

超小型人工衛星「NEXUS」における $\pi/4$ shift QPSK 送信機の復調器の開発及び通信評価

Development and Evaluation of Demodulator of $\pi/4$ shift QPSK transmitter in CubeSat "NEXUS"

奥山・宮崎研究室
Okuyama-Miyazaki Laboratory
廣瀬祐香
Yuka Hirose

In recent years, the amount of communication data has been increasing as the missions of CubeSats become more sophisticated. However, due to the size limitation of CubeSats and the low transmission power, there are few transmitters and dedicated demodulators that can perform high-speed communication, which results in low effective throughput of CubeSat. The purpose of this study is to develop a $\pi/4$ shift QPSK demodulator to realize a high-speed transmitter for CubeSat, and to evaluate the results of this study to provide evaluation data for the realization of high-speed communication in near future.

1. 研究背景

1.1. 近年の人工衛星開発

近年、多くの民間企業や教育機関で、低コストで開発期間が比較的短く、相乗り衛星として打ち上げの機会が得られやすい CubeSat 等の超小型人工衛星が数多く開発され、打ち上げられている。ミッションもより多様化・高度化しており、その搭載機器にはより高い性能が求められるようになっている。

1.2. 超小型人工衛星の通信への課題

前節で述べた通り、衛星に求められるミッションは複雑化する一方で、超小型人工衛星にはミッション実現のためのデータのやり取りを行う通信には以下のような課題がある。

10 cm 立方を1単位(1U サイズ)とした CubeSat は、大型人工衛星に比べ搭載機器のサイズに制限がある。また、自ら発電できる電力も少ないため、搭載している送信機の送信電力が低くなりやすく、高い信号対雑音比(Signal-to-Noise Ratio, S/N)を得ることが難しい。そのため、地上局がデータを受信する際の正味の通信速度(実効スループット)が遅くなってしまう、軌道寿命内での実現可能なミッションが制限されている。

また、周波数利用の手続きや必要な機器の入手の容易さから、超小型衛星の多くは通信にアマチュア無線帯を採用しており、アマチュア無線のパケット通信では AX.25 プロトコルが一般的に使用されている。しかしながら、アマチュア無線帯は割り当てられている周波数域が低く帯域幅が狭い。そのため、高度化するミッションに対応できる高速通信が可能で、かつ超小型衛星のコストの低さを満足できるアマチュア無線帯の無線機の開発は難しく、そのような無線機は現時点で実現していない。

1.3. 超小型人工衛星「NEXUS」^[4]

1.3.1. NEXUS の開発目的

以上の通り、従来の通信機より性能の良い超小型人工衛星用の通信機の需要が高まったことから、アマチュア無線帯を利用する多くの CubeSat に搭載されるバス通信機(GMSK9600 bps)と比較して、より高速な通信が可能な通信機の実証を目的として、著者らの研究室では1U の CubeSat 「NEXUS」(Fig. 1)を開発し、2019年1月18日にイプシロンロケット4号機で打ち上げた。

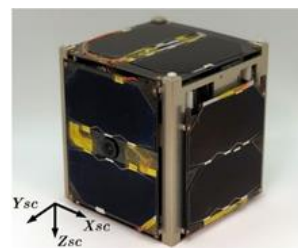


Fig. 1 CubeSat "NEXUS"

1.3.2. $\pi/4$ shift QPSK 送信機

NEXUS 搭載通信機の1つである $\pi/4$ shift QPSK 送信機(Fig. 2, 以下, QPSK)は、著者らの研究室と JAMSAT(日本アマチュア衛星通信協会)により共同開発した新規開発通信機である。通信速度は38400 bps であり、従来のバス通信機に比べて4倍の通信速度である。



Fig. 2 $\pi/4$ DQPSK transmitter

Table 1 $\pi/4$ DQPSK transmitter specifications

寸法	80×40×10 mm
質量	15.5 g
動作電圧	3.33~3.50 V
消費電流	680 mA
通信速度	38400 bps
変調方式	$\pi/4$ shift QPSK
送信周波数	435.900 MHz
送信電力	0.3 W
通信プロトコル	CCSDS
占有周波数幅	25.890 kHz
動作温度	-20~+60 deg

