

# 超小型人工衛星「NEXUS」の通信評価

## Evaluation of Communication System of CubeSat “NEXUS”

宮崎・山崎研究室  
Miyazaki-Yamazaki Laboratory  
藤井瞳  
Hitomi Fujii

Recently, the amount of communication data of pico-satellites such as CubeSat has been increasing as their mission has become more sophisticated. However, there is a problem that the effective throughput of CubeSat is low because there are few reasonable (affordable) high-speed transceivers for amateur radio band. The objective of this research is to develop a reasonable high-speed transceiver which can be mounted on CubeSats, to suggest how to evaluate CubeSat communication, to show the parameters that affect communication, and to evaluate the influence so that evaluation data helps to realize high-speed communication in near future. In this paper, actual CubeSat communication system is evaluated with CubeSat “NEXUS” and development status of the decoder for the  $\pi/4$  DQPSK transmitter mounted on “NEXUS” is described. If the decoder is developed, the affordable high-speed communication of CubeSat will be realized in amateur radio band.

### 1. 序論

#### 1.1. 研究背景

##### 1.1.1. 近年の超小型人工衛星開発

近年、人工衛星、特に CubeSat 等の超小型人工衛星の開発が活発化している。超小型人工衛星は大型衛星に比べ低コストかつ短期間での開発が可能のため、多くの民間企業や教育機関が新規参入している。それに伴い衛星ミッションも高度かつ多様化しており、画像データや衛星に搭載されたセンサデータ等、大量のデータをミッション達成のために取得することが求められるようになった。

##### 1.1.2. 超小型人工衛星の通信に対する課題と要求

前節で述べたようにミッション達成に必要なデータ量は増加したが、超小型人工衛星の通信には実効スループットが低いという課題がある。ここで実効スループットとは、衛星-地上間通信で実際に取得できた単位時間あたりのデータ量である。実際に著者らの研究室の超小型人工衛星 SPROUT (Fig. 1) では、225kbyte の 1 枚の画像を取得するために約 1 か月間ダウンロードを行ったが、画像の復元に必要なすべてのデータを揃えることができなかった<sup>[1]</sup>。



Fig. 1 SPROUT(left) and QVGA image from SPROUT(right)

CubeSat の実効スループットが低くなる要因はいくつかある。一つ目に CubeSat は機器のサイズや電力に限りがあることから自ずと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ということが挙げられる。二つ目の要因としては、必要機器の入手の容易さ等から多くの CubeSat がアマチュア無線帯を利用しているが、高速な通信機が比較的少なく、高速なものは CubeSat に搭載するには高価だからである。そして短期間で開発を行う CubeSat では利得を高めるための地上局の設計が十分になされていない。したがって CubeSat において高い実効スループットを実現するための要求は以下の 2 点である。

- CubeSat に搭載可能なサイズと消費電力で、高速かつ安価な通信機の開発。
- 利得の高い地上局の設計。

さらに現在 CubeSat やアマチュア無線帯において、どのような状況下でどの程度データを送受信できるか等の実際の通信を評価した論文は少なく、十分なデータが公開されていない。したがって、CubeSat の通信評価方法を示し実際に通信を評価することで実効スループットの改善に役立つデータを提供することができる。

### 1.2. 超小型人工衛星「NEXUS」<sup>[2]</sup>

本稿ではアマチュア通信技術実証衛星「NEXUS」(Fig. 2)を用いて CubeSat の通信評価方法を示し、評価結果について記す。NEXUS は前述のような背景から、高速な通信機と高汎用性カメラシステムの実証を目的として著者らの研究室と JAMSAT(日本アマチュア衛星通信協会)により共同開発した。本衛星は 1U サイズ(10 cm 立方)の CubeSat であり、2019 年 1 月 18 日にイプシロンロケット 4 号機にて打ち上げられた。

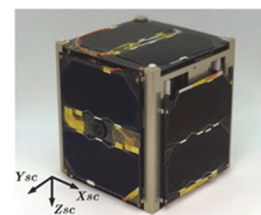


Fig. 2 NEXUS

本稿では従来の CubeSat 搭載用無線機であるバス無線機と、新規開発した  $\pi/4$  shift QPSK (DQPSK) 送信機及び FSK 送信機の 3 種類を通信評価に用いる (Table 1)。

