

光データ中継システムの検討

荒木智宏[†] 市川 愉[†] 谷島 正信[†]

[†] 宇宙航空研究開発機構(JAXA) 研究開発本部 通信・データ処理グループ
305-8505 つくば市千現 2-1-1

E-mail: [†] {araki.tomohiro, ichikawa.satoshi, yajima.masanobu}@jaxa.jp

あらまし 2020 年代の高分解能地球観測ミッション等をサポートする、2Gbps 程度的高速データ中継を実現する光データ中継システムの検討結果を報告する。併せて 2030 年代の更なる超高速化の実現方法について述べる。

キーワード 光 データ中継

A study of Optical Data Relay system

Tomohiro ARAKI[†] Satoshi Ichikawa[†] and Masanobu Yajima[†]

[†] Telecommunications and Data Handling Group, Aerospace Research and Development Directorate,
Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

2-1-1 Sengen, Tsukuba-city, Ibaraki 305-8505 Japan

E-mail: [†] {araki.tomohiro, ichikawa.satoshi, yajima.masanobu}@jaxa.jp

Abstract We report a study results of from 2 Gbps optical data relay system in 2020s to support earth observation satellites and so on. In addition, our study of much-higher optical data relay system in 2030s also reported.

Keyword Optical, Data relay

1. はじめに

2020 年代に向けて、地球観測衛星搭載観測センサの高分解能化等により宇宙からのデータ伝送需要の増大が想定される。そのため JAXA では、「きらり」(Optical Inter-orbit Communications Test Satellite, OICETS)による、欧州 Artemis 衛星との光衛星間通信実験等^[1]に引き続き、光データ中継システム及び光衛星間通信技術の研究を進めている^{[2][3]}。2020 年頃の需要に対応するため、伝送レート（光衛星間通信の変復調レート）としては 2.5Gbps 程度を目標としている。我々が考える、2020 年頃の光データ中継システムのイメージを、図 1 に示す。

本稿では、参考文献[3]に引き続き、変復調速度 2.5Gbps 程度（ユーザ伝送レート 1.8Gbps）からの更なる高速化について検討した結果を報告する。

2. 光データ中継システム構想

本章では、海外の光衛星間通信を用いたデータ中継

システム構想と JAXA の構想を示し、その対比を行う。

海外の光データ中継システム構想の状況は、欧州 (ESA) に関しては [4][5]、米国 (NASA) に関しては [6][7][8]を参照されたい。

次に、JAXA が検討している光データ中継システム構想の前提について述べる。データ中継システムでの、データ中継衛星から地上へのフィードリンク回線には、RF(Ka バンド)と光が考えられる。我が国の天気は曇りがちで、国内に乾燥地帯が無いことを考えると、国内での光によるフィードリンク回線の安定的な運用は困難であるため、データ中継衛星から地上への回線は、RF(Ka バンド)で実現する必要があると考える。

更に、2020 年代に変復調速度 2.5Gbps 程度（ユーザ伝送レート 1.8Gbps）が必要となることに加え、将来の地球観測衛星において、更なる高分解能化と発生データ量の増大が予想されることから、2030 年代のデータ中継システム／光衛星間通信においては 10Gbps 以上への更なる高速化が必要であると考えられる。

これらの前提を踏まえ、表－1 に海外と JAXA の構想の比較結果をまとめる。

結果として、ESA EDRS も NASA LCRD(及び将来の TDRS)は、相互にインタオペラビリティを有しないと共に、共に JAXA の構想に合致しないことが判った。

よって、我が国としての将来のニーズを満たす為、JAXA 独自の光データ中継システムの実現が必要である。

上記を受け、我々が検討した変復調速度 2.5Gbps 程度を目標とした光データ中継システム構想の概要（一つの検討例）についてまとめる。

以下の 2 点を、検討の前提として前記に加える。

- ▶ 開発時のリスクを極力小さくするため、光部品を除く電子部品は、現段階で搭載用として使用可能なもののみを使用する。
- ▶ 光データ中継衛星上でのデジタルデータ処理は、極力行わない。これは、DRTS は 15 年寿命が要求されるため、極力単純な構成とするためである。

