

衛星通信用マルチチャンネル伝送技術

富塚浩志* 石津文雄*
 長谷川文大** 井戸康浩***
 岡崎彰浩*

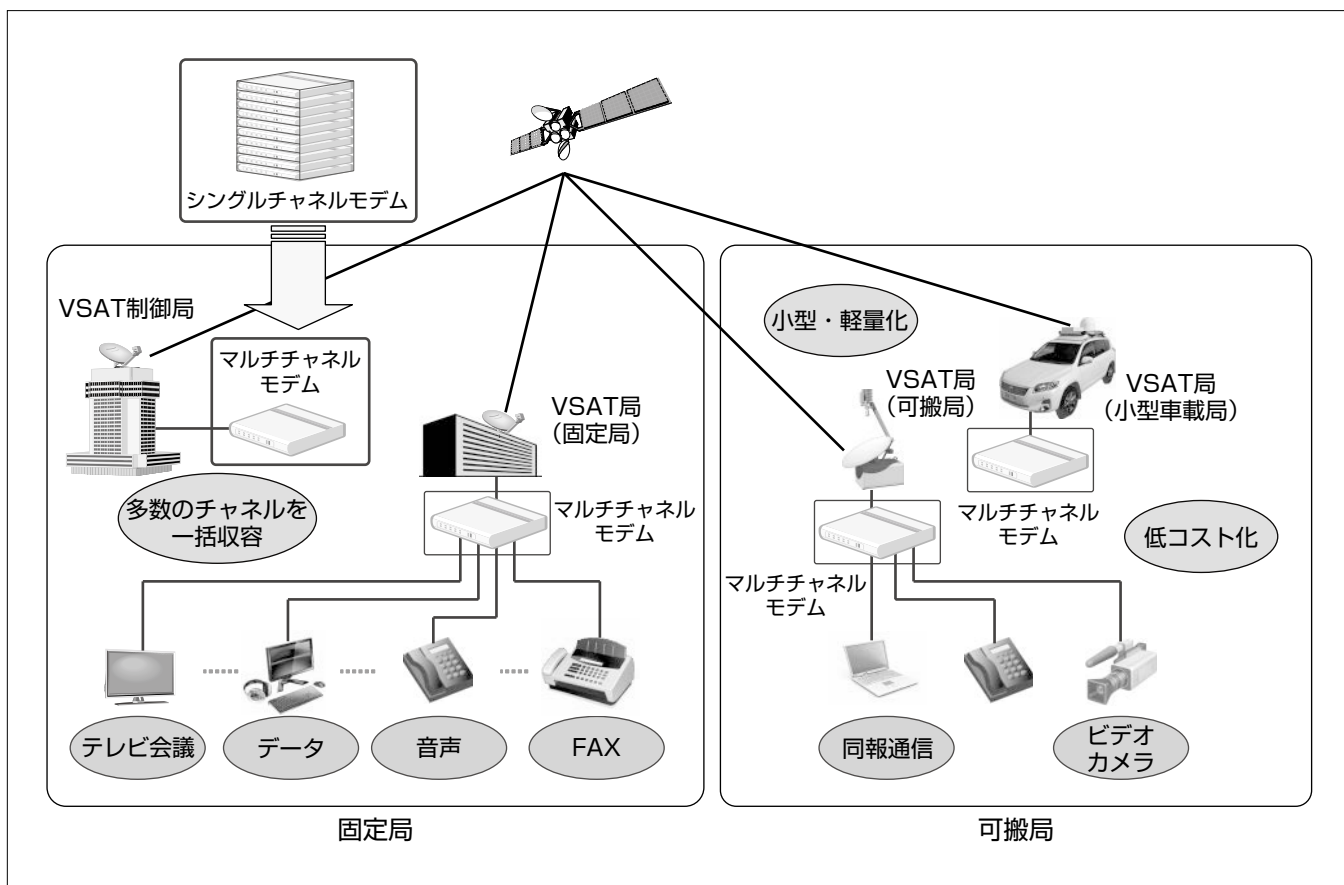
Multi-channel Transmission Technologies for Satellite Communication Systems

Koji Tomitsuka, Fumihiko Hasegawa, Akihiro Okazaki, Fumio Ishizu, Yasuhiro Ido

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、音声通信から高速データ通信まで多様なサービスへの対応、変調信号の多値化や強力な誤り訂正符号の採用等、モデムの高機能化が進んでおり設備コストが増大している。現在、三菱電機では廉価な衛星通信ネットワークの構築を実現するための研究開発に取り組んでおり、今回、衛星通信用モデムの小型軽量化・低コスト化のために、複数チャンネルの無線信号処理を1台のモデム装置に集約させたマルチチャンネルモデムを開発した。これによって、VSAT (Very Small Aperture Terminal) システムなどで複数のモデム装置を用いて実現されていた多チャンネル同時通信をこのモデム1台で実現することができる。このモデムの主な特長を次に示す。

