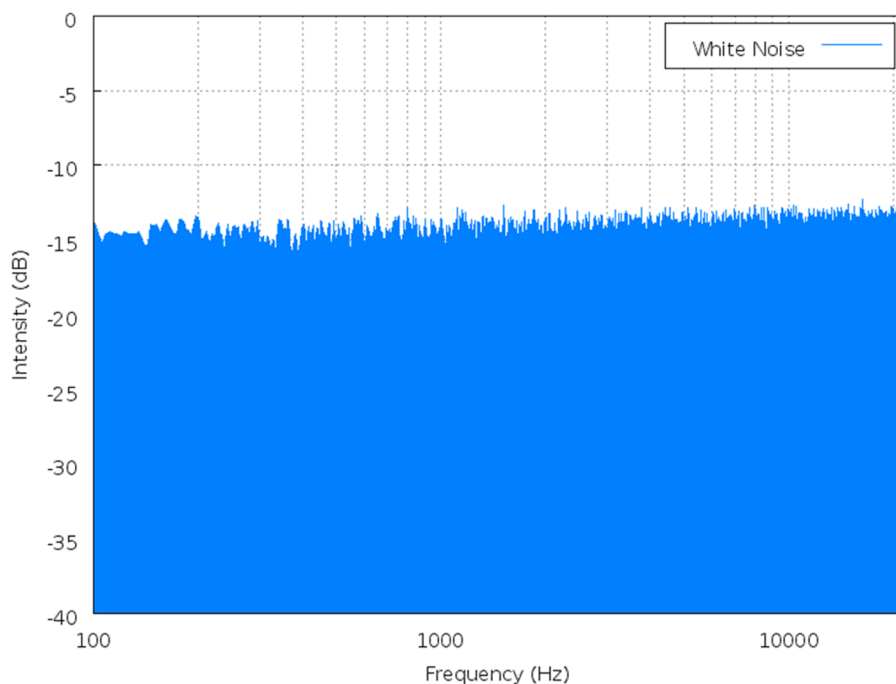
¿Será necesario identificar todo el espectro de frecuencias? ¿El orden del filtro dependerá del margen de frecuencias a identificar? ¿Qué señales deberemos utilizar como señales de entrenamiento? Como se puede observar, el planteamiento de estas cuestiones iniciales será fundamental para el diseño de la aplicación. Si se trata de señales de audio para conversaciones normales, será suficiente con caracterizar el canal para la banda de frecuencias 20 Hz - 3.400 Hz y se podría realizar con un filtro de longitud más corta; en cambio, si lo que pretendemos es una caracterización para un mayor margen de frecuencias, es posible que se necesite incrementar la longitud del filtro al poder existir mayor número de rebotes en la sala para las altas frecuencias, especialmente si nos encontramos en auditorios de grandes dimensiones.

Supongamos que nos encontramos en una aplicación de voz donde las frecuencias estarán entre 20 Hz y 3.400 Hz aproximadamente. **¿Qué tipo de señal de entrada utilizaremos para realizar el entrenamiento?** Si nos lo miramos desde el punto de vista frecuencial y si queremos tener una caracterización completa, necesitaríamos utilizar una señal con contenido frecuencial en toda la banda de frecuencia útil. El primer tipo de señal en el que podríamos pensar es en una función delta de Dirac. Desde un punto de vista matemático, se trata de una función que tiene un espectro plano, con lo que la podríamos utilizar en cualquier tipo de problema de identificación de sistemas. El principal problema es cómo generar físicamente una delta acústica. Como podemos imaginar esto no es posible y tendremos que recurrir a otras alternativas de señales que comúnmente se utilizan en identificación de sistemas, como son el ruido blanco gaussiano o el ruido coloreado.

