

地球観測衛星では世界最高の周波数利用効率を持つ 64APSK 変調方式を使用して
毎秒 505 メガビットの高速ダウンリンク通信に成功
—小型衛星における伝送速度の世界記録を更新—

1. 発表者： 齋藤 宏文（宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 教授
東京大学大学院工学系研究科 教授（委嘱））
中須賀 真一（東京大学大学院工学系研究科 教授）

2. 発表のポイント：

- ◆64 値振幅位相変調（64APSK）方式（注1）を使用し、超小型衛星「ほどよし4号」と JAXA 宇宙科学研究所の直径 3.8 m アンテナ受信設備の間で、毎秒 505 メガビットという、100 kg 以下の小型衛星としては世界最高速の通信に成功しました。
- ◆使用した 64APSK 変調方式は、限られた周波数資源を有効に利用して大量の観測データを伝送できることが原理的に知られていましたが、技術上の問題から地球観測衛星で利用されたことはありませんでした。
- ◆100 kg 程度の小型衛星を多数機打ち上げて、準リアルタイムの地球観測ミッションを行う構想が、近年、IT 企業等から提案されています。本技術は、今後の新しい地球観測ミッションの高速データ伝送に貢献できます。

3. 発表概要：

近年の地球観測衛星は、数十 cm の物体まで見分けられる能力を持っていますが、観測データを地上に伝送するためには、高速な伝送回線が必要となります。しかし、電波の周波数帯域幅は限られており、観測データの伝送の高速化のためには、周波数帯域幅を効率よく利用する技術の開発が課題となっていました。

宇宙航空研究開発機構（JAXA）宇宙科学研究所の齋藤宏文教授（東京大学大学院工学系研究科 教授（委嘱））らの研究グループは、これまで地球観測衛星では実用化されていなかった 64 値振幅位相変調方式（64APSK）と呼ばれる、周波数利用効率が従来方式より 1.5 倍から 2 倍高い変調方式について、従来からの技術的困難を解決して衛星からの送信技術、地上での受信技術を開発することに成功しました。開発した成果を、東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻の中須賀真一教授らとともに、2014 年に打ち上げられた重量 64 kg の超小型衛星「ほどよし4号」の高速通信システムに適用しました。「ほどよし4号」から毎秒 505 メガビットの速度でデータを送信し、直径 3.8 m の JAXA 宇宙科学研究所（相模原キャンパス）のアンテナ受信設備でデータを誤りなく受信することに成功しました。64APSK 方式は、地球観測衛星としては世界最高の周波数利用効率を持ち、毎秒 505 メガビットの伝送速度は 100 kg 以下の小型衛星では 2015 年 9 月時点で世界最高速となります。

同グループは、2015 年 2 月 18 日付けのプレスリリース

https://www.t.u-tokyo.ac.jp/epage/release/2015/150218_01.html で、超小型衛星からの毎秒 348 メガビットの通信実験に成功したことを報告しておりますが、今回の成果はその通信速度を単に約 1.5 倍に増加させただけでなく、周波数利用効率が地球観測衛星としては世界最高の 64APSK 方式を軌道上実証でき、限られた無線周波数帯域の中で地球観測衛星のデータ伝送能力を高めた意義があります。近年、100 kg 程度の小型衛星を多数機打ち上げて、準リアルタイム

ムの地球撮像ミッションを行う構想が、IT 企業等から提案されています。大量の観測データの伝送のために無線周波数帯域の不足がおきることが予想されますが、限られた周波数帯域を最大限有効に使用することを可能にする本技術は、今後の新しい地球観測ミッションの高速データ伝送に大きく貢献できます。

なお、本研究は JAXA 宇宙科学研究所と東京大学グローバル COE プログラム「セキュアライフ・エレクトロニクス」の支援を受けて行われました。また、「ほどよし 4 号」の開発は、総合科学技術会議 最先端研究開発支援プログラムにおいて日本学術振興会より助成されて行われました。

