

地上波デジタル放送向けOFDM復調LSI

Single-chip OFDM Demodulator for Japanese Digital Terrestrial Broadcasting

あらまし

2003年から始まる日本の地上波デジタル放送の規格は、多様なサービスの提供を目指し策定された。日本における放送規格の特徴は、地上波で問題となるマルチパスに強いOFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) を変調方式に採用したことに加え三つある。キャリア間隔の異なる3種の伝送モード、移動受信時に誤りを少なくする時間インターリーブ、同一周波数で異なるプログラムを送ることができる階層伝送である。これらの機能を実現するため、地上波デジタル放送用復調部は、複雑で大規模な回路と大容量のメモリが必要となる。多様な端末で放送を受信することを考慮すると、復調部のLSI化は必須である。今回開発したLSIは、新たな処理方式を提案することで、メモリを大幅に削減し、復調に必要なすべての機能を1チップに集積した。本稿では、日本規格に初めて準拠した1チップOFDM復調LSIについて述べる。

Abstract

In Japan, digital terrestrial television broadcasting which can accommodate a variety of broadcasting services will be launched in the year 2003. The Japanese standard is characterized by the use of OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) in the modulation scheme, which provides stable reception in multipath environments. Other features of the Japanese standard are three modes with different carrier spacing, time interleaving for reducing data errors in mobile reception, and hierarchical transmission that enables different programs to be transmitted simultaneously. The demodulator needs a large logic and memory space to provide these functions. To enable broadcasts to be received with various terminals, the demodulator should be built into a single-chip LSI. We designed a new architecture of OFDM demodulation for reducing the on-chip memory space, and succeeded in developing a single-chip LSI. We report on the first single-chip OFDM demodulator for Japanese digital terrestrial television broadcasting.



大和田秀夫 (おあわだ ひでお)
システムLSI開発研究所先端システムLSI研究部 所属
現在、デジタル変復調LSIの研究開発に従事。



吉田昌弘 (よしだ まさひろ)
システムLSI開発研究所先端システムLSI研究部 所属
現在、デジタル変復調LSIの研究開発に従事。



玉村雅也 (たまむら まさや)
第二システムLSI事業部第一設計部 所属
現在、デジタル変復調LSIの設計に従事。

まえがき

近年、MPEG方式による映像圧縮とデジタル変復調技術を利用したテレビ放送のデジタル化が進み、衛星を用いたCS（Communication Satellite）、BS（Broadcasting Satellite）デジタル放送が既に始まっている。地上波も2003年から関東、近畿、中京地域で放送が開始され、2011年までに全国の地上波テレビ放送が、すべてデジタル放送に切り換わる予定である。映像や音声以外に、各種のデータ送出が可能なデジタル放送は、情報機器と親和性も良く、通信と並ぶ重要な情報インフラに発展すると予想される。

地上波デジタル放送は、様々な形態の端末で放送を受信し、多様なサービスの提供を目指している。変調方式にマルチキャリアのOFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing：直交周波数分割多重）を採用することで、地上波で問題となるマルチパス環境下で安定して放送を受信することができる。また、マルチキャリアの特徴を生かした移動受信向けの機能を盛り込むことで、従来サービス提供が困難であった、携帯・ノートパソコン・車載などの移動端末においても、サービスを受けることを可能にした。

多様な受信環境のもと、OFDM信号を安定して復調するLSIは、システムにおける重要なデバイスとして位置付けられる。

本稿では、地上波デジタル放送復調に必要な機能をすべて取り込んだ1チップ復調LSIを開発したので紹介する。

OFDM

OFDMは図-1（a）に示すように情報を分割し、直交関係にある複数の搬送波で変調し伝送する方式である。建物などの反射によって生じる遅延波（マルチパス）が存在しても、信号の劣化を招かずに復調できることが大きな特徴である。情報を分割をすることにより、1シンボルの時間を長くできるうえ、干渉防止として、シンボル後半と同じ情報をシンボルの前部に付加すること（ガードインターバル）がその理由である。主波以外を遅延波と見なすことにより、エリアが隣接する異なる放送局による同一周波数で、同一放送を行うSFN（Single Frequency Network）が可能となり、周波数の有効的利用を図ることができる。また信号の周波数スペクトルも矩形に近いので{図-1（c）}、周波数帯域を有効利用できる特徴も併せ持つ。

