

# 地上 - 衛星間光伝搬特性の解析

- ETS-VI 光通信実験の成果より -

宇宙開発事業団（元郵政省通信総合研究所） 荒木賢一

## 1. はじめに

将来の超高速宇宙光通信システムのために、通信総合研究所は世界に先駆けて関連重要技術の実証を目的に地上 - 衛星間光通信実験を 1994 年 12 月から 1996 年 7 月まで実施した[1]。技術試験衛星 VI 型(ETS-VI)搭載の光通信基礎実験装置(LCE)、相手となる地上光学局が開発され、図 1 に示すような実験システムを構成している。米国ジェット推進研究所(JPL)は 1995 年 11 月から参加した。ダウンリンク送信には波長 0.83  $\mu\text{m}$ 、出力 30-mW の半導体レーザー、またアップリンク送信には波長 0.5145  $\mu\text{m}$ 、出力 10W のアルゴンガスレーザーが用いられた。実験では大きな受信光強度変動が観測されたが、距離 40,000 km 以上に及ぶ双方向光回線が、地上、衛星双方の狭レーザービームの高精度制御技術とともに成功裏に実証された。本稿では、アップリンク光伝搬データ解析に関する新しい側面を報告する。

## 2. アップリンク光受信強度

LCE 搭載光受信器では 10 秒間にわたって 2 ミリ秒間隔の光受信強度データが取得可能である。データは一旦搭載メモリに記録され 1 秒ごとに地上に下るされる。このようなアップリンク伝搬データは全実験期間中において 19 回取得された。いずれのデータでも帯域が 100Hz またはそれ以上のランダムな激しい変動がみられた。図 2 に 1996 年 1 月 27 日の実験で得られた例を示す。この 10 秒間のデータによる、平均値で正規化された強度の分散即ち正規化強度分散の値は 0.92 である。この変動が大気ゆらぎだけによるものであるとすると、強いゆらぎの場合の理論が適用されなければならず、複雑な解析や検討が必要になってくる。さらに、一般に変動の原因としては大気ゆらぎの他に地上送信機のビーム指向誤差、LCE における追尾誤差、量子化誤差などがある。多くの原因が重なり合っているため、当時は取得データを十分に説明できる理論や解析方法が見いだせなかった。データ解析に関する作業は継続されてきており、最近、ここに示した 1 月 27 日のデータにおいて小区間統計を基本にした処理を行えば良いという見通しがたった。同じ時間帯に取得されたダウンリンク光の受信データを調べたところほとんど光の欠如が無かった。これは LCE において追尾と指向がうまくいっており、LCE に到達した光が受信器にそのまま入っていることを意味する。従って、ここでのデータの変動の主要な原因は大気ゆらぎと指向ゆらぎであると推定された。

### 3. 確率密度関数

図2の10秒間のデータによる正規化強度のヒストグラムを図3に丸印で示す。良く知られた単峰性の対数正規強度分布からかけ離れている。実験における最大の特徴はビーム幅が0.001度オーダーの狭ビームを用いていることである。衛星の移動速度は毎秒約0.003度であり、角度分解能約0.0001度で追尾された。これから、短時間、例えば0.1秒間のデータはランダムな追尾誤差というよりはむしろある一定の追尾誤差に従っていると見なしうる。実際、0.1秒間のデータのPDFは多くの場合対数正規強度分布に従うことが確認された。但し、正規化強度分散即ちシンチレーションインデックスはそれぞれのサンプルで異なる。

10秒間で衛星の方向は大きく変わらないので光路の大気の性質は一定であると仮定できる。弱いゆらぎ及びガウス型指向誤差を仮定すれば、パラメータ推定のための解析式が導出できる。これには、送信光ビーム幅( $w_0$ )、rms指向誤差( $s_j$ )、指向のバイアス( $j$ )、シンチレーションインデックス( $A$ )等のパラメータが含まれる。0.1秒間のシンチレーションインデックスに対するヒストグラムを図4に示す。送信光ビーム幅 $w_0 = 6 \mu\text{rad}$ を測定値として用い、解析式によってパラメータフィットした結果、 $A=0.20$ ,  $j=0$ , and  $s_j = 3.8 \mu\text{rad}$ が得られた。指向誤差のrms値 $s_j = 3.8 \mu\text{rad}$ は、恒星を用いて行われた望遠鏡の追尾誤差測定で求められているものと同程度の値である。

