

衛星放送の視点で見た通信伝送路安定化の調査報告

一般財団法人 日本海事協会 技術研究所

塚越 郁夫

目次

はじめに	1
1. 衛星放送の概略	2
2. 本報告のスコープ	5
3. 変調方式	6
4. 誤り訂正	8
4.1 衛星放送 ISDB-S3 における誤り訂正符号	8
5. 衛星チャネルの降雨減衰対策	9
5.1 可変速度変調	11
5.2 送信側での対策	12
6. 伝送フレームと制御信号	14
6.1 伝送フレーム	15
6.2 TMCC による伝送路レイヤの制御	16
7. 効果	18
8. 考察	19
あとがき	21

はじめに

自動運航船の段階的発展として、2025年までのフェーズⅡ自動運航船^[1]で実現する内容に下記
のことが掲げられている。

- 高度なデータ解析技術や AI 技術を活用して船員がとるべき行動の具体的な提案
 - 判断に必要な情報を視聴覚的に掲示
 - 陸上からの船上機器の直接的操作が可能（最終意思決定者は船員）
- （令和2年12月 国土交通省 自動運航船の実用化に向けて～開発実証と基準戦略）

上記文書によれば、自動操船機能とともに遠隔操船機能が、衛星通信や地上波無線通信により、
例えば400km離れた陸上施設から遠隔監視・操船機能を実証するとされている。^[1]

それを実現・実証する際に、船陸間の通信はベストエフォートが前提とされ、複数の双方向通信が
帯域を共有することによる伝送速度の増減は、対象エリアにおける送受信サービス数そして個々の通信
実効レートに依存する。その中でどれほどの帯域を得るかは通信事業者との契約に依存する。また、送
受信に関与する機器の性能および信頼性に関しては仕様把握により、ある程度は想定範囲内で推移
すると考えられる。一方で、高度36000km上空にある静止衛星を介した通信は自然環境に依存す
る度合いが大きい。自然環境としては通信電波に対する太陽雑音による妨害や降雨による減衰があげ
られるが、衛星伝送路遮断の自然環境要因としては、大気圏（特に対流圏）における降雨減衰が
最も大きいとされている。

衛星を用いた通信サービスのうち代表的なものひとつに衛星放送があげられる。衛星放送は言わば
帯域保証されたサービスではあるが、1対多の通信サービスとして広くあまねくサービスを行き渡らせるため
に、降雨減衰による伝送路遮断の影響を可能な限り低減する対策をとっている。日本では、総務省の
「放送サービスの高度化に関する検討会」で「スーパーハイビジョン WG」を設置、4K/8Kに対応した放
送サービスの規格化が行われ、2018年12月より放送が開始されている。

本報告では、最新の衛星放送規格の概略を俯瞰し、伝送路遮断の影響を可能な限り低減するた
めに考慮された技術要素をピックアップし、船陸間通信において伝送効率を高め、且つ、通信遮断率
を低減し接続信頼性向上へ向け、規格化や実装の際の議論、あるいは通信事業者との協議の際の
参考情報として紹介する。

1. 衛星放送の概略

放送衛星（BS：Broadcasting Satellite）を用いた衛星放送（BS 放送）の先駆けは、1984年5月に試験放送開始、1989年6月に本放送へ移行したBSアナログ放送である。赤道上空の高度約36,000kmの距離にある静止衛星搭載のトランスポンダ（1チャンネルあたりの周波数帯域27MHz）を4個使い4チャンネル（4番組）が放送された。

2000年12月にBSデジタル放送が開始された。BSデジタル放送では、デジタル変調方式そしてデータ圧縮技術により、27MHzのトランスポンダ1チャンネル分の帯域に2番組以上のサービスを提供することが可能となり、当初は4チャンネルで10番組を放送した。その後、衛星トランスポンダの周波数帯域は34.5MHzに拡大され、1チャンネルの伝送速度は52Mbpsが可能となった。

BSデジタル放送（以後、衛星放送）開始時点では、映像の解像度はフルHD即ち、“1920x1080x60Hz interlaced”の画素レートであったが、その後、放送規格は立体映像に対応する3DTV、そして超高画質化を実現したUHDTV(4K/8K；8Kは開発元のNHKが“スーパーハイビジョン”と命名)と進化してきた。上記規格準拠した放送サービスの運用は、フルHD⇒3DTV(BS11等で放送、その後中止)⇒UHDTV(4K/8K)と進化の過程をたどっている。

一連の進化において、特にUHDTVに際し、その当時、既に存在していた一般家庭の受信機への影響を鑑み、従来との棲み分けを確保し(#1)、衛星トランスポンダの周波数再配置や、円偏波を従来の右旋に加え左旋も利用するなど、衛星中継器資源の有効活用を行いながら、従来放送と新規放送の双方の伝送を確保した。

衛星通信は直線偏波が多いが地上の場所によって傾き角が異なる。衛星放送は各家庭で受信することから、受信アンテナの傾きの調整が不要であることが望ましく、これがBSによる衛星放送では円偏波採用の理由である。円偏波では垂直方向の電界と水平方向の電界との間に位相差をもつ。垂直方向の電界位相が水平方向の電界より $n/2$ だけ進んでいる場合、伝搬方向に向かって電界が反時計回り（左）周りに回転して見えるので左旋円偏波、逆に、 $n/2$ だけ遅れている場合は、右旋円偏波と呼んでいる。図1のように、4K/8K衛星放送（正確には“新4K/8K衛星放送”）は、従来の衛星放送で使用してきている右旋円偏波に加え、左旋円偏波の電波を使用する。右旋波と左旋波の信号は各々独立して扱うことができ、右旋波と同じ周波数帯で左旋波を伝送できる。なお、新たに左旋円偏波を受信するには、左右旋両円偏波に対応する受信アンテナが必要になる。

(#1) 従来からの受信機は新規の4K/8Kサービスをそのままでは受信できないが、新規サービスを受信できる新規受信機と市場で混在することを許すもの。既存の受信機の買い替えを強要せずインフラに悪影響を及ぼさない方法

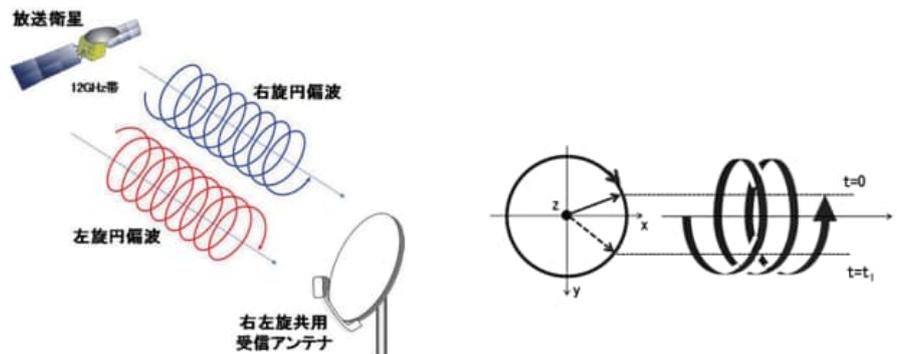


図1 円偏波 [2][3]

2018年12月には4K/8K放送が開始された。なお、UHDTV(Ultra HDTV)の広範な普及を図り多チャンネル化を行うために、この時期に新たな放送衛星 BSAT-4a が打ちあげられ、こちらも含めて運用している。

2023年6月現在、4K/8Kの放送チャンネルは、BSの4K放送が9チャンネル、BSの8K放送が1チャンネル、CSの4K放送が8チャンネル、計18チャンネルが放送されている。^[2] (#2)