- (1) 情報速度にあわせて任意の変調速度・周波数配置をチャンネルごとに独立に設定することができ、1台のモデムで最大6チャンネル同時通信を実現した。
 - (2) 低CNR (Carrier power to Noise power Ratio) 下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できる多重開ループ周波数推定技術を採用して、チャンネルごとの初期同期時間の高速化、良好な受信特性を実現した。
- また、更なる低コスト化に加えて高速・大容量伝送を実現する次世代衛星システム向けの将来技術として、周波数領域等化技術を用いたSC/MC (Single Carrier/Multi Carrier) ブロック伝送技術、低PAPR (Peak Average Power to Ratio) マルチチャンネル伝送技術について述べる。



衛星通信システム対応マルチチャンネルモデム装置

衛星通信システムにマルチチャンネルモデム装置を適用したときのサービスイメージを示す。マルチチャンネルモデムは様々なサービスに対応した多数のチャンネルを一括して処理できるため、衛星通信設備の小型軽量化・低コスト化を実現する。

1. ま え が き

衛星通信ネットワークの需要拡大に伴い、高機能化する衛星通信設備の低コスト化が課題であり、当社は廉価な衛星通信ネットワークを構築し衛星通信インフラの普及促進に向け研究開発に取り組んでいる。今回、衛星通信用モデムの小型軽量化・低コスト化のために、1台のモデムで複数の無線チャンネルを同時に通信可能なマルチチャンネルモデムを開発した。

本稿では、このモデム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。また、次世代衛星通信ネットワーク向けの将来技術として、更なる低コスト化に加えて高速・大容量伝送を実現する周波数領域等化技術を用いたSC/MCブロック伝送技術、低PAPRマルチチャンネル伝送技術について述べる。

2. マルチチャンネルモデム

2.1 モデム主要諸元と特長

表1にマルチチャンネルモデムの主要諸元を示す。マルチチャンネルモデムは、変復調機能の回路規模を従来機と比較して約1/6以下に削減し、1枚のモデム基板上に6チャンネルの機能を集約することで小型軽量化を実現した。また、このモデムは変調速度・周波数設定機能をデジタル信号処理で実現することによって、クロック可変用のアナログ部品を削減するとともに32ksps~2.24Mspsの範囲を1spsステップでの可変調整を実現し、この1台で完全非同期のチャンネルを最大6チャンネルまで同時通信することを可能とした。なお、モデム諸元は今後の市場ニーズに応じ、更なる高機能化に向け、追加していく予定である。

2.2 マルチチャンネルモデムの構成

衛星通信システムは、1つのシステム内で、音声・データ・映像等を異なる変調速度で通信するサービスが提供されている。そのため衛星通信用モデムは、情報速度に応じて任意の変調速度切り換えを実現するマルチレート変換機能が要求される。従来、このマルチレート変換を実現する手法として、DDS(Direct Digital Synthesizer)によってクロック速度を切り換える方法が用いられていたが、複数の変調速度を扱うマルチチャンネルモデムの実現は困難であった。

図1に今回開発したマルチチャンネルモデムの構成を示す。図の構成によって、マルチレート変換をデジタル信号処理で実現し、DDSを不要とした。また、マルチチャンネル伝送を行う分波・合波処理をデジタル化し、モデム基板構成を簡素化した。さらに、チャンネル数分必要であったアナログ部品(DDS, バンドパスフィルタ(BPF), D/A変換器, A/D変換器)を1つに共通化し、削減した。

また、受信性能では、低CNR下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できる多重開ループ

表1. マルチチャンネルモデムの主要諸元

項目	諸元
IF周波数	950~1.450MHz
周波数設定範囲	連続した周波数設定可能範囲 76MHz
周波数設定	1Hzステップ
変調速度設定範囲	32ksps~2.24Msps/1ch
変調速度設定	1spsステップ
同時通信チャンネル数	6ch
変調方式	BPSK/QPSK
復調方式	同期検波
誤り訂正方式	畳み込み符号化/ビタビ復号 ターボ符号化/ターボ復号
符号化率	1/2, 3/4
ロールオフ率	0.2~0.35