しかし、性能向上を追求し搬送波の本数を増やすと、それに従い図中の変調器も増え、回路規模が非常に大きくなる欠点がある。搬送波が直交関係にあることを利用し、変調処理はIFFT（Inverse Fast Fourier Transform）、復調処理はFFT（Fast Fourier Transform）により一括して行うことにより、回路の増大を抑えることができる。OFDMは最近のLSIテクノロジー

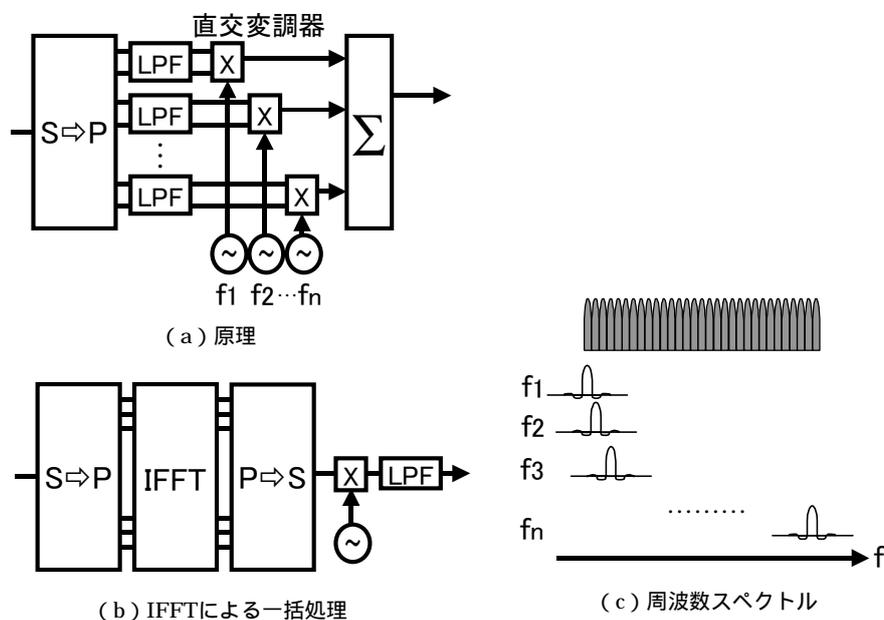


図-1 OFDMの原理
Fig.1-Principle of OFDM.

ジの進歩で、大規模回路と大容量メモリの集積が可能となり、脚光を浴びるようになった変調方式である。ちなみに地上波デジタル放送では最大約5,600本の搬送波を使用し情報を伝送するので、8,192ポイントのメモリとFFT回路が必要となる。

地上波デジタル放送

世界における地上波デジタル放送の規格を表-1に示す。欧州⁽¹⁾・米国・日本⁽²⁾の3種の規格が存在する。日本と欧州は、地上波で大きな問題となるマルチパス対策のため、変調方式にOFDMを採用した。欧州（英国）と米国では1998年末から、それぞれの規格で既に放送を開始しているが、日本での放送開始は数年遅れの2003年の予定である。遅れの理由は、日本の規格がほかの規格にない多様なサービス実現を追求したことによる。そのサービスを支える規格は、

- (1) 3種類の伝送モード
- (2) 階層伝送
- (3) 時間インターリーブ

の3点であり、以下にその特徴を述べる。

- (1) 3種類の伝送モード

日本における地上波デジタル放送の伝送パラメータを表-2に示す。「居間のテレビで見る（固定受信）」、あるいは「携帯・車載端末で動きながら見る（移動受信）」など、様々な受信環境を想定し、キャリア間隔の異なる3種類の伝送モードが規定されている。一般にシンボル長が短くキャリア本数の少ないMODE1が移動受信向き、シンボル長が長くキャリア本数の多いMODE3が固定受信向きとされている。MODE1はキャリア間隔が広く、移動受信時におけるドップラーシフトの影響を受けにくい、周波数の有効利用を図るためのSFN（異なる放送局による同一周波数で同一放送）はガードインターバルが短いため困難である。他方MODE3はSFNに都合が良いが、キャリア間隔が狭いので移動受信に適切とは