4K/8K放送での伝送データの多くを占める映像の入力フォーマットは最大で“7680x4320x60Hz progressive”の解像度をもった画素レートになり、従来のHDに比べ1秒当たりの画素密度が32倍の複雑度になる。“超高画質”が指す意味は、体積的な解像度だけではなく、量子化精度を従来の8bitから10bitに拡張し、表現可能なダイナミックレンジを拡大して明暗のコントラスト比を飛躍的に増大させ、人間が瞳孔を固定した状態で識別可能な範囲の上限といわれるダイナミックレンジ 10^5 まで拡大した(#3)。さらに広色域に対応(#4)したことで、現実に近い、より鮮明なカラー表現を可能としている。他にも、動きの滑らかなHigh Frame Rate対応や、3Dオーディオを採用するなど、自然界にあるがままの状態に一層近い臨場感を受信機で視聴再生可能な品質を実現させた。(図2)

これらは制作を含む放送側と受信機側の双方が対応することで実現できたものである。

(#2)

右旋チャンネル:NHK BS4K, BS日テレ4K, BS朝日4K, BS-TBS4K, BSテレ東4K, BSフジ4K。

左旋チャンネル:NHK BS8K, ショップチャンネル4K, 4K QVC, WOWOW 4K, J SPORTS 4K, 日本映画+時代劇4K。

(#3) ITU-R BT.2020 準拠

(#4) ITU-R BT.2100 準拠

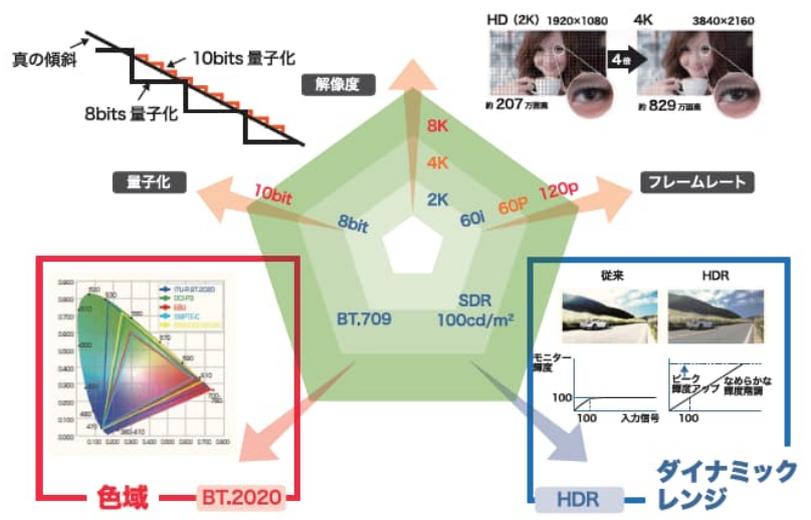


図2 超高画質映像の5カテゴリ [2]

デジタル放送における信号の流れの概略を図3に示す。

放送局（ここでは制作も含んで扱う）では、映像、音声、データ等の個々のメディア情報を各々「圧縮符号化」し、「エレメンタリ・ストリーム」と呼ばれるデータシーケンスを生成する。個々のエレメンタリ・ストリームは「多重化」でまとめられ、同期管理をとり多重化ストリームとしてパケット化される。

多重化ストリームの伝送路符号化の際には、伝送路エラー等の誤りを受信側で訂正するための「誤り訂正符号」を付し、伝送フレームを構成し所望の電波にのせるための「変調」を行う。受信器側では、送信系と逆の操作を行う。

ここで、誤り訂正符号や変調方式への要求は伝送路により異なり、地上波放送、衛星放送、ケーブル放送等で各々適切な方式が採用されている。デジタル放送では主に、位相変調、あるいは位相変調と振幅変調の組み合わせによる変調方式が採用されている。

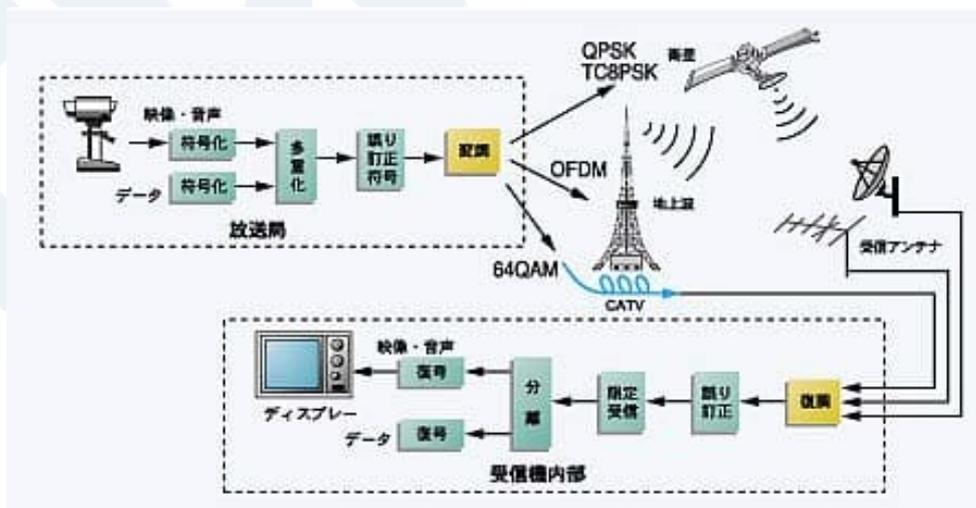


図3 放送システム全体図 [19]

2. 本報告のスコープ

衛星を介した放送サービスの進化を実現した技術は、以下の2点に集約されると筆者は考える。

- (1) 伝送路符号化方式（変調方式，誤り訂正）
- (2) 映像・音声の情報源圧縮符号化方式

本報告では上記のうち，パラメータ選択による回線信頼性の対策をとるという観点で，衛星チャネルの伝送路符号化の主要技術の一つである変調方式に焦点をあて説明する。映像・音声等の情報源圧縮符号化方式の技術説明は，次回取り扱う。

日本の4K/8K衛星放送の伝送路符号化の規格である，ISDB-S3の概要を表1に示す。ここでは変調方式，誤り訂正符号，そして制御情報に関する仕様が規定されている。

表1 ISDB-S3方式概要

ISDB-S3方式の概要	
項目	内容
変調方式	$\pi/2$ シフト BPSK, QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK*
誤り訂正方式	内符号：LDPC符号 (符号長 44880) 外符号：BCH符号
内符号符号化率	1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 7/9, 4/5, 5/6, 7/8, 9/10
制御情報(TMCC)	変調方式・符号化率の制御，多重データフォーマット制御(MPEG-2 TS, TLV)等
フレーム構造	120スロット/フレーム
シンボルレート	33.7561Mbaud
ロールオフ率	0.03
その他	伝送信号点配置情報により，衛星中継器で生じる非線形特性による受信性能劣化を改善

※民間規格のみの規定で，省令では規定されていない

“超高画質”の放送品質を実現するにあたり，伝送路としての帯域（速度）要求を満足するため，伝送路符号化では，変調方式としてシンボルあたり4ビットの高効率で情報伝送する16APSKを採用し，それと共に，この多値変調の弱点であるビット誤り率(BER; Bit Error Rate)の増加（後述）に対する対策も考慮し，誤り訂正符号として内符号にLDPC (Low Density Parity Check) 符号，外符号にBCH(Bose Chaudhuri Hocquenghem)符号を付して受信機において誤りの回復を行えるようにしている。また，TMCC(Transmission and Multiplexing Configuration and Control) により制御情報を伝送する。

