

5GHz 帯 DX 通信のための低レート変調の検討

JA6XKQ / 武安 義幸

2009年11月15日

動機

アマチュア衛星通信においても地球周回軌道を離れ、惑星間軌道へ投入する計画がある。[1] [2] そこでの通信は帯域制限型通信路ではなく電力制限型通信路であり、低 C/N での DX 通信となる。低 C/N を克服するには、情報ビットあたりのエネルギーを高くするために通信レートの低速化を図り、誤り訂正 (Forward Error Correction = FEC) を導入することが常套手段である。[3] 一方、低レート化にはオシレータの位相雑音による限界があり、いくらでも低レート化できる訳ではない。[4]

そこで、マイクロ波帯で低レートを実現するための要点を、実験を通して確認する。

変調方式

プロフェッショナルな惑星探査機での通信システム、いわゆるディープ・スペース・ネットワーク (Deep Space Network = DSN) で採用されている残留キャリア位相変調 (PSK) を真似ることにした。PSK は FSK や ASK よりも誤り率特性 (Bit Error Rate = BER) に優れていることが採用の理由である。二値 PSK (Binary PSK = BPSK) では一般的に 180 度の位相偏移で、キャリアは消失している。位相偏移を 180 度以下とすることでキャリアを残留させ、低 C/N でのキャリア同期を改善する手法を併用している。[3] [4]

実験の構成

実験の構成図を 図-1 に示す。送信機は搭載側であり、実際のインプリメントを想定して回路構成を単純化する目的から、周波数変換方式 (コンバータ) ではなく、5GHz 帯オシレータ出力を直接変調する方式とした。後述する既存の PSK 復調器を用いるために差分変換とマンチェスタ・エンコードを経て、DC バイアスを掛けた (残留キャリア方式とするため) DBM で位相変調を行なう。オシレータの位相雑音の影響を評価するために、外部リファレンスを切替える。

受信機は 5GHz 帯の信号を 1.2GHz 帯へ周波数変換し、レシーバのオーディオ出力を PSK 復調器 (Demodulator = DEM) で復調する。受信系における位相雑音としては初段の周波数変換局発が支配的であるので、その影響を評価するために送信系と同様に外部リファレンスを切替える。

外部リファレンスには、SC カット採用の OCXO、GPS 同期オシレータ (オシレータは SC カット採用の OCXO)、ルビジウム Rb オシレータの三種類を比較と

して用いる。

PSK-DEM として G3RUH による Phase-3 衛星テレメトリ受信用のキットを用いた。[5] 本来のビット・レートは 400bps であり、低レート化のためにクロック再生回路を改造して 400/200/100/50bps を切替え可能としている。評価実験は最低速の 50bps のみとした。キャリア再生回路に変更は無い。

性能評価は BER 対 E_b/N_0 で行い、そのためのノイズ・ジェネレータと BER テスタを配置する。

E_b/N_0 は、PSK-DEM 入力のオーディオ信号を PC による FFT スペクトラム・アナライザ (SPECTRAN by I2PHD) [6] で測定する。

取得データ - スペクトラム

図-2、図-3 および 図-4 に、受信側周波数変換局発のリファレンスを、それぞれ OCXO、GPS-DO および Rb とした場合の受信信号スペクトラムを示す。

送信側オシレータのリファレンスは、いずれも OCXO である。搭載機器を想定して GPS-DO や Rb ではなく、OCXO とした。以降の取得データにおいても送信側はすべて OCXO である。

測定においては変調器入力データを固定値 (0) とすることで、差分変換とマンチェスタ・エンコードにより単一成分がスペクトラムとして見える。ノイズ・ソースは OFF としている。

着目点はキャリア近傍のスペクトラムの盛り上がりである。これはリファレンスの位相雑音特性の違いにより生じている。

取得データ - アイ・パターン

図-5 および 図-6 に、受信側周波数変換局発のリファレンスを、それぞれ GPS-DO および Rb とした場合の PSK-DEM 内アイ・パターンを示す。

送信データは BER テスタからの PRN9 擬似ランダム・パターンである。オシロスコープのトリガは送信側クロックによる。

アイ・パターンの測定においては、位相雑音の影響だけを見るために、ノイズ・ソースを OFF とした High C/N である。

取得データ - BER 特性

図-7 に、受信側周波数変換局発のリファレンスを、それぞれ GPS-DO および Rb とした場合の BER 特性を示す。比較のため図中には、非同期検波で差分変換を行なった場合の理論値をプロットしている。