表-1 各国の地上波デジタル放送規格

	日本	欧州	米国
放送開始時期	2003年	1998年	1998年
変調方式	OFDM	OFDM	8VSB
キャリア数	1,405 / 2,809 / 5,617	1,705 / 6,817	1
周波数帯域(MHz)	6	8	6
Bit rate(Mbps)	~ 23	~ 31	19

VSB: Vestigial Side Bands

いえない。そこで日本規格では、MODE1とMODE3の中間の特性を持ち、移動・固定いずれにも使えるMODE2を追加した。

- (2) 階層伝送

階層伝送はマルチキャリアであるOFDMの特徴を利用したものである。伝送帯域内のキャリアを13個のセグメントに分割し、これらのセグメントで三つの階層を構成することにより、3種類の異なるTS（Transport Stream）を同時に伝送する方式である。階層伝送の送信例を図-2に示す。3種類の異なるTSを多重化器で1本のTSにまとめ、符号化処理とキャリア変調を行う。各階層の符号化率、キャリア変調の伝送パラメータは、各階層ごと個別に設定することができる。これにより、複数の番組を同一帯域内で異なるビットレートや誤り耐性で

表-2 地上波デジタル放送の伝送パラメータ

	MODE1	MODE2	MODE3
セグメント数	13		
帯域幅	5.575 MHz	5.573 MHz	5.572 MHz
情報ビットレート	3.651 Mbps ~ 23.234 Mbps		
キャリア間隔	3.968 kHz	1.984 kHz	0.992 kHz
有効シンボル長	252 μs	504 μs	1,008 μs
ガードインターバル長 (1/4, 1/8, 1/16, 1/32)	63 μs 31.5 μs 15.75 μs 7.875 μs	126 μs 63 μs 31.5 μs 15.75 μs	252 μs 126 μs 63 μs 31.5 μs
キャリア数	1,405	2,809	5,617
キャリア変調方式	DQPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM		
誤り訂正内符号	畳込み (r=1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8)		
誤り訂正外符号	短縮化リードソロモン (204,188)		
インターリーブ	周波数, 時間, ビット, バイト		

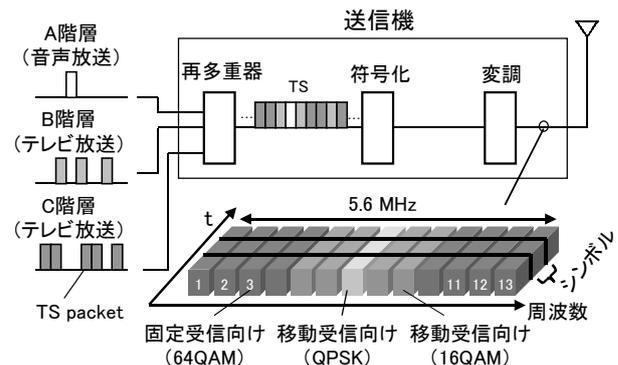


図-2 階層伝送

Fig.2-Hierarchical transmission.

伝送することが可能となる。

(3) 時間インタリーブ

携帯・車載端末などによる移動受信の場合、電波の受信信号レベルが時間的に変動することにより、復調データに誤りが生じることがある。このような移動受信時の問題を低減するため、時間インタリーブを採用し、誤りのない安定した復調をすることができる。

以上のように、日本の地上波デジタル放送は従来の家庭におけるテレビ放送の視聴だけでなく、移動中の携帯・車載端末による放送受信で多様なサービスを提供することを考慮した規格である。