IF : Intermediate Frequency SPS : Symbols Per Second
BPSK : Binary Phase Shift Keying
QPSK : Quadrature Phase Shift Keying

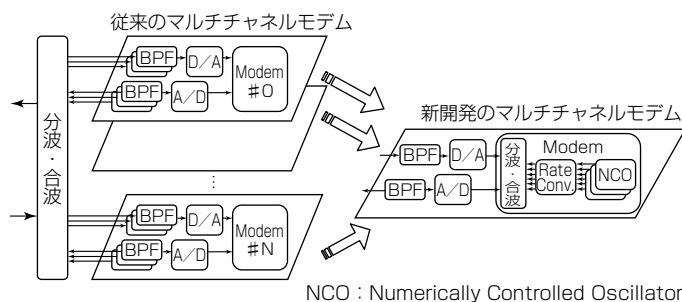


図1. マルチチャンネルモデムの基板構成

周波数推定技術を採用し、分散パイロットを挿入した無線フレームと併用することで1無線フレーム時間内という短時間での周波数引込みを実現した。また、安定した周波数オフセット補償によって低CNR下での同期検波時のチャンネル推定精度の劣化を抑えることができ、誤り訂正符号適用時の理論特性にはほぼ一致する良好な受信特性を実現した。

3. 主要要素技術

ここでは、マルチチャンネル伝送を実現するための主要技術について述べる。

3.1 マルチチャンネル対応のマルチレート伝送技術

図2に変調部におけるマルチチャンネル対応のマルチレート変換方式のブロック図を示す。

今回開発したマルチレート変換方式は、リサンプルするタイミングを決定するNCO回路と、所望のサンプル点を生成する補間回路・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⁽¹⁾⁽²⁾。1段目の補間回路はフィルタ係数を低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。この構成によって、フィルタ係数のメモリ容量を大幅に削減しつつ、高精度なサンプリングレート変換を実現した。さらに、チャンネルごとに時分割処理を行い共通化して回路規模を削減することで、マルチチャンネルに対応したマルチレート伝送機能のFPGA(Field Programmable Gate Array)実装を実現した。

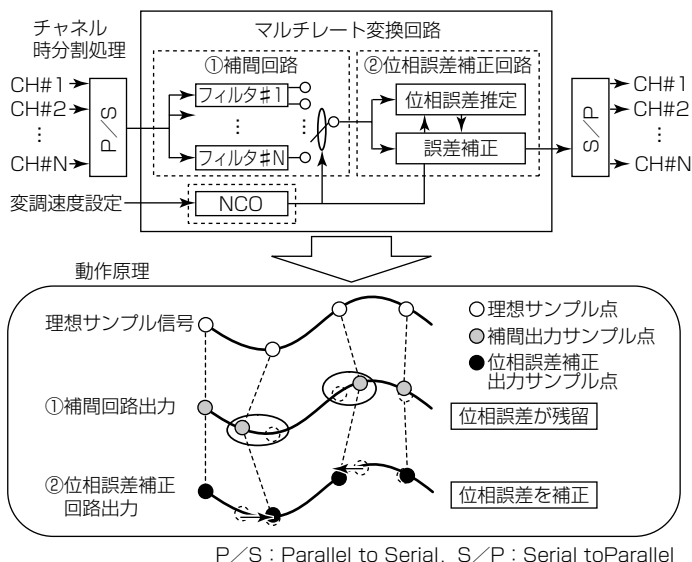


図2. マルチチャンネル対応のマルチレート変換方式

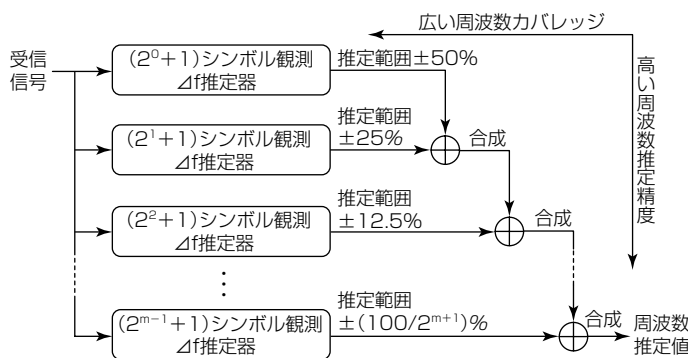


図3. 多重開ループ周波数推定方式

3.2 多重開ループ周波数推定技術

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・合成することによって、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⁽³⁾。図3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。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同時に満足することは困難であるが、この方式は図4に示すように周波数カバレッジの優れた推定値と推定精度の優れた推定値のそれぞれの特長を損なわずに合成することができる。

