

CubeSat「NEXUS」によるアマチュア衛星通信評価

Evaluation of Amateur Satellite Communication Using CubeSat "NEXUS"

中村壮児
Takeru Nakamura

山田晃一郎
Koichiro Yamada

佐藤陸
Riku Sato

中村涼太
Ryota Nakamura

藤井瞳
Hitomi Fujii

宮崎康行
Miyazaki Yasuyuki

日本大学
Nihon University

1. アマチュア衛星通信と CubeSat

CubeSat は、大電力の確保が困難なことから高速な通信機を搭載することが難しく、その投入軌道の大半が低軌道で通信時間も十分には確保できないため、効率的な通信が求められる。その回線の多くは以下の理由から、アマチュア無線帯を用いている。

- アマチュア無線帯の通信機器は、S 帯、X 帯などに比べて設置が容易で安価であること。
- アマチュア無線家の方々が、衛星通信のノウハウや運用ソフトを本やネットで公開しており、勉強がしやすいこと。
- アマチュア無線家の方々に受信を協力していただけること。

また多くの CubeSat はアマチュア衛星の技術を踏襲し、通信方式に CW と FM (AFSK1200bps / GMSK9600bps, AX.25 プロトコル)を多く採用しているのが現状である。

このような状況の中で、CubeSat を開発するにあたり著者らが直面した問題が、AX.25 プロトコルにおけるプリアンブル量と Info 部データ量の設定である。AX.25 プロトコルの内訳を図 1 に示す。

Preamble	Flag	Call sign +Control	Info	CRC	Flag
----------	------	-----------------------	------	-----	------

図 1 AX.25 プロトコル

ブルアンブル量が少ない程、実効スループットが大きくなるが、信号同期が取れずにパケットを落とす可能性がある。また Info 部データ量が大きいほど実効スループットは大きくなるが、1 パケットのデータ量が大きくなる分、通信中にエラーが起きる確率が高くなり、パケットを落とす可能性がある。CubeSat で効率的な通信を行う為には、この 2 つのパラメータをどう設定するかが重要となる。

そこで日本大学と JAMSAT(日本アマチュア衛星通信協会)が共同で開発し、2019 年 1 月に打ち上げられた CubeSat「NEXUS」ではプリアンブル量と Info 部データ量の 2 つのパラメータを可変とし、軌道上でパラメータを変化させて実効スループットを測定する実験を行うことにした。これにより、著者自身が CubeSat を開発するにあたって直面した上記の問題を解決するだけでなく、CubeSat 運用者、開発者にとって有益な情報を提供できると考えている。

2. アマチュア通信技術実証衛星「NEXUS」

NEXUS は 3 つのミッション無線機($\pi/4$ shift QPSK 送信機, FSK 送信機, リニアトランスポンダ)と、CubeSat 用カメラシステムの宇宙動作実証を目的とした、1U サイズの

CubeSat である^[1]。NEXUS の主要諸元を表 1 に示し、特に通信系の仕様を図 2 に示す。また、バス送信機と FSK 送信機の主要諸元を表 2 に示す。

表 1 NEXUS の主要諸元

項目	内容
投入軌道	太陽同期準回帰軌道、高度約 500km
寸法, 質量	105.0×105.0×113.5 [mm], 1.24 [kg]
電源系	・バス系電圧: 5.0 ± 0.1 [V] ・ミッション系電圧: $3.5V \pm 0.1$ [V] ・二次電池(1 直列 4 並列): Li-ion バッテリ, 3.7V, 1880mAh ・太陽電池(2 直列 6 並列): GaAs, $V_{mp} = 2.4V$, $I_{mp} = 502.9mA$
通信系	図 2 に示す通り
構造系	主要構造部材: A7075-T7351
熱制御系	バッテリーのみ $0^{\circ}C$ 以上に制御
姿勢制御系	N/A

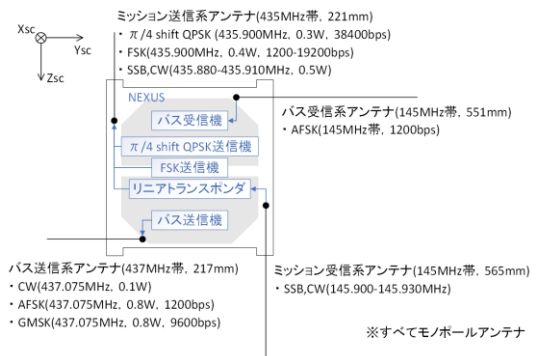


図 2 NEXUS 通信系仕様

表 2 NEXUS 搭載送信機主要諸元

項目	バス送信機	FSK 送信機
動作電圧	5.0 V	3.5 ± 0.1 V
消費電流	600 mA	600 mA
送信電力	0.8 W	0.4 W
送信周波数	437.075 MHz	435.900 MHz
占有周波数幅	13.390 kHz	21.020 kHz

3. 地上局

本論文では、地上局に新しく導入した偏波ダイバーシティ方式の有効性についても言及する。日大では、NEXUS を運用するにあたって、JARL(日本アマチュア通信連盟)を免許人とする地上局を新設し、水平・垂直偏波を独立したプリアンプ、無線機、TNC で復調し、データを補完し合う偏波ダイバーシティ方式を導入した。現在、図 3 に示す円偏波受信旧アンテナシステム、及び偏波ダイ

パーシティ受信新アンテナシステムによる 2 系統 3 偏波での受信を行っている。本論文ではこれらを比較し、円偏波受信よりも偏波ダイバーシティ方式による受信が有効であることを示す。

