

Wavelet Transformation zur Signal-Rauschabstandsverbesserung von Audiosignalen

Jan Krebber

Institut für Kommunikationsakustik (IKA), Ruhr-Universität Bochum, D-44780 Bochum und Tampere University of Technology/Finland, Department of Information Technology, Signal Processing Laboratory, krebber@ika.ruhr-uni-bochum.de

1. Einleitung

Seit der Entwicklung der schnellen Wavelet-Transformation (Fast-Wavelet-Transform) im Jahre 1983 ist die Wavelet-Transformation nicht mehr nur den mathematischen Spezialisten vorbehalten, sondern auch für Ingenieure und Physiker anwendbar. Darüber hinaus ist es heute möglich, sie einfach zu berechnen und zu programmieren. Im Bereich der Bildverarbeitung ist die Wavelet-Transformation schon nicht mehr weg zu denken, und auch im Audiobereich ist die Wavelet-Transformation dabei, sich zu etablieren (z.B. MPEG4, perzeptive Kodierung). Ein Vorteil der Wavelets ist, dass man durch geschickte Wahl des verwendeten Wavelets (Wellchen oder kleine Welle) eine dem Signal angepasste Transformation erreichen kann.

2. Grundlagen

Die Wavelet Koeffizienten werden durch Faltung des Eingangssignal mit dem Wavelet gewonnen.

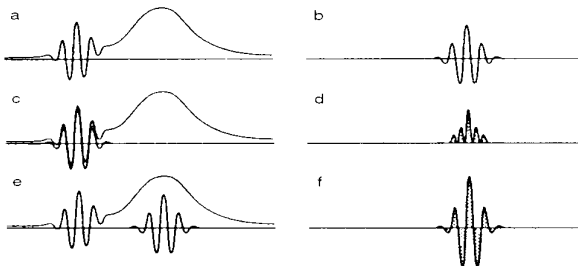


Fig.1 Koeffizientengewinnung mit der Wavelet-Transformation [Burke, 1998]

Fig.1 zeigt die Koeffizientengewinnung und ist wie folgt zu interpretieren: a) Eingangssignal, b) Wavelet, c) Faltung (hier: Vergleich des Eingangssignal mit dem Wavelet), d) Integration über die „übereinstimmende“ Fläche ergibt den Koeffizienten; in diesem Beispiel ergibt sich ein grosser Koeffizient. e) Faltungsvorgang zu einem späteren Zeitpunkt: das Wavelet passt nicht mehr so gut in das Eingangssignal, f) die Integration über die Fläche ergibt einen kleinen Koeffizienten (die Flächen unter der Kurve heben sich bei der Integration beinahe vollständig auf). [Burke, 1998]

Die Faltung im Zeitbereich entspricht einer Multiplikation im Frequenzbereich. Es wird also durch die Wavelet-Transformation ein gefiltertes Signal erzeugt. Sinnvolle Filterfunktionen sind jedoch keineswegs trivial aus einem gegeben Wavelet zu erzeugen, weil häufig Orthogonalität erwünscht ist und Wavelets keine ‚unendlich langen Signale‘ sind. Zur Implementation der Filter ist z. B. [Wickhauser, 1996] zu empfehlen.

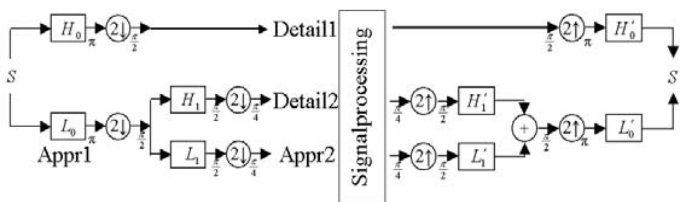


Fig.2 Dekomposition, Signalverarbeitung und Komposition des Signals mit einer Quadratur-Mirror-Filterbank (QMF)

Mit Hilfe des in Fig.2 gezeigten Aufbaus lässt sich ein beliebiges Signal analysieren und synthetisieren. Zuerst findet eine Aufspaltung in *Detail 1* und *Approximation 1* durch Filterung mit den entsprechenden Filtern statt. Anschliessend wird ein Downsampling um den Faktor zwei durchgeführt, um eine in der Gesamtsumme gleiche Zahl von Samples zu erhalten (das Eingangssignal wird unbearbeitet parallel auf das H_0 und L_0 Filter gegeben). Diese Schritte werden nun mit den Signalen *Approximation 1* bis *Approximation (n-1)* wiederholt. Zur weiteren Signalverarbeitung erhält man nun *Detail1, ..., Detail n* und *Approximation n*. Zur Rekonstruktion des Signals mit den bearbeiteten *Details* und der *Approximation n* wird zuerst ein Upsampling um den Faktor 2 durchgeführt, gefolgt von der Filterung mit H' bzw. L' und anschließender Addition. In der Regel sind H_n und L_m , sowie H'_n und L'_n zueinander orthogonal. H'_n ist das zu H_n bzw. L'_n das zu L_n inverse Filter, so dass man von einer Quadrature-Mirror-Filter-(QMF) Struktur sprechen kann.

