

Generalized Frequency Division Multiplexing

Leonard Göhrs
l.goehrs@tu-bs.de

I. Einleitung

Die steigenden Erwartungen an bestehenden Mobilfunknetze setzen diese, ihre Betreiber und ihre Entwickler vor ständig neue Herausforderungen.

Während Mobilfunknetze in der Vergangenheit in erster Linie darauf ausgelegt waren unterbrechungsfreie Sprachkommunikation zu gewährleisten, so dominieren heute alle Formen IP-basierter Datenübertragung die Netzauslastung. Die Datenmengen, beispielsweise für Multimediaanwendungen, steigen dabei stetig.

Zukünftige Mobilfunknetze sollen auch in der Lage sein, Machine-to-Machine-Kommunikation abzuwickeln, was zu neuen Herausforderungen führt. Beispiele dafür sind eine große Anzahl von Teilnehmern im Netz, kleine Datenpakete, und geforderte niedrige Latenzen und niedriger Energieverbrauch.

Diesen Anforderungen stehen die negativen Eigenschaften des Funkkanals gegenüber, über den Mobilfunk betrieben wird:

Reflexionen - Insbesondere in dicht bebauten, urbanen Bereichen kommt es zu Überlagerungen des Signals mit seinen Reflexionen.

Dopplereffekt - Durch sich schnell bewegende Teilnehmer, in Autos oder Zügen, kommt es zu Frequenzverschiebungen zwischen Sender und Empfänger.

Nutzung von Allokationslücken - Zur dichteren Ausnutzung des Spektrums sollen kleine Lücken in der Frequenzzuweisung ausgenutzt werden.

Eigenschaftsänderung des Kanals durch Bewegung des Teilnehmers.

Aufteilung der Kanalressourcen auf eine große Anzahl von Teilnehmern.

Diese Ausarbeitung soll einen Einblick geben, warum Mehträgersysteme eine Antwort auf viele dieser Anforderungen sind und welche Vor- und Nachteile das für 5G vorgeschlagene, jedoch nicht implementierte, GFDM-Verfahren gegenüber dem bereits bestehenden OFDM hat.

II. Ein- und Mehrträgersysteme

Um hohe Datenraten in klassischen Einträgersystemen zu erreichen, gibt es im Wesentlichen zwei anpassbare Parameter. Einerseits die Symbolrate, andererseits die Symbolkonstellationen.

Eine Verwendung von Symbolen mit vielen möglichen Konstellationspunkten, die die Übertragung mehrerer Bits pro Symboldauer erlauben, ermöglicht die Erhöhung der Datenrate bei gleichbleibender Signalbandbreite ist jedoch durch die Signal to Noise ratio (SNR) des Kanals begrenzt da die Entscheidungsschwellen für komplexere Symbole notwendigerweise näher zusammen liegen.

Auf der anderen Seite sind auch der Erhöhung der Symbolrate Grenzen gesetzt einerseits weil der Bandbreitenbedarf linear mit der Symbolrate steigt, andererseits weil sich die Symboldauern so weit verkürzen, dass sie sich in der Größenordnung der Echolaufrufen des Kanals annähern.

In Kanälen ohne Mehrwegeausbreitung und flacher Frequenzantwort sind Einträgersysteme mit hoher Symbolrate auch heute noch Stand der Technik, beispielsweise bei satellitenbasierter Kommunikation.

In Mobilfunksystemen, bei denen oft keine direkte Sichtverbindung zur Basisstation besteht und Echos, z.B. im urbanen Bereich, sogar aktiv genutzt werden sollen, wurden sie hingegen in neueren Standards weitestgehend durch Mehrträgerverfahren verdrängt.

A. Echoeinflüsse auf Einträgersysteme

Insbesondere in Stadtgebieten kommt es beispielsweise durch Bebauung zu vielen Reflexionen von Mobilfunksignalen, die zusammen mit dem Originalsignal vom Empfänger aufgenommen werden.

Die Signallaufzeiten dieser Echos sind durch Variationen der Pfadlängen jeweils unterschiedlich, was zum einen zu einem Phasenversatz des originalen und der reflektierten Träger führt, zum anderen zur Überlagerung aufeinanderfolgender Symbole.

Die unterschiedlichen Phasenlagen der Träger führen zu konstruktiver bzw. destruktiver Interferenz am Empfänger und zu einer nicht flachen Frequenzantwort des Kanals. Dieser Effekt wird auch als Fading bezeichnet.

Das Ineinanderlaufen aufeinanderfolgender Symbole durch den Kanal wird als Intersymbol Interference (ISI) bezeichnet und verhält sich am Empfänger wie ein additives Rauschen auf dem Originalsignal.

B. Mehrträgersysteme

Ein Ansatz zur Vermeidung der ISI ist eine Verlängerung der Symboldauern, sodass das Originalsignal und sämtliche Reflexionen innerhalb einer einzigen Symboldauer am Empfänger eintreffen.

