

位相回転系列を用いた拡散通信モデム

白井 忠*
松木優治*
岡崎彰浩**

Spread Spectrum Modem Using Phase Rotation Sequences

Tadashi Shirai, Yuji Matsuki, Akihiro Okazaki

要 旨

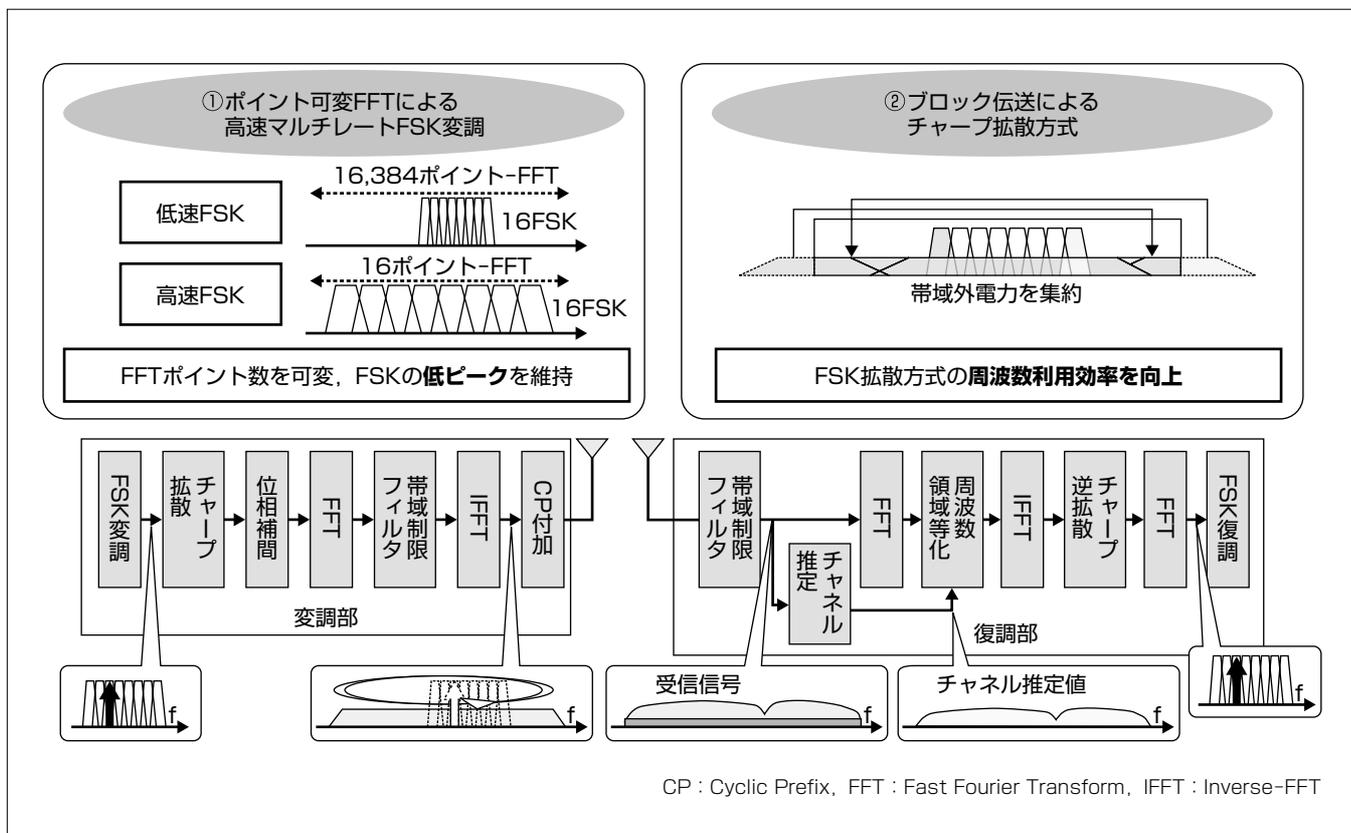
衛星通信は、これまで広域性、同報性、耐災害性等の特長を持つ無線通信路として、様々な分野で活用されてきたが、近年は洋上を航行する船舶や航空機など、移動体向けのサービスとしてもますます重要な通信路となっている。また装置の小型化、通信の大容量化を主眼に置いたKaバンドを使用したHTS(High Throughput Satellite)のサービスが始まるなど、衛星通信は、国内外で注目を集めている分野である。