Lo importante de estas señales en su función de entrenamiento del sistema es que poseen densidad espectral de energía en todas las frecuencias. Espectralmente puede haber variaciones, pero todas las frecuencias de entrada se excitan permitiendo al sistema adaptativo identificar el comportamiento para todas las frecuencias útiles de la aplicación. El problema podría surgir en el caso de utilizar señales de entrenamiento que no tuviesen energía en alguna banda frecuencial, dado que entonces el sistema no sería capaz de identificar las características en aquella banda concreta.

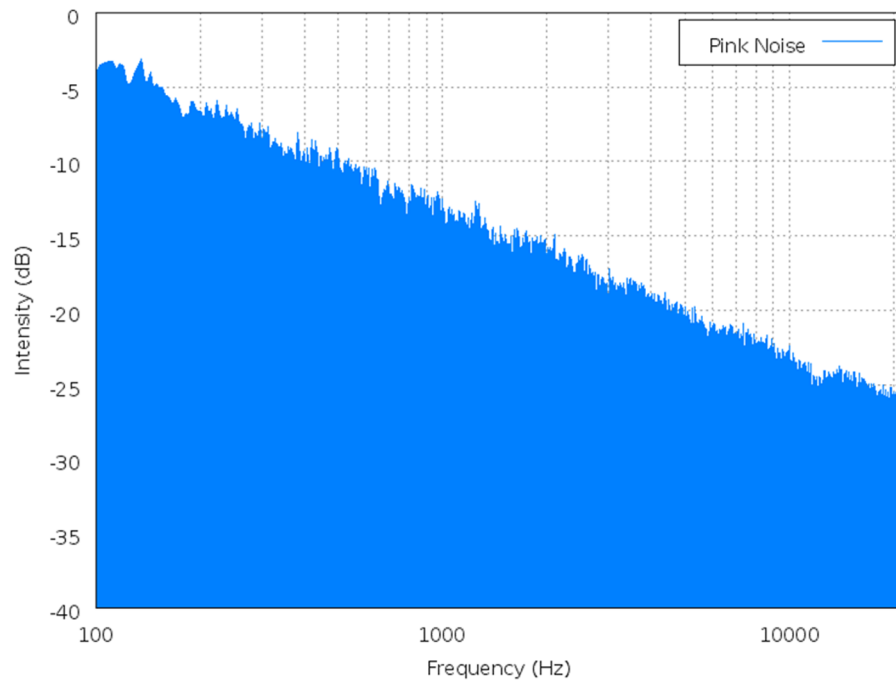
Las características del ruido blanco o coloreado son también excepcionales para garantizar una rápida velocidad de convergencia del algoritmo adaptativo. Recordemos que lo mejor que puede pasar para tener una convergencia rápida en los filtros adaptativos, y especialmente en el estimador LMS (*linear mean square*), es tener una señal de entrada decorrelada. El ruido blanco presenta una función de correlación delta y el ruido coloreado también presenta buenas características de decorrelación entre muestras. Esto permite que los algoritmos puedan converger rápidamente, incluso si se utiliza el algoritmo LMS.

