

技術試験衛星ETS-VIへのレーザー伝送

Laser beam transmission to the Engineering Test Satellite VI

豊田雅宏 豊嶋守生 高橋鉄雄 鹿谷元一 有本好徳 荒木賢一 有賀 規

Masahiro Toyoda, Morio Toyoshima, Tetsuo Takahashi,

Motokazu Shikatani, Yoshinori Arimoto, Kenichi Araki and Tadashi Aruga

郵政省通信総合研究所

Communications Research Laboratory, MPT

Abstract Experimental results of laser beam transmission from a ground station to the Engineering Test Satellite VI(ETS-VI) are presented. The ETS-VI that was launched last year August has an onboard laser communication equipment(LCE). A very narrow laser beam less than 60μ rad divergence was continuously transmitted to the LCE from a ground station with a highly accurate satellite optical tracking technique. Optical power fluctuation at LCE is very large, its log-amplitude variance was about 0.5 and a maximum time duration was about 50 milli-seconds. Theoretical analysis of laser beam fluctuation at a satellite is described and compared with the experimental results.

1 はじめに

地球の周りには大気が存在しその密度の空間的、時間的な変化により、地上から伝搬する光ビームの波面は変形し、衛星まで伝搬した後はビームの強度分布の変動となる。地上から人工衛星に対するレーザーの伝送については、1970年前後から、Fried(1)およびTitterton(2)によって強度変動の理論的な解析が行なわれ、Minnotによって低軌道の衛星に対してレーザー伝送の実験が行なわれた(3)。また、衛星に搭載されているコーナーキューブレトロリフレクターを用いた折り返しパスでのレーザー伝送が行なわれた(4,5)。これらの実験は、送信ビームの拡がり角が大きくゆらぎのある媒質中で球面波の伝搬として扱えるとした場合であり、ビーム拡がり角が狭い場合や、ゆらぎの発生位置でビーム径の小さい場合の伝送実験は行なわれていなかった。

一方、通信総研における衛星へのレーザー伝送に関する実験として、1983年に静止気象衛星GMS-2へのアルゴンレーザー伝送実験(6)、1987年にGMS-3へアルゴンレーザーと炭酸ガスレーザーの同時伝送実験(7)、1994年にGMS-5への狭ビームレーザー伝送実験(8)をいずれも気象衛星センターと共同して行なってきた。しかし、これらの実験は、走査型の衛星搭載光検出器に対してレーザー伝送を行なったもので、送信レーザーの連続的な検出は行なわれていなかった。通信総研では、光衛星間通信の研究の一環として衛星搭載用の光学装置を開発(9)し、ETS-VI(Engineering Test Satellite-VI)に搭載して、1994年の末から地上と衛星間での双方向光通信に関する実験を行なっている(10)。本論文では、この実験の中で行なわれた地上から衛星への狭ビームのレーザーを伝送した結果について述べる。衛星搭載受光器での受光結果を示し、強度変動の大気ゆらぎによる影響について理論的な検討と比較評価した。

2 地上から人工衛星へのレーザー伝送

地上から衛星へのレーザービームの伝搬では、伝搬路上での屈折率の変動によってビームの位相面が変形する。波面の変動は主に、屈折率変動の大きな対流圏までの間で生じ、ビームの傾きや散らばりを伴って伝搬していき、最終的に衛星におけるビームの強度分布は、歪んだ波面による遠方界パターンとなると考えられる。大気の屈折率の乱れは構造関数を用いて表すことができる。構造関数は

$$D_n(\mathbf{X}, \mathbf{r}) = \overline{(n(\mathbf{X}) - n(\mathbf{X} + \mathbf{r}))^2} \quad (1)$$

と定義される。ここで $D_n(\mathbf{X}, \mathbf{r})$ は屈折率構造関数、 $n(\mathbf{X} + \mathbf{r})$ は位置 $\mathbf{X} + \mathbf{r}$ での屈折率、上線は集合平均を表す。この $D_n(\mathbf{X}, \mathbf{r})$ が、Kolmogorov型の構造関数をとって表せるとすると、屈折率構造関数は二点間の距離 $|\mathbf{r}| = r$ のみの関数となり

$$D_n(r) = C_N^2 r^{2/3} \quad (2)$$

となる。ここで、 C_N^2 は屈折率構造定数である(12)。Friedの論文では、 C_N^2 を高度 $h[m]$ の関数として、次のようなモデルを仮定している(1)。

$$C_N^2(h) = 4.2 \times 10^{-14} h^{-1/3} \exp(-h/h_0) \quad [m^{-2/3}], \quad h_0 = 3200[m] \quad h > 1.5[m] \quad (3)$$

