デジタル放送の多重化伝送技術

正会員 河 合 直 樹†

1. ま え が き

デジタル技術の発展により、家庭に届けられる放送信号も文字放送やテレビ衛星放送の音声のように、デジタル化されているものが出現している¹⁾。これらはアナログ伝送による放送信号に多重したデジタル信号であり、サービスの種類は固定されている。

将来のデジタル放送として、従来の放送サービスを単にデジタル化するのではなく、デジタルの特徴を十分に活かして、様々なサービスを統合化して放送する ISDB(Integrated Services Digital Broadcasting)の開発が行われている²⁾³⁾。ISDB は、限られた放送電波を効率的に利用するため、映像、音声、データなど各種サービスを区別することなく柔軟に編成することを目的とし、その多重化伝送信号は、衛星波、地上波、ケーブル等の伝送路で最大限の共通化が図られる予定である。本講座では、将来のデジタル放送への要求条件を満足するための放送機能に深く関わる多

重化伝送技術を、ISDB を例にして概説する。

2. 多重化伝送への要求条件

ISDB の検討すべき範囲は、図 1 に示すように放送局設備から、放送信号を送出し家庭で受信してそのサービスを利用するに至るまでの、デジタル放送システム全体である。このシステム全系統で、映像、音声、各種データを区別なく、デジタル信号により統一的に扱うことが ISDB の最も基本とする概念である。この ISDB の多重化伝送には、次に示す事項を実現することが求められる⁴⁾。

- (1) サービスを構成するコンポーネント(映像、音声、文字など)を、自由自在に組合せて放送できる柔軟性
- (2) 新サービスの導入など、将来への拡張性
- (3) 各種放送伝送路および他のメディア(通信、パッケージ、コンピュータ系など)との間における、信号の共通性

図 1 ISDB のシステム系統

† NHK 放送技術研究所

"Fundamental Techniques for Digital TV Broadcasting;
(11) Multiplex and Transmission Techniques for Digital
Broadcasting", by Naoki Kawai (NHK Science and Technical
Research Laboratories, Tokyo)

図2 ISDBの基本構造

- (4) 伝送劣化に耐性があり、伝送特性が安定
- (5) 様々なサービス、多番組の中からの番組選択が容易
- (6) 必要に応じた、限定受信方式の導入
- (7) 受信機の低コスト化と運用の経済性

3. 多重化伝送の基本方式

ここでは、前章の要求条件を満たすための、ISDBの多重化伝送の基本となる技術方式を検討する。一般に信号を多重する場合、図3に示すように、ストラクチャ方式とパケット方式の2種類の方式がある。前者は、各サービスを多重する時間位置を固定的に割り当て、サービスと多重位置の関係を制御符号により示す方式である。後者は、各サービスの多重位置を固定せず、データに付加したヘッダによりサービスを示す方式である。

ストラクチャ方式によるデジタル放送の例としては、現在テレビ衛星放送で行っているデジタル音声伝送方式がある⁵⁾。この多重化伝送信号は図4に示すように、周期的に繰り返す伝送フレーム信号の中で音声が決められた時間位置で多重されている。この例では、主に伝送される信号が時間的に途切れることのないテレビ音声で、サービスの編成は固定的であり、その音声符号化に固定速度の方式が採用されているため、ストラクチャ方式が伝送効率、信頼性などの点で有利である。

一方、パケット方式によるデジタル放送の例としては、上記のテレビ衛星放送のデータチャンネルを用いるデータ放送があり⁶⁾、これに用いるパケット多重信号を図5に示す。データ放送では伝送するサービスの種類が多く、それらのサービスには情報内容により伝送量が異なる可変速度の符号化方式を用いるもの、間欠的にバーストデータを伝送する特性を有するもの

ストラクチャ方式：制御符号により各サービスを時間位置で固定的に割り当て多重する

パケット方式：ヘッダによりサービスを識別するため、多重位置は任意に割り当てられる

図3 ストラクチャ多重方式とパケット多重方式

図4 テレビ衛星放送デジタル音声の多重化伝送信号

図5 データチャンネルのパケット多重化伝送信号

の、あるいはリアルタイムの必要性がないサービスなどがある。また、これらのサービスの編成は時々刻々変化すると想定され、将来、新たなサービスを加えていくことも考えておく必要がある。このような場合、様々なサービスへの伝送量の割り当てをヘッダにより柔軟に指定でき、非同期でデータを伝送できるパケット方式の方が、伝送量を有効に活用できると考えられる。パケット方式では、ヘッダを用いることによるヘッダ損と呼ばれる伝送効率の低下があるが、上記のデータ放送でストラクチャ方式を用いると、割り当てた固定伝送量のサービス伝送データ領域で有効でない部分が多くなるため、結果的にパケット方式の方が伝送効率を高めることができる。

