

次世代衛星通信向け変復調装置

井戸康浩* 富塚浩志**
杉本達也*
吉岡 優*

Modulator and Demodulator for Next Generation Satellite Communication Systems

Yasuhiro Ido, Tatsuya Sugimoto, Masaru Yoshioka, Koji Tomitsuka

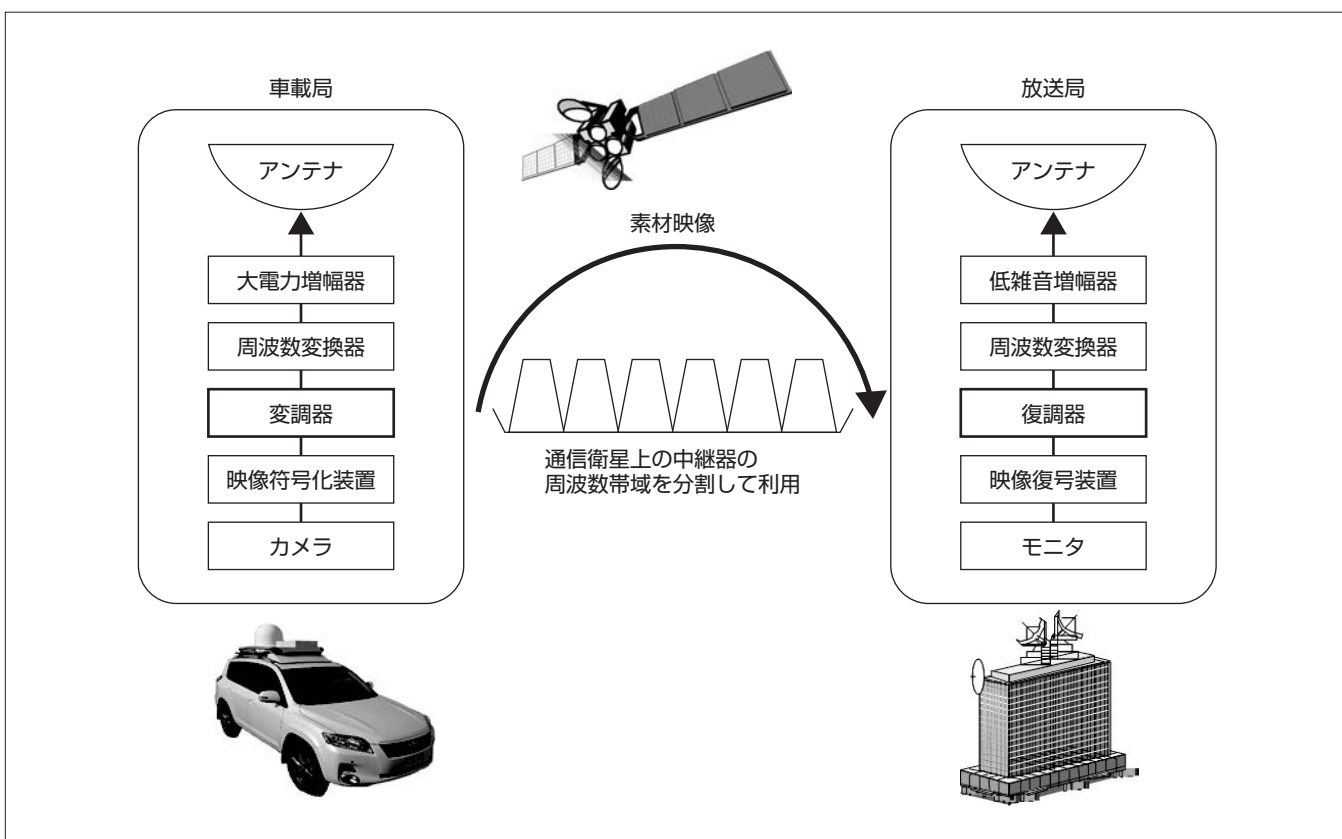
要 旨

近年、衛星通信システムは周波数利用効率向上と高速・大容量化の要求に伴い、変調信号の多値化や波形整形フィルタの急峻(きゅうしゅん)化、強力な誤り訂正方式の採用等、変復調装置の高機能化が進んでいる。特に、衛星通信システムの中でも放送用の映像素材を伝送するSNG(Satellite News Gathering)システムでは大容量伝送を行うため、周波数利用効率向上に関する技術開発・製品化が注目されている。