これらの前提を満たす光データ中継システムとして、図－2 に示す構成を提案した^[3]。

光衛星間通信装置の実現のみならず、RF(Ka バンド)フィーダリンクの 2Gbps への高速化が併せて必要である。参考文献[9]に示す 16QAM 変調器の開発実績を踏まえ、実現する考えである。

更に、次章では、本章を踏まえたユーザ伝送レート 10Gbps 以上への更なる高速化を目指したシステム検討の結果を紹介する。

3. 更なる高速化の検討

前項で示した 2.5Gbps（変復調レート。ユーザデータレートは 1.8Gbps）からの、更なる高速化への方策を検討した。目標通信速度は、ユーザ伝送レートで 10Gbps 以上とする。

高速化への方策として、まず、光衛星間通信に関しては、以下の 3 方策を検討し、比較した。

①シリアル伝送高速化： 光衛星間通信装置での 1 チャンネルの変調速度を、BPSK のまま高速化する。この場合、変復調部の高速化に伴い、10Gbps 以上の S 高速シリアル伝送系の実現、30W 近い偏波保持型の高出力光増幅器の実現など、大きな技術課題が発生する。

②多値変調化： 光衛星間通信装置での変調方式を、BPSK から多値変調方式とする。

地上の光ファイバ通信では、光 QPSK 変復調が広く使われている。この方式では 2 倍の高速化が可能である。光変調器の搭載化には大きな課題は無く、復調器も BPSK/DPSK 復調技術の延長線上で実現可能である。また、地上光ファイバ通信システムでは光 16QAM が

実用化途上にある。この技術を搭載化にはデジタル復調技術の搭載化が必要であり、デジタルデバイスに大きな課題がある。①と同じく偏波保持型の高出力光増幅器の実現も大きな課題である。

③波長多重化： 3 項の変復調速度 2.5Gbps 伝送システムを波長多重化する。例えば、6 波多重で、ユーザ伝送レート 10.8Gbps となる。3 項の実績を踏襲するので、実現に当たってのリスクは少ない。但し、変復調部が並列に搭載されるので、質量・電力がかさむ。

以上からの比較の結果を、表－2 にまとめる。

結論として、実現性の観点から、現時点では波長多重方式が、光データ中継衛星上でデータ処理が発生しないこと、新しい高性能デバイスの開発が不要であることから、適切であると考ええる。波長多重方式の場合の構成を、図－3 に示す。なお、送信側の高出力増幅器の高効率化は、全方式に共通の課題である。

なお、光データ中継衛星から地上へのフィーダリンクは、引き続き RF で行うこととし、3 章の段階で実現される 2Gbps の Ka バンドフィーダリンク回線の偏波多重、マルチビーム化で対応することを考えている。

なお、フィーダリンクの光化の実現には、サイトダイバシティと欠落データの再送制御のための途絶補償ネットワーク(DTN)技術の使用が必要となり、データ中継衛星上の大容量記録装置、データ処理が前提となるため、実現には大きな課題があると考えている。

4. 将来の波長多重化を実現する際の課題

将来の波長多重化を実現する際の課題は、波長多重分離方式を採用するとして、

- ①高出力光増幅器の高効率化
(1 波長あたりの、送信電力低減)
- ②波長多重化／分離部の実装である。

この内、①については、(a)波長 1.5 μ 帯の場合、光ファイバ増幅器(EDFA)の高効率化が必要となる。EDFA は地上の光ファイバ通信で多用されているが、高効率化は全く要求されていない（一般に、電気－光変換効率は数%に過ぎない）ため、10Gbps 級への更なる高速化にあたっては、送信側の消費電力を極力抑えるため、高効率化研究を行う必要がある。(b)波長 1 μ 帯では、イッテルビウム(Yb)を媒質に用いた増幅器が適当であると考えるが、Yb 媒質の増幅器(イッテルビウム添加光ファイバ増幅器(YDFA))は国内では実績が無いため、民生品として実績のあるイッテルビウム添加光ファイバレーザ(YDFL)の技術^{[11][12]}を踏まえた原理実証レベル（Technical Readiness Level (TRL) 3 の実現）からの研究開発を行う必要がある。但し、YDFA