復調LSI

地上波デジタル放送受信機の構成例を図-3に示す。アンテナで受信された信号は、チューナに入力され、選択されたチャンネルのみを抜き出した後、復調LSIに入力される。復調LSIではADコンバータでデジタル化後、同期処理・FFT・誤り訂正を行い、TSを出力する。出力はMPEGデコーダの入力となり、映像・音声が再現される。今回開発した復調LSIは⁽³⁾、受信機のフロントエンドに位置し、地上波デジタル放送を受信する上で重要なデバイスである。

本LSIは、表-2に記載されている日本における地上波デジタル放送の全伝送パラメータに対応し、信号を復調するために必要なすべての機能を内蔵している。したがって、チューナと時間インタリーブ用メモリを外付けすることで、復調システムを簡単に構成することができる。開発したLSIは三つのブロックで構成され、それぞれ以下に示す機能と特徴を持つ。

(1) 同期処理部

受信したOFDM信号をADコンバータでデジタル信号

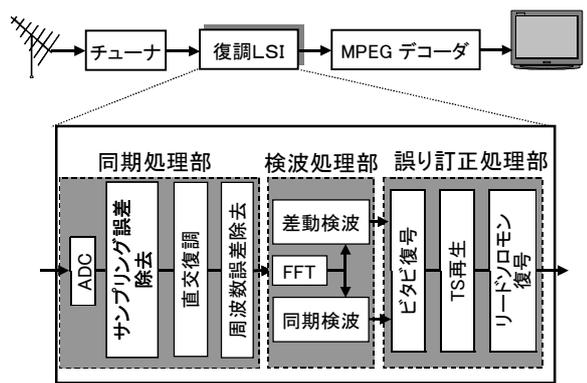


図-3 地上波デジタル放送受信機と復調LSIの構成
Fig.3-Receiver and demodulator LSI.

に変換した後、直交復調を行う。1シンボルの遅延メモリを用いて有効シンボル期間とガードインターバル期間の相関を求め、キャリア周波数誤差、送受信機間のサンプリング周波数誤差の補正を行う。従来、サンプリング周波数誤差の補正は、LSIに外付けするVCXO (Voltage Controlled Crystal Oscillator) の発振周波数を制御することにより行われていた。本LSIでは、インタポレータを用いた固定サンプリング方式を採用しているため、VCXOの代わりに安価な水晶振動子を用いることができる。また、アナログフィルタなどの外付け部品も削除でき、無調整で安定した受信を可能とした。

(2) 検波処理部

3種類の伝送モードに対応した2,048, 4,096, 8,192ポイントのFFT演算と検波処理を行う。受信信号にはSP (Scattered Pilot) と呼ばれる既知の情報が一定のキャリア間隔で含まれており、このSP情報から伝送路特性を推定し同期検波を行う。また、差動検波の場合は、1シンボル前の情報をメモリに保存しておき検波処理を行う。

(3) 誤り訂正処理部

各階層で使用されている伝送パラメータを示す制御信号であるTMCC (Transmission and Multiplexing Configuration Control) を復号し、その復号結果をもとに検波結果のデ・マッピング、各種デ・インタリーブ、ビット復号とリードソロン復号による誤り訂正を行い、TSの再生を行う。TS再生とは、階層伝送において、階層ごとに受信したデータを蓄積し、TSパケット単位で誤り訂正を行い送信側で再多重されたTSパケットの順番に並べ替える処理をいう。TMCCは復調に必要な重要な情報を伝送しているため、1シンボル中の複数のキャリアで同じ情報が伝送され、差集合巡回符号の誤り訂正が施されている。本LSIではTMCCの誤り訂正処理を行うだけでなく、複数のTMCC情報を用いることにより信頼性を向上させている。

開発技術

復調LSIは、様々な端末への組み込みを考えると、チップ面積の小さいLSIがコスト面、消費電力面いずれも有利である。日本の地上波デジタル放送システムは、多様なサービス提供を実現するため、階層伝送や時間インタリーブなどの規格を採用したため、復調LSIの処理機能は多くなり、複雑で大規模なロジックと大容量のメモリを必要とする。著者らは多くのメモリを必要とする