Figura 2. Densidad espectral de potencia del ruido blanco



Fuente: Wikipedia

Figura 3. Densidad espectral de potencia un ruido rosa



Fuente: Wikipedia

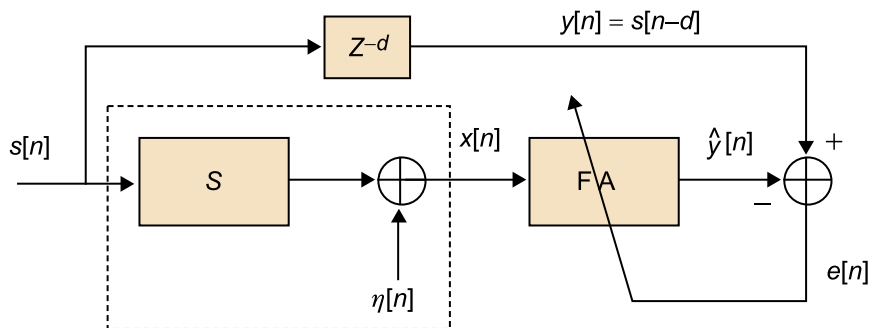
Finalmente nos podríamos cuestionar sobre qué algoritmo adaptativo utilizar. **¿Podemos utilizar el LMS y aprovechar su bajo coste computacional?, o debemos recurrir a versiones computacionalmente más costosas como el RLS?** Como viene siendo común a lo largo de la asignatura, la respuesta es: ¡depende!. Si estamos en el ejemplo de identificación de un canal acústico donde podemos utilizar el tiempo que necesitemos, podemos optar directamente por un LMS y alargar el entrenamiento el tiempo necesario, dado que tan solo tendremos que realizarlo una ocasión. Imaginemos en cambio otro escenario, como por ejemplo un cancelador de eco en un canal altamente variante, en este caso el entrenamiento tendrá que irse realizando de forma recurrente a lo largo del tiempo y será necesaria una convergencia rápida a fin de no perder eficiencia del canal. En ese caso sí que convendría recurrir a versiones más avanzadas para garantizar una convergencia rápida.

2. Ecualización de canal

El canal de comunicación es el principal elemento distorsionador en un sistema de telecomunicaciones. Desde el punto de vista del diseñador, buscamos aplicaciones donde el canal tenga un comportamiento neutro, es decir, que provoque la mínima distorsión sobre la señal enviada. No obstante, todos sabemos que en el mejor de los casos el canal provocará una distorsión de la señal de entrada y agregará una interferencia en forma de ruido. Esto lo podremos solucionar con un filtro en el receptor que realice una aproximación al filtro inverso del canal, de forma que reconstruya de la mejor forma posible la señal enviada.

Cuando trabajamos en aplicaciones avanzadas y en entornos más agresivos, como puede ser la telefonía móvil o aplicaciones en canales altamente variantes, la principal problemática ya no solo es la distorsión que produce el canal, sino la variabilidad del mismo a lo largo del tiempo. Ante esas situaciones el receptor no tiene más remedio que ir estimando a intervalos de tiempo el nuevo comportamiento del canal y corregir la señal recibida mediante un ecualizador.

Figura 4

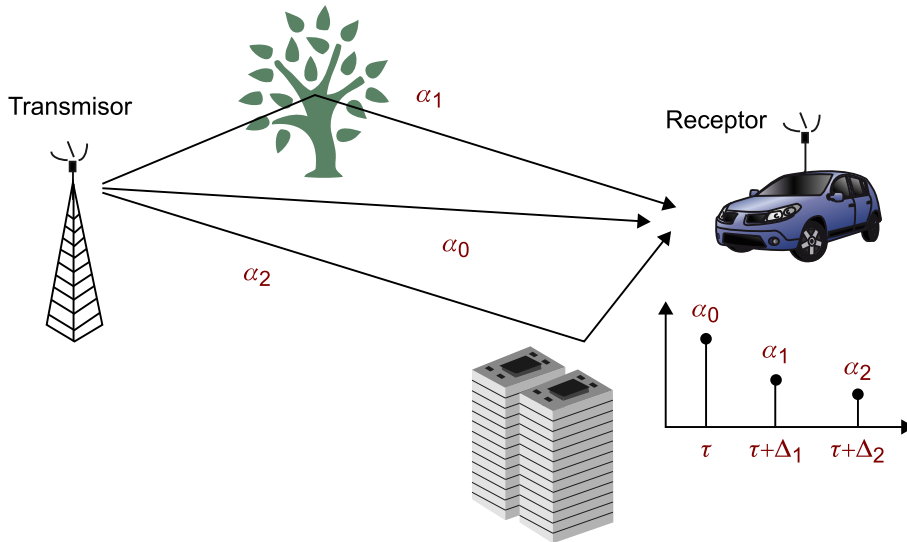


Debe existir un protocolo de comunicación que identifique unas ventanas de trabajo. Dicho protocolo tiene una ventana de tiempo para la transmisión de información útil y una ventana de tiempo pequeña para la estimación de canal y adaptación del ecualizador. En esta aplicación concreta, cuanto mayor sea el tiempo que utilicemos para corregir el canal, mayor será la pérdida de eficiencia en la transmisión. Teniendo en cuenta que el canal es un recurso escaso, el sistema se tendrá que diseñar de forma que el tiempo dedicado a la ecualización sea el mínimo posible.