3. 変調方式

変調とは、映像・音声・データ等の信号を、搬送波（信号を乗せるための基本的な伝送波）に乗せるための変換操作のことをいう。

一般には次式で表され、加法定理により位相がずれた 2 つの成分に分離される。

$$\begin{aligned} M(t) &= A \cos(2\pi f t + \varphi) \\ &= A \sin \varphi \cos \omega t + A \cos \varphi \sin \omega t \end{aligned}$$

搬送波の角周波数 $\omega=2\pi f$ とし、 A は振幅、 f は周波数、 t は時間、 φ は変調位相を表す。

消費電力抑制が求められる衛星通信では、ピーク対平均電力比が低い位相変調（PSK; Phase Shift Keying）が主に使われる。位相変調は搬送波の位相 φ を変化させる変調であり、変調波は

$$\begin{aligned} I(t) &= A(t) \cos \omega t \\ Q(t) &= A(t) \sin \omega t \end{aligned}$$

と表される。 $I(t)$ は同相成分の振幅、 $Q(t)$ は直交成分の振幅で、IQ 面上での信号点の配置を円周上の等間隔位置に配置したコンステレーション（信号点配置図）は図 4 になる。入力が 0 ならば -1 、1 ならば 1 となる振幅で変調すると入力信号に応じた位相点、すなわちシンボルが得られる。ここで、半径方向の値が変調されたキャリアの振幅を表し、円周上の角度が位相を表すもので、搬送波の位相を任意にずらすことに対応する。BPSK（Binary Phase Shift Keying）は、搬送波の位相を同相（0 度）と逆相（180 度）に対応させ 1 シンボル期間に 1 ビットの情報伝送を行う最も基本的な変調方式である。QPSK（Quadrature Phase Shift Keying）は BPSK の搬送波の位相を 90 度おきにとり、1 シンボル期間に 2 ビットの情報伝送を行う方式で、「00」「01」「10」「11」の 4 値の情報を伝送することが可能である。8PSK は位相を 45 度と細かくし、1 シンボルあたり 3 ビットの伝送が可能になる。なお、隣接する信号に対し誤り訂正符号化を行う TC8PSK(Trellis Coded 8PSK)方式もある。さらに、振幅方向の変調も加えることで搬送波位相を 22.5 度毎に等間隔にとり、16 個の信号点を得る 16APSK がある。

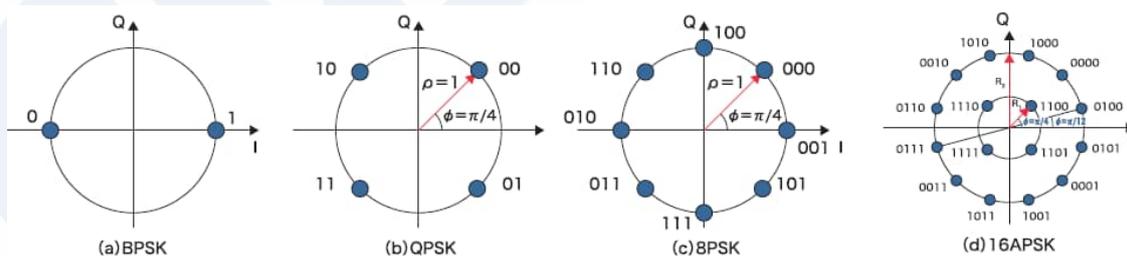
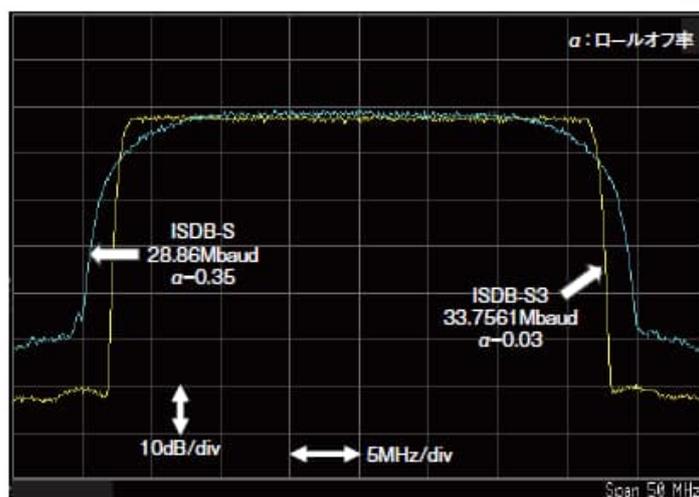


図 4 代表的な位相変調方式^[12]

位相点の数が多いほど、同時に送信できる情報が多くなるが、反面、位相点間の距離が近くなるので伝送中のエラーの妨害を受けやすくなる。

“超高画質”の放送品質を実現するにあたり、4K/8K 放送の伝送路符号化では、変調方式には従来の 8PSK よりも更なる効率化を実現する 16APSK を採用している。また、周波数帯域を最大限

有効利用するため、伝送時の変調信号の帯域制限を行うロールオフフィルタをロールオフ率 0.03 という非常に急峻なカットオフ特性（図 5）とし、変調信号のスペクトル波形を方形に近づけることで、電波法で規定されているトランスポンダあたりの占有帯域幅 34.5MHz を満足しながらシンボルレートを 33.756Mbaud まで増大させた。これにより伝送速度 100Mbps/チャンネルを実現している。^[16]



ISDB-S: 従来の BS デジタル放送, ISDB-S3: 高度 BS デジタル放送(4K/8K)

図 5 変調信号の周波数スペクトル^[5]

この伝送速度 100Mbps は、従来の BS デジタル放送の伝送速度の 2 倍に相当する。従来比で 2 倍にあたる伝送速度によって、従来比 32 倍（既説明のとおり）にあたる映像データを送信するため、従来型コーデック(#5)に比べて圧縮率に一層の向上性能をもつ最先端の映像圧縮符号化コーデック H.265|HEVC を採用し、1 チャンネル分の 8K 映像・音声は 100Mbps のビットレートで放送配信されている。

(#5) BS デジタル放送, 地上波デジタル放送, そして DVD ではすべて同一のコーデック(CODEC; COmpression and DECompression)で、MPEG2 ビデオ方式を採用している。

4. 誤り訂正

地形や雨などの影響で、伝送途中でデータに誤りが発生し、変調された位相点の位置を誤って受信してしまうことがある。デジタル放送の場合には受信ビット列が判読不能となり致命的な障害となる。

デジタル伝送路での誤り制御として、受信側で誤りを検出すると送信側にフィードバックを行い再送要求を行う方法、または、データと共に誤り訂正符号を送信し受信側で情報の復元を行う方法がある。

放送は基本的に、送信⇒受信の一方向伝送路であるので、上記のうち受信側で誤り訂正を行う FEC (Forward Error Correction) 方式が妥当と考えられている。

誤り訂正符号はデジタル伝送路で必須の要素技術で、伝送路で生じたビット誤りを誤り訂正符号によって、所定のビット誤り率まで下げようとするものであり、通信・記録・放送の各分野で広く採用されている。誤りの発生がランダムに起こるか、バースト状に起こるかの違いや、誤り訂正用のパリティビットを増やせば訂正能力は増すが、反面、伝送効率は低下する。そして、復号回路の複雑度を考慮の上で誤り訂正方式を設計することが重要とされている。誤り訂正符号の訂正能力は、信号間のハミング距離を用いて考えることができる。基本概念は図 6 に示すとおりで、誤り訂正符号化器で k ビットの情報源データに、 m ビットの冗長ビットを付加し、符号語 w を出力する。

