

# 超小型衛星「ほどよし4号」用 X帯348Mbps通信システムの軌道上実証

深見 友也<sup>1</sup> 渡邊 宏弥<sup>1</sup> 富木 淳史<sup>2</sup> 水野 貴秀<sup>2</sup> 齋藤 宏文<sup>2</sup> 岩切 直彦<sup>3</sup>  
新家 隆広<sup>4</sup> 小島 要<sup>4</sup> 川元 光一<sup>5</sup> 重田 修<sup>6</sup> 布村 仁志<sup>6</sup> 神田 泰明<sup>7</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

<sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構 <sup>3</sup> 情報通信研究機構 <sup>4</sup> 株式会社アドニクス

<sup>5</sup> 川元工業所 <sup>6</sup> アイ電子株式会社 <sup>7</sup> アンテナ技研株式会社

E-mail: fukami.tomoya [at] ac.jaxa.jp

**あらまし** 観測センサの能力向上に伴い、質量 50 kg クラスの超小型衛星においても 100 Mbps 以上の高速ダウンリンク通信が求められている。小型衛星の限られた電力、質量等のリソースで高速通信を実現するため、これまでに小型・軽量で低消費電力の X バンド送信機、衛星搭載アンテナ、及び地上の受信設備を開発してきた。パワーアンプには新たに開発した出力 2 W の高効率 GaN-HEMT デバイスを採用している。開発したシステムは質量 64 kg の超小型衛星「ほどよし4号」に搭載して打ち上げられ、3.8 m の地上アンテナとの間で 348 Mbps の高速ダウンリンク通信に成功した。本稿では開発した通信システムの概要、通信実験、更なる高速化に向けた取り組みについて報告する。

**キーワード** 小型衛星、衛星通信、X バンド、GaN、16QAM、64APSK

## On-Orbit Demonstration of the X-band 348 Mbps Communication System for the Nano Satellite: Hodoyoshi-4

Tomoya FUKAMI<sup>1</sup> Hiromi WATANABE<sup>1</sup> Atsushi TOMIKI<sup>2</sup> Takahide MIZUNO<sup>2</sup>  
Hirobumi SAITO<sup>2</sup> Naohiko IWAKIRI<sup>3</sup> Takahiro SHINKE<sup>4</sup> Kaname KOJIMA<sup>4</sup>  
Koichi KAWAMOTO<sup>5</sup> Osamu SHIGETA<sup>6</sup> Hitoshi NUNOMURA<sup>6</sup> and Yasuaki KANDA<sup>7</sup>

<sup>1</sup>The University of Tokyo 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

<sup>2</sup>Japan Aerospace Exploration Agency <sup>3</sup>National Institute of Information and Communications Technology

<sup>4</sup>Addnics Corporation <sup>5</sup>Kawamoto Corporation <sup>6</sup>AI Electronics Ltd. <sup>7</sup>Antenna Giken Co.,Ltd.

E-mail: fukami.tomoya@ac.jaxa.jp

**Abstract** A high-speed downlink communication system is required to meet various applications for nano/small satellites. Therefore, it is essential to implement a transmitter with small weight and power in such satellites. We have developed high speed communication system over 300 Mbps for small satellite. In order to reduce DC power consumption of transmitter, we have developed GaN-HEMT power amplifier for X band downlink. The Hodoyoshi-4 satellite equipped with the developed communication system was launched in 2014 and we demonstrated 348 Mbps downlink from 50-kg class satellite. This paper describes the summary of the developed system, the experiment of high speed downlink, and future works.

**Keywords** small satellite, satellite communication, X band, GaN, 16QAM, 64APSK

### 1. はじめに

地球観測や災害監視など幅広い応用を目的とし、質量 50 kg 程度の超小型衛星の開発が活発になっている。これまでの大型衛星と比較し、小型衛星は 1 機あたりの製造コストが数億円程度と格段に安く、また相乗り

打ち上げによって打ち上げコストも削減できる。そのため同じ衛星を大量に打ち上げてコンステレーションを構築し、高い時間分解能で地球を観測する試みが始まっている [1]。観測センサの能力向上に伴い、超小型衛星でも地上分解能数 m の本格的な地球観測が可能

になっている。観測能力を最大限に活かすためには高速なダウンリンク通信が必要である。しかし小型衛星は電力、質量、体積等の制限が厳しく、これまでに打ち上げられた超小型衛星のダウンリンク速度は最大でも数十 Mbps 程度であった。

