大容量通信を実現する、 宇宙光通信の研究開発動向

Research and Development Trends of Space Optical Communications for Realizing Large Capacity Communication

荒木智宏 Tomohiro Araki†

Summary

長い助走期間を終えて、宇宙での光通信はようやく実用段階に到達した。本論文では、まず宇宙光通信の長い歴史からの歴史について概説する。次に、世界の宇宙光通信の研究開発動向について距離別に分類し述べる。更に、宇宙光通信を実現するための技術及び課題を、主に大容量通信技術の観点から紹介する。その中で、特に送受信技術については、IoT 時代を支える大容量通信技術である光ファイバ通信システム・デバイス技術の成果を活用していることを、国際標準化の動向とともに紹介する。

Key Words

宇宙、光通信、通信方式、大容量通信

1

宇宙光通信とは

読者の皆さんは、「光通信」と聞いて何を思い浮かべるだろうか。本誌の読者であれば、まず間違いなく光ファイバを用いた有線の光ファイバ通信を思い浮かべることであろう。しかし、本論文で取り上げるのは宇宙での衛星と衛星の間、若しくは衛星と光地上局（電波のアンテナの代わりに、光学望遠鏡＝光アンテナを備える、衛星と光通信を行うための施設）の間の、無線の光通信についてである。

地上の光ファイバ通信技術では、10 年ごとにほぼ 2 桁の大容量化が実現された。現在では一人一人がスマートフォンで数十 Mbit/s のデータ伝送速度を日常的に扱い、動画ストリーミングや SNS を楽しんでいるが、これらを実現するのは基地局間を結ぶ大容量光ファイバ網である。一方、人類の宇宙活動でも、例えば地球観測衛星の観測センサの分解能向上、観測領域の拡大に伴い、伝送すべきデータ量は増大し続けており、地上同様に大容量通信が望まれている。また、民間の商用通信衛星においても、very High Throughput Satellite (vHTS) と呼ばれる、衛星 1 機で数百 Gbit/s、将来的には 1Tbit/s を超える通信容量を持つ衛星が登場しつつあり、衛星－ゲートウェイ局（衛星基地局）間の通信に光通信の活用を検討が始まっている⁽¹⁾。衛星間や衛星－地上間の無線の光通信である宇宙光通信

は、今後の宇宙データ伝送システムにおいて以下の理由で飛躍的な大容量通信の実現と、軽量小形化・低消費電力化を可能とするものと期待されている⁽²⁾。

- ▶ 電波に比べてほぼ 4 桁高周波帯域であり、例えば波長 1530-1570 nm 帯ではほぼ 5 THz (191.0~195.9THz) の帯域が使用可能である。
- ▶ 電波帯域と異なり、周波数干渉に伴う使用周波数や帯域幅等の制約が今のところ存在しない。
- ▶ 送信ビームの集光性（直進性）が高く、秘匿性に優れる。この特徴は高い指向精度が必要になることも意味する。
- ▶ アンテナ径を小さくできるために軽量小形化が期待できる。

本論文の構成は次のとおりである。2. では、宇宙光通信の特徴とこれまでの歴史を概説する。3. では、宇宙光通信を距離別に分類し、世界の最新研究開発動向を述べる。4. では、主に大容量通信技術に焦点を当てた技術動向と課題の紹介を行う。5. は本論文のまとめである。

2

宇宙光通信の特徴と歴史

21 世紀の最初の 10 年までは、前章で述べた高い集光性に伴う高精度指向の実現が技術的な課題であった。必要な精度を電波 (RF: Radio Frequency) 通信と比較してみよう。例えば JAXA の地球観測衛星「だいち 2 号」に搭載された、Ka バンド (26GHz

† 宇宙航空研究開発機構筑波宇宙センター、つくば市 Japan Aerospace Exploration Agency Tsukuba Space Center, Tsukuba-shi, 300-8505 Japan

帯)を用いた衛星間通信用アンテナ⁽³⁾は直径77cmのアンテナをステッピングモータを用いて駆動系とし、指向精度0.29deg(5mrad)を達成しており、自機と当時のデータ中継衛星「こだま」の軌道情報を基にしたオープンループでの指向制御で、「だいち2号」-「こだま」間の衛星間通信が可能であった。一方、光通信は、光アンテナ径10cmと使用波長1.55 μ mを想定すると、ビーム広がり(半値半幅)は10 μ radとなり、電波の5mradと比べてほぼ4桁高い1 μ rad(約0.00006deg)オーダの指向制御精度が必要となる。大雑把にこれをたとえると、富士山頂にあるサッカーボールを、100km離れた東京スカイツリーから狙うことになる(図1)。有名な劇画の主人公、世界一のスナイパーの「ゴルゴ13」も真っ青になるであろう高精度であり、送信側からの一方的なオープンループ指向制御ではこの精度の実現は困難である。そのため、通信相手からのレーザを受信し、その方向にレーザを送り返して回線を確立・維持する「捕捉追尾」技術が、電波とは比べ物にならないほど重要になる。

ここから宇宙光通信の歴史を紹介する。宇宙光通信の研究は、欧米では1970年代より行われている

図1 宇宙光通信における指向精度のたとえ

図2 「きらり」軌道上実験想像図

た^{(2),(4)}。今となっではいささか信じ難いことに、当時は炭酸ガスレーザの使用が考えられていた。我が国においては、研究の開始については遅れを取ったが、実際に衛星に搭載しての軌道上実験は世界に先んじている。郵政省通信総合研究所(当時、現NICT・情報通信研究機構)が開発し、宇宙開発事業団(当時、現JAXA)が開発した「きく6号」(ETS-6:Engineering Test Satellite 6)に搭載された、レーザ通信装置(LCE:Laser Communication Equipment)による、衛星-地上間光通信の実現(1994年)が、世界初の宇宙光通信であった⁽⁵⁾。