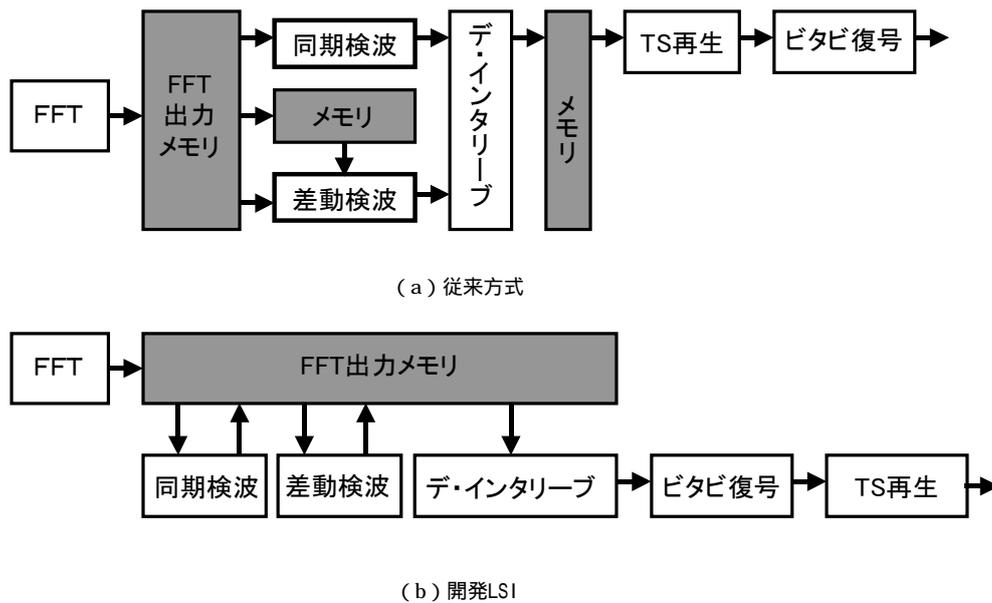


図-4 検波部・誤り訂正部構成
Fig.4-Architecture of detection and error correction.

検波処理，誤り訂正処理の二つのブロックに着目し，メモリ容量を削減する方式を考案した。

従来方式の問題は，検波処理部における逐次処理と，誤り訂正部の階層伝送処理におけるTS再生のメモリ使用法にある。

従来の検波処理は図-4 (a) に示すように，FFT演算後，同期検波，差動検波，周波数デ・インタリーブなどの処理を1シンボルごとに順次処理し，その都度，結果をメモリに保存していた。本LSIでは，FFTの演算結果を保持する一つのメモリを，時分割で同期検波，差動検波，周波数デ・インタリーブ処理用として使いまわす方式{図-4 (b)}を新たに開発した。一つのメモリで上記処理を行うには，それぞれの処理に必要な情報を損なわないように処理手順を最適化し，1シンボル内ですべての処理を完結させる必要がある。開発した方式では，1シンボル期間を複数期間に分割し，その分割単位で処理を管理し，差動検波 同期検波 周波数デ・インタリーブの順番でメモリのデータを書き換える。

また，TS再生を行う階層伝送処理は，階層データの切り換わり部分で誤り訂正能力を落とさないようにするため，誤り訂正の前に行われるのが一般的である。しかし，誤り訂正前のデータは訂正後のデータに比べ6倍も大きいいため，データ保存用に大容量のメモリが必要となる。本LSIでは，階層伝送処理を誤り訂正後に移動し，メモリを削減すると同時に，ピタビ復号部に階層伝送処

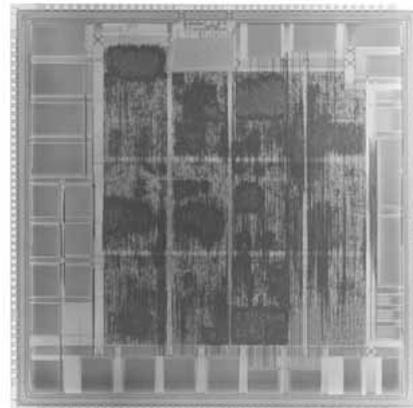


図-5 チップ写真
Fig.5-Chip photograph.

