

階層的復調を可能とする直交周波数分割変調の一検討

正員 小林 弘幸[†] 正員 貴家 仁志[†]

An Orthogonal Frequency Division Modulation Method Allowing Hierarchy Reconstruction

Hiroyuki KOBAYASHI[†] and Hitoshi KIYA[†], Members[†] 東京都立大学工学部電子情報工学科, 八王子市

Faculty of Technology, Tokyo Metropolitan University, Hachioji-shi, 192-03 Japan

あらまし FFT を用いた直交周波数分割変調 (OFDM) を任意の直交変換を用いたものに拡張することにより, 異なるレートの入力信号に対して階層的に復調でき, 特定のチャンネルのみを復調することができる特長をもつ変調方式を示す。

キーワード 多重伝送, 直交変換, フィルタバンク, OFDM

1. まえがき

複数の系列データを単一伝送路に伝送する多重伝送方式として, さまざまな方式が研究されている。これらは, 総称してしばしば MCM (Multi Carrier Modulation) と呼ばれる⁽¹⁾。MCM の伝送側では, 各系列データを変調し, 合成したものを出力する。この伝送されたデータは, 受信側で分離, 復調されもとの信号に復元される。

いわゆる周波数分割多重 (FDM: Frequency Division Multiplex) 伝送方式と呼ばれるものは, 上記の処理を変調器・分離フィルタ・復調器で構成したものである。この方式では, 受信側の分離フィルタの性能がシステムの性能を決定する。通常の FDM では, 分離フィルタに理想フィルタを使用できないため, 周波数上で十分分離されるように変調される。このため, 伝送帯域をすべて信号伝送に使用することができず, 無駄が生じる。

この伝送帯域の無駄を解決するための方法として, FFT (Fast Fourier Transform) がもつ複素変調機能を利用した OFDM (Orthogonal FDM) の研究が多く行われている^{(1)~(4)}。このとき, 各チャンネル信号が重なり合うように変調を行うため, FDM 方式のような伝送帯域の無駄が存在しない。また, FFT により演算量を低減することができ, チャンネル数の多い FDM を実現できる。更に, OFDM は移動体通信においてマルチパスによる信号劣化の影響を受けにくい点で注目されている。

しかし, FFT 演算の性質上, この OFDM では全

チャンネル信号を同時に復調しなければならない。また, 各入力信号が同一レートであるという仮定も必要となる。従って, 特定のチャンネル信号のみを復調したい場合や, レートの異なる信号を階層的に伝送したい場合などには制約が生じる。

本論文では, この FFT による OFDM がもつこれらの問題点を改善することを目的とする。まず, FFT に基づく OFDM を直交変換行列を用いたものに拡張する。次に直交変換をフィルタバンクとして解釈し, 階層的な復調を行うことができる OFDM の構成を示す。最後に具体例として, ハール基底から生成した OFDM を示し, FFT 方式と比較する。

2. 拡張された OFDM

2.1 FFT に基づく OFDM

OFDM は, FFT のもつ複素変調機能を利用した MCM である。この構成図を図 1 に示す。伝送部の変調・合成処理, 受信部の分離・復調処理は, それぞれ IFFT と FFT によって処理される。これにより, 各チャンネル信号は, 伝送信号の周波数領域において互いに重なり合うが, FFT の性質により, 受信側で完全に復元することが可能となる。

この FFT に基づく OFDM は, 以下の点が問題点として挙げられる。

- (a) 特定のチャンネルのみを復調することができない。
- (b) 全チャンネル同じレートの入力が仮定される。
- (c) 入力信号が実数である場合にも, 複素演算が必要となる。

本論文の目的は, この OFDM がもつ問題点を改善した方法を提案することにある。

2.2 OFDM のフィルタバンク表現

ここでは, 図 1 の FFT を直交変換で置き換えることを考察する (図 2 参照)。この場合にも, 直交変換の性質から, OFDM と同様に各チャンネル信号を受信

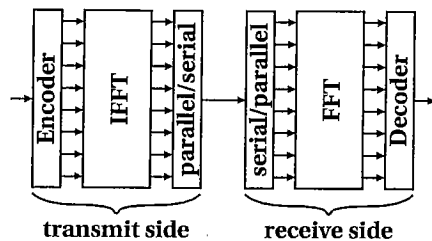


図 1 FFT を用いた OFDM の構成図
Fig.1 OFDM with FFT.