欧州宇宙機関(ESA:European Space Agency)は、1990年代に光衛星間通信システムの開発を進め、フランスの地球観測衛星SPOT-4(1997年打上げ)と、ESAの静止通信実験衛星ARTEMIS(2001年打上げ)との間での衛星間光通信に世界で初めて成功した⁽⁴⁾。また、SPOT-4からARTEMISへの衛星間光通信を用いた光データ中継による実データ伝送も行われた。加えて、JAXAが2005年に打ち上げた光衛星間通信実験衛星「きらり」(OICETS:Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite)とARTEMISの間で、異なる機関間での世界初の衛星間光通信、及び双方向通信に成功した⁽⁶⁾。なお「きらり」は、NICTとの協力の下に、世界初の低軌道(LEO:Low earth orbit)衛星-地上間の光通信実験にも成功している。「きらり」の軌道上実験のイメージ図を図2に、「きらり」の光通信装置の外観を図3に示す。

以上の実験は、送信側に波長0.8 μ m帯のひ化ガリウム・アルミニウム(GaAlAs:Gallium-Aluminum Arsenide)-レーザダイオード(LD:Laser Diode)、受信側にアバランシフォトダイオード

図3 「きらり」の光通信装置の外観
光アンテナ径26cm、熱ひずみによる変形を防ぐため、鏡面に加え鏡筒とトラスも全て低膨張ガラスで構成された構造となっている。

(APD:Avalanche Photo-Diode) を用いた、強度変調・直接検出 (IM/DD:Intensity Modulation, Direct Detection) によるものである。通信速度は「きらり」から ARTEMIS への伝送レートで、50Mbit/s (ARTEMIS から「きらり」への伝送レートが 2Mbit/s) にすぎず、前述の高精度な捕捉追尾を達成し宇宙光通信が実現可能であることを立証するためのミッションであった。なお、このとき「きらり」で使用された LD は、定格出力 300mW (CW, 単一モード) の GaAlAs-LD で、「きらり」開発スタート時の 1994 年時点では世界最高出力のものであった。

現在この出力の単一モード LD は、CD/DVD 書き込み用 LD として、安価かつ幅広く使用されている。波長 0.8 μ m 帯を用いた宇宙光通信は、3.以降に述べるように現在から将来の大容量通信衛星に用いられてはならず、いわば宇宙光通信のれい明期を支えた技術と言える。ただし、最近になって情報セキュリティの観点から強い関心を集めている、衛星を用いた量子鍵配送においては、世界初の実験⁽⁷⁾において用いられており、用途を変えて使い続けられている。

本章の最後に、図 2 にまつわる小話を紹介する。光アンテナ (望遠鏡) からレーザを送信しているこの図はインパクトがあるのか、「ゴルゴ 13」にこの図を参考にしたとしか思えない絵が出てきたエピソードがある⁽⁸⁾。残念ながら、宇宙光通信の実験衛星としてではなく、別目的の衛星としてであった。当時の筆者の周りには、『きらり』が『ゴルゴ 13』に載ったぞ! もっとも、〇〇衛星としてだけ

ど」と微苦笑をしていたものである。

3

宇宙光通信の分類ごとの動向

3.1 宇宙光通信の分類

本論文では、宇宙光通信をその通信距離によって 3 種類に分類する。図 4 にその概要を示す。

まず、①地球からの距離がおよそ 38 万 km 上である月や、惑星 (火星で 0.4 億 km から 2 億 km) との、超長距離通信である。次に、②地球の赤道上、およそ地表から距離 36,000km の静止軌道 (GEO:Geostationary Earth Orbit) 上の静止衛星を中心とする宇宙光通信である。中軌道と呼ばれる高度 20,000km 程度の軌道上の衛星を使用する通信もここに含める。最後に、③おおむね地表から高度 400km~1,000km を周回する低軌道 (LEO:Low earth orbit) 衛星が主体となる、LEO 衛星間、及び LEO 衛星-地上間の距離が 1,000~2,000km の宇宙光通信である。国際宇宙ステーション (ISS:International Space Station) も高度約 400km の低軌道上を周回しており、ここに分類される。

3.2 月・惑星との光通信

まず、月惑星との光通信について簡単に紹介する。地球近傍における光通信においては日欧に先行を許した、米国航空宇宙局 (NASA:National Aeronautics and Space Administration) であったが、月探査機からの光通信は 2013 年に打ち上げた月探査機 LADEE と光地上局との間で、世界で初

図 4 宇宙光通信の分類

めて成功している⁽⁹⁾。光地上局は米国内2か所及びESAのカナリア諸島テネリフェ山頂の光地上局の、計3か所との光通信に成功している。

現在、この実績を基に、NASA ジェット推進研究所 (JPL: Jet Propulsion Laboratory) を中心として小惑星探査機 Psyche との、惑星間距離での光通信実験が計画之中である⁽¹⁰⁾。

3.3 静止衛星を用いた光通信

ARTEMIS、及び「きらり」の成功を受け、宇宙光通信は、LEO 地球観測衛星のデータを静止衛星で中継する、光データ中継の分野から高速化と実用化の時代に移った。

ここでデータ中継について簡単にまとめる。低軌道衛星が、日本の地上局 (例えば JAXA 勝浦局) と通信できる範囲は、図5の明るい範囲のみであり、低軌道衛星がこの範囲を通過する1日に4回程度、1回当たり10分前後しか通信を行うことができない。一方、静止軌道からは常に地球のほぼ半分と通信できる。そこで、低軌道衛星⇄データ中継衛星⇄地上局とデータ中継衛星を介して通信を行うことで、低軌道衛星と地上局間で長時間の通信を行うことが、データ中継である。JAXA が打ち上げて運用していたデータ中継衛星「こだま」が低軌道衛星と通信可能な範囲を図6に示す、なお、低軌道衛星⇄データ衛星の回線を衛星間回線、データ衛星⇄地上局の回線をフィーダリンクと呼ぶことが多い。

静止軌道に複数機の中継衛星を配置すれば、常に低軌道衛星と通信を行うことができる。米国は、スペースシャトルや国際宇宙ステーションと24時間切れることのない通信回線の確保のため、1983年から Tracking and Data Relay Satellite (TDRS) を延べ12機打ち上げ、10機が運用中である⁽¹¹⁾。JAXA の宇宙飛行士が ISS に搭乗した際にテレビ中継を行うことがあるが、これは全て NASA の TDRS 経由で行われている。