屈折率のゆらぎによるレーザービームの強度の変動は対数正規分布となり(13)対数振幅変動の分散 $C_I(0)$ は

$$C_I(0) = \frac{8.16}{8\pi} k^2 \operatorname{Re} \left\{ \int_0^\infty ds C_N^2(s) \int_0^\infty d\sigma \sigma^{-11/6} \times \left\{ \exp[(\sigma/2) \operatorname{Re} \gamma(z,s)] - \exp[(\sigma/2) \gamma(z,s)] \right\} \right\} \quad (4)$$

で表される(1)。ここで、 s は伝搬路上での出射点からの距離で、 $C_N^2(s)$ は s での屈折率構造定数、 k は光の波数で λ を波長として $2\pi/\lambda$ 、 z は出射点から受光位置までの距離、 σ は伝搬方向と垂直な面内での $[m^{-2}]$ の次元をもった変数である。 α_0 をビームウエスト幅(振幅が $1/e$ 幅となる半径)として、 $z \gg h_0$ かつ $z \gg k\alpha_0^2$ との条件の下において

$$\gamma(z,s) = [2(z-s)/ik](s - ik\alpha_0^2)/(z - ik\alpha_0^2) \quad (5)$$

となり、式(4)の σ に関する積分が実行可能となる。ここで、地上から球面波が伝搬したときの振幅変動の分散である $C_I^s(0)$ を考えると、式(5)で α_0 を0と置き、式(4)に代入し、式(3)のモデルを用いると

$$C_I^s(0) = 0.704 \operatorname{sec}^{11/6} \theta (5.14 \times 10^{-7} / \lambda)^{7/6} \quad (6)$$

と表すことができる。ここで θ はレーザーの送信方向と天頂のなす角度で、 λ は $[m]$ 単位での光の波長である。式(4)の解析を進めると、 $C_I(0)/C_I^s(0)$ は

$$\begin{aligned} C_I(0)/C_I^s(0) = & \operatorname{Re}_1 F_1\left(\frac{3}{6}; \frac{7}{2}; -i\Omega\right) - [\sin(5\pi/12)/\cos(5\pi/12)] \operatorname{Im}_1 F_1\left(\frac{3}{6}; \frac{7}{2}; -i\Omega\right) \\ & + [\cos(\pi/3)/\cos(5\pi/12)] [\Gamma(\frac{2}{3})\Gamma(\frac{3}{2})/\Gamma(\frac{5}{6})\Gamma(\frac{3}{2})] \times \Omega^{3/2} \operatorname{Re}_1 F_1\left(\frac{2}{3}; \frac{5}{2}; -i\Omega\right) \\ & + [\sin(\pi/3)/\cos(5\pi/12)] [\Gamma(\frac{2}{3})\Gamma(\frac{3}{2})/\Gamma(\frac{5}{6})\Gamma(\frac{3}{2})] \times \Omega^{3/2} \operatorname{Im}_1 F_1\left(\frac{2}{3}; \frac{5}{2}; -i\Omega\right) - [\Gamma(\frac{2}{3})/\Gamma(\frac{3}{2}) \cos(5\pi/12)] \Omega^{5/6} \end{aligned} \quad (7)$$

と表すことができる。ここで ${}_1F_1$ は超幾何関数、 Ω は $k\alpha_0^2/(h_0 \sec \theta)$ である。Fig. 1に $C_I(0)/C_I^s(0)$ と Ω の関係を示す。図中に λ が $0.51 \mu m$ 、 θ が 45° のときの Ω に対応する拡がり角(全角)を書き入れた。 $C_I(0)$ は、 Ω が小さいほど球面波の振幅変動である $C_I^s(0)$ に近くなり、 Ω が大きくなるに従い小さくなっている。強度変動の周波数特性は、等しい屈折率のかたまりの気塊が形を変えないで風で流されて伝搬路をよぎると考えた場合の解析がなされている(12)。平面波が均質なゆらぎのある媒質中を伝搬し口径の小さな受光器で受光されたときの周波数スペクトル $W(f)$ は

$$W(f) = \frac{1.35}{f_0} C_I(0) \int_0^\infty \left[1 - \frac{\sin(t^2 + \omega^2)}{(t^2 + \omega^2)} \right] (t^2 + \omega^2)^{-11/6} dt \quad (8)$$

