

4-5 衛星-地上間光通信フェージングシミュレータ

4-5 *Fading Simulator for Satellite-to-Ground Optical Communication*

佐々木崇 豊嶋守生 竹中秀樹

SASAKI Takashi, TOYOSHIMA Morio, and TAKENAKA Hideki

要旨

地上-衛星間光通信では大気ゆらぎによるフェージングによって、通信品質が劣化することが知られている。大気ゆらぎとは、大気中の屈折率分布の変動によって、その境界面において光が屈折する現象である。そのため衛星搭載光通信機器は、この影響に関して事前にテストされることが望ましい。

そこで今回、光衛星間通信実験衛星「きらり (Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite: OICETS)」によって得られた実際の大気ゆらぎのデータをもとに、衛星-地上間フェージングシミュレータを開発した。本シミュレータの開発によって、今後、衛星搭載光通信機器のより高度な地上評価が可能となる。

In the satellite-to ground optical communications, it is well known that communication quality will be deteriorated by the fading by atmospheric turbulence. Atmospheric turbulence is a phenomenon which light is refracted on the boundary surface by change of the refractive-index distribution in the atmosphere. Satellite onboard optical-communications apparatus needs to be tested in advance about this influence.

Hence, the fading simulator for satellite-ground optical link was developed based on the actual propagation data obtained by Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite (OICETS) experiment. More advanced ground evaluation of satellite onboard optical-communications apparatus will be attained by using this simulator from now on.

[キーワード]

通信, 衛星通信, 光衛星通信, 大気ゆらぎ, OICETS

Communication, Satellite communication, Laser satellite communication, Atmospheric turbulence, OICETS

1 まえがき

地上-衛星間光通信において大気ゆらぎによる受信強度の変動を把握することは、安定した光通信回線を確立するための重要な課題の1つである。大気ゆらぎとは気温の変化による大気の屈折率の変動や、風とそれによって生じる対流、乱流などの影響によって光の到来角が変動したり、波面歪みが生じる現象である。光衛星通信においてはこの影響によって信号光の受信レベルが変動してしまい、その結果通信品質の劣化を招く。その減衰の大きさは最大で20 dB以上にもなり、さらにその変動周波数は数 Hz ~ 2 kHz 程度と通信

速度に比べて非常に遅い。

例として、通信速度が100 Mbpsの時、10 msのバーストエラーが生じると 10^6 ビットものデータが消失してしまう。現在NICTではこのような大気ゆらぎによる影響に対処するために、通信路をLDGM (Low Density Generator Matrix) 符号によって符号化する研究を進めている[1]。LDGM符号はLDPC (Low Density Paritycheck Code) 符号の一種であり、高速な符号化、復号化が行え、かつ長い符号長を実現できる。そこで、このLDGM符号の適切な符号長などを決定するためにも、衛星-地上間の大気ゆらぎによるフェージングを模擬するシミュレータが必要とさ

れている。

本研究では疑似大気ゆらぎを、光強度変調器を用いて光ファイバ中に発生させ、地上-衛星間の通信路における大気ゆらぎによるフェージングを再現することを目標とする。本研究によって開発されたシミュレータは、今後、実際の衛星搭載用宇宙光通信装置の性能評価等に利用可能であり、通信路の符号化の際にはその有効性を事前に評価することができると考えられる。なお今回のシミュレータで用いた疑似大気ゆらぎの信号は、NICTが解析したOICETSの実験データから求められているため、より実際の条件に近い地上-衛星間に生じる大気ゆらぎを再現することができる。

2 大気ゆらぎの理論モデル

大気ゆらぎのパワースペクトルは、大気ゆらぎによって生じる受信ビーム中のスペクルパターンの空間周波数スペクトルと、受信アンテナの開口による窓関数の空間スペクトルとの畳み込みによって計算できる [2]。

大気ゆらぎによるスペクルパターンの空間周波数スペクトル $W_s^2(\kappa)$ は一般的に式 (1) に示す、フォン・カルマン型スペクトルで記述されると仮定する。

$$W_s^2(\kappa) = \frac{0.033 C_n^2 \exp(-\kappa^2/\kappa_m^2)}{(\kappa^2 + \kappa_0^2)^{11/6}} \quad (1)$$

