双方向FPUへのHARQ方式の適用に関する検討

A Study on Applying HARQ Scheme for Bidirectional FPU

正会員 鵜澤史貴[†], 正会員 光山和彦[†], 正会員 青木勝典[†], 正会員 平栗健史^{††}

Fumiki Uzawa[†], Kazuhiko Mistuyama[†], Katsunori Aoki[†] and Takefumi Hiraguri^{††}

あらまし 再送制御により映像ファイル伝送の効率を高める双方向 FPU の研究を進めている。本報告では再送オーバーヘッドを削減できる Type-II HARQ の双方向 FPU への適用方法を提案し、Type-I HARQ と比較した際の優位性を示す。

キーワード：FPU, TDD, Type-II HARQ

1. ま え が き

放送事業者はスポーツなどの生中継や緊急報道において、ハイビジョン映像素材を伝送するために 6~7 GHz 帯のマイクロ波帯 FPU (Field Pick-up Unit) システム¹⁾²⁾を使用している。一方、映像素材管理の利便性を高めるためテープレス記録やメタデータの付与など映像機器のファイルベース化が進められている³⁾。また近年は、主に帯域保証型の IP ネットワークを使用した映像素材伝送が実現されている⁴⁾。現行の FPU システムでは、収録した映像ファイルを映像信号に変換する必要があるため、伝送には映像の実再生時間を要する。映像の高速伝送を実現するにはファイル形式のまま伝送し、ARQ (Automatic Repeat-reQuest) により伝送の信頼性を高める必要がある。公衆回線などを用いた再送要求も可能だが、高速かつ高信頼の ARQ プロトコルを実現するには、双方向伝送可能な FPU を用いることが条件となる。双方向 FPU の運用イメージを図 1 に示す。再送制御だけではなく映像や音声の送り返しや、中継現場の機器制御の実現も視野に入れる。双方向通信の複信方式は、周波数帯域の追加や変更を伴わず、送受信の回線速度比率を変更できる TDD (Time Division Duplex) 方式を想定している。

パケット単位の通信を行う ARQ プロトコルには SW (Stop-and-Wait), GBN (Go-Back-N), SR (Selective-Repeat) があり⁵⁾, 誤り発生率に対するスループットで比較すると SR が最も有効である⁶⁾. 加えて誤り訂正と ARQ を組み合わせた HARQ (Hybrid ARQ)⁶⁾ を用いることで, 高い誤り耐性を得られる. HARQ 方式には, 誤り発生時に

図 1 双方向 FPU の運用イメージ

同じ構成のパケットを再送する Type-I HARQ と、符号化によるパケットのパリティ部分を再送する Type-II HARQ がある。パケット合成型の Type-I HARQ は受信における時間ダイバーシティ効果⁷⁾を、畳込み符号を用いた Type-II HARQ は RCPC (Rate Compatible Punctured Convolutional) 符号による適応的な符号化率の制御⁸⁾を実現する。

主に固定回線で使用するマイクロ波帯 FPU では、パーティ部分のみを再送することで再送データ量の削減が可能な Type-II HARQ が有効であると考えられる。しかし Type-II HARQ は Type-I HARQ と異なり、初回送信時と再送時双方において、双方向 FPU の物理層⁹⁾ に適合した ARQ パケット構成が要求される。本報告では双方向 FPU に Type-II HARQ を適用する際の ARQ パケット構成を提案する。加えて計算機シミュレーションにより、Type-I HARQ 適用時の構成に対する伝送特性を比較し、誤り発生の少ない環境における Type-II HARQ の優位性を示す。

2. 双方向 FPU の ARQ パケット構成

双方向 FPU 物理層の諸元を表 1 に示す. TDD フレーム長はマイクロ波帯 FPU¹⁾²⁾ で想定する 50~100 km 伝送時の遅延を考慮し, 98 % 以上の時間利用効率を得られる 40 ms を最大値とする. データサブキャリアの数は 1 OFDM シンボルあたり 726 個である. 1 シンボル単位で

2013年11月29日受付，2014年1月27日再受付，2014年2月28日採録

† NHK 放送技術研究所

(〒157-8510 世田谷区砧 1-10-11, TEL 03-5494-3462)

†† 日本工業大学電気電子工学科

(〒345-8501 南埼玉郡宮代町学園台 4-1, TEL 0480-33-7658)

表 1 双方向 FPU 物理層の諸元

Channel bandwidth	18 MHz
Transmission mode	SISO, 1×2 SIMO, 2×2 MIMO
Primary modulation	BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM, 32QAM, 64QAM, 128QAM, 256QAM
Secondary modulation	OFDM
Preamble length	50.06 μ s
Symbol length	56.33 μ s
Data sub-carriers	726
TDD frame length	5 ms, 10 ms, 20 ms, 40 ms