¿Cada cuánto tiempo será necesario realizar una fase de *training* del algoritmo adaptativo? Esta pregunta dependerá del canal y de su caracterización estadística. En general en el modelado estadístico de canales se habla del tiempo de coherencia como aquel periodo de tiempo durante el cual el canal tiene un comportamiento más o menos estable. En canales móviles, esta va-

riabilidad está relacionada con el multitrayecto y con el efecto Doppler debido a los movimientos del emisor y el receptor. Una vez conocido ese parámetro, deberemos establecer un periodo de entrenamiento del algoritmo no muy superior al tiempo de coherencia a fin de poder realizar un seguimiento de las variaciones del canal.

Figura 5. Multitrayecto y Doppler en comunicaciones móviles



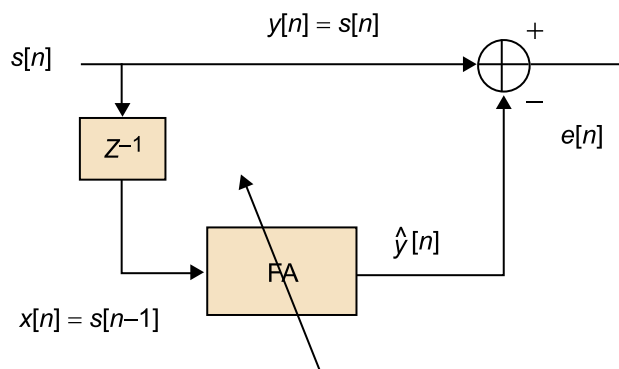
En la figura 5 se puede observar que la señal recibida en el vehículo llega por tres caminos diferentes con retardos variantes en el tiempo a medida que el vehículo se desplaza. El sistema entonces deberá utilizar una ventana de entrenamiento donde transmitirá una secuencia conocida o de *training* a fin de que el sistema adaptativo pueda realizar la ecualización del canal. Después de este entrenamiento, el sistema irá realizando pequeños ajustes utilizando el error de decodificación para hacer un *tracking* de las pequeñas variaciones del canal. Pasado el tiempo de coherencia, deberá realizarse otra fase de *training* para realizar los ajustes a las variaciones más severas que haya podido experimentar el canal. En este caso, dado que necesitamos que el sistema realice la adaptación en el menor tiempo posible, resulta fundamental utilizar un algoritmo de convergencia rápida como bien pudiese ser uno basado en la estructura de Gram-Schmidt o un RLS.

3. Predicción lineal

La predicción lineal ha sido una de las aplicaciones más interesantes en el campo del procesamiento de señal, especialmente aplicada a los modelos de comportamiento y su evolución futura. Todos imaginamos lo que supondría poder realizar una predicción de los valores de la bolsa. Lamentablemente para nosotros, estos valores no corresponden a un modelo lineal, con lo que las predicciones basadas en este tipo de modelos suelen estar llenas de errores.

No obstante, existen campos de aplicación en el ámbito del procesamiento de señal donde los algoritmos de predicción de señales tienen una gran utilidad, como por ejemplo en las técnicas de compresión y codificación de voz.