ここで $\kappa_m = 5.92/l_0$ 、 $\kappa_0 = 2\pi/L_0$ であり、 l_0 は大気ゆらぎの空間分布の最小スケール、 L_0 は最大スケールを表す。ここで C_n^2 は大気の構造関数であり、シミュレーション等には地上-衛星間においては式 (2) の Hufnagel-Valley モデルの式がよく用いられる。

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

この時、 h は地上局の高度、 v は風速の平均二乗偏差であり式 (3) によって与えられる。 A は地上における C_n^2 の係数であり、例えば Differential Image Motion Monitor (DIMM) と呼ばれる手法を用いて求めることができる。

$$v = \left[\frac{1}{15 \times 10^3} \int_{5 \times 10^3}^{20 \times 10^3} V_B^2(h) dh \right]^{1/2} \quad (3)$$

ここで $V_B(h)$ は Bufton の風速モデルであり、式 (4) を用いた。

$$V_B(h) = \omega_g h + v_g + 30 \exp\left[-\frac{h - 9400}{4800}\right] \quad (4)$$

上式において v_g は地上付近の風速であり、 ω_g は衛星の運動による大気の望遠鏡に対する動きである。

また、受信アンテナの開口による窓関数は式 (5) から得られる。

$$W_a(\kappa) = \frac{\pi D^2 2J_1(\pi D \kappa)}{4 (\pi D \kappa)} \quad (5)$$

よって大気ゆらぎの時間パワースペクトルは式 (1) と式 (5) を用いて、式 (6) によって与えられる。

$$\begin{aligned} W_e^2(f) &= \left| \frac{\tau_r}{V} \int_0^\infty W_a \left(\sqrt{\kappa^2 + \frac{f^2}{V^2}} \right) W_s^* \left(\sqrt{\kappa^2 + \frac{f^2}{V^2}} \right) d\kappa \right|^2 \\ &= \frac{\tau_r^2}{V^2} \int_0^\infty \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)^2 \frac{J_1^2(\pi D \sqrt{\kappa^2 + f^2/V^2})}{(\pi D \sqrt{\kappa^2 + f^2/V^2})^2} \\ &\quad \times \frac{0.033 C_n^2 \exp\left[-\frac{(\kappa^2 + f^2/V^2)}{\kappa_m^2}\right]}{(\kappa^2 + f^2/V^2 + \kappa_0^2)^{11/6}} d\kappa \quad (6) \\ &= \frac{0.033 C_n^2 \tau_r^2 D^2}{4V^2} \int_0^\infty \frac{J_1^2(\pi D \sqrt{\kappa^2 + f^2/V^2})}{(\kappa^2 + f^2/V^2)} \\ &\quad \times \frac{\exp[-(\kappa^2 + f^2/V^2)/\kappa_m^2]}{(\kappa^2 + f^2/V^2 + \kappa_0^2)^{11/6}} d\kappa \end{aligned}$$

ここで τ_r は光学損失であり、 V は通信路中の風速である。そして次に式 (6) に関して周波数の正規化を行い、各々の周波数の出現確率を求める。式 (7) に確率密度関数 $P_w(f)$ の計算式を示す。

$$P_w(f) = f W_e^2(f) / \int_0^\infty W_e^2(x) dx \quad (7)$$

3 シミュレータの構成

今回開発した衛星-地上間光通信フェージングシミュレータは、大気ゆらぎによる受信強度の変動を、光強度変調器を用いて再現している。シ

ミュレータの構成を図1に示す。また、使用した光強度変調器を図2に示す。光源の波長は1550 nmであり、信号の検出にはPhotodiode (PD) を用いている。シミュレータではまず、疑似大気ゆらぎ信号生成用PCにおいて大気ゆらぎによるフェージング信号を生成する。今回信号の生成には、ソフトウェアとしてNational Instruments社のLabVIEW及びLabVIEW FPGAを、またハードウェアとして同社のPCIスロット搭載型FPGAボードPCI-7811Rを使用した。これによって疑似大気ゆらぎによるフェージング信号のリアルタイム生成が可能となっている。

そして信号を、デジタル-アナログ変換回路

(DAC) を用いてアナログ信号に変換したのちに、光強度変調器に入力し、光ファイバ上に衛星-地上間における大気ゆらぎによるフェージングの再現を試みた。

また、今回使用した光強度変調器は、入力電圧によって減衰の程度を調整できるため、入力する信号の電圧幅を変えることによって、疑似大気ゆらぎの影響の強さを調整することができる。

