

Equalizzatori e Filtri

Massimiliano Salfi

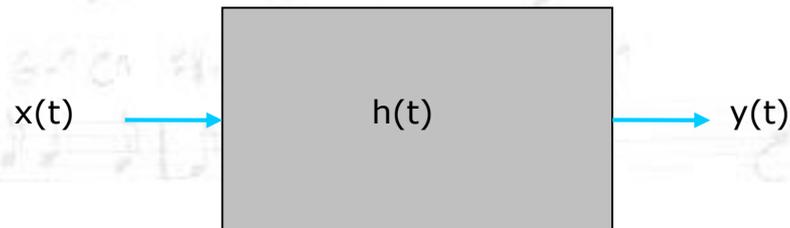
salfi@dmf.unict.it

Nozioni generali

- Quando un segnale elettrico rappresentante un'onda acustica (per esempio il segnale che esce da un microfono) entra in un circuito, viene manipolato e il suo contenuto di frequenze viene modificato.
- Per avere una chiara visione di questo fatto, dobbiamo pensare ai segnali sia nella loro rappresentazione in tempo che nella loro rappresentazione in frequenza.

Nozioni generali

- Sia $x(t)$ il nostro segnale che entra in un circuito elettrico e sia $y(t)$ il segnale che ne esce. In ogni istante di tempo il circuito interviene sul segnale in ingresso, secondo un comportamento che è tipico del circuito che stiamo considerando e che viene descritto da una funzione del tempo $h(t)$.

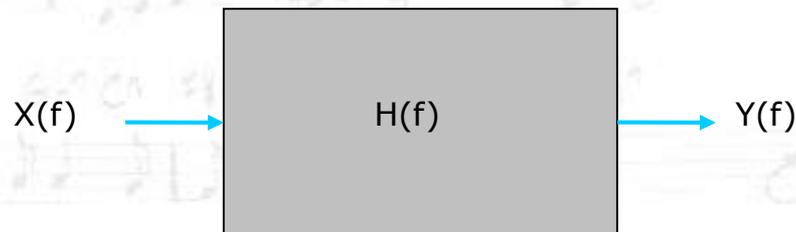


Nozioni generali

- Dati i segnali $x(t)$, $y(t)$ e la funzione $h(t)$ consideriamo il loro equivalente in frequenza $X(f)$, $Y(f)$, $H(f)$. Nel dominio della frequenza, vale l'equazione:

$$Y(f) = X(f) \cdot H(f)$$

Si noti che tale formula non vale nel dominio del tempo, dove le tre funzioni $x(t)$, $y(t)$ e $h(t)$ sono legate tra loro da una relazione più complessa.



La funzione $H(f)$ prende il nome di *funzione di trasferimento*, mentre la $h(t)$ *risposta impulsiva*.

Gli equalizzatori

- Un equalizzatore (detto anche PEAK EQ O PEAKING) è un circuito in grado di amplificare, o attenuare, un certa banda di frequenze, lasciando tutte le altre inalterate.
- La curva che descrive l'azione di un equalizzatore non è altro che un grafico, in un diagramma Ampiezza-Frequenza, che va moltiplicato per il segnale di ingresso al fine di ottenere il segnale di uscita.

Gli equalizzatori

Esempio 1

- Consideriamo il caso in cui $H(f) = 1$ lungo tutto lo spettro. In virtù della formula vista in precedenza, si avrà:

$$Y(f) = X(f)$$

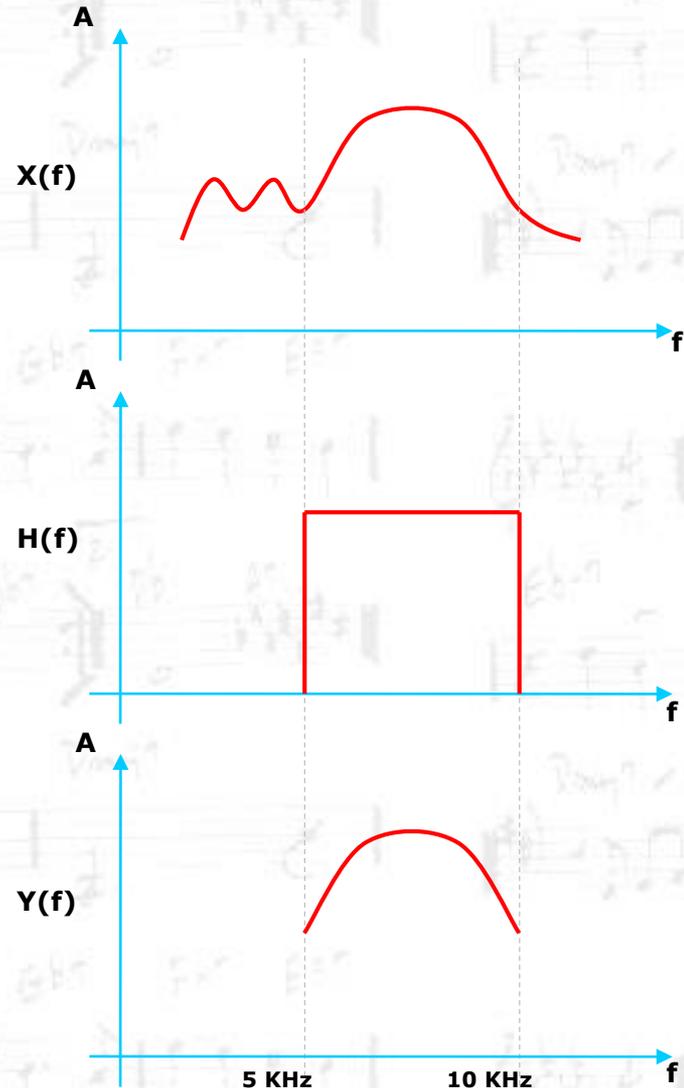
cioè il circuito non interviene sul segnale in ingresso.