と表せる。ここで $\omega_0 = f/f_0$ 、 f_0 は

$$f_0 = v_n / N(2\pi\lambda H \sec \theta)^{1/2} \quad (9)$$

である。ここで、 v_n は伝搬方向に対して垂直方向の風速、 H はゆらぎ媒質の高度、 N は季節変動の係数で恒星のシンチレーションの観測から冬季は3.2とされている(3)。式(8)の関係は平面波についてであるが、Minnotによる地上から衛星でのレーザー伝送の実験では、式(8)の関係に合った、約70Hzから減衰し始める周波数特性が得られている(3)。

3 実験装置

Fig. 2に実験に用いた望遠鏡を、また、Table 1にレーザー送信系の諸元を示す。望遠鏡の指向は、ETS-VIの接触軌道要素から特別摂動法により軌道生成を行ない、地上装置からの衛星への指向方向を計算した。レーザー装置は望遠鏡のクーデ焦点位置に配置し、レーザー送信用の望遠鏡は光学観測用の望遠鏡の上側に、両望遠鏡の光軸がほぼ平行になるように設置されている。レーザーの指向方向は望遠鏡の指向に付随して、また、内部光学装置の駆動を用いても調整できる。ビーム拡がり角の調整は、送信用望遠鏡の直前に配置したビームエキスパンダーを用いて行う。ETS-VIの追尾誤差は方位角方向に $3.7 \mu \text{ rad(rms)}$ 、仰角方向に $2.7 \mu \text{ rad(rms)}$ との結果が測定されている。

ETS-VIには光通信装置LCE(Laser Communication Equipment)が搭載されている(9)。ETS-VIは長楕円軌道を航行しており、約3時間の光伝送の実験時間中には、LCEの望遠鏡光軸が地上局の方向に合うようにETS-VIの姿勢が制御される。Fig. 3にLCEの受光系を、Table 2に各受光器の諸元を示す。LCEには口径7.5cmで15倍の望遠鏡及びCCD(Charge Coupled Device)、QD(Quadrant Detector)、APD(Avalanche Photo Diode)の受光器が搭載されている。CCDでは受光スポットが数画素にまたがって受光される。CCDの直前に配

置されているビームスプリッタでの透過光強度に偏光依存性があり、最大に透過する偏光方向は、APDの前に配置されているポラライザの透過方向と同じ方向である。地上送信ビームの偏光方向はこの偏光方向に合わされている。

4 レーザー伝送結果

Fig. 4にAPDでの受光強度の変化を示す。このとき、送信ビームを走査して最も頻繁に受光される方向に向けた。Fig. 5のようにCCDとQDでのレーザー受光の対数振幅変動を正規確率紙に記入し、直線部の傾きから対数振幅変動の分散 $C_I(0)$ を求めた⁽²⁰⁾。Table 3に1月15日以降の実験におけるレーザー送信の状態とそのときの $C_I(0)$ を示す。2節での解析によると、天頂角 θ を 45° 、 λ を $0.51\mu\text{m}$ 、 h_0 を 3.2km 、 α_0 を 55mm としたときに、 $C_I^s(0)$ は 1.33 、 Ω は回折限界の送信では 8.2 であるが Ω は実際にはこの値よりは小さく、ビームの拡がり角はビームパターンの測定より $20\mu\text{rad}$ 程度であり、 $C_I(0)/C_I^s(0)$ は $0.3\sim 0.5$ と考えられ、 $C_I(0)$ は 0.5 程度となる。これはTable 3の送信口径が 110 と 160mm のときの実験値と凡そ合っている。出射口径が 20mm のときは回折限界で出射されていても Ω が 0.27 となり、 $C_I(0)$ の計算値は 0.73 となる。Table 3の結果では、ビーム拡がりの変化に対して $C_I(0)$ はあまり変化が見られないが、 20mm に径を小さくしたときに $C_I(0)$ が大きくなっており、この点は整合が取れている。Fig. 1より、出射口径が 11cm のときに回折限界で出射すれば、 $C_I(0)/C_I^s(0)$ が 0.04 程度まで小さくなり、 $C_I^s(0)$ を 1.33 とすると受光強度の変動は 49% (rms)となる。

