

# フレーム構造を用いた同期多重によるデジタル放送の ベースバンド一括再送信システム

日下部 武志<sup>†</sup> 倉掛 卓也<sup>†</sup> 小山田 公之<sup>†</sup>

<sup>†</sup>日本放送協会 放送技術研究所 システム 〒157-8510 東京都世田谷区砧 1-10-11

E-mail: <sup>†</sup> {kusakabe.t-fi, kurakake.t-hq, oyamada.k-ew}@nhk.or.jp

あらまし 近年普及の進む FTTH を利用したデジタル放送の再送信手段として、複数の MPEG-2 TS を時間軸上で多重化しベースバンドで伝送する方式の検討を行っている。今回、伝送信号に周期的なフレーム構造を持たせ、複数の MPEG-2 TS を TS パケット単位で同期多重する方法を提案する。本報告ではまず同期多重方式の特長について述べる。次にフレーム構造および光伝送路における誤り対策について検討する。また伝送装置を試作し誤り率特性、伝送遅延およびチャンネル切り替え時間について評価したので、これらについて報告する。

キーワード デジタル放送, 再送信, ベースバンド, 同期多重, FTTH, WDM

## Multi-channel digital broadcasts over FTTH using frame structure for synchronous multiplexing of MPEG-2 TS streams

Takeshi KUSAKABE<sup>†</sup> Takuya KURAKAKE<sup>†</sup> and Kimiyuki OYAMADA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Broadcasting Systems, Science & Technical Research Laboratories, Japan Broadcasting Corporation

1-10-11 Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo, 157-8510 Japan

E-mail: <sup>†</sup> {kusakabe.t-fi, kurakake.t-hq, oyamada.k-ew}@nhk.or.jp

**Abstract** For re-transmission of digital broadcasts over FTTH, we propose a synchronous time-division multiplexing system to transmit MPEG-2 TS streams, using frame structure consisting of MPEG-2 TS packets. In a synchronous multiplexing system, we can expect stable and jitter-free transmission. In particular, we examined forward error correction required in proposed system over FTTH. We also evaluated an experimental system on bit-error-rate, transmission delay, and channel switching durations.

**Keyword** Digital broadcasts, Re-transmission, Base-band, Synchronous Multiplexing, Fiber To The Home, Wavelength Division Multiplexing

### 1. はじめに

近年、インターネット接続のためのアクセス系インフラとして FTTH (Fiber To The Home) の普及が進んでいる。光ファイバーは広帯域な信号を伝送可能である上、光波長多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 技術により、それぞれの光波長で独立した信号を伝送できる。こうしたことから、データ通信に加え、映像配信も可能なインフラとして注目されている。

有線によるデジタル放送の再送信手段としては、ブロードバンド通信回線を利用し、IP マルチキャスト技術によりデジタル放送の MPEG-2 TS (Transport Stream) を伝送する方法が注目を集めている。一方、光ファイバーの波長帯として、通信用波長帯 (上り/下り 2 波長) とは別に、放送用として割り当てられた光波長帯が規格化されており [1],

3 波長多重によって通信と独立して放送サービスを行う方法がある。このような放送用光波長帯を利用する方式としては、変調波を周波数軸上で多重 (FDM: Frequency Division Multiplexing) し伝送する SCM (Sub-Carrier Multiplexing) [2]あるいは FM 一括変換方式 [3]が実用化されている。

我々は、多チャンネルの MPEG-2 TS をベースバンドで一括して時間軸上に多重し伝送する方式を提案した [4]。この方式は、通信用に開発された低廉な光伝送部品を活用することができ、変調波伝送方式に比べて光伝送部分の大幅なコスト削減が可能になる。提案方式はベースバンド・デジタル信号を伝送することにより、変調波伝送方式に比べて 7~9dB 受光電力に優れることを示した。

多チャンネルの MPEG-2 TS を時間軸上で多重する方法としては、Ethernet スイッチを用いて各 TS の伝送クロッ

クとは非同期に多重化する方式[5][6]と、周期構造を持ったフレーム単位で多重化する方式[7]（以下、同期多重方式）の検討を行っている。今回、同期多重方式について詳細な検討を行う。