4. 発表内容：

近年の地球観測衛星は高分解能のカメラやレーダを使用し、地表の数十 cm の物体まで見分けられる能力を持っています。衛星で取得した高解像度の観測データを地上に伝送するためには、高速な伝送回線が必要となります。しかし、地球観測衛星から地上へのデータ伝送に使用できる電波の周波数帯域幅は限られており、周波数帯域幅を効率よく利用して高速伝送を実現することが課題となっていました。

電波を使ってデジタルデータを送信する場合、電波の位相と振幅の組み合わせそれぞれにビットを割り当て、受信時にはどの位相・振幅が送信されたかを推定することで送信されたデータを復元します。これまで多くの地球観測衛星で用いられてきた 8 値位相変調方式 (8 Phase Shift Keying, 8PSK、注 2) や 16 値直交振幅変調方式 (16 Quadrature Amplitude Modulation, 16QAM、注 3) では、それぞれ、使用周波数帯域幅 1 ヘルツあたり毎秒 3 ビットあるいは 4 ビットの情報を伝送することができます。本研究で採用した 64 値振幅位相変調方式 (64 Amplitude and Phase Shift Keying, 64APSK) は、位相と振幅を変化させることで 64 種類の状態を定義し、それぞれに対して 6 ビットの情報を割り当てる方式です。これにより使用周波数帯域幅 1 ヘルツあたり毎秒 6 ビットの情報を伝送することができ、8PSK 方式の 2 倍、16QAM 方式の 1.5 倍の周波数利用効率となります。

64APSK 方式では、振幅が大きく変化することから、衛星に搭載する高周波増幅器に高い線形性が要求されます。さらに、64APSK 方式では位相の僅かなずれが受信データの誤りを引き起こします。地球観測衛星のような低軌道周回衛星は毎秒 8 km 程度の速度で移動しており、衛星からの電波はドップラー効果 (注 4) によって周波数が大きく変化します。衛星から送られたデータを正しく受信するために、地上の受信機は時々刻々と変化する周波数を高い精度で追尾することが求められます。これらの課題により、低軌道周回衛星における 64APSK 方式の使用は実現していませんでした。

今回、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所の齋藤宏文教授 (東京大学大学院工学系研究科 教授 (委嘱)) らの研究グループは、従来の 8PSK 方式と比較して 2 倍、16QAM 方式と比較して 1.5 倍の周波数利用効率となる 64APSK 方式について、技術的困難を解決して衛星からの送信技術、地上での受信技術を開発しました。そして、開発した成果を東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻の中須賀真一教授らとともに、重量 64 kg の超小型衛星「ほどよし 4 号」の高速通信システムに適用しました。「ほどよし 4 号」から 64APSK 方式を使用して毎秒 505 メガビットの速さでデータを送信し、わずか直径 3.8 m の JAXA 宇宙科学研究所 (相模原キャンパス) のアンテナ受信設備でデータを誤りなく受信することに成功し、実際の宇宙空間でその動作を実証しました。低軌道周回衛星での 64APSK 方式の使用は大型衛星を含め世界初であり、また毎秒 505 メガビットの伝送速度は 100 kg 以下の小型衛星では世界最高速となります。

同グループは、2015年2月18日付けのプレスリリース (https://www.t.u-tokyo.ac.jp/epage/release/2015/150218_01.html) で、超小型衛星からの毎秒348メガビットの通信実験に成功したことを報告しておりますが、今回の成果はその通信速度を単に約1.5倍に増加させただけでなく、周波数利用効率が地球観測衛星としては世界最高の64APSK方式を軌道上実証でき、限られた無線周波数帯域の中で地球観測衛星のデータ伝送能力を高めた意義があります。近年、100kg程度の小型衛星を多数機打ち上げて、準リアルタイムの地球撮像ミッションを行う構想が、IT企業等から提案されています。大量の観測データの伝送のために無線周波数帯域の不足がおきることが予想されますが、限られた周波数帯域を最大限有効に使用することを可能にする本技術は、今後の新しい地球観測ミッションの高速データ伝送に大きく貢献できます。