送信データは BER テスタからの PRN9 擬似ランダム・パターンである。

考察

最終的な評価指標である BER 特性において、図-7 に示すようにリファレンスの位相雑音特性の相違による差異が歴然と現れている。データ取得時には何かの間違いかと確認を行なったほどである。

これらの差異は、図-3 および 図-4 に示すスペクトラムに現れている位相雑音特性の違いによるものと考えられる。図-4 ではキャリア近傍が位相雑音のために盛上っており、また、AC 電源からの誘導と思われる 50Hz と 100Hz のノイズ成分が見て取れる。これらのノイズ成分の分布は、本来の変調成分と同じ領域に分布するので、それが C/N を劣化させることは定性的には容易に理解される。定量的評価としては、位相雑音成分を周波数軸で積分して電力値に換算する。ビット・レートが下がるほど変調成分がキャリア近傍に分布するので、オシレータの位相雑音特性の呪縛から逃れられない。

ここで注意を要する点は、リファレンスである GPS-DO や Rb の方式自体の相違ではなく、位相雑音特性の相違点だけに着目すべき点である。「GPS-DO だから良い、Rb は悪い」というものではない。実験に用いた Rb の個体差、あるいは Rb に使用した電源からの影響も考えられる。

間接的な評価指標であるアイ・パターンにおいては、図-5 および 図-6 に示すように大きな差異は読取れない。強いて言えば、クロスポイントのジッタに差異が見られる。通信システムの評価においては間接的な評価指標ではなく、end-to-end での直接的な評価が肝要であろう。

なお、図-7 の BER 特性では理論値から約 2dB の機器劣化であり、DX 通信の実用においては更なる改善が望まれる。これは用いた PSK-DEM のキャリア再生方式がリミッタと二乗回路であることが支配的であり、他の方式による改善が可能である。FEC の導入と併せて、実運用に向けての課題とする。

まとめ

マイクロ波帯での低レート変調方式では、オシレータの位相雑音に配慮すべきことが実験で確認できた。一方、適切に設計された機材で 50bps が実用可能であることが確認できた。

謝辞

送受信の 5GHz 帯オシレータの提供、実験と考察に助言と議論を頂いた JF1WKX 勝間 伸雄 氏に感謝申し上げます。氏の設計開発による高性能な Solilock-G 無しでは本実験も 50bps という低レートも実現し得なかった。

参考文献

- [1] To Mars with P5-A
Karl Meinzer, DJ4ZC
<http://www.amsat-dl.org/p5a/p5a-to-mars.pdf>
- [2] UNITEC-1
UNISEC
http://unitec-1.cc.u-tokai.ac.jp/ja/about_unitec-1_ja
- [3] Proposal for a FEC-Coded AO-40 Telemetry Link
Phil Karn, KA9Q
<http://www.ka9q.net/ao40/2002paper/>
- [4] DETECTION OF VERY WEAK TRANSMISSIONS FROM DEEP SPACE
Peter Kinman, Robert Bokulic
<http://www.upv.es/satellite/trabajos/pracGrupo15/Marte/DSN/PDF/Astro.pdf>
- [5] 400 bps PSK P3 Data Demodulator PCB
James Miller, G3RUH
<http://www.jrmiller.demon.co.uk/products/p3dem.html>
- [6] Spectran V2
Alberto di Bene, I2PHD
<http://www.sdrham.com/spectran.html>