Gli equalizzatori

Esempio 2

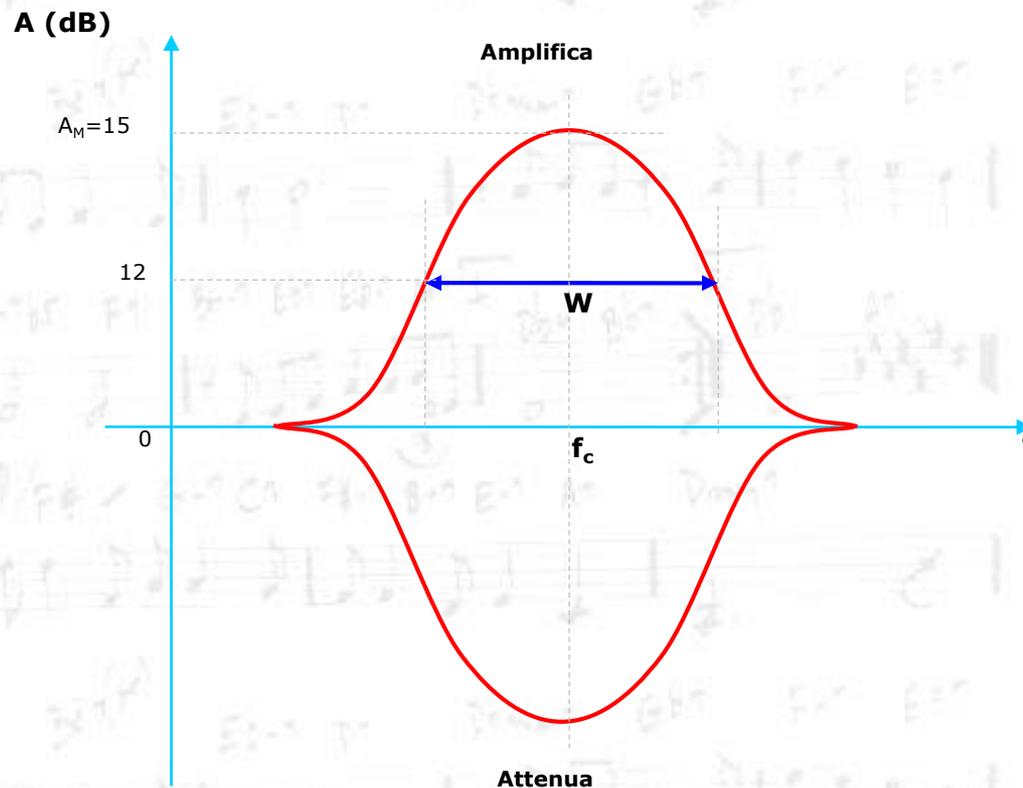
Consideriamo il caso in cui la $H(f)$ = 1 nell'intervallo [5KHz, 10KHz] e 0 altrove. Questo è un primo esempio di filtro passa-banda ideale.

Possiamo già vedere come una funzione di trasferimento di questo tipo, consenta di estrarre dal segnale in ingresso solo una determinata banda (nell'esempio compresa tra 5KHz e 10KHz) che in questo caso risulta essere la nostra banda di interesse.



Gli equalizzatori a campana

- Un equalizzatore a campana (detto anche Peak Bell EQ) ha per funzione di trasferimento la forma descritta nella seguente figura:



Gli equalizzatori a campana

Questo tipo di equalizzatore è dotato di 3 controlli:

- *Guadagno o Gain*
(attenuazione/amplificazione - cut/boost)
- *Frequenza centrale*
(center frequency)
- *Fattore di merito Q*
(Q factor)

Gli equalizzatori a campana

Guadagno o Gain

Agisce sull'ampiezza A_M della campana che può essere sia positiva (amplificazione) che negativa (attenuazione).

L'amplificazione massima è un parametro che dipende dalla qualità del circuito: arrivare a 15dB di guadagno senza introdurre distorsioni, implica l'uso di tecnologie sofisticate.

Generalmente troviamo questo tipo di EQ sui canali del mixer. Più il mixer è di fascia professionale, più i suoi peak EQ consentono guadagni elevati senza introdurre distorsioni. Nei mixer di fascia media, generalmente, i guadagni sono dell'ordine di 12dB (ricordiamo che tra 12 dB e 15dB c'è di mezzo un raddoppio del segnale in termini elettrici dunque c'è una notevole differenza).

Gli equalizzatori a campana

Frequenza centrale

È la frequenza alla quale si ha il guadagno massimo (o minimo) sulla campana.

Generalmente un potenziometro ne consente la variazione, permettendo di centrare la campana esattamente nella zona di frequenze che vogliamo manipolare.

Gli equalizzatori a campana

Fattore di merito Q

È un parametro che misura l'ampiezza della campana, cioè l'ampiezza della banda di frequenze che vengono amplificate (o attenuate). E' calcolato in base alla seguente formula:

$$Q = \frac{f_c}{w}$$

dove w è la larghezza relativa di banda, misurata a 3dB al di sotto del picco. Il fattore di merito Q è indipendente dalla zona di frequenze in cui lo si sta considerando.

Gli equalizzatori a campana

Vediamo questo fatto con un esempio numerico. Consideriamo una campana larga 40Hz intorno ai 100 Hz (tra 80Hz e 120Hz).

Ora, se ci spostiamo alle alte frequenze, per esempio a 10000 Hz, abbiamo che la nostra campana si estenderebbe tra i 9980 e i 10020Hz, cioè avremmo una campana strettissima.

Ricordiamo che le frequenze sono rappresentate in una scala logaritmica, soprattutto per dare una rappresentazione consona alla percezione dell'orecchio umano.