は実現出来れば電気－光変換効率が低い（20%以上）と予想されることが魅力的である。

②については、合波・分波用の光学素子追加が必要であり、部分的な試作による検証が必要と考えている。

5. 結び

光データ中継システムの研究成果として、データレートが 2Gbps 級のシステムの構想を概説した。更に、データレートが 10Gbps 級の将来システムについて、方式のトレードオフを行った結果を報告した。

光データ中継システムは、これまで ALOS 後継ミッションといった大型地球観測衛星ミッションをユーザとして想定して研究を進めてきた。新たなユーザとして航空機への対応も考えられる状況になってきたため、今後はこれらへの対応についても研究を行っていく。

文 献

- [1] T. Jono, et.al., “Overview of the inter-orbit and orbit to-ground laser communication demonstration by OICETS,” Proc. SPIE, Vol. 6457, 645702, 2007.
- [2] 荒木他、「高速・小型・長寿命な光衛星通信システムの実現へのアプローチ」第 57 回宇宙科学技術連合講演会 1H06(2013)
- [3] T. Araki et.al, “The Approach to Realize a

Higher Speed, More Compact and Longer-Lasting Operational Optical Space Communications System” Proceedings of International Conference of Space Optics and System, S3-2 (2014)

[4] http://www.esa.int/Our_Activities/Telecommunications_Integrated_Applications/EDRS

[5] Harald Hauschildt et.al., “European Data Relay System - One Year to Go!” Proceedings of International Conference of Space Optics and System, S1-3 (2014)

[6] B.Edwards et.al., ” A Space Based Optical Communications Relay Architecture to Support Future NASA Science and Exploration Missions” Proceedings of International Conference of Space Optics and System, S6-1 (2014)

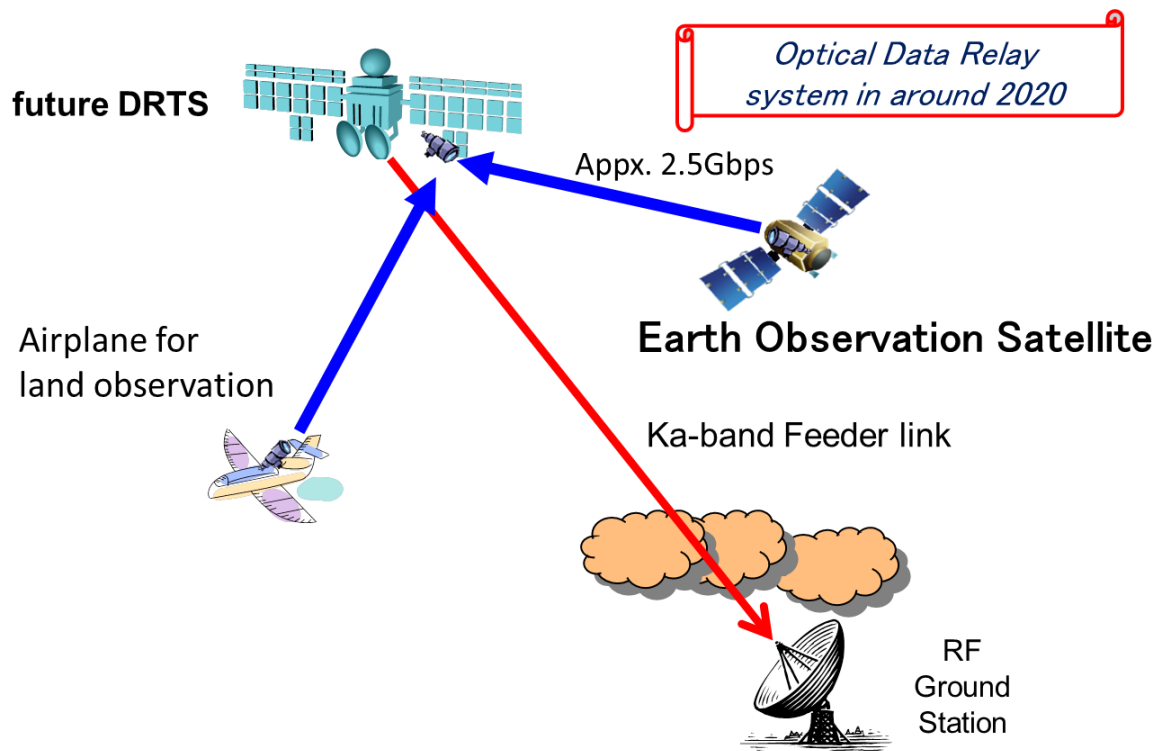
[7] D. M. Boroson, et.al., “Overview and results of the Lunar Laser Communication Demonstration” Proc. SPIE 8971, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVI, 89710S (2014);

