

3.3 FILTRO ADAPTIVO

3.3.1 Descripción del problema.

Sin duda la principal aplicación de la red Adaline está en el campo del procesamiento de señales, en concreto para el diseño y realización de filtros que eliminen el ruido de señales portadoras de información. Como filtro adaptivo se ha utilizado esta red en numerosas aplicaciones, destacándose su uso en filtros de ecualización adaptivos en modems de alta velocidad y canceladores adaptivos del eco para filtrado de señales en comunicaciones telefónicas de larga distancia y comunicaciones vía satélite. Una de las primeras aplicaciones de redes neuronales que tuvo éxito en la industria fue el Adaline para la eliminación de ecos en circuitos telefónicos.

Por otro lado, los filtros adaptivos se pueden usar para predecir el valor futuro de una señal a partir de su valor actual basándose en un aprendizaje en el que se emplea como entrada el valor retardado de la señal actual y como salida esperada, el valor actual de la señal, el filtro intentará minimizar el error entre su salida y la señal anterior. Una vez el filtro predice correctamente la señal actual, basándose en la señal anterior, se puede utilizar directamente la actual como entrada sin el retardo, el filtro realizará una predicción del valor futuro de la señal.

Otro ejemplo es el filtro adaptivo utilizado para modelar las respuestas de un sistema basándose en las señales de entrada, en este caso las entradas al filtro



son las mismas que las del sistema, ajustando los pesos durante el aprendizaje en función de la diferencia entre su salida y la del sistema, éste será el modelo de filtro adaptivo utilizado en esta aplicación.

Existen sistemas en los cuales es posible determinar la fuente de ruido, por ejemplo cuando son los mismos elementos de medición los que introducen señales de ruido a la señal original; este ruido es ocasionado por los niveles de voltaje y de frecuencia del sistema alimentador de los aparatos, el cual es imprescindible en el proceso.

En la presente aplicación, una señal de ruido ha sido introducida por los cables de conexión de los aparatos y se ha mezclado con la señal que se desea medir, lo que en este caso es crítico, ya que no se conoce la forma exacta de la señal de interés y por tanto no es posible determinar cuál debe ser la señal correcta de salida.

Aprovechando que la fuente de ruido ha sido completamente determinada, se utilizará este conocimiento para implementar un procedimiento de filtrado que por medio de un filtro adaptivo permita recuperar la señal original.

La figura 3.3.1, es un esquema de la disposición que se dará al filtro dentro del contexto general que se ha dispuesto para solucionar el problema. Las variables son:



