

CHALMERS

Analoga filter

Introduktion i filterdesign med datorstöd

Göran Hult

2013-01-08

Filter

Ett filters funktion är att modifiera en signals egenskaper. Oftast vill man med filtret dämpa frekvenskomponenter i vissa frekvensområden medan frekvenskomponenter i andra frekvensområden passerar odämpade. Dessa filter kallas frekvensselektiva filter. Vissa filter påverkar inte amplituden hos frekvenskomponenterna utan introducerar en frekvensberoende fasvridning istället. Dessa så kallade allpassfilter används ibland för att modifiera faseegenskaperna hos frekvensselektiva filter. Det finns många böcker om filter i både pappersform och på internet där man kan studera teorin bakom elektriska filter. Det följande ska ses som en mycket kort sammanfattning av det viktigaste då det gäller design av analoga filter som används för tidskontinuerliga signaler.

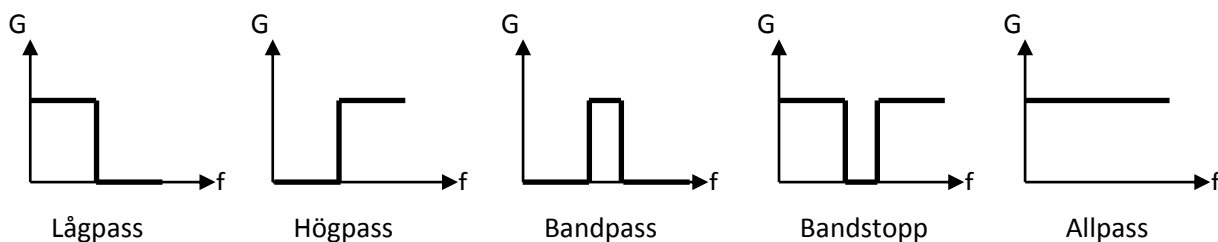
Filtertyper

De vanligaste filtren kan delas in i följande typer:

Lågpasfilter	LP	Låter låga frekvenser passera, stoppar höga frekvenser
Högpasfilter	HP	Låter höga frekvenser passera, stoppar låga frekvenser
Bandpasfilter	BP	Låter frekvenser inom ett frekvensband passera, stoppar frekvenser utanför detta frekvensband
Bandstopfilter	BS	Stoppar frekvenser inom ett frekvensband, låter frekvenser utanför detta frekvensband passera.
Allpassfilter	AP	Låter alla frekvenser passera men ger olika fasvridning för olika frekvenser

Ideala filter

I figurerna nedan syns amplitudförstärkningen G som funktion av frekvensen f för de vanligaste ideala filtertyperna.



I figuren ovan kan man särskilja 3 områden för ett filter:

- Passband: Frekvensområde som vi vill ska passera filtret.
- Stoppband: Frekvensområde som vi vill ska stoppas av filtret.
- Övergångsband: Frekvensområdet mellan passband och stoppband.

I ett idealt filter är övergångsbandet "oändligt smalt".

Ett idealt filter går inte att konstruera i verkligheten då det skulle krävas oändligt många komponenter och ge upphov till ett filter med oändlig fördröjning mellan in- och utgång. Man är alltså i praktiken hänvisad till någon typ av approximation av det ideala filtret.

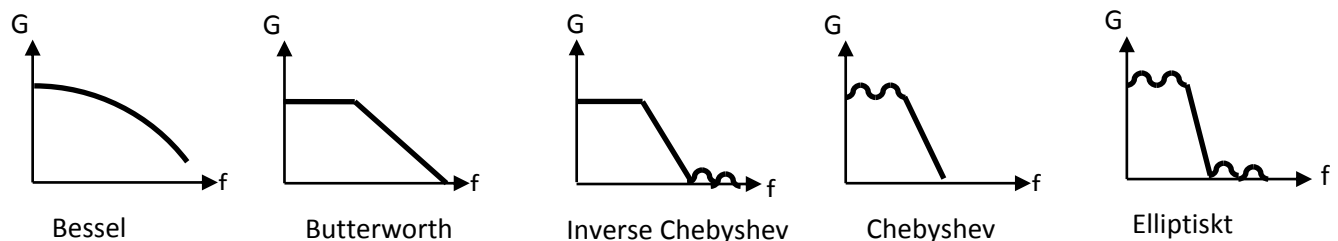
Vanliga approximationer

Inom parentes anges vad som är utmärkande för filtertypen. Förklaringar i kommande avsnitt.