50 kg 程度の超小型衛星で数百 Mbps の高速ダウンリンク通信を実現するため、これまでに小型・低消費電力の衛星搭載送信機、衛星搭載アンテナ、地上局システムを開発してきた [2]。このシステムは東大が中心となって開発した超小型衛星「ほどよし 4 号」に搭載され、2014 年 6 月に打ち上げに成功した。本稿では開発した通信システムの特徴、「ほどよし 4 号」と 3.8 m 地上アンテナの間で行った 348 Mbps の通信実験、また更なる高速化に向けた取り組みについて報告する。

## 2. 通信システム

### 2.1. 従来の高速通信システムの問題点

地球観測衛星のダウンリンクには X バンドの 375 MHz (8025 MHz ~ 8400 MHz) が割り当てられている。限られた帯域内で高速な通信を実現するために、左右両方の偏波を使用する方法や周波数帯域をいくつかのチャンネルに分割し、それらを束ねて使用する方法が取られてきた。これらの手法はいずれも複数の送信機を搭載する必要があり、通信システムは大きな質量・消費電力となる。別のアプローチとして、振幅と位相の両方に情報を載せる多値変調によって高速化する手法がある [3]。この方法では 1 つの送信機で高速化が可能であるが、多値変調は要求 Eb/No が高く、またパワーアンプに高い線形性を要求する。そのため電力効率の低い線形領域でパワーアンプを動作させる必要があった。また 375 MHz を複数のチャンネルに分割せずに 1 つの搬送波で広帯域を使用する場合、ベースバンド信号を生成するためにデジタル信号処理の演算部を数

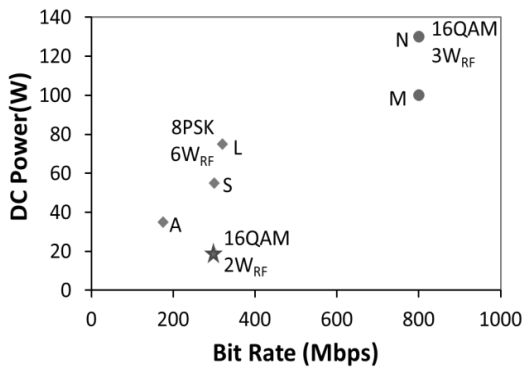


図 1 X バンド高速送信機のビットレートと消費電力の関係。◆は 8PSK 変調、●は 16QAM 変調を表す。ほどよし 4 号衛星 (64 kg) に搭載した本システムは★で示した。

百 MHz で高速動作させる必要があり、これも消費電力増加の要因となる。図 1 は従来の X バンド送信機に対して、ビットレートを横軸に、消費電力を縦軸にしてプロットしたものである。8PSK 変調は位相のみに情報を載せる変調方式で、16QAM 変調は位相と振幅の両方に情報を載せる変調方式である。そのため 16QAM 変調はパワーアンプにより高い線形性を要求し、結果として消費電力も大きくなっている。

50 kg 程度の超小型衛星の発電能力は 100 W 程度であり、ダウンリンクシステムに割り当てられる電力はその 2 割の 20 W 程度である。本システムは様々な工夫により、16QAM 変調を用いる 348 Mbps の通信機を約 20 W の消費電力で実現した。

### 2.2. 衛星搭載送信機

開発した衛星搭載送信機の主な仕様を表 1 に示す。通信方式には Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) で標準化されている Flexible Advanced Coding and Modulation Scheme for High Rate Telemetry Applications (131.2-B-1) [4]を採用した。低軌道を周回する地球観測衛星は 1 可視中に地上局との距離が大きく変化するため、距離に応じて通信速度を変化させるのが効率的である。本規格ではシンボルレートは一定とし、変調方式と誤り訂正の符号化率を変化させる。この組み合わせは Adaptive Coding and Modulation (ACM) 番号として全部で 27 種類定義されている。シンボルレートは一定のため回線の中断無く伝送レートを変化させることができ、Es/No で約 20 dB のダイナミックレンジを提供する。また、これまでの通信機は誤り訂正符号に畳み込み符号やリードソロモン符号、これらを組み合わせた接続符号などが採用さ