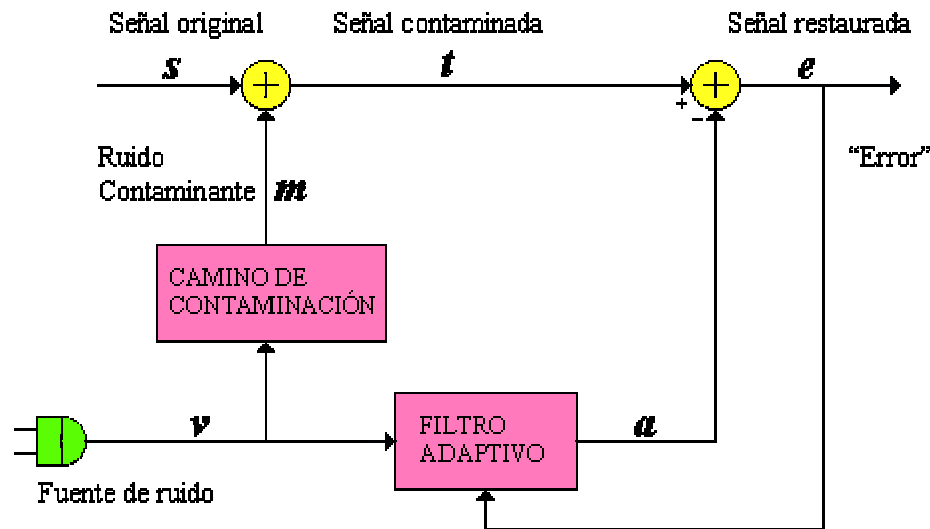


Figura 3.3.1 Diagrama de Bloques de un filtro adaptivo

- s : Señal de interés, es decir es la señal que se desea medir, aunque se conoce su naturaleza, su forma es indeterminada.
- v : Fuente de poder de los instrumentos de medida, por sus características de potencia y frecuencia es una fuente de ruido.
- m : La señal v , es indispensable en el proceso de medición ya que sin ella los aparatos de medida no funcionarían; v es la fuente detectada de ruido, pero su contribución se limita a la parte inducida en los cables de conexión, que se convierten en el camino de contaminación; de esta forma la señal m es la fuente de ruido que afecta realmente la señal original s .
- t : Señal resultante de la suma de la señal de interés s y de m que es el porcentaje efectivo de ruido que afecta la medición.
- a : Salida del filtro.



e : Diferencia entre la señal contaminada t y la señal que entrega el filtro adaptivo, si el filtro realiza un buen trabajo, esta señal debe ser la señal restaurada sin ruido. Durante el proceso de aprendizaje la señal e servirá como referencia para determinar el desempeño del filtro.

La señal v es una señal por lo general de 60Hz, que en este caso alimenta el filtro adaptivo, los parámetros del filtro deben ajustarse para minimizar la señal de error e , de esta forma y de acuerdo con el esquema de la figura 3.3.1 podría pensarse que la salida esperada del filtro a es la señal contaminada t , pero debe recordarse que la única fuente efectiva de ruido es la señal m por lo tanto, lo que realmente se espera del filtro es que reproduzca sólo la parte de t que afecta la medición ($t = s+m$), o sea m . Por consiguiente la salida del filtro a debe ser cada vez más cercana a m para que la señal de error e , se aproxime a la señal no contaminada s .

La entrada al filtro es el valor de la fuente de ruido, que en este caso se asumirá como una señal senoidal uniformemente distribuida entre -0.2 y 0.2 para conservarla dentro de límites observables; la frecuencia de la onda es de 60 Hz, y la frecuencia de muestreo es de 180 Hz.

$$v(k) = 1.2 \sin \left[\frac{2\pi k}{3} \right] \quad (3.3.1)$$



El estudio de los procesos de filtrado se ha basado en un análisis en el dominio de la frecuencia, determinado por las series de Fourier, así para un sistema de filtrado dado, una señal de entrada $f(t)$ que produce una salida $r(t)$ característica del sistema en el dominio del tiempo, se obtendrá un análogo en el dominio de la frecuencia tal que, $F(w)$ producirá una señal de salida $F(w)H(w)$.

En la figura 3.3.2, se observa como el sistema actúa como un filtro de las diferentes componentes de frecuencia. Para garantizar que el filtrado sea exitoso, el filtro debe atenuar igualmente todas las componentes de frecuencia, la respuesta debe ser una réplica de la señal de entrada no en magnitud, pero si en forma; en general puede haber un retraso de tiempo asociado con esta réplica, por lo tanto, se habrá filtrado exitosamente una señal $f(t)$, si la respuesta es $k * f(t - t_0)$; la respuesta es una réplica de la entrada con magnitud k veces la señal original y un retraso de t_0 segundos.

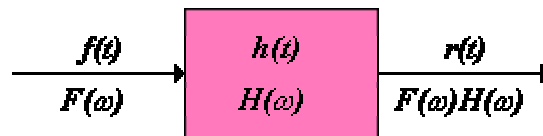


Figura 3.3.2 Representación de un sistema de filtrado en el dominio del tiempo y en el dominio frecuencial



Para el filtro adaptivo $v(t)$ es la señal de entrada al filtro y la respuesta debe ser $k * v(t - t_0)$ que en el dominio de la frecuencia, equivale a desfazar la función original 90° y multiplicarla por un factor k , el cual se escogió como $1/10$ para simplificar el proceso de visualización.

Como se indicó anteriormente, la salida del filtro debe ser la señal m para que al final del proceso pueda obtenerse la señal restaurada, por lo tanto la forma de la señal m será:

$$m(k) = 0.12 \sin \left[\frac{2\pi k}{3} + \frac{\pi}{2} \right] \quad (3.3.2)$$

Para tener una idea clara de la relación entre m y v , la figura 3.3.3 ilustra la proporción de la señal original de ruido y de la señal efectiva de ruido que afecta la medición.