Bessel		(Maximalt slät grupplöptid i passbandet)
Butterworth		(Maximalt slät amplitudförstärkning i passbandet)
Inverse Chebyshev	(Chebyshev 2)	(Rippel i stoppbandet)
Chebyshev	(Chebyshev 1)	(Rippel i passbandet)
Elliptiskt	(Cauer)	(Rippel i pass- och stoppbandet)

Ovanstående filtertyper har alla sina för- respektive nackdelar men i princip kan man säga att de är ordnade så att det översta Besselfiltret ger minst förvrängning av signalen men har flackast övergång mellan pass- och stoppband medan Elliptiska filtret förvränger signalen mest men har brantast övergång mellan pass- och stoppband. Butterworth-filtret är ett mycket använt filter då det kan ses som en bra kompromiss mellan de övriga filtren. Inverse Chebyshev och Elliptiska filter är inte så vanliga då de är komplicerade att realisera eftersom de har nollställen i stoppbandet.

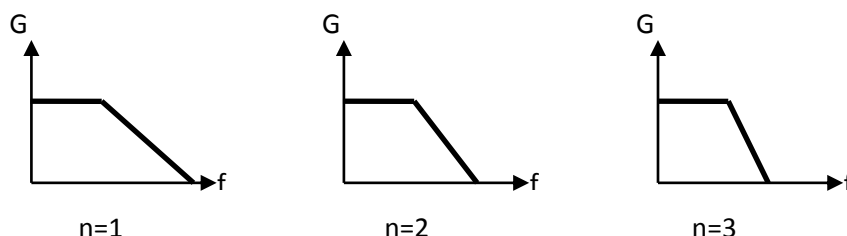
I figuren nedan kan man i grova drag se skillnaden i amplitudförstärkning för lågpasfilter med de vanliga approximationerna.



Filters ordningstal n (Filter Order)

Filters ordningstal bestäms av antalet poler hos filtrets överföringsfunktion. Högre ordningstal ger brantare övergång mellan passband och stoppband. Ju högre ordningstal desto fler reaktiva komponenter (kondensatorer och spolar) krävs i filtret. Välj aldrig högre ordningstal än nödvändigt eftersom filtret då förvränger signalen mer, kostnaden för filtret ökar samt känsligheten för komponentvariationer ökar.

I figuren nedan kan man i grova drag se skillnaden i amplitudförstärkning för lågpasfilter av Butterworthtyp med olika ordningstal n .



OBS!

Ett filter med ordningstal $n=1$ får alltid samma karakteristik som ett Butterworthfilter. Det är alltså meningslöst att t ex tala om ett 1:a ordningens Elliptiskt eller Chebyshevfilter

Q-värde för filter av 2:a ordningen

Q-värdet beror på var polerna hos överföringsfunktionen är lokaliserade i det komplexa talplanet. Ju närmare imaginäraxeln polerna är desto högre Q-värde. Ju högre Q-värde desto känsligare är filtret för variationer i komponentvärden. Det är lämpligt att $Q < 5$ i filterlänkar med 1 operationsförstärkare.

Lågpasfilter

Överföringsfunktionen för ett lågpasfilter av 2:a ordningen utan ändliga nollställen kan skrivas:

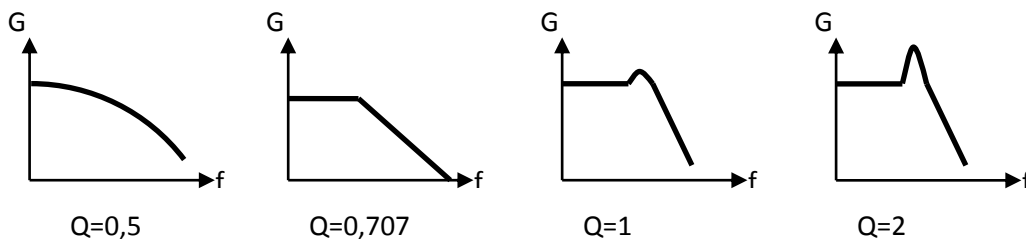
$$H(s) = \frac{K \cdot \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad \text{där } K \text{ är förstärkningen i passbandet.}$$