図5 低軌道衛星が勝浦局と通信可能な範囲

電波による通信と比較して、宇宙光通信において特徴的なのは、宇宙通信全体から見ればニッチな分野と言ってよい実用化が衛星間回線から始まったことである。これは、光通信の弱点として、大気の影響や水蒸気に弱く、特に雲や霧があると遮断されてしまうことに起因する。つまり、大気のない宇宙空間での通信である衛星間通信に光通信を割り当て、電波は衛星-地上間回線 (フィーダリンク) に専ら割り当てることで、限られた電波資源を有効利用するという考え方によっている。

ESA は、独 航 空 宇 宙 セ ン タ ー (DLR: Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt) が開発した技術を用いて欧州データ中継システム (EDRS: European Data Relay System) を運用・開発中であり、従来の電波による通信では困難な超高速通信を可能とする光通信技術を実用化している。これはドイツが開発した狭線幅 Nd:YAG レーザを用いた、2位相シフトキーイング (BIT/SK: Binary Phase-Shift Keying) 変調と、ホモダイン検波による復調技術により、ユーザデータ伝送レート 1.8Gbit/s、変復調レート 2.8Gbit/s を実現している。EDRS から地上までは波長と偏波で4多重化した Ka バンド回線で伝送される。EDRS では、ALPHASAT 衛星 (2013 年) での軌道上実証を完了し、静止のデータ中継である EDRS-A (2016 年)、EDRS-C (2019 年打上げ予定) と、ESA の地球観測衛星である SENTINEL 衛星シリーズとの間で、光データ中継の実運用を開始している⁽¹²⁾。なお EDRS 計画は、ESA と AIRBUS 社が費用を折半する官民共同プロジェクトとして推進されている。EDRS-A、C は大西洋上の静止衛星であるが、3機目の EDRS-D はアジア・オセアニア地区上空の静止衛星への相乗りを予定しており、我が国のスカパー JSAT 社が Airbus 社に協力する予定である⁽¹³⁾。

米国では、衛星間光通信と光によるフィーダリンクの実験を併せて行う Laser Communications

図6 低軌道衛星が「こだま」と通信可能な範囲

Relay Demonstration (LCRD) という光通信実験ミッション⁽¹⁴⁾が、2020年（文献では2019年とあるが延期されている）に打上げ予定である。本ミッションはマサチューセッツ工科大リンカーン研(MIT-LL:Massachusetts Institute of Technology Lincoln Laboratory)が波長1.5 μ m帯での光ファイバ通信の技術を踏まえて、永年研究開発を行ってきた成果である。遅延線検波差動位相キーイング(DD-DPSK:Delay line Detection,Differential Phase Shift Keying)等をNASAが採用したものである。ユーザデータ伝送レート1.24Gbit/s、変復調速度2.88 Gbit/s（符号化率1/2）での光通信実験を行う予定である。

またNASAは、ハワイの山頂や砂漠に光地上局を置いて、主に光で静止衛星から地上への伝送を実現しようとしている。ただし、Kaバンドによるフィーダリンクも次期TDRSの実用段階では併用する計画である。低軌道上の国際宇宙ステーション間で通信実験を行うILLUMA-Tという計画も進んでいる⁽¹⁵⁾。

筆者が属するJAXAは、2019年度打上げを目指した静止衛星である光データ中継衛星(JDRS:Japanese Data Relay System)を開発中である⁽¹⁶⁾、⁽¹⁷⁾。JDRSは、JAXAが開発中のLEOの高分解能地球観測衛星である、ALOS-3、ALOS-4（共に2020年度打上げ予定）から、ユーザ伝送レート1.8Gbit/sでのデータ伝送を実証し、更に実用化する予定である。JDRSの軌道上イメージを図7に示す。衛星間光通信では、NASAと同様に1.5 μ m帯のDD-DPSKを使用する。一方、静止衛星から地上へのフィーダリンクには、前述のEDRSと同じく雲による影響を受けないKaバンドを用いる。

図7 JDRSの軌道上イメージ⁽¹⁶⁾

我が国は世界的に見ても雲が多く⁽¹⁸⁾、EDRSと同様にフィーダリンクにはKaバンドのみを用いており、フィーダリンクに関しては光に重きを置くNASAと異なっている。

またNICTは、2021年度の打上げを予定する技術試験衛星(ETS:Engineering Test Satellite)9号機に搭載される、静止衛星－地上間の光通信による超高速データ伝送(10Gbit/s以上)の実証実験のための宇宙光通信機器HICALI(High Speed Communication with Advanced Laser Instrument)を開発中である⁽¹⁹⁾、⁽²⁰⁾。

表1に、これらのミッションの比較を示す。

なお中国では、中国空間技術研究院(CAST:China Academy of Space Technology)が開発した、光通信装置を搭載した衛星「実践13号」が2017年4月に打ち上げられたと報道されている⁽²¹⁾。この装置に関する公開情報は報道以外にはほとんど存在せず、2015年の宇宙データシステム諮問委員会(CCSDS:Consultative Committee of Space Data

表1 静止衛星を用いた光通信ミッションの比較

	EDRS	LCRD	JDRS	HICALI
開発機関	ESA/DLR	NASA/MIT LL	JAXA	NICT
打上げ	2016年1月 (EDRS-A)	2020年予定	2019年度予定	2021年度予定
使用波長帯	1.06 μ m	1.5 μ m帯	1.5 μ m帯	1.5 μ m帯
ユーザーデータ伝送速度(変復調速度)(bit/s)	1.8G [双方向] (2.8G)	1.24G [双方向] (2.88G)	1.8G [LEOからGEO] (2.5G)	10G [双方向] (11.096G)
光通信の用途	光データ中継システムの衛星間光通信	光フィーダリンク及び光データ中継システムの衛星間光通信	光データ中継システムの衛星間光通信	光フィーダリンク
データ中継のフィーダリンク	Kaバンド	光(実用時はKaバンドを併用する)	Kaバンド	(フィーダリンク実験ミッションのため適用外)

