Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 92 (2001)

Heft: 1

Artikel: Gefilterte Multitone-Modulation

Autor: Cherubini, Giovanni / Eleftheriou, Evangelos / Ölçer, Sedat

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-855656

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Gefilterte Multitone-Modulation

Verfahren für Very High-Speed Digital Subscriber Lines (VDSL)

Eine der grössten Herausforderungen des Informationszeitalters ist es, enorme Datenmengen effizient und zuverlässig über das am weitesten verbreitete Kommunikationsnetz, nämlich über das Telefonnetz, zu übertragen. Mittels einer als Digital Subscriber Line (DSL) bekannten Technologie wird zunehmend die noch weitgehend brachliegende Kapazität der Telefonleitungen erschlossen, welche ein Tausendfaches der heute benützten Kapazität beträgt.

Dieser Beitrag befasst sich mit den Basisfunktionen für die Multiträger-Modulationsmethode. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Filtered Multitone (FMT) Modulation für VDSL (Very High-Speed Digital Subscriber Lines). Es wird gezeigt, dass die hohen Anforderungen an VDSL-Übertragungssysteme, insbesondere das Problem des Spektrum-Managements, mittels Multiträger-Kanalzerlegung durch Filterung, Einfügen von Zusatzbandbreite und Entzerrung gelöst werden können. Die Basisfunktionen der FMT-Modulation werden aus der Perspektive der Filterbanken unter Berücksichtigung der Zusatzbandbreite diskutiert.

VDSL ist die letzte Hürde bei der Übertragung von mehreren MBit/s über das Telefonnetz und gleichzeitig die wohl grösste Herausforderung an die Modem-Ingenieure. Komplexe Probleme können oft durch das altbewährte Konzept von «divide et impera» gelöst werden, und dies scheint auch heute noch im hochmodernen Ingenieurwesen unseres Informationszeitalters der vorherrschende Lösungsansatz zu sein. So ist es zwar ironisch, aber wohl unvermeidlich, dass für die erfolgreiche VDSL-Übertragung über eine einzelne und an diese angrenzende Leitungen eine stark verfeinerte Version von «divide et impera» verwendet werden muss, die unter dem Namen Multiträger-Übertragung bekannt ist.

Adresse der Autoren
Dr. Giovanni Cherubini, Dr. Evangelos Eleftheriou und *Dr. Sedat Ölçer*, IBM Research, Forschungslaboratorium Zürich
8803 Rüschlikon
{cbi,ele,oel}@zurich.ibm.com

Der Kern von Multiträger-Übertragung ist die Überführung der komplexen Problemstellung der Breitbandübertragung über ein Aderpaar in viele, leicht zu bewältigende Schmalbandübertragungs-Problemstellungen. Shannons grundlegende Publikation von 1948 [1], welche das Informationszeitalter einläutete, identifiziert Multiträger-Übertragung eindeutig als die beste Methode zur Lösung komplexer Übertragungsprobleme. Hier sei auch darauf verwiesen, dass neuere Erweiterungen der Arbeit von Shannon in der Tat bestätigen, dass das Multiträger-Frequenzteilungsmultiplexverfahren auch für Mehrbenutzerkanäle optimal ist.

Wie nachfolgend gezeigt wird, gibt es viele verschiedene Ansätze zu Multiträger-Übertragung und genauso viele Ansichten, welches denn nun die geeignetste Einzelimplementierung unter ganz spezifischen Bedingungen sei [2]. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der sogenannten FMT-Übertragung als einer dieser Multiträger-Methoden. Speziell werden ihre Stärken auf dem Gebiet des Spektrum-Managements aufgezeigt, welches eine Haupteinschränkung im Aufbau von DSL ist. DSL ist nämlich mit dem Unbundling konfrontiert. Unbundling bedeutet, dass verschiedene Service-Provider verschiedene Verbindungen über die gleichen Multipaarkabel teilen müssen. Diese Verbindungen führen zu gegenseitigem Nebensprechen. Somit kommt der Entwicklung von Übertragungsmethoden, die nicht zu solchen gegenseitigen Beeinträchtigungen führen, ein besonderes Gewicht zu. Das Ziel von FMT-Technologien ist es, ganz allgemein alle Vorteile der Multiträger-Übertragung zu wahren und gleichzeitig das spezielle Problem des Unbundling des lokalen Netzes zu behandeln. Für Multiträger-Übertragung gibt es auch andere Lösungsansätze, wie z.B. die auf Zipper basierte DMT (Discrete Multitone)-Modulation [3]. Alle diese Methoden weisen spezifische Eigenschaften auf, die beim Unbundling hilfreich sind.

