3-3 地上に設置した光衛星間通信機器エンジニ アリングモデルと静止衛星 ARTEMIS との 光適合性試験

3-3 Optical Compatibility Test between an Engineering Model of the Laser Utilizing Communication Equipment on Ground and the ARTEMIS Satellite in a Geostationary Earth Orbit

豊嶋守生 山川史郎 山脇敏彦 荒井功恵 Marcos REYES Angel ALONSO Zoran SODNIK Benoit DEMELENNE TOYOSHIMA Morio, YAMAKAWA Shiro, YAMAWAKI Toshihiko, ARAI Katsuyoshi, Marcos REYES, Angel ALONSO, Zoran SODNIK, and Benoit DEMELENNE

要旨

衛星打ち上げ前に光のインタフェースを確認するため、地上に設置された光通信機器と、38,000 km 離れた静止軌道上にある光通信ペイロードの間で、地上-静止衛星間の光通信実験が行われた。実機で の総合的な光の特性として、強度、感度、波長、偏光及び変調方式等が捕捉追尾シーケンスと共に試 験され確認された。ダウンリンクのビット誤り率は、大気ゆらぎの存在下においても 10⁻¹⁰ 台を記録 した。大気の擾乱層が地表に近いため、アップリンクへの影響の方が大きく、アップリンクのビット 誤り率は最良値で 2.5 × 10⁻⁵ となった。地上-衛星間のレーザ回線を用いて、光アンテナのファー フィールドパタンも測定された。これらの結果より、光通信回線においてさらに高精度な動的な設計 が可能となり、光通信システムの設計に貢献する結果が得られた。

A ground-to-space laser communications experiment was conducted to verify the optical interfaces between a laser communications terminal in an optical ground station and an optical payload onboard a geostationary satellite 38,000 km away before the launch of the satellite. The end-to-end optical characteristics such as intensity, sensitivity, wavelength, polarization, and the modulation scheme of optical signals as well as acquisition sequences of the terminals were tested under fairly good atmospheric conditions. The downlink's bit error rate was on the order of 10^{-10} in spite of atmospheric turbulence. Atmospheric turbulence induced signal fading increased the uplink bit error rate, the best value of which was 2.5×10^{-5} because the turbulent layer near the earth surface affects the uplink signal more than it does the downlink one. The far-field optical antenna patterns were measured through the ground-to-satellite laser links. From these results, a more accurate dynamic link design of the optical communications link can be performed that would be useful for system designers, especially for designers of optical commercial systems.

[キーワード]

大気ゆらぎ、光地上局、静止軌道衛星、空間レーザ光通信

Atmospheric turbulence, Optical ground station, Geostationary earth orbit, Free-space laser communications



1 はじめに

光衛星間通信実験衛星「きらり」(OICETS) は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)により開発 された。本プロジェクトは、欧州宇宙機関 (ESA)の協力により行われた。OICETSは、 レーザの捕捉追尾と通信を軌道上で可能とする、 光衛星間通信機器(LUCE)を搭載している。プ ロトフライト試験は2002年1月に終了した[1]。 打ち上げ後に欧州側と日本側のインタフェースの 齟齬があるリスクを回避するために、2003年9 月8~16日に衛星の実機を用いてレーザの捕捉 追尾と通信を検証する光適合性試験が実施され た[2][3]。本試験では、LUCEのエンジニアリン グモデル (EM) が、スペインテネリフェ島にあ る ESA の光地上局 (OGS) の隣にセットアップ され、静止軌道(21.5°E)にある先端型データ中 継衛星(ARTEMIS)に搭載されている SILEX 用光ペイロード (OPALE) 間で光通信を確立す る。本実験の目的は、実機での総合的な光の特性 として、強度、感度、波長、偏光及び変調方式等 が捕捉追尾シーケンスと共に試験を実施し適合性

を確認するためである。

2 光適合性試験の構成

図1に光適合性試験の実験構成を示す。また、 図2にその時の写真を示す。電波で通信を行う ESAの地球局は、ベルギーのReduにあり、 ARTEMIS からのテレメトリを受信し、その フィーダリンクが通信試験中に使用された。カナ リア諸島には、高い標高を持つ山々があり、シー イング条件が非常に良く、様々な実験を行うのに 最適な場所である。ESA 光地上局は、標高 2,393 m にあり、大気の逆転層の上に位置してお り、山頂は非常に穏やかである[4][5]。大気ゆら ぎの構造パラメータは、 C_n^2 (2,393 m) = 0.698 × 10⁻¹⁴ m^{-2/3} である。静止衛星 ARTEMIS の方 向は、光地上局から見て方位角 123°、仰角 37° の方向である。大気のコヒーレンス長とシーイン グサイズは、ARTEMISの方向において23 cm と 0.76 arcsec である。ビームの諸元を表1に示 す[6][7]。