System)⁽²²⁾の技術会合で彼らが報告した内容によると、波長 1.5 μ m 帯の位相変調といわゆるディジタルコヒーレント復調を用いた宇宙光通信システムの開発を行っており、この内容で衛星が開発されたと筆者は推定している。

3.4 低軌道間・低軌道－地上間光通信

最後に、低軌道 (LEO) 衛星－LEO 衛星の間、及び LEO 衛星－光地上局間の宇宙光通信について述べる。この分野は 2. で述べたように、日本が LEO－地上間の光通信を世界で初めて達成し、その後も DLR が低軌道衛星間通信を世界で初めて実現するなど⁽⁴⁾、主に日欧の政府機関で開拓されてきた分野である。現在最も活発に研究開発が行われているこの分野は、月・惑星との光通信や静止衛星を用いる光データ中継システムの研究開発が、現在でも各国の宇宙機関 (NASA, ESA, DLR, JAXA) を中心に推進されていることとは対照的に、いわゆる LEO コンステレーション (数十～数千機の LEO 衛星群を用いた、グローバルな情報通信・インターネット接続サービスを提供しようというチャレンジングな計画) と密接に結び付き、欧米の民間主導で進んでいるものも多い。よって、それらの情報は積極的に公開されているとは限らず、以下に紹介する筆者が把握している情報が全てでも最新でもない可能性が高いことを御容赦頂きたい。例えば本論文を執筆中に Space-X 社は、Starlink という名の LEO コンステレーション衛星システムの第 1 回目打上げとして、60 機の衛星を打ち上げたとのニュースが入ってきた^{(23), (24)}。これは 60 機を 1 台のロケットで打ち上げるもので、最終的な衛星数は 10,000 機を超える。Space-X 社は全くと言ってよいほど学会では報告しないため、米連邦通信委員会 (FCC: Federal Communication Commission) への申請内容以上のことは不明である。また、衛星間通信に光通信を使うという情報もある⁽²³⁾。

欧州においては、Leosat 社⁽²⁵⁾が比較的小規模な LEO コンステ構想を進めており、光通信装置の開発を行っている。この構想の特徴は、LEO コンステレーション全般が主張するところの「グローバルな情報通信・インターネット接続サービス」において、光ファイバの補完ではなく、光ファイバ通信よりも早いデータ伝送を、物理的に保証しようとしているところにある。すなわち、即時性 (低 Latency) の面で、光ファイバ中の光速 (約 20 万 km/s) よりも、真空・大気中での光速 (約 30 万 km/s) が約 1.5 倍速いことを生かして、例えばロ

ンドン－シンガポールといった長距離データ伝送において、LEO コンステレーションならば 60ms 早くデータ伝送できるとうたっている。この 60ms は、ms 単位でのコンピュータ取引を行っていると言われる現在の金融取引においては、利用者に圧倒的な優位性を与えるとのことである。なお文献 (26) は、高速金融取引関係者は、短波通信 (今どき!) まで使って、大西洋を越える距離なら光ファイバより時間的に早いという意味での高速通信を実現しようとしていることを紹介しており、Leosat 社の狙いは間違っていないと思われる。

前項で述べた GEO の衛星は、1 機が質量 2～4t、開発費 100 億円以上、打上げに 1 回数十億円～百億円のコストを要する。高コストのため、10～15 年の長期運用すなわち長寿命・高信頼性が前提となっている。一方、LEO コンステレーションでは、3～5 桁の数の衛星を同時期に運用する必要がある。総投資額としてどの計画でも数十億米ドルであることから、衛星を抜本的に小形・低コスト化し、多数の衛星を同時に打ち上げることが必須となっている。

この計画への採用を目指していると思われる研究開発として、Thales 社は Optel- μ という小形光通信装置を ESA の支援で開発しており、早ければ、本論文が出版されるときには衛星に搭載の上、軌道上で実証実験中の予定である⁽²⁷⁾。

EDRS 用の光通信システム、装置を開発し供給している独 Tesat 社も、この分野への参入を明言しており、低コスト光通信装置や光地上局設備の開発を行っている⁽²⁸⁾。また、DLR の光通信研究グループからのスピノフ企業を前身に持つ Mynaric 社⁽²⁹⁾も低コストの衛星搭載用光通信装置の開発を行うとともに、光地上局設備、航空機用無線光通信装置の製造販売を開始している。

ESA は、欧州の衛星コンステレーション計画を後押しするためか、GEO/LEO 衛星技術の革新を目指した、HydRON と名付けた研究開発プロジェクトを開始しており⁽³⁰⁾、構想ではあるが、2025 年ごろに GEO を 1 機、LEO を 1 機、それぞれ打ち上げて軌道上実証を検討している。

米国においては、いわゆる“GAFA”の中で Google, Facebook が宇宙光通信に関する研究開発を行っている。Google は、大形気球を用いた基地局サービスを開始しており⁽³¹⁾、この気球間を接続する目的で、光通信装置の研究開発を行っている⁽³²⁾。耐環境性要求が異なりそのまま宇宙で使える技術ではないと思われるものの、その実績は宇宙光

図8 ソニーの光通信装置の外観⁽³⁶⁾

通信にも活用可能であろうと筆者は推定している。Facebook は、直接⁽³³⁾ 及び大学への資金提供⁽³⁴⁾ の双方の手段で、研究開発を進めており、学会でも盛んに報告している。なお、Facebook Connection Lab の宇宙光通信に関する責任者は、数年前まで NASA JPL の宇宙光通信研究室長であった宇宙光通信分野では著名な人物である。米国における人材の移動のダイナミズムを表しているとともに、Facebook が宇宙（あるいは無線）光通信を用いたインターネットサービス網構築に本気であると世界に表明した事件であった。

本項の最後に、我が国における本分野へのチャレンジとして、ソニーの研究開発^{(35), (36)} を紹介する。ソニーを含めて現在では世界で2社しか保有しなくなった（ちなみに、もう1社はパナソニック）、CD/DVD/BD 読出し／書込みのコア技術である光ピックアップ技術は、 μrad オーダの極めて高いレーザ送信方向制御精度を有している。この技術を光通信の指向制御に活用し、低コストの宇宙光通信装置を実現しようというチャレンジである。予定⁽³⁷⁾ より遅れているが、本論文が掲載される頃には国際宇宙ステーション（ISS）日本実験モジュール「きぼう」船外部に、ソニーが JAXA と協力し開発した光通信装置が取り付けられ、NICT と協力して光地上局との光通信実験を行っているはずである。ソニーが開発した光通信装置の外観を図8に示す。