Table 1 Transceivers equipped on “NEXUS” for evaluation

|                   | 変調方式          | 通信速度[bps]         | 消費電力[W] |
|-------------------|---------------|-------------------|---------|
| バス無線機             | GMSK          | 9.6k              | 0.8     |
|                   | AFSK          | 1.2k              | 0.8     |
| $\pi/4$ DQPSK 送信機 | $\pi/4$ DQPSK | 38.4k             | 0.3     |
| FSK 送信機           | GMSK          | 1.2 ~ 9.6 ~ 19.2k | 0.4     |

$\pi/4$  DQPSK 送信機は、誤り訂正符号の一種である CCSDS

準拠リード・ソロモン符号がプロトコルに含まれるため、信号の誤りに強い。FSK 送信機は通信速度可変のため、通信環境の良し悪しに合わせて通信速度を設定することで実効スループットの上昇が見込める。3 種類の無線機のうち  $\pi/4$  DQPSK 送信機は最も通信速度が速いが、信号がノイズに埋もれやすいため高い S/N が必要となり、専用の復調機が必要である。本稿では、新規開発した復調機についても述べる。

また実効スループットを上げるための設計として、NEXUS の地上局には新たに偏波ダイバーシティ方式を導入した<sup>4)</sup>。従来、受信偏波面には水平・垂直偏波を合成した円偏波が多く用いられてきたが、この方式では水平・垂直偏波を独立した系統で復調し、データを補完し合うことで全体の利得向上をはかる。

### 1.3. 研究目的

本研究では、NEXUS を経て今後超小型人工衛星で高速通信を実現することを目指す。そのためには 1.1.2 節で述べた要求を達成する必要があり、 $\pi/4$  DQPSK 復調機を開発することで高速通信は可能である。したがって本研究の目的は以下の 3 点である。まず通信評価に関して、

- ・超小型人工衛星の通信評価方法の提案。
- ・衛星-地上間の通信に影響を及ぼすパラメータを示し、その影響を評価すること。

NEXUS の  $\pi/4$  DQPSK 復調機に関して、

- ・安価で高速通信可能な S/N の高い復調機の開発。

## 2. 通信評価指標及び評価方法

### 2.1. 評価指標

本稿では CubeSat の通信評価指標として、実効スループットと誤り率を提案する。これらの指標は無線回路や通信機の性能評価に使用されており<sup>5)</sup>、実際に大型衛星の通信評価でも用いられている<sup>6)</sup>。最も一般的な誤り率は符号誤り率(Bit Error Rate, BER)だが、パケット通信においてはパケット誤り率(Packet Error Rate, PER)もよく用いられる。NEXUS のパケット通信では誤り検出符号の一種の CRC を用いており、地上局の仕様上パケット毎でしか誤りの判断ができないため、本稿の通信評価では PER を用いる。

まずここでの実効スループット[bps]の定義は、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]で割った値である。ここで通信時間は衛星のデータ送信開始から衛星が地上局の可視範囲外に出るまでとする。

次に PER[%]の定義は前述の通信時間内で誤りを含んでいたパケット数を送信パケット数で割った値の百分率である。

### 2.2. 評価方法

2.1 節で述べた評価指標を 3 節で述べる評価パラメータごとに比較することで通信評価を行う。ただし運用内容を変更することで条件を変えてその影響を評価する場合、評価指標がそのときの軌道や運用の時間帯に左右されてはいけない。したがって、NEXUS の場合 9 日を 1 周期とした太陽同期準円軌道であるため、軌道 1 周期分のデータ量と通信時間から実効スループットを求める。

## 3. 評価パラメータ

CubeSat の通信を評価する際の評価パラメータを以下に示す。また本稿で NEXUS を例として実際に通信評価を行った際のパラメータの条件も示す。

### 3.1. 変調方式・通信速度

変調方式や通信速度の違いは通信に大きく影響する。NEXUS にはバス無線機(AFSK・GMSK)と新規開発した FSK 送信機、 $\pi/4$  DQPSK 送信機が搭載されている。また FSK 送信機は通信速度が可変である。よって前述の評価指標を各変調方式や通信速度で比較することでその影響を評価できる。本稿の通信評価では、1 パケットの Info 部データ量が各無線機で等しくなるような運用を 1 周期ごとに条件を変えて行った。

### 3.2. プリアンブル回数

受信側はパケットの先頭に付加されたプリアンブルを認識することでデータの波と同期を図り復調を開始する。プリアンブル回数が多いほど同期は取りやすいが、1 パケットのうち Info 部以外のデータ量が多くなるため、実効スループットに影響する。NEXUS ではプリアンブル回数を 0~255 回の中から任意に設定可能だが、本稿では 5, 10, 20, 40, 80 (デフォルト) 回を選び 1 周期ごとに条件を変えて運用を行った。