Übersicht über die Filterbanksysteme

Schon früh wurde auf dem Gebiet der Signalverarbeitung und Datenübertragung erkannt, dass die Aufteilung eines einzelnen Signalfrequenzbandes in verschiedene, aneinander angrenzende Bänder ein sehr effizienter Weg ist, um Systeme aufzubauen. Generell lässt sich die Kanalzerlegung in Form von überlappenden oder nichtüberlappenden Teilbändern realisieren (Bild 1). In der Signalverarbeitung wurde Teilbandzerlegung für die Kurzzeitspektralanalyse von Sprachsignalen eingeführt, ursprünglich in analoger, später auch in digitaler Form. Es zeigte sich, dass mittels digitaler Abbildung von Sprachsignalen und individueller Quantisierung der Teilbandsignale (Teilbandcodierung) eine bessere Signalqualität erzielt werden kann als durch Quantisierung des Breitbandsignales. Aus diesen Erkenntnissen entstand der Quadraturspiegelfilter (QMF, Quadrature Mirror Filter) [4] als Grundbaustein für die spektrale Aufteilung. Bild 2 zeigt die allgemeine Form einer QMF-Bank mit M Teilbändern und einem Subsampling/Upsampling-Faktor K, wobei gilt $K \leq M$. Eine solche Filterbank kann eine parallele Anordnung von Filtern sein, die einen gemeinsamen Input haben (Analysefilterbank) oder deren Output addiert

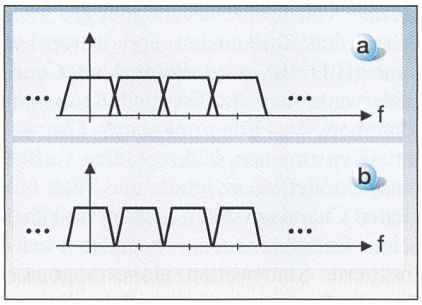

Bild 1 Spektralunterteilung in benachbarte und überlappende (a) bzw. nicht überlappende (b) Bänder

wird, um ein einziges synthetisiertes Signal zu erhalten (Synthesefilterbank). Ist K = M, dann wird die Filterbank als kritisch abgetastet (critically sampled) oder maximal dezimiert (maximally decimated) bezeichnet. Eine uniforme Filterbank resultiert, wenn die Frequenzantworten $H_i(f)$, i = 1,..., M–1, durch Verschieben der Frequenzantwort eines Filterprototyps $H_0(f)$ (mit Impulsantwort $h_0(n)$) erzielt werden:

$$H_i(f) = H_0(f - \frac{i}{T}) \quad \Updownarrow \quad h_i(n) = h_0(n) \cdot e^{j2\pi ni/M}, i = 1, \cdots, M-1 \tag{1}$$

Der Hauptanreiz, das Spektrum eines Kommunikationskanals in Teilkanäle aufzuteilen und die Daten parallel über diese Teilkanäle zu übertragen, bestand darin, die in der Datenübertragung auftretenden typischen Probleme wie Amplituden- und Phasenverzerrungen und Impulslärm zu reduzieren. Gute Leistung bedeutet, dass im Idealfall der Signalempfang frei von Intersymbol- (ISI) wie auch von Interteilkanalinterferenzen (ICI) ist. Obwohl Letzteres durch Vermeiden von Spektralüberlappungen zwischen den Teilkanälen erzielt werden kann (Bild 1b), wird dieser Ansatz normalerweise mit der Begründung ausgeklammert, dass Filter mit glatten Charakteristiken zu einem inakzeptablen Verlust an Spektraleffizienz führen und Filter mit steilen Charakteristiken nicht praktikabel seien. Frühe Arbeiten verwendeten zeitlimitierte Sinuswellen als orthogonale Basisfunktionen, um parallele Datenübertragung zu erzielen. Diese Funktionen führen zu überlappenden Spektren des Typs sinc(f) (siehe z.B. Bild 5a). Später wurden in [5] gewisse Orthogonalitätsbedingungen eingeführt, um Filterübertragungsfunktionen zu erhalten, bei welchen die Spektralüberlappung auf nur zwei benachbarte Teilkanäle beschränkt ist, während ISI und ICI am Ausgang des bekannten Übertragungskanals vermieden werden. Motiviert durch diese Arbeit, befassten sich die Autoren von [6] mit einem analogen Übertragungssystem, in dem Orthogonalität zwischen den sich überlappenden Teilkanälen mittels Offset-QAM (Offset Quadrature Amplitude Modulation) erzielt wurde.