なお、宇宙光通信に関する概説（和文）はこれまでに文献（38）～（40）でも報告されており、関心のある方は御一読頂きたい。

4 宇宙光通信の技術動向と課題

本章では、主に大容量通信技術に焦点を当てた宇宙光通信の技術動向と課題の紹介を行う。また、宇宙光通信に関する国際標準化は、CCSDS⁽²²⁾ において

進められている。CCSDS の Optical Communication Working Group での最新の標準化活動状況の枠組みに沿って、宇宙光通信での大容量伝送技術についてまとめる。

4.1 パルス位置変調方式とターボ符号の組合せ

パルス位置変調（PPM: Pulse Position Modulation）は、距離 38 万 km の月探査機、億 km 単位の惑星探査機との超遠距離通信に用いることを想定して標準化が進んでおり、High Photon Efficiency（HPE）と呼称されている方式である。技術標準書案において想定している最大通信レートは 500Mbit/s である。電波の無線通信において、1 シンボルで複数 bit の情報を伝達するためには位相・振幅情報をシフトさせた多値変調を用いている。光ファイバ通信では同様に多値化が進みつつあるが、PPM は図7に示すように一つの光のパルスがある場所によって、複数 bit の情報を表現するものである。図7の例では、一般的な Optical On Off Keying（OOK, IMDD 方式別称）の Non Return to Zero（NRZ）方式で 4bit を送るためには平均して光のパルスが二つ（図9では台形で表現）必要となることが、PPM だと一つで済む。検出器を1シンボルの検出限界で動作させると、4bit を受信するため、PPM では半分のシンボルで済み、その分必要な受信電力が減少し、復調部を高感度化することと同じ効果を得ることが可能となる。図9は4bit を1パルスで表現する PPM の例であるが、8bit を1パルスで表現する PPM まで規格化されている。

HPE と呼ばれる通信方式は、PPM に、高い誤り訂正能力を有する、SCCC（Serially Concatenated Convolutional Code、ターボ符号の一種）と、超伝導ナノワイヤによる光子検出器を組み合わせることで、1光子/bit 前後の超高感度検出を行うものである。

本方式の技術勧告ドラフト版は、既に CCSDS の Web サイト⁽⁴¹⁾ からダウンロード可能である。また、本方式は 2020 年代後半から開始される、国際協力による有人月探査計画においても、月－地球の高速データ伝送回線（上り＝地球から月＝20Mbit/s、下り＝月から地球＝500Mbit/s、暫定）に用いることが、CCSDS 技術会合にて議論されている。

4.2 位相変調とホモダイン検波／遅延線検波の組合せによる高速宇宙光通信システム

既に 3.3 で述べた、ドイツが開発し ESA が採用した BPSK とホモダイン検波の組合せ、及び

図9 PPM方式の概念

NASA/MIT-LL, JAXA が採用している DD-DPSK は、現在運用中あるいは開発中のシステムでは 2.5Gbit/s 程度の通信速度であるが、波長多重化やいわゆるデジタルコヒーレント復調技術の採用で、数十 Gbit/s への高速化が達成可能であると筆者は考え、研究開発を行っている^{(39), (40), (42)}。また、CCSDS にて、米 NASA/ 仏 CNES と日本 (JAXA, NICT) が協力して、予備勧告案を作成している。本システムの実現に向けた大きな技術課題は、次の 2 点である。

(1) 10W 級光 HPA (High Power Amplifier)

筆者らが検討している次期光データ中継システムでは、まずユーザデータ伝送速度が JDRS の 8 倍 (14.4Gbit/s) 以上、変復調速度 20Gbit/s 程度の高速通信の実現を目指している⁽⁴²⁾。この 20Gbit/s は、一例として 4 値位相変調 (QPSK: Quadrature Phase Shift Keying) 5Gbit/s×4 波長多重を想定している。5Gbit/s QPSK 伝送は、前述の CCSDS 予備勧告案の送信クロックレート 10GHz 若しくは 2.5GHz に沿ったものである。

復調方式にいわゆるデジタルコヒーレント方式を用いれば、受信側の感度を JDRS の遅延線検波から 2 倍以上改善できる。この場合、上記の高速化の実現のためには、併せて光 HPA として、JDRS の送信出力である 2~3W⁽¹⁷⁾ から、10 W への高出力化が必要になると筆者らは判断している。

これまでに宇宙で使用された実績のある通信用 (GHz の高速変調光を増幅する) 光 HPA は、例えば文献 (9) で述べられている LADEE で用いられている、シングルクラッドのエルビウム添加ファイバ (EDF: Er-Doped Fiber) を用いた 500mWEDFA⁽⁴³⁾ (EDF Amplifier) 止まりである。高出力化の工夫として、イッテルビウムを添加する (EYDF: Er-Yb-Doped Fiber)、ダブルクラッド型を採用する等があるが、これらを宇宙で使用したという報告はまだ

ない。NASA/JPL では、惑星探査機搭載用の 6W の EYDFA を地上で検証し⁽⁴⁴⁾、実験室レベルでは 51W の EYDFA を試作している⁽⁴⁵⁾。なお、JDRS 用の HPA は、開発段階である。

光 HPA に関するもう一つの課題は、衛星搭載機器は宇宙線の影響を受け、かつ特に GEO は放射線量が高いため、EDF/EYDF が放射線劣化により透過損が大きく増加し光 HPA の出力が低下することである。現在のところ、10W 級の光 HPA を実現可能かつ耐放射線性の EYDF は欧州製のみ⁽⁴⁶⁾で、極めて高価格の上に経験的に供給が安定的とはいえない。そこで筆者のグループは、より性能の良い宇宙用 EYDF の研究開発を行っているところである⁽⁴⁷⁾。

