地上デジタル放送用 OFDM 受信機の受信特性

Performance of OFDM Receiver for Digital Terrestrial Television Broadcasting

正会員 佐藤 誠[†], 正会員 工藤 雄也^{†††}, 関 隆史^{††}
 正会員 相沢 雅己^{††}, 正会員 多賀 昇[†], 正会員 石川 達也^{††}
 Makoto Sato[†], Katsuya Kudo^{†††}, Takashi Seki^{††},
 Masami Aizawa^{††}, Noboru Taga[†] and Tatsuya Ishikawa^{††}

あらまし 地上デジタル放送では、マルチパス妨害に加えアナログ放送波からの妨害に対して耐性の高い受信機が望まれる。本研究では、これらの妨害に対して受信性能を向上する地上デジタル放送用 OFDM 受信機を開発し、その性能を評価した。また、オンエア受信した変調信号を記録再生できる機能を設け、受信 OFDM 信号を容易に解析することができるようにした。

キーワード：地上デジタルテレビジョン放送, OFDM, 妨害, 信号解析

1. ま え が き

我が国の地上デジタル放送は、1998 年秋に郵政省の電気通信技術審議会において「地上デジタルテレビジョン放送暫定方式」が策定され、1999 年 5 月に伝送方式が答申された¹⁾。我々は、この方式に準拠し UHF テレビジョンチャンネルの OFDM 受信機を開発した。本稿では受信機の概要と基本性能および周波数選択性妨害に対する性能改善について報告する。

また、受信特性の解析を効率的に行うことができるよう、オンエア受信した変調信号を記録再生できるようにした。これを用いた解析結果についても述べる。

2. OFDM 受信機の構成

2.1 概 要

OFDM 受信機の構成図を図 1、外観を図 2 に示す。

また、入出力機能を表 1 に示す。OFDM 受信機に入力

された RF 信号(UHF チャンネル 13 ch から 62 ch のいずれか 1 波)はチューナ部で選局され、4.1 MHz の IF 信号が出力される。RF 信号が 1/7 MHz 周波数オフセットされる場合には、チューナの局部発振周波数を同様にオフセットさせ、IF 周波数を変更せずに対応することができる。

IF 信号は A/D 変換され、OFDM 復調処理と誤り訂正処理の後、MPEG-2 トランスポートストリーム形式準拠のデータとして出力される。本受信機ではこれらの機能を W 443 mm×H 132 mm×D 500 mm の大きさ(図 2 参照)で実現した。

2.2 チューナ

表 2 にチューナの特性を示す。隣接アナログ波妨害を十分に抑圧するため、57 MHz IF にて下側隣接音声キャリア抑圧量 17 dB、上側隣接映像キャリア抑圧量 40 dB の SAW フィルタを 2 段縦続接続し、さらに下側隣接音声キャリアを 4.1 MHz IF 段で抑圧している。また、OFDM 受信機で重要とされる位相雑音も 64 QAM で問題ない程度の特性である。これらを民生用テレビチューナと同様のパッケージに収めた。

2.3 復調処理

復調処理は同期(クロック、キャリアおよびタイミング)回路、FFT 回路およびパイロット補間・等化回路により構成される。各階層に応じて差動検波あるいは同期検波を行い、周波数と時間のデインタリーブ処理を行う。

本装置では、パイロット信号を利用して入力信号およびチューナの位相雑音を除去するとともに、周波数選択性妨害を受けたキャリアを平均振幅、分散などから検出し性能改善を図っている。

1999 年 10 月 29 日 映像情報メディア学会放送方式研究会で発表

2000 年 2 月 23 日受付, 2000 年 4 月 16 日再受付, 2000 年 5 月 8 日採録

[†] 東芝デジタルメディアエンジニアリング株式会社

(〒235-8522 横浜市磯子区新杉田町 8, TEL 045-770-3311)

^{††} 株式会社東芝 セミコンダクター社 システム LSI 事業部

(〒235-8522 横浜市磯子区新杉田町 8, TEL 045-770-3311)

^{†††} 株式会社東芝デジタルメディアネットワーク社 深谷映像工場

(〒366-8510 深谷市幡羅町 1-9-2, TEL 048-574-2480)

[†] Toshiba Digital Media Engineering Corp.