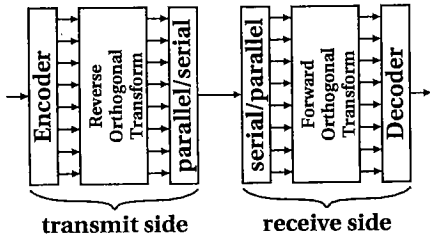
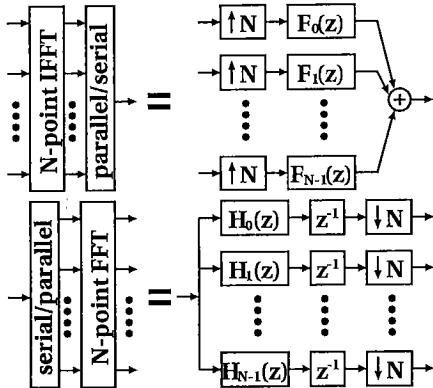
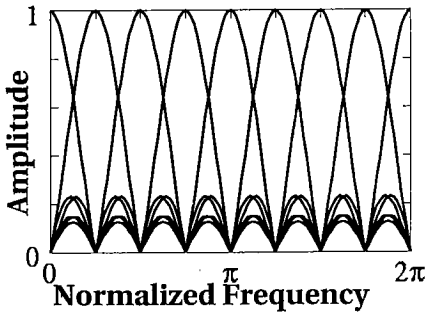


図2 直交変換を用いた OFDM の構成図
Fig.2 OFDM with orthogonal transform.



(a) Filter bank descriptions of IFFT and FFT.



(b) Frequency Responses of the filters $H_i(k)$
($i = 0, 1, \dots, 7$)

図3 N 点 IFFT, FFT のフィルタバンク表現
Fig.3 Filter bank descriptions of IFFT and FFT.

側で完全に復元することが可能である。このとき、使用される直交変換の選択には、多くの自由度が存在する。図1における OFDM はこの特殊な場合に相当し、直交変換に DFT 行列を用いたものに相当する。

近年、直交変換とフィルタバンクの関係が研究され、種々の分野に応用されている^{(5)~(7)}。例えば、図1における N 点 IFFT および FFT は、図3(a)に示すよ

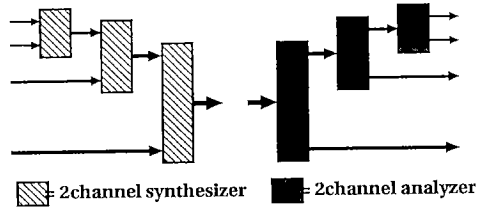


図4 フィルタバンクのトリート構成
Fig.4 Tree structure of filter bank.

うな、 N 分割並列フィルタバンクに相当することが知られている。但し、 $\downarrow N$ は、レートを $N:1$ に変換するダウンサンプラであり、時刻 0 から N 点ごとのタイミングで値を選択するものとする。図3(b)は、この場合の帯域分割特性を示す。FFT では、周波数帯域が等間隔に帯域が割り当てられ、それぞれの帯域幅も等しくなっていることがわかる。

以上のように、直交変換の選択問題は、フィルタバンクの選択問題に帰着する。換言すれば、信号の再構成問題は、完全再構成フィルタバンクとして論じることができる。図4の構成を考えよう。これは、2分割フィルタバンクをトリート構成したものであり、この構成は2分割フィルタバンクに限らず、また分割方法もオクターブ分割に限定されず自由に選択可能である。また、このようなフィルタバンク表現を直交変換行列として記述することもできる。

図4に示したように、フィルタバンクのトリート構成として、OFDM を解釈したとき、明らかに以下の特長をもつ。

- (a) トリート構成の特定の出力のみを復元できる。
- (b) 各チャンネルで同じレートの入力を仮定する必要はない。
- (c) 信号が実数でかつ、フィルタバンクが実フィルタからなる場合、複素演算を必要としない。

