

Biomed. Technik  
27 (1982), 214–217

L. G. Zhou  
P. Kartmann  
J. Nagel  
M. Schaldach

## Entwurfsverfahren digitaler Filter\*

Digital Filter Design

Aus dem Zentralinstitut für Biomedizinische Technik der Universität Erlangen-Nürnberg  
(Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. M. Schaldach)

**Schlüsselwörter:** Digitale Filter, Phonokardiogramm

Die Anwendung digitaler Filter in der biomedizinischen Technik bringt gegenüber Analogfiltern wesentliche Vorteile. Vor allem erleichtert die große Flexibilität digitaler Systeme die Anpassung an das jeweilige Meßproblem, wobei in der vorliegenden Arbeit die Optimierung des Signal-Rauschverhältnisses bei biologischen Summensignalen wie Elektrokardiogramm (EKG) und Phonokardiogramm (PKG) im Vordergrund steht. Während bei der Realisierung von digitalen Filtern im allgemeinen Filtercharakteristiken durch digitale Computeralgorithmen approximiert werden, die einen sehr hohen Rechenaufwand erfordern, werden in der vorliegenden Arbeit digitale Filterprinzipien vorgestellt, die ein Minimum an Rechenzeit, Zeitaufwand bei der Verwirklichung und geringe Anforderungen an Spezialkenntnisse digitaler Filteralgorithmen erfordern. Die Wirksamkeit des Verfahrens wird an der phonographischen Analyse der »beat to beat«-Bestimmung der fetalen Herzfrequenz demonstriert.

**Key-words:** Digital Filters, Phonocardiogram

The use of digital filters in biomedical engineering offers major advantages in comparison with analog filter techniques. In particular, the great flexibility of digital systems, permits matching to special problems in biological measurement can be achieved by preference is given to the optimization of the signal-to-noise ratio in recorded biological summation signals such as the electrocardiogram (ECG) and phonocardiogram (PCG). In constructing digital filters the filter characteristics are usually approximated by digital computer algorithms, which call for a high in arithmetic overhead. In this paper the principles of digital filter design requiring a minimum of computer time, construction time and little experience in digital filter algorithms are presented. The efficiency of this procedure is demonstrated by the beat-to-beat phono analysis of the fetal heart rate.

### 1 Einleitung

In der Kardiotokographie hat die Einführung digitaler Signalverarbeitung bei der Analyse des abdominalen EKG zu einer Verbesserung der Schlag-zu-Schlag-Frequenzmessung geführt [4]. Die Möglichkeit, die fetale Herzfrequenz auch akustisch zu überwachen, bietet zusätzlich diagnostische Vorteile in der Perinatologie.

Das Ziel der Signalverarbeitung im vorliegenden Problem besteht in der Extraktion charakteristischer Parameter wie fetale Herzfrequenz oder Herzzeitintervalle aus dem abdominal aufgenommenen akustischen Signalgemisch, wobei das Problem wegen der geringen Signalenergie und des hohen Rauschpegels in der Auflösung des fetalen Phonokardiogramms in die beiden Herzöne besteht. Das am mütterlichen Abdomen aufgenommene Phonosignal enthält mütterliche Herzgeräusche, fetale Herzschallsignale und eine große Anzahl anderer akustischer Signale. Die selektive Bandpassfilterung von den mütterlichen Schallanteilen läßt sich nur durch Anpassung der Filtercharakteristik an das Signalspektrum erreichen.

Erste Hinweise auf die Problematik finden sich bereits bei Hammacher [3], der durch Anpassung der Filter eine Selektion der unterschiedlichen spektralen Anteile beider Herzöne voraussagte, wobei die Anwendung analoger Filtertechnik wegen fehlender Adaption eine Lösung der meßtechnischen Aufgabe nicht ermöglichte.

Die Anwendbarkeit digitaler Verfahren wird durch den Fortschritt der Mikroelektronik bestimmt. Die zunehmende Komplexität von Mikroprozessorsystemen mit hoher Rechengeschwindigkeit bietet unter Anwendung spezieller Algorithmen die Voraussetzung, eine Filterung in real-time vorzunehmen.