(2) デジタルコヒーレント復調用の高速大容量 DSP 若しくは FPGA

JDRS, NASA の LCRD では、**3.**で述べたように復調技術として地上の光ファイバ通信では既にその使命を終えようとしている DD-DPSK を使用している。筆者らは 2020 年代後半の 20Gbit/s 化、あるいは更なる高速化に向けては、いわゆるデジタルコヒーレント方式の復調復号の適用を考えている。デジタルコヒーレント方式は、よく知られたとおり局発光と混合した信号光を電気信号に変換した後の処理をデジタル的に行う復調方式である。変復調、特に復調・復号で必要となる高速大容量 Digital Signal Processor (DSP), Analogue-to-Digital Converter (ADC), Digital-to-Analogue Converter (DAC) 等の高速動作する IC では、宇宙線、特に重粒子線によるビット反転 (SEU: Single Event Upset) 等に代表される、シングルイベント効果 (SEE: Single Event Effect) による誤動作の排除のため、SEE の影響を受けないデジタルデバイス、若しくは影響回避策の実現が必要である。

例えばデジタルコヒーレント技術を用いた 100Gbit/s のトランシーバを宇宙空間で用いた場

合、デジタルコヒーレントトランシーバの本体が最先端の高集積 DSP であることから、特に処理が複雑な復調復号部で SEE によるエラーを頻発することが予想される。

一方、放射線耐性のある宇宙機用の中央演算装置 (CPU: Central Processing Unit) / DSP は、地上の最先端品に比べて 10 年あるいはそれ以上前の性能となっており、最先端のデジタル処理技術を宇宙で使用するのには容易ではない。Statistic Random Access Memory (SRAM) 型の高速大容量 Field Programmable Gate Array (FPGA) を例にとると、現在、宇宙で使用可能と供給業者が保証しているものでは、Xilinx 社の Virtex-5⁽⁴⁸⁾ が最も高速大容量である。この Virtex-5 においても、宇宙放射線による誤りの影響を低減するため、内部への回路書き込み時にツールが自動的に三重多数決回路化（同時に同じ処理を三つ走らせ、仮に一つ誤っても多数決決定で正しい出力を得る）し書き込んでいる。Xilinx 社によると、数年前から Ultrascale+ の宇宙機搭載化を進めているとのことであり、近い将来使える見込みである。問題点は、一般的に高価な宇宙用部品（クラス 1 と呼ばれる最もグレードの高いものだと受注生産、全数全工程記録等を行うため）の中でも、FPGA は著しく高価なことである。ちなみに、宇宙用の Virtex-5 はポルシェが買える値段である。

なお、世界的にも雲が多い我が国にデータを下ろすためには、当面は光ではなく RF (Ka バンド) による、中継衛星から地上との高速回線が併せて必要と考えている (図 5)。高速な DSP, FPGA は高速 Ka バンド通信においても重要な技術課題であり、Ka バンドのフィーダリンクの高速化についても JAXA にて研究開発を行っている⁽⁴⁹⁾。

4.3 光ファイバ通信システム技術をそのまま使用する宇宙光通信構想

前項の技術は、地上の技術を宇宙用の耐放射線を有し、高い品質保証を行った部品（いわゆる宇宙用部品）を用いた装置を宇宙専用に開発しようというものである。容易に想像がつくと思うが、地上用装置に比べて著しく高価になりまた調達期間も長くなる。

近年、Facebook/MIT と、NASA/MIT-LL が別々に、光ファイバ通信用の 100Gbit/s、若しくは 200Gbit/s トランシーバモジュールを高度 400～1,000km の低軌道衛星に搭載し、低軌道衛星から地上へ 100～200Gbit/s の光通信を行うことを計画している^{(34), (50)}。この場合でも、放射線が比較的弱い低軌道において、かつ送信にのみ使用し、また

文献 (49) では地上での復調復号後、データの大きな誤りや欠落があれば再送制御を行う考え方を取っている。光データ中継衛星の静止軌道は、放射線の強いバンアレン帯 (Van Allen Belt) の外側であり、低軌道に比べてずっと 10 倍の放射線を浴びる。特に SEE を起こす重粒子が多く、現状では地上用の光ファイバ通信用のトランシーバモジュールが静止軌道で復調復号に使えるかどうかの検討や検証については世界的に未着手のままである。

一方、近年の論理回路の高集積化に伴い、地上の情報通信システムでも、宇宙からの粒子線によるエラーが問題となりその対策が必要とされている⁽⁵¹⁾。地上用のデジタルコヒーレントのトランシーバを含む超高速通信システムの衛星搭載化も、あるいはこういった取組みと、従来の宇宙での取組みとの融合で実現するものかもしれない。

5 結言

宇宙光通信の特徴・歴史を概観し、現在の研究開発動向を、特に大容量データ伝送の観点からまとめた。

最後に筆者の私見を述べる。我が国では、光ファイバが離島にまで行き渡り、山奥にでも行かない限り携帯電話が使える環境にある。そのため、宇宙通信というと非常時のみお世話になるという認識になってしまうが、世界的には光ファイバの恩恵を受けられない人々は「残り 30 億人 (Rest 3Billions)」も存在している。

光ファイバ通信技術はすばらしい技術であり、我々は日々その恩恵を受けている。しかし光ファイバはぜい弱なインフラであり、本論文執筆中にも伊豆諸島への光ファイバ海底ケーブルが故障し、伊豆諸島のインターネット・携帯サービス等が一時不通になったとの報道があった⁽⁵²⁾。思い出せば、東日本大震災の際には日本と世界を結ぶ海底ケーブルは大損害を受け、幸運にも生き残ったケーブルがあったため世界との通信は保たれた⁽⁵³⁾。

東日本大震災は未曾有の大災害とはいえ、被害地域はその名のとおり東日本の特に太平洋岸であったため光ファイバ海底ケーブルは全滅しなかった。しかし、災害ではなくいわゆる「有事」であれば、数の限られたぜい弱な光ファイバ海底ケーブルは格好の攻撃目標になり、現状では我が国は細い衛星通信回線しか使えなくなり、通信回線不足により、情報的に大混乱になるであろう。