しかしながら、通信速度が速いために信号がノイズに埋もれやすく、高いS/Nが必要となる。そのために、通信プロトコルにはリード・ソロモン符号を付加したCCSDS 準拠フレームを採用しており、誤り訂正能力の向上を狙っている。そのため、QPSK から送信されたデータの復調には、これらを考慮した専用の復調器が必要となっている。

1.4. 地上局システム

実効スループットの改善のため、NEXUSは直線偏波ダイバーシティ方式を導入している。水平・垂直の直線偏波2系統を独立した無線機で受信し、復調したデータを補完し合うことで全体の利得向上を目的としている。本研究では、この2系統による受信・復調・補完を「偏波ダイバーシティ」と呼ぶ。なお、後述の通り、QPSKの実効スループットの評価は偏波ダイバーシティの値で行う。

1.5. 本研究の目的

以上をふまえ、本研究では、超小型人工衛星における高速アマチュア通信の実現を目的とし、そのためにNEXUSに搭載したQPSKの有用性を実証する。具体的には、まず、QPSKの専用復調器を開発し、それを用いた通信評価方法を示す。その上で、評価結果を示すことでQPSKの有効性を実証する。

2. $\pi/4$ shift QPSK 復調器の開発

2.1. $\pi/4$ shift QPSK 変調²⁾

NEXUSのQPSKが採用している $\pi/4$ shift QPSK変調とは、BPSK(Binary Phase-shift Keying)という波の位相を変化させることで“0”と“1”を表し1 bit ずつ情報を伝達する方式から派生したものである。BPSK変調した二つの波(I波とQ波)の位相を $\pi/2$ ずらして合成するとQPSK(Quadrature Phase-shift Keying)変調となり、一つの波で2倍の情報量を送ることができ、高速通信が可能となる。この信号を極座標にプロットしたものがFig.3のコンスタレーションであり、1つの点が2 bit(I値とQ値)を表す。これに $\pi/4$ の差動位相偏移を付与したのが $\pi/4$ shift QPSK ($\pi/4$ DQPSK, $\pi/4$ Differential QPSK)である。

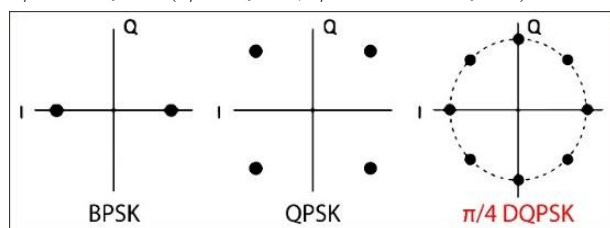


Fig. 3 Constellation of PSK, QPSK and $\pi/4$ DQPSK

2.2. $\pi/4$ shift QPSK 送信機のバケット構成

上述の通り、QPSKはCCSDS 準拠フレームを送信するようになっており、先頭バケットの始まりを認識するための同期コード、次にinfo部(送信する正味のデータ)、その後ろにリード・ソロモン符号が付加され、データを暗号化するためのスクランブルが施される(Fig.4)。また、NEXUSではinfo部を、送信したい情報をアマチュア無線帯でよく用いられているAX.25プロトコルに包んだものにしていく(したがって、info部の一部が本当に送信したい正味のデータ、ということになる)。これは、NEXUSにはQPSKの他に送信機が2機搭載されており、それらはCCSDSではなくAX.25プロトコルで送

信するようになっており、NEXUSのOBC(メインコンピュータ)は、処理を簡単にし、かつ、送信機同士の性能比較をしやすいよう、どの送信機を使う場合も、送信機にAX.25プロトコルのデータを送るようにしたかったからである。

また、CCSDS 準拠のリード・ソロモン符号は一般的なリード・ソロモン符号とは異なるため、符号の生成や復号の際に特定の行列を掛ける必要がある。

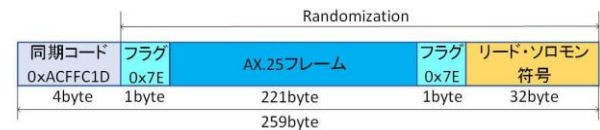


Fig. 4 Frame Structure of the $\pi/4$ DQPSK Transmitter

2.3. QPSKの復調の流れ

以上を踏まえ、本研究ではSDRから入力した信号を以下の順番で処理し、復調を行う復調器を開発した。

- ① ドップラーシフトによる中心周波数シフト量の計算
- ② QPSK変調の復調
- ③ デスクランブル
- ④ CCSDSプロトコルの復調として、同期コードの認識
- ⑤ リード・ソロモン符号による誤り訂正
- ⑥ フラグの検出
- ⑦ AX.25プロトコルの復調