4 シミュレーション結果

まず、2において求めたパワースペクトルの式を用いて擬似大気ゆらぎをシミュレーション上

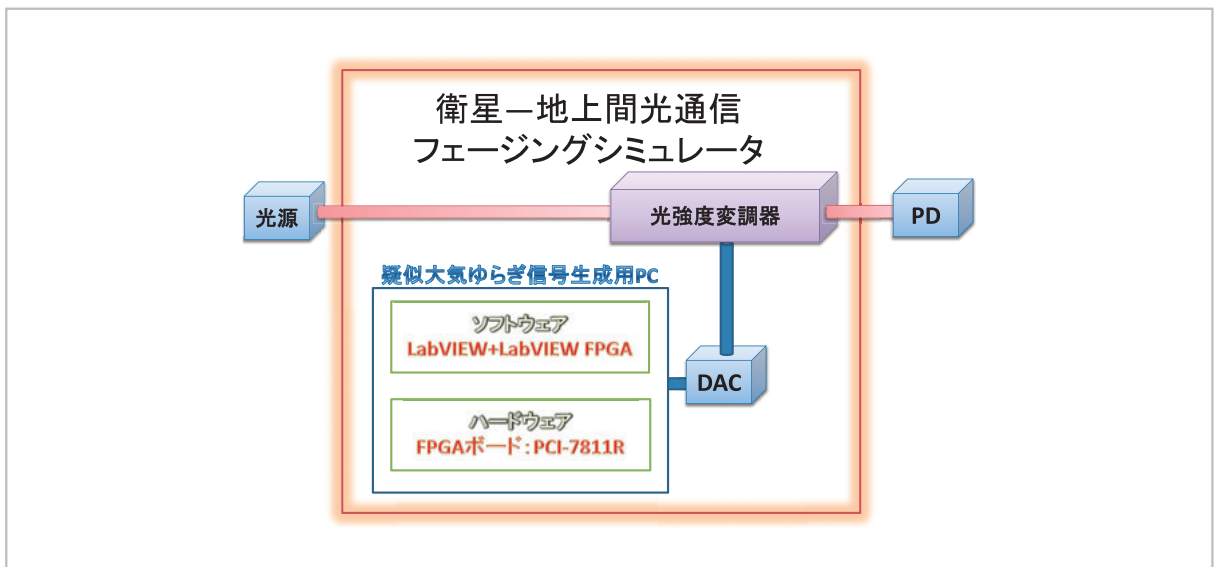


図1 シミュレータの構成例



図2 光強度変調器

で発生させた。今回シミュレーション条件として、 $l_0 = 4e - 3$ [m]、 $L_0 = 1.6$ [m]、 $D = 0.05$ [m]、 $V = 80$ [m/s] とした。生成された大気ゆらぎの波形とその周波数スペクトルを図3、図4に示す。また、比較のために実際の衛星-地上局間光衛星通信時の大気ゆらぎのパワースペクトルのグラフを図5に示す。これは OICETS 衛星

を用いて取得されたデータである。図5を見ると、大気ゆらぎの周波数成分の多くが数 Hz から数百 Hz 程度であることがわかる。そして、この特徴は図4においても確認できるため、シミュレーション結果は大気ゆらぎのこの特徴を再現できていると考えられる。