### 2 Entwurf digitaler Filter

Das Vorgehen bei der Entwicklung digitaler Filter entspricht den bekannten Methoden der Analogtechnik und wird in drei Schritten vorgenommen:

1. Festlegung der gewünschten Filtercharakteristik.
2. Anpassung einer analytischen Funktion an die Übertragungsfunktion.
3. Digitale Approximation der analytischen Funktion.

Eine vollständige Beschreibung eines Filters erfolgt sowohl durch seine Übertragungsfunktion  $H(j\omega)$  im Frequenzbereich als auch durch ihre Fouriertransfor-

\* Diese Arbeit entstand während eines Gastaufenthaltes von Prof. Li-gao Zhou am Zentralinstitut für Biomedizinische Technik in Erlangen 1981.

mierte im Zeitbereich, der Impulsantwort  $h(t)$  [6]. Die Filterung des Signals  $x(t)$  läßt sich entweder durch die Faltung mit der Impulsantwort im Zeitbereich oder durch Multiplikation mit der Übertragungsfunktion im Frequenzbereich vornehmen.

Das Frequenzspektrum der Ausgangsgröße  $y(t)$  ergibt sich durch Multiplikation der Frequenzspektren von Eingangsgröße  $x(t)$  und Filter  $H(j\omega)$ .

$$Y(j\omega) = X(j\omega) \cdot H(j\omega) \quad (1)$$

Die Faltung der Eingangsgröße  $x(t)$  mit der Impulsantwort des Filters liefert direkt die Ausgangsgröße  $y(t)$ .

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \cdot h(t-\tau) d\tau \quad (2)$$

Bei linearen Systemen ist die Übertragungsfunktion rational und läßt sich durch Polynome approximieren. Die zugehörige unendliche Impulsantwort muß zur

praktischen Filterung auf eine endliche Impulsantwort reduziert werden, wobei sich der dadurch entstehende Fehler durch Wahl geeigneter Algorithmen innerhalb vorgegebener Grenzen halten läßt. Für Filtercharakteristiken niedriger Ordnung ist die zu berechnende Impulsantwort einfach. Im Gegensatz hierzu ist die digitale Realisierung von Filtern höherer Ordnung schwierig, wenn nicht sogar unmöglich. Diese Einschränkung im Einsatz digitaler Filter beruht auf der begrenzten Rechengeschwindigkeit und der daraus resultierenden begrenzten Bandbreite für den real-time Betrieb [5]. Für die praktische Anwendung sind daher nur solche Methoden von Interesse, bei denen eine analytische Approximation der Übertragungsfunktion sich vereinfacht durchführen läßt.

### 3 Vereinfachte Entwurfsverfahren digitaler Filter

Im folgenden werden Methoden vorgestellt, die auf eine analytische Approximation analoger Strukturen verzichtet. Die dazu notwendigen Rechenalgorithmen bestehen im wesentlichen aus Multiplikation, Faltung und Fouriertransformation und sind in der Systemsoftware vorhanden.

Eine optimale Störunterdrückung läßt sich nur durch eine dem Signalspektrum angepaßte Filtercharakteristik erreichen. Die einfachen Filterstrukturen wie der ideale Tiefpaß, Hochpaß, Bandpaß bzw. die Bandsperre sind durch eine reelle Übertragungsfunktion gekennzeichnet und, wie Bild 1a zeigt, nachzubilden.

$$Y(j\omega) = [H(j\omega)] \cdot X(j\omega) \quad (3)$$

Die zugehörige Impulsantwort berechnet sich durch inverse Fouriertransformation aus der Übertragungsfunktion (Gl. 5). Die anschließende Faltung des abdominalen Phonosignals Bild 2c mit der Impulsantwort Bild 2b eines idealen Bandpaßfilters Bild 1a zeigt das in Bild 2d dargestellte fetale Phonosignal. Deutlich läßt sich aus dem in Bild 2d dargestellten Phonogramm das Vorhandensein zweier jeweils zu einem Kontraktionszyklus gehörenden Herzöne erkennen. Die Wirksamkeit des digitalen Filters wurde im vorliegenden Beispiel unter Anwendung der PDP 11 mit der bei Digital Equipment Corp. vorhandenen Software [2] nachgewiesen, wobei ein auf Band aufgenommene abdominales Phonosignal ausgewertet wurde.