En la gráfica de la parte superior de la figura 3.3.3, se ve como v es una señal senoidal de magnitud 1.2, mientras que la gráfica inferior muestra la señal m que alcanza solo la décima parte de v con una magnitud de 0.12 y desfasada 90° con respecto a la señal v , éstas dos ondas representan los patrones de entrenamiento de la red, siendo v la entrada y m la salida deseada.



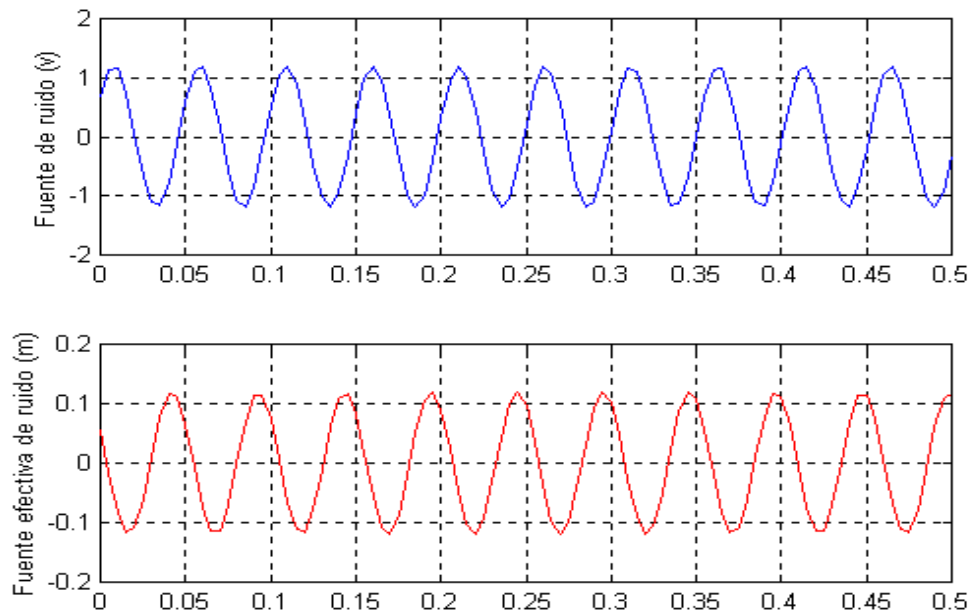


Figura 3.3.3 Señal original de ruido y señal que afecta el proceso de medición

3.3.2 Justificación del tipo de red.

Como puede notarse, la red Adaline tiene la estructura básica del Perceptrón, la diferencia es que su función de transferencia es del tipo lineal, pero por poseer una estructura similar presenta la misma limitación de la red tipo Perceptrón de poder resolver solo problemas linealmente separables.

A pesar de sus limitaciones innatas, la red Adaline es ampliamente usada en los procesos de filtrado combinándola con retardos en línea a su entrada, que mejoran la calidad del filtrado



