光ダウンリンクのファイバ結合実験 Experiment of the Fiber Coupling Efficiency for Satellite Downlinks

竹中秀樹 豊嶋守生 高山佳久

TAKENAKA Hideki, TOYOSHIMA Morio, and TAKAYAMA Yoshihisa

要旨

光衛星間通信実験衛星「OICETS」を用いて、地上-衛星間光通信における精追尾機構を用いたファ イバカップリング効率の計測実験の結果を示している。はじめに、水平伝搬における空間光通信の ファイバカップリング理論から高度変化に対応した宇宙光通信のファイバカップリング理論への拡張 を行った。また、今回の実験では、大気ゆらぎの変動に追従できるように高速な精追尾機構を用い、 大気ゆらぎを抑制して地上-衛星間光通信のファイバカップリング実験を行った。最後に高度変化に対 応した宇宙光通信のファイバカップリング理論のシミュレーション結果と実際に OICETS を用いて ファイバカップリング実験を行った結果との比較を行う。

The results are shown of experiments to measure fiber coupling efficiencies using the fine pointing mechanism in ground-to-satellite optical communications by utilizing the optical interorbit communications engineering test satellite "OICETS". First, the fiber coupling theory of spatial optical communication in horizontal propagation is extended to a fiber coupling theory of optical communication in space which takes into account changes in altitude. Further, in the present experiments a fast fine pointing mechanism was used to enable the tracking of variations in atmospheric turbulence, and thus the fiber coupling experiments of ground-to-satellite optical communications were conducted by suppressing the effects of atmospheric turbulence. Finally, the results of the actual fiber coupling experiments using OICETS are compared with the results of simulations using the fiber coupling theory of optical communication in space which takes into account changes in altitude.

[キーワード]

レーザ通信,ファイバカップリング効率,大気ゆらぎ,精追尾機構 Laser communication, Fiber coupling efficiency, Atmospheric turbulence, Fast steering mirror

1 はじめに

近年、衛星の高機能化が進んでおり、容量が大 きいデータを扱うことが多くなってきている。そ のため、衛星と地球とを繋ぐ大容量高速通信が必 要になる。現在、通常使われている電波を用いた RF 通信は、電波法により使うことのできる周波 数に制限があるため、今後必要になるであろうギ ガビットクラスの通信速度を出すのは困難であ る。また、RF 通信は、混信や通信速度を上げよ うとすると、アンテナ径を始めシステム全体が大 きくなり消費電力も増えるという問題もある。そ のため、電力資源が限られている宇宙において従 来の RF 通信では限界がある [1]。

これに対し、現在、研究開発されている光を用 いた衛星光通信技術が注目されている。光通信に 用いられるレーザの周波数は数百テラ(10¹²)Hz であり、ギガビットクラスのベースバンド信号を 伝送することは容易に可能である。衛星光通信の 特長は、光の周波数が高いためアンテナが小型に なり、衛星搭載用光送受信機を小型・軽量にでき ることである。しかしながら、衛星通信に光通信 を適用するにはいくつかの克服すべき課題があ る。まず、ビーム広がり角が狭いため、衛星搭載 用機器へ高い捕捉追尾精度が要求されることが挙 げられる。また、衛星から地上の間には大気が存 在し、大気ゆらぎにより発生する屈折率の変化に より光のシンチレーションや到来角度変動が発生 し、通信信号が劣化する。このシンチレーション は、地上と衛星間において光通信を行う場合の主 な擾乱要因であり、衛星は7 km/secの速度で周 回しており、光回線は大気を高速に横切るため、 大気ゆらぎの変動周波数は1 kHz 以上にもなる。 また、光通信として通信に用いるには光ファイバ 増幅器を使用する必要があるため、衛星から受け た光をシングルモードファイバに導く必要があ る。

本稿では、光衛星間通信実験衛星「OICETS」 を使用して実際の衛星からの光を使ったファイバ カップリングの計測について述べる。2では、 水平伝搬におけるファイバカップリング理論を高 度変化に対応できるように式の拡張を行った。こ れにより、任意の天頂角からの地上-衛星間光通 信におけるファイバカップリング効率をシミュ レーションすることができる。3では、OICETS を用いて実際にファイバカップリング実験の実験 構成の説明を行う。4では、OICETSを用いた 地上-衛星間光通信におけるファイバカップリン グ実験結果を示している。5では、地上-衛星間 光通信におけるファイバカップリング効率の理論 値とOICETS実験で得られた実測値との比較を 行っている。

2 ファイバカップリング理論

本研究では、地上-衛星間光通信のように、高 度の変化により大気の屈折率構造パラメータが変 化する伝搬路の場合に、ファイバカップリング効 率がどのようになるか水平伝搬の理論の拡張を 行った。