変動の周波数特性については、FFT解析の結果に風速に関係する有意な周波数成分は判別できなかった。送信ビームの衛星での放射照度についてはAPDでの受光強度の最高値について比較し、この値から衛星での放射照度を算出すると 0.59nW/cm^2 となった。一方、送信レーザーをガウスビームと仮定して、レーザービームの放射照度 I_t を考えると、

$$I_t = 2P_t T \exp(-2(\Delta\phi/\phi)^2) / \pi(R\phi)^2 \quad (10)$$

となる。ここで、送信するレーザーの強度 P_t を 4.8W(peak) 、伝搬路の透過率 T を 50% 、指向誤差角 $\Delta\phi$ を 0 とし、拡がり角 2ϕ (全角)を $30\mu\text{rad}$ 、衛星までの距離 R を 33500km とした。式(10)から放射照度を計算すると、 I_t は 0.61nW/cm^2 となり、測定した受光ピーク値と良く合っていた。

5 おわりに

地上からETS-VIへのレーザー伝送について述べた。LCEでの受光強度については、受光結果のピーク値とガウスビームの伝搬として算出した値は良く一致していた。強度変動は、Friedによる解析と凡そ合致していた。

参考文献

- (1)D.L.Fried, J.Opt.Soc. Am., 57, 980, 1967. (2)P.J.Titterton, J. Opt. Soc. Am.,63, 439, 1973. (3)P.O.Minnot, J.Opt. Soc. Am., 62, 885, 1972. (4)J.L.Bufton, Appl. Opt., 16, 2654,1977. (5)P.A.Lightsey, Opt. eng., 33, 2535, 1994. (6)T.Aruga, K.Araki, R.Hayashi, T.Iwabuchi, M.Takahashi and S.Nakamura, Appl. Opt, 24, 53, 1985. (7)荒木,板部,高部,有賀,猪股,レーザーセンシング・シンポジウム予稿集, 47, 1988. (8)豊田,武藤,高部,荒木,有本,有賀,レーザー研究, 23, 402,1995. (9)荒木,鹿谷,豊田,有本,有賀,鈴木,通信総合研究所季報, 40, 153, 1994. (10)有本,豊島,豊田,高橋,鹿谷,荒木, SB-2-10, 電子情報通信学会総合大会, 1995. (11)K.T.Knox, J. Opt. Soc. Am., 66, 1236, 1976. (12)V.I.Tatarski, McGRAW-HILL, 1961. (13)D.L.Fried and J.B.Seidman, J. Opt. Soc. Am., 57, 181, 1967. (14)J.I.Davis,Appl. Opt., 5, 139, 1966. (15)R.S.Lawrence and J.W.Strohbehn, Proc. IEEE, 58, 1523, 1970. (16)D.L.Fried, J.Opt.Soc. Am., 56, 1380, 1966. (17)R.K.Tyson, Academic Press, 1991. (18)R.L.Fante, Proc. IEEE, 63, 1669, 1975. (19)廣本,高部,豊田,青木, 日本天文学会1995年春季年会, 1995. (20)M.W.Fitzmaurice and J.L.Bufton, J. Opt. Soc. Am.,59, 462, 1969. (21)H.T.Yura and W.G.Mckinly, Appl. Opt., 22, 1608, 1983. (22)H.T.Yura and W.G.Mckinly, Appl. Opt., 22, 3353, 1983. (23)R.Barletti, G.Ceppatelli, L.Paterno, A.Righini and N.Speroni, J.Opt. Soc. Am., 66, 1380, 1976.