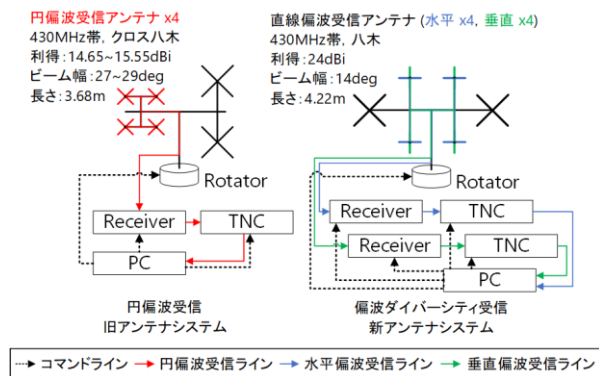


図3 地上局受信システム

4. 通信評価結果

NEXUS は太陽同期準回帰軌道を周回しており、回帰日数が約 9 日であるため、9 日で実効スループットの統計をとる。ここでいう実効スループットとは、取得したデータ量を通信時間で割った値(単位は bps)のことである。

まず、GMSK9600bps でプリアンブル量を変化させたときの実効スループット測定結果を示す。NEXUS は GMSK による通信の場合、プリアンブルとして 0xEE をパケットの頭に付加する。プリアンブル量はコマンドにて可変であり、0xEE を送る回数を指定できる。NEXUS 搭載の FSK 送信機において、プリアンブル回数(PA)を 80 回、40 回、20 回としたときの 9 日間の平均実効スループットを表 3 に示す。表中の()内の値は最大実効スループットである。

表 3 プリアンブル回数に対する平均実効スループット

PA	水平[bps]	垂直[bps]	円[bps]
80 回	2359 (4106)	1421 (3713)	883 (2582)
40 回	2850 (4418)	1501 (3268)	1318 (3091)
20 回	3132 (4335)	2039 (5319)	1608 (3486)

また、各プリアンブル回数における、最大仰角に対する平均実効スループットを図 4 に示す。プロット点は水平・垂直・円偏波の実効スループットの平均値である。

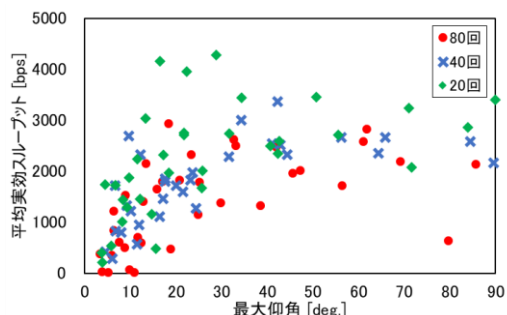


図 4 各プリアンブル回数における最大仰角に対する平均実効スループット

ここで最大仰角が小さい場合と大きい場合での実効スループットを比較する。最大仰角が 0~10 度の場合と 10~90 度の場合における平均実効スループットを図 5 に示す。

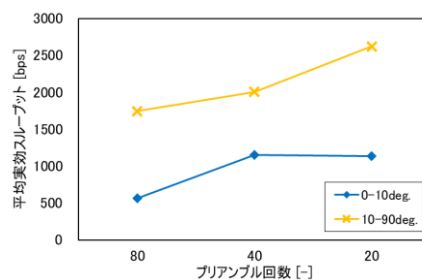


図 5 最大仰角が 0~10 度の場合と 10~90 度の場合におけるプリアンブル回数に対する平均実効スループット

表 3 からプリアンブル回数が少ない程、平均実効スループットは増加することがわかる。また、図 4、図 5 から、最大仰角が大きいときはプリアンブル回数が少ない程実効スループットはおおよそ増加する。最大仰角が小さいときはプリアンブル回数が 80 から 40 にかけて実効スループットは増加するものの、40 から 20 にかけては減少する。

次に、Info 部のデータ長を変化させたときの実効スループット測定結果を示す。NEXUS 搭載のバス送信機において、Info 部データ長を 83 バイト及び 239 バイトとしたときの 9 日間の平均実効スループットを表 4 に示す。また、最大仰角が 0~10 度、10~20 度、20~90 度の場合における平均実効スループットを表 5 に示す。

表 4 Info 部データ長に対する平均実効スループット

	水平[bps]	垂直[bps]	円[bps]
83bytes	1226 (1763)	1122 (1828)	907 (1461)
239bytes	1625 (2663)	1237 (2710)	1053 (1802)

表 5 各 Info 部データ長における最大仰角に対する実効スループット

	0~10[deg.]	10~20[deg.]	20~90[deg.]
83bytes	676	1122	907
239bytes	568	1237	1053
増加率 [%]	-15.91	16.78	27.65

表 4 から、平均実効スループットは、Info 部データ長が 83 バイトの時よりも 239 バイトの時の方が大きくなることがわかる。しかし、表 5 から、最大仰角が小さいときは 83 バイトの時よりも 239 バイトの時の方が実効スループットは小さくなることがわかる。

これらに加え表 3、表 4 から、円偏波受信方式に比べて直線偏波ダイバーシティ方式が有効であることもわかる。

以上より、CubeSat 通信において効率的な通信を行うには、最大仰角によってプリアンブル量や Info 部データ長を変えることが効果的であることを確認した。今後は適切なパラメータを機械学習等で自動設定するために、より多くのデータを取得していく。また、偏波ダイバーシティ方式は円偏波受信のように左旋円偏波・右旋円偏波を変化させる必要がなく、自動運用に適した受信方式であり、今後は自動運用に向けて地上局ソフトの開発を進めていく。

参考文献

- [1] 山口清, 鈴木智大, 宮崎康行: 次世代アマチュア衛星通信技術実証「NEXUS」, スペース・エンジニアリング・コンファレンス講演論集, 2016.5 巻, pp.1-5,2016