[8] D. M. Boroson, et.al., “Overview of the Lunar Laser Communication Demonstration” Proceedings of International Conference of Space Optics and System, S1-2 (2014)

[9] 稲岡和也 他、「高速マルチモード変調器の開発」第 55 回宇宙科学技術連合講演会予稿集 3D11 (2012)

[10] <http://www.furukawa.co.jp/fiber-laser/products/fiber.htm>

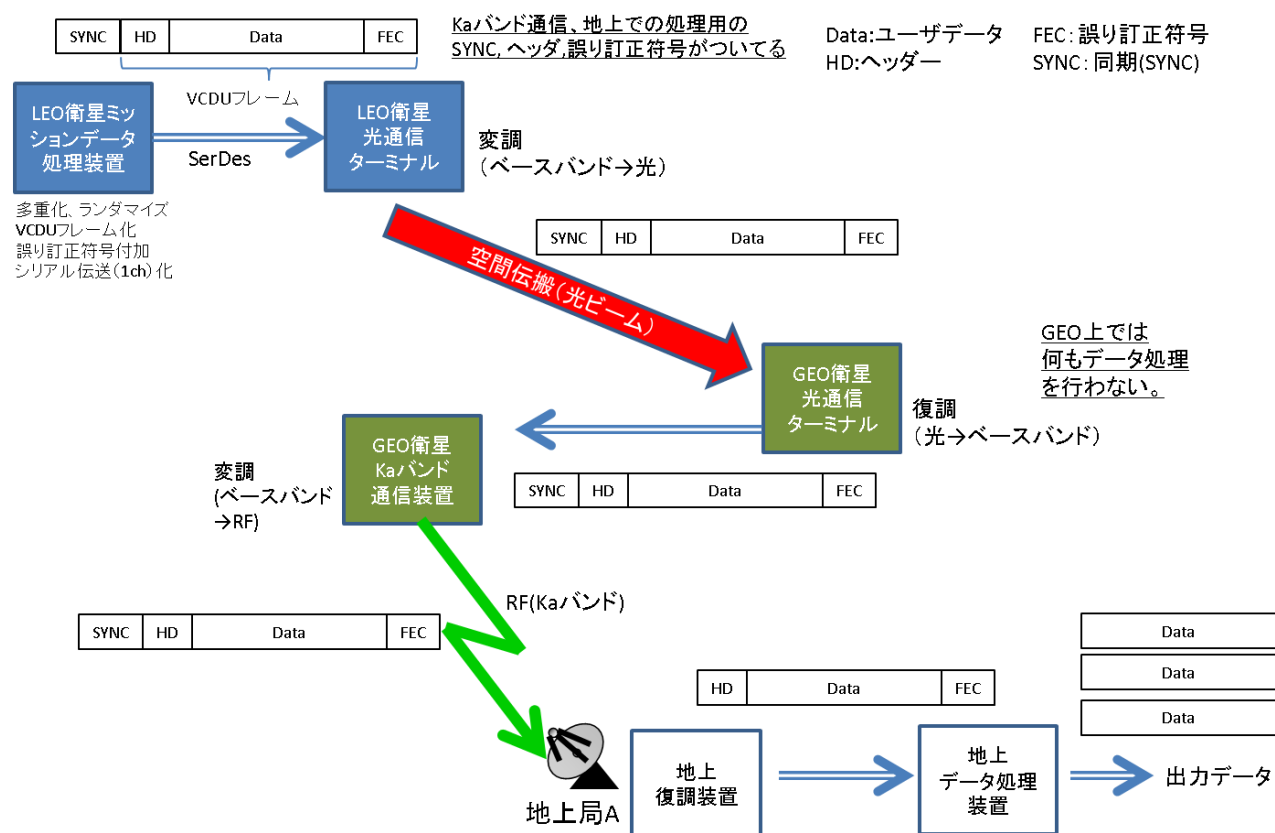
[11] <http://www.fiberlaser.fujikura.jp/>



