

5-3 DLR における光通信実験

5-3 Optical Communication Experiments at DLR

Dirk Giggenbach, Florian Moll, and Nicolas Perlot

Dirk Giggenbach, Florian Moll, and Nicolas Perlot

要旨

2006年と2009年に、ドイツ航空宇宙センター (DLR) の通信・航法研究所 (IKN) は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と情報通信研究機構 (NICT) との共同研究において、JAXA の光衛星間通信実験衛星 (OICETS、和名「きらり」) を使用した光ダウンリンク実験を実施した。また、低軌道衛星 (LEO) からの光ダウンリンクチャンネルを解析し、将来の応用を目指して、この伝送技術の可能性を評価した。ミュンヘン近郊のオーバーファッフェンホーヘンにある DLR 光学地上局は、大気の変動 (IRT) の効果を測定するための測定器と、ビット誤り率を定量化するデータ受信器フロントエンドを備えている。このプロジェクトは、KIODO (Klrari Optical Downlinks to Oberpfaffenhofen) と命名されている。IRT に関連するパラメータ全てに対して、リンク高度に強い依存性があるという結果が得られた。この2つの測定キャンペーンの成功をうけて、DLR-IKN は様々な小規模な LEO ミッションに向けて、レーザー試験光源の開発を行った。そして、将来のテレメトリデータのダウンリンク、アップリンクに向けて、この技術をさらに深め、最適化することが可能となった。

In 2006 and 2009, the Institute of Communications and Navigation (IKN) of the German Aerospace Center (DLR) in a joined venture together with JAXA and NICT executed optical downlink experiments with JAXA's OICETS/Kirari to investigate the optical LEO downlink channel and evaluate the feasibility of this transmission technology for future applications. The DLR Optical Ground Station at Oberpfaffenhofen near Munich comprised several devices for measuring the effect of the atmosphere's index-of-refraction turbulence (IRT) and a data receiver frontend to quantify bit-error distributions. This project was named KIODO (Klrari Optical Downlinks to Oberpfaffenhofen). Results showed a strong dependency on link elevation for all IRT-related parameters. These two successful measurement campaigns encouraged DLR-IKN to develop a laser test source for various small LEO missions to enable further investigations and optimizations of this technology for future telemetry data down- and up-links.

[キーワード]

空間光通信, 大気伝搬, レーザビーム伝送, シンチレーションインデックス

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

1 まえがき

DLR-IKN の光通信グループ (OCG) は、これまで15年以上にわたり大気中と宇宙での空間レーザー通信の応用を目指して研究を続けてきた。その結果、いくつかの実験用レーザー通信機器を開発し、オーバーファッフェンホーヘン光学地上局 (OGS-OP) を設立した。NICT との交流に端を

発し、2005年の夏には DLR と JAXA との折衝の結果、OGS-OP の使用が開始されたが、この OGS-OP は OICETS に搭載されている JAXA の光衛星間通信機器 (LUCE) からのレーザー信号を受信するためのものであった。その結果、JAXA と NICT が、小金井にある KODEN 実験設備^[1]内の NICT の光地上局 (OGS) へのダウンリンクに初めて成功した。そして、その後、2006年

6月には欧州においても光LEOのダウンリンクが初めてできるようになった。2009年の夏には、JPL、ESA、NICTの地上局とともに、GOLCE [2] を遂行し、NICTが2回目のダウンリンク・キャンペーンを開始した。

2006年夏の1回目のキャンペーンでは、OGS-OPの望遠鏡は全面開放型クラムシェル型ドーム内で保護され、高速角速度の物体の追跡を行った。望遠鏡の焦点光学諸特性は、いくつかのビームスプリッタにより、DIMM（シーイング測定装置、Friedパラメータを測定する）、瞳カメラ（瞳位置の平面内で強度分布を測定するもの）、追跡カメラ、電力計、データ受信器フロントエンドといった様々なIRT測定装置の照射用に使用されている。また、独立した5cmの屈折望遠鏡も電力測定に使用している。これは、小口径から大口径に至る開口平均効果の影響を比較するのに有効である。2009年の2回目のキャンペーンには、焦点カメラ、受信したアナログ・データ信号のための高速データ・ロガー、シャックハルトマン波面センサが追加された。表1に各々のキャンペーンの際に使用された測定装置の一覧を示す。

パワーメータは、望遠鏡の光学ベンチ上の標準シリコン受信器からなる。ビット誤り率測定器(BERT)は、受信した擬似ランダムビット列(PRBS)のデータ信号のビット誤り率を測定する。一方、シーイング測定装置(DIMM)は、天文学では標準的な機器であり、Friedパラメータ r_0 を測定する。瞳カメラと焦点カメラは、それぞれ瞳位置の平面強度分布の画像と、焦点像を記録する。シャックハルトマン波面センサ(SHWFS)は、複素数の光電界の位相と強度に関する情報を測定することができる。