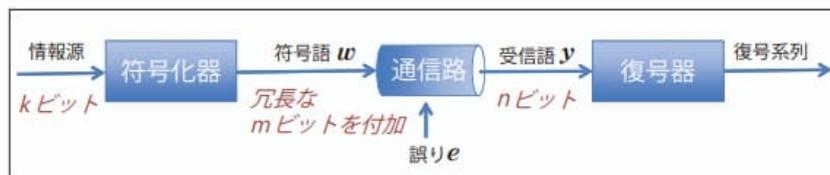


図 6 誤り訂正の概念^[17]

この符号語 w のビット数 ($n=k+m$) を符号長と呼ぶ。 $R=k/n$ を誤り訂正の符号化率 (符号化レート) といい、符号の効率を表す。これに、通信路で雑音などによる誤り e が加わり、受信語 $y = w+e$ を出力する。受信側復号器では y から符号語 w を求め、復号系列を得る。

4.1 衛星放送 ISDB-S3 における誤り訂正符号

4K/8K 衛星放送における伝送路符号化規格である ISDB-S3 では、受信者端子における総合品質への要求は、再生映像において、通常の視聴状態でブロックノイズ等の視認が難しいレベルとして、誤り訂正後の出力段で所定のビット誤り率の性能を得よう誤り訂正符号を設けている。

誤りが連続的に発生し出現頻度に偏りがあるようなバーストエラーが発生し、エラー訂正範囲を超える際の対策には、情報源シンボルをシャッフルすることでバーストエラーをランダム化するインターリーブを行う。主信号系と TMCC 制御信号とは同一の符号化器とし、外符号と内符号をつなげる接続符号を採用している。外符号はシンボル誤りの訂正に BCH 符号を、内符号はランダム誤り訂正に LDPC 符号を採用している。^[11]

5. 衛星チャネルの降雨減衰対策

電波は周波数が高くなると、その性質として 1. より広い帯域が利用できる。2. 同じ開口面積のアンテナで利得が高くなる（指向性が高くなる）。3. 回線相互間の干渉を防止できる。等の利点がある。^[14]

一方で、電波が雲や雨滴に当たると雨滴がレンズの役割を果たし、電波は吸収されたり散乱させられたりして弱まる性質がある。電波の波長が雨滴の大きさに近づくとつれ、雨滴による電波の吸収・散乱が起こりやすくなるという特性がある。雨滴の大きさは直径(0.3~4)mmといわれる。

周波数が高い電波ほど、波長が短く降雨減衰が起こりやすい性質がある。具体的には、10GHz 以下のマイクロ波帯ではあまり問題にならなかった、降雨による電波強度の減衰が 12GHz 帯以上では大きくなり、雨が強くなると急激に受信機側の画質音質の品質が劣化する。降雨による電波の減衰は気象現象が起こる対流圏でのみの現象だが、大気圏の他の高度を含め、太陽妨害による雑音を含めても降雨減衰の影響は最も大きく、回線設計上の最重要因子とされている。^[7] 研究論文も多数存在するが、雨滴断面積の和を雨滴の全損失断面積として、その波動方程式を Bessel 関数を用いて解くことで、降雨強度と雨滴半径、その断面積あたりの減衰量が得られる等とされている。^[8]

電波を発出する際の変調方式として図 7 に示すように、BPSK から QPSK, 8PSK, 16PSK と多値変調になるほど、BER (Bit Error Rate; #6)は悪化する傾向にある。これは図 4 に示したとおり、隣接信号点間距離に依存するものであり、同じ BER とするには、多値変調になるほど必要な所要 C/N 比(#7)は高くなる。

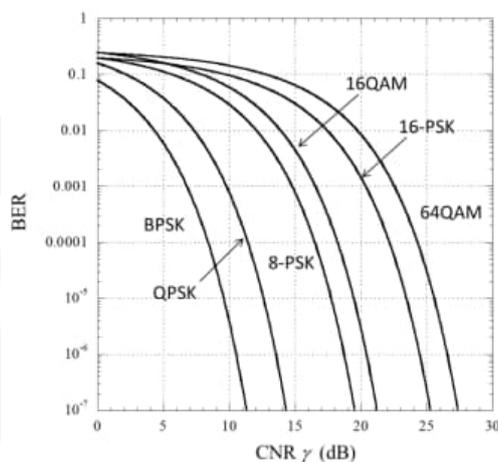


図 7 所要 C/N 比と BER 特性 ^[20]

(#6) ビット誤り率(BER) = 誤りビット数 / 伝送ビット数 で得られる値であり、送信されたデータがどの程度正確に受信されているかを示すもので、受信品質を判断する際に用いる。

デジタル伝送では一定の誤り率を超えると訂正機能が利かなくなり、品質が急激に劣化する。

(#7) Carrier to Noise Ratio(搬送波対雑音の電力比)。エラーフリーで伝送可能な、信号電力と雑音電力の比の最小値を示すもの。^[4]

受信機において、復調前の受信入力端子の電圧が同じ信号であっても、ノイズレベルが高いとC/N比は小さい値となる。(図8) 所要C/N比よりも実際のC/N比が小さくなると信号は誤りやすくなる。一般に、所要C/Nが低い伝送方式により情報を提供することで、サービスが遮断される時間の短縮が期待できる。衛星放送の場合、通常時C/N比25dB以上は確保したい、とされている。

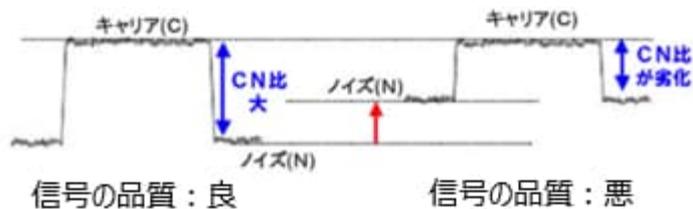


図8 信号のC/N比

ここで、降雨減衰に対する対策は、図9に示すように主に3つの方法がある。^[14]

- (a) 可変速度変調
- (b) 送信電力制御
- (c) サイト・ダイバーシティ

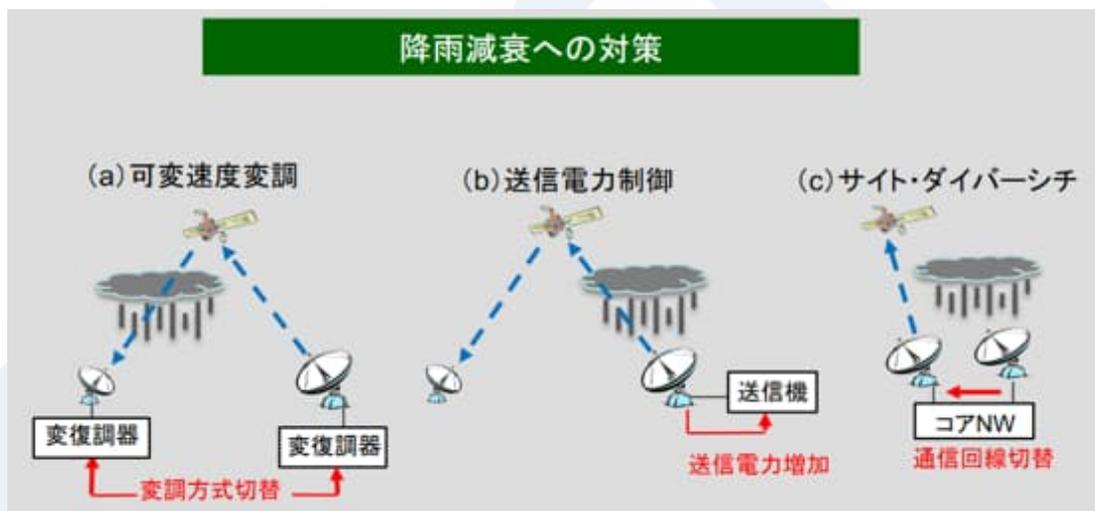


図9 降雨減衰対策^[14]