Q-värdet i uttrycket ovan avgör om man får någon resonanstopp i amplitudförstärkningen:

$$Q \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \text{ger ingen resonanstopp}$$

$$Q > \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \text{ger resonanstopp. Ju högre Q-värde desto högre resonanstopp.}$$

I figuren nedan kan man i grova drag se skillnaden i amplitudförstärkning för lågpasfilter av 2:a ordningen med olika Q-värden.



Q-värdet bestämmer också hur stegsvaret ser ut. Ju högre Q-värde desto större översväng. Om polerna för $H(s)$ är reella blir stegsvaret för $H(s)$ utan översväng (Icke oscillatoriskt). Man kan lätt visa att polerna är reella om $Q \leq 0,5$.

Q-värdet för standardfilter av 2:a ordningen:

Bessel: $Q = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577$

Butterworth: $Q = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$

Chebyshev, Elliptiskt: $Q > \frac{1}{\sqrt{2}}$

Man realiserar ofta högre ordningens aktiva filter som en kaskadkoppling av 1:a ordningens filter och 2:a ordningens filter med olika Q-värden. Exempelvis kan man realisera ett 4:e ordningens Butterworthfilter som två kaskadkopplade 2:a ordningens filter med Q-värdena 0,54 respektive 1,31. Fastän filtret med Q-värdet 1,31 har resonanstopp så kommer inte det totala filtret att få någon resonanstopp utan kommer att få maximalt slät amplitudförstärkning såsom alla Butterworthfilter.

Högpasfilter

Överföringsfunktionen för ett högpasfilter av 2:a ordningen med nollställen endast i $s=0$ kan skrivas:

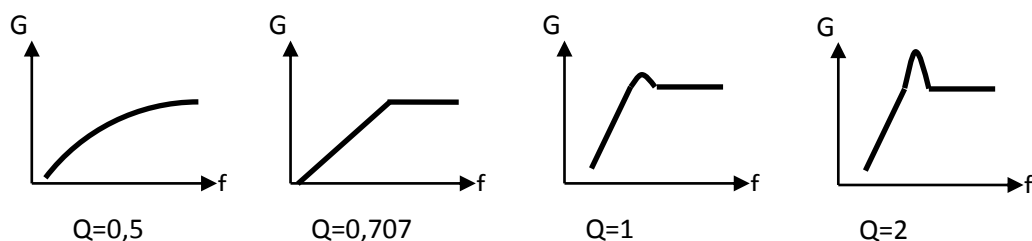
$$H(s) = \frac{K \cdot s^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad \text{där } K \text{ är förstärkningen i passbandet.}$$

Q-värdet i uttrycket ovan avgör om man får någon resonanstopp i amplitudförstärkningen:

$$Q \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \text{ger ingen resonanstopp}$$

$$Q > \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \text{ger resonanstopp. Ju högre Q-värde desto högre resonanstopp.}$$

I figuren nedan kan man i grova drag se skillnaden i amplitudförstärkning för högpasfilter av 2:a ordningen med olika Q-värden.



Smalbandigt Bandpassfilter

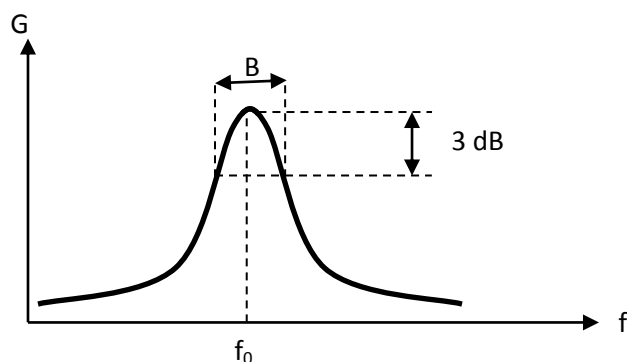
Överföringsfunktionen för ett bandpassfilter av 2:a ordningen kan skrivas:

$$H(s) = \frac{K \cdot \frac{\omega_0}{Q} s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad \text{där } K \text{ är förstärkningen i passbandet.}$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad \text{är filtrets centerfrekvens.}$$