図一 1 2020 年代の光データ中継システム

表一1 ESA EDRS, NASA LCRD(TDRS)と, JAXA のデータ中継システム構想の比較

	ESA EDRS ^{[4][5]}	NASA LCRD(TDRS) ^[6]	JAXA データ中継システム構想 ^[3]
実現時期	2015	2018 (LCRD, 実験) 2025 以降 (TDRS)	2020 頃
使用波長帯	1064nm	1550nm 帯	1064nm or 1550nm 帯
変復調方式	BPSK ホモダイン	DD-DPSK	BPSK ホモダイン 若しくは DD-DPSK
データレート	光変復調速度 2.8125Gbps ユーザ伝送レート 1.8Gbps	光変復調速度 2.88Gbps ユーザ伝送レート 1.244Gbps	光変復調速度 2.5Gbps(暫定) ユーザ伝送レート 1.8Gbps 以上
地上への回線	Ka バンド (ユーザ伝送レート 450Mbps×4)	光 砂漠の中にある, ホワイトサンズ光地上局で受信する.	Ka バンド 2Gbps 程度 (光の衛星-地上回線は, 雲で切れてしまうため, 不適)
GEO 上でのデータ処理の有無	有. EDRS(GEO)上での, 誤り訂正を含む複雑なデータ処理を実施している.	無 (DD-DPSK 時) 大気伝搬を前提とし, 重い誤り訂正符号を付加しているが, 誤り訂正処理は地上で行う.	無
高速化予定	なし (ニーズが無いとの事)	有り. 10Gbps 以上.	有り. 10Gbps 以上.
我が国の必要性との合致	否	否	—

