

5-2 OICETS 側の光通信実験結果

5-2 The Uplink Data Received by OICETS

小山善貞 豊嶋守生 高山佳久 竹中秀樹

KOYAMA Yoshisada, TOYOSHIMA Morio, TAKAYAMA Yoshihisa, and TAKENAKA Hideki

要旨

本稿は OICETS を用いた国際光通信実験キャンペーン期間中に OICETS 側で取得したデータの解析結果を示している。解析では OICETS に搭載された光衛星間通信機器の精捕捉追尾センサ出力信号を用いてシンチレーションインデックス、確率密度関数、周波数解析、相関時間について調べ、地球上に分散された 4 つの光地上局データに特徴的な相違が有るか調査した。またアップリンク通信回線品質の評価として符号誤り特性について解析した結果も述べている。

This paper shows the results of data analysis obtained by OICETS during international optical communication campaign. Scintillation Index, Probability Density Function, FFT analysis, and Normalized Covariance analysis were carried out using received FPS signal of LUCE onboard OICETS to identify any specific characteristics difference between 4 OGS distributed on the Earth. The analysis of BER characteristics of Uplink was also carried out to investigate the link quality.

[キーワード]

大気伝搬, レーザビーム伝送, 空間光通信

Atmospheric propagation, Laser beam transmission, Free-space optical communication

1 まえがき

低軌道周回衛星である光衛星間通信実験衛星 (OICETS) を用いた地上局-衛星間の光通信実験では、地球上で全く異なる場所に存在する複数の地上局からの信号を OICETS に搭載された光検出器を共通のセンサとして受光する事が可能である。この事は異なった地上局から受光した信号の特性を比較する事により地上局の設置場所での大気ゆらぎの相違を明らかにする事ができる可能性を示している。本稿ではドイツ航空宇宙センター (DLR)、欧州宇宙機関 (ESA)、アメリカ航空宇宙局ジェット推進研究所 (NASA JPL) 及び情報通信研究機構 (NICT) の光地上局 (Optical Ground Station: OGS) と OICETS 間で実施した光通信実験の内、地上局から衛星へのアップリンク実験に関し OICETS が取得した実測データの解析結果を示す。

2 実験に参加した地上局の設置場所

表 1 に実験に参加した各国機関が所有する地上局の地名、緯度・経度及び海拔高度の比較を示す [1]-[4]。いずれの局も北半球の緯度 28 度～48 度の間に存在する。DLR の地上局は欧州大陸の内部に位置しており比較的 low 仰角 (数度) から実験が可能である。その他の局はいずれも海洋の近傍に位置するが、ESA と JPL の局は海拔高度が 2,000 m を超え、近くに天文台が存在するように大気ゆらぎの少ない場所に設置されている。実験

表 1 光地上局設置条件の比較

機関名	設置場所	緯度	経度	海拔高度
DLR	Oberpfaffenhofen	48.08° N	11.27° E	645 m
ESA	Tenerife Island	28.30° N	16.51° W	2,393 m
JPL	Table Mountain	34.38° N	117.66° W	2,200 m
NICT	Koganei	35.71° N	139.49° E	122 m

を実施した時の衛星仰角は、実験開始時の方位にもよるが、DLR 局は 0° から、ESA 局も 0° から、JPL 局は 20° から、NICT 局は 15° からであった。

3 データ解析

3.1 OICETS の取得データ

OICETS 搭載の光衛星間通信機器 (LUCE) は地上局からの光信号を 3 つの光検出器である粗捕捉追尾センサ (CPS)、精捕捉追尾センサ (FPS) 及び光受信機 (OPR RX) でそれぞれ受光する。この内 FPS はサンプリング周波数が 1024 Hz と比較的高速であり、また変調の有無に関わらず常時受光可能でこれら光検出器の中で大気ゆらぎの影響解析に最も適した信号を出力するので、本稿では FPS が検出した信号強度を解析する事とした。

3.2 解析手法

NICT が既に実施した地上局-OICETS 間双方向光通信実験データの解析結果は文献 [5] に示されている。本稿でも同様の解析を行う事により異なる地上局間での実測データの特性差異を見出す事として以下の①~⑤の項目について解析を行った。但し、FPS の信号処理機能の制約を避けるため、取得したデータの中で極力出力が飽和をしていないデータを中心に解析を行った。

- ①シンチレーションインデックス (SI): SI は受光強度ゆらぎの正規化分散であり SI が大きいほど受光強度ゆらぎが大きくなる。本検討では 0.5 秒間のデータから式 (1) を用いて算出した。