Dazu müssen die worst-case Unterschiede der Signallaufzeiten festgestellt und die Symboldauer entsprechend angepasst werden.

Die notwendige Reduktion der Symbolrate n führt zu einer Reduktion des Bandbreitenbedarfs um den selben Faktor n , allerdings zwangsläufig auch zu einer Reduktion der Datenrate um n .

Zur Vermeidung dieser Reduktion der Datenrate werden in Mehrträgersystemen die zu übertragenden Symbole auf n Träger aufgeteilt und parallel übertragen.

In aktuell eingesetzten Systemen sind große Trägeranzahlen von $n = 1024$ oder $n = 8192$ nicht unüblich, um auch bei langen Laufzeitunterschieden noch ISI-Freiheit gewährleisten zu können.

III. OFDM

A. Motivation

Das aktuell verbreitetste Mehrträgersystem ist Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), bei dem die Unterträger mit Hilfe der Inverse fast Fourier transform (iFFT) erzeugt werden.

Die direkte Erzeugung, Modulation und Addition von n Unterträgern hat eine algorithmische Komplexität von $\mathcal{O}(n^2)$. Durch Nutzung der günstigeren iFFT werden die Träger bei OFDM mit einer deutlich günstigeren Komplexität von $\mathcal{O}(n \log n)$ synthetisiert. Eine Voraussetzung dafür ist, dass die Anzahl der Träger einer Zweierpotenz entspricht.

Die n parallel zu übertragenden komplexwertigen Symbole werden als Eingangsvektor der iFFT verwendet und durch diese in den Zeitbereich transformiert. Die Elemente des Ausgangsvektors werden anschließend sequenziell übertragen. Dieses Vorgehen führt zu einer

blockweisen Übertragung der Daten, die nächsten n Symbole werden als nächster zusammenhängender Block transformiert und nach dem aktuellen Block seriell ausgegeben.

Ergebnis dieses Vorgehens sind n mit den Eingangssymbolen modulierte Träger mit rechteckförmiger (Länge n) Impuls- und sinc-förmiger Frequenzantwort.

Wie zuvor erwähnt rufen Reflexionen des Signals nicht nur ISI sondern auch eine nicht flache Frequenzantwort hervor. Dies führt dazu, dass Träger durch den Übertragungskanal abgeschwächt oder sogar eliminiert werden können, wenn sie vom Fading betroffene Frequenzbereiche belegen.

Dadurch ist es praktisch immer notwendig, Redundanz in das zu übertragende Signal einzufügen, die die Rekonstruktion der Daten auch dann noch erlaubt, wenn einzelne Träger bei der Übertragung geschädigt werden. Diese Kombination aus OFDM und Vorwärtsfehlerkorrektur wird auch als Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing (COFDM) bezeichnet.

Bei der zuvor beschriebenen direkten Aneinanderreihung von transformierten Blöcken kommt es trotz langer Symbolauern an den Blockgrenzen weiter zu ISI zwischen aufeinanderfolgenden Symbolen der Träger. Zur Vermeidung dieses Ineinanderlaufens werden zwischen den zu übertragenden Blöcken sogenannte Guard Intervalle eingefügt, deren Länge dem worst-case Laufzeitunterschieds des Kanals entspricht.

Während dieser Guard Intervalle kann beispielsweise der Sender deaktiviert werden, was dazu führt, dass vor dem Empfang eines neuen Blocks die Kanalantwort komplett abgeklungen ist und die aufeinanderfolgenden Blöcke somit unabhängig voneinander empfangen werden.

Verbreiteter ist allerdings der Ansatz, die k Samples des Guard Intervalls mit den letzten k Elementen des Ausgangsvektors des folgenden Blocks zu füllen. Durch die Einführung eines solchen Cyclic Prefix (CP) verhält sich die Faltung mit der Kanalantwort wie eine zyklische Faltung, was die Kanalschätzung und Kanalkompensation im Empfänger vereinfacht.

B. Probleme

Durch die Sinc-Förmigkeit und die gleichmäßigen Frequenzabstände der Träger liegen das Maximum der Frequenzantwort eines Trägers jeweils auf den Nullpunkten der Frequenzantworten aller anderen Träger.

Idealerweise sind die OFDM-Träger somit orthogonal zueinander, was heißt, dass es zwischen ihnen keine gegenseitige Beeinflussung gibt. Es kommt nicht zu Interferenz zwischen den Trägern (Intercarrier Interference (ICI)).

Diese Orthogonalität geht jedoch verloren, falls ein Frequenzunterschied zwischen Sender und Empfänger besteht (durch Abweichungen der Lokaloszillatoren oder den Dopplereffekt bei relativer Bewegung) oder die Rechteckförmigkeit der Pulse im Zeitbereich beeinträchtigt wird.

Das bedeutet insbesondere, dass, ohne die Orthogonalität der Träger zu beeinflussen, keine Filterung des OFDM-Signals vorgenommen werden kann.