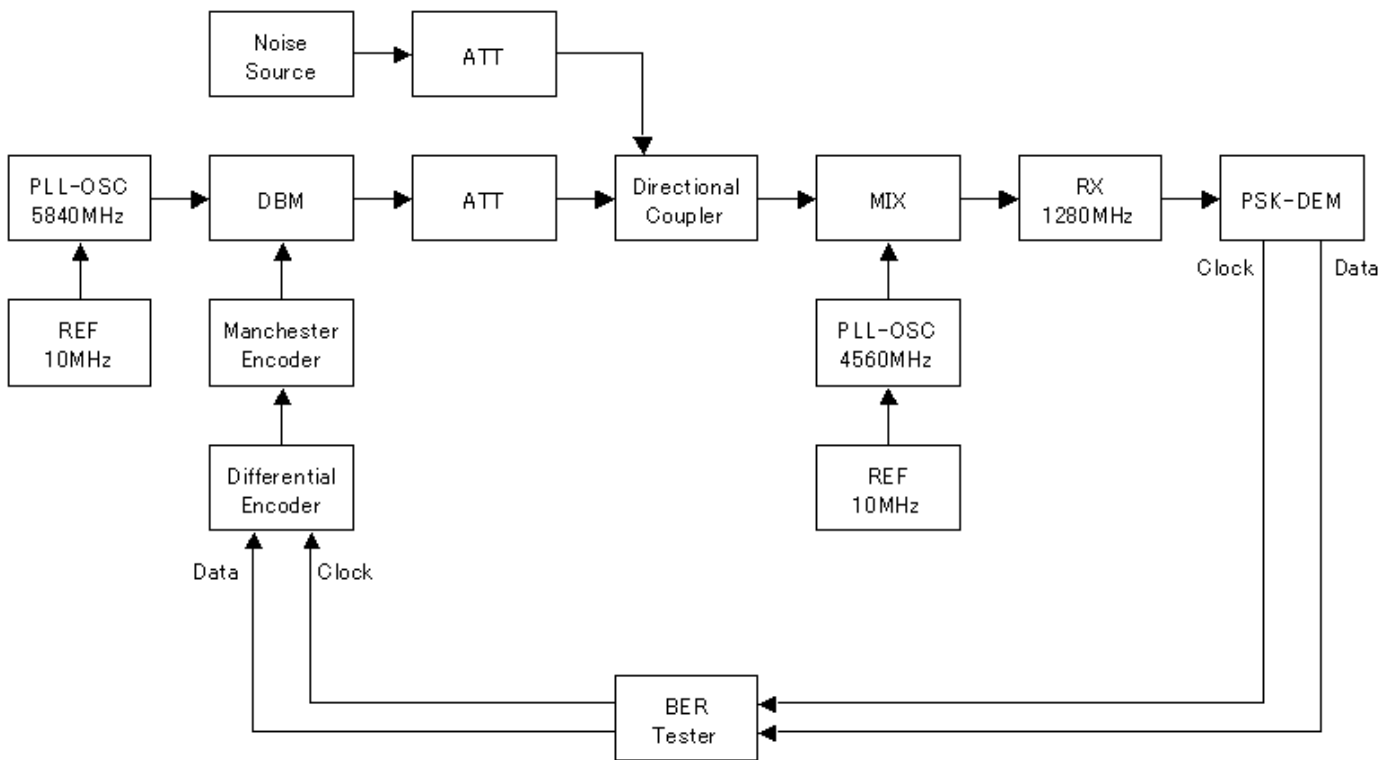


図-1 : 実験の構成

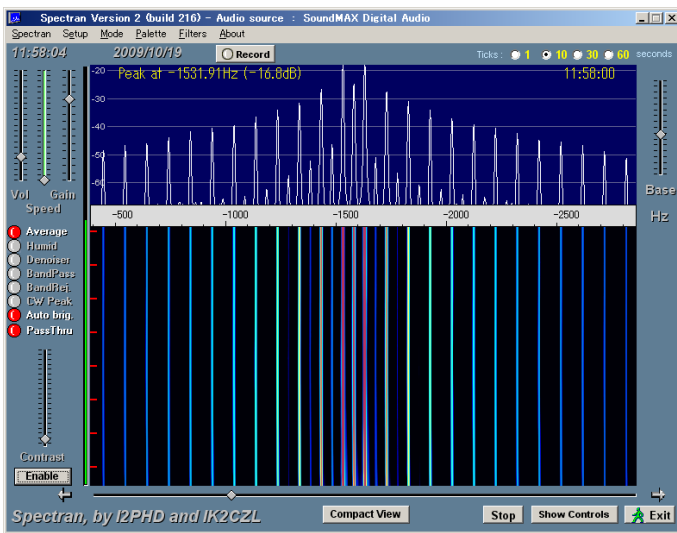


図-2 : 受信スペクトラム / リファレンス = OCXO

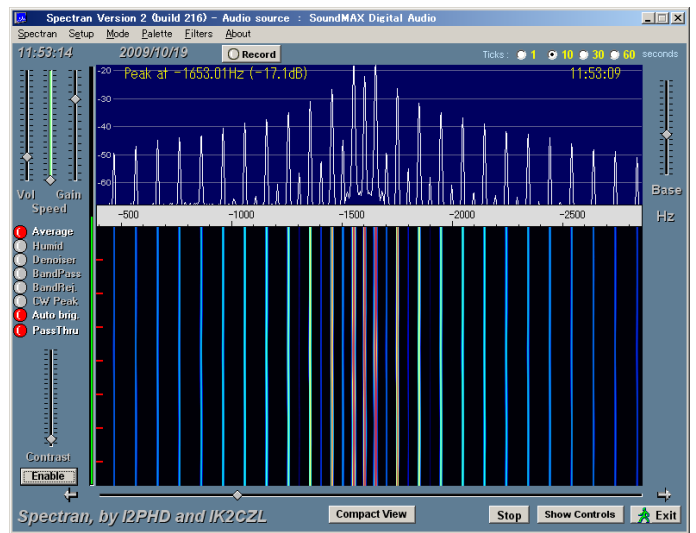


