Gemischtphasige Filter

Christian-W. Budde
30449 Hannover, E-Mail:Christian@savioursofsoul.de

Einleitung

In vielen Bereichen der Akustik und insbesondere der Elektroakustik werden Filter mit unterschiedlichsten Charakteristiken für unterschiedlichste Zwecke eingesetzt. Diese Filter können entweder als klassische IIR-Filter mit unendlich langer Impulsantwort (bekannt insbesondere aus der Analogtechnik) oder FIR-Filter (meist nur mit Digitaltechnik realisierbar) realisiert werden. Dabei sind IIR-Filter typischerweise minimalphasig und FIR-Filter (aus praktischen Gründen bei der Erzeugung der Koeffizienten) eher linearphasig ausgelegt. Aus akustischer Sicht ist aber weder eine reine Minimalphasigkeit noch eine reine Linearphasigkeit immer sinnvoll.

Dieser Beitrag stellt eine neue Methode für FIR-Filter vor, bei der nahezu beliebig und kontinuierlich zwischen Minimal-, Linear- und Maximalphasigkeit eingestellt werden kann, wobei die resultierende Filterimpulsantwort immer eine nahezu optimal kurze Länge behält.

Hintergrund

Wie bereits eingangs erwähnt lassen sich Filter leicht als minimalphasige IIR-Filter bzw. linearphasige FIR-Filter erstellen. Minimalphasige Filter haben dabei eine minimal kurze Einschwingzeit und eine frequenzabhängige Gruppenlaufzeit, wohingegen linearphasige Filter eine konstante Gruppenlaufzeit für alle Frequenzen und ein symmetrisches Ein- und Ausschwingverhalten aufweisen. Zusätzlich ist an dieser Stelle noch der Typ der maximalphasigen Filter zu erwähnen, der ein maximal langes Einschwingen, aber ein minimal kurzes Ausschwingen besitzt und damit das Gegenteil eines minimalphasigen Filters darstellt. Die Impulsantwort entspräche dabei auch der rückwärts (akausal) betrachteten Impulsantwort eines minimalphasigen Filters.

Vergleicht man die Länge der Impulsantworten, so fällt auf, dass die eines linearphasigen Filters in der Regel um den Faktor 1,5 gegenüber der eines minimalphasigen Filters länger ist (zumindest, wenn man einen unteren Schwellwert für das Ein-/Ausschwingen als Kriterium für die Länge festlegt (siehe Abbildung 1)).

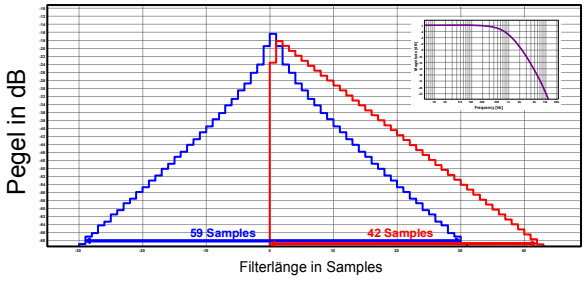

Abbildung 1: Vergleich der Impulsantworten eines 1 kHz-Tiefpassfilters erster Ordnung mit Linear- (blau) und eines mit Minimalphasigkeit (rot)

Motivation

Unter anderem bei Anwendungen in der Elektroakustik steht nicht selten ein Budget an Verzögerung zur Verfügung, das als Einschwingzeit für die Filter genutzt werden kann. Als konkretes Beispiel sei hier eine Delay-Line in einer Beschallungsanlage genannt. Dieses Budget soll so gut wie möglich auch für tiefe Frequenzen genutzt werden, auch wenn die Zeit meistens nicht ausreicht, um beliebig steile Filter linearphasig zu realisieren.

Aus akustischer Hinsicht wäre es daher wünschenswert, ein Filter mit beliebiger Einschwingzeit zu konstruieren, das einen beliebig einstellbaren Frequenzgang besitzt, sich dabei insbesondere auch frequenzkontinuierlich zwischen Minimalphasigkeit und Linearphasigkeit frei einstellen lässt und gleichzeitig eine optimal kurze Impulsantwort behält.