Figura 6. Esquema de un predictor lineal

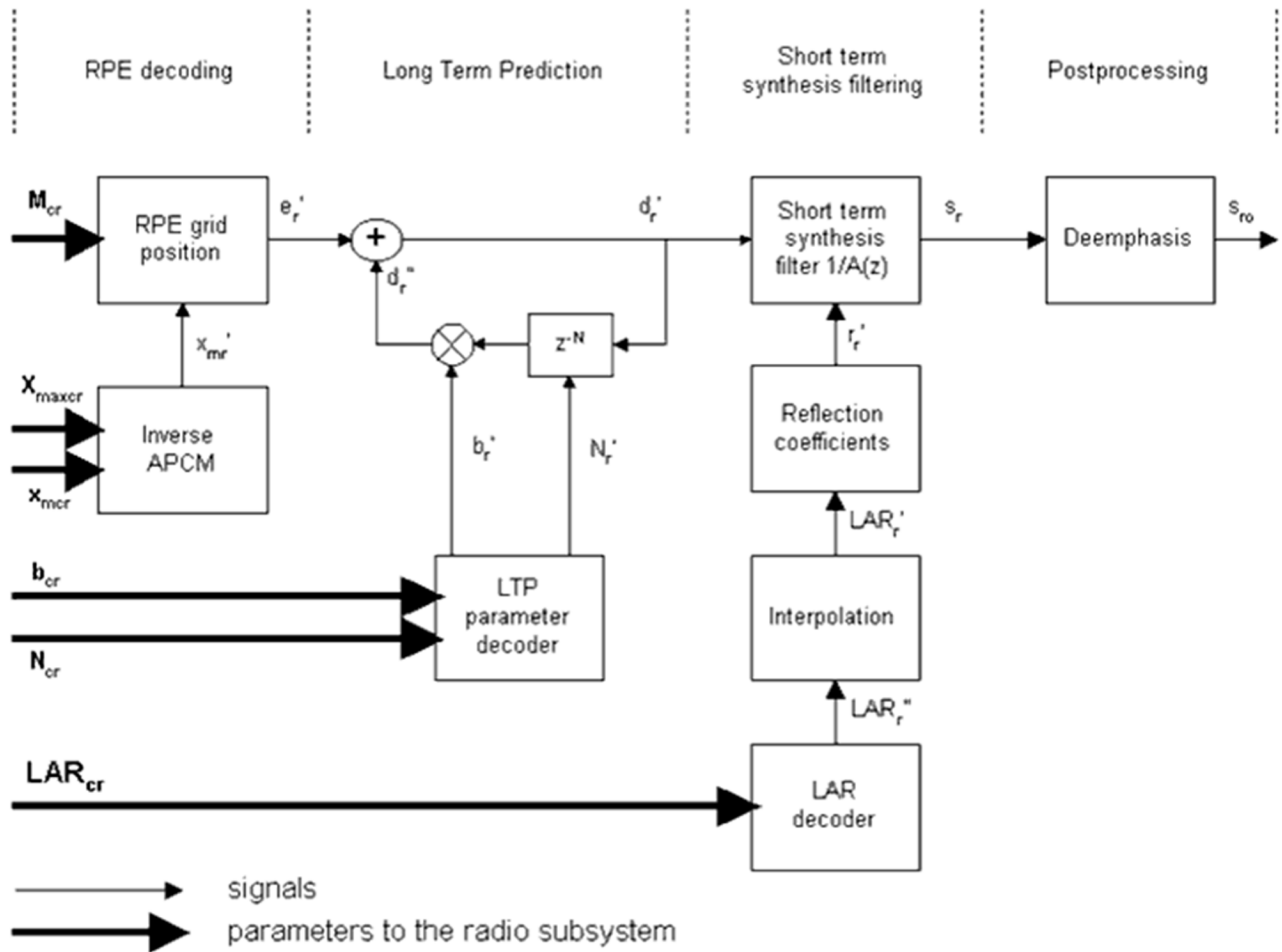


Si pensamos en un sistema de comunicación de voz masivo como pueden ser las comunicaciones móviles y trabajando con señales de voz en calidad audio, siguiendo el criterio de Nyquist tendríamos que muestrear a 8.000 Hz y con una resolución de 8 bits/muestra tendríamos un canal básico de voz de 64 Kbit/s. El sistema GSM utiliza un algoritmo de codificación de voz basado en un sistema predictivo lineal excitado que consigue reducir las necesidades de transmisión a 13 Kbit/s.