表 1 衛星搭載送信機の仕様

Frequency band	8160 ± 60 MHz
RF output power	2 W
Symbol rate	100 Msps
Modulation schemes	QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK, 64APSK, 16QAM, 64QAM
Baseband filter	Square root raised cosine $\alpha = 0.5$
Data rate (user)	72 to 540 Mbps
Error correction code	Serially Concatenated Convolutional Coding (SCCC)
Data input interface	LVDS
DC power	28 V, 20 W
Volume	12 × 10 × 7.3 cm <sup>3</sup>
Weight	1,330 g
Operating temperature	-20 to +50 °C
Radiation test	20 kRad



図 2 衛星搭載送信機のフライトモデルの外観

れてきた。本規格ではターボ符号の一種である **Serially Concatenated Convolutional Coding (SCCC)** が定義されている。シャノン限界に迫る高い符号化利得が得られるため RF 送信電力を下げる事ができ、システムの消費電力削減に繋がっている。

次に送信機のフライトモデルの外観を図 2 に示す。質量は 1,330 g である。送信機はベースバンド信号を生成するデジタル部（上部）と変調・増幅を行う RF 部（下部）から構成される。発熱量の多い RF 部を下にすることで衛星筐体に接させ、放熱効率を高めている。

### 2.2.1. デジタル部

送信機のブロックを図 3 に示す。デジタル部は制御や信号処理を担う FPGA と D/A コンバータ、及び DC/DC コンバータなどの周辺回路から構成される。外部のデータレコーダで **CCSDS 131.2-B-1** 規格に準拠した誤り訂正符号化、フレーム生成までを行い、デジタル部はデータレコーダからその信号を入力して I/Q のベースバンド信号を出力する。データレコーダとのインターフェースには LVDS を採用した。デジタル部からデータレコーダに 100 MHz のクロックを供給し、1 シンボル 2 ビットの **QPSK** 変調を使用する場合は 2 本のデータ線を、1 シンボル 4 ビットの **16QAM /**

**16APSK** 変調を使用する場合は 4 本のデータ線を使用する。このデータ線は 4 本しか用意していないため、データレコーダは最高で **16QAM / 16APSK** 変調までしか使用できない。**64QAM / 64APSK** 変調のような多値度の高い変調方式の通信実験を行うため、デジタル部単体で **CCSDS** フォーマットの信号を送信する機能も搭載した。地上で作成した **CCSDS** フォーマットのデータをコマンドによってデジタル部の不揮発性メモリに書き込み、送信機はこれを繰り返し送信する。この不揮発性メモリには放射線に強いとされる磁気抵抗メモリ (**MRAM**) を採用している。

送信するデータは I/Q 平面にマッピングされ、ロールオフ係数が 0.5 の **Square root raised cosine** フィルタで波形整形される。その後、パワーアンプの歪みを補正するプレディストーション回路を通過し、250 MHz の D/A コンバータによってアナログの I/Q 信号が出力される。100 Msps のシンボルレートに対して 2.5 倍という比較的低いオーバーサンプリングレートを採用することでデジタル信号処理部の負荷を低減し、アナログのローパスフィルタと組み合わせることで必要な特性を実現している。さらに **FPGA** の信号処理部は 2 並列処理を行うことで動作周波数を半分の 125 MHz に下げ、大幅な消費電力削減を実現した。**FPGA** には **Altera** 社の **Cyclone III** を採用した。**BGA** 実装を避けることで検査を容易にし、コストを削減している。**SRAM** 型の **FPGA** は起動時に外部のコンフィグ ROM から回路情報を読み込む必要がある。放射線によってコンフィグ ROM の内容が破損すると **FPGA** の動作に定常的な異常が発生するため、コンフィグ ROM は 3 つ搭載し、コンフィグ時の **CRC** エラーを検知して ROM を切り換える回路を搭載している。また **SRAM** 型 **FPGA** は動作中にシングルイベントアップセット (**SEU**) が発生する恐れがある。この対策は一般に大きな実装面積、消費電力が必要となる。小型衛星の場合、高速送信機に電源が入っている時間は短い。そこで、もし運用者