図 2 TDD フレームの構成例

2^8 を元とした RS (Reed-Solomon) 符号化を実現するため、8 の倍数である 720 個を ARQ パケットとして構成する。この構成により、TDD フレーム長や送受信時間比率の変更に対し、OFDM シンボル単位の調整が可能となる。加えて適応変調や SISO/MIMO 切替の対応を容易にするため、QPSK-SISO で 1 パケット / OFDM シンボルとなる 180 byte を ARQ パケットサイズとする。16QAM-SISO では 2 パケット / シンボル、256QAM-MIMO では 8 パケット / シンボルである。SR-ARQ の ACK/NACK 情報送信タイミングは、再送遅延を最小化するため TDD フレームに同期した Synchronous ARQ¹⁰⁾ とする。TDD フレームの構成例を図 2 に示す。

提案する Type-II HARQ を用いた ARQ パケット構成と、比較する Type-I HARQ を用いた ARQ パケット構成を図 3 に示す。誤り検出・訂正には 16 byte のパリティを持つ RS 符号を使用する。SR-ARQ に必要なパケット識別情報は、初回送信データおよび各再送パリティを識別する情報である。識別情報には (最大送信回数 + 1) × (1 TDD フレームで送信する ARQ パケット数) bit が必要で、TDD フレーム長 40 ms、最大送信回数 5 回では 2 byte となる。また上位層で使用するフラグメントヘッダは初回送信データに対して 1 byte 必要である。以上により、実際に送信されるデータ量は図 3 の Data で示す量である。本報告では図 3 の Data で示す部分以外をオーバーヘッドと定義する。ARQ パケットは現行 FPU¹⁾²⁾ で規定する内符号と同じ拘束長 7、符号化率 $r=1/2$ とした符号器にて畳込み符号化される。続いて初回送信の ARQ パケットサイズを 180 byte、すなわち符号化率 $r=1$ となるようにパンクチャ処理する。Type-II HARQ ではパンクチャされたビット列を送信側メモリに保持し、2 回目以降の送信時にはパンクチャされたビット列の中から、パケット識別情報を含めて 45 byte ずつ送信する。提案する Type-II HARQ では ARQ パケット 4 倍分に相当する再送パリティを格納できるため、パケット識別情報によるオーバーヘッドは Type-I HARQ の 4 倍と

図 3 各 HARQ 方式によるパケット構成

図 4 シミュレーションブロック図

なる。受信側ではパンクチャールにしたがって再送 ARQ パケットを合成し、ビタビ復号する。 $r=1$ の Type-I HARQ では Type-II HARQ で初回送信する 180 byte を常に送信し、受信側では同一ビット列として合成する。今回の検討では、符号化率 $r=1/2$ の Type-I HARQ である RS(90,74) を畳込み符号化し 180 byte とした ARQ パケット構成も比較対象とした。

3. 各 ARQ パケット構成の伝送特性評価

各 ARQ パケット構成による、Type-I/Type-II HARQ を用いた際の性能を計算機シミュレーションにより比較評価した。シミュレーションブロック図を図 4、諸元を表 2 に示す。HARQ プロトコルは 1 TDD フレーム単位で ACK/NACK 情報を送信する Synchronous SR-HARQ で、通信路では ACK to NACK あるいは NACK to ACK となる誤りは発生しないものとした。

各 ARQ パケット構成にて得られるスループットを図 5、各 ARQ パケットが正しく復号されるまでの平均パケット送信回数を図 6 に示す。CNR=19 dB 以上の再送発生のない環境ではパンクチャ後畳込み符号化率 r によりスループットが決まるため、 $r=1/2$ の Type-I HARQ では 20 Mbps を超えるスループットを得ることはできない。ただし CNR=15 dB 以下の低 CNR 環境における平均パケット送信回数、すなわち再送遅延は小さくなる。 $r=1$ の Type-I HARQ はパケット識別情報のオーバーヘッドが最も小さく、CNR=19

表 2 シミュレーション諸元

OFDM symbol length	56.33 μ s
TDD frame length	10 ms (176 symbols)
UL:DL symbols (delay)	176 : 0 (0)
Data sub-carriers (effective)	726 (720)
Modulation level	16QAM-SISO
Data packet size	180 byte
HARQ protocol	Synchronous SR-ARQ
Inner code	Convolutional code

Type of HARQ	Type-II	Type-I
Punctured CC rate	r=1	r=1 r=1/2
Outer code	RS(180,164)	RS(180,164) RS(90,74)
Retransmission packet size	45 byte	180 byte