理の一部の機能を持たせ，誤り訂正能力の低下を防いだ。

以上の二つの方式を用いることにより，従来，約1.3 Mビット必要であったメモリを0.77 Mビットまで削減し，約40%ものメモリを削減することに成功した。

本LSIは，0.25 μm CMOSプロセスを用い，最大動作周波数は65 MHz，電源電圧はIO部3.3 V，内部ロジック部2.5 Vで消費電力は1.3 Wである。チップサイズは9 mm \times 9 mmで，そのチップ写真を図-5に示す。

評価システム

開発した復調LSIを使用して評価システムを試作した。評価システムは，ビット誤り率 (BER : Bit Error

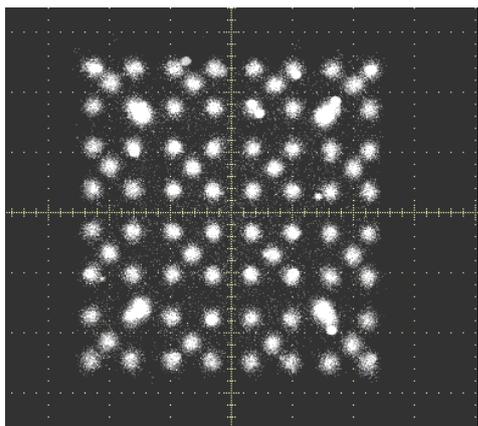


図-6 コンスタレーション (3階層)
Fig.6-Constellation diagram (3-layer).

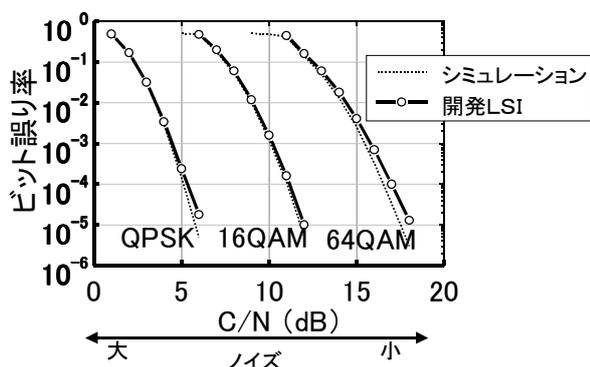


図-7 階層伝送時のビット誤り率
Fig.7-Measured bit error rate.

Rate) の測定やコンスタレーション表示などの実験・評価に必要な機能を備えている。

A階層：QPSK，B階層：16QAM，C階層：64QAMの変調方式を用いた階層伝送の信号を，評価システムで受信した場合のコンスタレーションを図-6に示す。QPSKの4点，16QAMの16点，64QAMの64点が分離し

て表示されており，LSIが階層伝送の信号を正しく復調していることが分かる。

また，上記階層伝送の信号にガウス雑音を付加した場合の，ビタビ復号後におけるビット誤り率測定の結果を図-7に示す。点線がシミュレーション値，実線が測定結果であり，ほぼシミュレーション結果に近い値が得られている。

む す び

開発した地上波デジタル放送用OFDM復調LSIについて紹介した。全体のデータフローを見直すことにより，性能を落とすことなく，LSIに搭載されるメモリを大幅に減らした。これにより小型化，省電力化を実現し，復調に必要なすべての機能を1チップに集約した。今後，地上波デジタル放送の移動受信の特性を生かした情報機器が増加すると予想されるが，移動特性の向上，より一層の低消費電力化を含め，各種のサービスを受ける端末に適した復調LSIの開発を進めていきたい。

参考文献

- (1) ETSI : European Telecommunication Standard ETS EN 300 744 "Digital Video Broadcasting (DVB) ; Framing structure , channel coding and modulation for digital terrestrial television" , March 1997 .
- (2) ITU-R WP11A "Channel coding , frame structure and modulation scheme for terrestrial integrated services digital broadcasting (ISDB-T)" , May 1999 .
- (3) Ohwada, H. et al. : "21- A Single Chip Band-Segment-Transmission OFDM Demodulator for Terrestrial Television Broadcasting" , ISSCC2001 Digest of technical papers .