正規化強度の確率密度関数は解析的に付録の式(A1)で求められる。シンチレーションインデックスが $s_i^2 = 0.27$ (図4のピーク値に対応する)のときの確率密度関数の計算結果を図3に実線で示す。測定結果と非常に良く一致していることが分かる。以上から10秒間の強度データの統計は指向誤差と大気ゆらぎを考慮して説明でき、また地上からのレーザ伝送に対して弱い大気ゆらぎの理論が適用できると考えられる。これらは今後の光システムの設計にとって非常に有用である。

### 4. 時間相関関数

時間変化特性を特徴づけるために、10秒間データを用いて2ミリ秒間隔で0.1秒までの時間差の正規化強度の自己相関関数を求めた。相関値は、0.1秒の時間間隔ごとに相関処理されて得られる約100個の標本値の平均として求めている。この操作は上の議論と同様ビーム指向誤差の影響を少なくすると考えられる。図5に全実験データについて自己相関値の平均値及びばらつきを時間差の関数としてそれぞれ丸印とエラーバーで示す。グラフの傾向はTartarskiの文献[3]に示されている、地上伝搬実験で求められたものと良く一致している。このような傾向を持つ解析式は文献[4]で示されている式の多少の変更で得られ、付録の式(A2)に示している。併せて図2のデータに関する解析式を式(A3)に示す。解析式を用いて、時間平均効果の評価や相関時間などのパラメータの評価ができる。相関値が $1/e^2$ となる相関時間は平均で6.3 msecであった。相関時間は光路における大気のコヒーレンス長や風速に依存する。実験期間でみると1.9から

11.7 ms の範囲であった。図 2 のデータでは相関時間 10.5 ms が推定され、これはゆらぎの変動帯域約 100 Hz に相当する。

## 5. まとめ

本稿では、ETS-VI 光通信実験で得られた光伝搬データを用いて解析及び議論を行った。ここで求めた確率密度関数、時間相関関数に関する解析式は実際の伝搬データを十分説明できるものであり、種々の異なった伝搬条件あるいはビーム伝送条件を想定したシミュレーションにも利用可能である。より安定な光回線のために、ビームパラメータの最適化、マルチレーザ伝送、アダプティブ光学の適用等の検討を行っている。

本稿は、2000 年 5 月 28 日から 6 月 6 日まで盛岡で開催された第 22 回宇宙技術および科学の国際シンポジウムで発表された論文 No.2000-I-5, “Up-Link Intensity Statistics in ETS-VI Laser Communication Experiments”の抄訳である。

## References:

- [1] M. Toyoshima and K. Araki, *Applied Optics*, Vol.37, No.10, pp. 1720-1730, April 1998.
- [2] L. C. Andrews *et al.*, *Applied Optics*, Vol.34, No.33, pp. 7742-7751, Nov.1995.
- [3] V. I. Tatarski, *Wave Propagation in a Turbulent Medium* (McGraw-Hill, New York, 1961), p. 213.
- [4] P. Stroud, *Opt. Eng.*, Vol. 35, No. 2, pp. 543-548, 1996.

## Appendix

### 付録

弱い大気ゆらぎの場合でかつビーム指向誤差がオフセットなしのガウス分布に従う場合、正規化強度  $I/I_0$  の確率密度関数は

$$p(I) = \frac{1}{I_0} \operatorname{Erfc} \left[ \frac{\ln(I/I_0) + \mathbf{s}_I^2 (\mathbf{b} + 1/2)}{\sqrt{2} \mathbf{s}_I} \right] \cdot \mathbf{b} \exp \left[ \frac{\mathbf{s}_I^2}{2} \mathbf{b} (\mathbf{b} + 1) \right] (I/I_0)^{\mathbf{b}-1} \quad (\text{A1})$$

与えられる。ここで、 $\operatorname{Erfc}()$  は誤差補関数、 $\mathbf{s}_I^2$  はシンチレーションインデックス、 $\mathbf{s}_j$  は rms 指向誤差、 $w_0$  はガウスビームの  $1/e^2$  ビーム広がり角 (半角)、そして  $\mathbf{b} = w_0^2 / (4\mathbf{s}_j^2)$  である。