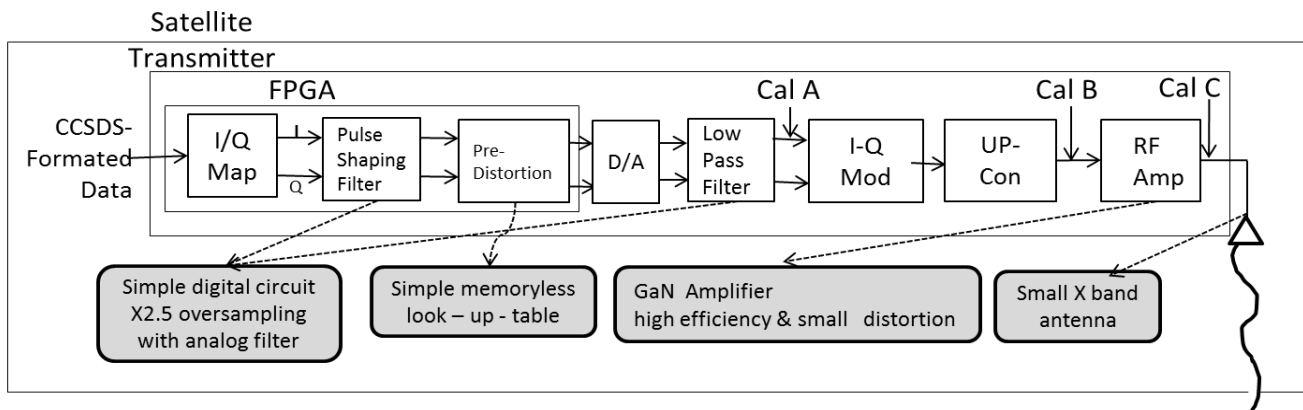


図 3 開発した衛星搭載送信機のシステムブロックと特徴

が異常に気付き、SEUの発生が疑われる場合は送信機の電源をリセットし、データレコーダから同じデータを再度送信するという対応を取ることにした。

この他にデジタル部ではRF出力電力の制御(ALC)も行う。送信機は宇宙環境の温度変化によって特性が変化する。これを補正するため、地上の恒温槽で温度を変化させて取得した特性をテーブルとして保持し、温度に応じてALCの動作を変えている。この補正テーブルはMRAMに保存されており、地上からのコマンドによって書き換えることができる。

### 2.2.2. RF部

RF部はデジタル部が出力したI/Qベースバンド信号をSバンドで直交変調し、Xバンドへのアップコンバート、増幅を行ってアンテナに出力する。大型衛星の送信機は変調部とパワーアンプが別のモジュールになっているのが一般的だが、1つのモジュールにすることで小型化を実現している。

パワーアンプには近年、高周波・電力用途で高効率を実現できるとして注目されている窒化ガリウム-高電子移動度トランジスタ(GaN-HEMT)の固体増幅器を採用した。AB級で動作させ、多値変調に要求される線形性と効率のバランスを取っている。開発したアンプモジュールの外観を図5に、振幅特性(AM-AM)、位相特性(AM-PM)を図4に示す。平均出力電力は回路の損失を考慮して34dBmに設定した。飽和出力電力からの出力バックオフは約1~2dBであり、電力付加効率は47%である。平均電力付近での位相回転量は2度以下であり、平均より振幅の大きい範囲でも位相は数度しか回転しない。これは従来のガリウムヒ素(GaAs)を使用したパワーアンプと比較して極めて小さい回転量であり、これによって高い電力効率で16QAMのような位相振幅変調を採用することが可能になっている。開発したアンプの歪みが小さかった為、デジタル部でのpredistortionは行っていない。またSEUによってデジタル部のALCが暴走したときに備え、アンプにはアナログの保護回路を搭載している。

### 2.3. 衛星搭載アンテナ

超小型衛星に搭載できる小型・軽量のXバンド中利得アンテナ(MGA)を新たに開発した。その外観を図6に示す。2x2の4素子からなるパッチアレイアンテナで、大きさは一辺が7cm、質量は69g、最大利得は13.5dBiである。従来の大型衛星では衛星側のアンテナを2軸のジンバルによって地上局に向けていた。本システムではコストと質量の面でジンバル機構は搭載せず、アンテナを衛星本体に直接取り付け、衛星の姿勢制御によってアンテナを地上局に指向させることに