5.1 可変速度変調

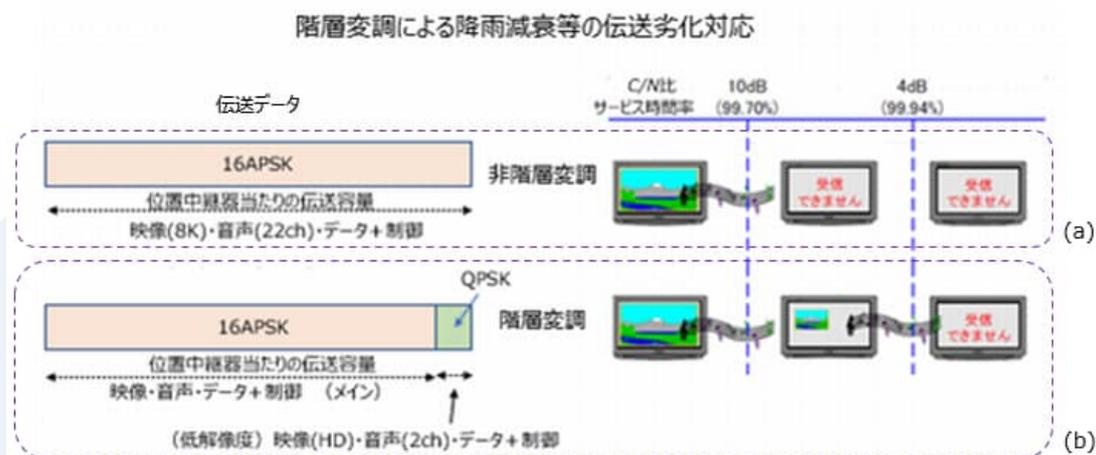
ダウンリンク(#8)側, すなわち受信機側で対策が行えるよう, 階層伝送 (階層変調) があげられる。

これは衛星放送のようにマルチキャスト型配信を行う場合に有効と考えられる方法で, 可変速度変調ともいわれる。降雨減衰の影響を受ける受信機側において, 伝送された変調波のシンボルレートを状況により選択できるようにするものである。(図 9(a))

言い換えれば, 「同一伝送帯域内で異なる複数の伝送性能による放送を可能とする伝送方式」であり, 降雨減衰により多値変調方式による放送にマージンがなくなった場合, 所要 C/N 比が低い変調方式でバックアップのテレビ信号を受信することができるようにしている。

4K/8K 衛星放送では, 位相点数が少ない, よって減衰率の低い変調方式である QPSK や BPSK によるスロットを伝送フレーム中に, 多値変調によるスロットと共に時分割定義している。具体的には, 伝送速度は速いが減衰に弱い 16APSK のような高レートの変調方式と, 伝送速度は落ちても減衰の影響を受けにくい QPSK/BPSK という 2 種類の変調方式による階層伝送により一番組を送信する。受信機は通常時は 16APSK を使い, 大雨の時にはテレビが自動的に信号劣化判定を行い QPSK/BPSK での受信へ切り替えるようにする。こうすることで, 受信エリアの異なる個々の受信機への降雨時の放送サービス遮断率を下げる (サービス時間率を向上させる) 効果がある。

なお, 階層伝送は当初, 日本特有の放送伝送方式であり, 衛星デジタル放送の他にも, 地上波デジタル放送で採用されている。^[6] 現在は欧州の放送規格 DVB でも, 異なる伝送方式の複数の信号の多重が可能な Variable Coding and Modulation (VCM)が存在する。^[18]



(#8) 衛星トランスポンダで中継された後の受信側へ至る送信

図 10 に階層変調と受信映像の再生表示の例を示す。(a)は非階層変調で、帯域全部を利用して 1 チャンネルの映像（例えば 8K 映像）を伝送し、受信機表示を行う。(b)はチャンネルのメインサービスとして高解像度の映像・音声等を 16APSK の多値変調で、低解像度の映像・音声等をバックアップとして QPSK など低速の変調で多重化する階層変調の例を表したものである。

図 10 の例では、一定の C/N 比(10dB)の品質でサービス時間率 99.70%までは、非階層変調も階層変調も受信機表示は問題なく行われる。しかし、ノイズレベルが上がり、C/N 比が悪化し 10dB を下回ると、非階層変調の場合は回線エラー率悪化のため、受信機表示が正しく行われれないのに対し、階層変調の場合は、同じ状態でも低 C/N 変調（QPSK 等）による低解像度映像・音声データの受信ができ、低解像度を受信機機能等でスケールアップする（しない）などにより表示が可能となる。エラー率がさらに悪化し、サービス時間率が 99.94%以下となり、C/N 比が 4dB 以下となると、低 C/N 変調によっても降雨減衰の影響を受け、受信機表示は困難となるが、その間のマージンが確保できる。

実際に、ISDB-S3 で規格化されている階層変調の-slot構成例を表 2 にまとめる。^[10]

表 2 階層変調の構成例

総スロット数	高階層	低階層
120	16APSK(7/9) 100 スロット(注) (有効 80 スロット)	QPSK(1/2) 20 スロット(注) (有効 8 スロット)
	16APSK(7/9) 100 スロット(注) (有効 80 スロット)	QPSK(3/4) 20 スロット(注) (有効 8 スロット)

なお、衛星放送のサービス時間率に関して、ITU-R BO.1696 において最悪月 99.5%以上、年間サービス時間率(#9) 99.86%以上を推奨している。^[13]

4K/8K の衛星放送方式はこれに準拠するものである。

5.2 送信側での対策

アップリンク(#10)側の送信電力を増強した送信電波を供給することで、降雨時の C/N 比低下を補う効果がある。(図 9(b)) また、地理的に離れた場所に副局を設け、アップリンクのチャネルを切り替えることで雨雲を回避する、“サイト・ダイバーシティ”を行うことが効果的とされている。(図 9(c))

(#9) 年間サービス時間率とは、降雨減衰量閾値以上の降雨が発生する年間時間率を算出し、この値を晴天時間率(100%)から引いた値に相当する。

(#10) 衛星トランスポンダへ向けての送信

サイト・ダイバーシティは、降雨に対する高い信頼性を確保するために運用するもので、主局で合成後の変調前の多重化信号をデジタル回線で副局へ送信し、副局から衛星へアップリンクする。主局と副局とではクロック周波数を同期管理し、キャリア周波数も高い精度で同類の周波数になっている。なお、ダウンリンクはサイト・ダイバーシティの対象にはならない。

回線遮断になるようなレベルの集中豪雨では数 dB 程度の電力増加を行っても時間率改善効果に乏しい。雨域は狭いエリアに限られるので、数百キロ程度、地理的に離れた場所に副局を設け、サイト・ダイバーシティを行うことで対策とする。

NHK によると、渋谷（主局；東京渋谷）と約 49km 離れた菫蒲（副局；埼玉県）でサイト・ダイバーシティを実施した効果は、

99.9%(最悪月間 44 分/月) ⇒ 99.9985%(最悪月間 40 秒/月)
とサービス時間率の改善が見られた、とのデータがある。^[9]