衛星の軌道位置の不確定さよりも広く設定した2つのレーザービーム光のビーム広がり角度を用いて、オープンループ制御により、OICETSの光信号の受信が開始される。LUCEがこの信号を地上から検出すると、OGS-OPに向けて自身のレーザービームを送信し、それが広角カメラ(WFoV)に軸合わせされ光が検出される。望遠鏡の指示方向をこの初期捕捉信号で補正後、OGS-OPは狭角カメラ(NFoV)に切り替えられ、衛星の通過期間中は50 μ ラジアン以下の精度でLUCE信号の追跡を行う。この追跡精度を

表1 測定装置一覧。望遠鏡の横に並べて置かれた口径5cmのパワーメータ以外は、全ての機器は40cmのカセグレン望遠鏡の光学ベンチに実装される

測定器	キャンペーン年度
パワーメータ (口径 40/5 cm)	2006/2009
ビット誤り測定器	2006/2009
シーイング測定装置	2006/2009
焦点カメラ	2009
シャックハルトマン波面センサ	2009
瞳カメラ	2006/2009
データ・ロガー	2009

表2 OGS-OP望遠鏡と追跡のパラメータ。WFoVとNFoVは視野を示す

望遠鏡の種類	カセグレン
望遠鏡焦点距離	3.6 m
開口直径	40 cm
副鏡の直径	12 cm
広角度追尾視野 (WFoV)	165 × 123 mrad
広角度追尾視野焦点距離	50 mm
狭角度追尾視野 (NFoV)	3.5 × 2.6 mrad
狭角度追尾視野焦点距離	2.0 m
リファレンス視野角	0.7 mrad
リファレンス焦点距離	1.4
ビーコン広がり角度 (各々)	5 mrad (1e ⁻²)

もってすれば、試験時間の全期間を通じて、全測定装置と受信器フロントエンドを照射することができる。主要なOGS-OPの諸元を表2に示す。

2 KIODO 2006—2006年のダウンリンク実験

KIODO2006 実験キャンペーン中に行われた8回の試行のサマリを表3に示す。1回の試行は、OICETS衛星の特定の1回の可視パスであり、つまり実験1回分に相当する。各試行についてOICETSは、事前に数日間の計画を要する衛星姿勢を慣性空間に固定する特別な運用が必要なため、リンク頻度を増やすことはできない [3]。

全ての試行は、ほぼ同時刻の夜間に行われた。地上局から見ると、衛星の通過時の最大仰角は様々である。OICETSに搭載している光ターミ

表3 Kiodo 試行の概略。現地時間は UTC + 2 時間

KIODO 試行番号	2006年6月の実施日	パス開始時間 (UTC)	最大パス仰角	測定仰角スパン	天候	備考
KT06-1	7 th	1:13	45.5°	10-35°	90% clear sky, 8°C	No scintillation/DIMM measurement
KT06-2	9 th	0:02	33.5°	10-32°	90% clear sky, 10°C	No BER measurement
KT06-3	14 th	1:04	55.6°	10-45°	clear sky, 10°C	
KT06-4	15 th	23:54	28.0°	2-27°	80% clear sky, 12°C	
KT06-5	21 st	0:56	68.2°		Cloudy	No Link
KT06-6	23 rd	1:21	38.4°		Cloudy	No Link
KT06-7	28 th	0:47	83.2°	4-43°	Thunder clouds 1 h before trial, 18°C	
KT06-8	30 th	1:12	46.5°		Cloudy	No Link

ナル LUCE を動作させる場合、その角速度と視野に対する太陽の位置に関して若干の制約がある。この制約のために、各試行は事前に決められた衛星パスに限られ、それに対応する仰角スパン（表3の5列目）に制限されることになった。2006年のキャンペーン期間中、5、6、8回目の試行では、雲に覆われてしまったためにリンクを確立することができなかった。

OICETS は、欧州宇宙機関 (ESA) の ARTEMIS 衛星と光学的にコンパチブルなので、50 Mbit/s で、波長 847 nm で OOK 変調のデータ送信を行い、810 nm 波長の光信号を受信する。Kiodo ダウンリンクは、地上局からのビーコンビーム（波長 808 nm、ビーム広がり角 5 mrad）と、OICETS からの通信ビーム（ビーム広がり角 5 μ rad [4]）の2つのビームからなる。

OGS-OP は、天文支持台上に支持されている 40 cm のカセグレン望遠鏡からなる。図1にこの望遠鏡と支持台を示す。通信受信器、追跡カメラ、測定カメラ、電力計を望遠鏡背後にある金属板上に置く。ビーコンビームは、40 cm 望遠鏡の各側面上に搭載され、2カ所に配置された 5 cm 望遠鏡により伝送される。