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (1)$$

ここで、 I は受光強度、 $\langle \ \rangle$ はアンサンブル平均を示す。

- ②確率密度関数 PDF: 注目する仰角に対応した時刻の 1 秒間のデータを用い、平均値で正規化した強度に対する確率を算出した。
- ③周波数解析 FFT: 各仰角に対応した時刻の 1 秒間データから 2^{10} 個のデータを用いて解析した。
- ④自己共分散関数: 同じく各仰角に対応した時刻の 0.1 秒間のデータから解析した。計算式

は次の通りである。

$$\begin{aligned} K(t, s) &= E[(I_t - \mu_t)(I_s - \mu_s)] \\ &= E[I_t \cdot I_s] - \mu_t \cdot \mu_s \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 E は期待値演算子、 μ_t 及び μ_s は平均値である。上式を更に分散 σ^2 で正規化し自己相関係数としてグラフ表示した。尚、比較する系列データの時間差 $t-s$ は 0.1 sec である。

上記の他に通信回線の品質を評価する為に次の項目について解析した。

- ⑤符号誤り率 BER: 地上局から送信された PN 符号を光受信機で受信し、復調した PN 信号の誤り個数カウント値から算出した。BER の評価は 1 秒間の誤り率で行った。

3.3 解析する FPS データ及び BER データの抽出

表 2 にキャンペーン中の実験で光リンクが成立したケースを示す。表には OGS の識別、実験

表 2 光リンク成立ケース一覧

OGS	Date	Duration [m:ss]	EL. Angle Min/Max [deg]	Effective FPS Data	FPS Data Ana.	BER
DLR	2009/07/01	4:14	11/57	80%	Y	
	2009/08/19	4:27	3/35	50%	Y	
	2009/08/21	5:43	10/27	25%	Y	
	2009/08/28	4:43	4/49	25%	Y	
ESA	2009/07/08	8:06	0/23	3%	Y	
	2009/07/10	8:48	0/39	6%	Y	
	2009/07/15	3:15	0/52	0%		
	2009/07/22	6:19	0/53	5%		
	2009/07/29	7:13	0/19	42%	Y	
	2009/07/31	4:17	0/31	12%		
	2009/09/11	7:23	0/20	0%		
JPL	2009/09/16	4:41	0/79	0%		
	2009/05/21	2:29	20/61	14%		
	2009/06/02	1:39	20/60	100%	Y	
	2009/06/04	2:16	20/83	60%	Y	
NICT	2009/06/11	2:15	20/51	75%	Y	Y
	2008/11/13	5:38	15/56	34%	Y	
	2008/11/18	5:04	15/38	40%		
	2008/11/20	4:04	15/24	80%		
	2008/12/02	5:30	18/34	60%		
	2008/12/04	5:30	22/58	5%	Y	
	2008/12/11	4:36	15/24	15%		Y
	2008/12/16	2:30	23/89	30%		
	2008/12/18	5:56	20/54	8%		
	2008/12/23	5:36	18/26	25%		
	2009/01/13	5:49	18/36	20%		
	2009/01/15	6:35	22/62	18%		
	2009/01/20	5:46	14/24	80%		Y
2009/04/23	2:05	24/87	100%	Y		

年月日、実験時間（計画値）、実験中の最小／最大衛星仰角、飽和していない有効なFPSデータの時間割合とFPSデータ及びBERデータ解析を行ったケースに「Y」字を記入してある。DLRの実験ではUplinkの信号は無変調でありBER解析の対象外とした。同様な理由でESAが実施した実験も対象外とした。

4 解析結果

4.1 シンチレーションインデックス (SI)

図1は解析結果の一例であり表2のDLR局2009/7/1のデータを解析したものである。上段はFPSの受光電力の時間経過を示しておりFPS受光レベルの出力は-57 dBmで飽和している。下段はFPS出力データからSIを計算したもので図中にはOGSの衛星仰角（赤線）も併せて示してある。いずれの局のデータも図1に示すようにSIは仰角が大きくなるに従って低下する。

図1の例と同様に各OGSの実験に関し表2のFPS解析欄にY印で示すケースについて解析を行った。結果を図2にまとめて示す。この図には解析した複数日の実験結果をOGS毎に同一記号で示してある。

各局当たりの解析対象数が限られかつ実施時期も異なっているが、図2の結果を元にOGS間のデータ特性を比較すると、DLRの実験結果は他のOGS実験に比べて低仰角の領域（20°～30°）でもSIが小さい結果となっている点が特徴と言えよう。他のOGSについては特徴的な差異の有無を判断することは難しい。