これら衛星通信を始めとして、通信に使われる技術のうち、直接スペクトル拡散方式は、雑音や干渉に強く、秘匿性が高いことで、セルラーシステムから防衛・宇宙通信などの用途まで幅広く活用されているが、ピーク対平均電力

比(Peak-to-Average Power Ratio : PAPR)が高いため、装置の大きさ、消費電力に課題がある方式であった。

このたび三菱電機は、一次変調にFSK(Frequency Shift Keying)、二次変調に位相回転系列を採用し、低PAPR特性を実現する拡散通信方式を開発して実ハードウェアでの特性評価を行った。その結果、この方式は従来方式と比較してPAPRを約2 dB抑圧可能であること、さらにBER(Bit Error Rate)特性の改善も見込めることから、装置の小型化・低消費電力化に適した方式であることを確認した。

今後は、これらの開発成果を移動体搭載衛星通信機器に適用するなど、衛星通信分野を始めとする無線通信分野の発展に向けて取り組んでいく。



位相回転系列を用いた拡散通信モデム

位相回転系列を用いた拡散通信モデムの構成を示す。定包絡線変動特性を持つFSK変調信号と位相回転系列を乗算することによって実現するチャープ拡散を組み合わせた拡散通信モデムを開発した。拡散信号処理はブロック単位とすることで帯域制限を効果的に行い、また、周波数領域等化によって、波形歪(ひず)み補償を実現した。

1. ま え が き

直接スペクトル拡散方式(Direct Sequence-Spread Spectrum: DS-SS)は、雑音や干渉に強く、秘匿性が高いことから、セルラーシステムから防衛・宇宙通信まで幅広く用いられている通信方式であり、衛星通信では、この特長と併せて、隣接する衛星に対する軸外輻射(ふくしゃ)を低減することを目的として活用されてきた。近年の衛星通信システムに数多く利用される移動体通信機器は、装置の小型化、低消費電力化の観点から、電力増幅器を効率よく動作させることが重要であるが、従来の拡散方式は、M系列などの符号系列を用いるため、PAPRが大きく、より大型の電力増幅器が必要という課題があった。

この課題に対し、これまで当社は、一次変調にFSK、二次変調に位相回転系列という、ともに振幅一定の信号という特徴を持つ方式を組み合わせ、包絡線変動の少ない低PAPR特性を実現する拡散通信用の変復調方式を検討してきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。ここで、一次変調に使われるFSKは、一般的には周波数利用効率が劣るという欠点があるが、拡散通信に適用することで、その欠点を補うことができる。このたび、これらの検討結果を実装した拡散通信モデムを開発し、特性評価を行ったので、結果について本稿にまとめる。

2. 位相回転系列を用いた通信方式

今回開発した変復調方式は、変調帯域をN個のサブキャリアに分割し、その中のM個を用いてFSK信号を生成し、情報ビットに応じてそのうちの1つを選択する一次変調方式を採用した。二次変調方式は、FSK信号に位相回転系列を乗じ拡散処理を行う方式とした。この様子を図1に示す。

M値FSK信号と位相回転系列は、ともに振幅一定で位相のみが変化する信号であり、拡散後信号はそれぞれの位相を加算した信号として表現可能であるが、位相回転系列は複素信号であるため、拡散処理に複素乗算が必要となり、実ハードウェア上で実現するには、演算処理量が大きくなる欠点があった。今回、一次変調信号と拡散符号がともに定振幅で位相のみで表現可能な信号であることを利用して、拡散処理を位相演算に置き換えることで処理量を削減し、ハードウェア実装を可能とした。

また、拡散後の信号に、CPを付加したブロック伝送方

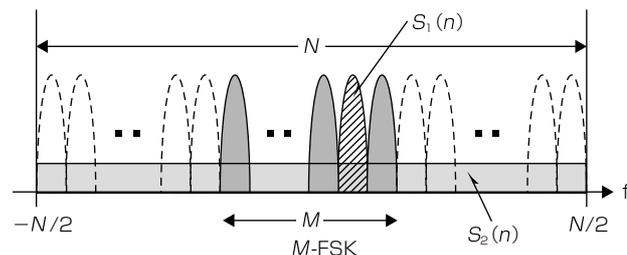


図1. M値FSK信号の拡散

式を採用した。CPとは、データ部の後部分のコピーであり、信号の拡散処理をこのブロック単位で実行することで、拡散信号をブロック帯域内に制限できるという利点がある。さらに、復調処理時でもCPを活用することによって、周波数領域等化を用いた波形歪み補償が可能となり、伝送路の周波数変動に対する耐性向上を実現した。