Wenig später erschien eine Arbeit [7], in der dargelegt wurde, dass sich parallele digitale Datenübertragung effizient realisieren lässt, wenn die diskrete Fouriertransformation (DFT) mittels der schnellen Fouriertransformation (FFT) implementiert wird. In dem in [7] vorgestellten System erfolgt die Modulierung durch Anwendung der DFT auf aufeinander folgende Blöcke komplexer Übertragungssymbole, während eine ähnliche DFT-Operation an der Empfängerseite erfolgt. In nachfolgenden Umsetzungen wurden Signalmodulierung und -demodulierung normalerweise durch eine inverse diskrete Fouriertransformation (IDFT) bzw. durch eine DFT-Operation durchgeführt. Die serielle Übertragung von DFT-Output-Blöcken entspricht einer Filterung mit rechteckigem Fenster, und somit erhält man für jeden Teilkanal eine sinc(f)-förmige Spektralcharakteristik. In Bezug auf ISI und ICI auf der Empfängerseite werden in [7] zwei wichtige Techniken beschrieben: Wenn die DFT-Blöcke vor der Übertragung zyklisch verlängert werden und eine ausreichende Anzahl von Teilkanälen ausgewählt wird, so kann grundsätzlich jeder Teilkanal durch einen komplexen Einzelkoeffizient-Entzerrer entzerrt werden. Empfängerseitig kann zudem der ICI-Effekt abgeschwächt werden, wenn am DFT-Output vor der Signalübertragung eine Filterung mit nichtrechteckigem Fenster durchgeführt wird. Die heute weit verbreitete Multiträger-Technik der DMT [8] lehnt sich an das oben beschriebene, auf DFT basierte Modulationsprinzip an.

Bild 3 zeigt ein Filterbankkommunikationssystem, welches kritische (K = M) oder nichtkritische (K > M) Abtastung verwendet. Gegenüber der Teilband-Codierungsanordnung in Bild 2 ist hier die Abfolge von Analyse- und Synthesefilterbank vertauscht. Die Inputsymbole $A_k^{(0)}$, $A_k^{(1)}$, ... , $A_k^{(M-1)}$ werden parallel über M Teilkanäle mit einer Symbolrate von 1/T übertragen. Senderseitig wird das gleiche Basisband-Prototypfilter $H_0(f)$ auf allen Zweigen verwendet. Die Empfängerfilter im Analysebereich entsprechen den Filtern im Synthesebereich[1]. In einer Filterbank mit nichtkritischer Abtastung ist der Abstand zwischen den Zentralfrequenzen $f_i = i \cdot (K/MT)$, i = 0, 1,..., M–1, zweier aufeinander folgenden Teilkanäle grösser als die Symbolrate 1/T.

Bellanger et al. zeigten, dass für den kritisch abgetasteten Fall, K = M, die Filterbanken beim Sender wie auch beim Empfänger auf gleiche Art realisiert werden können [9], wie in Bild 4 dargestellt. Diese Arbeit war in der Tat ein Meilenstein auf dem Gebiet der Multirate-Filterbanken, weil sie zeigte, dass man uniforme digitale Filterbanken durch Kombination von Polyphasenfilterung und diskreten Fouriertransformationen effizient realisieren kann. Die M-Zweig-Filter mit Übertragungsfunktionen $H^{(0)}(f)$, $H^{(1)}(f)$, ..., $H^{(M-1)}(f)$ und Impulsantworten $h^{(0)}(k)$, $h^{(1)}(k)$, ..., $h^{(M-1)}(k)$ sind Basisbandfilter, welche die N Polyphasenkomponenten des Filterprototyps $H_0(f)$ darstellen. Um die Impulsantwort von Polyphasenfilterkomponenten zu erhalten, werden im Wesentlichen regelmässig T-abständige Stichproben der Impulsantworten $h_0(n)$ des Prototypfilters entnommen, welches T/M-abständige Werte liefert. Anschliessend wird jede Polyphasenfilterkomponente auf einen anderen Zeitbereichpunkt des IDFT-Outputs angewendet. Die Filterbankstruktur mit M-Zweig-Polyphase ist attraktiv, weil die notwendigen Filteroperationen im Symboltakt 1/T statt im Übertragungstakt M/T stattfinden.

Perfekte Rekonstruktion und Spektraleindämmung

Dank der ihnen inhärenten Möglichkeit, Signale mit gewünschten Charakteristiken zu formen, erlauben Filterbanksysteme dem Kommunikationsingenieur grosse Freiheiten im Design. Wie bereits dargestellt, war für die Auswahl von Filtern oft die Vorgabe der vollständigen Eliminierung von ISI und ICI massgebend. Ausgehend von einem idealen Übertragungskanal ohne Signalverzerrung, wird mit dieser Bedingung empfängerseitig die fehlerfreie Wiederherstellung der Übertragungssymbole gewähr-

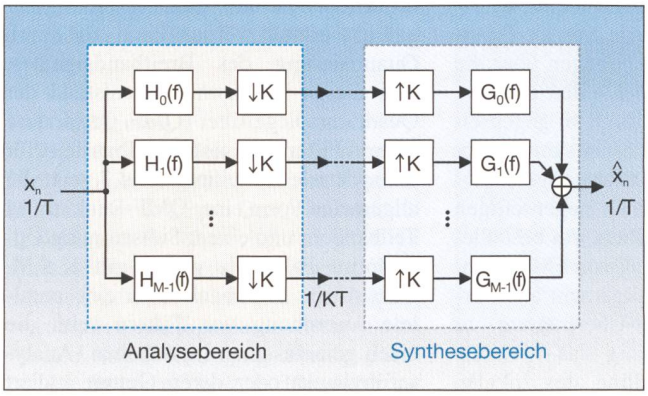

Bild 2 M-Teilband-Generalisierung des Quadraturspiegelfilters (QMF). Subsampling (↓K) und Upsampling (↑K) um einen Faktor K

[1] Mit * wird eine komplexe Konjugation angezeigt.