ストラクチャ方式とパケット方式の比較を表1にまとめる。両者にはそれぞれ利点があり、デジタル放送の目的に応じて多重化方式を選ぶ必要があるが、ISDBとしては、2章で示した多重への要求条件を考慮すると、基本的にパケット方式を採用する方が利点が多いと考えられる。ただし、パケット方式は高速伝送の場合にヘッダ識別などの信号処理を高速で行わな

表 1 多重伝送方式の比較

比較項目	ストラクチャ多重方式	パケット多重方式
方式策定	サービスの割当構成を事前に決定して制御符号を定め、伝送信号を定めておく必要がある。	サービスにとらわれず、パケット形式により伝送信号を定めることができる。
柔軟性	サービスの編成は事前に決められた固定速度の構成の中で行われる。	速度、伝送周期などサービスの伝送特性に関わらず、自由に編成できる。
拡張性	新しいサービスの追加、多重構成の変更には限りがある。	新しいサービスの追加が可能で、サービスの多重構成を変更することが可能である。
信頼性	周期的な同期と制御符号を基に、安定にサービスを捕捉できる。	パケットヘッダを正確に識別するために、誤り訂正を必要とする。
信号処理の容易性	高速伝送でも、多重位置を捕捉した後は、必要十分な低速の信号処理にすることができる。	高速伝送の場合、誤り訂正、ヘッダ識別などに高速の信号処理が必要である。

ければならず、直接サービスを抽出するサービス分離回路にコストがかかる場合がある。そこで、信号を時間構造的に分離することが容易なストラクチャ方式の利点をサービス分離の前に適用すると、その後の信号処理を低速度化できて都合が良い。このような考え方における多重化伝送信号の具体的設計例を次章で述べる。

4. 多重化伝送信号の構成

2章の多重伝送への要求条件を考慮した ISDB の多重化伝送信号の構成例を図 6 に示す⁷⁾。ここでは放送局における多重化伝送信号の生成過程の順序で述べるが、受信側における復号過程はこの逆の順序となる。

4.1 信号源符号化

映像、音声、各種データなど、番組を構成するコンポーネント信号を、それぞれの信号の性質に適した方法でデジタル符号化し、必要に応じてビット圧縮処理などを行い符号化データを生成する。

4.2 データグループ化

符号化した信号をサービス側からみて、信号内容を区別できる単位に区切り、データグループヘッダを付加して、データグループ信号を構成する。データを区

図 6 ISDB の多重化伝送信号の構成例

切る単位は、例えば映像フレーム、画像1ページあるいは音声の符号化ブロック長など、提示や符号化の単位となるまとまった量のデータである。このように、データグループはサービスの種類や情報内容によりデータ量は異なり、いわゆる可変長のパケットと見なすことができる。

4.3 伝送パケット化⁸⁾

データグループのような可変長のパケットのままでは、様々なサービスを高速で自在に多重することは難しい。そこで、データグループ信号を伝送側からみて多重化伝送に都合の良い一定のデータ長に区切り、パケットヘッダを付加して伝送パケットを構成する。伝送パケットは様々なサービスやそのコンポーネントを多重しやすいように、共通の固定長パケット形式となっている。

パケットヘッダとして、基本的に次の項目が必要と考えられる。

- ・パケット識別子：パケットのデータを区別する。
- ・連続性指標：パケットストリームの伝送順の誤りを検知し、パケットの順序を整える。
- ・データグループ開始フラグ：データグループの先頭が送られるパケットであることを示す。
- ・スクランブルフラグ：限定受信のためのスクランブルの状態を示す。
- ・有効データ長：パケットデータの有効なデータ範囲を示す。

4.4 パケット多重

サービスを構成する各コンポーネント、さらに複数のサービスを伝送パケット単位で時分割多重し、パケットストリームを構成する。パケットストリームには、1つのサービスのコンポーネントを多重したシングルプログラムのストリームと、複数のサービスのコンポーネントを多重したマルチプログラムのストリームの2種類があるが、どちらも同じ信号形式である。

