2

FPUの高度化に向けた最新技術

〔正会員〕池田 哲 臣[†]

キーワード FPU, 周波数移行, MIMO, 時空間トレリス符号, 直交周波数分割多重

1 ま え が き

平成23年9月に公表された総務省の周波数再編アクションプラン¹⁾により, 700MHz帯を使用するFPU (Field Pickup Unit) は, 1.2GHz帯および2.3GHz帯を移行先の周波数帯候補として, 移行のための技術的条件の検討を開始することとなった。700MHz帯(770~806MHz)を用いる放送事業用の電波は, 移動環境での伝搬特性が良好なことから, マラソンや駅伝などのロードレース中継やゴルフ中継など, 移動を伴う番組中継に用いられている。総務省から示された周波数再編の方針では, FPUが使用する周波数は, 現行の700MHz帯よりも1.5倍から3倍程度の高い周波数へと移行する。このため, 新たな周波数の利用にあたっては, 従来よりも厳しくなる伝搬特性に対処するため, MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 技術や訂正能力の高い誤り訂正符号を導入し, FPUの伝送技術を高度化する必要がある。

このような背景のもとに, 移動伝送の大容量化と高信頼性を目的として, FPUの高度化に向けた検討が情報通信審議会で行われている。本稿では, MIMO技術として導入が検討されている時空間トレリス符号化方式について, 伝送方式の特徴や伝送特性を解説するとともに, 高度化したFPUのシステム構成, 試作装置の概要, 野外実験の結果について述べる。

2 MIMO伝送方式の採用

ロードレース中継など移動しながら番組中継を行うFPUは, OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 方式²⁾の採用によって安定した映像伝送を行うことができるようになった。しかし, 一つの送信アンテナと一つの受信アンテナを用いる従来の送受信方法 (Single-Input Single-Output, 以下SISO) では, 映像圧縮にAVC/H.264方式を用いた場合の映像信号の所要ビットレート35Mbps³⁾を, 無線区間で途切れずに伝送することは困難である。こ

の問題を解決するため, 二つの送信アンテナと二つの受信アンテナを用いる 2×2 MIMO伝送方式を採用して, 伝送容量を拡大しつつ回線信頼性を向上させる方法が検討されている。

MIMO伝送方式には, 空間多重により伝送容量を拡大する手法が一般的に採用されているが, 伝搬環境が厳しいFPUの移動伝送では, 伝送容量の拡大よりも回線信頼性を重視して伝送方式を設計する必要がある。このため, 時間方向と空間方向の両方で誤り訂正効果が得られる時空間トレリス符号化MIMO (Space-Time Trellis Coded-MIMO, 以下STTC-MIMO) 伝送方式が採用された。

3 STTC-MIMO伝送方式

2×2 STTC-MIMO伝送方式⁴⁾⁵⁾は, 図1に示すように, 送信側で一つの情報系列に対して二つの異なる畳込み符号化 (誤り訂正符号化) を行った出力 (x_1, x_2) をIQ平面と呼ばれる2次元上にマッピングし, 二つの送信アンテナから同一周波数で送信する。時空間トレリス符号化器の畳込み符号化部は, 二つの送信系統間でレジスタと重み付けの構造を同じにしてあり, 同一の状態遷移をするように設計される。しかし, 送信系統間で重み付け係数を異なる値にすることで, 同一の信号を入力しても, 異なる信号を出力するように動作する。このような状態遷移は, トレリス線図で表すことができ, トレリス符号化と呼ばれている。このとき畳込み符号化器の重み付け係数は, 時空間トレリス符号化器の出力において, 送信系統間の信号点間距離の和が大きくなるように設計される。