また、大気ゆらぎのもうひとつの特徴として周

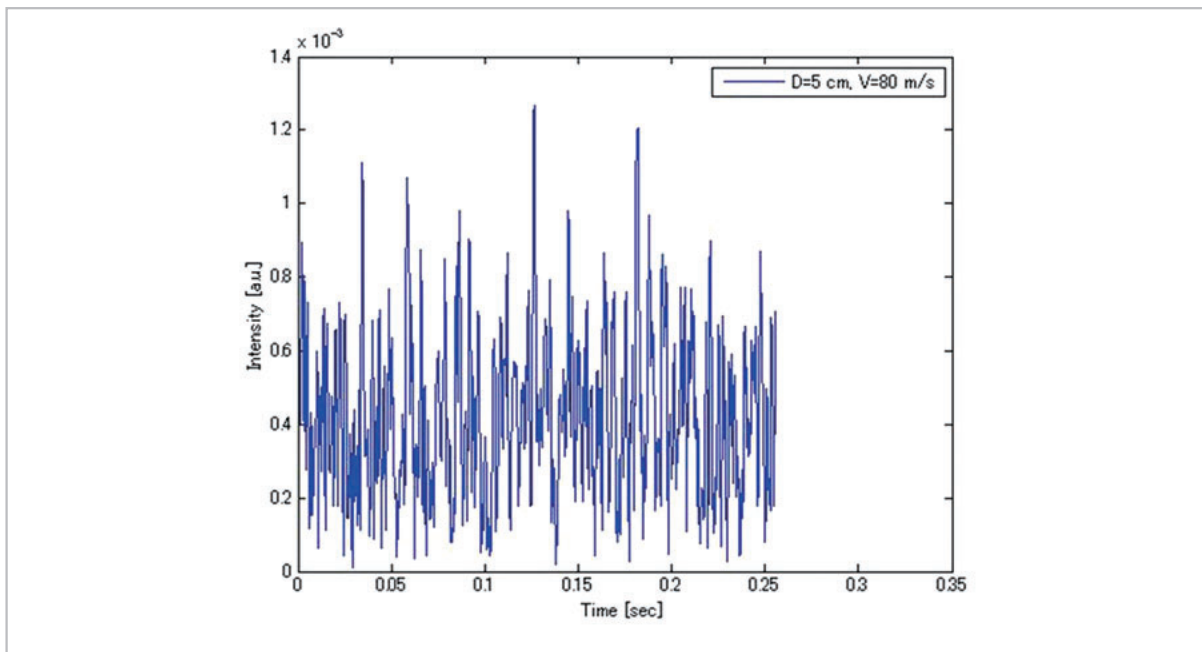


図3 PC 上でのシミュレーション結果

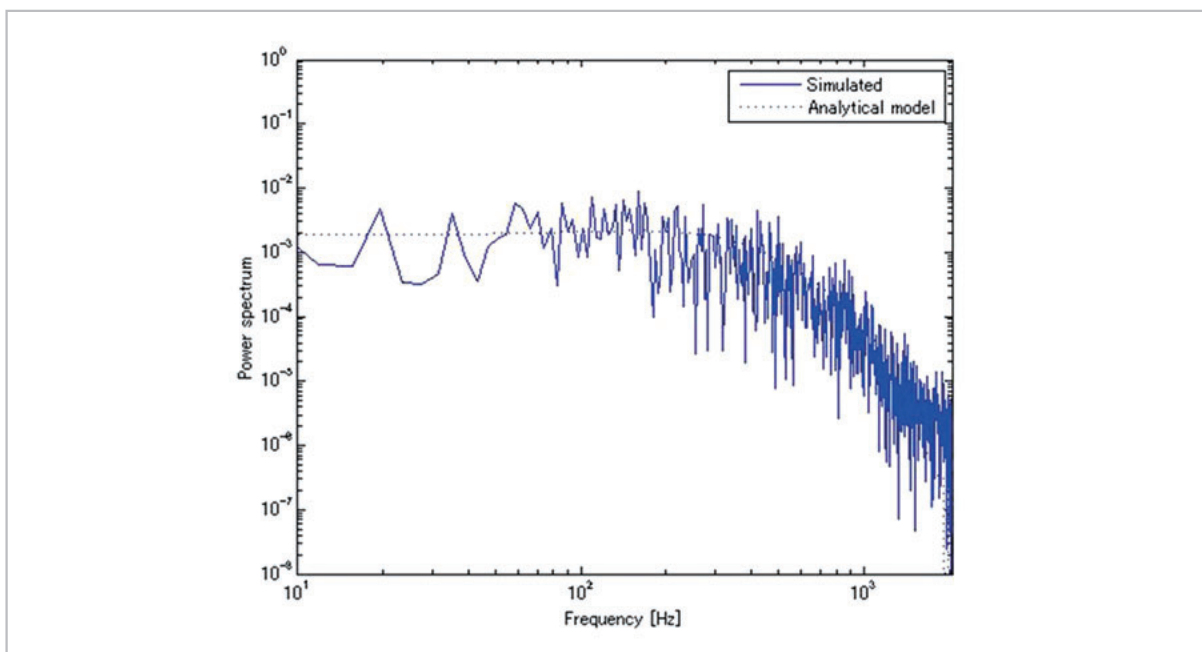


図4 PC 上でシミュレーションした波形をフーリエ変換した結果

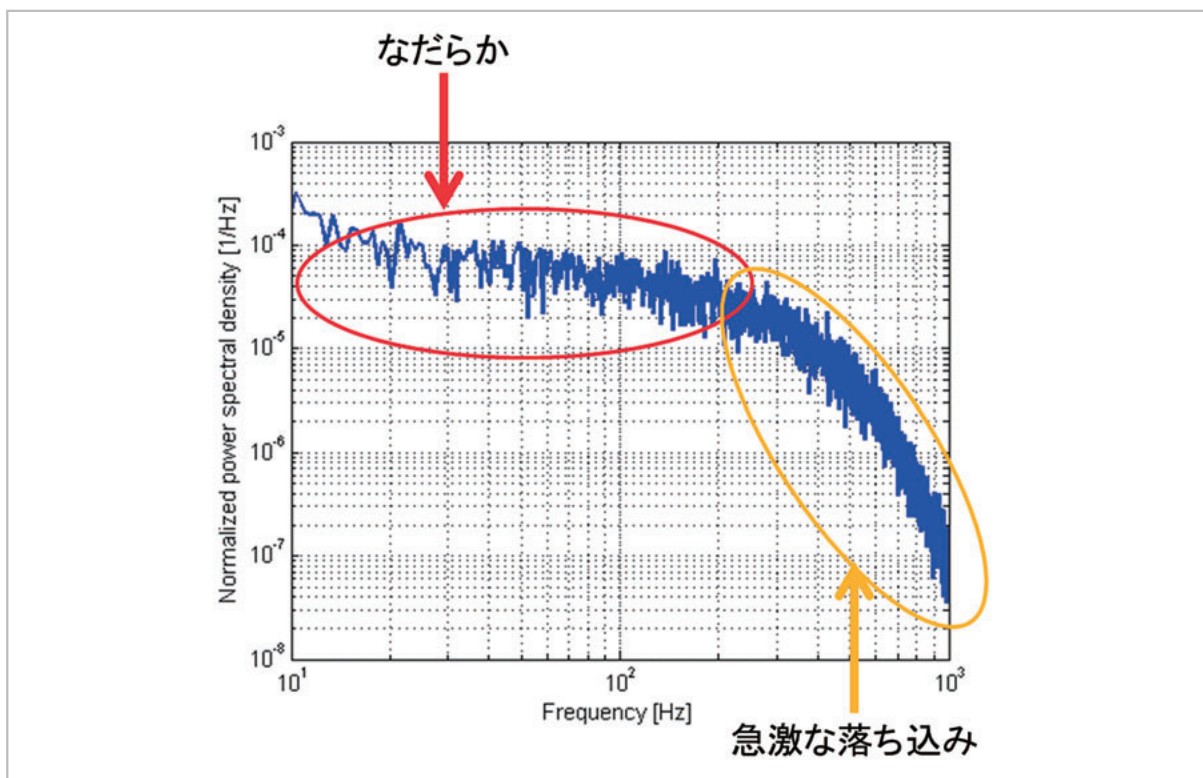


図5 OICETS 実験時に実測された大気ゆらぎの波形をフーリエ変換した結果

波数スペクトルが 100 Hz 代後半になると落ち込む点が上げられる。この特徴について図4と図5の周波数スペクトルを比較してみると、両グラフにおいて 400 Hz 付近からスペクトルの落ち込みが確認できる。そのためこの特徴についてもシミュレーション結果は大気ゆらぎを再現できていると考えられる。

以上の理由から、今回作成したシミュレーションプログラムは、地上-衛星間における大気ゆらぎによるフェーディングのパワースペクトルに関して、再現できたと考えられる。

5 測定結果

5.1 シミュレータの測定結果

次に、実際に衛星-地上間光通信フェーディングシミュレータを用いて、光ファイバ上に疑似大気ゆらぎを発生させた。まず図1の構成を用いて、測定を行った。記録された波形、及びフーリエスペクトルを図6、図7に示す。図3と図6を比較すると、光ファイバ上に発生させた疑似大気ゆらぎは、シミュレータの結果に比べて減衰に偏って