3 Kiodo 2009—2009年のダウンリンク実験

2回目の Kiodo 実験キャンペーンが6月9日と8月28日の間に実施された。2009年の

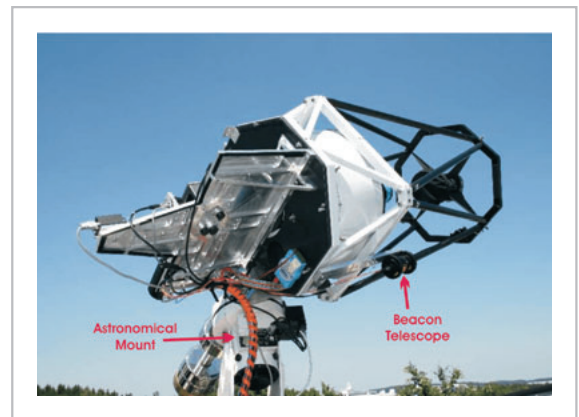


図1 OGS-OPの40 cm 望遠鏡の焦点ベンチと、天文支持台の写真（2006年6月）

Kiodo 実験期間中に行われた試行の概略を表4に示す。合計10試行が行われたが、天候条件のため、うまくいったのは5試行だけであった。7回目の試行では、部分的に曇ってはいたが何とかリンクが確立できた。しかし、しばらくしてリンクが阻止されてしまったために有効な測定にはならなかった。また、実験 KT09-1,2,4,9,10 では、曇りのためにリンクを確立することができなかった。

2009年にはOGS-OP望遠鏡は、2006年の時とは幾分異なったマウントシステムに搭載されることになった。本システムは高性能精密回転ステージを備えた特注フォーク・マウント構造を採用した。このマウントとモータは非常に高い荷重にも耐えられるものであり、柔軟性も備えているの

表 4 2009 年の KIODO の試行の概略。現地時間は UTC + 2 時間

KIODO の試行番号	2009 年の実施日	パス開始時間 (UTC)	最大パス仰角	測定仰角スパン	天候	備考
KT09-01	24 th Jun	02:01	64.0°	-	Rain	No Link
KT09-02	26 th Jun	00:44	21.0°	-	Rain	No Link
KT09-03	1 st Jul	01:28	57.2°	11-57°	Almost clear sky	
KT09-04	3 rd Jul	01:46	86.8°	-	Overcast	No Link
KT09-05	19 th Aug	02:20	45.7°	3-35°	Almost clear sky	
KT09-06	21 st Aug	01:03	27.2°	10-27°	Clear sky	
KT09-07	26 th Aug	01:47	78.3°	6-7°	Cloudy, drizzle	
KT09-08	28 th Aug	02:04	68.8°	4-49°	Clear sky	
KT09-09	2 nd Sep	01:13	33.4°	-	Overcast	No Link, one light flash spotted
KT09-10	4 th Sep	01:31	51.1°	-	Overcast, rain	No Link

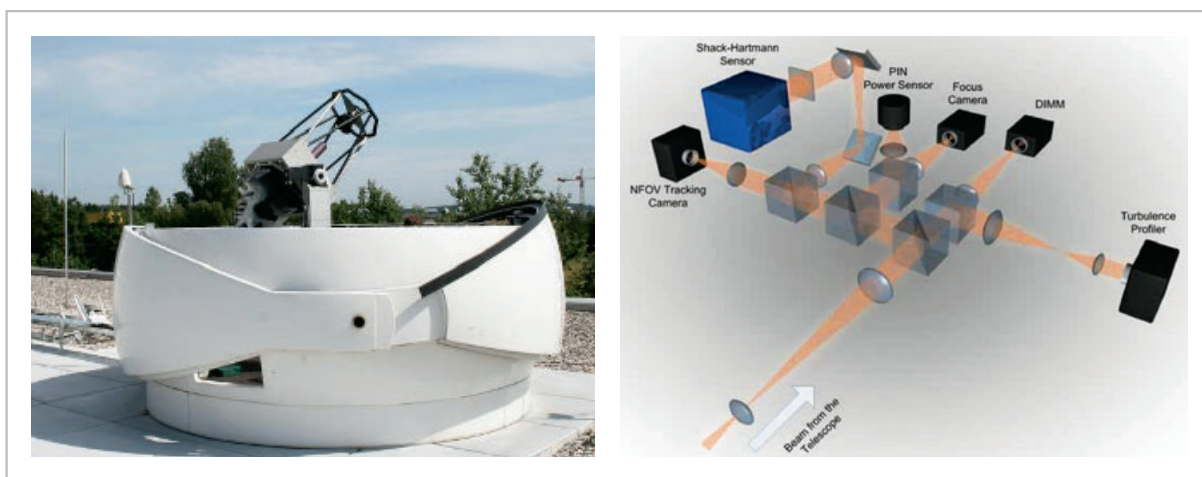


図 2 天文クラムシェル型ドームに収容された受信器望遠鏡 (左側) と、2009 年のキャンペーンでの測定機器セットアップ (右側) の構成。ビームは、追跡カメラ、受信器フロントエンド、測定装置へと導かれる [5]