受信側では, 二つの受信アンテナの出力信号 (y_1, y_2) を用いて, ビタビ復号法により, 送信された情報系列を推定する。ビタビ復号器では, メトリック計算部で受信系統毎に受信した実際の受信信号と, 推定した伝搬路応答から作成した受信信号レプリカとの間の信号点間距離に基づいたメトリックにより信頼度を計算し, ブランチ選択部, トレースバック部を経て, トレリス線図上のより信頼度の高い入力信号系列を推定して復号する。このように二つの受信信号を相補的に用いるビタビ復号を行うことによって, 復号結果の信頼性を向上させることが可能となる。

[†] NHK 放送技術研究所

"Recent Technologies for Advanced FPU" by Tetsuomi Ikeda (NHK Science and Technology Research Laboratories, Tokyo)

図1 2×2 STTC-MIMO 伝送方式の構成

4 STTC-MIMOの伝送特性

2×2 STTC-MIMO伝送方式をOFDM方式と組合せた2×2 STTC-MIMO-OFDMシステムを試作し、フェージングシミュレータを用いて2.3GHz帯の動的環境における室内伝送実験を実施した。検討に用いたチャネルモデルは、広島駅伝コースにおける伝搬実験に基づくもので、6パスのうちの2波がライスファクタ−3dBのライス波、残りがレイリー波で構成される2波ライスモデルである。移動速度は35km/hに設定し、MIMO伝搬路応答(図1の $h_{11} \sim h_{22}$)の相関は、これまでの野外実験の結果をもとに、送信相関係数0.7および受信相関係数0.3を中相関、送信および受信相関係数0.3を低相関、送信および受信相関係数0.9を高相関として実機による測定を行った。また、誤り訂正におけるデータの拡散期間(時間インターリーブ長)は378msとした。

実験結果を図2に示す。比較のため、現行FPU(SISO-OFDM)の測定結果も併せて示す。中相関では、現行FPUの16QAM(1/2)-SISOに対して、16QAM-STTCがほぼ同等のビット誤り率(BER)特性であり、QPSK-STTCでは所要CNRが約6dB改善される。所要CNRは、外符号にRS(204, 188)符号を想定して、ビタビ復号後のBERが 1×10^{-4} を下回る値とした。STTC-MIMOのBER特性は、伝搬路応答の相関係数の値により異なる傾向を示すことが図2より確認できる。すなわち、相関係数が小さくなるほど良好な特性を示し、大きくなるほど劣化しやすい傾向がある。

5 2×2 STTC-MIMO伝送システム

5.1 全体システム構成

2×2 STTC-MIMO伝送システムを用いたロードレース中継のシステム構成イメージを図3に示す。2送信のMIMO伝送を実現するため、移動中継車には送信アンテナと電力増幅器を2式、2系統分のアップコンバータが1式に内蔵された送信高周波部、および、STTC-MIMO変調器が搭載される。MIMO伝送方式を採用するシステムは、従来のシステムとは構成や伝送特性が異なるため、効率的な中継システムを構築するには、以下の点に留意する必要がある。

- (1) 送信アンテナ間隔をできるだけ拡大すること
- (2) 受信アンテナ間隔をできるだけ拡大すること
- (3) 電力増幅器とアンテナ間のケーブル損失を低減する

図2 2×2 STTC-MIMOの伝送特性

図3 システム構成イメージ

こと

アンテナ間隔を拡大することで伝搬路応答の相関を低減し、MIMO伝送特性を向上させることができる。

5.2 変復調器

2×2 STTC-MIMO-OFDM変復調器の諸元を表1に、構成を図4に示す。OFDM部分は、現行FPUの1kフルモード(FFTサイズが1024ポイント)と基本パラメータを同一とし、変調形式を拡張してQPSK, 8PSK, 16QAMのSTTCに対応させている。また、外符号として従来のRS