図-3 : 受信スペクトラム / リファレンス = GPS-DO

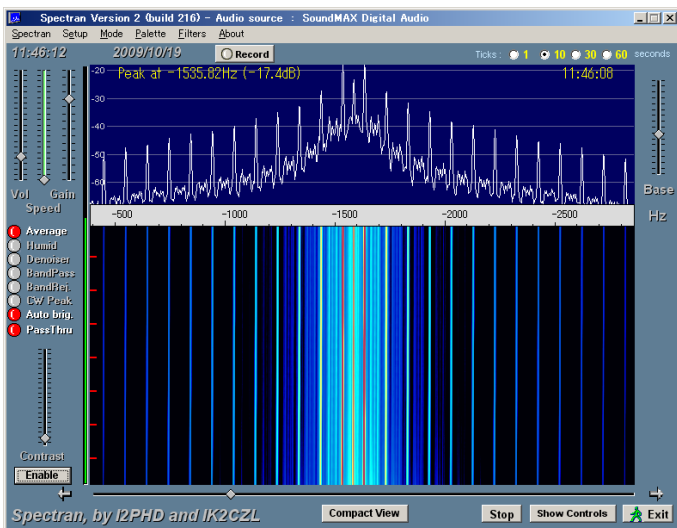


図-4 : 受信スペクトラム / リファレンス = Rb

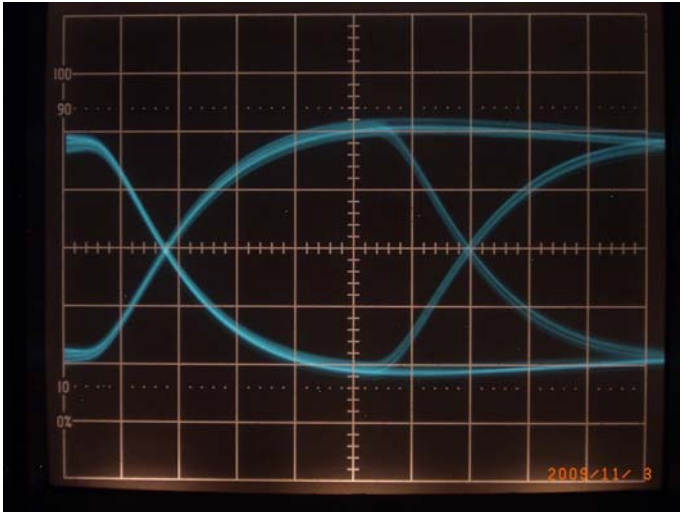