で、試験装置を据え付ける際にもほとんど制約が無い。図 2 は、クラムシェル型ドーム内の新しいマウントを示す (左側)。また、望遠鏡の背後にある光学ベンチの測定設定を右側に示す。2006 年の実験と比較すると、焦点カメラとシャックハルトマン波面センサが追加されている。

4 測定結果と学術的知見

両方の KIODO 測定キャンペーンについて一連の解析が行われ、その結果については [4][6]-[8] に出版されている。40 cm 口径で記録された受信電力の代表的な例を図 3 (左側) に示す。仰角が

大きくなれば、平均電力は増え、変動がはっきり見えるようになる。仰角約 24 度から電力が降下したのは、雲の量が多くなかったためである。同図右側に、平均受信電力の瞬時値で正規化した受信電力を示す。衛星の視角が高くなるにつれ相対的な電力の変動が小さくなるがよくわかる。

2006 年と 2009 年の 7 つの衛星パスの受信電力のシンチレーションインデックス (規格化分散値) を図 4 に示す。両キャンペーンの受信電力の記録を使用すれば、大気の状態が異なる場合のシンチレーションの振る舞いを決定することができるし、何よりも特定の場所での変動を示すことができる。仰角が大きくなれば、電力のシンチレーションインデックスが激減するのは予想通り

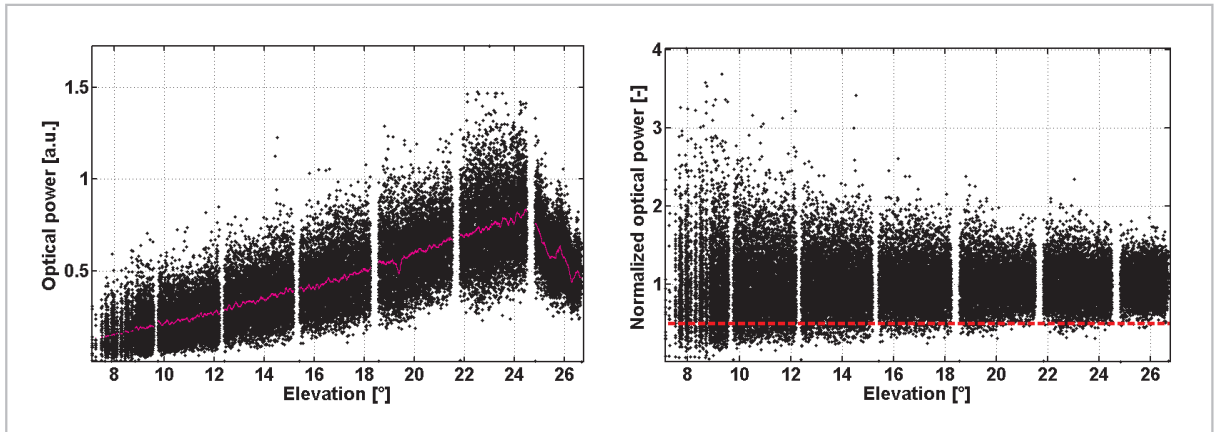


図3 左側：KTO6-04での受信電力（縦軸単位は任意）。黒色の数値は10 kHzで記録された電力のサンプル。赤紫色の線は1 s移動平均の平均値。右側：正規化受信電力。黒色の数値は10 kHzで記録された規格化受信電力の例。赤い破線は、1を平均値に対して-3 dBフェージング閾値を記す[8]

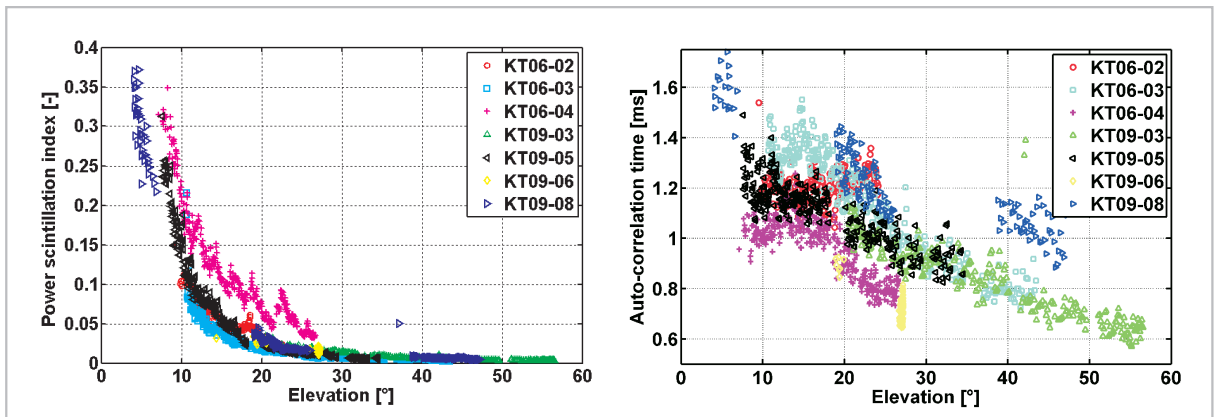


図4 KIDO全測定の電力シンチレーションインデックス（左側）と、自動相関関数の50%ロールオフにより定義された相関時間の測定（右側）[8]