Q-värdet i uttrycket ovan avgör -3dB bandbredden (B) för bandpassfiltret enligt:

$$B = \frac{f_0}{Q} \quad \text{se figur nedan}$$



Bredbandigt Bandpassfilter

Om bandbredden B är större än ca 2 oktaver (fyrdubbling i frekvens) kan det vara lämpligt att bygga bandpassfiltret i form av ett lågpasfilter kaskadkopplat med ett högpasfilter.

Smalbandigt Bandstoppfilter (Notchfilter)

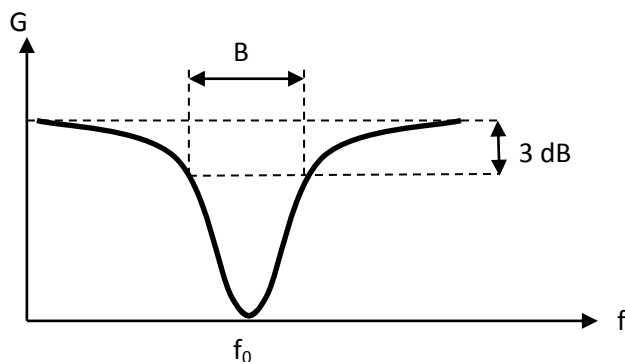
Överföringsfunktionen för ett bandstoppfilter av 2:a ordningen kan skrivas:

$$H(s) = \frac{K \cdot (s^2 + \omega_0^2)}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad \text{där } K \text{ är förstärkningen i passbandet.}$$

$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$ är filtrets centerfrekvens.

Q-värdet i uttrycket ovan avgör -3dB bandbredden (B) för bandstoppfiltret enligt:

$$B = \frac{f_0}{Q} \quad \text{se figur nedan}$$

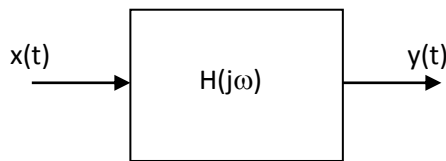


Bredbandigt Bandstoppfilter

Om bandbredden B är större än ca 2 oktaver (fyrdubbling i frekvens) kan det vara lämpligt att bygga bandpassfiltret i form av ett lågpasfilter och ett högpasfilter vars utsignaler summeras.

Faslöptid (Phase delay)

Antag att vi har ett allpassfilter nedan så att amplitudförstärkningen är konstant lika med 1 för alla frekvenser medan fasvridningen kan variera.



Antag att vi matar in signalen: $x(t) = \cos(\omega t)$

På utgången erhålls då signalen: $y(t) = \cos(\omega t + \varphi)$ där $\varphi = \arg(H)$ mätt i radianer.

Definition: Faslöptid: $t_p = -\frac{\varphi}{\omega}$

Faslöptiden är ett mått på hur stor tidsfördröjningen i filtret är för ett visst fasläge på cosinussignalen. (t ex en specifik nollgenomgång).

Grupplöptid (Group delay)

Grupplöptid är ett begrepp som används då man vill ange hur signaler som är mer komplicerade än en cosinusformad signal behandlas i ett filter. Antag som ovan att vi har ett allpassfilter så att amplitudförstärkningen är konstant lika med 1 för alla frekvenser medan fasvridningen kan variera.

Antag att vi matar in signalen:

$$x(t) = \cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t) = \underbrace{2 \cos \frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t}_{\text{Envelopp}} \cdot \cos \frac{\omega_2 + \omega_1}{2} t$$



På utgången erhålls då signalen:

$$y(t) = \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + \cos(\omega_2 t + \varphi_2) = \underbrace{2 \cos \left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right)}_{\text{Envelopp}} \cdot \cos \left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2} t + \frac{\varphi_2 + \varphi_1}{2} \right)$$

Enveloppens tidsfördröjning: $t_e = -\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\omega_2 - \omega_1} = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta\omega} \rightarrow -\frac{d\varphi}{d\omega}$ då $\Delta\omega \rightarrow 0$