図-5 : アイ・パターン / リファレンス = GPS-DO

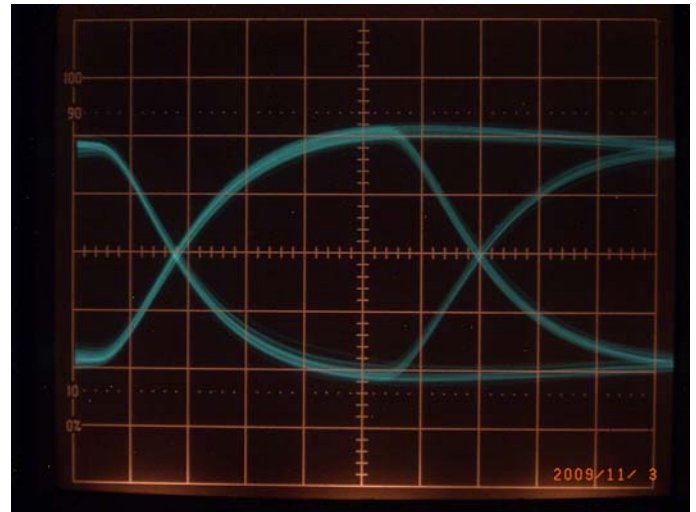


図-6 : アイ・パターン / リファレンス = Rb

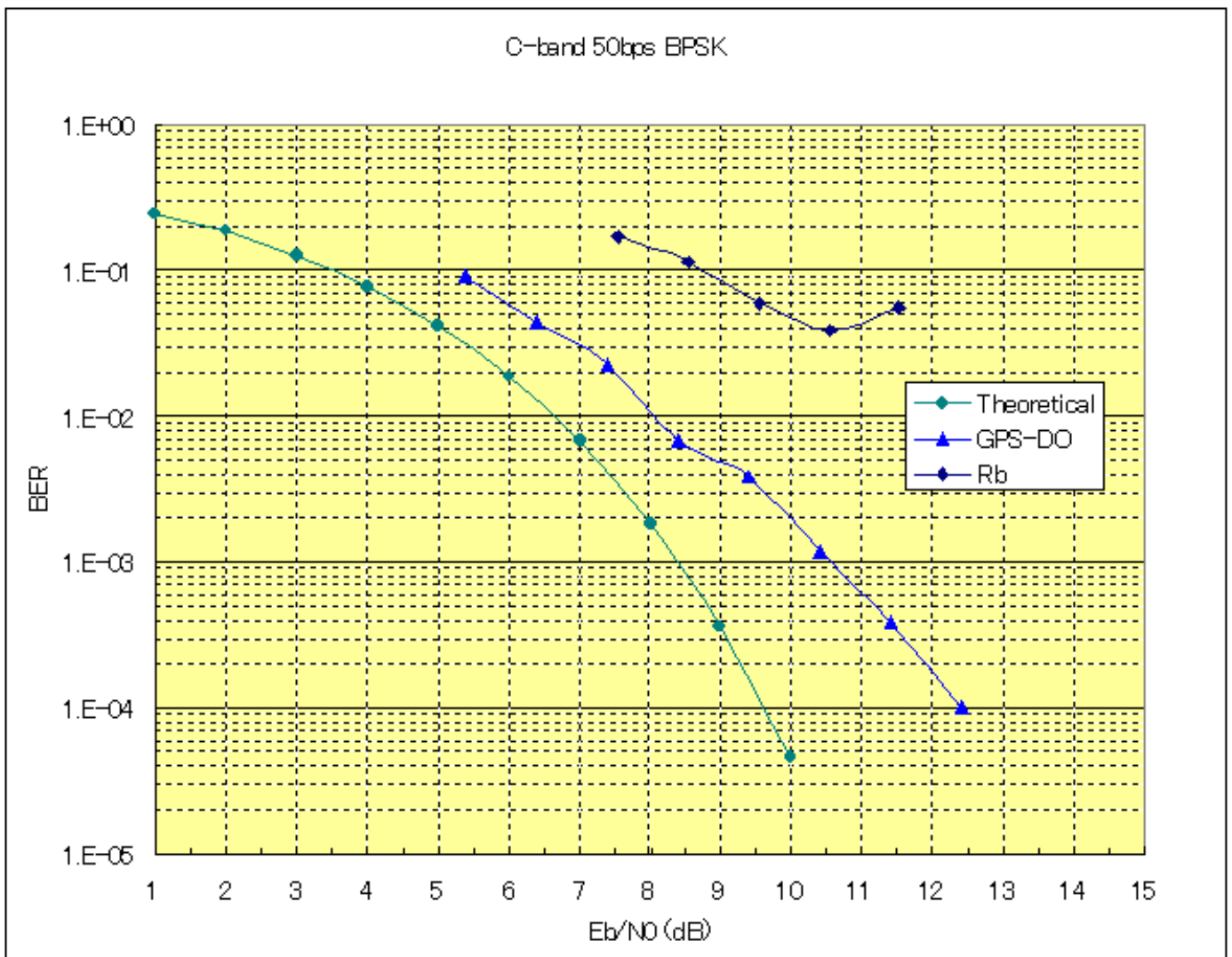


図-7 : BER 特性