3. 開発したモデム

3.1 ハードウェア構成

開発したモデムのハードウェア構成を図2に示す。モデムは、DAC(Digital Analog Converter)、ADC(Analog Digital Converter)、FPGA(Field-Programmable Gate Array)などで構成し、変調、復調といった信号処理はFPGAを用いて実現した。変調用FPGAは、入力されたデータを変調してDACへ出力し、DACは入力された信号をアナログ信号に変換し、IF(Intermediate Frequency)周波数の信号として外部に出力する。一方、受信したIF周波数の信号はADCへ入力され、デジタル信号に変換後、ADCから信号を受けた復調用FPGAは復調処理を行い、復調データとして外部に出力する構成とした。

3.2 信号処理

3.2.1 変調部

変調部の機能ブロックを図3に示す。変調部ではFSKによって一次変調した信号を拡散系列によって拡散する。拡散された信号は、2章で述べたとおり振幅一定の信号となる。

ただし、位相回転系列に対し、従来のオーバーサンプル処理のように0信号挿入後に帯域制限処理を行うと、ピーク電力が大きくなるため、今回は位相補間と自己折り返し処理を組み合わせる手法を採用し、モデムに実装した。

(1) 位相補間

ここで用いる補間処理は、従来の補間処理であるサンプル間に0を挿入する方式とは異なり、より確からしい信号

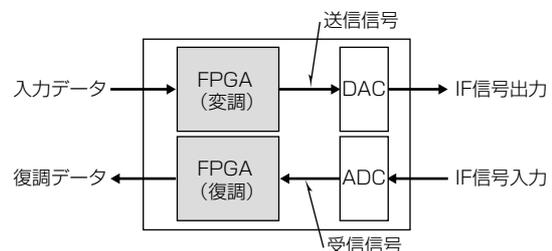


図2. モデムのハードウェア構成

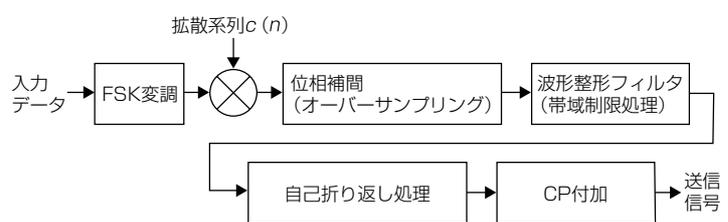


図3. 変調部の機能ブロック図

補間を行う方式を採用した。 v 倍オーバーサンプルを行う場合、 $S_2(n)$ と $S_2(n+1)$ の間に補間される信号を $S_{2,ovs}(n, v)$ とし、 $v=2$ の場合のイメージを図4に示す。図のように $S_2(n)$ 、 $S_2(n+1)$ を両端とする弧を二等分する位置に $S_{2,ovs}(n, 2)$ を挿入し、半径 A の円周上で補間を行う。このため、補間後の信号も振幅一定の位相回転系列となり、帯域制限後のピーク電力の増大を抑えることができる。

(2) 自己折り返し処理

通常、オーバーサンプルしたFSK信号に帯域制限フィルタを適用すると波形歪みが発生するため、この方式では、帯域制限フィルタによって除去された基本信号成分を、フィルタ通過後に帯域内に折り返して加算する方式を採用した。オーバーサンプル数2の場合の自己折り返し処理の様子を図5に示す。この自己折り返し処理を行うことで、