今回、三菱電機では、放送用映像素材伝送向けに新方式を採用し、周波数利用効率の向上に大きく寄与する変復調装置を製品化した。また、同時に装置の小型化・軽量化・高機能化を実現した。

この変復調装置は、周波数利用効率を従来比で約27%向上させるとともに、装置の小型化も実現した。この装置の主な特長を次に示す。

- (1) 変調方式は、従来のQPSK(Quadrature Phase Shift Keying)~32APSK(Amplitude Phase Shift Keying)の方式に加えて、新たに64APSKの多値変調方式を搭載
- (2) 波形整形フィルタとして、従来のロールオフ率0.35, 0.25, 0.20に加えて、新たに0.15, 0.10, 0.05に対応
- (3) 寸法・質量ともに、従来機種との1/2に小型化・軽量化し、実装スペースや積載質量の削減が課題となっている中継車等での車内スペースの有効活用に貢献



映像素材伝送システムの構成

衛星通信での映像素材伝送システムの構成例を示す。車載局には、主に送信系のシステム機器を装備しており、変調器から出力された変調波は通信衛星を介して放送局等の固定局に伝送される。通信衛星では、限られた中継器の周波数帯域を分割して利用するため、変調波の周波数利用効率の向上が大きな課題となっている。

◇一般論文◇

1. ま え が き

衛星通信ネットワークの需要拡大、伝送映像の高精細化に伴い、伝送帯域の削減、周波数利用効率の向上が課題である。当社では、デジタルSNG向け変復調装置の開発を第1世代のDVB-S(Digital Video Broadcasting-Satellite)⁽¹⁾から取り組んでおり、現在はDVB-S/DSNG(Digital Satellite News Gathering)/S2⁽²⁾対応の変復調装置を市場へ供給している。今回、DVB-S2のPart IIとして規格化されたDVB-S2X(S2 eXtensions)⁽³⁾に対応した変復調装置を製品化した。DVB-S2Xでは、従来の変調方式(～32APSK)に加えて新たに64APSK方式が追加され、伝送帯域を決定するロールオフフィルタのフィルタ係数には、より狭帯域化を実現するために従来のロールオフ率(0.35, 0.25, 0.20)に加えて新たに0.15, 0.10, 0.05が追加された。

本稿では、この変復調装置について述べるとともに、その技術的な課題と解決策について述べる。

2. 映像素材伝送用変復調装置

2.1 変復調装置の主要諸元と特長

今回製品化した復調器を図1に、変調器と合わせた変復調装置の主要諸元を表1に示す。この装置は、次の特長を持つ。

(1) 周波数利用効率の向上

新たに64APSKの多値変調方式を搭載して、波形整形フィルタとして、0.15, 0.10, 0.05に対応した。これによって、同一伝送速度の場合に変調波帯域が約27%改善される。

(2) 小型化・軽量化

従来の半分の幅(19インチラックのハーフサイズ)で実現することで既存機器の実装スペースに予備系1台を追加可能であり、安定した通信回線の確保を可能とするなど新たな利用用途が広がる。また、質量も従来比約1/2に軽量化して車載積載量の課題にも対応した。

(3) 従来機種との互換性の確保

既存のDVB-S/DSNG/S2方式の機器との接続を考慮して、DVB-S2Xで追加されたモード以外のDVB-S/DSNG/S2モードも実装している。これによって、新旧の方式が混在した運用では、既存機器が送受信可能なモードを選択することで互換接続性を確保でき、運用現場での利便性が高まる。