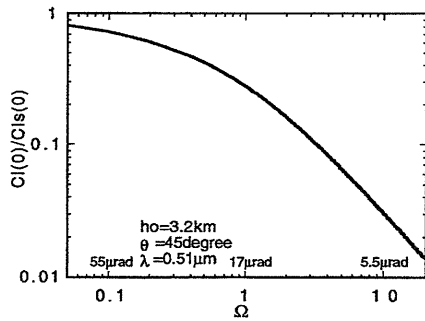


Fig. 1 Relation between the normalized log-amplitude variance $Cl(0)/Cl^s(0)$ and Ω (1).

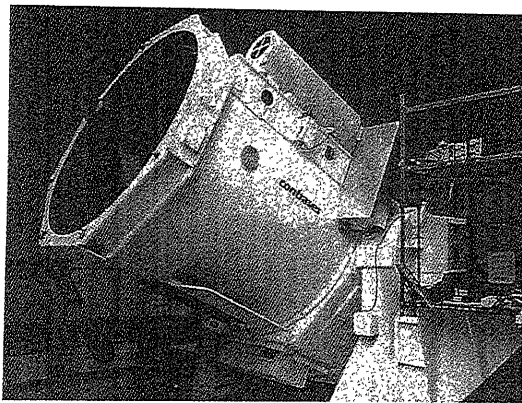


Fig. 2 Ground station telescope.

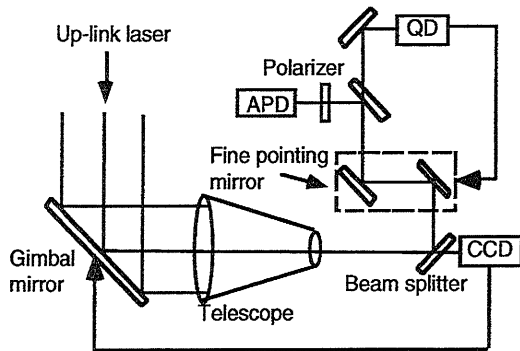


Fig. 3 LCE optical receiver.

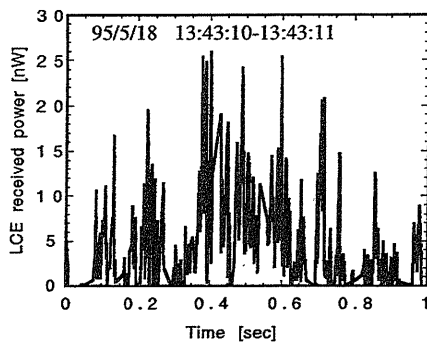


Fig.4 Time variation of LCE received laser power which was measured at APD detector.

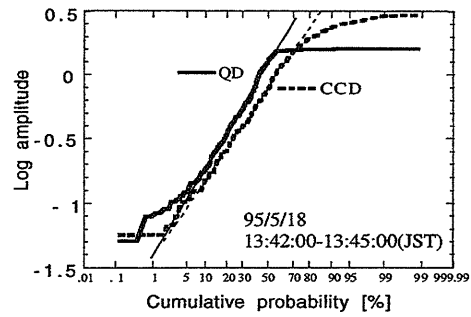


Fig.5 Cumulative probability distribution of received laser log-amplitude variation measured at CCD and QD detector.

Table 1 Specifications of the ground station laser transmitter.

Laser	Ar laser
Wave length	514.5nm
Transmittivity	-3.2dB
Output power	4.8W
Divergence	collimate ~ 60 μ rad
Output beam diameter	20~160mm
Polarization	Linear

Table 2 Specifications of LCE optical sensors.

	CCD	QD	APD
FOV μ rad	8000	400	200
Efficiency (P polarization)	-11.3dB	-8.2dB	-10.1dB
(S polarization)	-18.6dB	-7.9dB	

Table 3 Laser transmission parameter and $Cl(0)$.

Date	Divergence μ rad	Beam width mm	$Cl(0)$		
			QD	CCD	APD
1/15	collimate	160	0.7	0.5	
	-30	160	0.6	0.3	
	-60	160	0.6	0.3	
1/18	collimate	160	0.4	0.3	
1/30	collimate	20	1.6	0.7	
2/17	collimate	160	0.5	0.3	
2/23	collimate	160	0.6	0.5	
3/ 1	collimate	160	0.6	0.4	0.3
5/18	collimate	110	0.5	0.3	0.3