図 5 各 ARQ パケット構成におけるスループット

図 6 各 ARQ パケット構成における平均パケット送信回数

dB 以上の再送発生のない環境では最大のスループットを得られる。しかし CNR の低下に対するスループットの低下が大きく、CNR=14 dB 以下では $r=1/2$ のスループットを下回る。提案する Type-II HARQ ではパケット識別情報によるオーバーヘッドが Type-I HARQ の 4 倍となるため、CNR=19 dB 以上の再送発生のない環境におけるスループットは $r=1$ の Type-I HARQ よりもわずかに小さいが、Type-II HARQ の平均パケット送信回数が 5 回を超えず誤り発生が少ない CNR=9~17 dB において、最も高いスループットを得られる。Type-II HARQ では、RCPC 符号の特徴である適応的な符号化率の変動により、最適な冗長度を選択していると考えられる。なお、誤り発生が多い低 CNR 環境における Type-II HARQ の平均パケット送信回数は、 $r=1/2$ の Type-I HARQ より大きくなる。ただし双方向 FPU に Type-II HARQ を用いる場合、CNR に対応する適応変調や SISO/MIMO 切替を用いて、低 CNR 環境における変調多値数を下げて再送遅延を抑えることが可

能である。以上により、双方向 FPU では Type-II HARQ を前提としたパケット構成が有効であると判断できる。

4. む す び

本報告では、複信方式に TDD を用いた双方向 FPU に Type-II HARQ を適用する際のパケット構成を検討し、Type-I HARQ 適用時に対する伝送特性を比較した。パケット識別情報などによるオーバーヘッドを考慮した計算機シミュレーションの結果、再送時のパケットサイズを変更しない Type-I HARQ に対し、提案する再送時のパケットサイズを $1/4$ とした Type-II HARQ のパケット構成が誤り発生が少ない環境において有効であることを確認した。今後は ACK/NACK 情報によるオーバーヘッドを評価した上で、ハードウェアへの実装を進める予定である。

〔文 献〕

- 1) ARIB STD-B11: “テレビジョン放送番組素材伝送用可搬型マイクロ波帯デジタル無線伝送システム,” 2.2 版, 標準規格 (Nov. 2005)
- 2) ARIB STD-B33: “テレビジョン放送番組素材伝送用可搬型 OFDM 方式デジタル無線伝送システム,” 1.2 版, 標準規格 (Mar. 2011)
- 3) ARIB TR-B31: “ファイルベースによる番組交換方式,” 1.2 版, 技術資料 (Jul. 2012)
- 4) ARIB TR-B34: “制作・取材用リアルタイム IP 映像伝送における品質確保のためのガイドライン,” 1.0 版, 技術資料 (Dec. 2011)
- 5) D. J. Costello, J. Hagenauer, H. Imai, and S. Wicker: “Applications of Error-Control Coding,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, **44**, issue. 2, pp. 2531-2560 (Oct. 1998)
- 6) S. Lin, D. J. Costello and M. J. Miller: “Automatic-repeat-request error-control schemes,” *IEEE Commun. Mag.*, **22**, issue. 12, pp. 5-17 (Dec. 1984)
- 7) D. Chase: “Code combining—a maximum-likelihood decoding approach for combining an arbitrary number of noisy packets,” *IEEE Trans. Comm.*, **33**, issue. 5, pp. 385-393 (May 1985)
- 8) J. Hagenauer: “Rate-compatible punctured convolutional codes (RCPC codes) and their applications,” *IEEE Trans. Comm.*, **36**, issue. 4, pp. 385-393 (Apr. 1988)
- 9) K. Mitsuyama, N. Kogo, F. Uzawa and N. Iai: “Prototyping and Performance Evaluation of TDD-Based 2x2 MIMO-OFDM Transceiver,” in *Proc. IEEE RWW 2014.*, pp. 43-45 (Jan. 2014)
- 10) IEEE C802.16m-08/353: “Proposal for IEEE 802.16m HARQ Protocol and Timing,” (May 2008)

う ざ わ ふ み き
鵜澤 史貴 2004 年, 早稲田大学理工学部卒業。同年, NHK 入局。NHK 岡山放送局を経て, 2009 年から, 同放送技術研究所にて, 主として双方向 FPU に関する研究に従事。現在, 放送技術研究所 (伝送システム研究部) 研究員。正会員。

みつやま かずひこ
光山 和彦 1999 年, 京都大学大学院工学研究科修士課程修了。2013 年, 慶應義塾大学理工学部後期博士課程修了。1999 年, NHK 入局。NHK 放送技術局を経て, 2002 年から, 同放送技術研究所にて, 番組中継用無線伝送技術の研究に従事。現在, 放送技術研究所 (伝送システム研究部) 専任研究員。博士 (工学)。正会員。

あおき かつのり
青木 勝典 1989 年, 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年, NHK 入局。NHK 金沢放送局を経て, 1991 年から, 同放送技術研究所にて, 高効率符号化方式, デジタル放送の多重化方式, IP 技術を用いる放送システムの研究に従事。現在, 放送技術研究所 (伝送システム研究部) 主任研究員。正会員。

ひらぐり けんじ
平栗 健史 1999 年, 筑波大学大学院理工学研究科理工学専攻修士課程修了。同年, NTT 研究所に入社。2010 年から, 日本工業大学にて, 無線通信アクセス制御に関する研究, 無線伝送効率と通信品質制御に関する研究に従事。現在, 日本工業大学工学部 (電気電子工学科) 准教授。博士 (情報学)。正会員。