だが、飽和は見られない。その反対に、強度のシンチレーションでは、仰角10度以下で確かに飽和が見られる（図5左側と比較）。40 cm口径での受信の相関時間も図4（右側）に示す。ここで、曲線の変動は全体的には減少してはいるが、特定の試験、例えばKT06-03、KT06-04では極大点があるように見える。

シンチレーションの相関時間は、擾乱セルに対する相対的な（相対的に大気に対する）鉛直方向のビーム速度とシンチレーションの相関幅の比で基本的に決定される。ある仰角以下では、相関幅は飽和現象により減少し始める[6][9]。衛星の鉛直方向の速度が増加するため、鉛直方向のビームの速度は、仰角が高くなると増加する。このような効果の結果、飽和領域と弱いゆらぎの領域の境として、仰角13度付近で相関時間は全体の最大

となることがわかった。Taylorの凍結仮説により、相関時間は受信開口サイズが増加すると増加するが、全体の最大となる仰角角度は同じあたりになることが予想される。

2006年のパスの強度シンチレーションインデックスと、Friedパラメータの数値を図5に示す。第1のカメラ上で、瞳画像が記録されたシンチレーションが測定される。第2のカメラでは、DIMM（シーイング測定装置）コンセプトを使用してFriedパラメータ r_0 が見積もられる[10]。カメラは両方共露光時間が80 μ sであるが、大気ゆらぎに対して画像を「フリーズ」させるのに十分に短い時間である。

仰角の関数として、強度のシンチレーションインデックス（即ち、カメラの画素）を図5左側に示す。シンチレーションの変動は、瞳カメラの

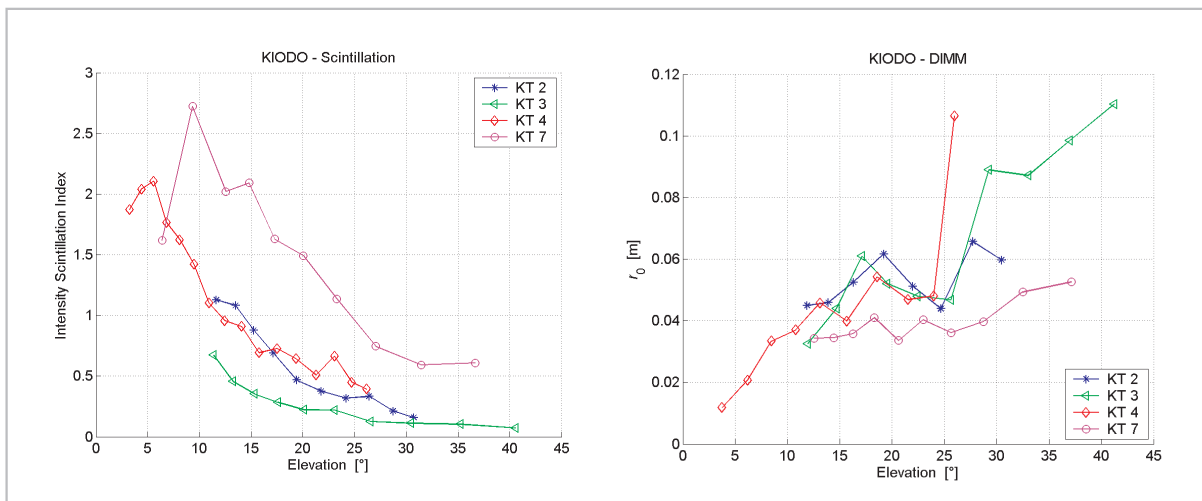


図5 ダウンリンクの強度シンチレーションインデックスと、シーイング測定装置 (DIMM) からの r_0 測定 [4] (2006年)

12ビットの解像度でも十分に表すことができる。2つの異なる開口は、開口上のシンチレーションの空間的な平均の評価を可能とする。直径40cmの開口上(副鏡によるければ直径12cm)において、開口平均ファクターは仰角5°と30°のとき0.2と0.1であった。

理論的に予測されているように[9]、点開口受信機において仰角が低いところでシンチレーションの飽和が見られる。さらに興味深いことには、2つの異なる夜間値でシンチレーションの変動が大きい。つまり、KT06-07の間のシンチレーションは、KT06-03の間よりも5倍強くなっている。この2つの試行の主な相違点として、KT06-07の数時間前に暖かい雷雨があったことが挙げられる。

図5の折れ線は、表5に示す理論値と比較することができる。仰角30度における理論値は、測定値の範囲内である。HV_{5.7}大気擾乱プロファイルは日中のモデルであるが、オーバーファッフェンホーヘンの夜間の大気にあてはめて考慮することができる。すべて夜間に測定されたチャンネルパラメータの変動は、全く予想外であり、光通信システムの設計は最悪擾乱ケースに基づいて行う必要があることを意味している。