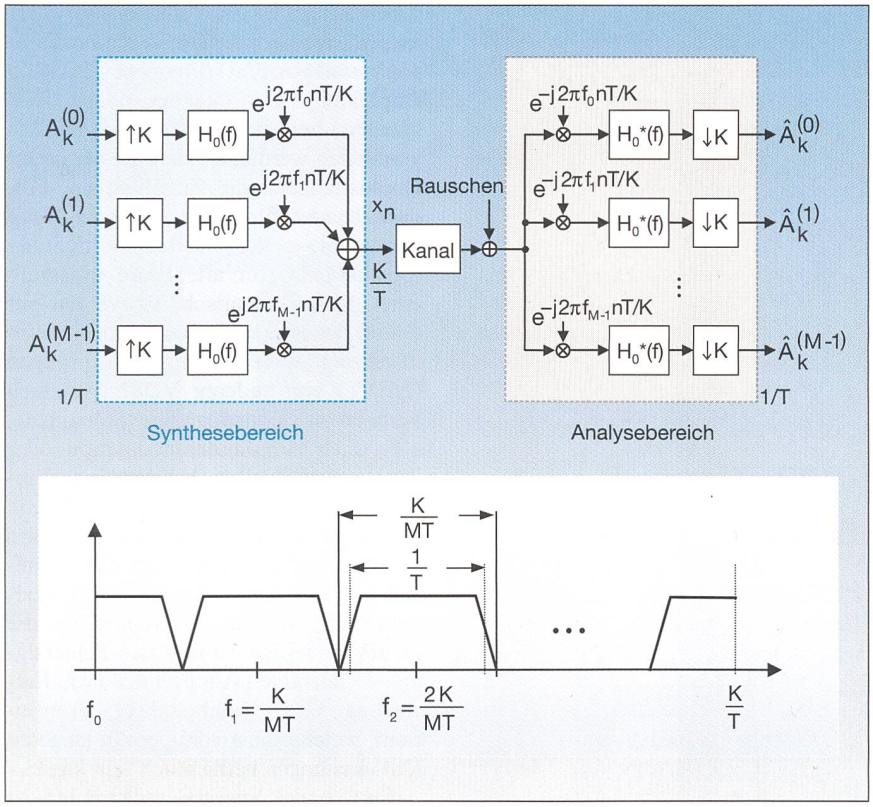

Bild 3 Kommunikationssystem mit Filterbankmodulation
K = M: kritisch abgetastete Filterbank, K > M: nicht kritisch abgetastete Filterbank

leistet. Unter der Annahme von Übertragung über einen idealen Kanal und matched Filterung empfängerseitig lassen sich die Bedingungen einer «perfekten Wiederherstellung», welche man als eine allgemeinere Form des Nyquistkriteriums bezeichnen kann, wie folgt beschreiben:

$$\sum_n h_i(n)\cdot h_i^*(n-\ell M)=\delta_\ell,\ i=0,1\ldots,M-1$$
$$\sum_n h_i(n)\cdot h_j^*(n-\ell M)=0,\ i\neq j \qquad (2)$$

Hier entspricht δ_ℓ dem Kronecker-Delta. So sind zum Beispiel die perfekten Rekonstruktionsbedingungen für DMT-Systeme erfüllt, für welche die Impulsantwort des Prototypfilters wie folgt ausgewählt wird:

$$h_0(n)=\begin{cases}1 \text{ wenn gilt } 0\le n\le M-1\\ 0 \text{ sonst}\end{cases}$$
$$\Updownarrow \qquad (3)$$
$$H_0(f)=\frac{\sin(\pi f M)}{\sin(\pi f)}\cdot e^{-j(M-1)\pi f}$$

und für welche die Impulsantworten der Polyphasenkomponenten $h_0(n)$ einfach durch $h^{(i)}(k) = \delta(k)$ für $i = 0, 1, \ldots, M-1$ gegeben sind, wobei $\delta(k)$ den Einheitsimpuls darstellt. Bild 5a zeigt die mit DMT erhaltenen Teilkanal-Spektraleigenschaften. Die Spektren von nebeneinander liegenden Teilkanälen überschneiden sich ungefähr beim Punkt –3 dB, und die maximale Amplitude des Spektrums ausserhalb des betrachteten Teilkanals erreicht –13 dB. Wir halten fest, dass für eine perfekte Rekonstruktion normalerweise ein beträchtliches Mass an Überschneidung von benachbarten Teilkanälen erlaubt sein muss. Als Nächstes sollen das Filterbankmodulationsverfahren, welches man FMT (Filtered Multitone) nennt und das eine gute Teilkanal-Spektraleindämmung erzielt, sowie die Vorteile dieser Technik für VDSL vorgestellt werden.