図 2 テネリフェにおける LUCE エンジニアリ ングモデルと ESA OGS の望遠鏡の写真

3 試験結果と議論

3.1 回線確立統計

図3に光適合試験における回線確立の統計結 果を示す。試験は32セッションが実施され、そ れぞれ 20 分間行われた。光リンクの確立は 78% の割合で成功し、22%の割合では雲やその他の 要因で光リンクは確立できなかった。LUCEの みでの1本のレーザビーム伝送は、双方向のリ ンクが確立した47%に含まれるが、大気ゆらぎ のフェージングの影響が大きかった。図4に示 すように、ESA OGS からは、大気ゆらぎを低減 するために4本のレーザビームが伝送された[8]。 図5にLUCEのみの場合と、ESA OGS との同 時伝送の場合のアップリンクの確率密度分布 (PDF)の比較例を示す。OGSの役割は、LUCE の初期捕捉を助け、OPALE 間の光リンクを安定 に保持するためである。LUCE 単独での初期捕 捉にもレーザ変調がCW モードにおいて成功し、

表 レーサビームの諸元		
Terminal	OPALE heam (s)	LUCE FM beam
Wavelength	(Beacon: 801 nm)	Communication: 847 nm
Beam diameter $(1/e^2)$	125 mm (at telescope aperture)	120 mm (at telescope aperture)
Transmitted power	10 mW (at telescope aperture)	40 mW (at telescope aperture)
Signal format	$2 \mathrm{PPM}$	NRZ
Data rate	2.048 Mbps	49.3724 Mbps
Polarization type	LHCP	LHCP

LHCP: Left Handed Circular Polarization, 2 PPM: 2-Pulse Position Modulation, NRZ: Non Return to Zero.





また、すべての通信セッションにおいて、一旦地 上-衛星間光回線が確立されると、LUCE 単独で 通信を維持することができた。

3.2 ダウンリンク

ESAのOPALEペイロードは、2.048 Mbpsの 通信速度で通信ビームを送信する。ダウンリンク の信号変動にかかわらず、測定されたビット誤り 数は866秒間でゼロであり、これはビット誤り 率 (BER) にして 5.6 × 10⁻¹⁰ 以下に相当する。 大気ゆらぎの主要な周波数スペクトルは10Hz 以下に存在していた。ARTEMIS から地上への フォワードリンクは、静的な回線マージン7dB であることを考えると完璧な結果であった。これ により、OPALEの送信器と、LUCEの光受信器 の機能が確認された。

3.3 アップリンク

LUCE は、49.3724 Mbps の 通信 速度 で 通信 ビームを送信する。アップリンクの BER は1秒 毎に計測され、最良値で2.5×10⁻⁵であった。 BER の値で 10⁻⁴ ~ 10⁻³ における平均的な BER の劣化を考慮すると、静的なリンクマージンは - 1.47 dBとなった [3]。実際の軌道上では、リ ターンリンクの通信性能は大気ゆらぎと透過損失 が存在しないため、通信品質は 6.45 dB 改善され る。レーザビーム伝搬におけるアップリンクで は、大気ゆらぎによるビームワンダリングが主な 要因となり、その周波数成分は30Hz以下で あった。

3.4 ファーフィールドパタンの測定

地上-衛星間のレーザリンクを通して、LUCE からの送信レーザビームのファーフィールドパタ ンが測定された。LUCE では、7×7グリッドで 光行差補正角度をラスター走査することにより行 われた。ステップは約3 µrad である。図6と図 7 に、LUCEの送信レーザがCW モードと疑似ラ ンダム符号 (PN) モードのときのファーフィー ルドパタンの測定結果を示す。PAX、PAY は LUCE での光行差補正角度の方向をそれぞれ 示す。測定中は、チップ-チルトの追尾精度は 0.81 µrad (3 σrss) 以下であり完璧な状態で測定 を行うことができた。大気ゆらぎを考慮した時の



0.4

0.2

図5

0.5



1.5 Normalized Intensity of uplink signal

LUCE と OGS のアップリンクレーザビー

ムの確率密度関数(PDF)の測定例



最後に、本試験により、軌道上での光通信機器 の設計及び動作が妥当であることが実証され、 JAXA のレーザ通信機器と ESA の対向光通信ペイ ロードの光適合性が衛星打ち上げ前に総合的に確 認されたことにより、OICETS 衛星の打ち上げ再始 動に向けた活動の一助となったことを申し添える。

していることが分かる [9][10]。

PA Y angle [µrad]

変調 PN モードにおける LUCE 送信ビー

ムのファーフィールドパタン測定結果(単 位は nW/m²)

ビームパタンを評価するため、平均的なビームパ

タンの広がり角を Hufnagel-Valley モデルに基づ

いて計算した結果、8.5 µrad (FWHM) が得ら

れた。この値を図6と図7に示された測定された

ファーフィールドパタンと比較すると、よく一致

地上に設置した OICETS 衛星に搭載される光 衛星間通信機器と静止衛星 ARTEMIS に搭載さ れた対向光通信ペイロードとの間で光適合性試験

謝辞

60

50

40

30

20

10

著者らは、本光適合性試験を実施するに当た り、準備から遂行まで多大な協力を頂いた ESA、 IAC の関係各位に敬意を表するとともに、NEC 東芝スペースシステム㈱の関係各位に深く感謝す る次第である。