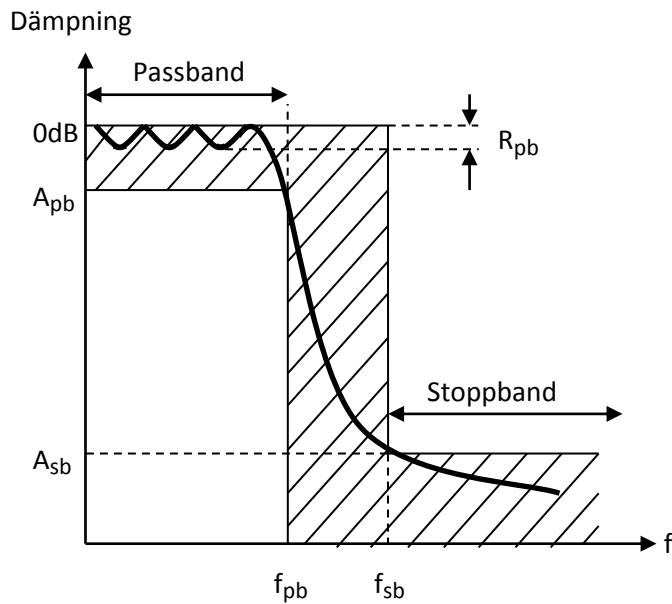
Definition: Grupplöptid: $t_g = -\frac{d\varphi}{d\omega}$

Grupplöptiden kan alltså ses som ett mått på hur stor tidsfördröjningen i filtret är för enveloppen för summan av 2 sinusvågor med närliggande frekvenser. Enveloppen kan i sin tur ses som bärare av informationen i signalen.

För att inte förvränga signalen ska ett bra filter ha konstant grupplöptid för alla frekvenser inom passbandet. Detta kräver enligt definitionen för grupplöptiden att fasvridningen φ är en linjär funktion av ω inom passbandet. Av förut nämnda filtertyper har Besselfiltret den mest linjära faskarakteristiken medan Elliptiska filtret har den minst linjära faskarakteristiken.

Specifikation av filter

Filter kan specificeras enligt följande figur som visar ett lågpasfilter men det är likartat för de andra filtertyperna:



A_{pb} Maximal dämpning i passbandet . Väljs ofta till 3dB.

A_{sb} Minimal dämpning i stoppbandet

R_{pb} Rippel i passbandet. Endast för Chebyshev och Elliptiska filter

f_{pb} Passbandfrekvens

f_{sb} Stoppbandfrekvens

I fallen med Chebyshev och Elliptiska filter specificerar man ofta inte ripplet i passbandet och maximal dämpning i passbandet separat som man gjort i figuren ovan. Det vanligaste är att man för dessa filtertyper sätter maximal dämpning i passbandet lika med ripplet i passbandet, d v s $A_{pb} = R_{pb}$.

Passiva filter

Passiva filter består vanligtvis av kondensatorer, spolar och eventuellt motstånd.

Vid höga frekvenser används ibland andra komponenter t ex vågledare och microstrip.

Fördelar:

Kräver ingen matningsspänning till aktiva komponenter

Kan ha mycket liten förlusteffekt om det bara innehåller reaktiva element.

Kan användas vid mycket höga frekvenser.

Kan användas vid stora spänningar och stora strömmar.

Nackdelar:

Spolar är stora, dyra, svåra att trimma, har stor tolerans, läcker magnetfält och är känsliga för magnetfält.

Måste designas med hänsyn till käll- och lastresistans.

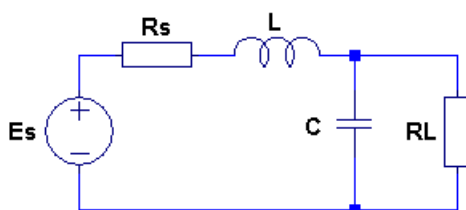
Tips

Det är viktigt att känna till källresistansen R_s för källan som matar filtret samt lastresistansen R_L som är kopplad till filtrets utgång. Se figurer nedan.