Filtered Multitone (FMT) Modulation

FMT bezeichnet ein Filterbankmodulationsverfahren, bei dem die M-Zweig-Filter frequenzverschobene Versionen eines Prototypfilters sind, welcher ein so hohes Mass an Spektraleindämmung erzielt, dass ICI im Vergleich zu den anderen Rauschsignalen vernachlässigbar klein wird. Eine hohe Spektraleindämmung lässt sich leichter erzielen, wenn die Bedingung der perfekten Rekonstruktion etwas gelockert wird und/oder nicht kritisch abgetastete Filterbanken verwendet werden. Darum verwendet FMT-Modulation im Allgemeinen eine nicht kritisch abgetastete Filterbankstruktur (K>M), wie sie in Bild 3 gezeigt wird. Modulation mit einer Zusatzbandbreite a = (K/M) – 1 in jedem Teilkanal ist möglich und gewährleistet eine vollständige Spektraleindämmung innerhalb eines Teilkanals. Für K → M wird der Verlust an Bandbreiteneffizienz verschwindend klein, allerdings zum Preis eines Anstiegs in Implementierungskomplexität, weil dann Filter mit immer steileren Spektralcharakteristiken realisiert werden müssen. Empfängerseitig verwenden FMT-Systeme Teilkanal-Signalentzerrung in der Form von linearen Entzerrern oder Decision-Feedback-Entzerrern (DFE). Vorcodierungstechniken können auch verwendet werden.

Der vorliegende Artikel befasst sich mit linearphasigen Finite-Impulse-Response(FIR)-Prototypfiltern mit T/K-abständigen Koeffizienten der Länge γK, wobei γ eine ganze Zahl ist. Somit besitzt

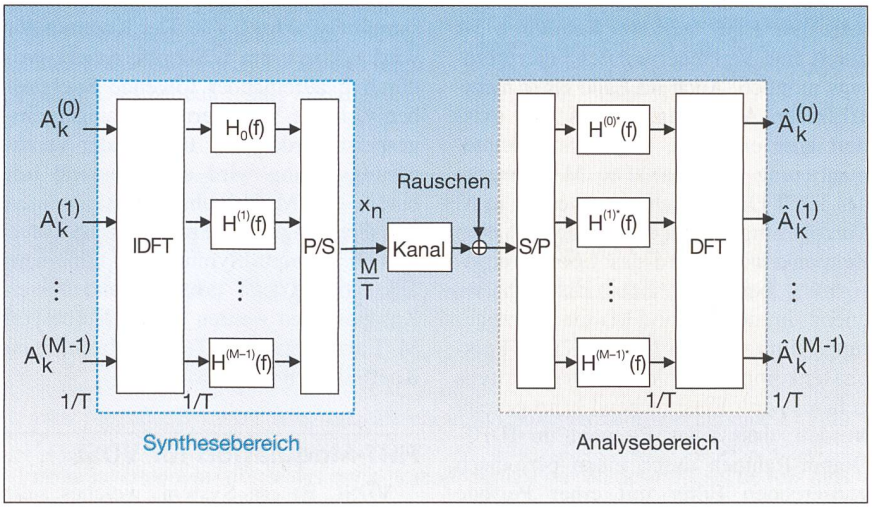

Bild 4 Eine effiziente Realisierung des Filterbanksystems aus Bild 3 für K = M mit diskreter Fouriertransformation (DFT), inverser DFT (IDFT) sowie parallel/serieller (P/S) und seriell/paralleler (S/P) Umwandlung