本報告では、同期多重方式の特長と試作フレーム構造、および検討した伝送システムについて述べる。続いて伝送路の誤り対策について検討を行うとともに、試作装置による、受光電力特性の評価結果を報告する。

またデジタル放送の再送信においては、直接受信と同等のサービスを実現することを前提とした様々な要求項目が示されているが[8]、それらの項目について、定量的な数値目標はまだ定められていない。今回、要求項目のうち、伝送遅延とチャンネル切り替え時間について、試作装置による評価を行ったので、これらについても報告する。

## 2. ベースバンドによる多チャンネル多重伝送

図 1 に我々が提案した、光波長多重による MPEG-2 TS のベースバンド伝送システム概念図を示す。通信用の光波長との波長多重により、1 芯の光ファイバーを放送と通信とで共用する。提案した伝送システムは、

- ・ IP マルチキャスト伝送と比べ、通信トラフィックの影響を受けないため QoS 確保が容易である
- ・ 1 波長を放送で占有するため、同時に全チャンネルを家庭まで伝送可能である

というメリットがある。

また、ベースバンド信号の伝送であるため、通信用に開発された光送受信技術や部品を活用でき、放送用に特別な回線設計を必要とせず、通信系の回線設計をそのまま利用してサービスを行うことが可能である。

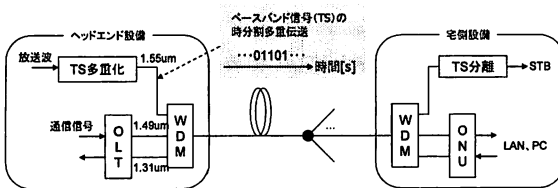


図 1 WDM によるベースバンド伝送システム概念図

本報告で提案する同期多重方式は、多チャンネルの MPEG-2 TS を周期構造を持ったフレーム単位で多重化する方式である。伝送する TS に対し、フレーム内のスロット数を固定的に割り当てることで、ジッタのない安定した伝送、受信が可能である。

## 3. 同期多重方式

本章では多チャンネルの MPEG-2 TS を多重伝送するためのフレーム構造、および提案する同期多重方式の伝送システムについて述べる。

### 3.1. 同期多重方式の伝送フレーム構造

複数の TS を独立性を保ったまま TS パケット単位で多重伝送するフレーム[9]は、ITU-T Rec. J.183 において TSMF (Transport Stream Multiplex Frame) として勧告化されている[10]。

TSMF ヘッダには、フレームの各スロットに格納された TS を識別する ts\_id テーブル (relative\_ts information) があり、受信機はそのテーブルを参照して、所望の TS を選択する。また、ヘッドエンドにおける受信状態や、緊急警報フラグビットなどの情報を格納するフィールドなど、デジタル放送を多重するために必要な機能を備えており、TSMF はベースバンドでデジタル放送を多重する手段として適している。

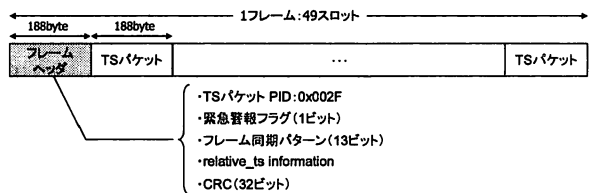


図 2 試作フレーム構造

TSMF をベースとして試作した多重フレーム構造を図 2 に示す。多重フレームは制御情報を送るフレームヘッダと、複数の TS パケットからなる。多重フレームは BS デジタル放送の再送信時の帯域利用効率を考慮して設計した。1 多重フレームのスロット数は、BS デジタル放送の 1 多重フレームで伝送されるスロット数と同じく 48 とした。これにフレームヘッダを加え、1 多重フレームは 49 スロットで構成される。

また、BS デジタル放送の 1 スロット分の情報を多重フレームの 1 スロットで伝送することを想定し、同期多重時のレート変換を考慮して、多重フレームの 1 スロット分の情報レートを BS デジタル放送の 1 スロット分の情報レート (1.087Mbps) よりわずかに高くすることとする。

さらに、BS デジタル放送の各中継器ごとに 1 つの多重フレームを対応させて伝送することとした。2006 年 12 月現在、中継器は 4 個あることから、BS デジタル放送の全中継器の TS を伝送とした場合、伝送路には各中継器に対応する 4 種類の多重フレームが伝送される。

