

## 地上一低軌道衛星間光通信回線における受信光変動の確率密度関数の検討

### Probability density function of the atmospheric turbulence-induced signal fluctuation in a ground-to-low earth orbit optical communication link

豊嶋守生 高山佳久 國森裕生 城野隆\*

M. Toyoshima, Y. Takayama, H. Kunimori, and T. Jono\*

情報通信研究機構、\*宇宙航空研究開発機構

NICT, \*JAXA

#### Abstract

The Kirari Optical communication Demonstration Experiments with the NICT optical ground station (KODEN) were successfully conducted in March, May, and September, 2006 under the cooperation between JAXA and NICT. Data from the uplink and downlink optical communication links were analyzed. For the downlink, the scintillation index agreed well with the theoretical results calculated based on the strong fluctuation theory. The aperture averaging effect was the dominant factor in reducing the variation of the downlink signals. The probability density functions as a function of elevation angles were measured and compared with the theoretical model, showing good agreement. For the uplink, the scintillation index disagreed with the calculated results based on the strong fluctuation theory. The multiple beam effect of the uplink transmission with large beams will have an additional reduction factor, which will help to establish ground-to-satellite laser communication links in the future. Four laser beams transmitted from the optical ground station to the OICETS satellite also helped to reduce the optical signal's intensity fluctuation due to atmospheric turbulence.

#### 1. まえがき

地上一衛星間光通信は、近い将来、地上系ネットワークと衛星系ネットワークを結ぶ大容量の超高速情報伝送手段として注目されている。情報通信研究機構(NICT)では、2006年3月から9月にかけて、光衛星間通信実験衛星(OICETS)の光衛星間通信機器(LUCE)を用いて、地上一低軌道衛星間で世界初の双方向光通信実験を行った。実測データからフェージング等の影響を解析することは、今後の空間光伝送システムの設計において、所望のフェードマージンで安定な光回線の確立を実現するために重要である。大気ゆらぎによる受信信号の強度変動は、空気中の屈折率のランダムな時間変動により起因する。そこで本稿では、マルチビーム伝送を行ったときの大気ゆらぎの影響を、受信光強度変動の確率分布について解析したので報告する。

#### 2. 大気ゆらぎのモデル

##### 2.1. Hufnagel-Valleyモデル

Hufnagel-Valley(HV)の大気の構造パラメータは次式で与えられる<sup>[1,2]</sup>

$$C_n^2(h) = 0.00594(\nu/27)^2(10^{-5}h)^{10} \exp(-h/1000) \\ + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) \\ + A \exp(-h/100) \quad (1)$$

ここで、 $h$ は光地上局の高度で122mで、 $\nu$ はパフトン風速モデルによるrms擬似風速である。式(1)のパラメータ $A$ は、Differential image motion monitor (DIMM)<sup>[3]</sup>という大気ゆらぎ測定方法により、 $1.2 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ と求められた<sup>[4]</sup>。このモデルによる地上局での $C_n^2(122 \text{ m})$ は、 $3.56 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ となる。

## 2.2. 大気ゆらぎによる強度変動の確率分布

大気ゆらぎによる受信強度変動の確率分布は、弱い擾乱下における理論においては、一般に対数正規分布となる<sup>[1]</sup>。対数正規分布は、規格化した強度  $I$  に対する分散値を  $\sigma^2$  とすると、次式で与えられる。

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

また、強い擾乱下における理論では、受信強度変動の確率分布は、ガンマーガンマ分布でよく説明できるとされ<sup>[2]</sup>、次式で与えられる。

$$p_G(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{(\alpha+\beta)/2-1} \times K_{\alpha-\beta}\left(2\sqrt{\alpha\beta}I\right), \quad I > 0 \quad (3)$$

ここで、 $\Gamma(\cdot)$  はガンマ関数、 $K_a(b)$  は第2種の修正ベッセル関数であり、

$$\alpha = \frac{1}{\sigma_x^2}, \quad \beta = \frac{1}{\sigma_y^2} \quad (4)$$

で表され、 $\alpha$  と  $\beta$  は大気の大いスケールと小さいスケールのシンチレーションに対するパラメータであり、 $\sigma_x^2$  と  $\sigma_y^2$  はそれぞれに対応する規格化分散値である。シンチレーションインデックスは、これらを使って以下で表される。

$$\sigma^2 = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\alpha\beta} \quad (5)$$