本実証では、地球観測のデータ伝送に割り当てられているX帯(注5)の電波(周波数8025-8400メガヘルツ)の周波数帯域幅375メガヘルツのうち、1/3となる125メガヘルツの帯域のみを使用して効率的に毎秒505メガビットの通信に成功しています。送信電力や送受アンテナの最適化を行うことで、全375メガヘルツの周波数帯域の中に3つの125メガヘルツ帯域をとり、各々の帯域で毎秒505メガビットの通信ができます。さらに、各々の帯域で、電波の右円偏波と左円偏波(注6)を独立に使用することで通信チャンネル数を2倍にできます。このように6チャンネルの通信路を確保して、その各々で毎秒505メガビットの通信を行って、合計毎秒3000メガビットという高速なデータ通信がX帯で実現できます。本研究は、降雨による減衰が大きい高周波のKu帯、Ka帯(注5)を使用することなく、降雨にも強く使いやすいX帯を用いて超高速のデータ伝送ができる可能性を示しました。

図1はJAXA宇宙科学研究所で受信し、復調した信号を振幅と位相の2次元平面に示したものであり、6ビットの情報に対応する $2^6 = 64$ 個の配置(コンスタレーション)を確認できます。この配置を正確に伝送するため、本研究グループはアイ電子株式会社と協力し、優れた歪特性を持ち高効率な窒化ガリウムを用いた高周波増幅器を開発しました。また誤り訂正符号にターボ符号(注7)を採用することにより、効率の良いデータの誤り訂正が可能となっています。

図2は株式会社アドニクスが製造し、「ほどよし4号」に搭載した高速送信機であり、装置重量は1.3kgです。

現在、衛星からの電波を受信する受信機の信号処理はソフトウェアによるオフライン処理となっています。今後はこの処理を高速化することによって、低コストな受信機の実現を目指します。また、夜間・悪天候時にも観測ができるマイクロ波を用いた合成開口レーダ(注8)等の搭載観測センサの実現や、衛星システムの信頼性向上が取り組むべき課題となります。

5. 発表論文：

会議名：第59回宇宙科学技術連合講演会(2015年10月7日～9日開催)

講演タイトル：64APSK変調を用いた50kg級衛星からの505Mbpsダウンリンク通信実験

著者：深見友也，渡邊宏弥，富木淳史，水野貴秀，齋藤宏文，岩切直彦，新家隆広，小島要，川元光一，重田修，布村仁志，神田泰明

6. 問い合わせ先：

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 教授
東京大学大学院工学系研究科教授(委嘱)
齋藤 宏文

7. 用語解説：

(注1) 振幅位相変調式

搬送波の振幅と位相の両方に対して変調を加える方式。位相変調方式より多くの状態を定義できるため、周波数の利用効率が高い。振幅と位相の状態数に応じて32値振幅位相変調(32APSK)方式、64値振幅位相変調(64APSK)方式などがある。

(注2) 位相変調方式

搬送波の振幅は一定とし、位相に対して変調を加える方式。位相の状態数に応じて2値位相変調(BPSK)方式、4値位相変調(QPSK)方式、8値位相変調(8PSK)方式などがある。海外の地球観測衛星では8PSK方式が用いられることが多い。

(注3) 直交振幅変調方式

搬送波のI成分(同相成分)とそれと90°位相がずれた直交するQ成分(直交成分)に、それぞれ振幅変調を加える方式。状態の数に応じて16値直交振幅変調(16QAM)方式、32値直交振幅変調(32QAM)方式などがある。(注1)に述べた振幅位相変調の1種とも解釈できる。我が国の「だいち2号」「ASNARO」等の地球観測衛星では、16QAM方式が用いられている。

(注4) ドップラー効果

電波を送受信する2局が相対的に移動している場合、電波の伝搬中に局までの距離が変化するため、電波の周波数が変化して観測される現象。低軌道を周回する人工衛星は秒速8km程度で周回しているため、地上の無線通信より大きな周波数変化が発生する。