Dal momento che si utilizza una scala logaritmica per l'asse delle x (l'asse delle frequenze), mentre l'intervallo [80Hz, 120Hz] è piuttosto grande (qualche cm), l'intervallo [9980Hz, 10020Hz] è estremamente piccolo da disegnare (meno 1 mm).

Gli equalizzatori a campana

Dunque se fissassimo solo il valore della larghezza relativa di banda e con il controllo della frequenza centrale facessimo scorrere il filtro lungo tutto lo spettro di frequenza, osserveremmo nel grafico, in scala logaritmica, che la campana si restringe andando verso le alte frequenze e si allarga andando verso le basse.

Dato che vogliamo che una volta fissata, la larghezza di banda resti costante lungo tutto lo spettro, introduciamo nella formula la frequenza centrale come fattore di normalizzazione.

Questo, tra l'altro, in base a quanto visto sulla percezione dei suoni da parte del sistema orecchio/cervello, ci garantisce che l'equalizzatore agisca su di una banda di frequenza che è la stessa dal punto di vista percettivo.

Gli equalizzatori a campana

Vediamo, dunque, numericamente come vanno le cose in un equalizzatore parametrico, grazie all'introduzione del parametro Q il cui valore si mantiene costante.

Se $f_c=100\text{Hz}$ e $w=40\text{Hz}$, il che significa che la campana ha un'azione rilevante sulla banda $80\text{Hz}-120\text{Hz}$, avremo:

$$Q = \frac{100}{40} = 2.5$$

Se $f_c=10000\text{Hz}$ e $Q=2.5$, invece, avremo:

$$w = \frac{10000}{2.5} = 4000\text{Hz}$$

Questo dimostra come sia necessario che la w vari, se vogliamo che la campana mantenga una forma costante lungo lo spettro di frequenza, con fattore di merito Q costante.

Gli equalizzatori a scaffale

Un equalizzatore a scaffale (detto anche Shelving EQ) viene utilizzato per avere un controllo sugli estremi dello spettro delle frequenze udibili. E' dotato di 2 controlli standard:

Frequenza centrale (center frequency):

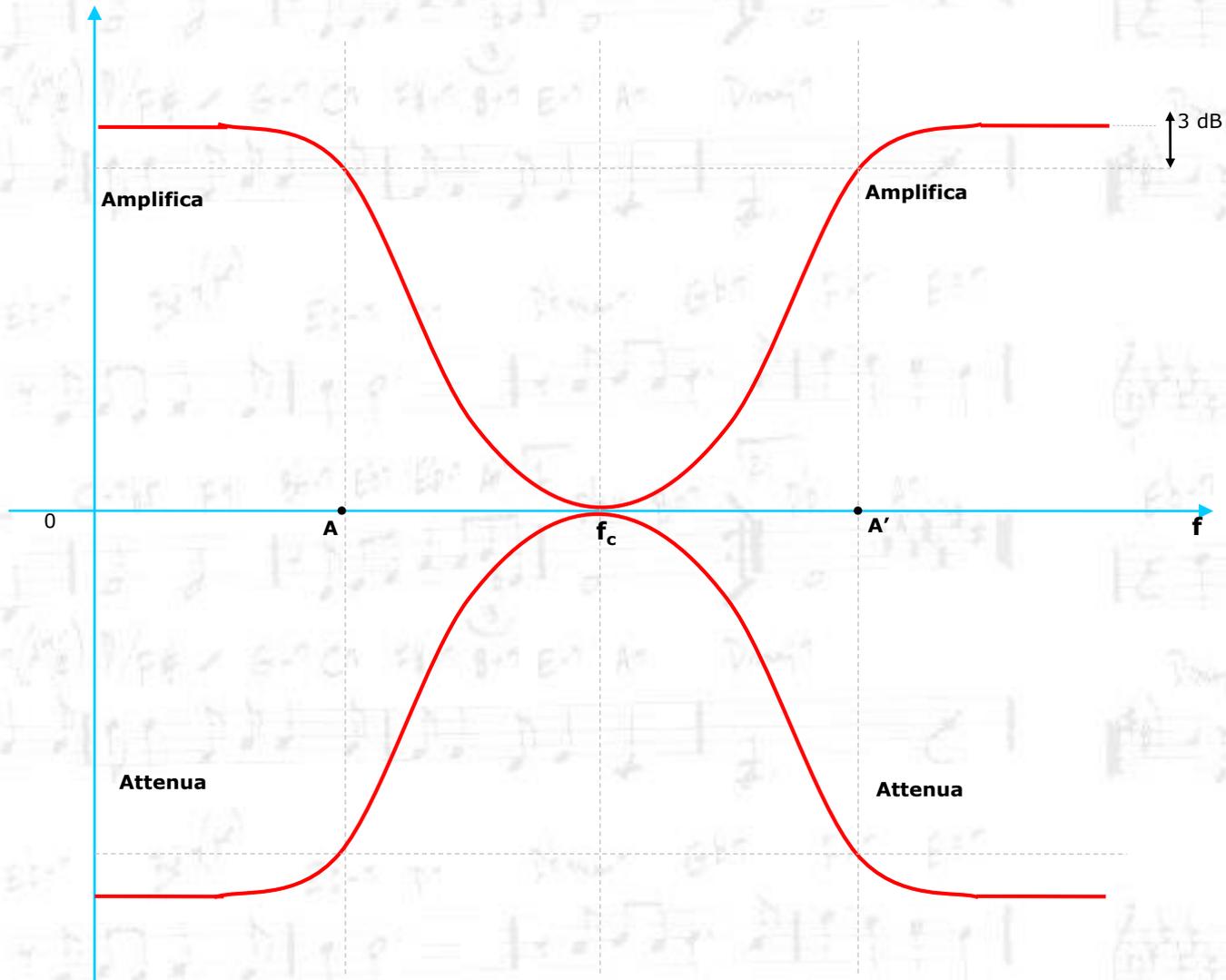
Calcolata nel punto medio dell'intervallo in cui la curva di guadagno decade di 3dB rispetto al valore massimo;

Guadagno (gain):

Applica una amplificazione (o una attenuazione) alla parte del segnale superiore (o inferiore) alla banda usata per determinare la frequenza di taglio.