なお、SNGシステムでは送信局と受信局が個別に運用される場合があり、その利便性を考慮して、当社では変調器と復調器をそれぞれ別々の装置として構成している。変復調装置の諸元は、今後の市場ニーズに応じて更なる高機能化に向けて追加していく予定である。

2.2 変復調装置の構成

変復調装置の構成を図2に示す。図の(a)は変調器、(b)は復調器の構成である。この装置の特長である小型化・軽量化を実現するために、IF(Intermediate Frequency)フロ



図1. SNG向け復調器

表1. 変復調装置の主要諸元

項目	諸元
IF周波数	950～1,500MHz
周波数設定	1 Hzステップ
変調速度	384ksps～36Mpsps, 1 spsステップ
変調方式	QPSK, 8PSK, 16QAM, 16APSK, 32APSK, 64APSK
誤り訂正方式	畳み込み+RS接続符号/ビタビ復号+RS復号/ BCH符号+LDPC符号/BCH復号+LDPC復号
符号化率	1/2, 3/5, 2/3, 32/45, 11/15, 3/4, 7/9, 4/5, 5/6, 7/8, 8/9, 9/10
ロールオフ率	0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.35
周波数安定度	± 1 ppm以内
データ入出力ポート	DVB-ASI
監視制御	LCD, LED (装置前面) 10Base-T/100Base-TX/1000Base-T (装置背面)
外形寸法	210(W)×480(D)×44(H) (mm)
質量	約 4 kg

SPS: Symbols Per Second, 16QAM: 16 Quadrature Amplitude Modulation, RS: Reed Solomon code, BCH: Bose Chaudhuri Hocquenghem code, LDPC: Low Density Parity Check code, DVB-ASI: Digital Video Broadcasting Asynchronous Serial Interface, LCD: Liquid Crystal Display

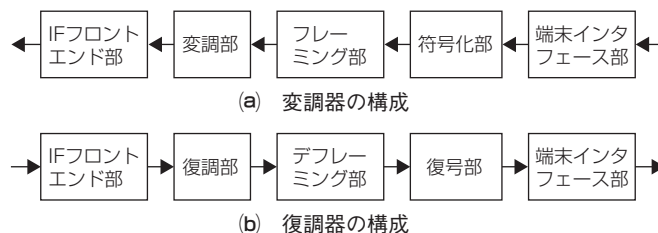


図2. 変復調装置の構成

ントエンド部以外の大部分をFPGAで実現した。IFフロントエンド部は、シリコンチューナーとダイレクトコンバージョン方式を採用して部品点数を削減したことで、部位ばらつきによる性能の安定性阻害要因を排除しつつアナログ部の小型化を実現した。さらに、構成部位ごとに低消費電力化を図って電源部を小型化し、基板実装の配置の工夫によって効率的な排熱構造を実現した。また、映像素材伝送の現場では緊急性が要求されることから、装置の起動時間の主要要因である送信周波数の安定性確保までの時間を短縮するために、高精度・高安定でかつ起動時間の短い水晶発振器を採用した。

3. 主要要素技術

周波数利用効率の向上に寄与する多値変調方式と狭帯域フィルタ技術、及びそれらを適用した場合の復調処理の技術的課題及び解決技術について述べる。

3.1 低ロールオフ率対応マルチレート伝送技術

この変復調装置では、広範囲のシンボルレート可変伝送

に対応しながら、低ロールオフ率による狭帯域伝送を実現するために、高精度なサンプリングレート変換が必要である。サンプリング点を細かく補間して波形を再生する従来方式では、多くのフィルタ係数メモリ量が必要となる課題があったが、今回、この課題を克服する低メモリ量で高精度にサンプリングレートを変換する方式を開発した。