(8, Shinsugita-cho, Isogo-ku, Yokohama 235-8522, Japan)

^{††} Toshiba Corp. Semiconductor Company, System LSI Division

(8, Shinsugita-cho, Isogo-ku, Yokohama 235-8522, Japan)

^{†††} Toshiba Corp. Digital Media Network Company, Fukaya Operations-Visual Products

(1-9-2, Hatara-cho, Fukaya-shi, Saitama 366-8510, Japan)

図 1 OFDM 受信機の構成図
Block diagram of OFDM receiver.

図 2 OFDM 受信機の外観
Photograph of OFDM receiver.

表 1 OFDM 受信機の機能
Specifications of OFDM receiver.

入出力仕様	
RF 入力	UHF テレビチャネルの 1 波 13 ch (470-476 MHz)~62 ch (764-770 MHz) 部分受信階層を含む
	+1/7 MHz オフセット対応可能
	-20 dBm~-70 dBm/75 Ω
IF 入力	4.1 MHz±3 MHz
	0 dBm/75 Ω
出力	TS 信号×2 (DVB 準拠パラレル I/F)
	LVDS

2.4 誤り訂正処理

内符号のビタビ復号, バイト・デインタリーブ, エネルギー逆拡散の後, 外符号(RS)が復号される. 周波数選択性妨害(マルチパス, スプリアス, アナログ同一妨害など)を受けたキャリアに対しては, 以下の方法で受信性能を改善した.

- (1) 平均振幅より小さい OFDM キャリヤは C/N が劣化しているのと等価である. 誤り率に関して信頼

表 2 チューナの特徴
Specifications of RF tuner.

入力周波数	470~770 MHz
入力レベル	-20 dBm~-80 dBm/75 Ω typ.
選局ステップ	1/7 MHz
第一中間周波数	57 MHz
第二中間周波数	4.1 MHz
雑音指数(NF)	7 dB typ.
位相雑音	
1 kHz offset	-70 dBc/Hz typ.
10 kHz offset	-90 dBc/Hz typ.
外形寸法	(W)116 mm×(D)33 mm×(H)13 mm

性が低いと見なせるので, 軟判定の際に小さい重みづけを行ってビタビ復号する²⁾.

- (2) 狭帯域妨害を受けると特定 OFDM キャリヤが劣化する. コンスタレーション基準点からの分散を求め, それが大きいときにはビタビ復号で消失扱いとする³⁾.

3. 室内実験

実験に用いたパラメータを表 3, 系統図を図 3 に示す. 誤り率の測定では外符号 RS(204,188)はオフとし, ビタビ復号前後で測定した. ビタビ復号後のビット誤り率では 2×10^{-4} 以下(RS 訂正後ビット誤り率 1×10^{-11})を擬似エラーフリーと見なし基準とした.

基本特性として, AWGN 条件下での IF 入力時と, 入力レベルを変化させた RF 入力時の誤り率を測定した. また, 妨害条件としてマルチパスおよびアナログからディジタルへの干渉条件でも誤り率を測定した.

3.1 IF および RF 基本特性

図 4 に IF 折返し(AWGN)でのビタビ復号前の誤り率測定結果を示す. 各変調方式とも測定結果は理論値にほぼ一致しており, キャリヤ数の違いによる差もほとんどなかった.

表 3 実験に用いた伝送パラメータ
Transmission parameters on laboratory experiment.

モード	Mode 2, Mode 3
ガードインタバル長 G	(有効シンボル期間との比) 1/8, 1/32
時間インターリーブ長 I	8, 4
キャリア変調方式	DQPSK 16 QAM, 64 QAM
内符号(畳込み) r	1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8
外符号	RS (204, 188)
伝送周波数(UHF)	ch 15, ch 19 +1/7 MHz オフセット

図 3 実験系統図

Block diagram of experimental system.