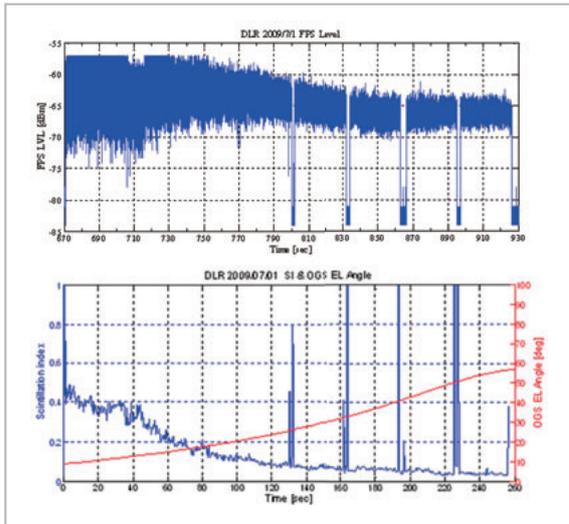


図1 シンチレーションインデックスの解析例

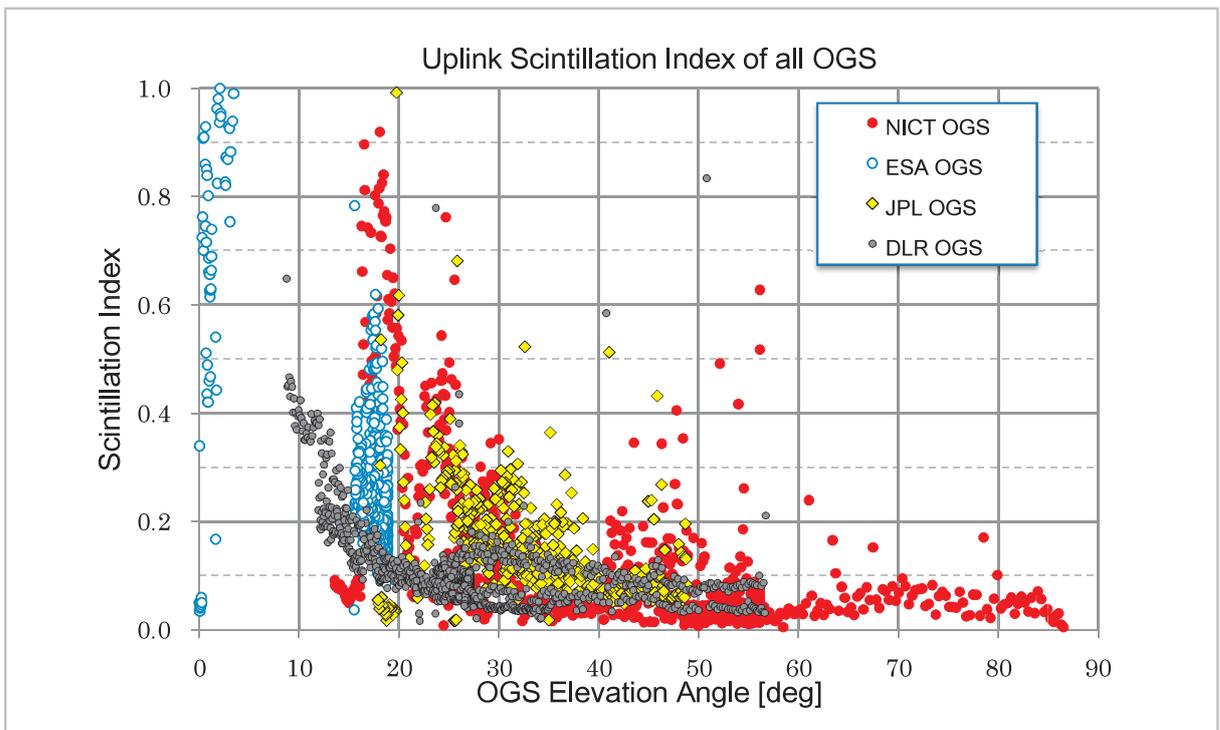


図2 各局のシンチレーションインデックスと仰角の関係

4.2 確率密度関数 PDF

図3に示すDLR局 2009/7/1のデータについて、仰角15°から55°まで10°毎に解析した結果を図3に示す。他の局の解析結果はDLRデータ解析結果と同様であり、局の相違による特徴的な変化は認められない。