4. 次世代衛星通信システム向け技術

ここでは次世代衛星通信ネットワーク向けの将来技術として、更なる低コスト化に加えて高速・大容量伝送を実現する周波数領域等化技術を用いたSC/MCブロック伝送技術とマルチチャンネル伝送下で低PAPRを実現するマルチチャンネルSC-OFDM(Single Carrier-Orthogonal Frequency Division Multiplexing)伝送技術について述べる。

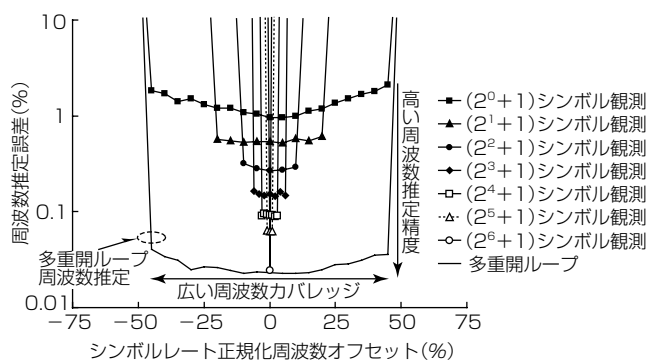


図4. 周波数推定精度

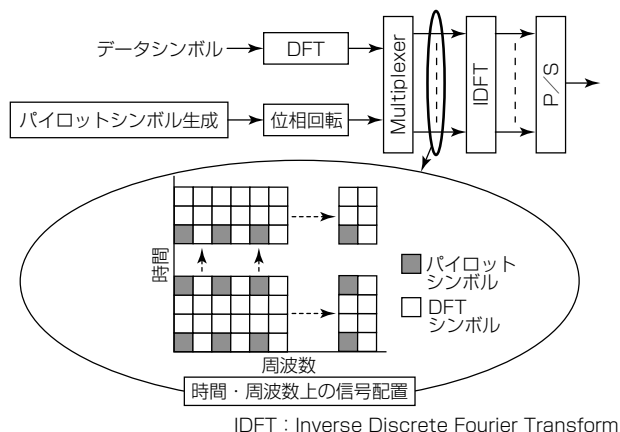


図5. SC/MCブロック伝送及びパイロット信号生成

4.1 SC/MCブロック伝送技術

衛星通信では、将来の高速・大容量伝送の実現に向けて広帯域化が進んでいる。広帯域伝送は、広い周波数帯域を用いて信号を送るため、周波数領域での信号の歪(ひず)みが問題となる。周波数領域歪みを補償する技術として、周波数領域等化(Frequency Domain Equalization: FDE)を用いたSC-OFDM伝送技術が有効である⁽⁴⁾。SC-OFDM伝送は、従来のSC伝送と同等の低PAPR特性を実現し、さらに、周波数領域歪補償が可能である。しかし、周波数領域等化に用いる伝送路推定値を高速、かつ高精度に推定するためにはパイロット信号の挿入が必要であるが、パイロット信号をSC-OFDM信号に多重するとピーク電力が増加してしまうという問題がある。また、MCブロック伝送であるOFDMでは、パイロット信号を柔軟に配置できるという特長があるが、ピーク電力が大きいといった問題がある。これらを解決するためにSC-OFDM信号に対して周波数軸上でパイロット信号を多重したSC/MCブロック伝送技術を提案する。この技術によって、ピーク電力を低減したパイロット多重伝送を実現できる。

図5にSC/MCブロック伝送の送信機構成を示す。DFT(Discrete Fourier Transform)処理によって周波数領域に変換されたデータシンボルと周波数領域で位相回転を加えたパイロットシンボルを多重する。ここで、パイロットシンボルは定包絡線信号系列を用い、多重シンボルにおけるデータシンボルとパイロットシンボルの比率を等しく設定