4.5 スロット多重

高速伝送路の場合にはパケット多重に加えて、図6の伝送フレームに示すような、低速の伝送単位であるスロットを用いるストラクチャ多重方式を導入することが考えられている。スロットはあらかじめ定められた時間位置のビットで構成され、受信側では単純な回路でスロットを抽出できる。これにより、その後の誤り訂正、ヘッダ識別などの信号処理を低速化することができる。受信側で多重された伝送信号の中からサービスのコンポーネントを抽出する手順は、まず必要なスロットを取り出し、次にそのスロットで送られるパケットについてのヘッダを識別すればよい。

4.6 フレーム構成

伝送劣化に強い耐性を得るため、パケットストリームを周期的な同期構造をもつ伝送フレームに構成する。この過程では、誤り訂正符号化、インタリーブ、伝送スクランブル、フレーム同期符号付加などの処理を行う。各放送伝送路の放送システムにおける利用目的や伝送容量の違いなどにより、伝送フレームのパラメータは異なるが、基本的な信号構成は最大限の共通化を図ることが望ましい。周期的に同期信号の付加された伝送フレーム信号はビットストリームとなり、最終的なベースバンド信号として変調器に入力される。

4.7 変調

ビットストリームは、各伝路走に適した方式でデジタル変調されて伝送される。衛星波ではQPSKあるいは8PSK、地上波ではOFDM、ケーブルでは多値QAMなどが適しているといわれている。

4.8 伝送制御⁹⁾

ISDBでは、多種多様なサービスが多重されている伝送信号の中から、希望のサービスを構成しているコンポーネントを効率良く抽出し、復号部へ送る機構が重要になる。パケット伝送では多重された各サービスのコンポーネントのパケットが受信側で分離できるように、パケットヘッダはパケット識別子(以降、PID)を含んでいる。このPIDを利用してパケットを識別する方法として、直接指定方式と間接指定方式の2種類がある。

図7に示すように、直接指定方式ではサービス(番組)とPIDの関係が直接規定され、間接指定方式では別途伝送される伝送制御データにより間接的に定めら

図7 直接指定方式と間接指定方式

図 8 伝送制御データの概念

れる。直接指定は、システム内で識別すべきサービス(番組)の数が少なく、固定されている場合に適している。ISDB では識別すべきサービス(番組)数が多く、固定的に割り当てると PID に必要なビット数が多くなり、また将来の拡張性が得にくくなるので、間接指定方式を導入する方が利点が多い。

間接指定方式では、伝送制御データとして次のような項目の関係がテーブル上に示されることになる。

- ・編成チャンネル、・個別番組番号
- ・PID、・符号化方式
- ・スロット番号、・周波数チャンネル
- ・伝送メディア

伝送制御データは容易かつ確実に受信するため、図 8 に示すように、事前に決められた特定のスロット No. と PID のパケットで送信される。

4.9 限定受信

限定受信を行うためには、伝送パケットなどの単位でスクランブルが行われる。

5. 伝送方式の共通化と標準化

5.1 ISDB システムの共通化

ISDB では、種々なサービス・伝送路を統合化して扱うことがひとつの目標である。したがって、伝送における信号形式・信号処理は可能な限り共通化する必要がある。

ISDB の伝送方式において、データグループ化・パケット化・パケット多重・伝送制御の部分は、サービスや伝送路によらず、ISDB システム内で統一された信号形式で行われる。したがって、この部分の信号処理は、すべてのサービス・伝送路で共通になる。

一方、伝送路の性質に依存するフレーム構成・変調方式は、基本的には使用する伝送路により個別に設計されるものである。しかし、同じ種類の伝送路や性質の類似した伝送路のフレーム構成・変調方式は、可能な限り共通化を行うことが望ましい。

限定受信は、暗号など秘密に関わる部分を含むため、国や放送局(またはグループ)の事情により、それぞれ独立した限定受信システムを採用することが多い。この場合でも、1つの限定受信システムを用いる範囲内では、サービスおよび伝送路によらず共通の方式を用いることが可能である。

5.2 MPEG の利用と標準化⁷⁾¹⁰⁾

映像や音声の符号化、信号多重化を検討する国際機関として MPEG が知られている。MPEG-2 は、まもなく国際標準として決まろうという状況にあり、放送の分野にも少なからず影響力を持つものと考えられる。放送に関する国際標準化機関である ITU-R でも、デジタル放送における MPEG-2 の取り扱いを検討している最中である。