Gli equalizzatori a scaffale

A (dB)



Gli equalizzatori parametrici

E' possibile effettuare una classificazione degli equalizzatori parametrici in:

- Completamente parametrici;
- Semi parametrici;
- Di picco

Gli equalizzatori parametrici

Completamente parametrici

Permettono di modificare tutte e tre le grandezze che caratterizzano la campana di equalizzazione: frequenza centrale (f_c), guadagno (A), fattore di merito (Q).

I mixer professionali hanno su ogni canale un equalizzatore parametrico a 4 bande: bassi, medio bassi, medio alti, alti.

Per i bassi e per gli alti sono spesso disponibili anche i controlli di shelf, che consentono un taglio (o boost) completo al di sotto o al di sopra di una certa frequenza.

Nei casi ideali è possibile anche decidere con quale pendenza vogliamo che avvenga questo taglio o boost.

Gli equalizzatori parametrici

Semi parametrici

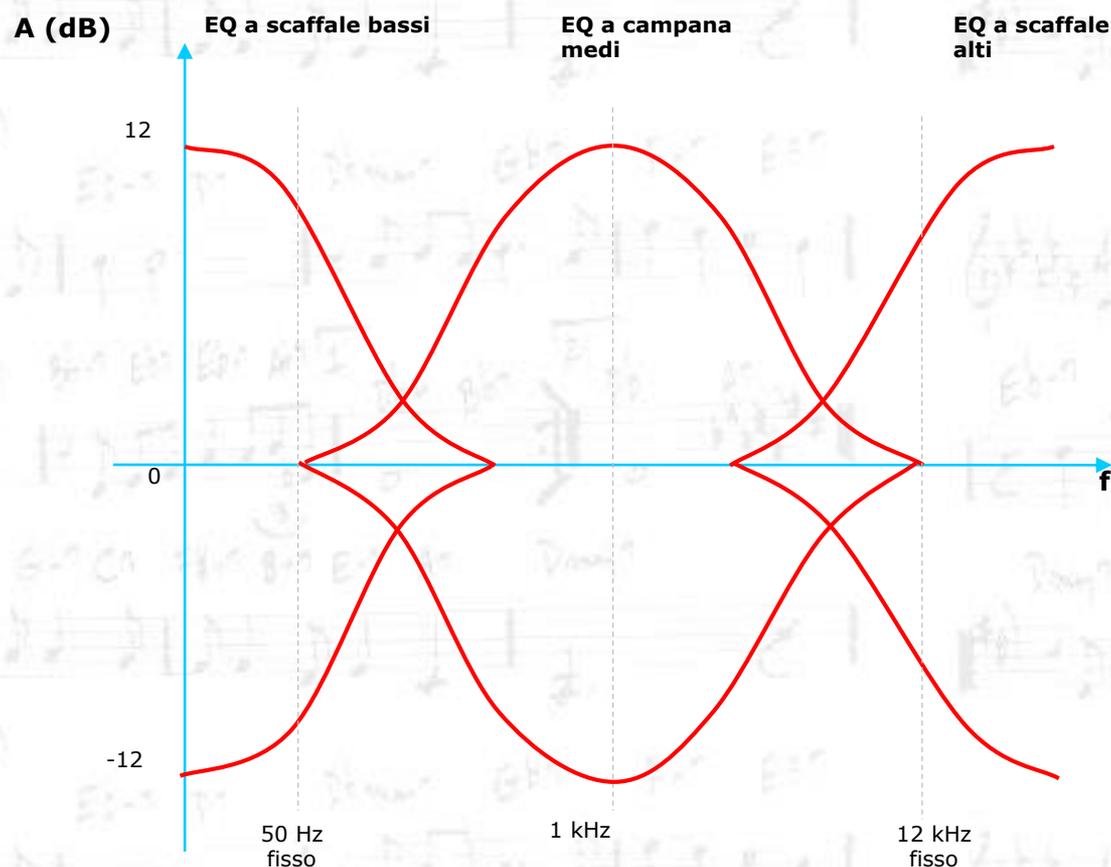
Il fattore di merito Q non è variabile, cioè la forma della campana è fissa (generalmente Q viene fissato ad un valore circa pari a 1.5)

Di picco

Sono fissi i valori di f_c e Q ed è possibile intervenire solo sul guadagno. Questi EQ sono il tipo più economico e vengono installati su mixer di fascia bassa.