Haciendo un simple cálculo proporcional vemos que hemos conseguido multiplicar casi por 5 la capacidad del canal tan solo por el simple hecho de codificar apropiadamente la señal a transmitir, y en un sistema de gran escala podemos imaginar el gran impacto de este factor sobre la capacidad total del sistema.

La figura 7 muestra la estructura del codificador de voz GSM. No es el objetivo del curso comprender la totalidad del esquema dado que esto queda fuera del contenido del mismo, pero sí podemos apreciar cómo el núcleo de este sistema de codificación se basa en un predictor LPC.

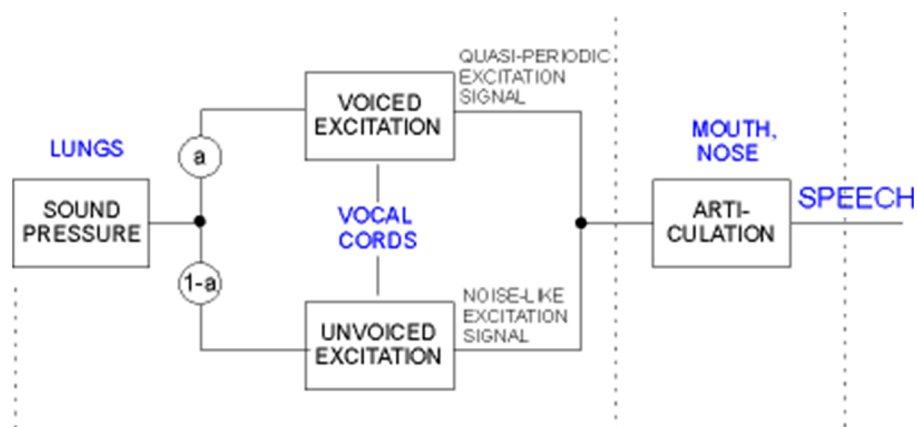
Figura 7. Esquema del codificador GSM RPE-LTP



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

El esquema se fundamenta en las características de la señal de voz y el modelado del tracto vocal.

Figura 8. Modelo matemático de la generación de voz



Fuente: http://www2.spsc.tugraz.at/add_material/courses/scl/vocoder

La figura 8 nos muestra que nuestro sistema de producción de voz admite un modelado sencillo desde el punto de vista acústico. Fundamentalmente tenemos dos tipos de sonidos, unos que corresponden a una excitación con

una señal casi periódica y otros que corresponden a una excitación similar al ruido blanco. Esta excitación pasa por el tracto vocal produciendo finalmente los sonidos que nosotros escuchamos.

Este y otros sistemas de codificación de voz basados en predicción lineal parten de la base de que el tracto vocal puede modelarse mediante un filtro IIR con la siguiente función de transferencia $H(z)$:

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

Como observamos, si el tracto vocal corresponde a este modelo, su sistema inverso corresponde a un filtro FIR y la determinación de los coeficientes de predicción del filtro pueden servir para realizar una codificación eficiente de la señal.