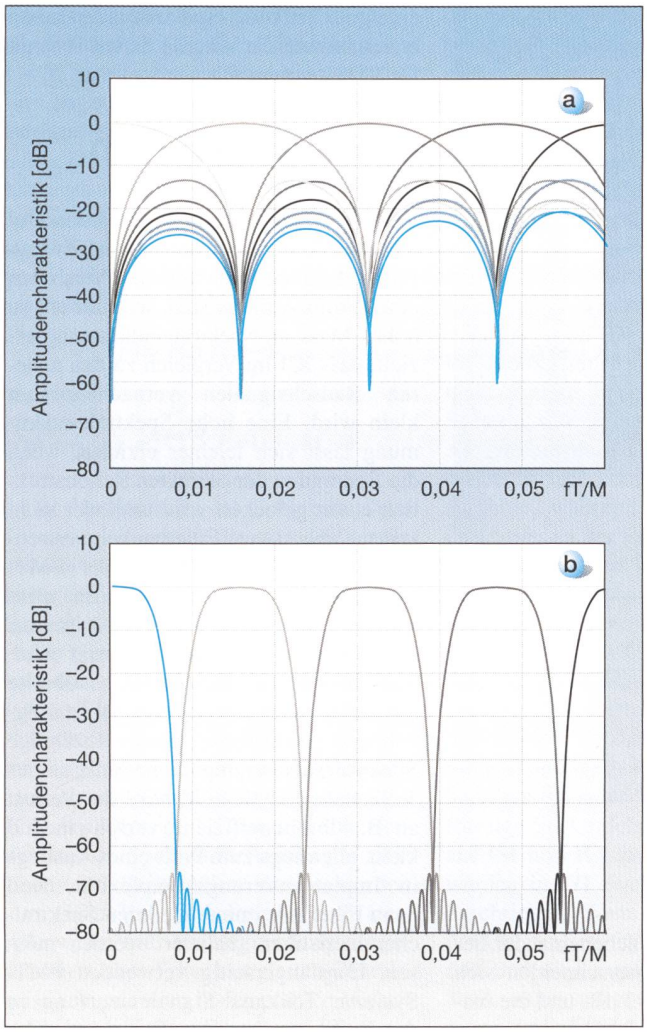

Bild 5 Teilkanalfrequenzsignale von DMT (a) und FMT (b) für $f \in [0, 0{,}06\ M/T]$ und $M = 64$

jeder der K Polyphasenfilterkomponenten γ Koeffizienten. In Bild 5b sind als Beispiel die Spektralcharakteristiken von aufeinander folgenden Teilkanälen, welche aus der Verwendung eines für $M = 64$ und $\gamma = 10$ ausgelegten FIR-Filterprototyps erhalten wurden, zu sehen. Man beachte, dass ausserhalb eines Teilkanals die Energie um mehr als 67 dB herabgesetzt ist. Eine stärkere Reduktion ist durch eine Verlängerung des Filterprototyps möglich. Auch im Falle einer nichtkritischen Abtastung, also $K > M$, existiert eine effiziente FMT-Systemimplementierung (Bild 6a). Die M Elemente des IDFT-Output-Rahmens werden in M Verzögerungsleitungen gespeist. Zum Zeitpunkt nT/K wird das Übertragungssignal x_n berechnet, indem die Signalsequenz in der (n mod M)-ten Verzögerungsleitung mit der (n mod K)-ten Polyphasenkomponente des Filterprototyps gefaltet wird. Entsprechend kann gezeigt werden, dass jedes Element im IDFT-Output-Rahmen durch einen periodisch variierenden Filter mit einer Periode $\mathrm{lcm}(M,K) \cdot T/K$ gefiltert wird. Hierbei ist lcm(M,K) das kleinste gemeinsame Vielfache von M und K. Man beachte, dass wir für $K = M$ die effiziente Implementierung von Bellanger et al., wie sie in Bild 4 gezeigt wird, erhalten. Eine effiziente Implementierung eines FMT-Empfängers ist in Bild 6b dargestellt. Hier setzen wir eine Abtastfrequenz von K/T entsprechend dem Sendesignal voraus und betrachten im Allgemeinen einen Subsampling-Faktor $L \leq K$. Der Kommutator wird zyklisch um L Schritte rotiert, wodurch L aufeinander folgende Stichproben y_n in die Verzögerungsleitungen eingespeist werden. Der Inhalt jeder Verzögerungsleitung wird anschliessend mit einem der M Polyphasenkomponenten des Empfänger-Filterprototyps gefaltet. Das DFT-Output-Symbol wird mit einem Takt von (K/L)/T erhalten, und dessen Komponenten werden in eine Reihe von M Entzerrern mit T(L/K)-abständigen Koeffizienten gespeist.

FMT-Modulation für VDSL

VDSL ist ein System, welches sehr vom Einsatz der Spektraleindämmung profitiert. Die Abschwächung der zwischen benachbarten Teilkanälen auftretenden Signalkoppelung ist ein eindeutiger Vorteil von FDD (Frequency Division Duplexing) mit engliegenden Teilkanälen, bei denen damit Echoeffekte vermieden werden können. Ist bei dieser Duplexmethode die Zuteilung der Frequenzbänder für Übertragung in Netz- (upstream) oder Teilnehmerrichtung (downstream) für alle Paare innerhalb eines Kabels identisch, so werden auf Grund der starken Teilkanal-Spektraleindämmung auch Nebensprechstörungen (NEXT) von anderen VDSL-Systemen vermieden. Schmalbandige Störsignale, z.B. duch Amplitudenmodulation oder Amateurfunkquellen, haben keinen Einfluss auf benachbarte Teilkanäle, wenn die Sidelobe-Charakteristiken auf faire Weise reduziert worden sind. Des Weiteren reduziert eine schwächere Energiekopplung zwischen den Teilkanälen die empfängerseitige Varianz des Fehlersignals in adaptiven Algorithmen (wie Entzerrung oder Symboltaktsynchronisation), welche sonst vor allem in längeren DSL-Leitungen beträchtlich sein kann.