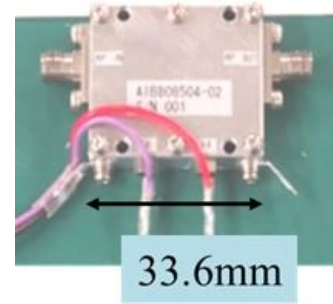


図5 GaN-HEMTパワーアンプの外観

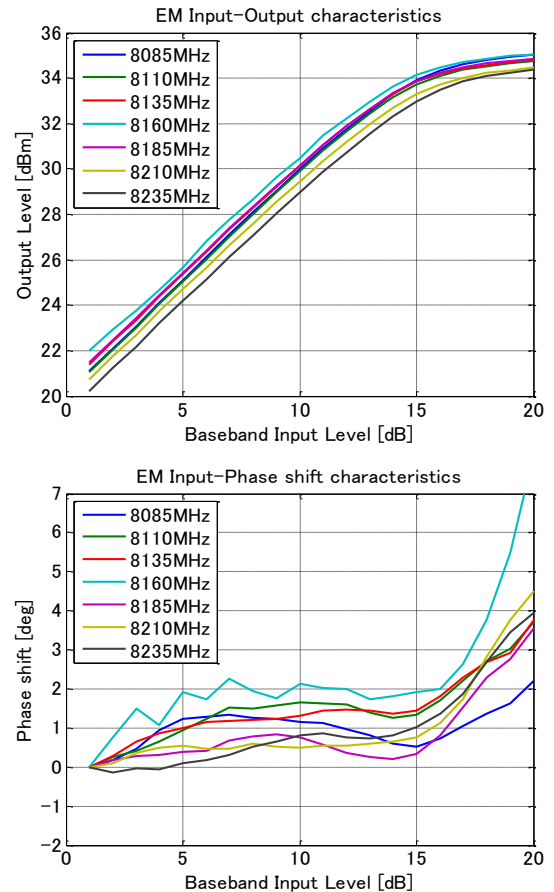


図4 GaN-HEMTパワーアンプの入出力特性。上: 振幅特性(AM-AM), 下: 位相特性(AM-PM)

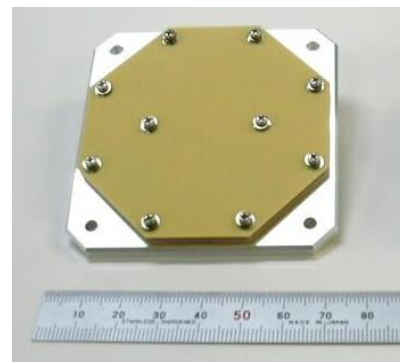


図6 Xバンド中利得アンテナの外観

した。このアンテナのビーム幅は約  $20^\circ$  であり、小型衛星の姿勢制御精度で十分に達成できるレベルである。MGA の他に、低速通信用のアイソフラックスアンテナも搭載している。

### 2.4. 地上局システム

小型衛星は少ないリソースで運用できるコンパクトな地上局が望ましい。そこでテレメトリ・コマンド運用で使用する S バンドと、観測データの伝送に使用する X バンドの共用アンテナを JAXA 宇宙科学研究所の屋上に設置した (図 7)。直径は 3.8 m で S バンドの利得は 36 dBi, X バンドの利得は 47.5 dBi である。TLE データから作成した衛星の軌道情報と GPS 時刻に基づいて方位角、仰角を制御するプログラム追尾方式である。

X バンド受信システムのブロックを図 8 に示す。アンテナで受信した信号はアンテナの背面にある低雑音増幅器で増幅し、ダウンコンバータで 700 MHz 帯の中間周波数に変換し、その信号を長距離伝送のために光信号に変換する。光ケーブルでアンテナ背面から衛星運用室まで導き、光信号を電気信号に戻した後、自動利得制御器で電力レベルを一定にする。

近年、100 Msps のシンボルレートと SCCC のターボ符号に対応した受信機がいくつか販売され始めている [5] [6]。これらの高速通信対応受信機は大型衛星での使用を前提としているため高価であり、低コストな小型衛星ミッションでの採用は難しい。地球観測衛星の観測データは必ずしもリアルタイムでの復調・復号を必要としないことから、ソフトウェアによる低コストな復調・復号システムを新たに開発した。AGC から出力された IF 信号は 400 MHz, 14 bit の A/D 変換チップによってデジタル化し、IF 波形をそのままデータレコーダに保存する。A/D 変換後のデータレートは 800 M バイト/秒に達するため、高速な NAND 型フラッシュメモリで構成される Solid State Drive (SSD) を 8 台並列化したデータレコーダを使用している。NAND 型フラッシュメモリには書き換え回数制限が存在し、製造プロセスの微細化が進むにつれてその回数は減少す