3. で紹介したいいわゆる衛星コンステレーション

計画は、欧米の民間による主導で進んでいるが、島国である我が国こそ「いざ」というためのために、切実に必要としていると筆者は考えている。

最後に、本論文を読んでいるであろう若い読者にお願する。日常・国内の感覚で将来を考えるのではなく、非日常・グローバルに世界を俯瞰してあるべき将来を想像し、研究開発を進めて頂きたい。

■ 文献

- (1) A. Mody, E. Gonzalez, "An operator's view: The medium-term feasibility of an optical feeder link for VHTS," Proc. IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)2017, pp.288-295, Nov. 2017.
- (2) V. W. S. Chan, "Optical satellite networks," J. Lightwave Technol., vol.21, no.11, pp.2811-2827, Nov. 2003.
- (3) 荒木智宏, 稲岡和也, 田島成将, 島田政明, 嶋岡恭志, 大澤右二 "ALOS-2 ミッションを支える高速データ伝送システム (その1) 衛星間通信サブシステム", 第56回宇宙科学技術連合講演会予稿集 IK11, Oct.2012.
- (4) Z. Sodnik, B. Furch, and H. Lutz, "Optical Intersatellite Communication," IEEE J. SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, vol. 16, no. 5, pp.1051-1057, May 2010.
- (5) K. Araki, Y. Arimoto, M. Shikatani, M. Toyoda, M. Toyoshima, T. Takahashi, S. Kanda, and K. Shiratama, "Performance evaluation of laser communication equipment onboard the ETS-VI satellite," Proc. SPIE, vol. 2699, pp.52-59, March 1996.
- (6) T. Jono, Y. Takayama, K. Shiratama, I. Mase, B. Demekenne, Z. Sodnik, A. Bird, M. Toyoshima, H. Kunimori, D. Giggenbach, N. Perlot, M. Knappek, and K. Araki, "Overview of the inter-orbit and orbit-to-ground laser communication demonstration by OICETS," Proc. SPIE vol.6457, 645702, March 2007.
- (7) S.-K. Liao, W.-Q. Cai, W.-Y. Liu, L. Zhang, Y. Li, J.-G. Ren, J. Yin, Q. Shen, Y. Cao, Z.-P. Li, F.-Z. Li, X.-W. Chen, L.-H. Sun, J.-J. Jia, J.-C. Wu, X.-J. Jiang, J.-F. Wang, Y.-M. Haung, Q. Wang, Y.-L. Zhou, L. Deng, T. Xi, L. Ma, T. Hu, Q. Zhang, Y.-A. Chen, N.-L. Liu, X.-B. Wang, Z.-C. Zhu, C.-Y. Lu, R. Shu, C.-Z. Peng, J.-Y. Wang, and J.-W. Pan, "Satellite-to-ground quantum key distribution," Nature, vol.549, pp.43-47, Sept.2017.
- (8) さいとう・たかお, "ゴルゴ13「剥がれた鍍金」," ビッグコミック, 2001年12月号, Dec.2001. (現在入手可能な書籍はS Pコミックス ゴルゴ13 114巻, リイド社, 東京, 2006.)
- (9) D. Cornwell, "NASA's optical communications program for 2015 and beyond," Proc. SPIE vol. 9354, 93540E, March 2015.
- (10) A. Biswas, M. Srinivasan, R. Rogalin, S. Piazzolla, J. Liu, B. Schratz, A. Wong, E. Alerstam, M. Wright, W. T. Roberts, J. Kovalik, G. Ortiz, A. Na-Nakornpanom, M. Shaw, C. Okino, K. Andrews, M. Peng, D. Orozco and W. Klipstein, "Status of NASA's deep space optical communication technology demonstration," Proc. IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) 2017, pp.23-27, Nov.2017.
- (11) https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/services/networks/tdrs_main
- (12) H. Hauschildt, S. Mezzasoma, H. L. Moeller, M. Witting and J. Herrmann, "European data relay system goes global" Proc. IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) 2017, pp.15-18, Nov.2017.
- (13) SJSAT 2019年2月4日 プレスリリース「光データ中継事業の共同展開に向けてエアバス社と覚書を締結」(2019) https://www.sptvsat.com/load_pdf.php?pTb=t_news_&pRi=1380&pJe=1
- (14) D. Cornwell, "NASA's optical communications program for 2017 and beyond," Proc. IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)2017, pp.10-14, Nov.2017.
- (15) T. Shih, O. Guldner, F. I. Khatri, J. W. Murnside, C. De Voe, W. Hubbard, S. Constantine, J. Torres and B. S. Robinson, "A modular, agile, scalable optical terminal architecture for space communications," Proc. IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)2017, pp.213-217, Nov. 2017.
- (16) Y. Sato, Y. Miyamoto, Y. Takano, S. Yamakawa and H. Kohata, "Current status of Japanese optical data relay system (JDRS)," Proc. IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)2017, pp.250-252, Nov. 2017.
- (17) 山川史郎, "光データ中継衛星 宇宙利用拡大のためのインフラストラクチャ," OPTRONICS, vol.38, no.446, pp.72-77, Feb.2019.
- (18) <https://earthobservatory.nasa.gov/images/85843/cloudy-earth>
- (19) M. Toyoshima, T. Fuse, A. Carrasco-Casado, D. R. Kolev, H. Takenaka, Y. Munemasa, K. Suzuki, Y. Koyama, T. Kubo-oka, and H. Kunimori, "Research and development on a hybrid high throughput satellite with an optical feeder link — Study of a link budget analysis" Proc. IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)2017, pp.277-282, Nov. 2017.
- (20) 久保岡俊宏, 宗正 康, "技術試験衛星9号機における光フィーダリンクシステムの開発と今後の展望," OPTRONICS vol.38, no.446, pp.78-82, Feb.2019.
- (21) <http://www.cast.cn/Item/Show.asp?m=1&d=5725> (in Chinese)
- (22) <http://stage.tksk.jaxa.jp/ccsds/index.html>
- (23) [https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink_\(satellite_constellation\)#Satellite_hardware](https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink_(satellite_constellation)#Satellite_hardware)
- (24) <https://spacenews.com/spacex-launches-60-starlink-satellites-begins-constellation-buildout/>
- (25) <http://leosat.com/>
- (26) D. Schneider, "WALL STREET TRIES SHORT