図3に変調部のサンプリングレート変換方式のブロック図を示す。今回採用したサンプリングレート変換方式では、リサンプルするタイミングを決定するNCO(Numerically Controlled Oscillators)回路と、所望のサンプル点を生成する補間回路と位相誤差補正回路の2段階構成でサンプリングレート変換を実現している⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。1段目の補間回路ではフィルタ係数メモリ量を削減するために比較的粗い精度で理想サンプル点に近い信号を生成し、2段目の位相誤差補正回路でその残留位相誤差を高精度に補正する。この方式によって、少ないメモリ量で高精度なサンプリングレート変換を実現した。

このサンプリングレート変換方式を用いた変調波のスペクトラム波形(ロールオフ率 0.20, 0.05)を図4に、コンスタレーション(32APSK, 64APSK)を図5に示す。図4ではロールオフフィルタを急峻にした場合に出現するリプル特性も良好であり、衛星の中継器上で隣接波に対する影響

が考えられる変調波の端の部分の減衰特性が十分得られている。また、図5では32APSK, 64APSK双方ともに理想的なマッピング位置を示す○点の中に実測のシンボル点が集中しており、理想に近い変調精度(理想シンボル点と観測シンボル点のベクトル誤差を理想シンボル点のベクトルで正規化した変調波の特性を示す性能指標)が得られている。

従来の32APSK, ロールオフ率0.20と今回追加した64APSK, ロールオフ率0.05を適用した場合の変調波帯域の比較を表2に示す。表から、同一伝送速度の場合に変調波帯域が約27%改善されることが分かる。

3.2 低ロールオフ率対応タイミング同期技術

3.1節で述べたロールオフ率0.05の復調処理での課題として、ロールオフ率が低くなるとキャリア周波数オフセット存在時にビット誤り率が大きく劣化する問題がある。これは、図6に示すように、ロールオフ率が低くなると復調入力アイパターンの大きくなり、タイミング誤差に起因して符号間干渉劣化が生じてBTR(Bit Timing Recovery)によるビット同期時にナイキスト点(振幅が一定になる点)の抽出が困難になるためである。このように、ロールオフ率が低い場合にBTRの推定精度が劣化する課題に対して、従来のBTRにリミッターとフルロールオフフィルタを前置

きすることで、ロールオフ率が低い場合でも高いBTR精度を維持できる手法を開発した。

図7に今回開発したBTRの構成を示す。従来は受信信号の瞬時電力の包絡線信号に対してDFT(Discrete Fourier Transform)解析でシンボルナイキスト