Eine eben solche Filterung wäre allerdings attraktiv um die Breite des belegten Spektrum des OFDM-Signals zu verringern. Das Spektrum eines OFDM-Signals wird bestimmt durch die Überlagerung sämtlicher, jeweils sinc-förmigen, Unterträgerspektren.

Das langsame Abklingen dieser sincspektren führt, bei Verwendung von OFDM, zu großen Signalabstrahlungen außerhalb des gewollten Frequenzbands, die als Out-of-band (OOB) Radiation bezeichnet wird.

IV. GFDM

Um Latenzprobleme durch die notwendigerweise langen OFDM-Blöcke und die zuvor erwähnte OOB Radiation zu reduzieren wurde für den Mobilfunkstandard der fünften Generation (5G) das neue Generalized Frequency Division Multiplexing (GFDM) Mehrträgerübertragungsverfahren vorgestellt. [1] [2] [3]

Die Grundkonzepte sind:

- Reduzieren der Anzahl der Träger gegenüber OFDM.
- Erhöhung der Symbolrate zum Erhalt der Datenrate trotz Reduktion der Träger, Inkaufnahme der entstehenden ISI.
- Unabhängige Erzeugung, Modulation und Filterung der Träger, unter Inkaufnahme, dass diese Träger, anders als bei OFDM, nicht orthogonal zueinander sind, was zu ICI führt.
- Zusammenfassung mehrere Symbole aller Träger, wie bei OFDM, zu einem Block. Ergänzung des Blocks um einen CP.
- Anwendung der Kanalschätzung auf einen solchen zyklischen Block. Herausrechnen der ISI zwischen den Symbolen in diesem Block.

Durch diese Änderungen gegenüber OFDM sollen mehrere Ziele erreicht werden:

Die Reduktion der Trägeranzahl und Erhöhung der Symbolrate soll die Latenz der Übertragung verringern, da so nicht sämtliche zu übertragenden Symbole bereits vor der Übertragung des ersten Samples des Blocks bekannt sein müssen. Bei OFDM müssen für die Transformation sämtliche Symbole des Blocks bereits bekannt sein.

Die unabhängige Erzeugung und Filterung der Träger macht es möglich die Bandbreitenausnutzung besser auf die zur Verfügung stehenden Ressourcen anzupassen. Dadurch wird es möglich, schmale Träger zwischen den Frequenzzuweisungen bereits bestehender Systeme zu platzieren und somit beispielsweise Lücken im Rundfunkspektrum für Mobilfunk nutzbar zu machen.

Die Zusammenfassung zu Blöcken mit CP ermöglicht die Nutzung von bereits aus OFDM-Systemen bekannten Synchronisations-, Kanalschätzungs- und Kanalkompensationsverfahren.

Der deutliche Nachteil von GFDM gegenüber OFDM ist der senderseitig höhere Rechenaufwand zur unabhängigen Erzeugung und Filterung der Unterträger und der empfängerseitig höhere Rechenaufwand zur Dekodierung.

V. Zusammenfassung

Es ist davon auszugehen, dass die Verwendung von Mehrträgersystemen in Zukunft weiter zunehmen wird, um hohe Datenraten auch über ungünstige Kanäle übertragen zu können. Dieser Trend beinhaltet auch kabelgebundene Systeme, die von der flexiblen Ressourcenaufteilung und Widerstandsfähigkeit gegen frequenzselektive Kanäle profitieren können. OFDM ist durch seinen, durch Verwendung von iFFT und FFT, vergleichsweise niedrigen Rechenaufwand ein attraktives Mehrträgerübertragungssystem.

GFDM bietet in einigen Szenarien Vorteile gegenüber OFDM, erreicht diese jedoch zu Lasten eines höheren Rechenaufwands und einer erhöhten Systemkomplexität. GFDM lässt einige Freiheiten im Systemdesign, die weitere Forschung und somit zukünftige Optimierungen erlauben.

GFDM wurde für den Einsatz im 5G-Mobilfunkstandard vorgeschlagen, jedoch schlussendlich nicht ausgewählt.

Glossar

- 5G Mobilfunkstandard der fünften Generation. 1, 4
- COFDM Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing. 3
- CP Cyclic Prefix. 3, 4
- FFT Fast Fourier transform. 4
- GFDM Generalized Frequency Division Multiplexing. 1, 4
- ICI Intercarrier Interference. 3, 4
- iFFT Inverse fast Fourier transform. 2, 4
- ISI Intersymbol Interference. 2–4
- OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing. 1–4
- OOB Out-of-band. 3, 4
- SNR Signal to Noise ratio. 1

Literatur

- [1] G. Fettweis, M. Krondorf and S. Bittner, GFDM - Generalized Frequency Division Multiplexing, 2009.
- [2] N. Michailow, M. Matthé, I. S. Gaspar, A. N. Caldevilla, L. L. Mendes, A. Festag, Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks, 2014.
- [3] A. Farhang, N. Marchetti, and L. E. Doyle, Low-Complexity Modem Design for GFDM, 2015.