いることが分かる。これは今後 LN 変調器を調整し、補正を行う予定である。

一方で図7をみると、その周波数成分の多くが数 Hz から数百 Hz 程度であり、また 100 Hz 代後半からスペクトルが落ち込むなど、ある程度大気ゆらぎの特徴が再現できていることが確認できる。しかし図4や図5と比較するとスペクトルの落ち込み方が異なることがわかる。この原因についても変調器が原因であると考えられる。今回擬似大気ゆらぎの生成に使用した LN 変調器は、入力電圧に対して線形に動作するわけではない。そのため今回シミュレーションプログラム内にこの光変調特性の逆関数を組み込むことによって、この特性の補償を試みた。しかしそのために変調特性を近似した結果、完全に補償できずこのような結果になったと考えられる。

5.2 通信系を用いた測定結果

次に、通信実験系として図8の構成を構築した。この測定では、実際に強度変調方式による通信信号を用いて、疑似大気ゆらぎ下での伝搬実験を行い、信号の劣化についての確認を行った。通

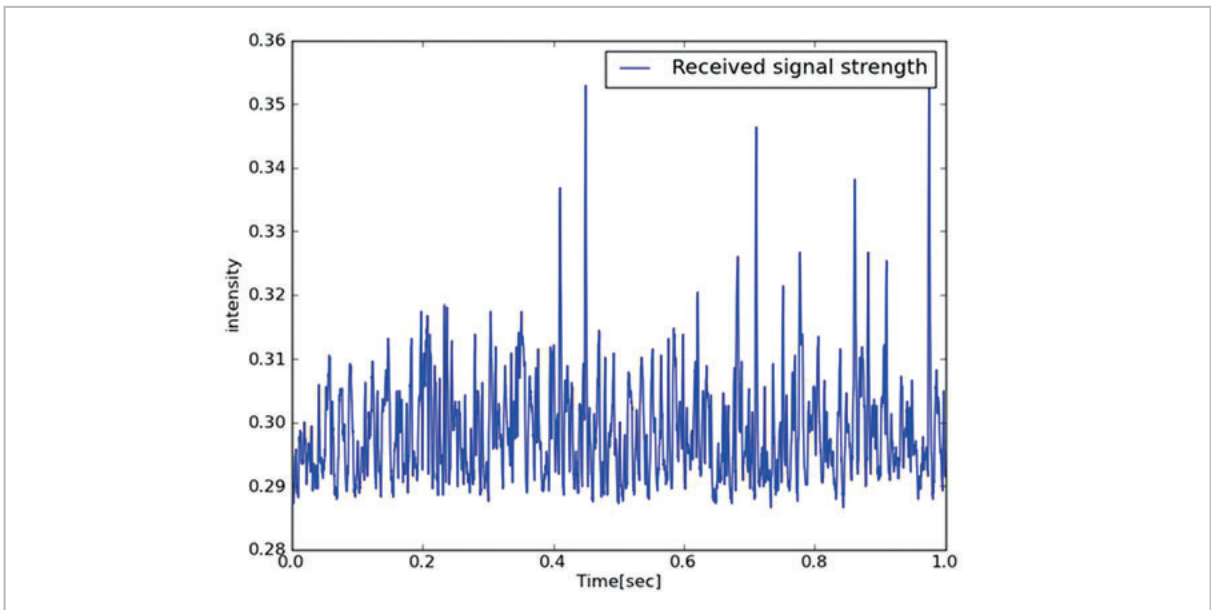


図6 光ファイバ上に発生した疑似大気ゆらぎによる受信レベルの変動

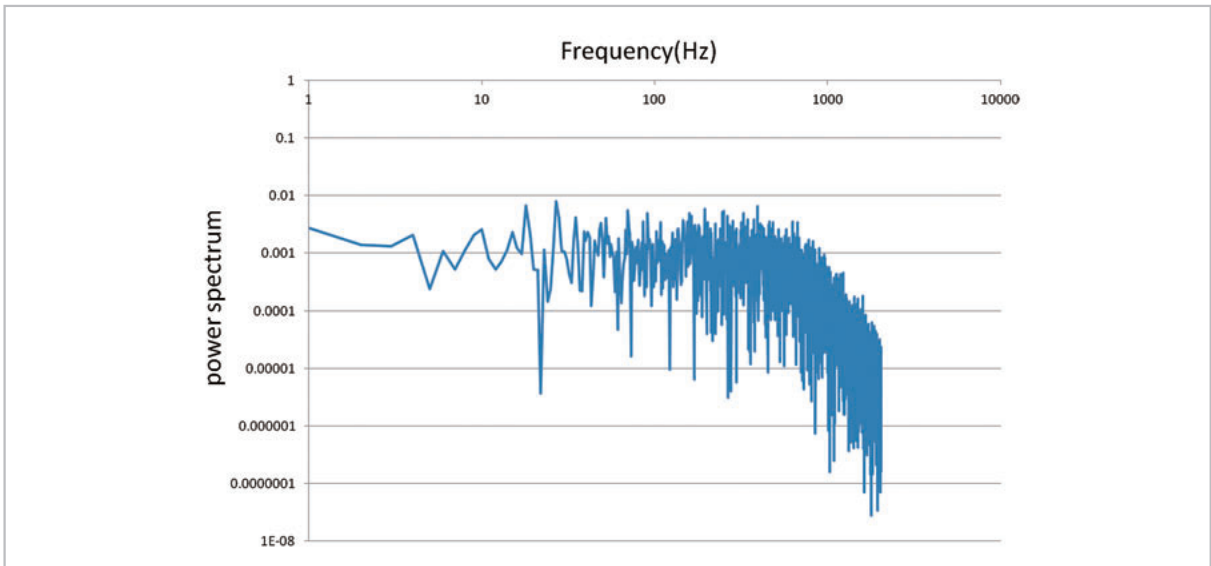


図7 記録した波形 (図5) をフーリエ変換した結果

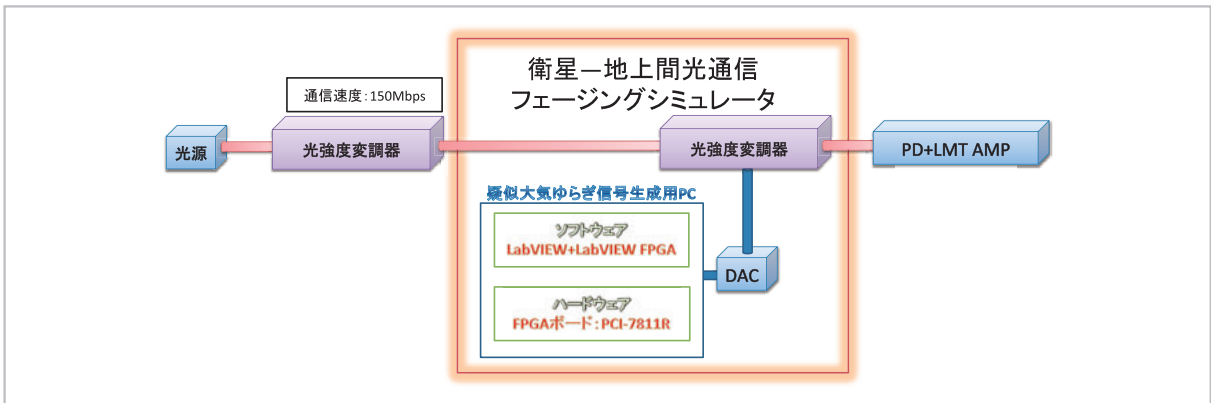


図8 シミュレータを用いた通信実験系

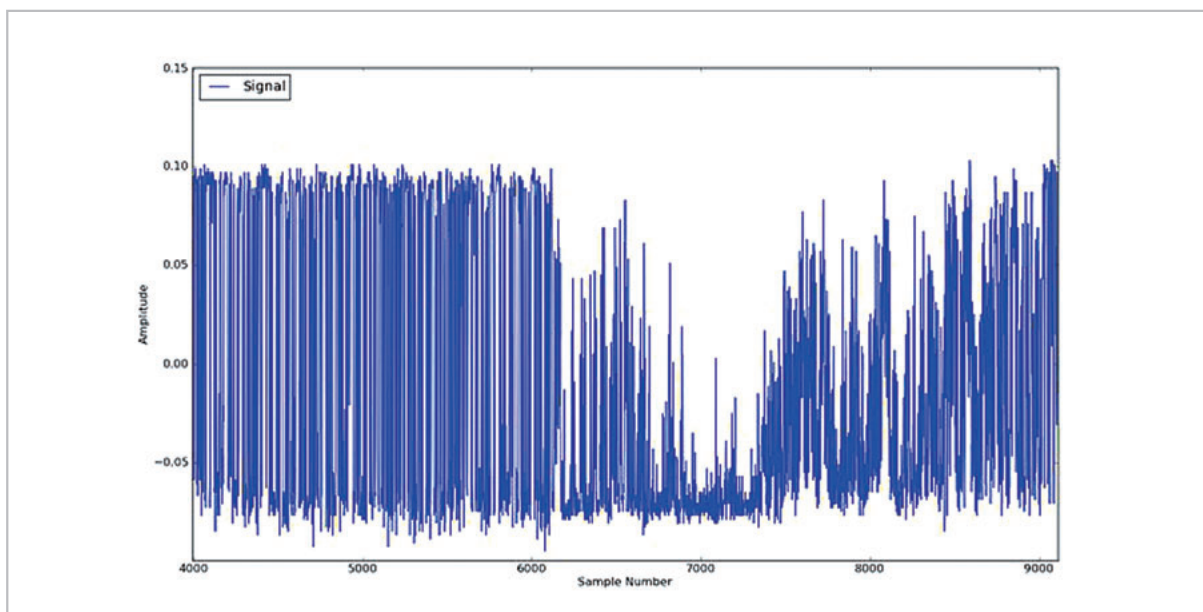


図9 疑似大気ゆらぎ中を伝搬した通信信号の受信レベル