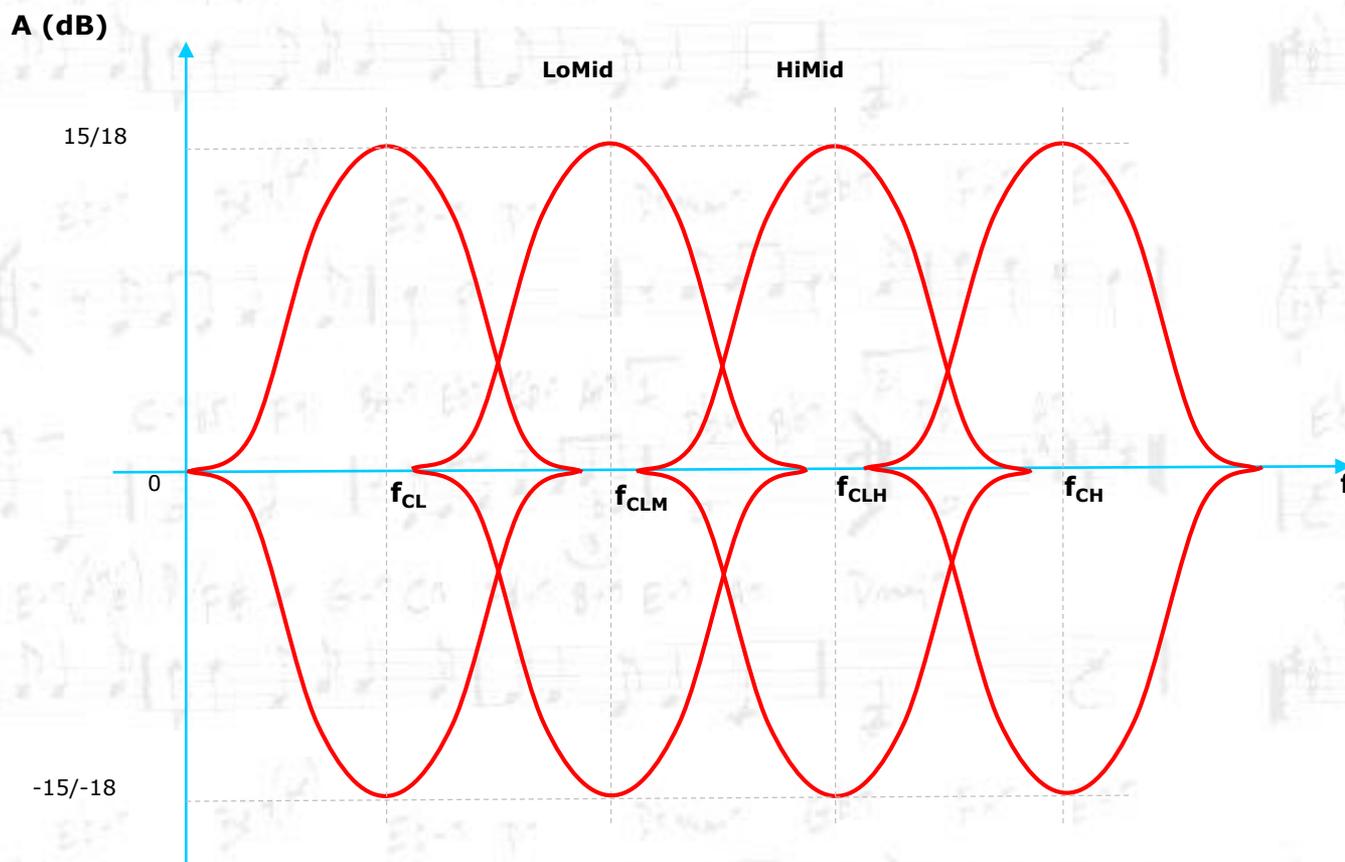
Gli equalizzatori parametrici

La figura seguente mostra la sezione di equalizzazione di un mixer di fascia bassa (mixer amatoriale):



Gli equalizzatori parametrici

La figura seguente descrive la sezione di equalizzazione di un mixer di fascia alta (mixer professionale):



Gli equalizzatori parametrici

Possiamo notare come il guadagno massimo applicabile sia di 12dB nel primo caso e 15dB (o addirittura 18dB) nel secondo.

Inoltre lo spettro di frequenze viene suddiviso in 3 bande (Bassi, Medi, Alti) nel primo caso, mentre nel secondo in 4 bande (Bassi, Medi Bassi, Medi Alti, Alti).

Infine, nel secondo caso, la curva di guadagno dei bassi e degli alti può assumere la forma sia di una campana che di uno shelving EQ, permettendo una versatilità ancora maggiore.

Gli equalizzatori parametrici

Esempio di applicazione pratica

Immaginiamo, ad esempio, che una particolare frequenza sta facendo risuonare un elemento in sala. Volete tagliare quella frequenza, ma come fare a sapere qual'è?

Stesso discorso ad esempio potrebbe esserci per una frequenza che dà un innesco (larsen) nel microfono, e voi non potete fisicamente spostare i diffusori o saltare sul palco e impedire a chi utilizza microfono di continuare a piazzarsi là dove non dovrebbe...

Cosa fare?

Gli equalizzatori parametrici

Diciamo subito che occorre un equalizzatore parametrico per poter agire. Immaginiamo che abbiamo capito che la frequenza che ci dà fastidio sia nei medi, ma non sappiamo come individuarla.

Andiamo allora nella sezione dei medi del nostro equalizzatore e mettiamo il controllo della larghezza di banda (width) al valore più basso possibile (se è indicato Q, al contrario, deve essere impostato al valore più alto), ossia in modo che l'equalizzazione che stiamo andando ad operare interessi la porzione minore possibile di spettro.

Ora alziamo al massimo il controllo del gain (in modo da enfatizzare al massimo la frequenza su cui stiamo indagando) e muoviamoci abbastanza lentamente con il controllo della frequenza.

Quando sentiremo altissima la frequenza che ci dà fastidio allora abbassiamo immediatamente il gain realizzando il taglio di cui abbiamo bisogno.

Gli equalizzatori grafici

Tipicamente si trova nello stereo di casa ed è composto da una serie di singoli equalizzatori a campana che suddividono lo spettro sonoro in bande prefissate permettendo solo di operare un taglio (o boost) su di esse. La larghezza della campana varia a seconda del contesto operativo per il quale l'equalizzatore viene disegnato. Tipicamente si hanno valori del tipo indicato nella seguente tabella:

Contesto lavorativo	Larghezza della campana	Numero di bande (numero di cursori dell'equalizzatore)
Hi-Fi	1 ottava	10
Semi professionale	1/2 ottava	20
Professionale	1/3 ottava	31

I filtri

I filtri vengono utilizzati per eliminare delle bande di frequenze dal segnale originario. Generalmente vengono realizzati con una circuiteria passiva, sono identificati da una frequenza di taglio f_c (sempre calcolata nel punto in cui il guadagno subisce una perdita pari a 3dB).