受信したビームに関する全情報は、複素数の強度と位相を計測する波面センサを適用することにより入手することができる。2009年にシャックハルトマン型のセンサが光学ベンチ上に設定さ

表5 Rytov理論とHV_{5.7}擾乱モデルを用いた強度シンチレーションインデックス σ_I^2 とFriedパラメータ r_0 の理論値

	仰角 30°	仰角 90°
σ_I^2	0.45	0.13
r_0 [m]	0.062	0.093

れ、約1kHzのフレーム・レートで稼働している。これらの測定から得られる情報で最も基本的なものは、入力ビームの位相、即ち波面の歪みである。実験KT09-08での幾つかの仰角に対する位相確率密度関数を図6に示す。仰角が小さいと、ガウス分布形状をした関数が広がるが、それは仰角が小さいと歪みの程度が大きくなるためである。本解析では、標準的なアルゴリズムで波面再構築を行っており、仰角が20°以下になる値では少なく見積っているかもしれない[5]。仰角20°以上は、受信平面において測定値は波面収差の予測値として有効であり、波面補償(Adaptive Optics: AO)システムへの設計手法へ発展できる。

AOシステムの中心的な構成要素はアクチュエータであり、ほとんどのケースでは歪みを取り除くために波面誤差の逆位相を作るデフォーマブルミラーである。その最大-最小の収差は、標準偏差の約5倍である。ミラーは反射するため半分の変位しか動かなくて良いため、一般的な大体

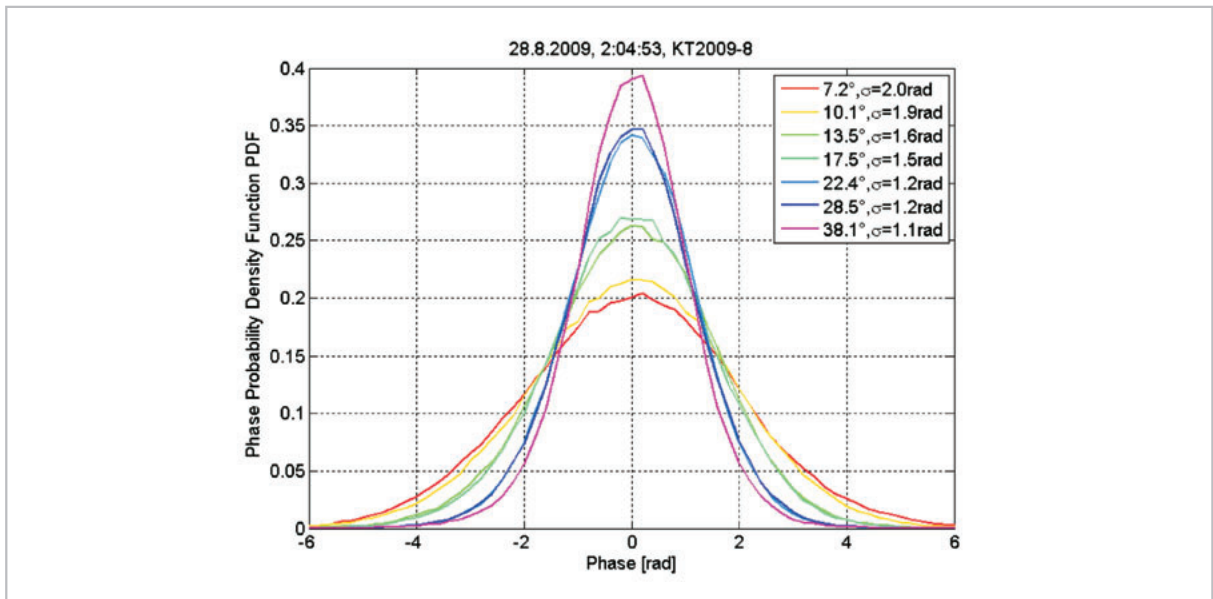


図6 試行8でのOICETS2009から実験中にシャックハルトマン型のセンサにより記録された確率密度関数 (PDF) の複素位相を示す。幾つかの仰角で示される。仰角の平均時間は 10.7 秒 (100 フレーム) であった [5]

の目安としてアクチュエータのストロークは波面誤差の標準偏差に対して 2.5 倍あればよい [11]。この法則をチルトの標準偏差と組み合わせると [12]、

$$Stroke = \frac{5}{2} \cdot 0.366 \cdot \left(\frac{D}{r_0}\right)^{5/6} \text{ [rad]} \quad (1)$$