信速度は 150 Mbps である。通信波形の例を図 9 に示す。ここで縦軸の振幅は、データレコーダからの電圧値である。またリミティングアンプ (LMT AMP) を使用することによって弱い疑似大気ゆらぎによる変動については補償されている。しかし、大きな変動によって明らかに信号が劣化している箇所がわかる。これによって、本シミュレータが単に大気ゆらぎのパワースペクトルを再現するにとどまらず、バーストエラーについても再現できることが確認できた。

6 むすび

今回、衛星-地上間光通信フェージングシミュレータを開発し、その評価について述べた。本シミュレータは、実際の衛星-地上間におけるフェージングを再現することができ、またバーストエラーを発生させることも可能である。そのため、今後、衛星に搭載される光通信機器を地上において正確に評価することが可能であり、また符号化による通信品質への効果などについても確認することができる。

今後の課題については、バーストエラー発生時の通信品質の評価が挙げられる。一般的な測定器である Bit Error Rate Tester (BERT) を用い

て評価を行うと、断続的なバーストエラー発生時に信号同期がとれないため、エラーのカウントが正確にできない。

また次の課題として、コヒーレント方式への適応を検討している。現在のシミュレータの構成では、IM-DD (Intensity Modulation-Direct Detection) 方式のみの評価しか行えない。これは使用した光強度変調器が位相に対して影響を与えてしまうためであり、位相変調を用いるコヒーレント方式では使用できない。しかしながら、コヒーレント方式はその高い受信感度と、位相変調を用いることから、強度変動である大気ゆらぎに対しての耐性が期待できる。そのため、今後シミュレータを改良し、IM-DD 方式との比較を行うことによって、光衛星通信に対してのコヒーレント方式の有効性を示したい。

謝辞

今回シミュレータの構築にあたって、宇宙通信システム研究室の豊嶋守生室長、光衛星通信技術ユニットの高山佳久主任研究員、國森裕生主任研究員、小山善貞専攻研究員、竹中秀樹技術員に大変お世話になりました。深く感謝いたします。

参考文献

- 1 Hideki Takenaka, Morio Toyoshima, Yozo Shoji, Yoshihisa Takayama, Yoshisada Koyama, Maki Akioka, and Eiji Okamoto, "Evaluation of the optical communication system for Small Optical Transponder (SOTA) based on the laboratory test," International Astronautical Congress (IAC), Vol. IAC-11 (B2.2.10), pp. 1–5, 2011.
- 2 Morio Toyoshima, Hideki Takenaka, Yozo Shoji, and Yoshihisa Takayama, "Frequency characteristics of atmospheric turbulence in space-to ground laser links," Proc. SPIE Defense, Security+Sensing Symposium Vol. 7685, 2010.

(平成 24 年 3 月 14 日 採録)

さ さ き たかし
佐々木 崇

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 研修員
衛星通信、大気擾乱
t-sasaki@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、レーザー通信、
量子暗号
morio@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、レーザー通信
take@nict.go.jp