降雨減衰が大きい高周波数帯（たとえば、衛星 Ka 帯など）では、サービス時間率を上げて所要稼働率達成に向け、これらの送信側、受信側でできる対策を組合せるなどの考慮が有効である。

6. 伝送フレームと制御信号

高度 BS/CS (4K/8K) 衛星放送全体のプロトコルスタックを図 11 に示す。

映像, 音声, 字幕等のデータ, そして SI 等の制御情報に加え, HTML5 等のアプリケーション機能を含めたデータコンテンツサービスは, MMT (MPEG Media Transport), そして TLV (Type Length Value) 方式を使用して多重化される。MMT は放送や通信などの複数の伝送路を經由して伝送される信号が, 共通の時刻情報を利用して同期再生できるような仕組みを備える。送信側では, 映像・音声信号等は MMT パケット化された後に IP パケット化され, 最終的に TLV パケット形式で多重化され, Phy Layer (放送伝送路符号化) で変調, 誤り訂正符号化が行われる。

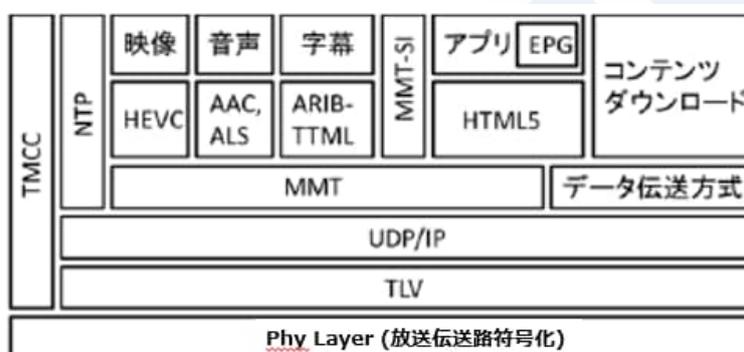


図 11 衛星放送プロトコルスタック [15]

また, 放送メディアを IP 再配信含め, ネット配信と容易に連携させるために, 図 12 のように UDP/IP レイヤ以上のスタックをそのまま IP 伝送可能な構成としている。これにより, ネット再配信等の際に二次多重化を行う必要がなくなり, 送上の簡便化が図れる。なお, CDN (Contents Delivery Network) を介した HTTP による動画配信を行う際のために TCP/IP にも対応する。

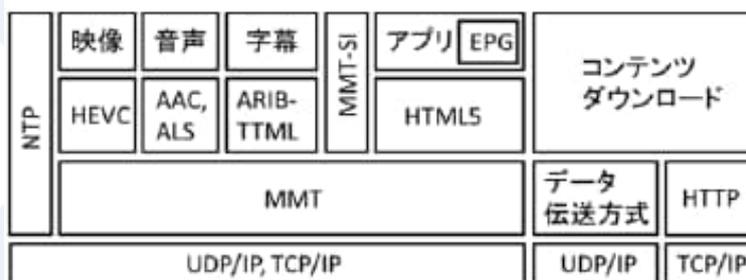


図 12 超高精細度配信 通信プロトコルスタック [15]

6.1 伝送フレーム

伝送フレーム構成に関しては、衛星放送ではスロットという概念を導入し、スロット単位で変調方式、誤り訂正の内符号を指定できる構造としている。

各スロットは主信号についてはヘッダ、データ（トランスポートパケット）、BCH パリティ（誤り訂正外符号）、スタンプビット、LDPC パリティ（誤り訂正内符号）で構成する。変調方式が 8PSK、16APSK、32APSK 等の多値の場合にはビットインターリーブを施す。TMCC 信号については主信号とほぼ同様に、外符号、エネルギー拡散、内符号を行う。これらの信号に加え、同期信号(フレーム同期、パケット同期)及びエネルギー拡散を施した伝送信号点配置信号をそれぞれに割り当てられた変調方式で変調し、時分割多重して変調波を生成することができる。(図 13)

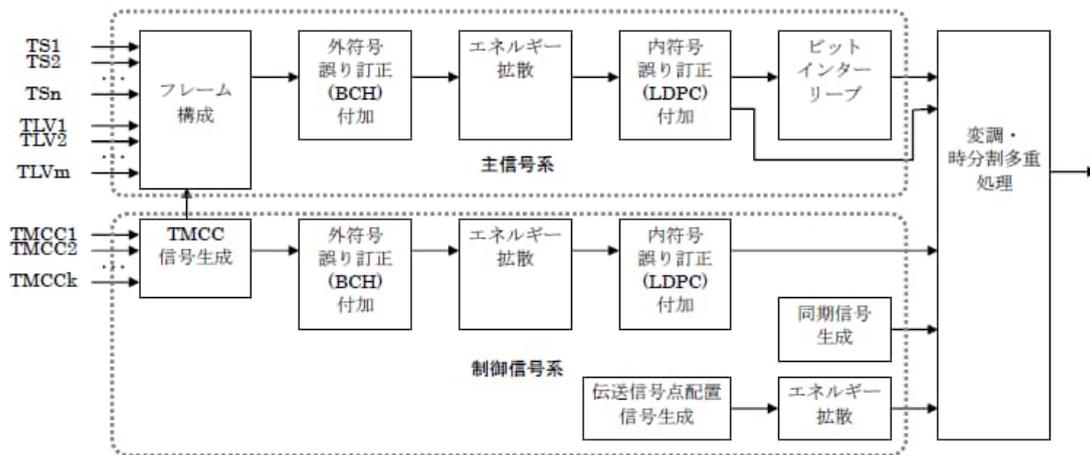


図 13 伝送路符号化構成^[15]

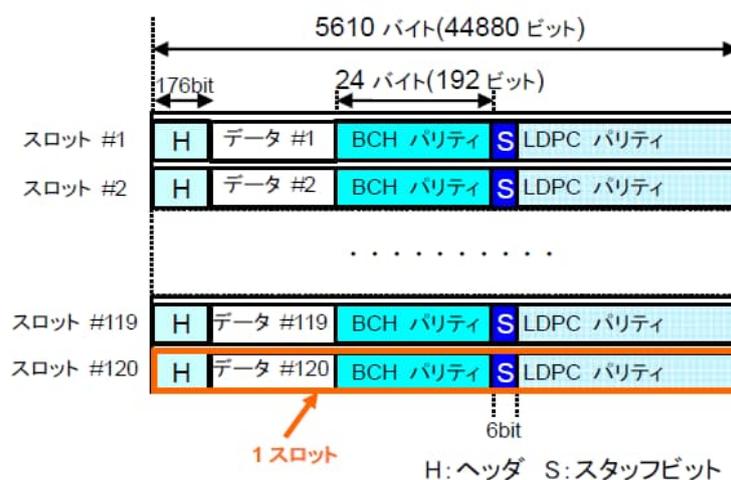


図 14 主信号の伝送フレーム構成^[15]

主信号の伝送フレームは、図 14 のように多重化され、120 スロットで構成される。

スロットの主信号の変調方式は5スロット単位で切り替えが可能で、1フレーム内で併用できる変調方式と符号化率の組み合わせは最大8と制限されている。

6.2 TMCC による伝送路レイヤの制御

制御信号 TMCC(Transmission and Multiplexing Configuration Control) は、多重化トランスポートである MPEG2-TS あるいは MMT において未定義の“物理層での制御”を実現するもので、受信機が変調の逆処理である復調処理を行うのに必要な情報や、誤り訂正の符号化率、トランスポート情報、緊急警報放送時に受信機を起動するための起動制御信号、降雨対策のサイト・ダイバーシティ・階層変調情報などがシグナリングされる。^[16]

