

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ルフィールドパターンも測定された。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用光パイロード(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2,393mにあり、大気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、 $C_n^2(2,393\text{ m}) = 0.698 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 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23cmと0.76 arcsecである。ビームの諸元を表1に示す[6][7]。

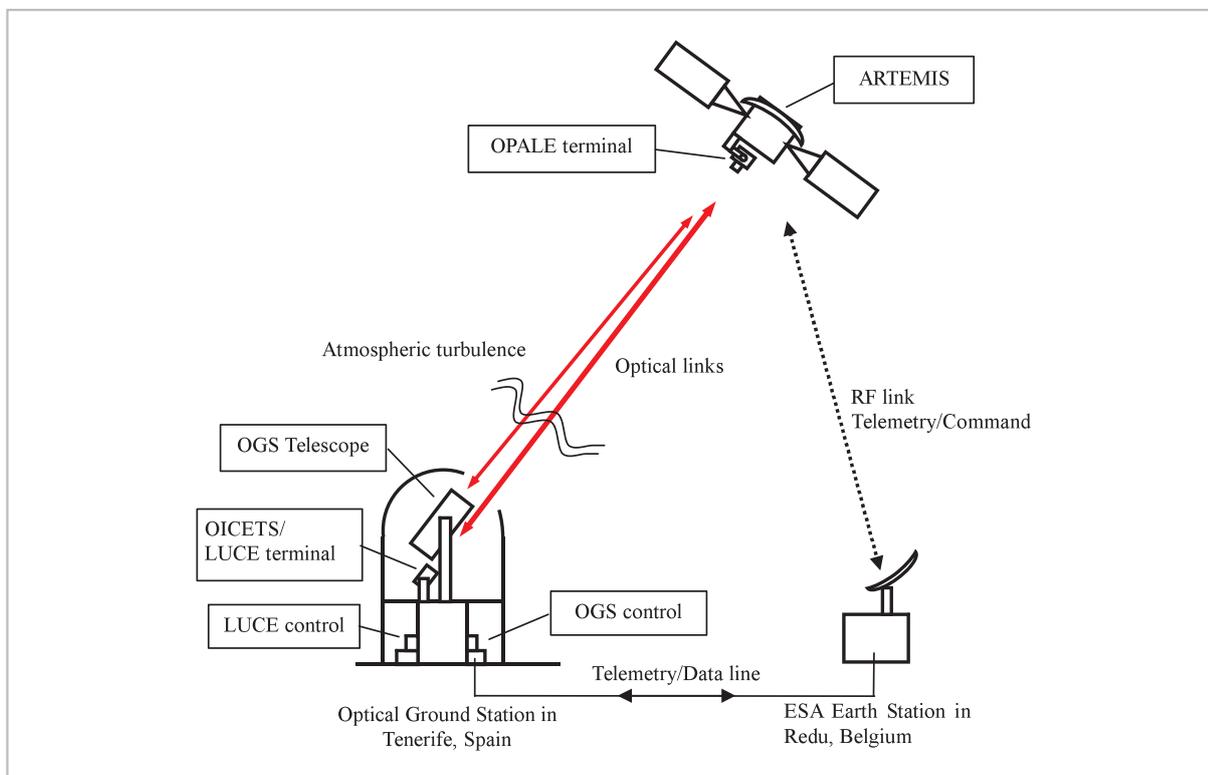


図1 テネリフェにおける光適合性試験の構成



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本のレーザービーム伝送は、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本のレーザー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ー変調がCWモードにおいて成功し、

表1 レーザビームの諸元

Terminal	OPALE beam (s)	LUCE EM beam
Wavelength	Communication: 819 nm (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 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.

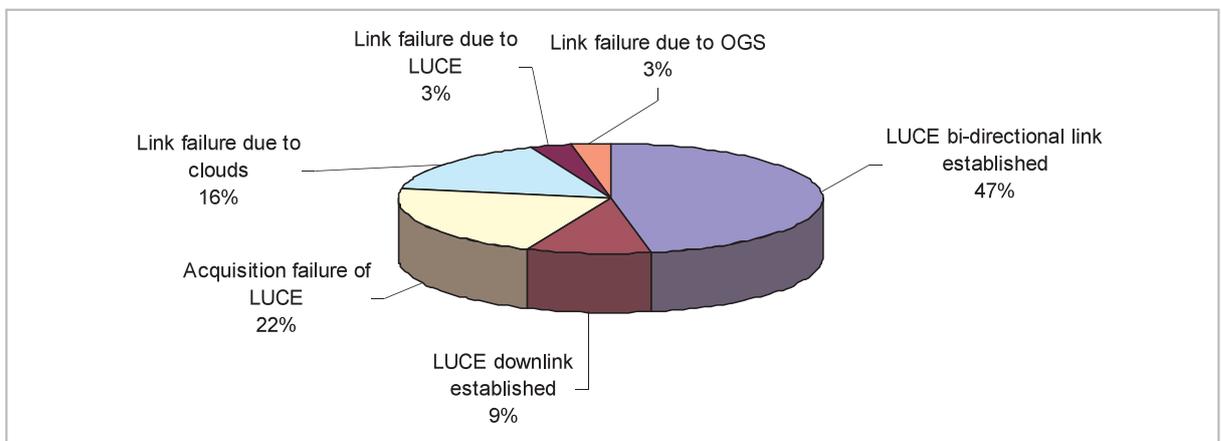


図3 試験中の回線確立統計結果

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 10 Hz 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 7 dB 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 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 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。レーザー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要因となり、その周波数成分は 30 Hz 以下であった。