### 3.3. Info 部データ量

Info 部データ量が多いほど計算上実効スループットは上がるが、パケット自体が長くなるため誤りも起こりやすい。NEXUS では Info 部データ量を 83, 161, 239 byte の中から設定可能なため、本稿では 1 周期ごとに 3 段階で条件を変更して運用を行う。

### 3.4. 運用時の条件

NEXUS では毎日昼・夜 2 回ずつ運用があり、毎回軌道や時間帯、衛星の状態などが異なる。したがってこれらの条件がどの程度通信に影響を与えるか評価する必要がある。本稿では最大仰角、方位角、昼/夜運用、角速度を条件としてあげ、各運用での実効スループットや PER を算出することで評価を行う。

### 3.5. 受信偏波面

1.2 節で述べたように NEXUS では新たに偏波ダイバーシティ方式を導入したが、著者らの研究室の地上局には以前から円偏波受信用設備がある。よってこの地上局では水平偏波・垂直偏波及び円偏波の 3 系統での復調が可能である。本稿では偏波ダイバーシティ方式の有用性を確認するため、従来の円偏波受信との比較を行う。

### 3.6. アンテナの方向調整

衛星運用の際には、軌道計算ソフトで計算した衛星の仰角及び方位角をアンテナローテータに随時伝達することで衛星を追尾する。よってローテータに伝達する制御値と実際にアンテナが向く方向は正確に一致している必要がある。しかしその精度は日々の運用により徐々に悪くなるため、定期的にアンテナの方向調整を行わなければならない。本稿では方向調整の必要性を再確認しその効果を評価するため、方向調整前後で同じ運用を行っていた際の評価指標を比較する。

#### 4. パラメータが通信に与える影響の定量的評価

##### 4.1. 変調方式・通信速度

まずバス無線機(AFSK, GMSK)と FSK 送信機(通信速度 9.6kbps)の実効スループット及びPER を Fig. 3 に示す。

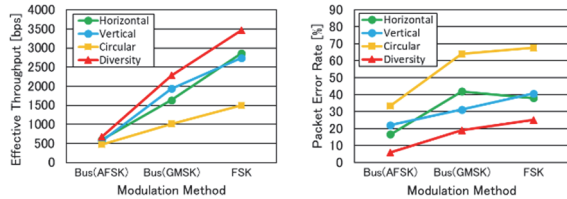


Fig. 3 Effective throughput(left) and PER(right)

この結果から、どの受信偏波面においても FSK 送信機は GMSK の約 1.5 倍の実効スループットを有しており、PER に関しても、若干高いが概ね GMSK と同程度に抑えられていることが分かる。FSK 送信機の通信速度は GMSK と等しいにも関わらず実効スループットに差が出た理由は、バス無線機より高速なマイコンを搭載したことでデータの packets 化の演算処理速度が上がった<sup>[4]</sup>からであると考えられる。

次に、通信速度については現時点では評価できていない。FSK 送信機を用いて 19.2kbps で通信を行うことは可能だが、それが NEXUS の角速度増加の一因となる傾向が確認できたため現在は運用を行っていない。角速度増加による影響については後述するが、その評価が完了次第、もしくは増加防止策が見つかり次第、通信速度に関する評価を行う。

##### 4.2. プリアンブル回数

プリアンブル回数を 80~5 回の間で変化させたときの実効スループットと PER を Fig. 4 に示す。

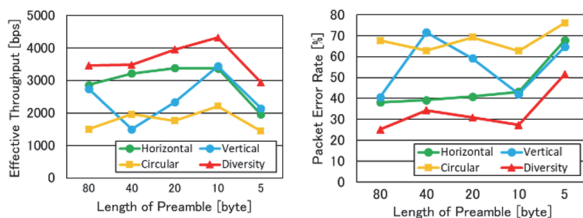


Fig. 4 Effective throughput(left) and PER(right)

この結果からプリアンブル回数は少ないほど実効スループットは高いが、本衛星の場合 10 回が最良で、それ以上少ないと同期を取り辛くなり復調に影響が出ることが分かった。PER は、プリアンブル回数が 80 回~10 回のときは大きな差はないが、5 回のときは明らかに高くなる。ここで垂直偏波のみプリアンブル 40 回と 20 回の値が大きく異なる。これは、これらの運用期間は衛星の角速度が低く地上局に対して衛星が一定の姿勢を維持したため、偏波面に偏りが生じたのだと考える。