Bekannte Ansätze

Einfache Ansätze, die auf Überblenden basieren (sowohl im Zeit- und Frequenz- als auch Cepstrumbereich), führen fast in allen Fällen dazu, dass zwar das gewünschte Verhalten erzeugt werden kann, die Impulsantwort aber meist länger oder mindestens genauso lang wie die Impulsantwort eines linearphasigen Filters ausfällt.

Andere Ansätze [1] benutzen eine Kombination von FIR- (Entzerrfilter) und IIR-Filtern (Bandpässe), um ebenfalls eine gemischtphasige Impulsantwort mit geringer Latenz zu erlangen (siehe Abbildung 2).

Dabei sind die IIR-Filter zwar parametrisch, aber nur begrenzt einstellbar, und das Einstellen von mehreren Filtern zum Erreichen eines beliebigen Frequenzganges muss meist mühsam per Hand unter Beachtung der Rechenlast erfolgen.

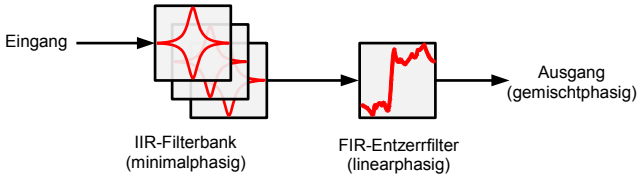

Abbildung 2: Gemischtphasiges Gesamtfilter bestehend aus IIR-Filterbank und FIR-Entzerrfilter.

Neuer Ansatz

In Anlehnung an den in Abbildung 2 gezeigten Ansatz kann man die IIR-Filterbank durch ein FIR-Filter ersetzen. Zwar besitzen FIR-Filter nur eine endliche Impulsantwortlänge, aber der durch Abschneiden (bzw. Fenstern) erzeugte Fehler lässt sich durch hinreichend lange Wahl der Filter-Kernel-Länge beliebig gering halten.

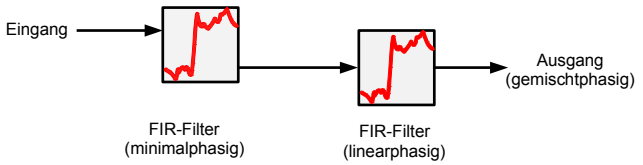

Abbildung 3: Gemischtphasiges Gesamtfilter bestehend aus minimal- und linearphasigen FIR-Filtern

Aus Abbildung 3 lässt sich der Signalfluss des so entstandenen gemischtphasigen Filters entnehmen. Natürlich lassen sich die FIR-Filter mittels Faltung auch zu einem gemischtphasigen Gesamtfilter kombinieren. Die Länge des Gesamtfilters ist dann die Summe der beiden Einzelfilterlängen. Das Einschwingen des Gesamtfilters entspricht dann der halben Länge des linearphasigen Filterteils.

Zerlegung eines Filters

Damit ein beliebiges Filter in Filter mit frei einstellbarer Phasigkeit umgewandelt werden kann, muss das Ausgangsfilter zunächst in zwei Teile zerlegt werden. Für das in Abbildung 3 gezeigte Signalflussdiagramm wäre das ein minimal- und ein linearphasiges Filter. Denkbar wäre aber auch eine Zerlegung in minimal- und maximalphasiges Filter. Die Länge des maximalphasigen Filters entspräche dann direkt der Länge des Einschwingens.

Von fundamentaler Bedeutung ist dabei die Umwandlung eines linearphasigen Filters in ein minimalphasiges Filter. Der Literatur kann man dafür verschiedene Algorithmen entnehmen [2-4]. Dabei muss angemerkt werden, dass alle Algorithmen gewisse Ähnlichkeiten besitzen und meist nicht frei von Aliasing sind. Die dadurch entstehenden Fehler lassen sich zwar beliebig minimieren, was jedoch zulasten der Rechenzeit geht.