2.4. QPSK 復調器の開発過程

2.4.1. 復調器開発の課題

NEXUS開発メンバーによる先行研究において、SDRと組み合わせることで、QPSK復調が可能なソフトウェア開発が行われていた。ソフトウェアはGNU RadioとMatlab-Simulinkを用いており、以下の3つの問題が未解決であった。

- ・GNU Radio/Simulink両ソフトにおいて、ドップラーシフトによる中心周波数シフト量の計算が地上局ソフト(Orbitmaster2)と合致していない。
- ・Matlab-Simulinkでのリード・ソロモン符号デコードブロックがCCSDS 準拠のものではない。
- ・GNU RadioにはAX.25プロトコルのデコードブロックが存在せず、自作ブロックを作成する必要がある。

本研究では復調器のソフトウェアを最終的に一つに統合してSDRと併せてパッケージ化することを目標としており、そのための準備として、上記の問題を解消することを目指す。

2.4.2. EMを用いた通信試験

復調器のパッケージ化を目指すにあたって、EMを用いた通信試験を行うことで、まず使用するソフトウェア(GNU Radio/Simulink)とSDR(LimeSDR/BladeRF)の組み合わせを決定することにした。ソフトウェアによって利用できるSDRが限られているため、本項目で検証を行ったのはGNU Radio-LimeSDR、Simulink-BladeRFの2通りである。

本通信試験では、運用を想定した減衰を与えた時、復調した各バケットに付加された送信バケット番号から、500バケット送信した際にそのうち何バケット正確に復調できたかを求め、実効スループットの値を算出した。

地上検証用の通信試験のコンフィグレーションをFig.5に、結果をTable 2に示す。

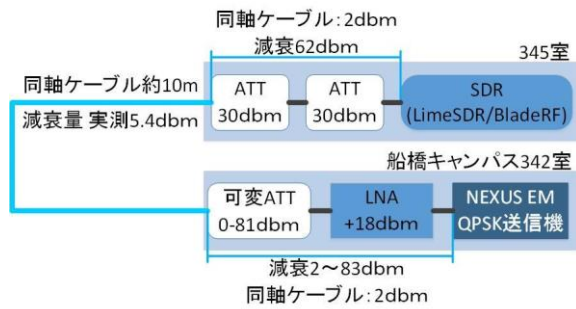


Fig. 5 Configuration of Communication Test of EM

Table 2 Results of Communication Test of EM

		Software	総減衰値 [dBm]		
		-SDR	69.4	72.4	75.4
実効 スループット [bps]	GNU Radio	-Lime SDR	8245	3711	996
	Simulink	-BladeRF	12280	12205	11707

この結果から、減衰の大きさに関わらず、Simulink と BladeRF の組み合わせの方がより通信速度が速いことが分かった。そこで、復調器の開発は Simulink と BladeRF の組み合わせで続行することにした。すなわち、前節の QPSK 復調器の開発の課題のうち、Matlab-Simulink でのドップラーシフトによる中心周波数の計算と、CCSDS 準拠のリード・ソロモン符号の復調が残された課題となった。

2.4.3. ドップラーシフトの計算

TLE から SGP4 を用いてドップラーシフト周波数をリアルタイムで計算し、随時中心周波数の更新を行った。地上局ソフトである, Orbitmaster2 との周波数シフト量の照らし合わせを行い、正しく機能していることを確認した。

2.4.4. QPSK 変調の復調

QPSK 変調の復調の流れを Fig.6 に示す。復調を行う際の誤り発生率を下げるため、まず受信信号に含まれるノイズ成分を取り除く。その後 QPSK 変調の復調を行い、コンスタレーションのシンボルのデータをビットに置き換える。ビットの羅列の中からパケットの始まりである同期コードの検出を行い、データを各パケットに分割する。