3. ハール基底による OFDM

図4の構成における2分割フィルタバンクの一つとして、ハール基底に基づくものがある⁽⁸⁾。これは、上述の特長をすべてもち、しかも演算効率が高い。

図5にハール基底に基づく2分割フィルタバンクを示す。フィルタのインパルス応答に1と-1しかもたず、その実現に乗算を必要としない。この2分割フィルタを図5のようにオクターブ分割した場合、フィルタバンク全体はハール変換に相当する。また、すべての帯域を対称にトリート構成した場合、それは WHT (Walsh-Hadamard Transform) に対応する。どのよ

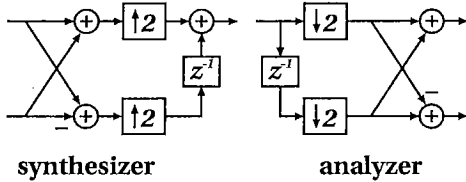
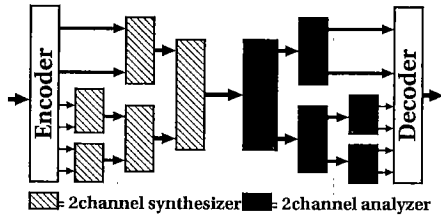
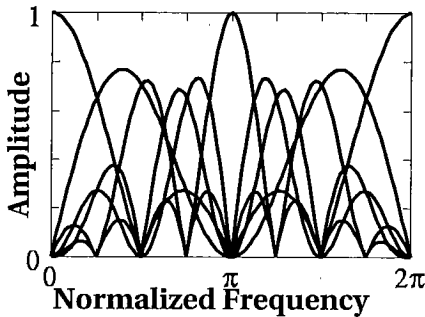


図5 ハール基底に基づく2分割フィルタバンク
Fig.5 Two-channel filter bank with Haar basis.



(a) OFDM with haar basis



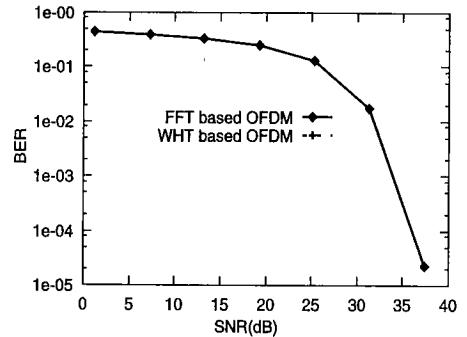
(b) Modulation Property of OFDM with Haar basis.

図6 ハール基底を用いた OFDM の一例
Fig.6 An example of OFDM with Haar basis.

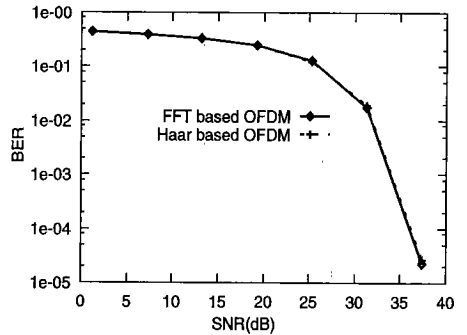
うにトリ構成を選択するかは、応用に応じてこれ以外にも自由に行うことができる。例として図6(a)で示される OFDM を考えよう。図6(b)は、この OFDM の変調特性を示している。この例では、低域側を2段階、高域側を3段階トリ分割しているため、0から $\pi/2$ までの帯域には二つのキャリアが、 $\pi/2$ から π までの帯域には四つのキャリアが存在する。このように、ハール基底を用いた場合、周波数帯域を等間隔に割り当てる必要がなく、それぞれの帯域幅も異なる OFDM を実現できることがわかる。

4. 雑音の影響の検討

通信で問題となる雑音の影響に関して、前述のハール基底による OFDM と FFT による OFDM を比較する。ここでは、簡単のために伝送路にガウス性ノイズ



(a) WHT based OFDM



(b) Haar based OFDM

図7 OFDM のビット誤り率による比較
Fig.7 Comparison of BER characteristics of OFDMs.