ここで、 D は受信開口径、 r_0 は Fried パラメータである。よって、必要なストロークは開口サイズに比例し、Fried パラメータに反比例する。図6は仰角 20° における波面誤差の標準偏差 1.2 rad であることを示しており、これはミラーのストロークで 3.0 rad になる。847 nm の波長においては、実際の必要なストローク長は $0.4 \mu\text{m}$ になる。Fried パラメータが 1 cm 以下で仰角 5° 以下であれば、式 (1) はミラーストローク長 19.8 rad (または $2.7 \mu\text{m}$) と予測する。最終的には、これらのストロークは既製品コンポーネントを用いれば簡単に実現することができる。しかしながら、位相歪みの時間挙動はここでは考慮していないし、適切なコンポーネントの選択はとても困難だがやりがいがある側面がある。

LEO ダウンリンクの全天において、Fried パラメータ r_0 と DIMM のような標準的な方法の見積もりはできなかった。Fried パラメータは、統計的に長時間のパラメータで定義されるものであ

るのに対して、光信号が横切る大気の体積は、ダウンリンクが視線方向のスリューを伴い速く変化してしまう。そのために、適切なパラメータの高速な時間サンプルデータを得るため、異なった時間窓で平均を計算しなければならない。この解析は、短時間でチルト除去された焦点シーイングサイズの直径を基に KT09-08 について行われ、文献 [13] に記述されている。これらを、さらに r_0 の瞬時値に変換し、長時間の平均を取ったものを図7に示す。この調査は、補償光学システムへの解像度の要求を解析するのに役立つとともに、短時間のヘテロダイン効果の統計を基に、コヒーレントやファイバ結合する受信機の性能評価を可能とする。

5 まとめと今後の展望

ドイツ航空宇宙センター (DLR) の OGS に対する KIDDO 実験により、光 LEO ダウンリンク伝送チャネルの非常に貴重な情報が得られた。

- ・理論的に予想されるシンチレーションの飽和が、アップリンクとダウンリンクの両方で低い仰角 (< 10 度) で見られた。
- ・シンチレーションに対する開口平均の有益な効果ははっきりと認められ、それにより今

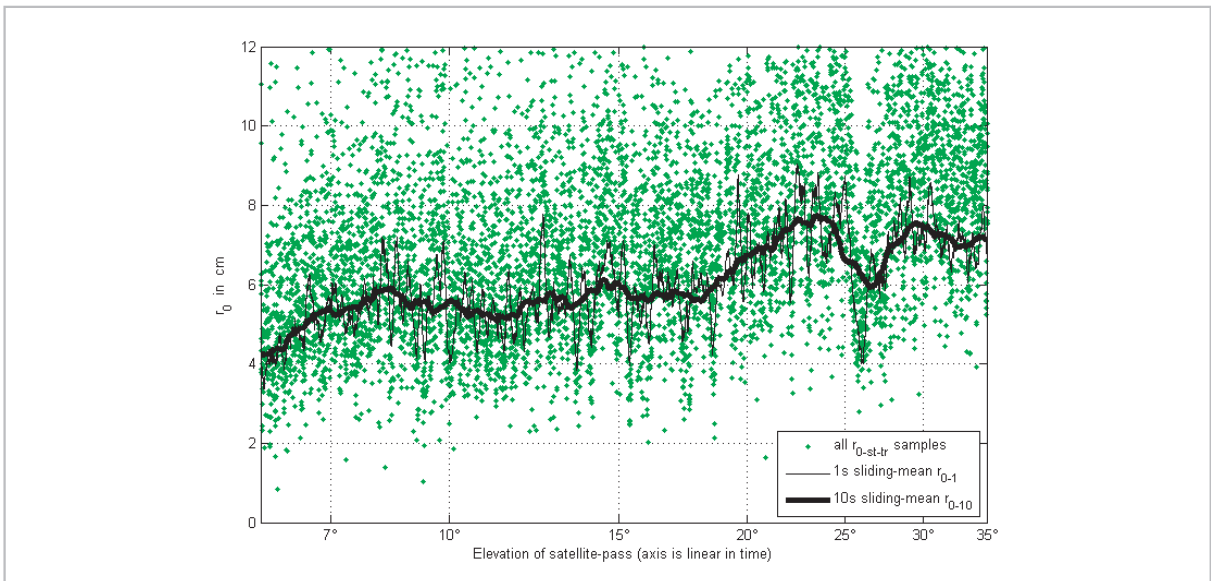


図7 光ダウンリンクにおける異なる平均時間（短時間、1秒及び10秒）における r_0 見積り比較

OGS-OP 上空の衛星上昇パスにおける仰角に対し、 r_{0-10} （10秒平均）の増加は、高仰角におけるリンクパスで大気マスが小さくなる理論と一致している。曲線の不安定な挙動は、リンクが断続的な擾乱層を横切るために起こる。緑色の点は、短時間の値であり、大きな変動を示している。