Eine starke Spektraleindämmung ist ausserdem auch für das Spektrum-Management von Vorteil. Beim Unbundling kann Datenverkehr von verschiedenen Anbietern, die möglicherweise auch mehrere Arten von Diensten offerieren, über das gleiche oder ein anderes Aderpaar innerhalb des gleichen Kabels stattfinden. Ein bestimmter Teilkanal kann dann entweder der Upstream- oder der Downstream-Übertragung zugeordnet werden, ohne dass die benachbarten Teilkanäle des gleichen Kabelpaars gestört werden. Starke Spektraleindämmung erleichtert somit die Bereitstellung von Dienstleistungen über Kabel, wenn verschiedene Modulationssysteme koexistieren müssen.

Betrachten wir beispielsweise die erzielbare Datenrate in Abhängigkeit der Kabellänge, wobei wir eine symmetrische Übertragung mit einer Abtastrate von 22,08 M Samples/s und Zipper-ähnlichen FDD voraussetzen. Für dieses Beispiel verwenden wir für den Kanal ein Metallkabel, dessen Übertragungsfunktion eine $\sqrt{(f)}$-Charakteristik aufweist (Abschwächung: 11,1 dB/100 m bei 11,04 MHz), mit 49 NEXT- und 49 Fernnebensprechstörquellen (FEXT) sowie additivem weissem Gauss'schem Rauschen (AWGN) mit einer einseitigen Spektralkraftdichte von −140 dBm/Hz. Die Signalstärke des Sendesignals sei 10 dBm. Das FMT-System in unserem Beispiel verwendet die gleichen linearphasigen Filterprototypen in den Polyphasenfilterbanken für Übertragung und