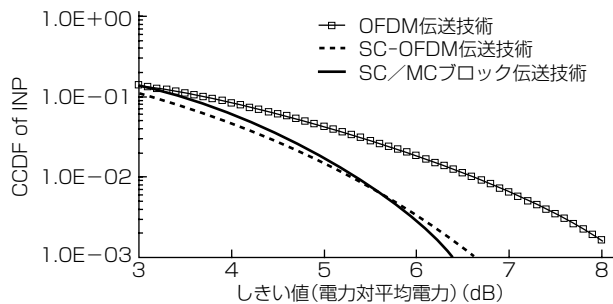


図6. SC/MCとSC-OFDM, OFDM伝送技術の電力特性比較

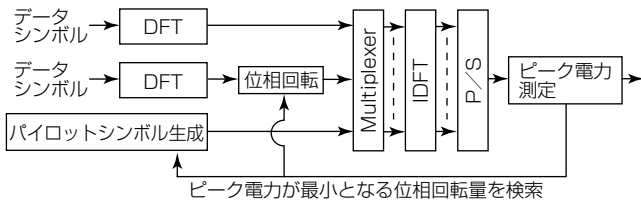


図7. SC/MC伝送方式：適応位相回転方式

する⁽⁵⁾。また、伝送路推定精度を高めるため、パイロットシンボルは一定の間隔で時間上に配置させる。

図6にSC/MCブロック伝送における電力特性(Complementary Cumulative Distribution Function of Instantaneous Normalized Power : CCDF of INP)を示す。ここで、SC-OFDM及びOFDM伝送はパイロットを挿入しないデータシンボルだけを伝送した場合の電力特性を示している。図から、提案するSC/MCブロック伝送技術を用いることでほぼSC-OFDM伝送技術と同等の優れた電力特性が得られることが分かる。この方式は、2013年にリリース予定の高速移動体向け放送技術規格であるDVB-NGH (Digital Video Broadcasting-Next Generation Handheld)で採択された⁽⁶⁾。

ピーク電力を更に抑圧する手法として、ピーク電力が最小となるように適応的に位相回転をデータシンボルに与える技術について述べる。図7に示すように、データシンボルを2グループに分割しそれぞれのグループに対しDFT処理を行う。そして片方のグループに対し、適応的に送信ピーク電力が最小となるように位相回転を加える⁽⁷⁾。位相回転量は事前に設定した候補の中から選ばれ、それぞれの位相回転量に対して異なるパイロットシンボル系列を用意し、受信機が位相回転量を判定できるようにする。この技術は、パイロットシンボルの比率に関する制約はない。

4.2 マルチチャネルSC-OFDM伝送技術

SC-OFDM伝送技術を用いてマルチチャネル伝送を行う場合、ピーク電力の増加が課題となる。このピーク電力の増加を抑える手法として、4.1節で述べたSC/MCブロック伝送向け位相回転技術を応用し、図8に示すように周波数領域で一方のチャネル信号に固定位相回転を与えるピーク電力抑圧手法の適用が有効である⁽⁸⁾。この技術は、ロールオフ

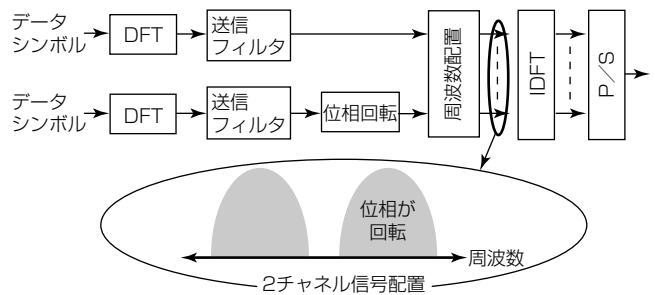


図8. マルチチャネルSC-OFDM送信及び提案技術

フィルタを用いたSC-OFDM信号にも適用可能な技術である。

5. むすび

廉価な衛星通信ネットワークを構築することを目的に開発したマルチチャネルモデムと、その技術的課題の解決方法について述べた。また、更なる低コスト化に加えて高速・大容量伝送を実現する次世代衛星通信ネットワーク向けの将来技術について述べた。

参考文献

- (1) 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.SAT, 衛星通信110(426), 43~48 (2011)
- (2) 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, 電子情報通信学会ソサイエティ大会論文集, 2011年_通信(1), 304 (2011)
- (3) 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)
- (4) Falconer, D., et al.: Frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless systems, IEEE Commun. Magazine, **40**, No.4, 58~66 (2002)
- (5) Ciochina, C., et al.: Satellite profile in DVB-NGH, Proc. ASMS 2012 (2012)
- (6) Digital Video Broadcasting (DVB)-Next Generation Handheld (NGH): Commercial Requirements for DVB-NGH, SB1856 (2009) <http://www.dvb.org/technology/dvb-ngh/DVB-NGH-Commercial-Requirements.pdf>
- (7) Hasegawa, F., et al.: A novel PAPR reduction scheme for SC-OFDM with frequency domain multiplexed pilots, IEEE Commun. Letters, **16**, No.9, 1345~1348 (2012)
- (8) Hasegawa, F., et al.: Peak power reduction techniques for multi-channel SC-OFDM, Proc. PIMRC 2011, 1743~1747 (2011)