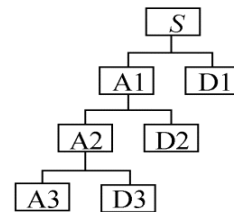


Fig.3 Wavelet Tree Darstellung

In diesem Beispiel wird die Dekomposition bis zur dritten Ebene vorgenommen. Das Signal S lässt sich wie folgt darstellen:

$$S = A1 + D1$$

$$S = A2 + D1 + D2$$

$$S = A3 + D1 + D2 + D3$$

3. Anwendungen zur Signal-Rauschabstandsverbesserung

Bislang sind zwei Verfahren etabliert. Das erste, das *Linear Denoising*, beruht auf dem Ansatz der Tiefpassfilterung, während im *Non-linear Denoising* versucht wird, die Rauschenergie von der Signalenergie zu subtrahieren.

3.1 Linear Denoising

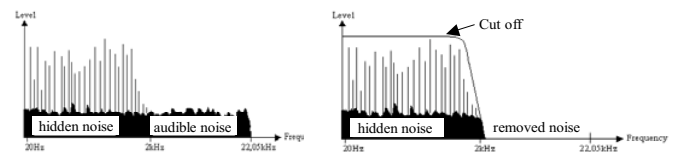


Fig.4 Tiefpassfilterung

Hierbei wird der untere Frequenzanteil des Rauschens durch das Nutzsinal überdeckt und der obere, störende Frequenzanteil des Rauschens durch das Tiefpassfilter „abgeschnitten“.

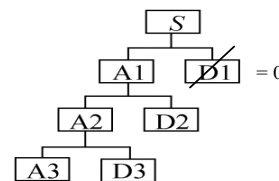


Fig.5 Detail 1 zu Null setzen

Um nun bei einem wavelettransformierten Signal den oberen Teil des Frequenzspektrums „abzuschneiden“ werden die Koeffizienten des *Detail1* zu Null gesetzt. Um die Cut-off-Frequenz weiter nach unten zu setzen, können weitere *Details* gleich Null gesetzt

werden.

Ein Problem dabei besteht in der sehr groben Auflösung. Da die Wavelet-Transformation normalerweise auf der QMF-Struktur beruht, sind nach dieser Methode nur Cut-Off-Frequenzen im Oktavabstand möglich. Die Cut-Off-Eigenschaften verhalten sich allerdings anders als man es von denen eines analogen, im Oktavabstand gefilterten Signal her kennt. Eine Eigenschaft der Wavelet-Familie ist die Veränderung des Cut-Off-Verhaltens bei Änderung der Ordnung (bei gleicher Skalierung und Dehnung). Ein Parameter ist die Cut-Off-Frequenz, welche mit steigender Ordnung sinkt. Hiermit lässt sich die Problematik der starren Oktavstruktur aufheben.

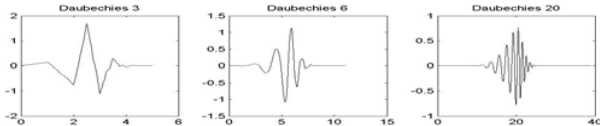


Fig.6 Mitglieder der Daubechies Wavelet Familie, der Ordnungen 3, 6, 20,

Ein weiteres Problem ist die Erzeugung von Wavelets mit hoher Ordnung (>20), weil hier der Rechenaufwand zu groß wird. Eine Möglichkeit um dennoch Wavelets mit hoher Ordnung zu erzeugen, stellt die Wavelet Iteration da. Hierbei wird zuerst die Waveletdekomposition mit einem Wavelet aus einer Waveletfamilie durchgeführt, das 1. Detail zu Null gesetzt, und anschließend das Signal wieder rekonstruiert. Das so gewonnene neue Signal wird nun erneut dekomponiert, jedoch mit einem anderen Wavelet aus der

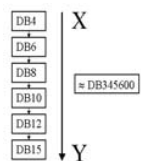


Fig.7 Waveletiteration gleichen Wavelet-Familie. Dazu wird wieder das 1. Detail zu Null gesetzt und das nächste Signal rekonstruiert. Die neue Ordnung lässt sich dann als Produkt der iterierten Ordnungen angeben.

Hier fehlen bislang jedoch effektive Reglerstrukturen, um die gewünschte Cut-Off-Frequenz mit der Iterationstiefe zu verbinden. Auch sollte weiter untersucht werden, welche Wavelet-Familien am besten geeignet sind, und welche Vor- und Nachteile die jeweilige Wavelet-Familie bezüglich des Cut-Off-Verhaltens mit sich bringt.