以上は BS デジタル放送の再送信時の帯域利用効率を考慮したフレーム構造としたが、伝送する対象を BS デジタル放送の TS に限定するものではなく、地上デジタル放送あるいは現行のハイビジョンよりビットレートの高い TS などの伝送も、スロット数を適切に割り当てることにより伝送が可能である。

なお、図 3 に示すように、フレームは伝送路速度に合わせて N 個でスーパーフレームを構成し、スーパーフレーム周期で繰り返し伝送する。スーパーフレームには、データを伝送するための多重フレームと、データを伝送しないスタッフィングフレームが含まれる。スタッフィングフレームのフォーマットは多重フレームと同じとし、区別のため多重フレームとは異なるフレーム同期パターンを割り当てる。

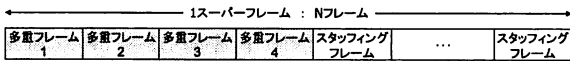


図 3 フレームとスーパーフレームの関係

### 3.2. 同期多重方式の伝送システム

同期多重方式の伝送システムを図 4 に示す。宅側設備は、受信信号からクロックを再生することにより、ヘッドエンド設備に従属同期して動作する。

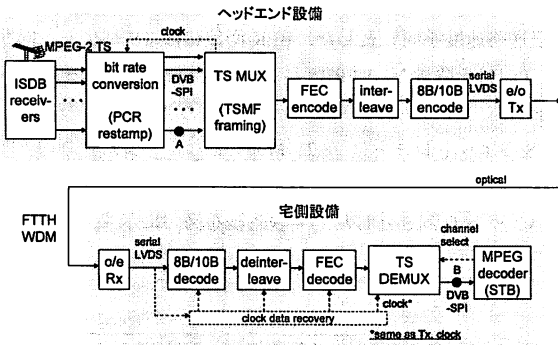


図 4 同期多重方式の伝送システム

ヘッドエンド設備では、RF 受信部で受信、復調された TS を、割り当てるスロット数に応じたレートに変換する。レート変換はヌルパケットの挿入あるいは削除によって実現し、PCR (Program Clock Reference) の打替を行う。同期化された TS は、多重フレーム内の決まった数のスロットに多重される。以上の処理を各 TS に対して行うことにより、フレームヘッダおよび TS パケットからなる多重フ

レームが生成される。

多重フレームおよびスタッフィングフレームからなるスーパーフレームに対し、伝送路誤り対策として FEC (Forward Error Correction) 符号化を行う。FEC は ISDB で用いられている外符号と同じリードソロモン (RS) (204, 188) とした。FEC パリティを付加されたストリームはバイト単位での畳み込みインターリーブを行ったのちに、8B/10B 符号化する。畳み込みバイトインターリーブの深さは RS 符号化後のパケットサイズに合わせ、204 とする。

なお、8B/10B 符号化においては、シリアル-パラレル変換時の 10 ビットアライメントを取る必要があるため、TS パケット同期 (0x47) 部分を置き換えてアライメント用の特殊符号 (K28.5) を伝送する。特殊符号を含む、8B/10B 符号化された信号は NRZ 光強度変調され、伝送路へ送出される。

次に、宅側設備の処理について述べる。宅側設備では、まず光受信部で復調されたビットストリームから、クロックを再生する。ストリームは 8B/10B 復号によりシリアル-パラレル変換され、デインターリーブ、FEC 復号を行った後、多重フレームの同期を取る。多重フレーム同期確立後、フレームヘッダを読み込み、リクエストされた ts\_id の TS パケットを取り出し、MPEG デコード処理が行われる。

### 4. 伝送路誤り対策の検討

本章では所要の誤り率と伝送路の誤り要因について述べ、誤り対策について検討を行う。誤り対策としては TS パケット (188 バイト) 毎に FEC パリティを付加することとして検討を進める。

#### 4.1. 所要バイト誤り率

図 4 に示す伝送システムにおいて、ビット誤りの生ずる主要因は、受光器の熱雑音であるため、ビット誤りはランダムに生ずるとする。

ここで、伝送システムは 8B/10B 符号化を用いているため、所要の誤り率はバイト誤りを単位として検討する。今回の検討では、約 18.5Mbps (約 2.3MByte/s) の TS において 1 日に一度の割合で誤りが発生するバイト誤り率:  $5 \times 10^{-12}$  を許容される誤り率と仮定し、これを所要バイト誤り率とする。