$C_n^2$  は  $10^{-14}$  より大きくなると中から強いゆらぎになるとされる。

## 3. マルチビーム伝送の受信確率分布

$N$  本のレーザビームが、大気のコヒーレンス長  $r_0$  以上に離されて互いに平行に伝送されているとする。このとき、各レーザビームは確率的に独立であるとする。マルチビーム伝送したときの確率分布  $p_{\text{multi}}(I)$  は、1本のレーザによる確率分布の  $N$  重の畳み込みとして得られる。対数正規分布やガンマーガンマ分布の  $N$  重の畳み込みは解析的には得られないので、 $n$  番目のビームによる確率密度関数  $p_n(\cdot)$  の特性関数  $\Phi_n(\cdot)$  を、フーリエ変換することにより数値計算を行うことで得られる。

$$p_{\text{multi}}(I) = \mathfrak{F}^{-1}[\Phi_1 \cdot \Phi_2 \cdots \Phi_N] \quad (6)$$

$$\Phi_n(a) = \int_{-\infty}^{\infty} p_n(x) \exp(iax) dx \quad (7)$$

ここで、 $\mathfrak{F}^{-1}[\cdot]$  は逆フーリエ変換で、それぞれのビームは  $1/N$  の送信電力である。

## 4. 測定結果

衛星搭載の光ターミナルは、地上局から送信された波長  $0.8\mu\text{m}$  帯のレーザ光を受信し、低速応答であるが広視野の捕捉追尾を行う粗追尾系と、高速・高分解能の精追尾系で自動追尾する機能を有している。精追尾センサではレーザ光を受信し、 $1024\text{Hz}$  のサンプリング周波数で計測可能である。一方、光地上局ではサンプリング周波数  $2\text{kHz}$  でデータを取得した。

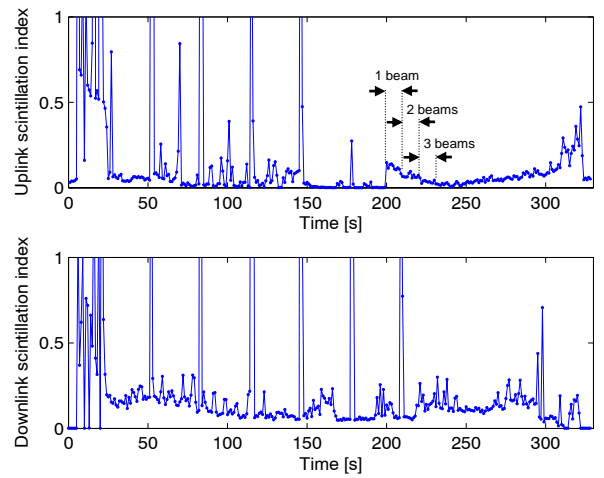


Fig. 1. Scintillation indices for the uplink and downlink received optical signals measured on September 19, 2006.

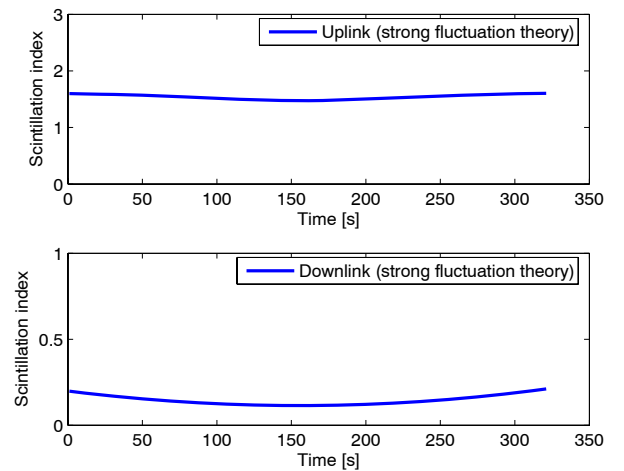


Fig. 2. Scintillation indices for the uplink and downlink received optical signals under the strong fluctuation theory.

#### 4.1. シンチレーションインデックス

図1に2006年9月19日に測定されたシンチレーションインデックスの時間変化を示す。本実験パスでは、最大仰角は37.6度であり、地上局望遠鏡の角速度は最大0.6 deg/sまで上昇している。定量的に評価するために、HVモデルにより計算したシンチレーションインデックスを図2に示す。この結果、ダウンリンクは良い一致を見たが、アップリンクは約10倍理論と測定値との差異があった。この原因については今後研究する必要がある。

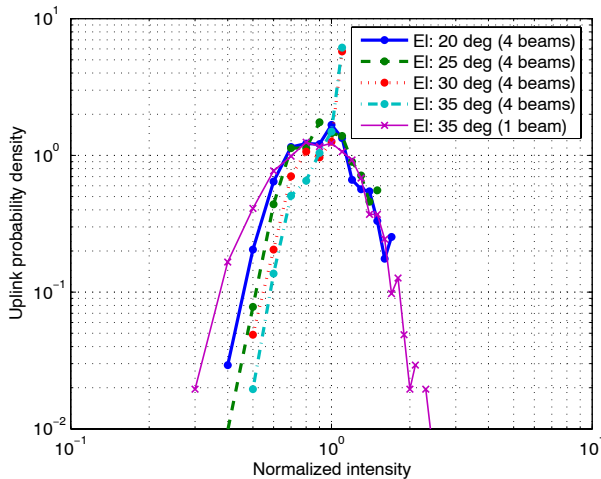


Fig. 3. Uplink PDFs at elevation angles of 20, 25, 30, and 35 deg with one and four laser beams measured on September 19, 2006.