MPEG-2 は、多重化方式を定めた Part 1(Systems)、映像の符号化を定めた Part 2(Video)、音声の符号化を定めた Part 3(Audio)から構成される。Part 2、Part 3 がそれぞれ映像、音声の符号化、Part 1 が信号多重に対応している。Part 1 に定められるトランスポートストリームは、データグループ構造およびパケット構造を持ち、パケット多重方式および伝送制御方式を採用するなどの点で、ISDB の伝送方式の基本構造と共通点が多い。MPEG-2 の利用は、他メディアとの両立性および国際標準化を推進する上で望ましい方向であり、このことから ISDB の伝送方式として適用することで検討が進められている。

6. 複数テレビの多重化伝送

ISDB は様々なサービスを行うことが可能であるが、ここではひとつのサービス形態として、ISDB 1 チャンネルの中で複数の標準テレビをサービスする場合の多重化伝送の技術について、放送システムの観点から述べる。

6.1 伝送ビットレートとサービス品質¹¹⁾

伝送路として 12 GHz 帯衛星放送を仮定すると、1

チャンネルの帯域幅 27 MHz の中で QPSK などの変調方式を用いた場合、混信保護の条件を満足する範囲では伝送ビットレートはおおよそ 40 Mb/s まで伝送できる可能性がある¹²⁾。符号化利得が比較的高い符号化率 75% の誤り訂正符号を用いた場合、映像符号化方式により異なるが、受信 C/N (27 MHz) と映像品質の関係は図 9 のようになると考えられる。伝送ビットレートが 40 Mb/s の場合、サービス限界(品質評価 = 2.5)はおおよそ C/N (27 MHz) = 9 dB と予測され、これは現行の FM 変調によるテレビ衛星放送の FM スレッショルドとほぼ同等の C/N 値に相当すると考えられる。

6.2 伝送可能なテレビの数¹¹⁾

ISDB 1 チャンネルの中で伝送できるテレビサービスの数は、伝送ビットレートと映像・音声の符号化レートにより異なる。放送するテレビの映像・音声符号化レートをすべて固定レートとし、同期やヘッダなど伝送に必要な信号を含む場合、テレビの数と伝送ビットレートの関係は(1)式のようになる。

$$R = \frac{(V+A)n(1+h)(1+f)}{r} \quad (1)$$

R : 伝送ビットレート, V : 映像符号化レート

A : 音声符号化レート, n : テレビの伝送数

r : 誤り訂正符号化率, h : ヘッダ損

f : 同期, 制御に必要なビット数の増加の割合

$A=512$ kb(4 ch の音声), $r=75\%$, $h=2.2\%$, $f=0.4\%$ と仮定すると, 12 GHz 帯衛星放送 1 チャンネルで放送できるテレビの数の目安は図 10 のようになる。この図では伝送ビットレートをパラメータとし、映像符号化レートをすべて一定としている。実際の映像符号化レートは映像内容により大きく異なるため、符号化レートの異なるテレビの組合せによって伝送数は変わることになる。

図 9 推定される受信 C/N と映像品質

6.3 統計多重

前節では、映像を一定レートと仮定したが、一般に高圧縮の映像符号化方式を用いると、データ発生量は時間軸上で大きく変化し、可変レートとなるのが普通である。通信の分野ではこのような場合、多数の映像を用いて統計多重を行い、伝送効率を上げる方式が提案されている。統計多重とは、1 つ 1 つの映像にピークの伝送容量を割り当てると、使用されない部分が多くなり伝送効率が悪化するが、多数の映像データを合計したデータ発生量は平滑化するため、さらに多くの映像が伝送可能になるという、情報源の統計的性質を利用した多重化伝送技術である¹³⁾。一般に統計多重の多重利得 G は(2)式のように表される。

$$G = \frac{\text{統計多重を行った場合の多重数}}{\text{ピーク伝送容量を割り当てた場合の多重数}} \quad (2)$$

図 11 は、複数のテレビ信号を多重した場合の、データ量の発生頻度を 1 チャンネルあたりに換算した結果である¹⁴⁾。統計多重の効果を期待するには相当多数

図 10 伝送ビットレートをパラメータとした場合のテレビ伝送数と映像符号化レートの関係

図 11 複数のテレビ信号を多重した場合のデータ量の発生頻度

(a) 通信のシステム

(b) 放送のシステム

図 12 放送と通信のシステム構成の相違

多重しなければならないことがわかる。現実の放送伝送路 1 チャンネルで伝送できるデジタルテレビの数は、統計多重の効果が期待できるほど多くはない。

放送で統計多重を用いるには、テレビだけでなく、音声、各種データを含めたマルチメディアを扱う場合が有効である。例えば、ファイル転送型のデータ放送の多くはリアルタイム性がなく遅延が許されるため、統計的に発生する伝送容量の使用されていない部分を埋めるように多重することができ、全体の伝送量を平滑化することができる。