#### 4.2. バイト誤り要因

伝送システムに 1000BASE-PX (GE-PON) 規格[11]に準拠した光受信器を用いる場合、保証されるビット誤り率  $e$  は  $10^{-12}$  以下である。8B/10B 符号化においては、伝送誤り

によって 10 ビットブロックのうち 1 ビット以上が誤ると、バイト誤りが発生する。さらに、誤りにより 10 ビットブロックのアライメントが失われ、アライメント用の特殊符号を再度受信するまでの間、バースト状に誤りが続く場合がある。

このような 8B/10B 復号誤りにおいて、最悪ケースを考え、あるビットが誤ると、その後再度アライメントが行われるまでの全てのデータが誤って復号されるとしてバイト誤り率を評価する。3.2節で述べたように、アライメントが行われるのは TS パケットの同期にあたる位置であり、ある 10 ビットブロックで復号誤りが発生したときの誤りの伝搬は最大で FEC 後のパケットサイズ（以下、n バイトと記述）、平均ではその半分となる。

このときの、ビット誤り率 e のときのバイト誤り率は

$$e_B = \frac{n}{2} \times \sum_{i=1}^{10} \binom{10}{i} e^i (1-e)^{10-i} \approx 5ne \quad (1)$$

で表される。例えば e=10<sup>-12</sup>、n=204 のとき、e<sub>B</sub>=1.02 × 10<sup>-9</sup> である。

### 4.3. FEC によるバイト誤り率の改善

以上、評価したバイト誤り率に対して、FEC による改善効果を試算する。4.2節で検討したバイト誤り率に対する FEC 復号後のバイト誤り率が、4.1節で求めた所要バイト誤り率以下になる FEC を施せば、所期の目的は達成されることになる。

RS (204, 188) は訂正前の誤り率 2 × 10<sup>-4</sup> に対し、訂正後の誤り率が 10<sup>-12</sup> 未満となる。従って例えば 1000BASE-PX 準拠の光受信器を用いる場合、本章で検討してきた誤りに対する訂正能力としては十分である。

## 5. 試作機による評価

以上の検討を元に伝送装置の試作を行った。装置の各機能は FPGA (送信装置 : Xilinx XC2VP30 FF896 受信装置 : Xilinx XC2VP50 FF1152) によって実現した。ロジックの使用率は送信装置で 39%、受信装置で 11% 程度であった。試作装置の諸元を表 1 に示す。

表 1 伝送装置諸元

Number of input TS	10 (DVB-SPI)
Line bit rate	1.25 [Gbps]
TSMF frame size	188 × 49 [bytes]
Slot bit rate	1.175 [Mbps]
Total bit rate	921.568 [Mbps]
Multiplexed signal	LVDS (NRZ, SMA 50 Ω)

RS (204,188) 符号化後の情報速度は 1Gbps であり、3.1 節で述べたスーパーフレームを構成するフレーム数 N=16 とした。16 フレームのうち 4 フレーム (250Mbps) は伝送する 10 チャンネルの TS であり、残りの 12 フレーム (750Mbps) はスタッフィングフレームである。

### 5.1. 受光電力対 BER 特性

光送受信器としてギガビット通信用途の SFP (Small Form Factor Pluggable) タイプ光モジュールを使用し、試作装置の室内伝送実験を行い、RS 符号化を行う場合、行わない場合のビット誤り率 (BER) 特性を求めた。使用した光モジュールは 1000BASE-PX (GE-PON) 規格である -24 dBm での BER:10<sup>-12</sup> 以下[11]、を満たすスペックを持っている。その他の緒元を表 2 に示す。

実験にあたっては比較のため RS 符号化を行わない場合も TS パケットに対し 16 バイトの 0x00 パターンを付加し、伝送路速度を同じとした。BER 測定には TS パケット同期 (0x47) を除き 2<sup>23</sup>-1 PRBS パターンを格納した TS を用い、伝送路のスロットは 24 スロットを割り当てた。このときの TS のビットレートは 28.21 Mbps となる。また残りの 9TS はそれぞれ地上デジタル 4TS、BS デジタル 2TS、全てヌルパケットの 3TS とした。実験システムを図 5 に示す。