Definizione formale: *un filtro cambia le caratteristiche spettrali dei suoni 'eliminando' le parziali indesiderate in un segnale, o, detto in altro modo, modellando il suo spettro.*

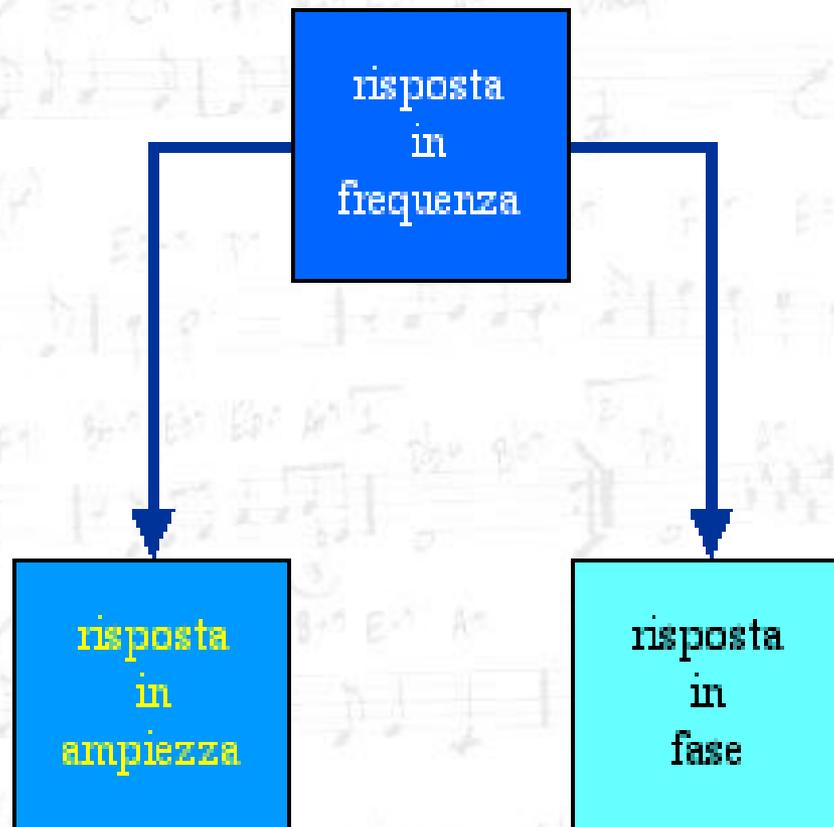
I filtri

Le caratteristiche di un filtro possono essere descritte per mezzo della sua risposta in frequenza (frequency response), che viene determinata sperimentalmente applicando un'onda sinusoidale all'ingresso del filtro e misurando le caratteristiche dell'onda sinusoidale in uscita.

La risposta in frequenza di un filtro consiste di due parti:

- la risposta in ampiezza (o *amplitude response*);
- la risposta in fase (*phase response*).

I filtri



I filtri

La risposta in ampiezza di un filtro varia con la frequenza ed è data dal rapporto tra l'ampiezza dell'onda sinusoidale in uscita e l'ampiezza dell'onda sinusoidale in ingresso.

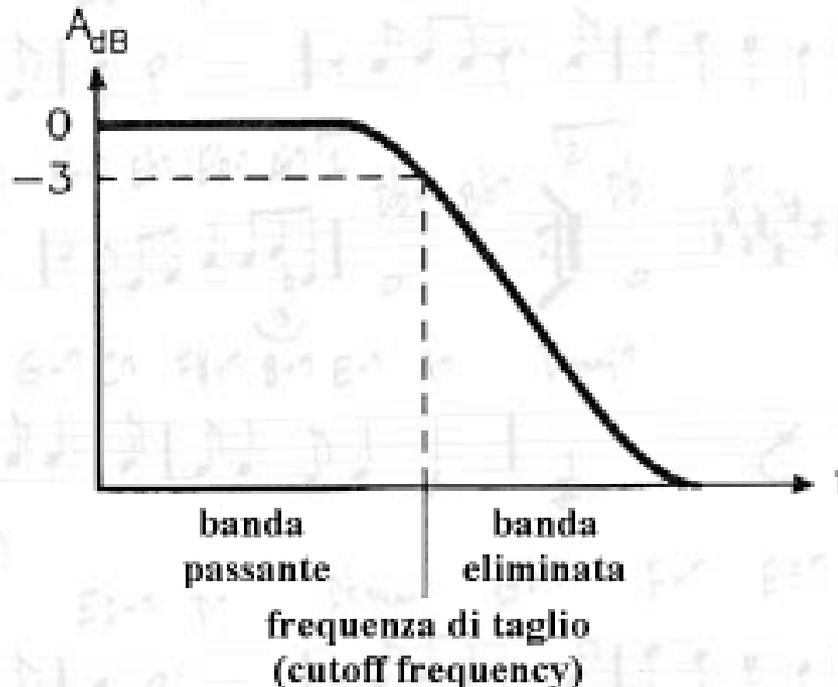
La risposta in fase descrive l'ammontare di variazione di fase in un'onda sinusoidale mentre essa passa attraverso il filtro: si tenga presente che la quantità di variazione di fase, cambia anch'essa con la frequenza dell'onda sinusoidale.

I filtri vengono generalmente distinti per mezzo della forma caratteristica assunta dalla loro risposta in ampiezza. I due tipi di filtro più importanti sono:

- il filtro passa-basso (LPF - Low Pass Filter);
- il filtro passa-alto (HPF - High Pass Filter).

Filtri Passa-Basso

Un filtro Passa-Basso consente alle frequenze che precedono il punto chiamato frequenza di taglio f_c (cutoff frequency) di passare attraverso di esso invariate (in realtà subiscono una minima alterazione), mentre le parziali che vengono a trovarsi dopo il punto di taglio verranno attenuate.