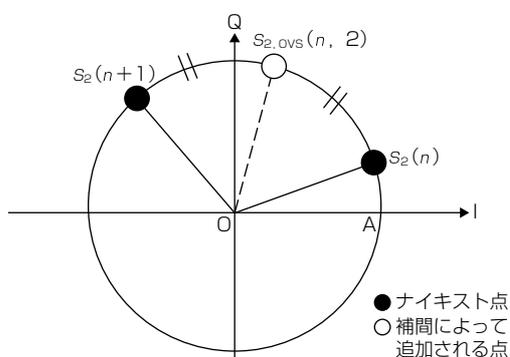


図4. 位相補間

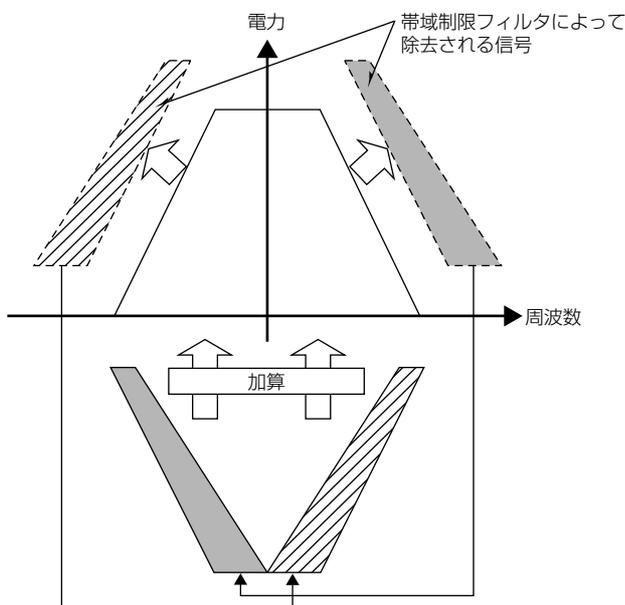


図5. 自己折り返し処理

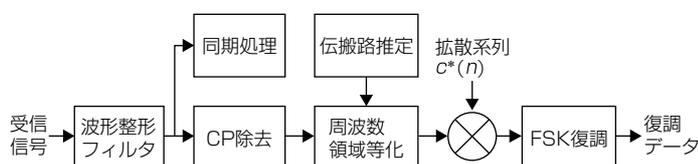


図6. 復調部の機能ブロック図

一度フィルタで除去された信号を、再び送信信号内に戻し、フィルタによる波形歪みを低減した。

3.2.2 復調部

復調部の機能ブロック図を図6に示す。復調部は、波形整形フィルタ後の信号に対し同期処理及び復調処理を行う。同期処理は、拡散周期の検出、周波数オフセット推定及びサンプルタイミング誤差検出を行う。復調処理は、CPを除去した信号を用いて周波数領域等化処理を行い、検出された拡散周期をもとに逆拡散処理を行ったうえでFSK信号の復調を行う。FSK復調処理では、FSKのサブキャリアの振幅値を比較し、最大のサブキャリアを選択することで、所望の信号を得ることができる。

4. 特性評価

開発したモデムを用いて、位相回転系列によるスペクトル拡散方式の諸特性を評価した。実機評価時の主要諸元を表1に示す。また、測定の様子を図7に示す。

4.1 送信特性

モデムから送信した送信信号のスペクトルを、図8に示す。 f_c 及び T_c はそれぞれ中心周波数とチップレートを表す。FSK変調した信号が位相回転系列によって拡散され、 $1/T_c$ の幅で帯域幅を持っていることが分かる。

次に、送信信号のコンスタレーションを図9に示す。図は振幅の最大値を1として正規化している。図から、単位円状に信号が遷移しており、ピーク振幅が出現していないことが分かる。信号が単位円の内側を遷移しているが、これは送信信号を波形整形フィルタによって帯域制限していることによる遷移である。

表1. 主要諸元

項目	内容
変調方式	16値FSK
拡散符号	位相回転系列
拡散率 N	4.096
オーバーサンプル数 v	2
波形整形フィルタ(送受)	ルートロールオフフィルタ(ロールオフ率0.5)