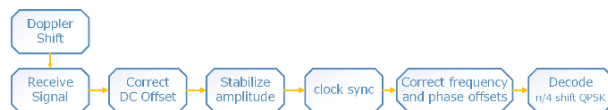


Fig. 6 QPSK Decoding Flow

2.4.5. CCSDS デコーダの開発

2.4.1 節に記述した通り、Matlab-Simulink でのリード・ソロモン符号デコードブロックは CCSDS 準拠のものではない^[3]ため、設定できる変数の数が1つ少なく、本研究に用いることはできなかった。そこで、Matlab の互換ソフトである Octave において、リード・ソロモン符号の復調関数”rsdec”を用いて復調を行った。この関数は Matlab では指定できなかった変数を持っているため、CCSDS 準拠のリード・ソロモン符号デコーダとして用いることができた。^[4]



Fig. 7 CCSDS Protocol Decoding Flow

しかしながら、最終的な復調ソフトは、他のソフトとのパッケージ化を目指しているため、最終的には関数”rsdec”のソースコードを Matlab に対応させて利用できるようにする必要がある。

2.4.6. AX.25 デコーダの開発

CCSDS 準拠のリード・ソロモン符号のデコードにより誤り訂正を行ったデータを、フラグと呼ばれる全パケット共通のコードを検出することでパケットの認識を行い、AX.25 プロトコルのデコードを行うようにした。

以上により、QPSK 復調器を完成させた。

3. $\pi/4$ shift QPSK 復調器の通信評価

3.1. NEXUS ミッション内容と達成基準^[4]

NEXUS のミッションのうち、本研究における該当項目は Full Success の1つである「(3)QPSK 送信機の実用性確認」である。このミッションの達成基準は、「QPSK 送信機の実効スループットが従来の通信機(GMSK9600bps)の3倍以上であること」である。

そこで、次項の通り、運用時に状況を考慮した上で、実効スループットの平均値を算出し、GMSK9600bpsの実効スループットを3倍した値と比較を行うこととした。

3.2. 実効スループットの定義と算出方法

本研究では、実効スループット[bps]を、誤りなく復調できたパケットの Information 部(Info 部、識別符号等を除いた実際のデータとして利用できる部分)のデータ量[bit]を通信時間[s]で割った値と定義した。ここで通信時間は衛星への Uplink 時刻から、RF 放射開始までの時間を加味し、Uplink 時間の 15s 後から衛星が地上局の可視範囲外に出るまでとした。

3.3. 運用時の条件

NEXUS は昼・夜2回ずつ運用があり、昼運用の方が違法無線による混信が多い傾向にある。また、仰角が大きいくほど電波が建物などに遮られる可能性が下がることから、ある程度の大きさがある方が実効スループットの値は高くなると考えられる。ただし、仰角が大きすぎると衛星と地上局の衛星進行方向の相対速度が大きくなる。そのためにアンテナローテータの追尾が遅れる可能性があり、また、ドップラーシフトの影響を強く受け、実効スループットの値が少し低下することもある^[5]。

以上のことから、実効スループットは昼と夜に分けて測定し、かつ、最大仰角によって分けて測定することとした。

3.4. 実効スループットの測定結果

以上を踏まえ、NEXUS の QPSK 送信機で17日間、動画のダウンリンクを行い、開発した復調器を用いて偏波ダイバーシティの実効スループットを測定した結果を Table 3 に示す。なお、NEXUS の回帰日数は9日間^[6]である。

Table 3 Average value of effective throughput under operational conditions for NEXUS

評価条件	実効スループット[bps]
バス通信機(GMSK9600 bps)	2279.2
QPSK 送信機(昼・夜)	2118.6
QPSK 送信機(夜のみ)	3925.2
QPSK 送信機 (夜のみ,最大仰角 18 deg.以上)	5504.6
QPSK 送信機 (夜のみ,最大仰角 19 deg.以上)	5743.4
QPSK 送信機 (夜のみ,最大仰角 20 deg.以上)	6054.2
QPSK 送信機 (夜のみ,最大仰角 24 deg.以上)	6870.5
QPSK 送信機 (夜のみ,最大仰角 40 deg.以上)	5962.6

3.5. 混信が実効スループットに与える影響

Table 3 より, 比較的混信の少ない夜運用での実効スループットは, 昼・夜運用での平均値と比べ2倍近くの値になっていることが分かる. この結果は, そもそも混信が強い場合, シンボルがノイズに埋もれてしまい, 信号の受信自体が難しくなる. ノイズと信号の強さは比例しているため, ノイズの除去には限度がある. そのため, 違法無線による混信の強い昼運用時において, 夜運用時と同程度の実効スループットを得るための改善方法については依然検討中である.