表1 変復調器の諸元

FFTポイント数	1024(1kモード)	
GIポイント数	128(ガード比1/8)	
FFTクロック	20.45074 MHz	
占有帯域幅	17.2 MHz	
サブキャリア数	総数:857 (DATA:672, CP:108, AC:66, TMCC:10, NULL:1)	
サブキャリア変調方式	16QAM, 8PSK, QPSK (DATA), BPSK (CP), DBPSK (TMCC)	
シンボル長	56.33 μ s (GI長6.26 μ s)	
内符号	64状態 16QAM-STTC, 32状態 8PSK-STTC, 16状態 QPSK-STTC	
内インターリーブ	周波数, 時間 (378 ms)	
外インターリーブ	バイト単位 (11 TSバケット)	
外符号	RS (204,188)	RS (204,166)
204-Byte TSレート [Mbps]	47.72 (16QAM)	35.79 (8PSK)
	23.86 (QPSK)	41.75 (16QAM)
	31.32 (8PSK)	20.88 (QPSK)
CPキャリア位相	送信1: {1,1}, 送信2: {1,-1}	

(204, 188) 符号よりも誤り訂正能力が2.5倍で、擬似エラーフリーの所要CNRを1dB改善できるRS (204, 166) 符号も採用している。

5.3 送信高周波部および電力増幅器

(1) 送信高周波部

変調器の出力IF信号をRF帯へアップコンバートする1.2GHz帯用と2.3GHz帯用の送信高周波部を図5に示す。いずれも2送信のMIMO伝送を想定し、周波数変換部では

図5 送信高周波部

共通の局部発振器を用いる構成として、2系統の送信周波数が同一になるようにしている。また、規定された帯域内の各周波数を送信できるように、中心周波数は4.5MHz刻みで変更できる仕様とした。なお、最近の検討では、周波数を共用する他システムとの干渉を避けるため、1MHz刻みで中心周波数を変更する案が提案されている。

(2) 電力増幅器

移動中継用FPUでは、周波数帯移行後も受信基地局を増やさずに従来と同等のエリアや回線信頼性をもつ伝送システムを構築する必要がある。そのため現行の700MHz帯OFDM-FPUの出力5Wよりも大きな出力が想定されている。このため、1.2GHz帯では平均出力25Wの電力増幅器、2.3GHz帯では平均出力40Wの電力増幅器をそれぞれ2式

図6 電力増幅器

図7 送信アンテナ
(左から700MHz, 1.2GHz, 2.3GHz用)

試作した。各電力増幅器の外観を図6に示す。1.2GHz帯電力増幅器は、LDMOS (Laterally Diffused MOS, シリコンを使用した横型構造) デバイスを採用しており、消費電力は300～400VA、サイズは3Uのラックマウントタイプ、重量は約15kgである。また2.3GHz帯電力増幅器は、GaN (窒化ガリウム) デバイスを採用しており、消費電力は600～700VA、サイズは4Uのラックマウントタイプ、重量は約25kgである。

5.3 アンテナ

アンテナの設計や開発にあたっては、現行のシステムと比較することを目的に、現在700MHz帯で使用しているアンテナと同等の特性を有する1.2GHz帯、2.3GHz帯の送信および受信アンテナを試作した。

送信アンテナについては、アンテナ構造を2段コーリニアアンテナとし、前節で述べたように、1.2GHz帯で25W、2.3GHz帯で40Wの信号をアンテナに入力するため、耐圧を充分にもつ設計とした。試作した送信アンテナを図7に

図8 受信アンテナ
(左から700MHz, 1.2GHz, 2.3GHz用)

示す。

受信アンテナについても、送信アンテナと同じ目的として現行システムと同等の特性を有するアンテナを試作した。アンテナ構造は1.2GHz帯、2.3GHz帯ともに8素子の八木アンテナとした。試作した受信アンテナを図8に示す。

6 野 外 実 験

1.2GHz帯および2.3GHz帯において、従来のSISOシステムとともに、試作した時空間トレリス符号化MIMO伝送システムを用いて、実際のロードレース中継のコースで伝送実験を行った。移動車は表2に示す条件で送信し、コース上を約30km/hで走行した。図9に移動車の外観を示す。また、受信点はビルの屋上や山の上などに設置した。