表 2 光モジュール緒元

対応ビットレート [Gbps]	1.0625~1.25
送信波長 [nm]	1549.2
受信波長 [nm]	1270~1600
光送信電力 [dBm]	1.9

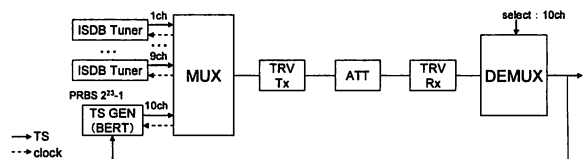


図 5 伝送実験システム

図 6 に測定結果をドットで示す。なお光モジュール単体のビット誤り率を破線で示し、そこから4.2節で述べたバイト誤り率から換算したビット誤り率を実線で示している。ビット誤り率への換算は単純平均して1バイト誤りを4ビット誤りとしている。

測定の結果、試作装置の誤り率は、光モジュールの受光特性から考えられる誤り率とほぼ一致することを確認した。なお、測定結果より、BER =  $10^{-11}$  で比較した場合、RS (204,188) の符号化利得として約 2dB が得られる。

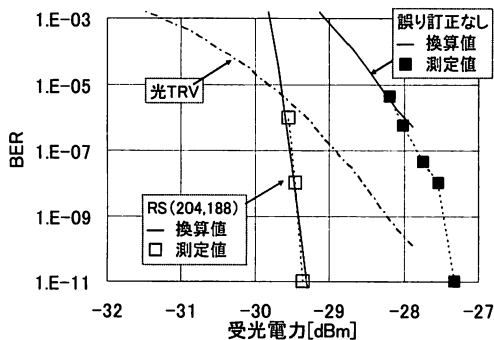


図 6 試作装置の受光電力対 BER 特性

## 5.2. 伝送遅延

試作した伝送装置について、TS の遅延量を測定した。測定には 24 スロットを割り当てた TS (28.21 Mbps) を用いた。伝送遅延は MPEG-2 TS の送受信処理 (図 3 中 A~B の区間) に要する時間とした。測定は TS パケット時間単位 (53  $\mu$ s) で行い、結果は 74TS パケット、約 3.9 ms であった。

デジタル放送の再送信時の伝送遅延については、例えば IP マルチキャスト伝送の場合について、文献[12]でふれられているが、同期多重方式は IP マルチキャスト伝送と異なり、TS パケットの到着間隔に揺らぎを生じない方式であるため、受信装置 (STB : Set Top Box) では揺らぎ吸収のためのバッファリングが不要である。試作装置における遅延の要因は主に送信側のフレーム化処理、および送受のインターリーブ処理となる。測定結果より、伝送遅延は実用上大きな不都合を生じるような大きさではないことを確認した。

## 5.3. チャンネル切り替え時間

変調波を直接受信する STB では、受信する物理チャンネルごとに時間デインターリーブやフレーム同期確立などの復調処理が必要である。一方、2 章で述べたベースバンド伝送方式や IP マルチキャスト伝送の STB ではこれらの処

理は不要であるため、チャンネル切り替えは高速になると考えられる。また、ベースバンド伝送方式ではヘッドエンドで受信した全てのチャンネルが家庭まで伝送されるのに対し、IP マルチキャスト伝送では視聴するチャンネルのみが伝送され、チャンネル切り替えは IGMP 等のプロトコルによる通信で行われる。したがってベースバンド伝送方式は IP マルチキャスト伝送と比較しても、チャンネルリクエストの通信時間がいないため、切り替えが高速であると考えられる。

同期多重方式のチャンネル切り替え時間について、試作装置を用いて測定を行い、直接受信の場合と比較した。測定は映像フレーム単位 (33 ms) で行った。切り替え時間は、視聴中のチャンネルの映像出力が停止してから、リクエストしたチャンネルの映像が出力されるまでの時間とした。図 7 に同期多重方式および直接受信の STB によるチャンネル切り替え時間の累積分布を示す。