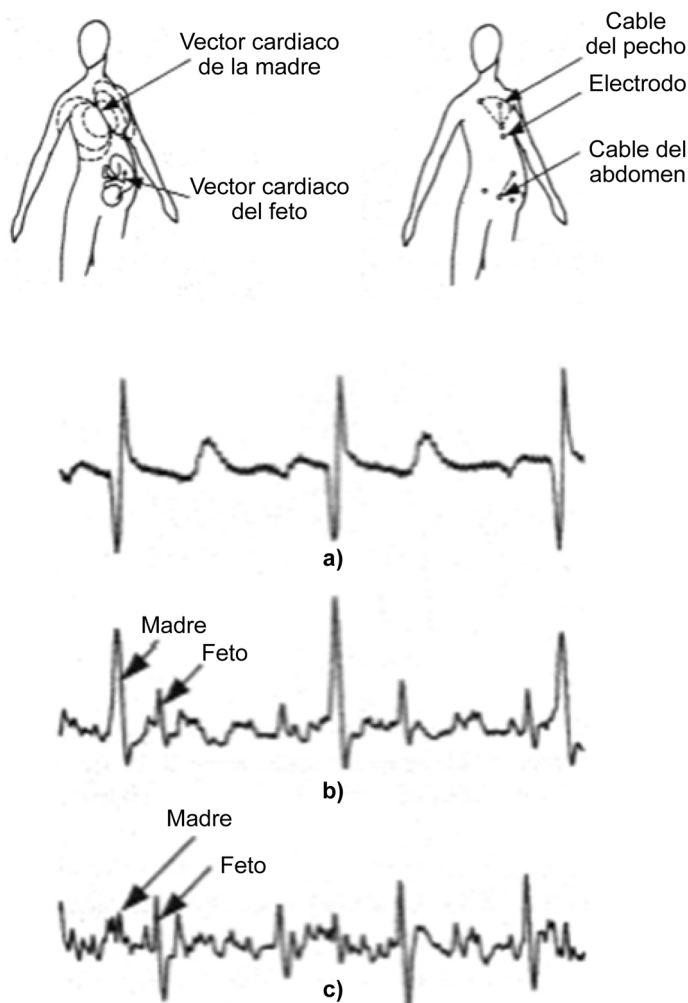
Vemos pues cómo el uso de filtros de predicción lineal pueden ser muy útiles en el diseño de sistemas de codificación de voz basados en modelos predictivos, aplicándose tanto a técnicas de compresión como a técnicas de síntesis artificial de voz.

4. Cancelación de ruido

Otra de las aplicaciones de procesamiento de señal con resultado más espectaculares en aplicaciones biomédicas son las técnicas de cancelación de ruido, especialmente cuando tenemos que procesar señales contaminadas por otras de mayor magnitud.

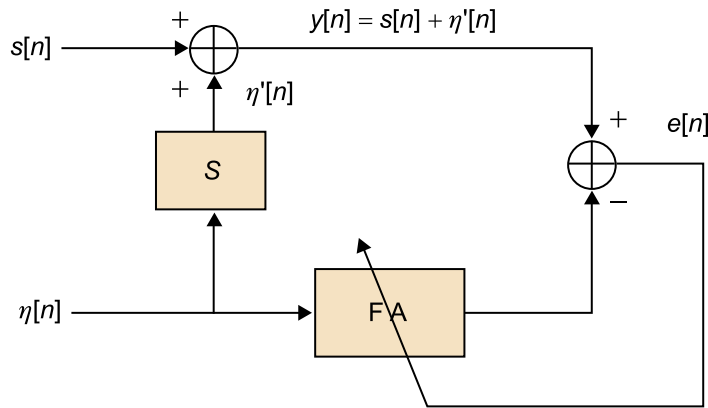
En anteriores módulos se puso como ejemplo la cancelación de ruido en la cabina de un helicóptero, pero en este caso nos centraremos en aplicaciones en el campo de la medicina, como por ejemplo el electrocardiograma de un feto que se ve interferido por los impulsos cardíacos de la madre que son de mucha mayor intensidad o por los efectos de la red eléctrica. En estos casos será necesario eliminar de la señal medida la señal interferente, a fin de obtener una señal de calidad en ámbitos tan importantes como las aplicaciones biomédicas.

Figura 9. Ejemplo de un sistema de medición de un electrocardiograma de un feto



En el ejemplo se puede observar cómo para realizar esta aplicación será necesario disponer de dos sistemas de medida, un sensor en la zona del feto y un sensor en la zona cardíaca de la madre. La mayor intensidad del impulso eléctrico cardíaco de la madre hace que el sensor de medición del feto se vea interferido por una señal de mayor intensidad.