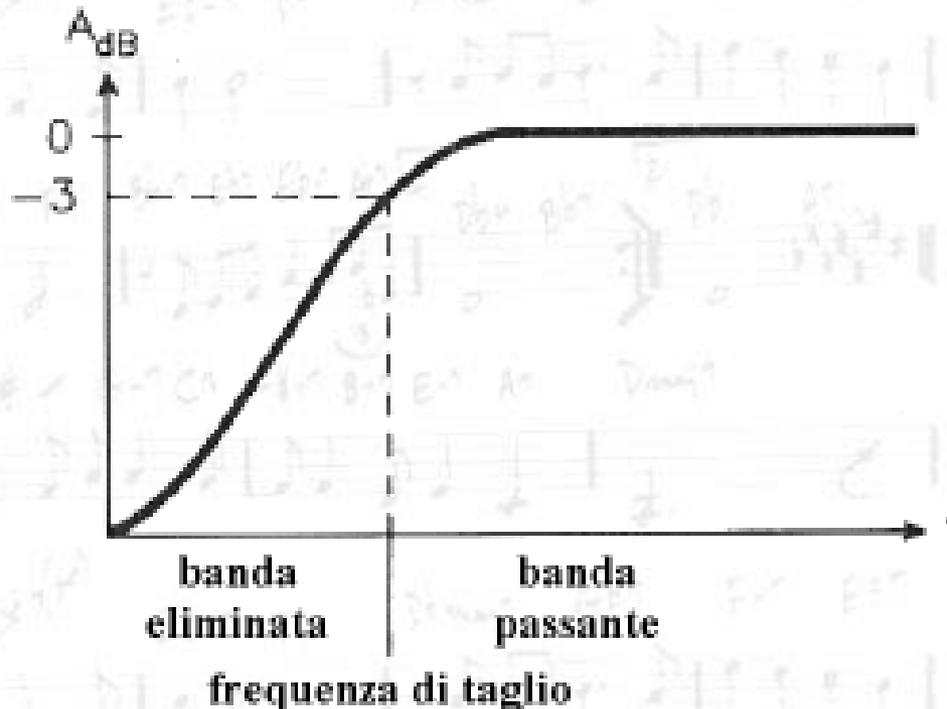
Filtri Passa-Basso

I Filtri passa-basso vengono utilizzati, ad esempio, per eliminare fruscii, o rumori ad alta frequenza.

C'è sempre una fase di transizione graduale tra la banda passante e la banda eliminata e quindi è necessaria una regola per specificare la frequenza di taglio: essa è più spesso definita come quella frequenza alla quale l'energia trasmessa dal filtro diminuisce di metà (-3dB), rispetto alla massima energia trasmessa dalla banda passante.

Filtri Passa-Alto

Un filtro Passa-Alto attenua le frequenze che precedono il punto di taglio f_c mentre quelle che lo seguono passeranno invariate attraverso il filtro (nella pratica con una minima attenuazione).



Filtri Passa-Alto

Tipiche applicazioni di filtri passa-alto sono l'eliminazione di vibrazioni a bassa frequenza come quelle generate da musicisti che camminano su un palco sul quale sono poggiati i microfoni, o come il rumore di fondo generato da un condizionatore d'aria.

Filtri Passa-Banda

Può essere pensato come la sovrapposizione di un filtro Passa-Basso e uno Passa-Alto.

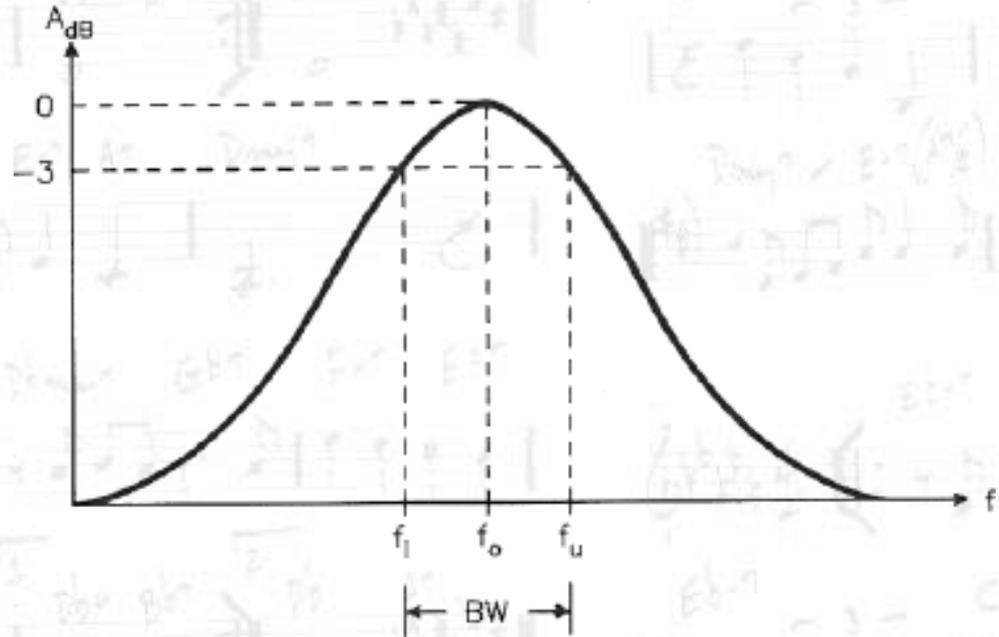
Un filtro Passa-Banda è un filtro che impedisce il passaggio sia di frequenze basse che alte ed è dotato di una banda passante.

I parametri di base di questo tipo di filtro sono:

- La frequenza centrale o center frequency, f_0 ;
- La larghezza di banda (o BW, cioè bandwidth), vista anche come l'intervallo definito da due frequenze di taglio: una superiore (f_u) ed una inferiore (f_l).