図4には各仰角に対するSIをもとに弱い擾乱に対する理論式[6]から対数正規分布を前提とした計算結果を示す。両者は良く一致している。

$$p(I) = \frac{1}{\sigma_I^2 \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{\left[\ln\left(\frac{I}{\langle I \rangle}\right) + \frac{1}{2}\sigma_I^2 \right]^2}{2\sigma_I^2} \right\}, I > 0 \quad (3)$$

ここで、 σ_I^2 はシンチレーションインデックス、 $\langle I \rangle$ は平均照度である。

4.3 周波数解析

周波数解析の例として図5に示すDLR局 2009/7/1のデータについて、仰角15°から55°まで10°毎に解析した結果を図5に示す。サンプリング周波数の制約で514 Hzまでのデータとなっている。仰角の低い15°では高周波域の落ち込みが明瞭なスペクトルとなっているが、仰角が高くなるにつれ高周波領域へとスペクトルの伸びが見受けられる。この傾向はいずれのOGS実験でも同じである。

4.4 自己共分散関数

FPSで受光した信号の時間変化特性を把握するために、図6に示すDLR局 2009/7/1のデータを用いて、注目する仰角に対し0.1秒までの時間差の正規化強度の自己共分散関数を調べ、結果を図6に示す。相関値が $1/e^2$ となる相関時間は