Unter der Voraussetzung, dass die Umwandlung jedoch hinreichend genau ist, lässt sich dann die Zerlegung wie folgt gestalten:

1. Umwandlung des Filters in ein minimalphasiges Filter (siehe oben)
2. Fensterung auf eine gewünschte Länge L_A
3. Erweiterung mit Nullen auf Originallänge, bzw. die maximale (linearphasige) Länge L_{Ges}
4. Transformation in den Frequenzbereich
5. Differenzbildung des Betragsspektrums (in dB) [entspricht Division der komplexen Spektren]
6. ggf. Erzwingen von Linearphasigkeit (Phase zu Null setzen) [bzw. Minimalphasigkeit]
7. Transformation dieser Differenz in den Zeitbereich
8. Fensterung der Impulsantwort auf neue Länge L_B, so dass $L_A + L_B \leq L_{ges}$

Für den Fall, dass in Schritt 6 die Minimalphasigkeit erzwungen wurde, muss eines der beiden Teilfilter nun noch zeitlich invertiert werden.
Das gemischtphasige Filter entsteht anschließend durch Faltung der Teilfilter.

Probleme bei der Zerlegung

Zunächst sei noch einmal darauf verwiesen, dass die Umwandlung in ein minimalphasiges Filter selten perfekt bzw. mit hoher Rechenzeit verbunden ist.

Die in allen Fällen nötige Anwendung von Fensterfunktionen (auch ein einfaches Abschneiden entspricht bekanntlich einem [Rechteck-]Fenster) bedingt zugleich eine zusätzliche Filterung. Im Falle des ersten Filters wird diese Beeinflussung zwar durch die Differenzbildung wieder korrigiert, allerdings sollte auch die zweite Impulsantwort noch gefenstert werden, wenn man auf möglichst kurze Impulsantworten bedacht ist. Dabei enthält das erste Filter ein zusätzliches Filter der Fensterfunktion und das zweite Filter ein dazu komplementäres, welches sich durch Faltung beider Filter wieder teilweise heraus kürzt. Besser wäre es jedoch, wenn man dies schon sukzessive bei der Erstellung berücksichtigen könnte, um möglichst kurze Teilfilter zu erhalten.

Mittels Iteration lassen sich die Einflüsse der Fenster minimieren. Dazu muss man nach dem letzten Schritt wieder zu Schritt 3 springen, dann aber die Differenz mit dem jeweils anderen Filter betrachten. So wird initial die Differenz zwischen dem ersten Filter und dem Gesamtfilter gebildet, wohingegen bei der ersten Iteration die Differenz zwischen dem zweiten Filter und dem Gesamtfilter verwendet wird. In einer weiteren Iteration würde dann wieder die Differenz zu dem ersten Filter betrachtet.

Als Abbruchkriterium für die Iteration kann zum Beispiel die Differenz zwischen dem Frequenzgang des Gesamtfilters und der Faltung der Einzelfilter herangezogen werden. Dabei kann es auch hilfreich sein, bestimmte Parameter der Fensterfunktion bei jeder Iteration zu beeinflussen.

Weitere Möglichkeiten

Durch Anwendung einer Gewichtungsfunktion lässt sich zusätzlich noch die Phasigkeit für jeden Frequenzbereich steuern. So ist es möglich, die Höhen möglichst linearphasig zu filtern, wohingegen die Bässe tendenziell minimalphasig gefiltert werden. Hierfür kann auch eine Zerlegung in drei Filter (minimal-, linear- und maximalphasig) sinnvoll sein, um eine minimal kurze Länge der Gesamtimpulsantwort zu garantieren.

Literatur

[1] A. Goertz, J. Kleber, M. Makarski, R. Thaden: Linearphasiges Filterdesign und die daraus resultierenden Latenzen (2011); URL:`http://www.ifaa-akustik.de/files/fir_filter_geringer_latenz.pdf`

[2] J. S. Lim und A. V. Oppenheim: Advanced Topics in Signal Processing, Prentice Hall Intern. Editions (1988)

[3] A. V. Oppenheim und R. W. Schafer: Discrete-Time Signal Processing, Prentice Hall Intern. Editions (1989)

[4] N. Damera-Venkata und B. Evans: Optimal Design of Real and Complex Minimum Phase Digital FIR Filters (1999)