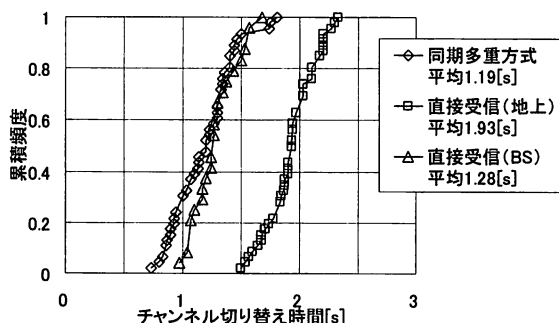


図 7 試作装置および直接受信のチャンネル切り替え時間

MPEG デコーダの処理のパラツキにより切り替え時間には幅が生じているが、同期多重方式では地上デジタル放送の直接受信に比べ、平均で 740 ms 程度短縮される。これは OFDM 変調信号のフレーム同期確立 (231~463 ms) および時間デインターリーブ (最大 218 ms) などの処理が不要なためであると考えられる。

また同期多重方式と BS デジタル放送の直接受信とを比較すると、わずかに同期多重方式の方が切り替え時間が短い。これは BS デジタルの多重フレーム同期確立 (1.4~2.8 ms) および時間デインターリーブ (最大 11 ms) などの処理が不要であるためと考えられる。

## 6. まとめ

多チャンネルデジタル放送の MPEG-2 TS をベースバンド光伝送する方式のうち、同期多重方式について、フレーム構造および伝送システムを検討した。また伝送路誤り対策の検討を行い、試作伝送装置を用いた室内実験により誤り率特性を評価した。ギガビット通信向けの光トランシーバモジュールにより、所要の誤り率を満足し、提案する同期多重伝送が可能であることを実証した。

さらに、伝送システムの重要な指標である伝送遅延およびチャンネル切り替え時間の測定、評価を行った。試作装置での伝送遅延は実用上大きな不都合を生じない程度であることを確認した。またチャンネル切り替え時間は、直接受信の場合と比べ変調信号の復調処理にかかる時間が削減されており、地上デジタル放送については直接受信に比べて高速となった。

今後の課題としては、宅内系ネットワークの伝送方式の検討、および多チャンネル伝送に適した高効率なフレーム構造の検討がある。

## 文 献

- [1] ITU-T Rec. G.983.3 : "A broadband optical access system with increased service capability by wavelength allocation", (2001)
- [2] ITU-T Rec. J.186 : "Transmission equipment for multi-channel television signals over optical access networks by sub-carrier multiplexing (SCM)", (2002)
- [3] ITU-T Rec. J.185 : "Transmission equipment for transferring multi-channel television signals over optical access networks by FM conversion", (2002)
- [4] 日下部武志, 倉掛卓也, 中村直義, 小山田公之 : "ベースバンド時分割多重によるデジタル放送の一括再送信方式の検討", 映情学技報, BCT2006-80, pp.21-24 (Jul. 2006)
- [5] 倉掛卓也, 日下部武志, 中村直義, 小山田公之 : "イーサネットフレームによるデジタル放送の再送信方式の一検討", 2005 信学総大, B-8-19
- [6] 倉掛卓也, 日下部武志, 中村直義, 小山田公之 : "イーサネットフレームを用いたデジタル放送のベースバンド一括再送信システム", 映情学技報, BCT2006-81, pp.25-28 (Jul. 2006)
- [7] 日下部武志, 倉掛卓也, 小山田公之 : "多チャンネル MPEG-2 TS 信号のベースバンド多重伝送の検討", 2005 映情学年大, 12-3
- [8] ITU-T. Rec. J.281 : "Requirements for multi-channel video signal transmission over IP-based fibre network", (2005)
- [9] 倉掛卓也, 中村直義, 前田幹夫, 小山田公之, 宮沢寛 : "ケーブルテレビ複数 MPEG-TS 多重方式の一提案", 映情学技報, vol.23, No.48, pp.7-12 (July 1999)
- [10] ITU-T. Rec. J.183 : "Time-division multiplexing of multiple MPEG-2 transport streams over cable television systems", (2001)
- [11] IEEE Std 802.3 : "Local and metropolitan area networks—Specific requirements Part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications", (2005)
- [12] 西村敏, 青木勝典, 藤田欣裕 : "IP マルチキャストを用いたデジタル放送コンテンツ配信技術に関する一検討", 映情学技報, BCT2005-187, pp.49-54 (Dec.2005)