図 7 宇宙科学研究所の屋上に設置した S/X バンド共用アンテナ

る。本システムでは最新の 10 nm 台のフラッシュメモリではなく、数世代古い 32 nm のフラッシュメモリを使用している。これにより、毎日 40 分間の波形を記録しても 15 年以上の寿命を確保した。記録した波形は PC の MATLAB 上に構築した受信ソフトウェアで復調・復号を行う。シンボルタイミングの同期には Gardner 法を、搬送波位相の同期には Costas 法を採用し、フレーム同期、軟判定したデータを、SCCC ターボ復号器で復号する。ターボ復号の反復回数は可変である。

### 3. 超小型衛星「ほどよし 4 号」の通信実験

開発した衛星搭載送信機やアンテナは質量 64 kg の超小型衛星「ほどよし 4 号」に搭載し、2014 年 6 月 20 日 (日本時間) にロシアのヤスネ基地からドニエプルロケットによって打ち上げられた。

本来、衛星本体の姿勢制御によって MGA を地上局に連続的に指向させ、高速通信を行う予定であった。しかし姿勢系の立ち上げ運用が遅れていたため、地上局指向モードではなく、地球指向モードで実験を行った。地球指向モードでは地上局からの衛星仰角が約  $50^\circ$  以上の時に MGA の半値全幅内に地上局が入る。ACM 番号が 17 の 16QAM 変調、符号化率 0.87 (348

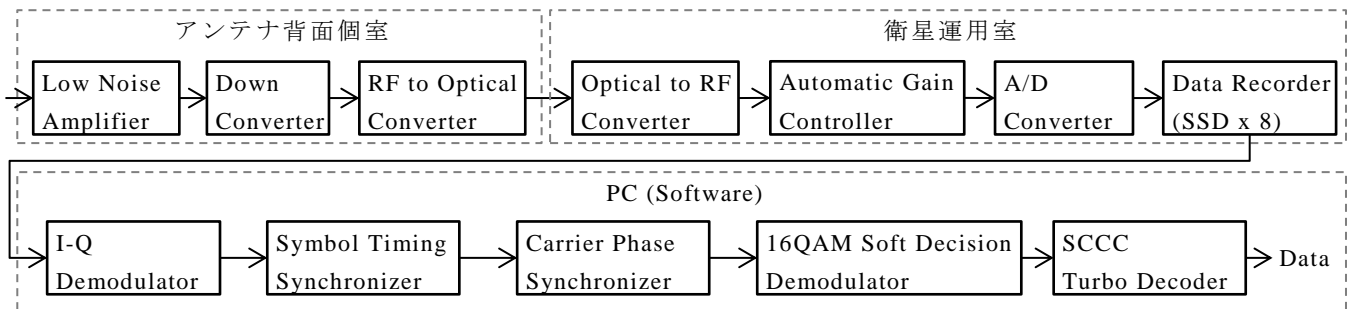


図 8 X バンド受信システムのブロック



Mbps) の試験データを地上で作成し, MRAM に書き込んでそのデータを送信させた. 仰角が  $84.5^\circ$ , 直線距離が 622 km の時に受信した信号の I/Q コンスタレーションを図 9 に示す. スペクトルから推定した受信 C/N0 は 96 dBHz であった. 誤り訂正前の 400 Mbps におけるビット誤り率は  $1.2 \times 10^{-3}$  であり, ターボ復号を行った後の 348 Mbps におけるビット誤り率は  $1.7 \times 10^{-9}$  以下であった. 復調・復号した範囲ではエラーフリーである.

次に ACM 番号が 26 番の 64APSK 変調, 符号化率が 0.84 (504 Mbps) のデータを作成し, 同様に「ほどよし 4 号」から送信させた. 現在の受信ソフトウェアは QPSK 変調と 16QAM 変調にしか対応していないため, そのままでは復調できない. そこで地上での送信機評価用に作成したソフトウェア [7] を使用した. このソフトウェアは送られてくる既知のビット列から I/Q の基準波形を作成し, Error Vector Magnitude (EVM) が最小になるように復調するものである. そのため観測データのような未知信号の復調には使用できないが, 今回の実験では既知のデータが送信されるため, 復調することが可能である. 仰角が  $83.3^\circ$ , 直線距離が 658 km