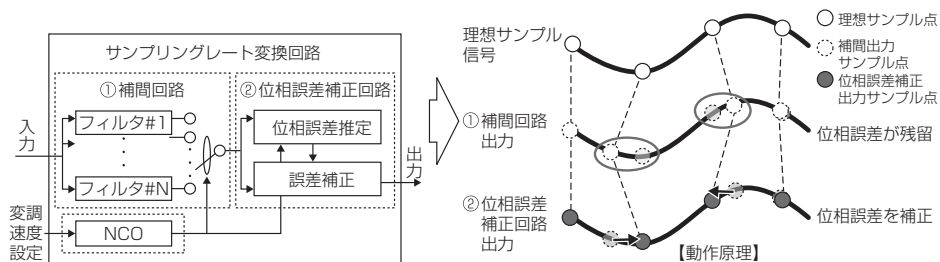


図3. サンプリングレート変換方式

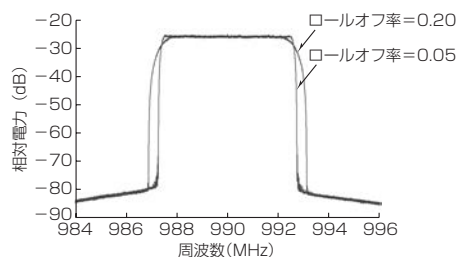


図4. ロールオフ率による変調スペクトラム波形の差異

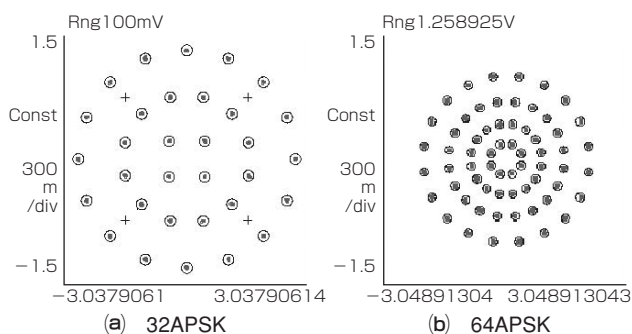


図5. コンスタレーション

表2. 変調方式とロールオフ率による変調波帯域の比較

変調方式	ロールオフ率	伝送速度 (Mbps)	シンボルレート (Msps)	100%占有周波数帯幅 (MHz)	帯域比率 (%)
32APSK	0.20	150.0	30.0	36.0	100.0
64APSK	0.05	150.0	25.0	26.3	72.9

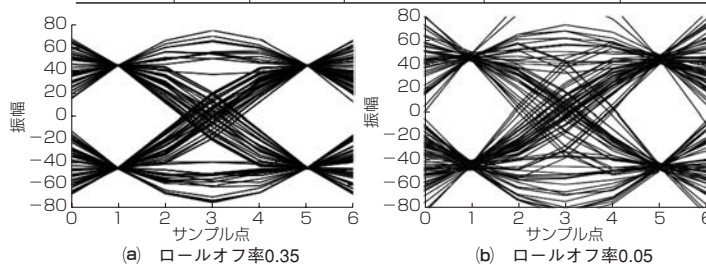


図6. アイパターン

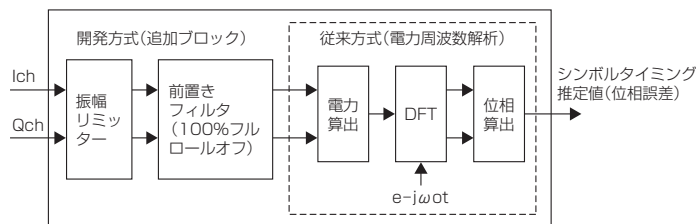


図7. BTRの構成

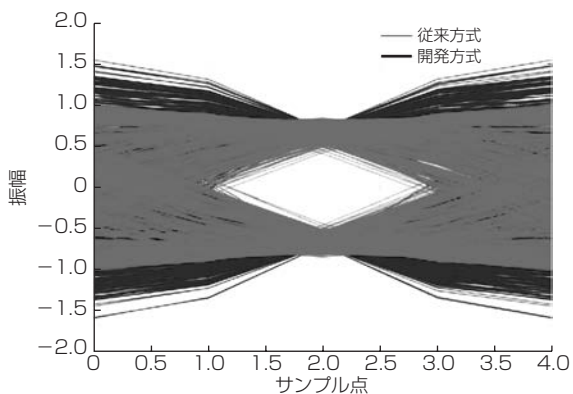


図8. 従来方式と開発方式のアイパターン

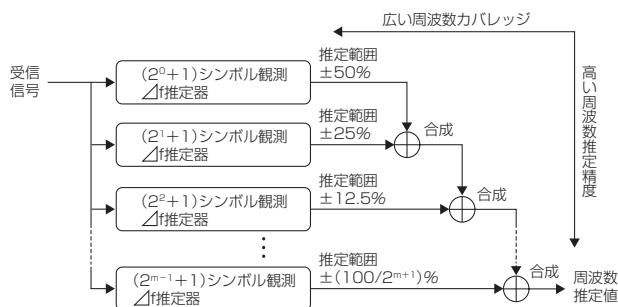


図9. 多重開ループ周波数推定方式

点の位相を算出する方式を採用していた。今回はその前段にリミッターとフルロールオフフィルタを追加することによって、リミッターで振幅をカットして雑音を低減することで低ロールオフ率変調信号の急峻な振幅変動を抑え、さらにシンボル周期の周波数成分を強調させるために高ロールオフ率(=1)のコサインロールオフフィルタを通した信号を用いてBTRを行う手法である。