図7. モデムの評価測定の様子

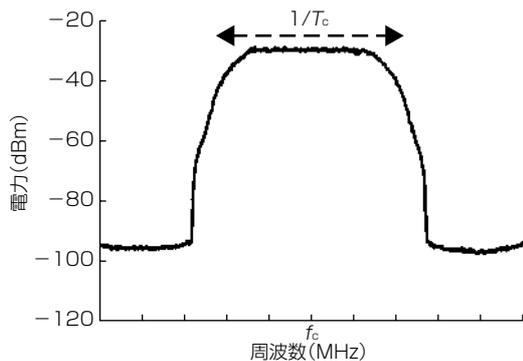


図8. 送信スペクトル

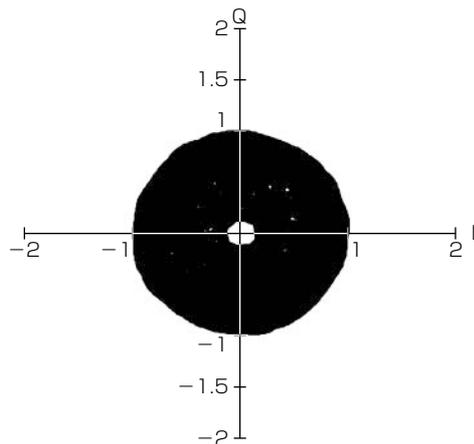


図9. 送信コンスタレーション

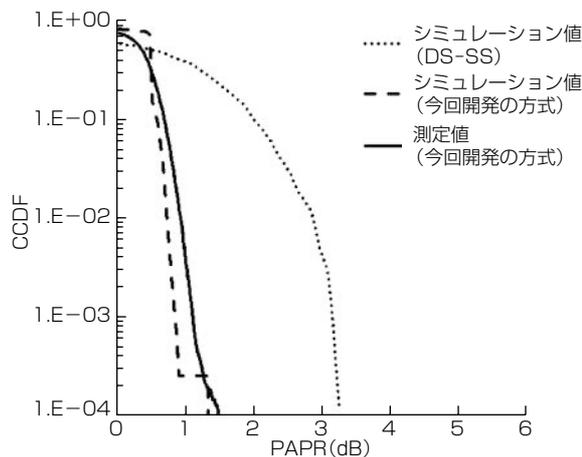


図10. PAPR特性

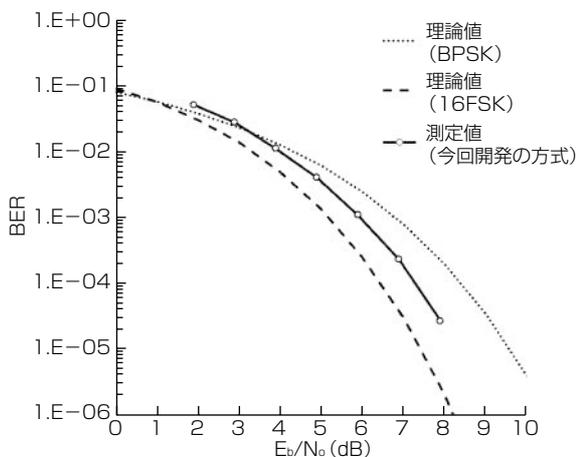


図11. BER特性

4.2 PAPR特性

モデムのPAPR特性とシミュレーション結果を図10に示す。また一次変調をBPSK(Binary Phase-Shift Keying)として拡散系列にPN(Pseudo-random Noise)系列を用いる従来のDS-SSの特性も併せて示す。

縦軸のCCDF(Complementary Cumulative Distribution Function)は相補累積分布関数を表す。CCDF=1.0×10⁻³で従来のDS-SSとの特性を比較すると、この通信方式は従来のDS-SSよりもPAPRが約2dB改善し、1.1dBとなり、従来方式と比較してPAPR特性を抑圧していることを確認した。

4.3 BER特性

モデムのBER特性の測定結果を図11に示す。図から、16FSKの理論値と実機で取得したデータの差は、BER=1.0×10⁻³で約0.7dBの差であり、伝搬路推定誤差やクロック偏差、アナログ部での量子化誤差等、理論値の計算には含まれていない要素を考慮すると実機の劣化量が小さいことが分かる。また、従来のDS-SSで使用されるBPSKの理論値と比較した場合、BER=1.0×10⁻³で、この通信方式の誤り特性が優れていることを確認した。

5. む す び

一次変調をFSK変調とし、位相回転系列によって拡散する方式を実ハードウェアに実装して特性を評価した結果、送信信号のスペクトルから期待通りに拡散されていること、

PAPR特性は、CCDF=1.0×10⁻³点で従来方式よりも約2dBよい1.1dBと小さい値であること、及びBER特性は、理論値からの大きな劣化がなく、従来のDS-SSより誤り特性が優れていることを確認した。

このことから、この方式は、拡散通信を行う上で、PAPA特性やBER特性で、従来の方式より優位であり、装置の小型化、低消費電力化に有効であることを実証することができた。今後は、これらの開発成果を、移動体搭載衛星通信機器に適用し、衛星通信分野を始めとする無線通信分野の発展に向け取り組んでいく。

参 考 文 献

- (1) 佐野裕康, ほか: 周波数領域で逆拡散・復調が可能な直接スペクトル拡散方式に関する検討, 電子情報通信学会ソサエティ大会, B-5-82 (2009)
- (2) 岡崎彰浩, ほか: シングルキャリアブロック伝送を用いたMFSK/DSの多元接続容量の一検討, 電子情報通信学会ソサエティ大会, B-5-12 (2011)
- (3) 尾崎圭介, ほか: MFSK/DSブロック伝送におけるPAPR低減手法, 電子情報通信学会論文誌, **J98-B**, No.1, 53~64 (2015)