##### 4.3. Info部データ量

Info 部データ量を 83, 161, 239byte と変化させた場合の実効スループットと PER を Fig. 5 に示す。

この結果から高速かつ誤りなくデータを取得するには、Info 部データ量は本衛星の場合 161byte が最適であるということが分かる。ここでデータ量 239byte のときの値が水平偏波のみ他と大きく異なるが、これも 4.2 節で述べた理由と同様に衛星の

姿勢によるものだと考える。

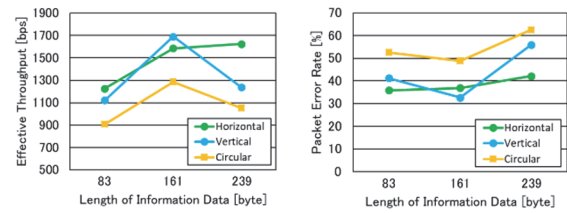


Fig. 5 Effective throughput(left) and PER(right)

##### 4.4. 運用時の条件

3.4 節であげた条件の中から、本要旨では変化が大きかった最大仰角と昼/夜運用の実効スループットについての結果のみ抜粋して示す。

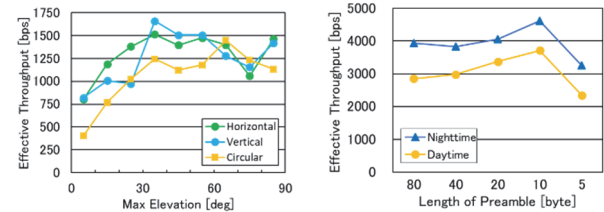


Fig. 6 Effective throughput for max elevation(left) and length of preamble(right)

Fig. 6 (left)は Info 部データ量が 83byte の運用を行い、各運用の実効スループットを最大仰角 10deg ごとに平均したときの結果である。実効スループットは仰角 0~30deg 程度までは増加し、その後大きい値を維持しつつも高仰角で少し減少する傾向がみられる。理由として、最大仰角が高いほど地上局から見た衛星の進行方向の相対速度が大きいため、アンテナロータータによる追尾が追いつかないことやドップラーシフトの影響を大きく受けることなどが考えられる。他の運用においても概ね同様の傾向が確認できた。

次に Fig. 6 (right)では FSK 送信機を用いたときのプリアンブル回数による実効スループットの変化を、昼運用・夜運用に分けて示した。全てのプリアンブル回数において昼運用のほうが約 1kbps 低いことが分かる。これは周波数利用申請をせずに無線通信を行う、違法無線が昼に多いためであると考えられる。

現在 NEXUS の角速度は 120deg/s に達したが、さらなる増加を防ぐためパケットダウンリンクは中止しており、その影響を正しく評価できるデータがない。衛星のアンテナ放射パターンから衛星の姿勢によっては通信に影響を及ぼすことが予想できるため、ダウンリンクを再開し次第評価する。

##### 4.5. 受信偏波面

Fig. 3, Fig. 4 から、偏波ダイバーシティ方式のほうが従来までの円偏波より実効スループットは高く、PER は低いことが分かる。角速度の影響などで水平、垂直のどちらかのスループットが低い場合でも、互いにパケットを補完し合うことで安定的に高いスループットを維持できている。したがって偏波ダイバーシティの有用性が確認できた。

##### 4.6. アンテナ方向調整

2019 年 5 月 26 日にアンテナ方向調整を行った。その前後のバス無線機(GMSK)の実効スループットと PER を Fig. 7 に示

す。この結果から、調整後実効スループットや誤り率は改善することが分かり、方向調整は有効な手段であることが確認できた。

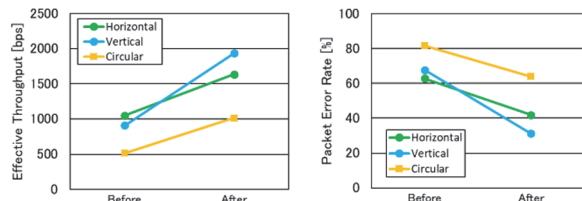


Fig. 7 Effective throughput(left) and PER(right)

## 5. $\pi/4$ DQPSK復調機の開発

### 5.1. $\pi/4$ DQPSK変調

$\pi/4$  DQPSK 変調は BPSK(Binary Phase-shift Keying)から派生しており、これは波の位相を変化させることで“0”と“1”を表し 1bit ずつ情報を伝達する方式である。BPSK 変調した二つの波(I 波と Q 波)を、90 度位相を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るため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のが Fig. 8 のコンスタレーションであり、1つの点が 2bit(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 $\pi/4$  DQPSK(Differential QPSK)である。