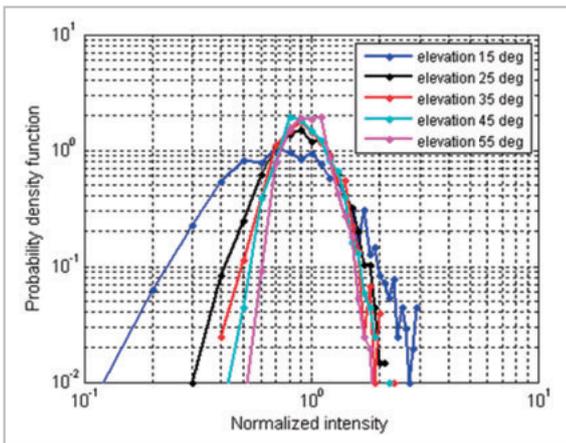


図3 DLR局 (2009/7/1) PDF 解析結果

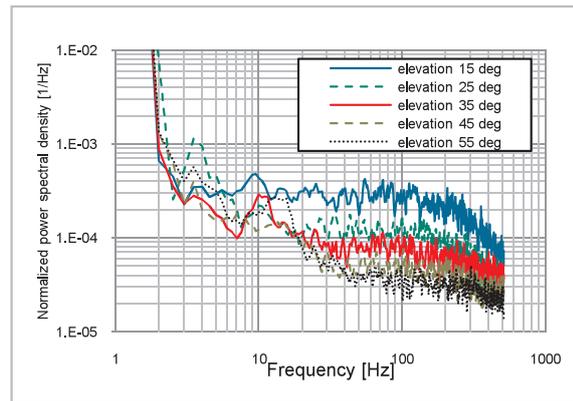


図5 DLR局 (2009/7/1) FFT 解析結果

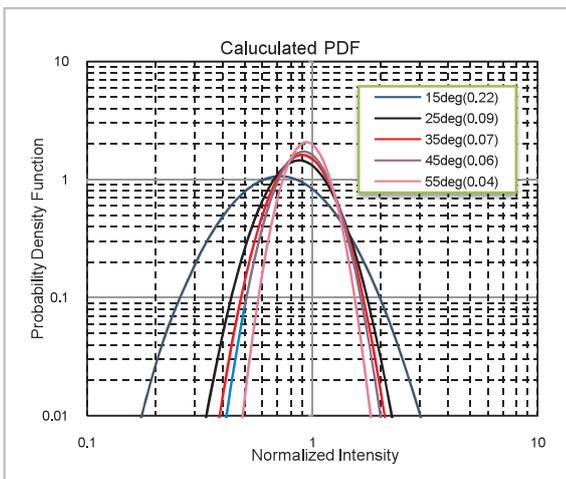


図4 SIから計算したPDF

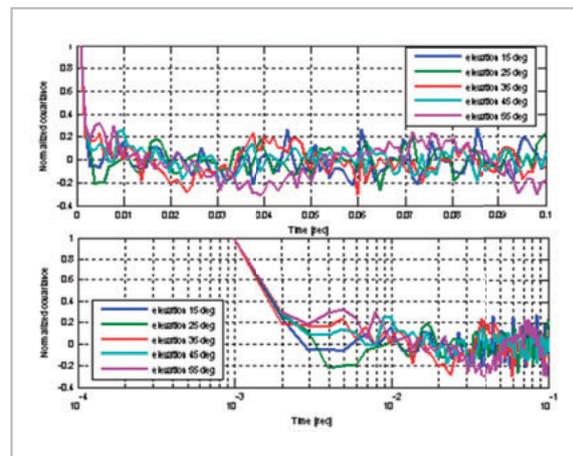


図6 DLR局 (2009/7/1) の自己共分散関数解析結果

仰角 15° で約 2 ms、仰角 55° で約 7 ms であった。ほとんどの OGS 実験結果では相関時間は 10 ms 以下であり、各 OGS 特有の傾向は見られなかった。

4.5 符号誤り率 BER

アップリンク回線の品質は LUCE が備えている符号誤り個数検出機能を用いて評価できる。LUCE では地上局から PN 符号で変調した信号

を受信・復調した後、LUCE 内部で生成する PN 符号と比較する事により本来信号が無い個所で信号を検出する挿入誤りとその逆の消失誤りとを識別し、両者の誤り個数の総和から BER が評価できる。図 7 は NICT 局 (2009/1/20) の実験データであり、上段に FPS 信号強度を、下段に復調後の挿入誤り個数の発生状況を示しており消失誤りもほぼ同様な発生状況であった。符号誤りは受信レベルが受信機の閾値感度 (この例では FPS レベルで -67 dBm 位) を下回った場合、また受信レベルが高くて信号レベルの変動が大きい場合に発生している。LUCE の光受信機は比較的レベル変動の少ない衛星間通信用として設計されており、この実験では図 1 上段のレベル変動などと比較しても変動が少なく、時刻 683 秒～718 秒では SI は 0.05 以下であったが BER は $10^{-1} \sim 10^{-3}$ のオーダーであった。

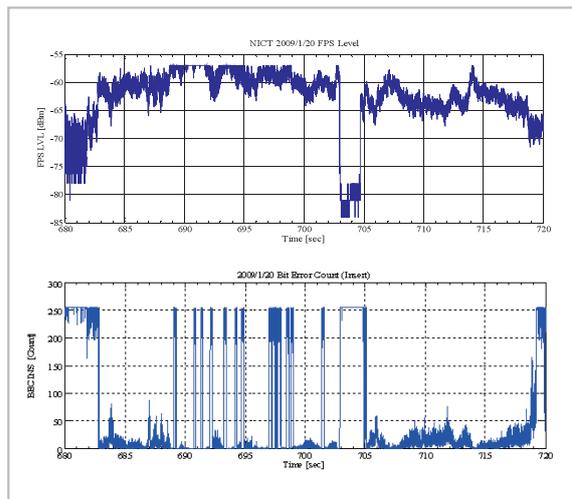


図 7 NICT 局実験時の FPS 受信レベルと挿入誤り個数

図 8 は NICT 局実験と JPL 局実験で得られた 1 秒間の BER と FPS 受信レベルの関係を示す。図中には文献 [7] から FPS 受信レベルに換算した光受信機の地上試験時の特性も併せて示している。文献 [7] によれば、衛星間光通信実験時に実測した BER 特性は地上試験時の値に比べ約 2 dB の劣化に過ぎなかったとされているが、地上-衛星間のリンクでは大気ゆらぎの影響も加わり 15 dB 以上の劣化が生じていることが判る。FPS レベルの出力は -57 dBm で飽和するので BER が 10^{-3} より低い値では正確な受光レベルは不明であるが、データでは 10^{-7} 程度の BER も観測されており、 10^{-3} 程度の BER であれば符号訂正などを行う事により実用的に問題ないものと考えられる。