- WAVE RADIO,” IEEE spectr. Jul 2018, p.12, July 2018.
- (27) https://www.dlr.de/kn/Portaldaten/27/Resources/dokumente/02_aktuelles/3-d_OTH-OEI-OPTE-OLEODL_Nov_2016_OPTEL-u.pdf
- (28) <http://www.tesat.de/en/laser>
- (29) <https://mynaric.com/>
- (30) H. Hauschdit, “HydRON: High throughput optical network,” Proc.Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXXI, Proc.SPIE vol. 10910, 109100K, Feb./ March 2019.
- (31) <https://loon.com/>
- (32) B. Moision, B. Erkmen, E.Keyes, T. Belt, O. Bowen, D. Brinkley, P. Csonka, M. Eglington, A. Kazmierski, N.-h. Kim, J. Moody, T. Tu, and W. Vermeer, “Demonstration of free-space optical communication for long-range data links between balloons on Project Loon,” Proc.Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXIX, Proc. SPIE vol.10096, 100960Z, March 2017.
- (33) H. Hematti, “Lower frequency bands emerging as valid alternatives to free-space lasercom in terrestrial, aerial, and satellite links,” Proc.Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXXI, Proc. SPIE vol. 10910, 1091013, March 2019.
- (34) R. J. Aniceto, “Heavy Ion radiation assessment of a 100G/200G commercial optical coherent DSP ASIC,” Proc. Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXXI, Proc. vol.10910, SPIE 1091011, March 2019.
- (35) K. Iwamoto, Tomohiro Araki, Yuta Kobayashi, Hirotaka Sawada, Taiji Ito, Takeshi Sano, Yasuhiro Takeshita, Shinji Ota, Mituhiro Ueno, Kei-ichi Shibata, Takashi Nakao, and Hiromitsu Komatsu, “Experimental verifications on small optical inter-satellite communication system for small and micro satellites,” Proc. IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)2017, pp.59-62 Nov. 2017.
- (36) 岩本匡平, “光ディスク技術を用いた小型宇宙光通信モジュールの研究開発,” OPTRONICS, vol.38, no.446, pp.94-97, Feb.2019.
- (37) http://www.jaxa.jp/press/2018/02/20180208_i-seep_j.html
- (38) 豊嶋守生, “特集 光技術×宇宙通信 総論,” OPTRONICS, vol.38, no.446, pp.66-71, Feb.2019.
- (39) 荒木智宏, 小林雄太, “宇宙光通信の最新動向とJAXAにおける研究開発,” 信学技報, WBS2016-47, Oct.2016.
- (40) 荒木智宏, “宇宙光通信の現状, 将来と技術課題,” 信学技報, OCS2018-22, Aug. 2018.
- (41) <https://public.ccsds.org/review/default.aspx>
- (42) T. Araki, “A study of the future optical data relay system; requirements, problems and solution,” Proc. IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications(ICSOS)2017, pp.209-212. Nov. 2017.
- (43) F. Hakimi, E. S. Kintzer, and R. S. Bondurant, “High-power single-polarization EDFA with wavelength-multiplexed pumps,” CWK1 CLEO’98, May 1998. に基づくものとNASAから聞いている.
- (44) S. Gupta, D. Engin, D. Packowicz, J.-L. Fournon, J. Lander, X. Dang, S. Litvinovich, T. Chuang, K. Puffenberger, F. Kimpel, and R. Utano, “Development, testing and initial space qualification of 1.5- μ m, high-power (6W), pulse-position-modulated (PPM) fiber laser transmitter for deep-space laser communication,” Proc. Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVIII, Proc.SPIE vol.9723, 97390V, March 2016.
- (45) D. Engin, J. Rudd, “51W, 1.5 μ m, 7 WDM (25nm) channels PPM downlink Tx and 500W, 1 μ m, uplink PPM Tx for deep space lasercom,” Proc. Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXXI, Proc.SPIE vol. 10910, 109100L, Mar. 2019.
- (46) <https://photonics.ixblue.com/store/lasers-amplifiers-fibers/rad-hard-space-grade-doped-fibers>
- (47) Y. Kobayashi, E. H. Sekiya, K. Saito, R. Nishimura, K. Ichii, and T. Araki, “Effects of Ge co-doping on p-related radiation-induced absorption in Er/Yb-Doped optical fibers for space application,” IEEE J. Lightwave Technol., vol.36, issue13, pp.2723-2729, March 2018.
- (48) https://japan.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds192_V5QV_Device_Overview.pdf
- (49) C.Kato, Mitsuhiro Nakadai and Masanobu Yajima, “Performance evaluation of Ka-band telecommunication subsystem for earth observation satellites,” Proc. 23rd Ka and Broadband Communications Conference, ka19-3. Oct. 2017.
- (50) B. S. Robinson, “TeraByte infraRed delivery (TBIRD): a demonstration of large-volume direct-to-earth data transfer from low-earth orbit,” Proc. SPIE Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXX, vol. 10534, 105240V, March 2018.
- (51) 岩下秀徳, “宇宙線による通信装置のソフトウェアへの取組と国際標準化活動,” ITUジャーナル, vol.47, no.1, pp.37-49, Jan.2017.
- (52) https://www.ntt-east.co.jp/tokyo/info/detail/1258503_2608.html
- (53) https://www.kddi.com/corporate/news_release/2011/0408/pdf/besshi2.pdf

(2019年5月28日受付, 7月16日再受付)

荒木智宏 (正員)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 研究開発部門所属, 主任研究開発員/光通信研究サブリーダー. 1992 慶大大学院理工学研究科修士課程了 (電気). レーザ工学を専攻. 1992 宇宙開発事業団に入社. 光衛星間通信衛星「きらり」の研究開発, 宇宙光通信技術の研究開発, 国際宇宙ステーション (ISS) 日本実験モジュール (JEM) 開発プロジェクト業務, 等に従事, 現在に至る.