後の運用システムで、ダウンリンクターミナルの開口寸法を最適化することができた。

- ・リンクのスリューレートを速くすると、仰角に対するシンチレーション速度が緩やかに増加することがわかった。
- ・波面の歪みを測定することにより、単一モード受信器（つまり、コヒーレントな、又はファイバと結合した受信器）の性能評価ができるようになり、補償光学技術を適用することの必要性が考えられ、そのようなシステムの仕様を定めた。
- ・多数のビーコンに対して、非常に低い仰角（3度以下）でリンクを確立することができる可能性が証明された。
- ・その地域の天候と位相幾何学的な制約を組み合わせることにより、衛星パス変化に依存するチャンネルの振る舞いを予測することが可能になった。実際には、信頼性の高い予測を得るためには、ずっと広範囲のデータベースが必要である。
- ・データレート、符号レート、変調スキーム、瞬時チャンネル状態へのインターリーバ深さのような、システムパラメータの適用が考えられる [14]。

DLR-IKN-OCGにて進行中の研究開発には、

新しい光学地上局（OGS-OP）の設置が含まれるが、これは研究所が新しいビルに移転した後で使用される予定である（図8）。地上の様々な場所でダウンリンクの実証を可能とするために、可搬型光地上局（TOGS）が開発され、現在稼働中である（図9）。今後の光ダウンリンク実験には、DLR自身で開発したレーザー光源を搭載した小型衛星搭載レーザー通信ミッション（OSIRIS）を使用した試験が行われる予定である。

今後のレーザー伝送の研究開発において、日中での測定、他の波長での送信、及び強いフェージン

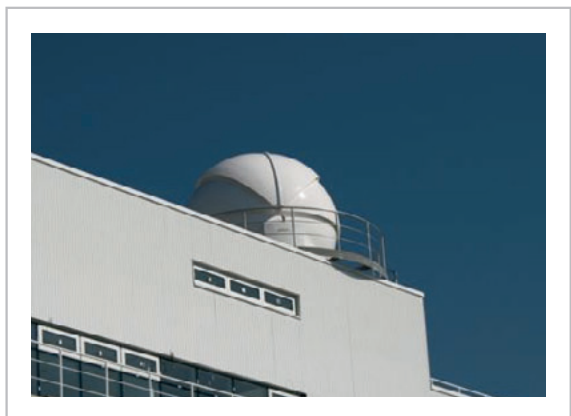


図8 DLRの通信・航法研究所の建屋の屋上にある新OGS-OPのドーム



図9 衛星と航空機ダウンリンク用 DLR の搬送車の付いた可搬型光学地上局

グを補償する最適なチャンネル符号化の試験等を推進したいと考えている。

JAXA と NICT には、KIODO 実験を支援、協力していただいたことにお礼申し上げます。一日

中、又いつも真夜中までダウンリンクを献身的に行っていただいた DLR-IKN-OCG のメンバー各位にも、感謝申し上げたい。

参考文献

- 1 M. Toyoshima, K. Takizawa, T. Kuri, W. Klaus, M. Toyoda, H. Kunimori, T. Jono, Y. Takayama, N. Kura, K. Ohinata, K. Arai, and K. Shiratama, "Ground-to-OICETS laser communication experiments," Proc. of SPIE, 6304B, 1–8, 2006.
- 2 Proceedings of International Workshop on Ground-to-OICETS Laser Communications Experiments 2010 (GOLCE 2010), ISSN 2185-1484, Tenerife, Spain, May 2010.
- 3 Y. Takayama, T. Jono, M. Toyoshima, H. Kunimori, D. Giggenbach, N. Perlot, M. Knappek, K. Shiratama, J. Abe, and K. Arai, "Tracking and pointing characteristics of OICETS optical terminal in communication demonstrations with ground stations," Free-Space Laser Communication Technologies XIX, Proc. of SPIE, 6457A, 2007.
- 4 T. Jono, Y. Takayama, N. Perlot, et al., "Report on DLR-JAXA Joint Experiment: The Kirari Optical Downlink to Oberpfaffenhofen (KIODO)," JAXA, ISSN 1349-1121, 2007.
- 5 M. Knappek, "Adaptive Optics for the Mitigation of Atmospheric Effects in Laser Satellite-To-Ground Communications," Ph.D. dissertation, Technische Universität München, Munich, Germany, 2011.
- 6 N. Perlot, M. Knappek, 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)," Proc. of SPIE Vol. 6457, 2007.
- 7 F. Moll, "KIODO 2009: Trials and analysis," International Workshop on Ground-to-OICETS Laser Communications Experiments 2010: GOLCE 2010, pp. 161–171, 2010.
- 8 F. Moll and M. Knappek, "Free-space laser communications for satellite downlinks: Measurements of the atmospheric channel," in Proceedings of the 62nd International Astronautical Congress, 2011.
- 9 L. C. Andrews and R. L. Phillips, "Laser Beam Propagation through Random Media," SPIE Press, Bellingham, Washington, 2nd edition, 2005.
- 10 M. Sarazin and F. Roddier, "The ESO differential image motion monitor," in Astronomy and Astrophysics, Vol. 227, Issue 1, pp. 294–300, 1990.