Eine zweite digitale Filtermethode ergibt sich im Frequenzbereich, wenn das durch die diskrete Fouriertransformation erhaltene Frequenzspektrum des Signals mit dem Frequenzgang des gewählten Filters multipliziert wird (1, 4). Mittels inverser Fouriertransformation erhält man aus dem so berechneten Frequenzspektrum das gefilterte Signal. Offensichtlich ist diese Methode etwas einfacher zu handhaben, da der Algorithmus der Fouriertransformation bekannt ist und in den meisten Fällen als Systemsoftware bereits vorhanden ist [2]. Der formale Ablauf des Verfahrens ist in Bild 3 dargestellt. Hierbei wird das abdominal ge-

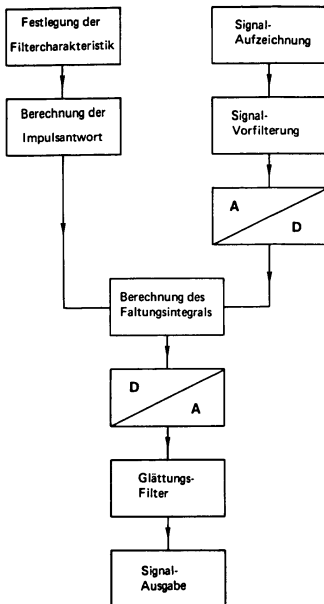


Bild 1. Flußdiagramm zur digitalen Filterung.

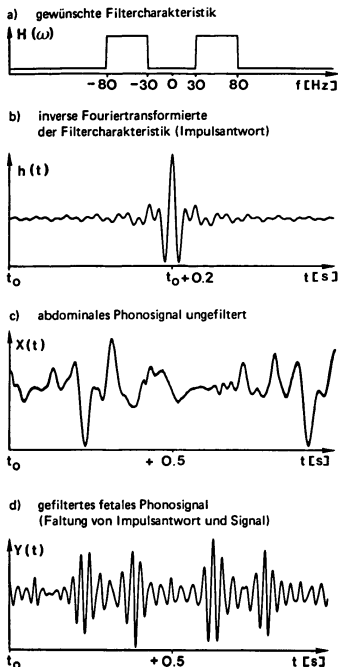


Bild 2. Beispiel der digitalen Filterung des fetalen Phonosignals durch Faltung von abdominalem Phonosignal und Impulsantwort des Filters.

wonnene Phonosignal Bild 3a in den Frequenzbereich transformiert Bild 3b. Die Multiplikation der Fouriertransformierten mit der Filtercharakteristik Bild 3c ergibt das in Bild 3d dargestellte Frequenzspektrum, aus dem durch inverse Fouriertransformation das fetale Phonosignal Bild 3e gewonnen wird. Beide Verfahren zeigen qualitativ das gleiche Ergebnis, wobei die Spaltung des fetalen Signals in zwei Herzöne nachgewiesen wird.

#### 4 Diskussion

Die Qualität der Verfahren hängt vom Algorithmus für die Berechnung der Fouriertransformierten, inversen Fouriertransformierten bzw. des Faltungsintegrals ab.

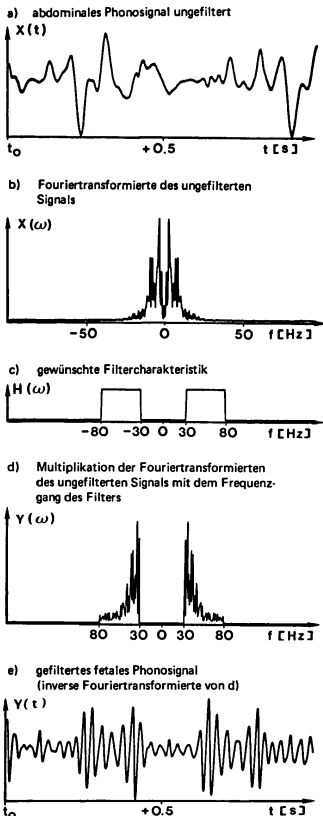


Bild 3. Beispiel einer digitalen Filterung des fetalen Phonosignals durch Multiplikation im Frequenzbereich.

Fouriertransformation

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (4)$$

Inverse Fouriertransformation

$$x(t) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} X(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega \quad (5)$$

### Faltung

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) h(t-\tau) d\tau \quad (6)$$

Die wesentlichen Fehlerursachen bestehen in:

1. Begrenzter Quantisierung des Eingangssignals,
2. der endlichen Registerlänge des Computers,
3. der begrenzten Rechenzeit mit endlichen Integrationsgrenzen.