を付加し、受信信号もとの信号をビット単位に比較し、その誤りビット数を全ビット数で割ったビット誤り率 (BER) を用いて評価する⁽⁹⁾。

入力信号として、8 kHz サンプリングされた女性の声を用い、各 OFDM の前段階でチャンネル数個の信号に振り分ける。FFT による OFDM では、文献(3)(9)の方法に基づき複素信号を処理した。すべての比較では、OFDM の伝送信号の帯域幅、伝送電力を同一になるように設定し行った。

図7(a)は、WHTを用いた OFDM と FFT を比較している。ここで、縦軸は BER、横軸は伝送信号と雑音の電力比 (SNR) であり両方法とも 2048 点の変換を使用している。どちらの OFDM も、SNR が増加すると BER が減少する特性を示しており、BER の点では両者にほとんど差異は見られないことがわかる。

次に、図6(a)で示した帯域幅の異なる OFDM について検討する。今回は、0から $\pi/2$ までの帯域に 512 個のキャリアをもち、 $\pi/2$ から π までの帯域に 1024 個のキャリアをもつ OFDM を使用する。従って、入

力信号は先ほどと同じレートでの1024個の信号と、その2倍のレートをもつ512個の信号に分解されて入力される。このOFDMとFFTを用いたOFDMに対してBERを比較した結果を図7(b)に示す。この場合にも、BERはほぼ同一の結果が得られた。

5. むすび

本論文では、FFTを用いて実現されるOFDMを、直交変換行列を用いた場合に拡張し、更に直交変換をフィルタバンクとして解釈することにより、階層的な復調を行うことができるOFDMの構成を示した。特に、ハール基底に基づくフィルタバンクを選択した場合には、伝送誤り率についてはほぼ同等で、演算効率の高いOFDMを生成できた。

今後は、OFDMに他の直交変換を用いた場合について検討するつもりである。また、今回行ったガウス性雑音だけでなく、インパルス性雑音も混在する復号ノイズ環境における、種々のOFDMのノイズ特性についても検討を行うつもりである。

文 献

- (1) Bingham J.A.C.: "Multicarrier Modulation for Data Transmission: An Idea Whose Time Has Come", IEEE Communications Magazine, pp.5-14 (May 1990).
- (2) Hirotsuki B.: "An Orthogonally Multiplexed QAM Sys-

- tem Using the Discrete Fourier Transform", IEEE Trans. Communications, COM-29, 7, pp.992-989 (July 1981).
- (3) Cimini, Jr., L.J.: "Analysis and Simulation of a Digital Mobile Channel Using Orthogonal Frequency Division Multiplexing", IEEE Trans. Communications, COM-33, 7, pp.665-675 (July 1985).
- (4) Nicolas J.J. and Lim J.S.: "On the Performance of Multicarrier Modulation in a Broadcast Multipath Environment", IEEE ICASSP-94, pp.III-245-III-248 (April 1994).
- (5) Vetterli M.: "A theory of multirate filter banks", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, ASSP-35, pp.356-372 (March 1987).
- (6) Vetterli M.: "Perfect transmultiplexers", IEEE ICASSP-86, pp.2567-2570 (April 1986).
- (7) 村松正吾, 貴家仁志: "変換符号化された画像に対する任意の有理数倍率の解像度変換法", 信学論 (A), J77-A, 3, pp.369-378 (1994-03).
- (8) 小林弘幸, 貴家仁志: "ハール基底に基づくマルチキャリア伝送", 信学技報, CAS93-81 (1993-11).
- (9) 曾根 進, 魚 潤, 姜 賢求, 高木 相: "耐ノイズ性分散伝送方式のデジタル信号伝送への応用について", 信学技報, EMCJ93-41 (1993-10).
- (10) Weinstein S.B. and Ebert P.M.: "Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform," IEEE Trans. Communication Technology, COM-19 5, (Oct. 1971).

(平成6年6月17日受付, 8月22日再受付)