#### 4.2. アップリンクの確率分布

図3に測定されたアップリンクの受信強度変動のヒストグラムを示す。図中の受信信号は、平均値で規格化されており、衛星仰角20,25,30,35度で、1本と4本のレーザを伝送したときの結果を示している。1本のビームに当たるシンチレーションインデックスは、式(3)を満足するように逆関数により求められ、0.20, 0.19, 0.12, 0.093 及び 0.11であった。図より、仰角が高くなるにつれ、またビーム本数が増えるにつれて、受信信号の変動が減少していることが確認できる。マルチビーム伝送を行うことにより、大気ゆらぎの低減に成功していることが確認できる。測定データにフィッティングしたシンチレーションインデックスを用いて、対数正規分布の式(2)と式(6)による計算値を図4に、ガンマーガンマ分布の式(3)と式(6)による計算結果を図5にそれぞれ示す。これにより、解

析結果と測定データが良く一致していることが分かる。

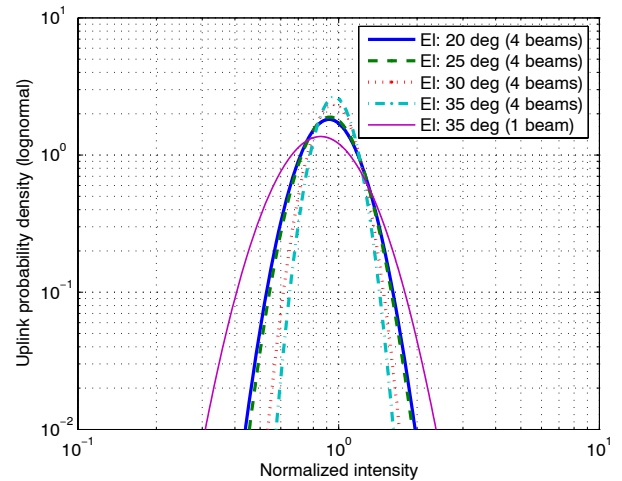


Fig. 4. Uplink PDFs at elevation angles of 20, 25, 30, and 35 deg with one and four laser beams calculated for the experiment on September 19, 2006 based on the lognormal PDF.

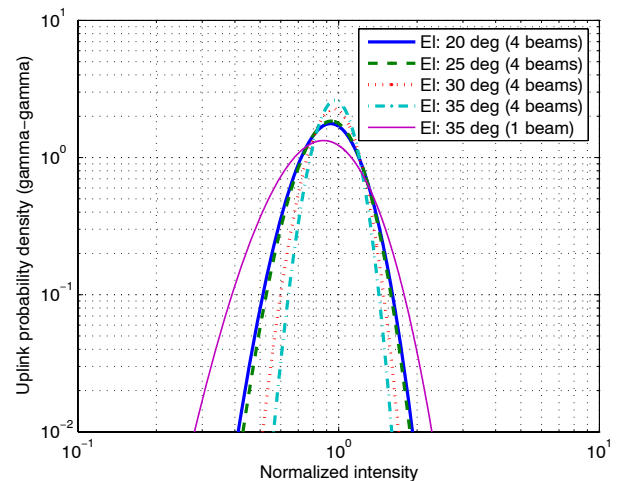


Fig. 5. Uplink PDFs at elevation angles of 20, 25, 30, and 35 deg with four laser beams calculated for the experiment on September 19, 2006 based on the gamma-gamma PDF.

#### 4.3. ダウンリンクの確率分布

図6に2006年9月19日に測定されたダウンリンクの規格化受信強度変動のヒストグラムを示す。衛星仰角20,25,30,35度での測定結果を示している。シンチレーションインデックスは、0.41, 0.18, 0.15 及び 0.088であった。図より、アップリンクと同様に仰角が高くなるにつれ、受信信号の変動が減少していることが確認でき

る。地上局の受信望遠鏡は、開口径 31.8cm で受信したため、開口平均効果により受信信号変動が低減されていることが分かる。定量的評価のため、対数正規分布の式(2)による計算値を図7に、ガンマーガンマ分布の式(3)による計算結果を図8にそれぞれ示す。図より、解析結果と測定データとが良く一致していることが分かる。