図 4 AWGN 環境下の誤り率特性
BER performance under AWGN condition.

図 5 に, IF 折返し(AWGN)でのビタビ復号後の誤り率特性を示す. また, 誤り率 2×10^{-4} の基準点での各変調方式のシミュレーション値と実測値を表 4 に示す. 64 QAM でも差は 0.3 dB 以下であり, 固定劣化は非常に小さい.

図 6 に, RF (15 ch) で入力した場合のビタビ復号後の誤り率特性を変調方式ごとに示す. 例えば, 64 QAM, 符号化率 $r=7/8$ の所要入力レベルは -76.0 dBm であった.

NF 7 dB のチューナで絶対温度 $T=300$ K, 帯域幅 5.57 MHz の熱雑音は $-106.5+7=-99.5$ dBm であり,

図 5 AWGN 環境下の誤り率特性 (ビタビ復号後)
BER performance under AWGN condition (after viterbi).

表 4 所要 C/N と RF 入力レベル (ビタビ後誤り率 2×10^{-4})
Required C/N and input level (ch 15).

変調方式		DQPSK		16 QAM	64 QAM	
符号化率		1/2	2/3	3/4	3/4	7/8
所要 C/N (dBm)	Sim 値	6.5	8.2	14.8	20.5	22.7
	実測値	6.6	8.3	14.9	20.7	23.0
所要 RF 入力 レベル (dBm)		−92.7	−90.8	−84.2	−78.8	−76.0

図 6 入力レベル対誤り率特性
BER vs input level performance.

64 QAM, 符号化率 $r=7/8$ の所要 C/N は 22.7 dB であるから, 所要 RF 入力レベルは -76.8 dBm と計算できる. 表 4 には各変調形式の所要 RF 入力レベルを示しているが, 実測値と 1 dB 以内の差である.

3.2 マルチパス特性

マルチパス特性の測定は, 遅延波の遅延時間をガードインタバルの $1/2$ ($31.5 \mu\text{s}$) に設定し, AWGN 環境下においてビタビ復号後の誤り率が 2×10^{-4} を満足する D/U を求めた.

平均振幅による重み付け訂正を用いない場合を図7に、用いた場合を図8に示す。64 QAM, 符号化率 $r=7/8$ の $D/U=4$ dB では約1 dBの改善であるが, 16 QAM, $r=3/4$ の $D/U=1$ dB では約6.5 dBの改善, DQPSK, $r=2/3$ の $D/U=0$ dB では約7 dB, DQPSK, $r=1/2$ の $D/U=0$ dB では約5 dBの改善と, 符号化率 r が小さく D/U が小さいときに大きな改善効果を確認した。なお, 図に示されたように, 64 QAM, 符号化率 $r=7/8$ では C/N が充分大きくても $D/U=0$ dB でエラーフリーにはならなかった。このような伝送パラメータを単一周波数ネットワークで用いると, 強電界地域であっても受信場所率が小さくなると考えられる。

3.3 アナログからデジタルへの干渉

図9に室内実験の評価系統図を示す。アナログ波の妨害はEIA カラーバー, 音声1 kHz 変調とし, OFDM の平均電力を D , NTSC の同期尖頭値電力を U として, 混合器前段に設置したアッテネータ(ATT)にて D/U を設定した。なお, OFDM 信号のRF 周波数は+1/7 MHz だけオフセットさせている。

アナログ同一チャンネル妨害では, テレビ信号成分が映像キャリアと音声キャリアに集中しているため, その近辺の

OFDM キャリヤが集中的に妨害の影響を受ける⁴⁾。そこで, OFDM のキャリヤごとにコンスタレーションの分散を検出し妨害を受けたキャリヤを判定して消失誤り訂正を行った。

この機能を用いない場合を図10に, 用いた場合を図11に示す。改善効果はビタビ復号後の誤り率 2×10^{-4} において64 QAM, 符号化率 $r=1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$ で, それぞれ3 dB, 5.4 dB, 7.1 dB, 10.8 dB, 12.7 dBであり, 符号化率 r が大きいほど改善効果が大きかった。

隣接チャンネル妨害評価は, アナログテレビ信号の帯域外

図9 NTSC テレビ妨害の系統図
Block diagram for analog interference of NTSC TV.