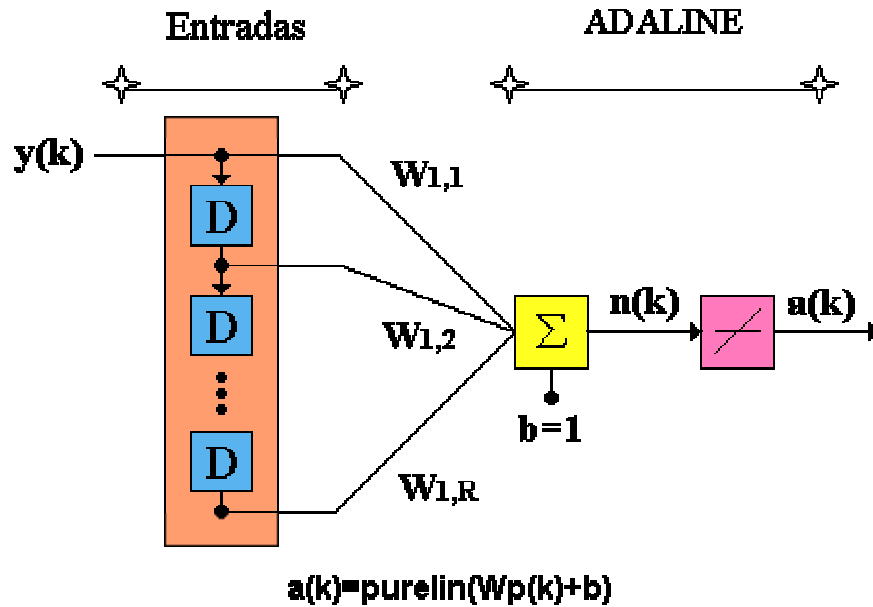


Figura 3.3.4 Estructura de un filtro adaptivo con una red Adaline

Cuando no es posible determinar la forma de onda de la señal original, ya que este es precisamente el propósito de la medición, un filtro adaptivo se hace bastante útil, pues como su nombre lo dice se adapta a cualquier forma de señal que se le presente, sobrepasando así las limitaciones de los filtros tradicionales.

3.3.3 Entrenamiento de la red.

El objetivo del algoritmo diseñado en Matlab es lograr obtener la señal m a la salida del filtro, minimizando el error medio cuadrático hasta reproducir una buena copia de la señal original s .

La red es creada con la función de las herramientas de redes neuronales *newlin*, que genera una nueva red tipo Adaline, a la cual se le han introducido cuatro



retardos, para conformar el filtro adaptivo que filtrará la señal de entrada. El valor de los retardos fue escogido por prueba y error, escogiendo aquel número que presentará un mejor rendimiento para la red.

```
net=newlin([-1,2],1);  
net.inputWeights{1,1}.delays=[0 1 2 3 4];
```

Los valores de los pesos iniciales y de las ganancias de la red son inicializados aleatoriamente, con ayuda de la función *rands*

```
net.IW{1,1}=rands(1,5);  
net.b{1}=[0];  
pi={1 2 3 4};
```

Los valores correspondientes a la entrada y a la salida de la red se obtuvieron evaluando la ecuación (3.3.1) para valores desde $\frac{2\pi}{3}$ hasta 4π . La red se entrenó para 5000 iteraciones, mediante las cuales el filtro logró una excelente aproximación de la función original.

```
net.adaptParam.passes=5000;  
[net,y,E,pf,af]=adapt(net,p,T,pi);
```

Para entrenar la red se generaron 101 puntos, algunos de los cuales pueden verse en la siguiente tabla:



	1	2	...	23	...	51	52	...	78	...	101
Entrada a la red (v)	0.6967	1.1345	....	1.1926	....	0.2119	0.8583	....	-1.1165	....	-0.3137
Valor esperado (m)	0.0561	-0.0159	....	-0.0653	....	0.0961	0.0365	....	0.0107	....	0.1176
Valor entregado (a)	-0.2592	-0.2379	....	-0.0385	....	0.0766	0.0293	....	0.0163	....	0.1098

W1=net.IW{1,1}

	I1	I2	I3	I4	I5
N1	-0.0405	-0.0127	-0.0319	-0.0389	-0.0097

b1=net.b{1}

N1	0.0032
----	--------

Mse 0.0022

Tabla 3.3.1 Resultados del proceso de entrenamiento

Para poder juzgar el trabajo realizado por el filtro, la figura 3.3.5 muestra la señal original y la señal restaurada, que permiten comprobar las bondades del filtro adaptivo.

En la figura 3.3.5 se observa como la señal e (verde) reproduce la señal original s (naranja) logrando una excelente aproximación, a partir de la cual puede retomarse el proceso de medición, pues en este punto cualquier tratamiento que se le haga a la señal de interés es altamente confiable, ya que ésta se encuentra libre de ruido.



