

将来月探査ミッションに向けた光通信捕捉追尾の基礎検討

Basic Study on Acquisition and Tracking of Optical Communication for Future Lunar Exploration

小林雄太 向井達也 荒木智宏
Yuta Kobayashi Tatsuya Mukai Tomohiro Araki

宇宙航空研究開発機構 研究開発部門
JAXA, Research and development Directorate

1. はじめに

2015 年 12 月, はやぶさ 2 は, SELENE, はやぶさでも搭載実績があるレーザー高度計 (LIDAR) を用いて, 光地球局 (豪州) から深宇宙への 1way アップリンク光リンクの確立に成功した[1]. 超遠距離通信が必要な深宇宙探査において, 光通信は, 既存 RF 通信よりも小型で高速な通信を可能にする新たな手段として期待され[2], NASA・ESA は月探査機 (LADEE) と光地球局間の直接伝送に成功している[3]. RF よりも極めてビームが細い光通信では, アンテナ同士を高精度に正対させるための指向・捕捉追尾が重要になる. 深宇宙探査でも, 地球近傍と同様に光地球局のビーコン光を用いた捕捉追尾が必要であるが, 航空保安の観点で, レーダー監視し, 航空機が照射範囲に侵入する場合は, ビーコン光を停止させる安全対策が必要となる [4]. こうした安全対策を具備したビーコン光を用いた捕捉追尾に加え, 光が届かない距離でのビーコンレスな捕捉追尾も深宇宙探査では必要となる. 本稿では, この中で安全対策を前提とした捕捉追尾の定量的な回線規模を把握するため, NICT 開発の光通信機器 (SOTA) [5]規模の機器を搭載した月探査機と光地球局間において, 光データ中継衛星[6]と同等な空間走査による捕捉追尾手法を適用した際の検討結果を示す.

2. 月探査機との光通信回線検討

月探査機と光地球局間の捕捉追尾・通信回線の計算結果を表 1 に示す. 本検討では, アップリンク波長 1.56 μm , ダウンリンク波長 1.54 μm とし, 地上側送信光アンテナは直径 5 cm, 受信光アンテナは直径 1 m, 送信電力は 80 W とした. 搭載側はリソースが限られるため, 送受共に SOTA 規模の直径 5 cm の光アンテナとし[5], 送信電力は 2.5 W とした. 各損失や指向精度等はこれまでのミッションの値を参考とし, 要求受光レベルは, 背景光除去技術を考慮し, 読み出し速度を遅くすることで, 感度を向上させている. その分, 捕捉追尾に必要な走査時間は長くなるが, 運用時間に対しては十分短くできる. なお, アップリンクは捕捉追尾のみを考慮し, ダウンリンク通信回線は, SSPD 検出器を想定に含め, LADEE の実績をベースに 3 photons/bit のセンサ感度とした[7]. 表 1 より, 今回検討の小型光通信システム規模で, 捕捉追尾回線並びに 600 Mbps 程度の通信回線が成立することが分かる. これは, 現行の X 帯 RF 通信と比べて, 小型かつ一桁以上の高速化の実現となる. 捕捉追尾に関して, 搭載地上間は単一ビーム走査を想定しているが, 航空保安を確保しつつ大気影響を軽減する策として, マルチビーム化することや, 深宇宙への幅広い適用に向けたビーコンレスの捕捉追尾手法の確立等が今後の課題と言える. また, 地上側の高出力光増幅器, 更なる高速化のための搭載側の高効率光増幅器の実現に加え

て, 高精度なアンテナ予報値や厳しい姿勢安定精度の実現も今後の課題となる.

3. まとめ

本稿では, 現時点で実現可能と考える光通信機器の性能, 光データ中継衛星の捕捉追尾手法を用いた月探査機と地上間の光通信回線の検討を行い, 既存の RF 通信と比べて, 光通信は, 小型で高速な通信が可能であることを示した. 本手法は, 航空保安技術を持つ光地球局を必要とするため, 今後, 詳細なシステム検討を進めていく予定である.

- [1] はやぶさ 2HP : http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20151225_02/
[2] 向井達也, 他 “深宇宙探査の光通信技術獲得に向けた実験システム検討,” 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 2015 年 10 月.
[3] Don M. Boroson, et al., “Overview and Results of the Lunar Laser Communication Demonstration,” *Proc. SPIE*, vol. 8971, 89710S, pp. 1-11, 2014.
[4] IOAG. T. OLSG. 2012. V1, “Optical Link Study Group Final report”
[5] 宗正康, 他 “超小型光通信機器(SOTA)軌道上通信実験(I), ” 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 2015 年 10 月.
[6] S. Yamakawa, et al., “JAXA’s Optical Data Relay Satellite Programme,” *Proc. ICSOS*, New Orleans, USA, Oct. 2015.
[7] M. M. Willis, et al., “Performance of a Multimode Photon-Counting Optical Receiver for the NASA Lunar Laser Communications Demonstration,” *Proc. ICSOS*, France, Oct. 2012.

表 1 月探査機との光通信回線計算

| | DL 捕捉 | DL 通信 | UL 捕捉 | UL 追尾 |
|----------------------------|------------|------------|-------------|-------------|
| 波長[μm] | 1.54 | 1.54 | 1.56 | 1.56 |
| 送信出力[W] | 2.5 | 2.5 | 80 | 80 |
| 送信光学系効率[dB] | -1.61 | -1.61 | -1.61 | -1.61 |
| 送信光アンテナ径[cm] | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 |
| 送信アンテナ利得[dB] | 99.28 | 99.28 | 99.17 | 99.17 |
| EIRP[dBm] | 131.65 | 131.65 | 146.59 | 146.59 |
| 送信光拡がり角[μrad] | ± 19.6 | ± 19.6 | ± 19.85 | ± 19.85 |
| 指向精度[μrad] | ± 15.0 | ± 5.0 | ± 15.0 | ± 5.0 |
| ポインティング損失[dB] | -2.09 | -0.23 | -2.03 | -0.22 |
| 波面精度損失[dB] | -1.01 | -1.01 | -1.01 | -1.01 |
| 伝搬距離[km] | 380000 | 380000 | 380000 | 380000 |
| 自由空間損失[dB] | -309.83 | -309.83 | -309.72 | -309.72 |
| 大気損失[dB] | -6.00 | -6.00 | -6.00 | -6.00 |
| 受信光アンテナ径[cm] | 100 | 100 | 5.0 | 5.0 |
| 受信アンテナ利得[dB] | 126.19 | 126.19 | 100.06 | 100.06 |
| 受信光学系効率[dB] | -6.38 | -6.38 | -4.56 | -4.56 |
| センサ受光レベル[dBm] | -67.47 | -65.61 | -76.68 | -74.86 |
| データレート[Mbps] | N/A | 600 | N/A | N/A |
| BER | N/A | 1.00E-4 | N/A | N/A |
| センサ感度[Photons/bit] | N/A | 3.0 | N/A | N/A |
| 要求受光レベル[dBm] | -70.0 | -66.34 | -77.0 | -77.0 |
| マージン[dB] | 2.53 | 0.73 | 0.32 | 2.14 |