Figura 10. Esquema propuesto para la aplicación



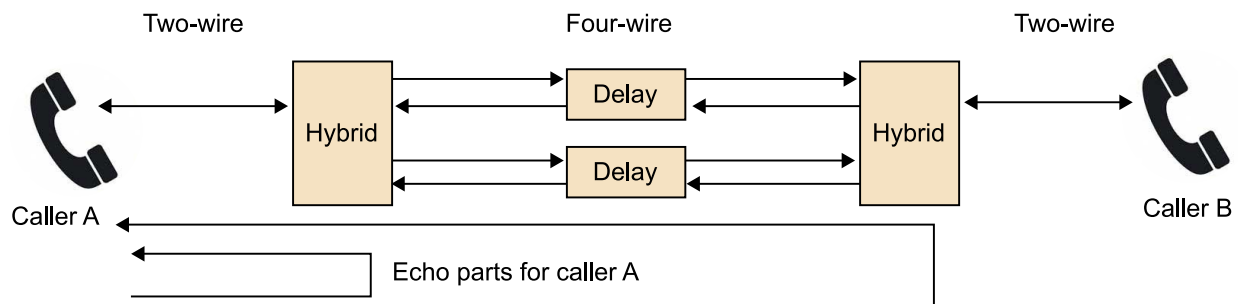
En el esquema propuesto para esta aplicación se observa que la señal $y[n]$ sería la medición en la zona abdominal donde se encuentra el feto, y $\eta[n]$ será la medición de la zona cardíaca de la madre. La señal $y[n]$ está compuesta por dos componentes, la parte de señal correspondiente al feto $s[n]$ más la interferencia producida por la madre, que será la señal origen transformada por el sistema S que representa la variación que experimentará la señal para llegar desde el corazón a la zona de medición abdominal.

El objetivo del sistema será realizar la cancelación de la señal interferente, que en este caso corresponde a la señal materna para poder dejar una señal de error que corresponda únicamente a la señal del electrocardiograma del bebé. El hándicap principal de esta aplicación es el hecho de que la potencia de la señal interferente en este caso es muy superior a la de la señal deseada, tal y como hemos podido ver en la figura 9. Por otra parte, al compartir ambas señales la misma banda frecuencial, no resulta posible realizar un filtrado clásico y tenemos que recurrir a un filtrado estadístico. Dado que las señales van variando con el tiempo, tendremos que recurrir a versiones adaptativas para poder obtener los resultados deseados.

5. Canceladores de ECO

Los sistemas de cancelación de ECO surgieron inicialmente en aplicaciones telefónicas cuando la señal enviada se reflejaba en el transformador y volvía hacia el emisor. Este problema de doble bucle hacía incómoda la comunicación, especialmente cuando estábamos en comunicaciones de larga distancia donde el retraso podía ser claramente apreciable en el receptor. Los sistemas de telefonía originales solucionaron este problema con los conocidos canceladores de ECO que realizaban su función también en los módems analógicos de transmisión de datos.

Figura 11. Esquema de un cancelador de ECO analógico



Este problema quedó aparentemente resuelto con la aparición de los sistemas de telefonía digitales, pero la era de la informática y la aparición de sistemas de videoconferencia han hecho reaparecer esta problemática incluso en sistemas digitales. Esto hace que los sistemas de videoconferencia actuales, como pueden ser Skype o Google Talk, puedan enfrentarse a problemas de eco en la comunicación si no se utilizan auriculares, un problema que se podría minimizar fácilmente con la inclusión de algoritmos de cancelación de eco. De hecho existen productos comerciales para evitar este problema en conferencias: manos libres para cuando se realizan conferencias bluetooth en vehículos o en salas de videoconferencia.

En la figura 12 se puede observar que al tener una conversación en modo de manos libres, los altavoces emiten una señal que volverá a ser capturada por el micrófono. Si queremos evitar que esa información retorne hacia el otro extremo, debemos proceder a realizar su cancelación.

Figura 12. Esquema de un cancelador de ECO en un sistema de videoconferencia