(注5) X帯、Ku帯、Ka帯、

電波の周波数の分類としてアルファベット名称が慣用的に付けられており、おおよそ8,000-12,000メガヘルツの周波数帯をX帯と呼ぶ。人工衛星による地球観測ミッションのデータ伝送には、8,025-8,400メガヘルツが割り当てられている。また、おおよそ12,000-18,000メガヘルツはKu帯、26,000-40,000メガヘルツはKa帯と呼ばれる。Ku帯、Ka帯では、降雨による電波の減衰が大きい。

(注6) 右円偏波、左円偏波

横波である電波は、その電界の方向で規定される偏波状態によって、2つの独立なモードが存在する。電波の進行方向に対して右ねじの方向に電界が回転していくモードを右円偏波と呼び、左ねじの方向に回転していくモードを左円偏波と呼ぶ。

(注7) ターボ符号

送信時に冗長なデータを付加することで、雑音によって誤りが発生しても受信時に訂正できるようにする「誤り訂正符号」の1種。ターボ符号は自動車のターボチャージャのように繰り返し処理することで、少ない冗長データでも効率的に誤りを訂正できる方式。スマートフォンのLong Term Evolution(LTE)や深宇宙通信でも使用されている。

(注8) 合成開口レーダ

衛星や航空機からマイクロ波を放射してその反射波を計測することで画像を得るレーダの1種。マイクロ波レーダは悪天候時や夜間にも観測できる利点があるが、マイクロ波は可視光よりも波長が長いので、高い地上分解能を得るためには非常に大きなアンテナが必要である。合成開口レーダは、衛星や航空機が飛行する移動距離にわたる反射波を記録して、データ処理を行うことで、等価的に移動距離のサイズのアンテナ受信と同程度の分解能を得るもの。

8. 添付資料：

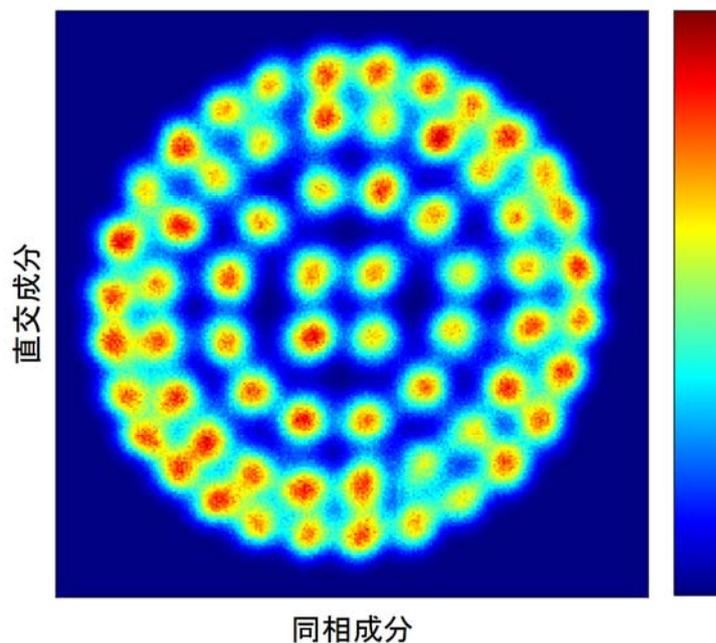


図 1: 約 600 km の高度の超小型衛星「ほどよし 4 号」からデータを送信し、JAXA 宇宙科学研究所で受信した信号を同相成分とそれと 90°位相がずれた直交成分の平面（または、振幅と位相の平面）で表した図。64 個の状態それぞれが 6 ビットの信号を表すため、同じ周波数帯域を使用して、高速の通信が行える。カラーコードは発生頻度を表し、赤ほど発生頻度が高い。64 個の状態は、雑音や増幅器の非線形性等によって広がっているが、誤り訂正符号によって、送信データが誤りなく復元できている。



図 2: 超小型衛星「ほどよし4号」に搭載した高速送信機の外観。重量は 1.3 kg、大きさは幅 12 cm、奥行 12 cm、高さ 7 cm。