図7 マルチパス環境下の C/N 対 D/U 特性
 C/N vs D/U performance under multipath channel condition.

図10 同一チャンネル干渉特性
Co-channel interference.

図8 マルチパス環境下の C/N 対 D/U 特性 (改善後)
 C/N vs D/U performance under multipath channel condition (with reliability weighting).

図11 同一チャンネル干渉特性 (消失誤り訂正後)
Co-channel interference (with erasure decoding).

スプリアスがない条件(−75 dBc 以下)で行った。図 12 に下側隣接妨害時の実験結果を示す。また、図 13 に上側隣接妨害、図 14 に両側隣接妨害時の実験結果を示す。64 QAM 変調において、RF の入力レベルに対してビタビ復号後の誤り率が 2×10^{-4} となる妨害波レベル (D/U) を示してある。

(1) 下側隣接妨害

所要 D/U は RF 入力レベルが −70 ~ −40 dBm でほぼ一定であるが、−40 dBm 以上の入力レベルでは許容

図 12 下側隣接チャネル干渉特性
Lower adjacent-channel interference (at BER = 2×10^{-4}).

図 13 上側隣接チャネル干渉特性
Upper adjacent-channel interference (at BER = 2×10^{-4}).

図 14 両側隣接チャネル干渉特性
Both side adjacent-channel interference (at BER = 2×10^{-4}).

できる妨害レベルが減少している。これは希望波と妨害波の合計が過大入力となり、チューナが非線形ひずみを生じたためである。

(2) 上側隣接妨害

下隣接妨害とほぼ同様であるが、入力レベルが小さいときの所要 D/U はやや小さくてよい。これはアナログ波スペクトルが周波数的に対象でないためである。ただし、入力レベルが −45 dBm 以上では差がない。

(3) 両側隣接妨害

上下隣接の妨害を同時に受けるが、IF 入力レベル −70 dBm から −45 dBm であれば符号化率 $r=7/8$ でも $D/U = -30$ dB となった。

4. モニタ機能と拡張機能について

4.1 外部 PC によるモニタ機能

OFDM 受信機のモニタ機能として表 5 に示す機能を用意し、受信障害などの解析が容易にできるようにした。また、外部にパソコン(PC)を接続することにより、遅延プロファイルなどの簡易的なモニタリングも可能である。

図 15 に、マルチパス妨害環境下 ($D/U = 3$ dB, 遅延量 5 μ s) において受信した場合のモード表示、コンスタレーション、帯域内スペクトルおよび遅延プロファイルの表示例を示す。

4.2 オンエア記録機能(拡張機能)

OFDM 受信機にオンエア信号の記録機能を追加して機能拡張した場合の構成図を図 16 に、解析機能を表 6 に示す。

UHF の OFDM 信号を復調すると同時に、復調前の IF 信号を記録できるように RAM およびハードディスクドライバ(HDD)を図 2 と同じ筐体に内蔵した。

記録した信号を読み出して再度復調することにより、受信障害状況などを繰り返し再現して解析することができる。実際にフィールドで受信障害が発生した時に自動記録した受信信号のスペクトルを図 17 に、等化後の復調出力(横軸が周波数)を図 18 に示す。等化後の復調出力において、矢印で示した周波数成分に受信障害の主な原因となったスプリアスが混入していることがわかる。

表 5 解析機能
Analysis function.