3.2 Non Linear Denoising

Bisher bekannte Verfahren auf FFT Basis nutzen z.B. einen Noise Print (reines Rauschen der Rauschquelle) zur Schätzung des Spektrums des Rauschens und subtrahieren anschließend das geschätzte Rauschspektrum vom Signal.

In der Wavelet-Transformation sind bislang zwei Verfahren üblich:

1. Hard Thresholding: Hier werden die Koeffizienten, die unterhalb eines Thresholdwertes liegen, zu Null gesetzt. Die Koeffizienten oberhalb des Thresholds bleiben unverändert.
2. Soft Thresholding: Auch hier werden die Koeffizienten unterhalb eines Thresholdwertes zu Null gesetzt. Allerdings subtrahiert man den Thresholdwert von den Koeffizienten, die oberhalb der Schwelle liegen. Es findet dabei ein Energieverlust statt.

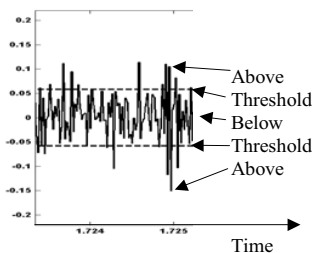


Fig. 8 Threshold 1.Detail

Im Audibereich hat bislang nur das zweite Verfahren Verwendung gefunden. Das scharfe Ein- und Ausschalten der Koeffizienten macht sich als störendes Knacken bemerkbar und wird durch das Soft Thresholding vermindert, bleibt aber weiterhin als Artefakt deutlich wahrnehmbar. Das Phänomen ist ähnlich zu einem flatternden Gate aus dem

Bereich der Studio- oder Beschallungstechnik.

4. Diskussion und Ausblick

Bisher sind die bekannten Algorithmen zur Signal-Rauschabstandsverbesserung auf Waveletbasis nur für Signale mit einem geringen Rauschanteil geeignet. Bei einem hohen Rauschanteil treten vermehrt Artefakte auf. Hier ist zu klären, ob diese Artefakte bei definierten Benutzergruppen (z. B. Handybenutzern) tolerabel sind. Auch stationäre Hintergrundgeräusche können bislang nur bedingt eliminiert werden, da mit der herkömmlichen Wavelet-Transformation z. B. Notchfilter nicht realisierbar sind. Desweiteren fehlt es z. Zt. noch an Algorithmen, um die dekomponierten Signalanteile effektiv zu bearbeiten, wie z.B. Threshold-Algorithmen (die bislang bekannten Algorithmen erzielen nur selten verwertbare Ergebnisse).

Das als „Knacken“ beschriebene Artefakt beim *Non Linear Thresholding* könnte durch Dither-Algorithmen gemildert werden. Denkbar sind auch Ansätze aus der Regelungstechnik, um ein „Smoothing“ der Koeffizienten zu erzielen.

Beim Linear Thersholding gilt es, das Problem der Regelung der Iterationstiefe, abhängig von der Cut-Off-Frequenz, zu lösen. Darüber hinaus sind grundsätzliche Untersuchungen zur Eignung der einzelnen Waveletfamilien notwendig.

Die Wavelet-Forschung stellt im Bereich der Akustik sicherlich einige interessante neue Ansätze bereit, die es weiter zu erforschen gilt. Durch die QMF-Struktur ist die Wavelettransformation der auditiven Signalverarbeitung ähnlicher als die FFT, welche äquidistant ausgelegt ist. Speziell die SNR-Verbesserung mit möglichst wenig Beeinflussung des Orginalsignals auf Waveletbasis stellt eine interessante Herausforderung dar.

Literatur

Burke Hubbard, B. (1998). *The World According to Wavelets, The Story of a Mathematical Technique in the Making*, A K Peters, USA-MA-Natick.

Donoho, D., Duncan, M., Huo, X., Levi, O. (1999). *Wavelab 802 for Matlab 5.x*, <http://www-stat.stanford.edu/~wavelab>

Kahrs, M., Brandenburg, K. (1998). *Applications of digital signal processing to audio and acoustics*, Kluwer Academic Publishers, USA-MA-Norwell

Louis, A. K., Maass, P., Rieder, A. (1998). *Wavelets: Theorie und Anwendung*, Teubner, Germany-Stuttgart.

Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G. Poggi, J.-M. (1996). *Wavelet Toolbox For Use with MATLAB*, The MathWorks, Inc. USA-MA-Natick.

Strang, G., Nguyen, T. (1996). *Wavelets and filter Banks*, Wellesley-Cambridge Press, USA-MA- Wellesly.

Vetterli, M. (2001). *Modern Signal Processing: Wavelets versus Fourier*, Lecture notes, CERN Lectures, May 14-16 2001, Swiss-Geneva.

Wickhauser, M. V. (1996) *Adaptive Wavelet Analyse, Theorie und Software*, (original english title: *Adapted Wavelet Analysis from Theory to Software*), Viehweg, Germany-Wiesbaden.