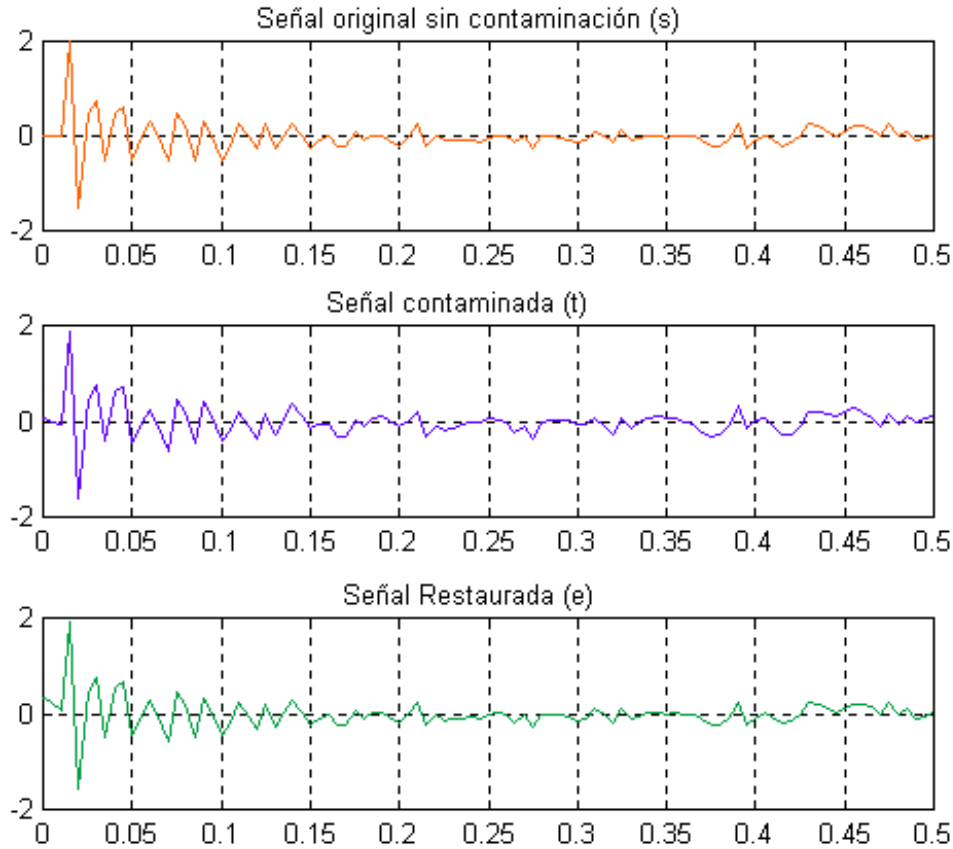


Figura 3.3.5 Señal recuperada por el filtro

Al final del proceso iterativo el máximo error entregado por la red equivale a $1.41e-07$, este es un valor bastante aceptable teniendo en cuenta que el error difícilmente será cero, puesto que el algoritmo LMS emplea un valor aproximado para el gradiente, que como se dijo en el capítulo 2 recibe el nombre de gradiente instantáneo, en lugar del valor real para realizar la actualización de los pesos; este valor del gradiente es una versión distorsionada del verdadero gradiente que ocasionará que los pesos sigan variando suavemente, a pesar de que el error medio cuadrático haya alcanzado el mínimo valor posible.



Es importante diferenciar entre el valor del error del filtro adaptivo, el cual mide su desempeño y corresponde al error medio cuadrático descrito anteriormente, y e la señal de error del sistema en general, con la cual se espera reproducir la señal original sin contaminación s , trabajo que depende a su vez del desempeño del filtro.

En esta red todos los parámetros están muy ligados, por ejemplo en el esquema general de la figura 3.3.1 se observa como la salida e (correspondiente a la diferencia entre a la salida del filtro y m la señal que se esperaba que este entregará para poder reproducir la señal original s a la salida del sistema), realimenta el filtro adaptivo convirtiéndose en un factor decisivo en el proceso de actualización de los pesos de la red, por otro lado la dimensión del vector de pesos tiene una influencia directa en el tiempo necesario de entrenamiento, por lo que generalmente se debe tomar un compromiso entre este aspecto y la aceptabilidad de la solución (normalmente se mejora el error aumentando el número de pesos).

El valor del parámetro α tiene una gran influencia sobre el entrenamiento. Si α es demasiado grande, es posible que la convergencia no se produzca debido a que se darán altos en torno al mínimo sin alcanzarlo. Si α es demasiado pequeño, se alcanzará convergencia pero a costa de una etapa de aprendizaje más larga.