時間相関関数に対する解析式は

$$B(\mathbf{t}) = a \left[ 1 + (\mathbf{t} / \Delta \mathbf{t})^b \right]^c - a + 1, \quad (\text{A2})$$

の形で与えられる。ここで、 $t$  は時間遅れ、 $\Delta t$  はデータ間隔、 $a, b, c$  は定数である。文献[4]に現れている式は  $a=1$ 、 $c=2$  の場合であり、ここでは図5に現れているような負の相関値を表すために変形されたものである。1996年1月27日のデータに対する式は次のように求められる。

$$B(t)|_{1/27} = 1.947 \left[ 1 + (t/0.002)^{0.443} \right]^{-1.121} - 0.947 \quad (A3)$$

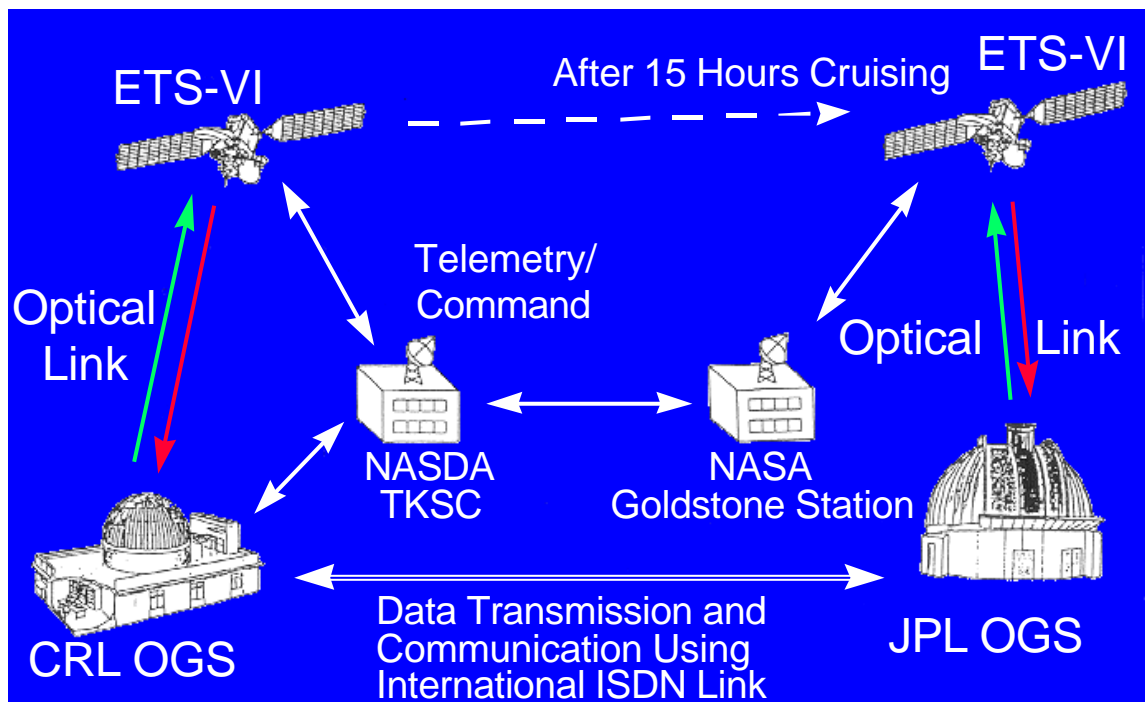


図1 ETS-VI衛星と地上局による光通信実験システムの構成

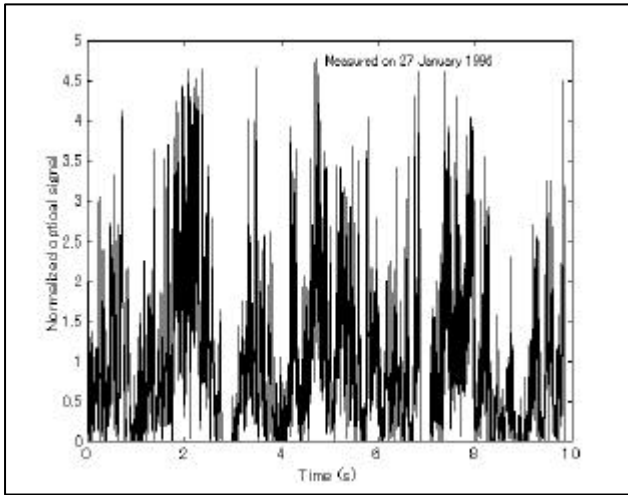


図2 1996年1月27日の実験で測定されたアップリンク光強度

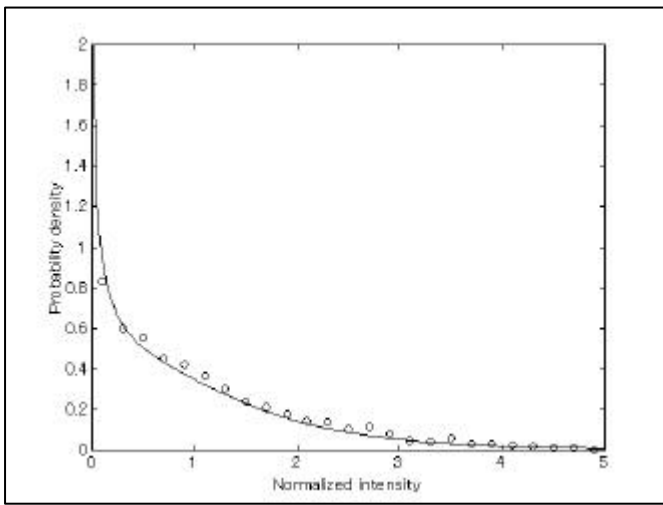


図3 大気ゆらぎと指向誤差を考慮に入れたときの正規化光強度の確率密度

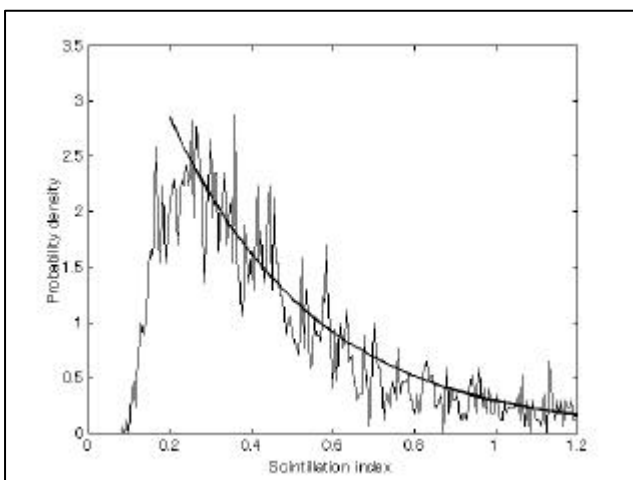


図4 シンチレーションインデックスの確率密度関数

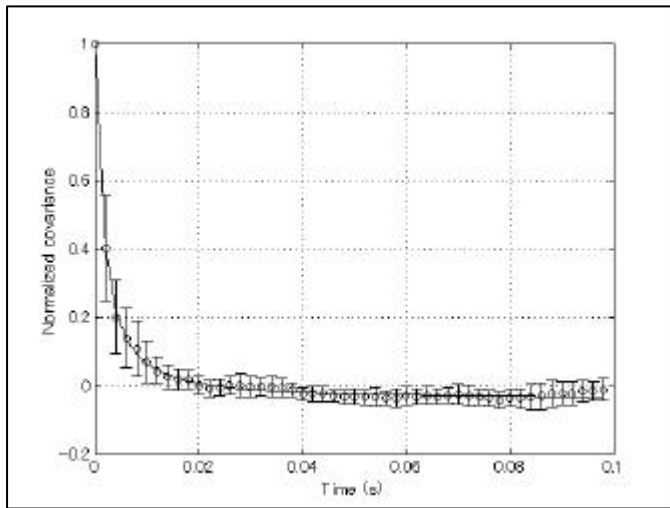


図5 正規化光強度の時間相関関数