3.4 ファーフィールドパタンの測定

地上-衛星間のレーザーリンクを通して、LUCE からの送信レーザービームのファーフィールドパターンが測定された。LUCE では、 7×7 グリッドで光行差補正角度をラスタ走査することにより行われた。ステップは約 $3 \mu\text{rad}$ である。図 6 と図 7 に、LUCE の送信レーザーが 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。PA X、PA Y 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 $0.81 \mu\text{rad}$ ($3 \sigma_{\text{rss}}$) 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

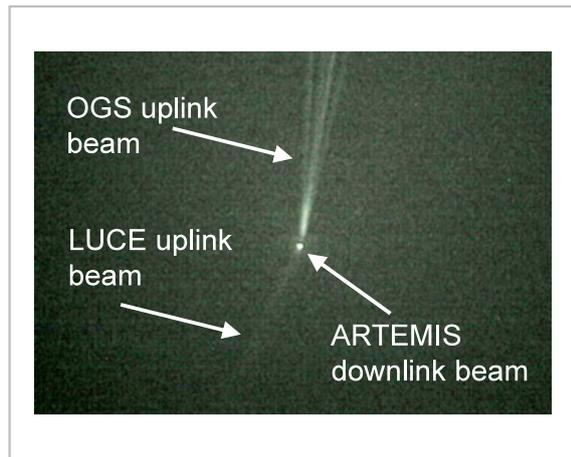


図 4 地上のカメラで撮影した LUCE と OGS のアップリンクビーム

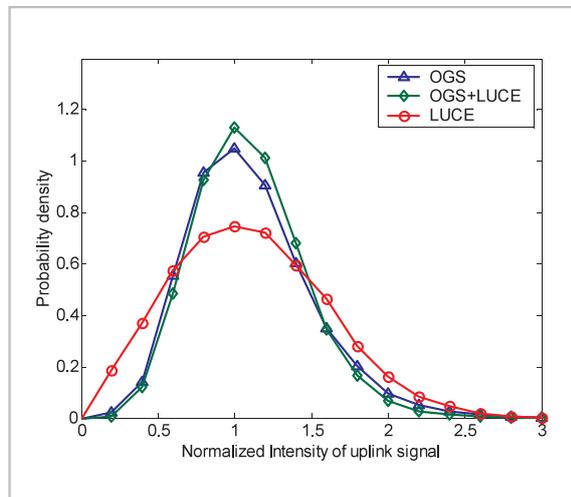


図 5 LUCE と OGS のアップリンクレーザービームの確率密度関数 (PDF) の測定例

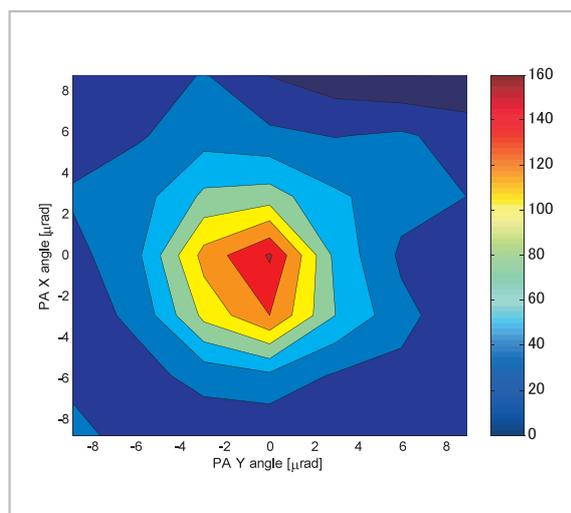


図 6 変調 CW モードにおける LUCE 送信ビームのファーフィールドパターン測定結果 (単位は nW/m^2)

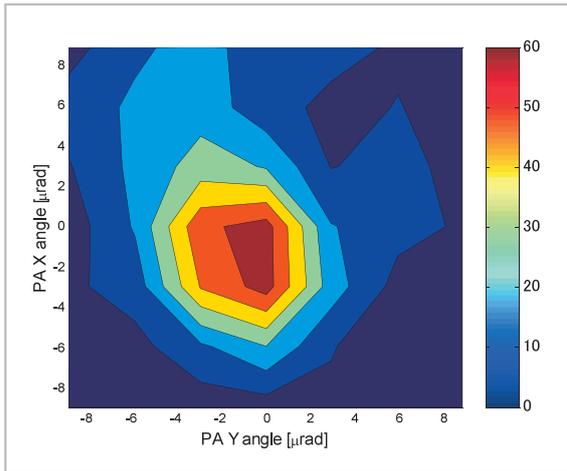


図7 変調PNモードにおけるLUCE送信ビームのファーフールドパタン測定結果 (単位は nW/m^2)

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、 $8.5 \mu\text{rad}$ (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ールドパタンと比較すると、よく一致していることが分かる [9][10]。

4 まとめ

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

参考文献

- 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.

が実施された。光通信回線の BER が測定され、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。このように通信ができたことは、実機での総合的な光通信の性能として、強度、感度、波長、偏光、変調方式の適合性が確認できたことを意味する。また、初期捕捉、追尾、指向及び捕捉追尾シーケンスについても適合していることが確認された。本試験により、地上-衛星間の光通信回線においてさらに高精度で動的な回線設計を可能とする知見が得られ、今後の宇宙光通信のシステム設計への貢献度は大きい。

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。

謝辞

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(株)の関係各位に深く感謝する次第である。