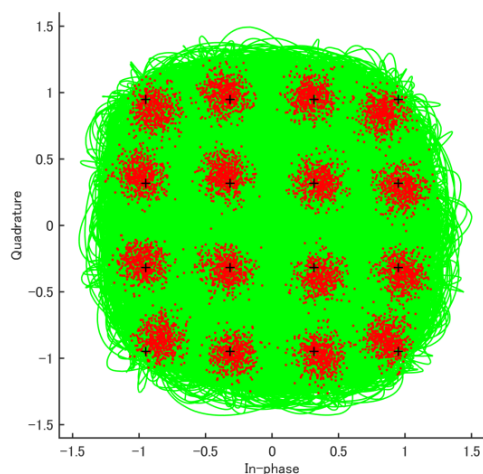


図 9 16QAM 受信信号の I/Q コンスタレーション

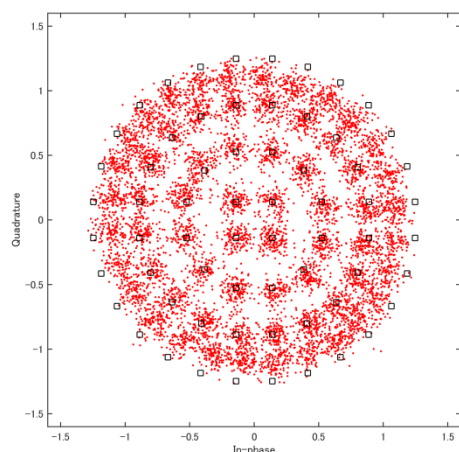


図 10 64APSK 受信信号の I/Q コンスタレーション

の時に受信した 64APSK の I/Q コンスタレーションを図 10 に示す. 黒の四角形は正しいシンボル位置を表す. 電力の大きい最外周のシンボルが大きく内側に寄っているものの, 誤り訂正前の 600 Mbps におけるビット誤り率は  $2.7 \times 10^{-2}$  であり, ターボ復号を行った後の 504 Mbps におけるビット誤り率は  $7.6 \times 10^{-7}$  以下であった. 復調・復号した範囲ではエラーフリーである.

#### 4. まとめ

50 kg 級の超小型衛星で数 100 Mbps の高速通信を実現するシステムを開発し, 16QAM 変調を用いた 348 Mbps の通信に成功した. またこのシステムで 64APSK を用いた 504 Mbps の通信を実現できる見通しを得た. 小型化・低消費電力化のために送信機の冗長性は最低限となっているが, 打ち上げからの 7 ヶ月間ではトラブル無く動作している. 今後は地上受信ソフトウェアの 64APSK 変調への対応, 復調・復号処理の高速化を目指す.

#### 5. 謝辞

本研究の一部は, 総合科学技術会議により制度設計された最先端研究開発支援プログラムにより, 日本学術振興会を通して助成されたものです.

#### 文 献

- [1] C. Boshuizen, J. Mason, P. Klupar and S. Spanhake, "Results from the Planet Labs Flock Constellation," in *Small Satellite Conference*, Utah, 2014.
- [2] H. Saito, N. Iwakiri, A. Tomiki, T. Mizuno, H. Watanabe and T. Fukami, "300 Mbps Downlink Communications from 50kg Class Small Satellites," in *Small Satellite Conference*, Utah, 2013.
- [3] 釜場俊行, 樋口雅之, 橋爪隆, 稲岡和也, 田島成将, 谷島正信, "ALOS-2 DT 高速伝送の開発," 著: 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 長崎, 2014.
- [4] The Consultative Committee for Space Data Systems, FLEXIBLE ADVANCED CODING AND MODULATION SCHEME FOR HIGH RATE TELEMETRY APPLICATIONS, CCSDS 131.2-B-1, 2012.
- [5] Zodiac Data Systems, "Cortex HDR XXL - High Data rate Receiver," [Online]. Available: <http://www.zds-fr.com/upload/docs/032557-ftp99-ed7r0-cortex-hdr-w.pdf>.
- [6] ViaSat, "ViaSat High Rate Receiver 3200 For Remote Sensing and Earth Observation," [Online]. Available: [https://www.viasat.com/files/assets/High\\_rate\\_modem\\_3200\\_Datasheet\\_005\\_web.pdf](https://www.viasat.com/files/assets/High_rate_modem_3200_Datasheet_005_web.pdf).
- [7] 深見友也, 富木淳史, 渡邊宏弥, 岩切直彦, 齊藤宏文, 中須賀真一, "超小型衛星用 X-band 高速ダウンリンク送受信機の評価システム," 著: 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, 富山, 2012.