また放送は図 12 に示すように、通信と多重化伝送のシステム構成が基本的に異なり、符号化部が多重化部と隣接している場合がある。この場合、伝送容量が使用されている状況を符号化部へフィードバックして符号化部におけるデータ発生量を制御し、伝送効率を最適化することが可能である。これには消極的な手法と積極的な手法があるが、前者としては、1 つのテレビでデータ発生量が少ない場合には、余った伝送容量を他のテレビへ融通することが考えられる(融通多重)。後者には、複数のテレビ映像符号化の際に各々のデータ発生量(例えば、符号化器におけるデータバッファ量)を検査し、それに応じた伝送容量を動的に割り当てていくことが考えられる(動的伝送量割当て)。

統計多重の概念を広義に考えた場合の、放送における適用の研究開発は今後の課題である。

7. む す び

本講座では、デジタルテレビの伝送だけでなく、マルチメディアや将来の放送サービスの発展を考慮した場合の、特に ISDB を想定した多重化伝送の技術を概説した。多重化伝送の技術は幅広く、さらに盛り込まなければならない詳細な技術要素があり、例えば、送受クロックの同期再生、正確な提示タイミングの制御、伝送効率の高い多重制御などがあるが、別の機会に報告させていただく。

多重化伝送には、将来のデジタル放送システムへ要求される機能を実現するための多くの技術要素を含み、視聴者の利益、放送事業者の運用性およびメーカーの受信機製造コストなどに大きな影響を与えることになる。方式策定にあたっては、幅広い観点からの十分な検討が望まれる。

〔参 考 文 献〕

- 1) 石田編：“放送とニューメディア”，pp. 121-150, pp. 203-261, 丸善(1992)
- 2) 河合ほか：“ISDB 放送方式の検討”，テレビ学技報，15, 35(June 1991)
- 3) 吉村：“ISDB と 21 世紀の放送サービス”，NHK 技研 R & D 増刊，26, pp. 10-16(Sep. 1993)
- 4) 木村ほか：“各種伝送路における ISDB 多重方式の検討”，テレビ学技報，17, 54, pp. 13-18(Sep. 1993)
- 5) 吉野ほか：“テレビジョン衛星放送デジタル音声伝送方式”，テレビ誌，37, 11(Nov. 1993)
- 6) 石田編：“放送とニューメディア”，pp. 151-171 丸善，(Apr. 1992)
- 7) 木村ほか：“MPEG-2 Systems の ISDB への適用の検討”，テレビ学技報，1, 28, pp. 7-12(May 1994)
- 8) 大崎ほか：“ISDB 伝送のためのバケット長の検討”，信学春季大，B-790(Mar. 1993)
- 9) 木村ほか：“ISDB の受信制御方式”，テレビ年次大，pp. 277-278(July 1993)
- 10) ISO/IEC 13818 (MPEG-2) DIS (June 1994)
- 11) N. Kawai：“ISDB transmission system in 12GHz band digital satellite broadcasting”，NAB '92 Broadcast Engineering Conference Proceedings, pp. 43-51 (Apr. 1992)
- 12) 加藤ほか：“デジタル衛星放送用変調方式の検討”，テレビ誌，47, 10, pp. 1358-1366(Oct. 1993)
- 13) 日本 ITU 協会編：“わかりやすい B-ISDN 技術”，pp. 47-51, オーム社 (Oct. 1993)
- 14) 岸野ほか：“バケット符号化を考慮した映像信号の統計的性質”，Proc. PCSJ'87, 8-5(1987)

かわい なおき
河合 直樹 昭和 53 年、東京工業大学大学院電子システム専攻修士課程修了。同年、NHK に入局。新潟放送局を経て、56 年より、同放送技術研究所に勤務し、現在、同所デジタル放送方式研究部主任研究員。放送衛星を用いる新放送方式、多チャンネル PCM 音声放送、ISDB の研究等に従事。正会員。