Um die notwendigen Rechenoperationen in der vorliegenden Filteranwendung zu reduzieren, hat sich die schnelle Fouriertransformation (FFT) bewährt [7, 8]. Neben der endlichen Registerlänge des Computers erzeugt dieser Algorithmus selbst Fehler, die auf der Länge des Signalfensters, seiner Grenzen und der Abtastfrequenz beruhen. Die begrenzte Registerlänge stellt die dominierende Fehlerquelle dar. Um einen Registerüberlauf zu vermeiden, muß nach jeder Rechenoperation das Resultat durch Mittel- oder Beschneiden gekürzt werden. Die Zahl der das Signal repräsentierenden Samples und damit der Rechenoperationen sollten deshalb so niedrig wie möglich sein, wobei die unterste Grenze der Abtastrate durch das Shannon-Theorem gegeben ist. Durch geeignete Wahl der Signalamplitude bei voller Ausnutzung des Dynamikbereiches und der Abtastrate lassen sich die Berechnungsfehler bei einer 16 Bit Wortlänge kleiner als 1% halten.

Die beiden vorgestellten digitalen Filtermethoden zeichnen sich gegenüber der Anwendung von Analogfiltern durch hohe Flexibilität und durch einfache Handhabung aus. Da sowohl die Filtergrenzen als auch ihre Steilheit einfach nachgebildet werden können, sind beide vorgestellten Methoden für die diagnostische Anwendung geeignet. Auch bei der Filterung stark abgegrenzter Frequenzbereiche wie z. B. das 50-Hz-Sperrfilter zeigen beide Verfahren gute Ergebnisse.

Am Beispiel des fetalen Phonokardiogramms konnte gezeigt werden, daß die digitale Filterung biologischer

Summensignale besonders wirkungsvoll ist, da die für die Abtrennung der Nutz- von Störsignalen steilen Filtergrenzen vorausgesetzt werden können. Die relativ niedrigen Bandbreiten bieten die Möglichkeit der real-time Analyse des fetalen Phonokardiogramms, die eine wichtige Ergänzung zum abdominalen EKG darstellt.

### Literatur

- [1] Bronstein, I. N., K. A. Semendjajew: Taschenbuch der Mathematik. Harry Deutsch Verlag, Frankfurt a. Main, 476 (1973)
- [2] Digital Equipment Corporation, LAB Applications - 11, System Reference Manual. Maynard Massachusetts 1974
- [3] Hammacher, K.: Neue Methode zur selektiven Registrierung der fetalen Herzschlagfrequenz. Geburtsh. u. Frauenheilk. 22 (1962), 1542
- [4] Nagel, J., M. Schaldach: Processing the abdominal fetal ECG using a new method in Fetal and Neonatal Physiological Measurements. Editor P. Rolfe, Pitman Medical Limited, Turnbridge Wells, 9-19 (1980)
- [5] Oppenheim, A. V., R. W. Schäfer: Digital Signal Processing. Englewood Cliffs, New Jersey 1975
- [6] Unbehauen, R.: Systemtheorie. Oldenbourg, München 1980
- [7] Yoganathan, A. P., R. Gupta, F. E. Udwadia, J. W. Miller, W. H. Corcoran, R. Sarma, J. L. Johnson, R. J. Bing: Use of the fast Fourier transform for the frequency analysis of the first heart sound in normal man. Med. & Biol. Eng. 14 (1976), 69
- [8] Yoganathan, A. P., R. Gupta, F. E. Udwadia, W. H. Corcoran, R. Sarma, R. J. Bing: Use of the fast Fourier transform in the frequency analysis of the second heart sound in normal man. Med. & Biol. Eng. 14 (1976), 455

121

Anschriften der Verfasser:  
Prof. Li-gao Zhou  
Department of Electrical Engineering  
Qinghua University  
Peking (Beijing)  
VR China

Dipl.-Ing. P. Kartmann  
Dr. rer. nat. J. Nagel  
Prof. Dr. M. Schaldach  
Zentralinstitut für Biomedizinische  
Technik  
Turnstraße 5  
D-8520 Erlangen