実験では、700MHz帯のOFDM信号と1.2GHz帯、2.3GHz帯のOFDM信号またはMIMO-OFDM信号を同時に出力し、映像伝送により受信可能なエリアを比較した。映像伝送と同時に、受信電力、受信SINRやRS復号部の誤りバイト検出数から換算したBER (換算BER)、MIMO伝搬路応答の相関係数の情報を取出して記録した。

MIMOの実験結果について、京都駅伝コースで行った伝送実験の例を紹介する。実験では、コースの沿道にあるビルの屋上に受信アンテナを設置し、主に見通し内環境のマ

表2 送受信条件

送信周波数	1249/2350MHz
占有帯域幅	17.2MHz (フルモード)
送信出力	最大5W + 5W (1.2GHz), 最大40W + 40W (2.3GHz)
偏波	2系統ともに垂直偏波
送信アンテナ	2段コーリニア, 5.4dBi
送信高/送信間隔	約3.2m/2.5mなど
受信アンテナ	8素子八木, 11.3dBi
受信間隔	2.5m, 5mなど

図9 移動車の外観

図10 マンション受信のSINR対BER

ンションと主に見通し外環境の病院の屋上を受信点とした。主に見通し内環境のマンション受信は、相関係数0.9以上が30%の高相関環境であり、図10に示すように換算BERは、シミュレーション曲線の中相関と高相関の間に分布した。一方、主に見通し外環境の病院受信では、相関係数0.6以下が80%の中低相関環境であり、図11に示すように換算BERは、シミュレーション曲線の中相関と低相関の間に分布した。いずれの伝送実験においてもMIMO伝送システムは良好な映像伝送が実現できており、実験によってシステムの有効性が確認された。

7 む す び

700MHz帯FPUの周波数移行に向けて検討されている時空間トレリス符号化MIMO伝送システムおよび試作装置、野外実験の結果について述べた。MIMO伝送方式は複数の送受信アンテナを用いることにより、伝送容量を拡大しながらダイバーシティ効果による回線信頼性をも向上できる

図11 病院受信のSINR対BER

方式である。しかし、MIMO伝送方式は従来のSISO伝送方式とは性質が異なり、見通し内環境の伝搬路において、伝送特性がやや劣化する傾向がある。この対策として、誤り訂正能力を2.5倍に強化したRS符号を新たな伝送パラメータとして用意しているが、信号間の相関を低くする運用上の工夫も必要である。

一般にMIMO伝送方式は、伝搬路による影響を受けやすい方式である。その特徴を十分に理解して伝送システムを構築することにより、従来のSISO方式に比べて伝送容量を最大2倍に拡大できるという利点を活用できる。

平成25年7月24日には、情報通信審議会においてMIMO伝送方式の技術的条件が取りまとめられた。今後は電波監理審議会の答申を経て、秋頃には制度化される予定である。これを受けて、ARIB規格の策定やメーカの製品化が円滑に進むことを期待したい。

(2013年7月29日受付)

〔文 献〕

- 1) 総務省報道資料：“周波数再編アクションプラン（平成23年9月改定版）の公表”，2011年9月14日
- 2) “テレビジョン放送番組素材伝送用可搬OFDM方式デジタル無線伝送システム”，電波産業会，ARIB STD-B33 1.2版（Mar.2011）
- 3) "User requirements for digital electronic news gathering", ITU-R Recommendation, BT-1872（Mar.2010）
- 4) 中川，光山，神原，池田：“時空間符号の800MHz帯市街地移動伝送特性”，信学技報，RCS2009-92，pp.85-90（Aug.2009）
- 5) 中川，池田：“2×2 STTC-MIMO-OFDMシステムの性能改善”，映情学技報，BCT2012-48，36，10，pp.69-72（Feb.2012）

池田 哲臣 1984年，室蘭工業大学電子工学科卒業。同年，NHKに入局。旭川放送局を経て，1989年より，放送技術研究所に勤務。地上デジタル放送伝送方式，番組中継用伝送方式の研究に従事。現在，放送技術研究所（伝送システム研究部）部長，正会員。