外部 I/F	BER I/F	BNC クロック, データ(ECL) 外部 PC にて RS ON/OFF 可能
	コンスタレーション	I, Q 信号, クロック出力 1 Vp-p/75 Ω
外部 PC I/F		D-Sub 9 Pin (RS 232 C)
表示機能		簡易モニタリング (1) コンスタレーション (2) スペクトル (3) 遅延プロファイル (4) TMCC 情報など

図 15 解析表示例 (マルチパス環境下)

The example of a display under multipath channel condition.

図 16 拡張機能

Block diagram of extended function.

表 6 オンエア解析機能
Specification of extended function.

記録	時間	最大 1 分間の変調信号を記録
	メモリー	2 GB
	データ	サンプリング 16.3 MHz (メモリーへは 16 bit で記録)
	トリガ	マニュアルまたはオート (伝送エラー発生前後 1 分間を採取)
再生	時間	最大 1 分間データのシングル/リピート再生
保存	HDD	36 GB
	ファイル数	最大 1 分間のデータを 16 個まで

図 17 記録した OFDM 信号スペクトラム
Spectrums of recorded OFDM signal.

図 18 記録した OFDM 信号の FFT 出力
FFT output data of recorded OFDM signal.

5. む す び

開発した OFDM 受信機の概要と基本性能、および妨害に対する受信性能の改善について報告した。マルチパス妨害に対しては、キャリアの平均振幅を求めて重みづけ訂正を行うことで性能改善できることを確認し、同一チャネル妨害に対しては各キャリアのコンスタレーションの分散を求めてキャリアごとに消失誤り訂正を行うことで、受信性能が改善できた。

また、OFDM 信号をリアルタイムで記録再生する機能を拡張した。フィールドでの受信障害解析、受信データ採取装置として有用である。

〔文 献〕

- 1) 電気通信技術審議会デジタル放送システム委員会報告書，“地上デジタルテレビジョン放送方式の技術的条件”（May 1999）
- 2) 中原俊二，高田正幸，土田健一，黒田徹：“マルチパス伝送路における 64 QAM-OFDM 信号の軟判定復号法の検討”，映情学技報，22, 34, pp. 7-12（June 1998）
- 3) 原田啓介，相沢雅己，佐藤誠，杉本雅彦：“地上伝送路を考慮した誤り制

御”，映情学年次大 3-1, p. 31（July 1998）

- 4) 中原俊二，岡野正寛，居相直彦，木村智：“アナログテレビ干渉による地上デジタル放送信号の干渉特性と特性改善”，映情学技報，23, 34, pp. 7-12（May 1999）

さとう まこと
佐藤 誠 1985 年，千葉工業大学電気工学科卒業。同年，東芝 AVE(株)（現 東芝デジタルメディアエンジニアリング(株)）入社。ハイビジョン機器，映像伝送機器開発を担当。現在，地上デジタル放送の研究開発に従事。正会員。

くどう かつや
工藤 雄也 1984 年，岩手大学工学部電気工学科卒業。同年，(株)東芝入社。マルチメディア対応高周波モジュール開発に従事。正会員。

せき たかし
関 隆史 1992 年，東北大学大学院工学研究科修士課程修了。同年，(株)東芝入社。1995 年～1999 年，(株)次世代デジタルテレビジョン放送システム研究所勤務。地上デジタル放送の研究開発に従事。

あいざわ まさみ
相沢 雅己 1990 年，慶應義塾大学理工学部計測工学科卒業。同年，(株)東芝入社。1995 年～1999 年，(株)次世代デジタルテレビジョン放送システム研究所勤務。デジタル放送伝送路符号化の研究開発に従事。正会員。

たが のぶる
多賀 昇 1989 年，芝浦工業大学工学部電気工学科卒業。同年，東芝 AVE(株)（現 東芝デジタルメディアエンジニアリング(株)）入社。デジタル放送変復調システムの研究開発に従事。正会員。

いしかわ たつや
石川 達也 1981 年，北海道大学大学院工学研究科修士課程修了。同年，(株)東芝入社。1995 年～1999 年，(株)次世代デジタルテレビジョン放送システム研究所勤務。デジタル放送の研究開発に従事。正会員。