このように、伝送路の基本パラメータを受信側に伝える TMCC は、“物理層での制御”に用いられるためのもので、図 11 に示すように、放送においては IP パケットとは別のスタックで送信される。主信号の変調方式が適宜選択可能なのに対し、TMCC 自体の変調は最も低い C/N でも受信可能なように、 $\pi/2$ シフト BPSK を用いる。なお、低 C/N 状態でも安定した受信をおこなうために、復調の際の同期確保が重要となる。周期的に $\pi/2$ シフト BPSK 変調される Sync 信号を挿入することで、受信 C/N 比が 0dB 以下においても安定した同期性能を確保するようにしている。(図 15)

TMCC で制御する情報のうち主なものを表 3 に示す。

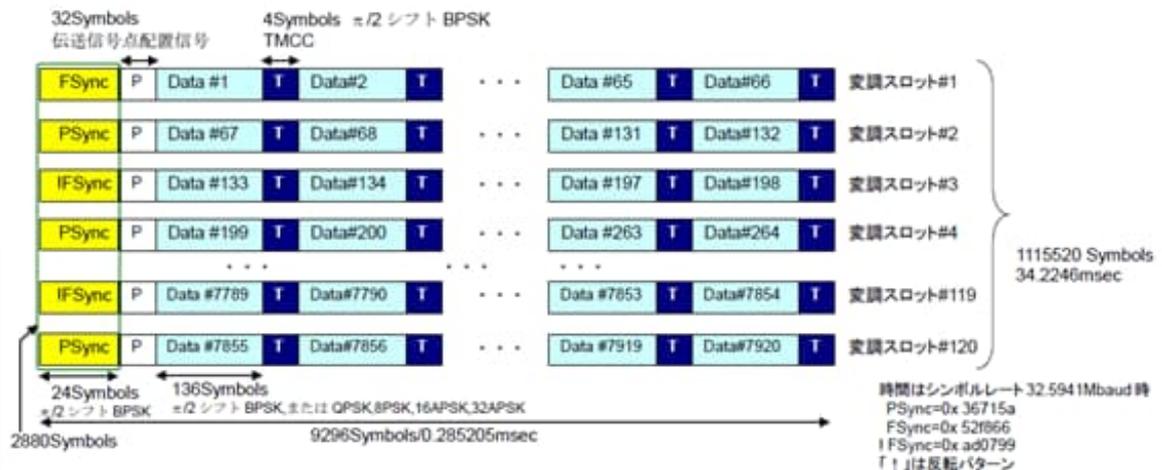


図 15 変調信号のフレーム構成 ^[15]

表3 TMCC 主な制御情報の構成

(1) システム識別：テレビジョン放送システム識別子
(2) 伝送パラメータ切替え指標：切替え15フレーム前からのカウントダウン
(3) 起動制御信号：緊急警報放送の伝送の有無 テレビやラジオを放送波で遠隔起動し、地震や津波などの緊急情報(#6)を一刻も早く視聴者に知らせるためのフラグ
(4) カレント情報 部分受信フラグ A：階層伝送パラメータ情報、B：階層伝送パラメータ情報、C：階層伝送パラメータ情報
(5) ネクスト情報 部分受信フラグ A：階層伝送パラメータ情報、B：階層伝送パラメータ情報、C：階層伝送パラメータ情報

7. 効果

降雨が最も激しい月（最悪月）で測定を行った結果が以下のように示されている。^[9] この実験の時点では、階層変調の低階層を QPSK で、多値変調は 16APSK ではなく 8PSK で行われた実験値である。全スロットの 1/12 を使い QPSK にあて階層変調をおこなったもので、東京エリアにおいて 45cm パラボラアンテナを用い受信した場合であるが、図 16 のように、8PSK で遮断時間 131 分間だったものが QPSK では遮断時間が 24 分間となり、割合で 1/5 以下に低減した。16APSK はこれを外挿して考えればよいであろう。

図 17 は、特定の 120 分間において QPSK と 8PSK で実際に変調データを衛星回線で伝送した際に、降雨によって伝送信号品質がどう影響を受けたかを C/N 比でプロットしたものである。所要 C/N 比が低い QPSK は 8PSK ほど回線劣化の影響を受けないことが分かる。

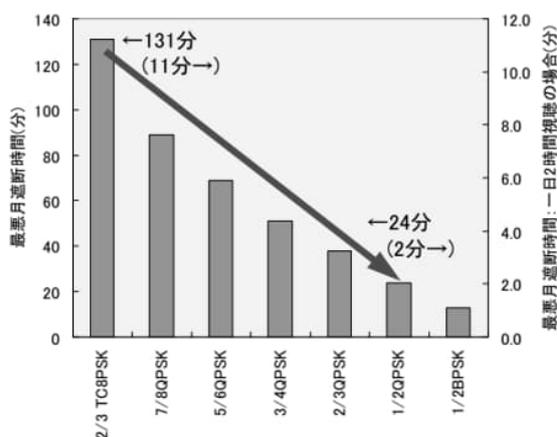


図 16 階層変調による遮断率改善効果^[9]

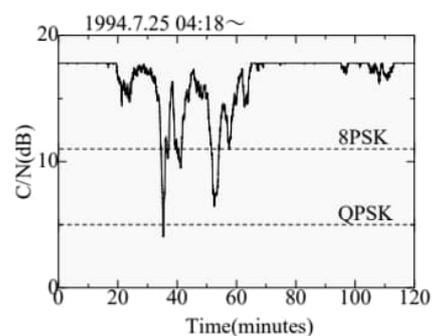


図 17 降雨減衰の観測例^[9]

このように、高効率の多値変調による伝送と所要 C/N 比が低い変調による伝送というように、伝送耐性の異なる複数種類の変調方式を組み合わせる階層変調をおこなうことで、降雨減衰によるサービス遮断への耐性を高めることができる。

8. 考察

以上説明したように、4K/8K 衛星放送では降雨減衰によるサービス遮断への耐性を高めるために、アップリンク側では送信電力の増強や局間サイト・ダイバーシティを行うこと、また、ダウンリンク側では上位階層と下位階層の各々に映像・音声などのアセットを配置し、受信状態に応じて受信機側で適宜切り替えを行えるよう、異なる変調方式で階層伝送を行うことが可能となっている。その制御は制御情報 TMCC を伝送することで受信側へ共有される。そして変調方式を切り替えることで、遮断率の改善効果があることを実証データとともに紹介した。

ここまで、衛星放送でのサービス遮断率低減への対策を中心に、通信伝送路の信頼性を向上させる取り組みを紹介した。衛星放送と船陸間通信の比較をしてみると、1 対多の配信により広くあまねくサービスを行き渡らせる放送に対し、基本 1 対 1 の接続である船陸間通信、そして、衛星トランスポンダの帯域を 1 ないし 2 つの番組配信で占有する放送に対し、同一の周波数帯域を複数の 1 対 1 通信で分け合う船陸間通信は、サービスの目的そして影響度が異なり、通信遮断率に関してサービス時間率が法律で定められている放送とはシステム要求や考え方が異なるであろう。また、船陸間通信に求められる機能・性能要件は、公海上、輻輳海域、狭水道、湾内、港内、そして離着岸時の各航海モードにも依存する。このように、放送と船陸間通信とは、通信伝送路の利用の仕方は異なるわけではあるが、その接続信頼性に対する期待はいずれも同様と考えられる。

「陸上からの船上機器への直接的操作」の可能性も含め、船陸間通信が自動運航船の運航上重要な役割を担うのであるなら、“通信の遮断”という事態を低減化する必要があると考える。