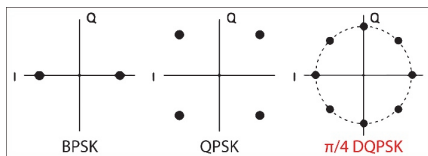


Fig. 8 Constellation of PSK, QPSK and  $\pi/4$  DQPSK<sup>[1]</sup>

### 5.2. $\pi/4$ DQPSK送信機の packets 構成

$\pi/4$  DQPSK 送信機では、送信する情報はまずアマチュア無線帯でよく用いられている AX.25 プロトコルに包まれる。さらに CCSDS<sup>[2]</sup> 準拠フレームとして、先頭に packets の始まりを認識するための同期コード、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。ここで CCSDS 準拠のリード・ソロモン符号は通常と異なり、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。

### 5.3. $\pi/4$ DQPSK復調機の開発

$\pi/4$  DQPSK 復調機の難点である S/N の低さを改善するため、Simulink を用いた復調ソフトウェア上でノイズを取り除く信号処理ブロックを改変することで、よりノイズの少ない信号を得ることができた(Fig. 9)。

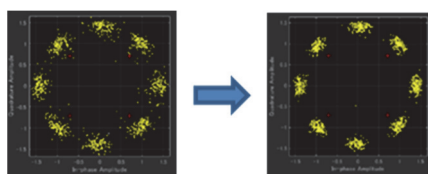


Fig. 9 Constellation change

このように S/N の改善には成功したが、大量の packets を復調するのに十分な S/N には達していなかった。Simulink の

処理速度にも一因があると考えたため、別のデジタル信号処理ソフトウェアである GNU Radio と、LimeSDR(Fig. 10, left)を用いて開発を行うことにした。

現在までに、GNU Radio 上で LimeSDR の設定値を調整することで Fig. 10(right)のようなコンスタレーションは得られている。また CCSDS プロトコルの解析のうち同期コードの検出、スクランブルの解除までは機能の確認が完了している。したがって今後は、リード・ソロモン符号の復号、AX.25 プロトコルの解析、地上での通信試験による S/N の確認を経て、実際に軌道上の NEXUS と高速通信が可能であることを確認する。



Fig. 10 LimeSDR<sup>[6]</sup>(left) and Constellation at present(right)

## 6. 結論及び今後の展望

本研究では以下の結論を得た。

- 超小型人工衛星の通信評価指標として実効スループットとパケット誤り率 PER を示し、評価方法を提案した。
- NEXUS を用いて通信に影響を及ぼすパラメータを示し、本稿で提案した方法でその影響を評価した。
- NEXUS の $\pi/4$  DQPSK 復調機の S/N を改善し、復調に必要な機能を確認した。

今後は高速通信可能な $\pi/4$  DQPSK 復調機を開発し、CubeSat の実効スループットの改善に貢献する。

### 謝辞

本研究の $\pi/4$  DQPSK 復調機の開発では、構造計画研究所及び JAMSAT 今村様(JIISZP)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

- 菊池秀乙, 超小型人工衛星自動運用システムの研究開発 (2017)
- 藤井瞳, NEXUS 開発チーム, 宮崎康行, アマチュア通信技術実証衛星「NEXUS」のミッション進捗状況, 第 63 回宇宙科学技術連合講演会 (2019)
- 石川義裕, 無線回線の設計・基準, 電子情報通信学会「知識ベース」4 群-1 編-9 章 (2010)  
[http://iceice-hbkb.org/files/04/04qun\\_01hen\\_09.pdf](http://iceice-hbkb.org/files/04/04qun_01hen_09.pdf)
- 村田健史, 山本和憲, バワランクンブラパン, 鈴木健治, 浅井敏男, 菅智茂, 村永和哉, 水原隆道, 影林佑哉, 柿澤康範, 矢羽田将友, HpFP プロトコルによる WINDS 衛星の回線品質検査, 情報通信研究機構研究報告 Vol. 63 No. 2 (2017), pp.153-161
- TM Synchronization and Channel Coding, Recommended Standard CCSDS 131.0-B-3 (2017)
- LimeSDR - Lime Microsystems (2020)  
<https://limemicro.com/products/boards/limesdr/>