Filtri Passa-Banda

Nei filtri digitali implementati nella maggior parte dei linguaggi per macchine virtuali, la frequenza centrale è data dalla media aritmetica della frequenza di taglio superiore ed inferiore.



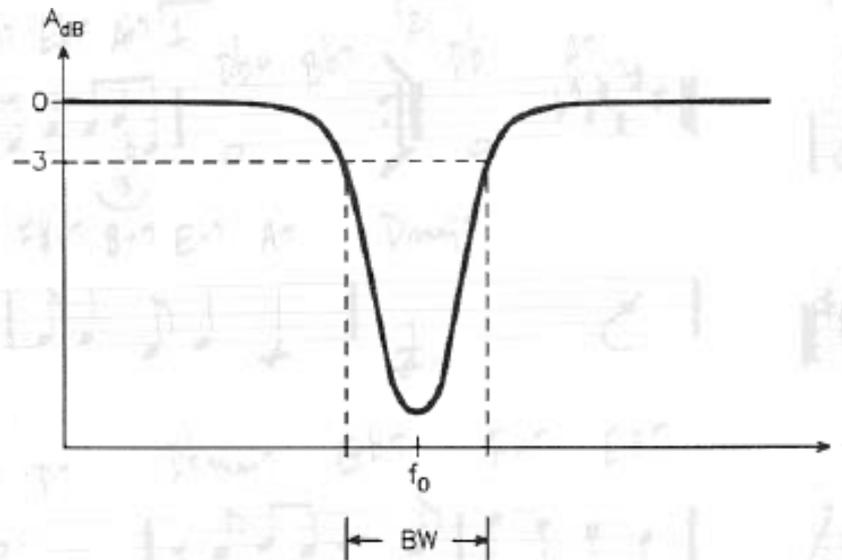
La larghezza di banda è una misura della selettività del filtro ed è uguale alla differenza tra frequenza di taglio superiore ed inferiore. La risposta di un filtro Passa-Banda è spesso descritta per mezzo di termini come 'stretta' o 'larga', a seconda della larghezza di banda attuale.

La selettività di un filtro Passa-Banda è spesso quantificata per mezzo di un fattore di qualità Q (vedi equalizzatore a campana).

Filtri Elimina-Banda

Anche questo filtro può essere pensato come la sovrapposizione di un filtro Passa-Basso e uno Passa-Alto.

Un filtro Elimina-Banda è un filtro che attenua una singola banda di frequenze, lasciando passare tutte le altre. Come un filtro Passa-Banda, è caratterizzato da una frequenza di centrobanda ed una larghezza di banda, ma un altro parametro importante è costituito dall'ammontare dell'attenuazione al centro della banda eliminata (stopband).



Pendenza di un filtro

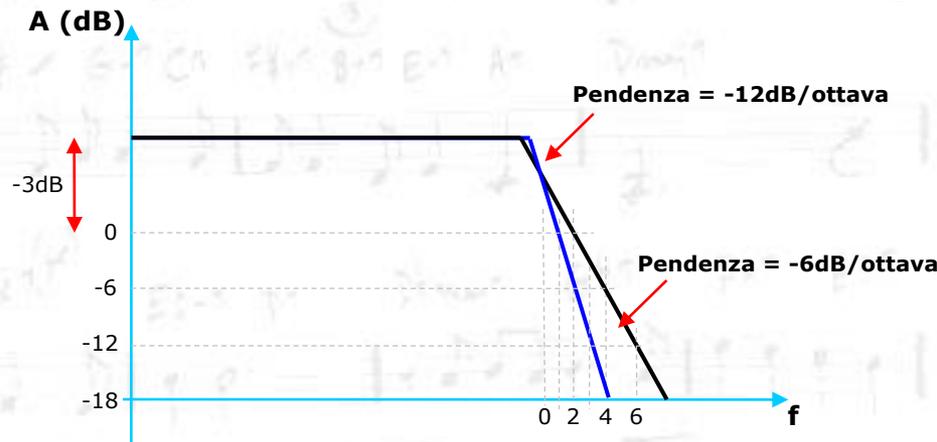
La pendenza di un filtro (o slope rate) permette di stabilire con quale rapidità decade l'ampiezza.

La situazione ideale che ci si auspicherebbe di avere in molte applicazioni reali, è quella di una pendenza verticale. Nella realtà ciò non è realizzabile, ma ci si può avvicinare abbastanza a tale risultato.

La pendenza si misura in dB/ottava (o in poli), cioè si misura di quanti dB diminuisce il guadagno in un'ottava.

Pendenza di un filtro

Facciamo un esempio numerico riferito alla figura seguente:



In essa si vede che il guadagno del primo filtro (linea colore blu), passando da una frequenza pari a 1,5 kHz ad una pari a 3 kHz, diminuisce di 12dB, mentre il secondo filtro (linea colore nero), passando da una frequenza pari a 2 kHz ad una pari a 4 kHz (è ancora un'ottava) diminuisce di 6dB. Questo significa che il primo filtro avrà una pendenza di 12dB/ottava, il secondo di 6dB/ottava.

Pendenza di un filtro

Nei filtri analogici abbiamo 4 pendenze standard e cioè:

Pendenza (dB/ottava)	Ordine del filtro	Numero di poli
6	Primo	1
12	Secondo	2
18	Terzo	3
24	Quarto	4

Il numero di poli si riferisce all'equazione del circuito che realizza il filtro: ogni volta che il numero dei poli aumenta di uno, la pendenza aumenta di 6dB/ottava. Quindi, troveremo sempre e solo multipli di 6 nell'indicazione della pendenza, fino ad un massimo di 24 dB per ottava, ed ogni polo rappresenterà uno step di 6 dB.

Esistono anche filtri digitali realizzati mediante degli algoritmi software; alcuni di questi vengono utilizzati per realizzare suoni mediante la sintesi sottrattiva e simulano filtri anche a 6 poli (36 dB/ottava).