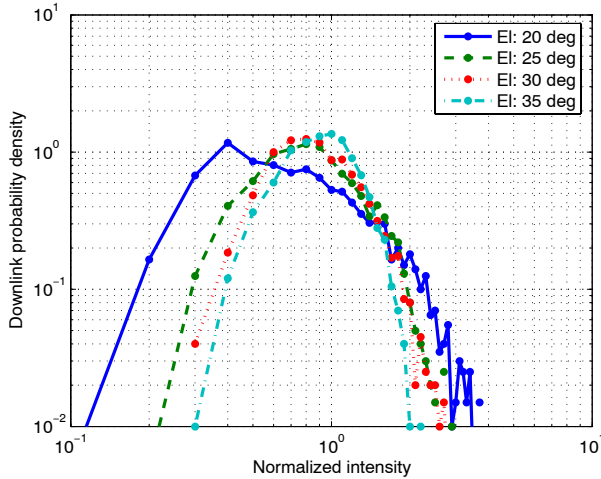


Fig. 6. Downlink PDFs at elevation angles of 20, 25, 30, and 35 deg measured on September 19, 2006.

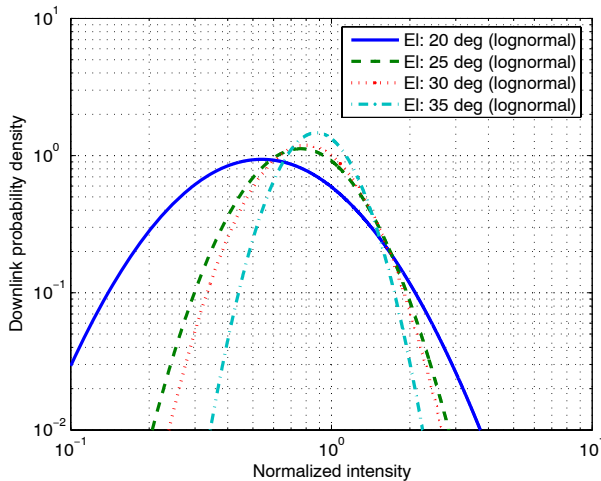


Fig. 7. Downlink PDFs at elevation angles of 20, 25, 30, and 35 deg calculated for the experiment on September 19, 2006 based on the lognormal PDF.

## 5. まとめ

地上一低軌道衛星間光回線における、レーザー光の受信強度変動について述べた。ダウンリンクについては、開口平均効果による受信強度変動の低減が確認され、HV モデルによるシンチ

レーションインデックス及び対数正規分布とガンマーガンマ分布による確率分布共に理論とよく一致した。アップリンクは、マルチビーム伝送により強度変動を低減できることが確認された。受信確率分布については、実測値と比較した結果、測定されたシンチレーションインデックスを用いて計算した分布に関しては良く一致したが、HV モデルによるシンチレーションインデックスの見積もりは約 10 倍実測値のほうが小さかった。この差異については、今後究明する必要がある。

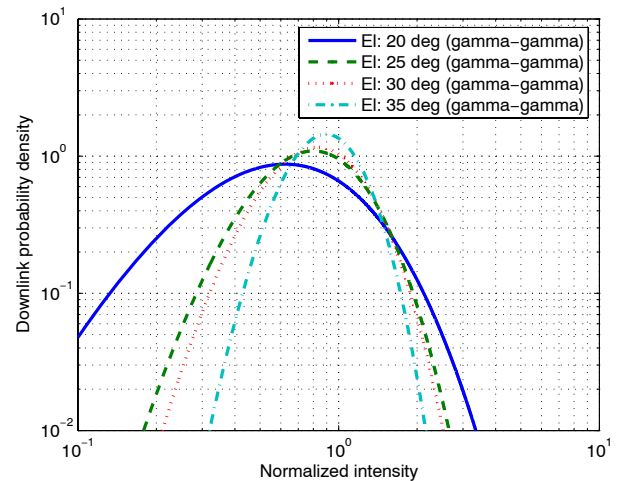


Fig. 8. Downlink PDFs at elevation angles of 20, 25, 30, and 35 deg calculated for the experiment on September 19, 2006 based on the gamma-gamma PDF.

## 6. 参考文献

- [1] L. C. Andrews, R. L. Phillips, and P. T. Yu, "Optical scintillations and fade statistics for a satellite-communication system," *Appl. Opt.* 34(33), 7742–7751 (1995). Errata: 36(24), 6068 (1997).
- [2] L. C. Andrews and R. L. Phillips, *Laser Beam Propagation through Random Media* (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Wash., Second edition, 2005).
- [3] M. Sarazin, and F. Roddier, "The ESO differential image motion monitor," *Astron. Astrophys.*, 277, 294–300 (1990).
- [4] M. Toyoshima, Y. Takayama, H. Kunimori, T. Jono, and K. Arai, "Data analysis results from the KODEN experiments," to be presented in SPIE proc., vol.6709, San Diego, U.S.A., August 28–30 (2007).