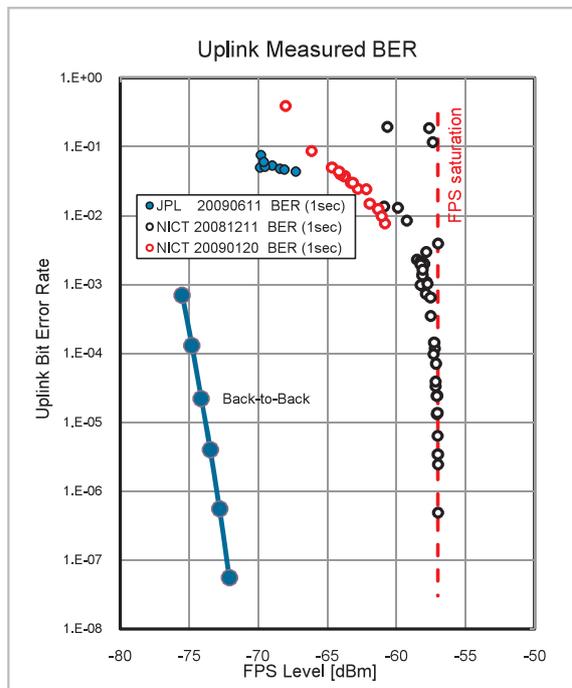


図 8 NICT 及び JPL 実験で得られた BER 特性

5 むすび

異なる場所に存在する地上局と衛星間のアップリンク実験について、OICETS が取得したデータをもとに解析を行い信号特性の差異について調べた。解析に使用できるデータ数が限られており、また、実施時期も異なるので明確な差異を見出すのは困難であるが、解析したデータの比較では衛星仰角とシンチレーションインデックスの関係で DLR 局の特性が他の局の特性に対し低仰角の領域で小さな値を示す結果であった。その他の

解析結果からは顕著な差異は見受けられなかった。宇宙空間にある共通の光検出器を用いて4局の OGS と衛星間での光通信実験は世界で初めてであり、各 OGS との実験で取得されたデータから各サイトの大気ゆらぎモデルのパラメータの同定やモデルの構築に貢献できる。またこの様なキャンペーンの実施を重ねることにより多くのデータの取得が期待される。

謝辞

本キャンペーンで得られたデータは宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と NICT との共同研究によるものであり、JAXA の協力に感謝する次第である。また海外局の関係機関の協力に対しても厚くお礼を申し上げる。最後に、このような実験は OICETS の開発・運用に携わられた多くの方々その努力とご協力により初めて可能になったものであり、改めてお礼を申し上げる次第である。

参考文献

- 1 N. Perlot, M. Knapek, D. Giggenbach, J. Horwath, M. Brechtelsbauer, Y. Takayama, and T. Jono, "Results of the Optical Downlink Experiment KIODO from OICETS Satellite to Optical Ground Station Oberpfaffenhofen (OGS-OP)," Proceedings of SPIE Vol. 6457, Jan. 24, 2007.
- 2 <http://www.iac.es/telescopes/pages/en/home/telescopes/ogs.php?lang=ES>
- 3 Keith Wilson, Joseph Kovalik, Adhijit Biswas, and William T. Roberts, "Recent Experiments at the JPL Optical Communications Telescope Laboratory," IPN Progress Report 42-173, May 15, 2008.
- 4 http://ilrs.gsfc.nasa.gov/stations/sitelist/KOGC_general.html
- 5 M. Toyoshima, H. Takenaka, Y. Shoji, Y. Takayama, Y. Koyama, and H. Kunimori, "RESULTS OF KIRARI OPTICAL COMMUNICATION DEMONSTRATION EXPERIMENTS WITH NICT OPTICAL GROUND STATION (KODEN) AIMING FOR FUTURE CLASSICAL AND QUANTUM COMMUNICATIONS IN SPACE," 61th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, IAC-10-B2.1.10, pp. 1-11, Prague, Czech Republic, Sept. 27, 2010.
- 6 Larry C. Andrews, Ronald L. Phillips, and Cynthia Y. Hopen, "Laser Beam Scintillation with Applications," pp. 87, SPIE Press, Bellingham, Washington, 2001.
- 7 小山善貞, 城野隆, 高山佳久, 空野正明, 荒井功恵, 白玉公一, 池辺憲一, 間瀬一郎, Zoran Sodnik, Benoit Demelenne, Aneurin Bird, "OICETS-ARTEMIS 衛星間通信実験における光通信特性評価," 第 50 回宇宙科学技術連合講演会, 2D09, 2006 年 11 月 9 日.

(平成 24 年 3 月 14 日 採録)



こやまよしただ
小山善貞
 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専攻研究員
 光通信、衛星搭載機器
 koyama.yoshisada@nict.go.jp



とよしまもりお
豊嶋守生
 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



たかやまよしひさ
高山佳久
 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主任研究員
 博士（工学）
 非線形光学、位相共役光学、フォト
 ニック結晶、電磁波解析、宇宙光通信
 takayama@nict.go.jp



たけなかひでき
竹中秀樹
 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有期技術員
 衛星通信、レーザ通信
 take@nict.go.jp