3.6. 通信評価結果

以上を踏まえ, 実効スループットの平均値を算出する条件を, 夜運用時のみかつ最大仰角 24 deg.以上の運用とした. このとき, 実効スループットの平均値は6870.5 bps となり GMSK9600 bps の実効スループットの3.01 倍となった.

これにより, 本研究において開発した復調器は, 混信が少なく, 最大仰角が 24 deg.以上の場合において, 「従来の無線機よりも3倍以上の実効スループット」という, NEXUS のミッション達成基準を満足することがわかった.

4. 結論及び今後の展望

4.1. 結論

本研究では以下の結論を得た.

- 通信試験の結果, SDR と復調ソフトウェアの組み合わせは BladeRF-Simulink の方が実効スループットの値が大きくなることが分かった.
- 現時点の復調器においては, 混信の少ない夜運用時かつ, 最大仰角の値が 24 deg.以上において, 従来の無線機の3倍以上の実効スループットで通信が可能である. このことから, 今後は超小型アマチュア衛星においても, 高度なミッション達成のための高速通信が実現可能であると分かった.

4.2. 今後の展望

復調器の開発に関して, アマチュア無線通信に精通されている UZ7HO/Andy 様から hs_soundmodem を用いた復調器を提供して頂いた. このソフトを NEXUS の最大仰角に関わらず, 7 日間昼・夜運用時に試用した結果が次の Table 4 の通り

である.

Table 4 Average value of effective throughput using hs_soundmodem for NEXUS

評価条件	実効スループット[bps]	
	平均値	最大値
バス通信機 (GMSK9600 bps)	2279.2	-
QPSK 送信機	12351.1	22976.6

この結果から, QPSK 送信機の実効スループットはバス通信機の 5.42 倍となり, ミッションの達成基準を大幅に超えて満足していることが分かる. したがって, 今後は運用時における条件に関わらず, NEXUS の達成基準とした通信速度よりもさらに高速な通信が CubeSat において実現可能であることが分かった. この通信技術が確立することで, 通信速度の制限によって, CubeSat では実現が難しいと考えられてきたミッション内容の実現を目指したい.

また, EM での通信試験時においてはドップラーシフトによる周波数計算が不要なため, 運用時に信号の受信と同時にドップラーシフトの計算を行うことで生じるソフトウェアへの負荷によって, 信号の取りこぼしが発生する可能性に関しては確認できていない. この点に関しては, 今後あらかじめ運用時のドップラーシフトによる中心周波数を計算しておき, 運用時には信号の受信のみを行うことで信号の取りこぼしの可能性の確認を行う余地がある.

今後は, hs_soundmodem を用いた回帰日数以上のデータによる QPSK の通信評価と並行して, 上記等の自作復調器の改善を行い, hs_soundmodem との比較を行うことで, QPSK のさらなる実効スループットの向上に取り組む.

謝辞

本研究の QPSK 復調器の開発において, 構造計画研究所の藤井様, JAMSAT の今村様(JIISZP), 及び hs_soundmodem をご提供いただきました Andy 様(UZ7HO)に多大なご支援を頂きましたこと, この場を借りて感謝申し上げます.

参考文献

- [1] 鈴木智大, 山口清, 鈴木脩斗, 山田晃一郎, NEXUS開発チーム, アマチュア通信技術衛星「NEXUS」仕様書第7版, NEX-003-4(2020), pp.2-38
- [2] 藤井瞳, 超小型人工衛星「NEXUS」の通信評価, 平成31年度日本大学理工学部航空宇宙工学科卒業論文(2020)
- [3] MathWorks日本, バイナリベクトルデータからのリード・ソロモン符号の作成-Simulink, https://jp.mathworks.com/help/comm/ref/binaryinputrsnccoder.html#responsive_offcanvas, (参照2021年2月3日).
- [4] Octave Forge, 関数リファレンス: rsdec, <https://octave.sourceforge.io/communications/function/rsdec.html>, (閲覧2021年2月3日).