参考文献

まとめ

[urad]

PA X angle [J

図 7

4

- 1 K. Nakagawa, T. Yamawaki, T. Jono, M. Toyoshima, and A. Yamamoto, "Completion of Optical Inter-Orbit Communications Engineering Test Satellite (OICETS)," 53rd International Astronautical Congress, the International Astronautical Federation, IAC-02-M.2.02, Huston, 10th-19th Oct. 2002.
- 2 M. Toyoshima, S. Yamakawa, T. Yamawaki, K. Arai, M. Reyes, A. Alonso, Z. Sodnik, and B. Demelenne, "Ground-to-satellite optical link tests between Japanese laser communications terminal and European geostationary satellite ARTEMIS," in Free-Space Laser Communication Technologies XVI, Proc. SPIE 5338A, pp. 1-15, 2004.
- 3 M. Toyoshima, S. Yamakawa, T. Yamawaki, K. Arai, M. Reyes, A. Alonso, Z. Sodnik, and B. Demelenne, "Long-term statistics of laser beam propagation in an optical ground-to-geostationary satellite communications link," IEEE trans. on Antennas and Propagation, Vol. 53, No. 2, pp. 842-850, Feb. 2005.
- 4 D. Rutz, R. Czichy, J. Bara, A. Comeron, A. Belmonte, P. Menendez-Valdes, F. Blanco, and C. Pedreira, "Inter-Mountain laser communication tests," in Free-Space Laser Communication Technologies II, Proc. SPIE 1218, pp. 419-430, 1990.





- 5 M. Reyes, J. A. Rodriguez, T. Viera, H. Moreno, J. L. Rasilla, F. Gago, L. F. Rodriguez, P. Gomez, and E. Ballesteros, "Design and Performance of the ESA Optical Ground Station," in Free-Space Laser Communication Technologies XIV, Proc. SPIE 4635, pp. 248–261. 2002.
- 6 T. T. Nielsen, G. Oppenhaeuser, B. Laurent, and G. Planche, "In-orbit test results of the optical intersatellite link, SILEX. A milestone in satellite communication," 53rd International Astronautical Congress, the International Astronautical Federation, IAC-02-M.2.01, Huston, 10th-19th Oct. 2002.
- 7 K. Nakagawa and A. Yamamoto, "Engineering model test of LUCE (Laser Utilizing Communications Equipment)," in Free-Space Laser communication Technologies VIII, Proc. SPIE 2699, pp. 114-120, 1996.
- 8 M. Reyes, S. Chueca, A. Alonso, T. Viera, and Z. Sodnik, "Analysis of the preliminary optical links between ARTEMIS and the Optical Ground Station," in Free-Space Laser Communication and Laser Imaging II, Proc. SPIE 4821, pp. 33-43, 2003.
- 9 L. C. Andrews and R. L. Phillips, "Laser Beam Propagation through Random Media," SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Wash., 1998.
- 10 R. L. Fante, "Electromagnetic beam propagation in turbulent media," Proc. IEEE, Vol. 63, No. 12, 1975.

(平成24年3月14日採録)



豐嶋守生 ワイヤレスネットワーク研究所 宇宙通信システム研究室室長 博士 (工学) 衛星通信、大気ゆらぎ、レーザ通信、 量子暗号 morio@nict.go.jp



山川史郎

宇宙航空研究開発機構宇宙利用ミッ ション本部利用推進プログラム・シス テムズエンジニアリング室衛星システ ム技術部グループ 技術領域リーダ 博士 (工学) 人工衛星システム、衛星通信、衛星間 光通信

yamakawa.shiro@jaxa.jp

山脇敏彦

宇宙航空研究開発機構研究開発本部衛 星構造・機構グループ 主幹開発員テクノロジスト 衛星構造、構造動力学、指向精度に対 する微小振動の影響 yamawaki.toshihiko@jaxa.jp

Marcos Reyes

カナリア天体物理研究所 プロジェクト技術部門長 天体観測装置の開発可視及び赤外観測 装置、受信機、望遠鏡、補償光学、空 間レーザ通信 mreyes@iac.es

Zoran Sodnik

欧州宇宙機関主任光エンジニア 光通信、光計測、干渉分光法 zoran.sodnik@esa.int



荒井功恵 宇宙航空研究開発機構施設設備部部長 人工衛星の開発(ゆり、つばさ、きら り)、きぼうの開発



Angel Alonso カナリア天体物理研究所 プロジェクトマネージャー/ ラ・ラグーナ大学基礎物理学部准教授 Ph.D. レーザーガイド星、大気擾乱における ビーム伝搬、恒星構造、天体観測装置

Benoit Demelenne 欧州宇宙機関 Redu 局 衛星運用ユニット長 エンジニア benoit.demelenne@esa.int