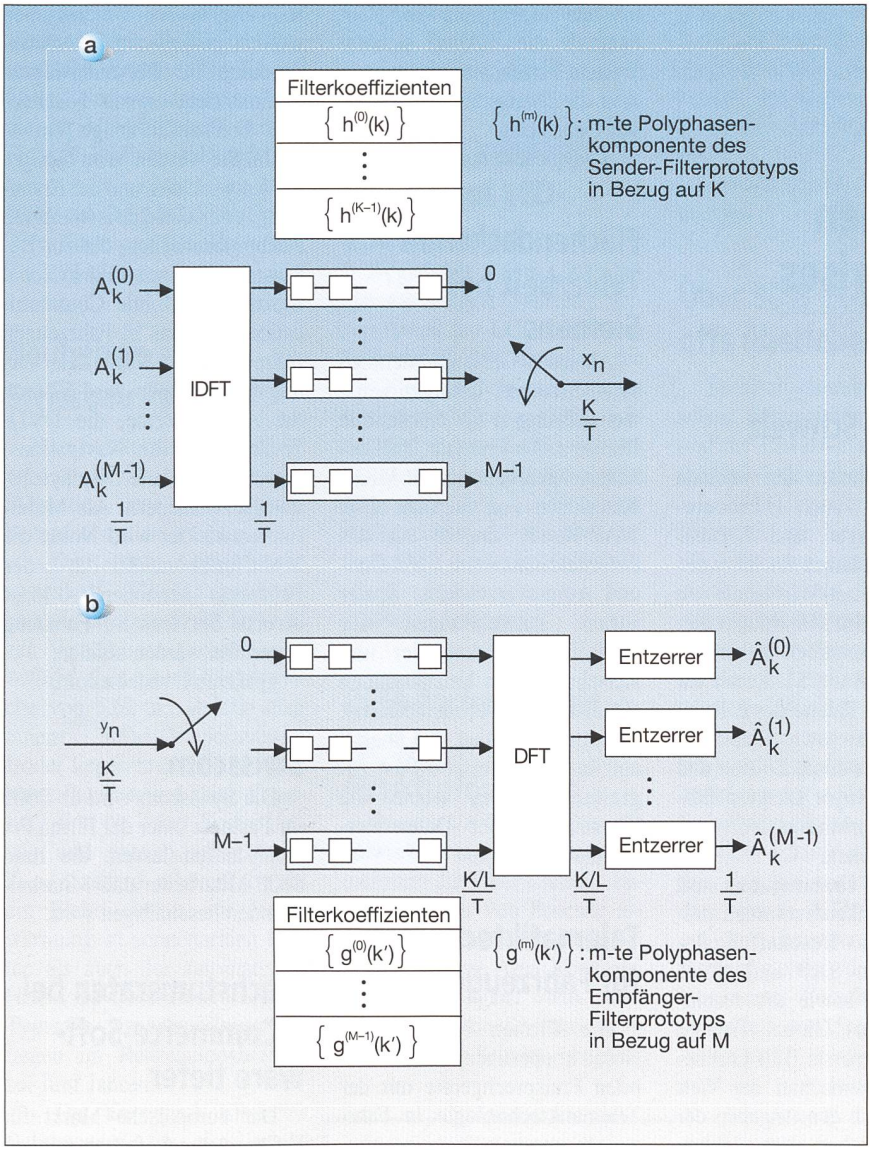

Bild 6 Effiziente Implementierung eines FMT-Modulators und Demodulators für K>M

Empfang, welche für M = 256, K = 288 (Zusatzbandbreite a = 12,5%) und $\gamma = 10$ ausgelegt sind. Mit diesen Parametern erzielt unser System Datenraten von 24,9, 10,3 und 6,5 MBit/s für die drei Kabellängen 300, 1000 und 1400 m.

Schlussbemerkungen

Die FMT-Modulation stellt eine interessante Alternative für VDSL-Übertragung dar, welche zwischen anderen Vorschlägen für Einzel- und Multiträger-Methoden anzusiedeln ist und einige ungewöhnliche Vorteile bezüglich des Spektrum-Managements, des Unbundling sowie des Duplexing aufweist. Einerseits erzielt FMT eine rein digitale Generierung einer Menge von einzelträgerartigen Mehrbandsignalen bei minimalen Anforderungen an die analogen Filter, und anderseits ermöglicht es auf Filterung basierende Implementierungsalternativen zu zyklischen Erweiterungen im Zeitbereich, welche für DMT-Implementierungen typisch sind. Somit kann in FMT digitales Duplexing durch Filterung erzielt werden. Dies bedeutet, dass allfällige Zusatzaufwendungen im Frequenzbereich entstehen.

In dem Masse, wie das Konzept von «divide et impera», welches der Multiträger-Übertragung zu Grunde liegt, die Hürden zu den bewährten Einzelträger-Technologien überwindet, werden Methoden wie die hier diskutierten auch in komplexen Übertragungssituationen vermehrt zum Einsatz kommen. Mögliche Beispiele dafür sind nicht nur das VSDL, sondern auch Kabelmodems und möglicherweise sogar drahtlose Übertragung.

*

Wir möchten Dr. Thomas Mittelholzer für seine technischen Beiträge und Frau Charlotte Bolliger für ihre redaktionelle Hilfe danken.

Referenzen

[1] *C. E. Shannon:* A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal, vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July–Oct. 1948.

[2] *G. Cherubini, E. Eleftheriou, S. Ölçer, J. M. Cioffi:* Filter bank modulation techniques for very high-speed digital subscriber lines. IEEE Commun. Mag., pp. 98–104, May 2000.

[3] *D. J. G. Mestdagh, M. R. Isaksson, P. Ödling:* Zipper-VDSL: A solution for robust duplex communication over telephone lines. IEEE Commun. Mag., pp. 90–96, May 2000.

[4] *D. Esteban, C. Galand:* Application of quadrature mirror filters to split band voice coding schemes. Proc. IEEE ICASSP '77, Hartford, CT, pp. 191–195, May 1977.

[5] *R. W. Chang:* Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission. Bell System Technical J., pp. 1775–1796, Dec. 1966.

[6] *B. Saltzberg:* Performance of an efficient parallel data transmission system. IEEE Trans. Commun. Technology, vol. COM-15, No. 6, pp. 805–811, Dec. 1967.

[7] *S. B. Weinstein, P. M. Ebert:* Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform. IEEE Trans. Commun. Technology, vol. COM-19, No. 5, pp. 628–634, Oct. 1971.

[8] *J. M. Cioffi:* Asymmetrical digital subscriber lines. The Communications Handbook, J. D. Gibson (Ed.), CRC Press Inc., pp. 450–479, 1997.

[9] *M. G. Bellanger, G. Bonnerot, M. Coudreuse:* Digital filtering by polyhase network: application to sample-rate alteration and filter banks. IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. ASSP-24, No. 2, pp. 109–114, Apr. 1976.

Modulation multisonore filtrée

Procédé pour Very High-Speed Digital Subscriber Lines (VDSL)

Un des plus grands défis de l'ère informatique est de transporter efficacement et fiablement d'énormes quantités de données sur le réseau de communication le plus répandu, à savoir le réseau téléphonique. Une technologie appelée Digital Subscriber Line (DSL), soit ligne d'abonné numérique, permet de profiter de la capacité encore inutilisée des lignes téléphoniques, qui est des milliers de fois plus élevée que celle exploitée actuellement.