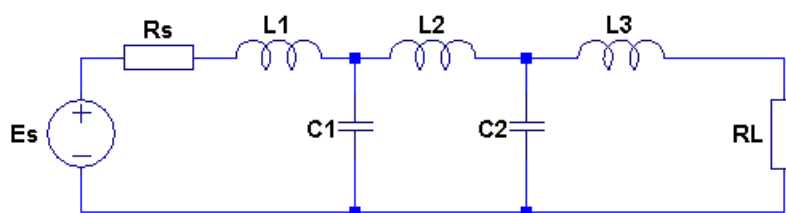
Om källresistans och lastresistans är ungefär lika stora så går det inte att realisera passiva Chebyshev eller Elliptiska filter med jämnt ordningstal.

Vid lågfrekvensförstärkare och i kraftsammanhang matas filtret ofta från en källa med mycket låg källresistans. Välj i dessa fall att första filterelementet ska vara ett serieelement så att signalkällan inte kortsluts vid extrema frekvenser.

Nedan visas ett 2:a ordningens LP-filter för en högtalare ($R_L=8\ \Omega$) som anslutits till en förstärkare med källresistansen $R_s=0.1\ \Omega$. Observera att spolen är ett serieelement. Om man valt parallellelement som första element så hade det blivit en kondensator som kortslutit förstärkaren vid höga frekvenser.



Nedan visas ett 5:e ordningens LP-filter



Aktiva filter

Aktiva filter består oftast av operationsförstärkare, motstånd och kondensatorer.

Fördelar:

Billigt

Lätt att miniaturisera

Hög precision.

Nackdelar:

Klarar ej höga frekvenser

Klarar ej höga spänningar och/eller höga strömmar

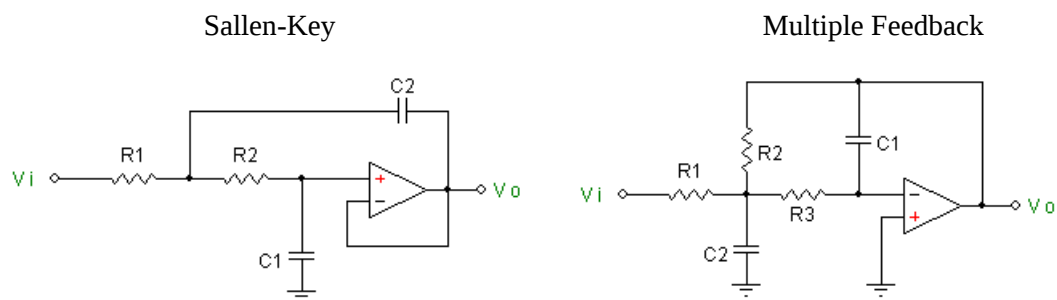
Tips

Vid enklare LP- och HP-filter av typ Butterworth och Bessel ($Q < 5$ för alla ingående 2:a ordningens länkar) är det enklast att realisera dem som en kaskadkoppling av 1:a ordningens länkar och 2:a ordningens så kallade Sallen-Key länkar.

Om det för ett LP-filter är viktigt med mycket stor dämpning i stoppbandet vid frekvenser $f > 100 \text{ kHz}$ är Multiple Feedback länken att föredra framför Sallen-Key länken.

För standard operationsförstärkare använd motstånd i intervallet $2 \text{ k}\Omega - 100 \text{ k}\Omega$ om det går.

Nedan visas 2 olika realiseringar av 2:a ordningens LP-filter



Gratis designverktyg för aktiva filter

FilterPro www.ti.com

Filter Wiz Lite www.schematica.com/

FilterLab www.microchip.com

Gratis designverktyg för aktiva och passiva filter (Även digitala filter)

Filter Free www.filter-solutions.com/ Begränsad till max ordningstal 3.

Gratis designverktyg för passiva filter

AADE www.aade.com/filter.htm

Olämpligt att använda vid låga källresistanser.
ty impedansanpassar till källan.
Utvecklat för högfrekvensdesign.

QuickFil www.omicron-lab.com

DOS-program. Kräver programmet DOSBox.

Gratis onlinedesign för passiva filter till högtalare.

www.diyaudioandvideo.com/Calculator/XOver/