その対策として、陸側のサイト・ダイバーシティ機能に加え、異なる伝送周波数帯の衛星回線を二重にもつことも候補の一つになるであろうし、変調方式のバリエーションを通信業者に用意してもらい、運航路上の天気予報等によって臨機応変に船側および陸側でそれを切り替える等も候補になるであろう。伝送方式の選択や伝送ビットレートの変動幅を含めて通信事業者側と連携を図り、伝送路符号化レイヤに関する要求・確認を行う意味はあるのかもしれない。

参考までに、衛星放送の技術的な要求条件を抜粋し、表 4 に示す。要求条件には取って具体的な制約事項は盛り込まれていないが、一連の規格化に際し、関連する規格化または運用ガイドライン制定の際に現実性をもったパラメトリックな議論が行われた。

表 4 衛星放送の技術的な要求条件^[16] (抜粋)

[1] システム	
①実時間性	送出から受信機出力までの遅延時間をできるだけ短くすること。
②システム制御	降雨時や故障時のアップリンクや衛星の切替を自由に行えること。 伝送方式の選択や組み合わせの変更を自由に行えること。 また、それに合わせた多様な受信機制御が可能な方式であること。
③アクセシビリティ	緊急警報信号のような非常災害時における対象受信機への起動制御信号及びメッセージの放送が考慮されていること。
④著作権保護	放送コンテンツの記録及び利用に関して制御できる機能を有すること。
[2] 放送品質	
①画像・音声品質	サービスに応じて画像、音声のビットレートを変更できること。
②低 C/N 時の特性	低 C/N 時の劣化ができるだけ小さいこと。
③伝送障害の特性	降雨減衰などによる伝送障害児の放送遮断の時間率が小さいこと。 降雨減衰などによる受信の一時段からの復帰が早いこと。 降雨減衰時における画質・音質・データのバランスを考慮すること。 受信不能時の雑音などがそのまま提示されないこと。
[3] 伝送路符号化方式	
①伝送帯域幅	他のサービスに干渉妨害を与えず、かつ、他のサービスから干渉妨害を受けない帯域幅とすること。
②変調方式	できるだけ高い伝送容量を確保できる変調方式であること。 できるだけ低い C/N 時でも安定に受信できる方式であること。 帯域利用効率が高く、中継器の非線形特性に強い方式を採用すること。 復調用 L S I 開発が可能であること。
③誤り訂正	衛星伝送路の雑音特性に有効であること。 変調方式との整合性がよいこと、また、符号化効率がよいこと。 誤り訂正用 L S I 開発が可能であること。
④伝送品質	最悪月においても安定した伝送品質を確保するため、所要のビット誤り率を確保できること。
⑤サービス時間率	サービス時間率についてはできる限り高い値を確保すること。

あとがき

本報告は、船陸間通信において、通信回線の遮断率を低減し信頼性向上を図る際に、通信事業者側と確認・連携をとって推進することの意義を想定し、衛星通信を利用する放送分野の規格内容を断片的に説明したものである。

通信の接続状態が継続される時間を長くし、サービス時間率を改善させることは歓迎すべきことである。将来へ向け、自動運航船による物資運搬や洋上作業のみならず、船員の福利厚生やレジャーなど人的利用も含め、広範な普及期が来ると想定した場合、より大容量の船陸間通信を志向しながらも、通信遮断の発生率を低減化させ通信の信頼性を高めることが必要となるであろう。

その場合、信頼性のある伝送路確保を図り、より高効率な変調方式、そして、電波の減衰へ耐性をもつ変調方式を適宜選択することができるなら、柔軟性をもったシステムとしての設計が可能になると考える。

一方で、現状直面する制限の打破へ向け、NTN(#11)による回線のフュージョン運用など、より低遅延かつ大容量な通信路の確保を検討し、そのうえでサービス品質を保証するネットワークそして機器のシステム設計を行うことが期待される。

紹介した衛星放送の仕様は、ISDB-S3 (Integrated Services Digital Broadcasting-Satellite) と呼ばれる方式であり、社団法人電波産業会 (ARIB) が策定した ARIB STD-B20 「衛星デジタル放送の伝送方式」にて伝送路符号化に関して規格化されているもので、現在、日本の 4K/8K 放送で実運用されている。

(#11) Non-Terrestrial Network: 地上波以外を用いた部分の移動通信の高度化として、従来の静止衛星に加え、高度 2000km 以下の低軌道周回衛星や、更に低高度の成層圏において一定地点に常駐可能な HAPS(High-Altitude Platform Station) を連携させることで、地球上の通信の空白地帯をなくす、という取り組み。地上波系と連動した 5G や Beyond5G における超カバレッジのスコープで、3GPP の活動とも連携する。

参考資料

- [1] 国土交通省 “自動運航船の実用化に向けて ～開発実証と基準戦略” 令和2年 第20回 海上技術安全研究所 講演会
- [2] テレビ受信向上委員会 “デジタル時代の放送受信技術 新4K8K衛星放送編” 2018
- [3] 正源和義 “日本の衛星放送（BS）の周波数” 電波技術協会報 No.335 2020.7
- [4] 橋本明記, 田中祥次 “高度BSデジタル放送技術” 2008
- [5] NHK 技研 R&D “衛星放送の伝送技術”, 2021 春, No.185
- [6] 社団法人 電波産業会 “伝送路符号化部 DVB-S.2 規格の概要” 平成18年
- [7] 山田松一 “伝搬研究の動向 2. 衛星-地球間伝搬” 電波研究所季報 1987
- [8] 福士清造 “降雨による電波の減衰と降雨強度” (論文)
- [9] 加藤久和 “BSデジタル放送の概要とサービス” NHK 技術局計画部 2007
- [10] 斎藤恭一 “4K・8K衛星放送伝送方式 ISDB-S3の運用規定” 情報処理学会 研究報告 2016
- [11] 鈴木洋一 “衛星デジタル放送システムにおける誤り訂正符号”
- [12] ARIB STD-B20 “衛星デジタル放送の伝送方式”
- [13] ARIB デジタル放送システム開発部会 “超高精細度テレビジョン放送システムに関する中間報告（伝送路符号化方式）”
- [14] 田代務 “衛星通信の仕組み～衛星打ち上げから回線運用まで～”
- [15] 情報通信審議会 情報通信技術分科会 放送システム委員会 超高精細度テレビジョン放送システム作業班 報告
- [16] 情報通信審議会情報通信技術分科会 放送システム委員会 “衛星デジタル放送の高度化に関する技術的な要求条件”
- [17] 仲地孝之 “MMT AL-FEC 符号化技術 -8K 放送をインターネット経由で中継する-” 情報処理 2017 Vol.58 No.2
- [18] 社団法人電波産業会 “伝送路符号化部 DVB-S.2 規格の概要” 平成18年
- [19] 都竹愛一郎 “デジタル放送” Jun No.279 CRL News
- [20] 唐沢好男 “熱雑音下のビット誤り率” Technical Report YK-056 Dec. 7, 2020
- [21] ARIB STD-B32 “デジタル放送における映像符号化, 音声符号化及び多重化方式”
- [22] ARIB STD-B60 “デジタル放送における MMT によるメディアトランスポート方式”
- [23] 鈴木, 斎藤, 田中 “4K・8K 放送の規格解説 ～伝送路符号化方式～”
- [24] 佐々岡秀一 “ビット誤り率特性の優劣比較に使用すべき信号対雑音電力比” 電波研究所季報 1995 March Vol.31