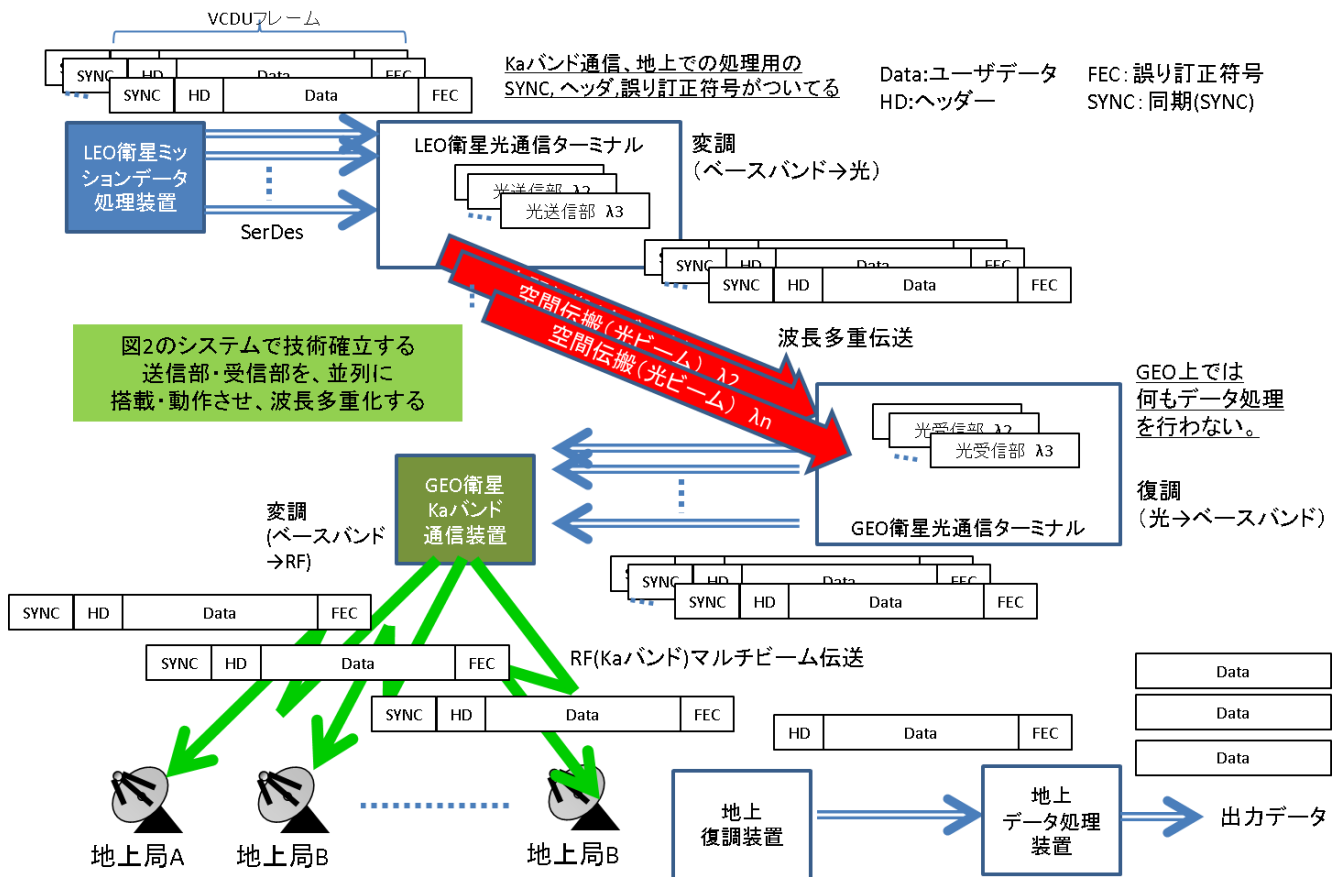


図一2 光データ中継システムにおけるデータの流れ(概念図)

表－2 高速化のための方策のトレードオフ（ユーザ伝送レート 1.8Gbps から、その 6 倍の 10.8Gbps の場合）

	シリアル伝送高速化	多値変調化	波長多重化
概要	衛星内の伝送を行うシリアル伝送系を、10Gbps 以上に高速化する。	RF 通信と同様に、QPSK、16QAM 等の多値変調方式を導入する。 復調器は、QPSK までは地上実績を元に実現可能。 これ以上の多値化には、復調器はデジタル化が必要	3 項で示した 1ch 伝送系の送受信部を、必要数並列化する。
利点	光送信機/受信機は 1 台のままで、質量は微増。	光送信機/受信機は 1 台のままで、質量は微増。	2020 年代に実現する光送信部・受信部実績をそのまま活用できる。 光送信部の多波長合波機能、受信部の波長分離機能の追加のみが新規。
課題	・高速(>10Gbps)シリアル伝送系の搭載化が必要 ・高出力光増幅器の高出力・高効率化	・デジタル多値変調の復調に必要なデジタルデバイスは、高速化が必要 ・高出力光増幅器の高出力・高効率化	・合波器、分波器の、試作による確認。特に受信部で ch 間の干渉が無いことの確認が必要。 ・高出力光増幅器の高効率化
欠点	光増幅器の高出力化（5W→27W 程度）は困難	光増幅器の高出力化（5W→27W 程度）は困難	送受信機が、多重数分必要となり、質量・電力がかさむ。
総合評価	×	×	△（波長 1064nm） ◎（波長 1550nm 帯）

注：捕捉追尾に必要な光量は増えないため、必要な送信光出力は 6 倍にはならない。



図－3 波長多重化時のデータの流れ(概念図)