図8にロールオフ率0.05での従来方式と開発した方式の電力周波数解析への入力アイパターンの比較を示す。開発方式はリミッター、フルロールオフフィルタ通過後の信号であり、ナイキスト点以外でのサンプル点の振幅変動が抑えられ、ロールオフ率の高い信号のアイパターンとほぼ同様になる。これによって、低いロールオフ率の信号でも周波数オフセット存在時にも高精度にタイミング推定することが可能となる。

3.3 高精度周波数同期技術

低CNR(Carrier to Noise Ratio)、多値変調伝送に対応するこの装置の復調器では、高精度な周波数同期が要求される。通常、周波数カバレッジと推定精度はトレードオフの関係にあり、これらを同時に満足させることは困難であった。今回、この課題に対して、周波数カバレッジの優れた粗推定と推定精度の優れた精推定のそれぞれの特長を損なわずに合成する多重開ループ周波数推定技術を開発した。多重開ループ周波数推定技術は、周波数オフセットによる位相変動を観測シンボル数の異なる周波数推定器を用いてそれぞれ推定・合成することで、広い周波数カバレッジと高い周波数推定精度を同時に実現する⁽⁶⁾⁽⁷⁾。図9に多重開ループ周波数推定方式のブロック図を示す。(2⁰+1)シ

ンボルから(2^{m-1}+1)シンボルまでの観測シンボル数の異なる周波数推定器(Δf:周波数オフセット)を備えている。粗推定AFC(Auto Frequency Control)はパイロットシンボル間での遅延検波による位相推定であり、精推定AFCはパイロットシンボルの平均値を用いたパイロットブロック間での遅延検波による位相推定である。これらを、同時に、かつ複数フレームで平均化することで、システムターゲットである周波数推定誤差を確保するための引込み時間の短縮とともに、広い周波数カバレッジと高精度な周波数同期を実現した。

4. むすび

周波数利用効率の向上が求められる衛星通信システムで、多値変調と低ロールオフフィルタを備えた小型・軽量な変復調装置を製品化した。変調信号の多値化と狭帯域化は更に高度化することが見込まれる技術であり、引き続き、これまでに培った変復調・伝送技術を更に発展させ、安定した通信の確保に寄与する機器を提供することで放送業務や映像伝送サービスへ貢献していく。

参考文献

- (1) EN 301 210 : Digital Video Broadcasting (DVB) : Framing structure, channel coding and modulation for Digital Satellite News Gathering (DSNG) and other contribution applications by satellite (1999)
- (2) EN 302 307-1 : Digital Video Broadcasting (DVB) : Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broad-casting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications ; Part1 : (DVB-S2) (2014)
- (3) Draft EN 302 307-2 : Digital Video Broadcasting (DVB) : Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broad-casting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications ; Part2 : DVB-S2 Extensions (DVB-S2X) (2014)
- (4) 富塚浩志, ほか: リサンプリングフィルタを用いた可変シンボルレート伝送技術に関する一検討, 電子情報通信学会技術研究報告, **110**, No.426, 43~48 (2011)
- (5) 井浦裕貴, ほか: サンプリングレート変換における補間誤差低減に関する一検討, 2011年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-3-22 (2011)
- (6) 富塚浩志, ほか: 衛星通信用マルチチャネル伝送技術, 三菱電機技報, **86**, No.11, 599~602 (2012)
- (7) Kubo, H., et al. : A multiple open-loop frequency estimation based on differential detection for MPSK, IEICE Transactions on Communications, **E82-B**, No.1, 136~144 (1999)