大気ゆらぎ存在下における水平方向のファイバ カップリング理論は式(1)によって求めること ができる[2]。

$$\eta_{c} = 8a^{2} \int_{0}^{1} \int_{0}^{1} exp \left[-\left(a^{2} + \frac{A_{R}}{A_{c}}\right) (x_{1}^{2} + x_{2}^{2}) \right]$$
(1)

$$\times I_{0} \left(2\frac{A_{R}}{A_{c}} x_{1} x_{2} \right) x_{1} x_{2} dx_{1} dx_{2}$$
(2)

$$A_c = \pi \rho_c^2 \tag{3}$$

$$A_R = \pi D_R^2 / 4 \tag{4}$$

$$\rho_{\rm c} = (1.46C_{\rm n}^2k^2L)^{-3/5} \qquad (5)$$

 D_{R} は受信レンズ直径、 W_{m} はファイバモード フィールド半径、 λ は光の波長、fはレンズの焦 点距離、Lは通信距離、kは光の波数である。

式(1)を高度の変化に対応した式に拡張する には、以下の Hufnage-Valley(H-V)モデルの 大気屈折率の構造パラメータを使用する必要があ る^[3]。

$$C_n^2(z) = 0.00594(v/27)^2 (10^{-5}z)^{10} \exp\left(-\frac{z}{1000}\right) +2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{z}{1500}\right) + A \exp\left(-\frac{z}{100}\right)$$
(6)

そして、 ρ_c に式(6)を適応させると、高度の 変化に対応したファイバカップリング効率 ρ_z は

$$\rho_z = \left[1.46k^2 \frac{1}{\cos(\zeta)} \int_{h_0}^H dz \ C_n^2(z) \right]^{-3/5} \tag{7}$$

となる。また、Hは

$$H = h_0 + L\cos(\zeta) \tag{8}$$

となる。 h_0 は光を受信する望遠鏡の高度、 ζ は 天頂角である。 $C_n^2(z)$ のパラメータであるvは バフトン風速モデルによる rms であり、開口に よる平均化係数Aは小金井にある NICT の光地 上局で計測した値である 1.2×10^{-13} m^{-2/3}とな る。また、 h_0 は 122 m である [4]。このパラメー タで高度のzを変化させた場合の大気ゆらぎの屈 折率のグラフを図1に示す。高度が上がるにつ れて大気ゆらぎによる屈折率の構造パラメータが 少なくなっていることが分かる。

 $D_{\rm R} = 0.318 \,\mathrm{m}, W_{\rm m} = 5.2 \,\mu\mathrm{m}, \lambda = 850 \,\mathrm{nm}, f = 0.1 \,\mathrm{m}, h_0 = 122 \,\mathrm{m}, \zeta = 58^\circ, A = 1.2 \times 10^{-13} \mathrm{m}^{-2/3}$ とし、距離 *L* を変化させた場合のファイバカップリング効率を図2に示す。距離 *L* がおよそ 10 km になるとファイバカップリング効率に変化が少なくなる。これは、高度が高くなることにより、大気の影響が少なくなったためである。

10

10







3 実験システム構成

10

カップリング効率

10

10

Length L[m]

通信距離しを変化させたときのファイバ

0.1

図2

10

光衛星間通信実験衛星 OICETS を使用して地 上-衛星間光通信実験を行った。その中のひとつ として、精追尾機構が大気ゆらぎを吸収してどの 程度シングルモードファイバにカップリングでき るか実験を行った。実験の概要は図3のように なっており、まず筑波宇宙センターから事前に OICETS に対して制御用コマンドが送られセッ トされる。その後、情報通信研究機構 (NICT) の光地上局の上空に OICETS が可視になった時 に光地上局からレーザを送信することによって OICETS が反応し、相互光通信実験が可能にな る。

望遠鏡から受信した光はクーデパスを通って光 学ベンチまで導かれる。精追尾機構 (FSM)の 構成は図4のようになっており、受信した光を ビームスプリッタで分岐を行い精追尾機構のミ ラーで光を反射する。精追尾機構と追尾センサは 閉ループが組まれており、追尾センサ(QD)の 中央に光が来るように追尾機構は制御されてい る。また、精追尾機構と追尾センサの間にビーム スプリッタを置き、その分岐の先にレンズとシン グルモードファイバを置いてある。追尾センサの 中央に光が導かれるとシングルモードファイバに 光が入るように調節してある。

ファイバカップリングの受信レベルは、事前に 安定したローカル光源を用いた場合のシングル モードファイバの受信パワーと実際に OICETS を用いた場合のファイバカップリングの受信パ ワーとの比較を行っている。また、受信パワーの 計測は、シングルモードファイバ用のセンサ PDaと参照用のセンサ PDb を用いて計測してい る。そして、事前に光学系の損失を計測してお り、PDb によって、シングルモードファイバに 入る手前のパワーを求めている。

実験で用いた精追尾機構を図5に示す。精追尾 機構は大気ゆらぎに耐えられるように、周波数応 答2kHz以上に設計されたものを用いた(表1)。

4 実験結果

OICETSとの通信実験の結果を図6に示す。 OICETSとの通信実験でのファイバ受光量と精 追尾機構のON-OFFのグラフである。共に縦軸 が電圧、横軸が経過時間となっている。このグラ フの経過時間は地上-衛星間光通信実験の実験時 間を示している。

精追尾機構は実験中に ON-OFF を意図的に繰 り返した。精追尾機構が 5 V の電圧になると ON になる。精追尾機構が ON になるとシングル モードファイバへの受光量も増えており、精追尾





Drive voltage	0-150 V
Pre-road	900 N
Diameter of Mirror	$20 \mathrm{mm} \phi$
Angular range	± 2.7 mrad
Frequency response	$> 2 \mathrm{kHz}$

機構で大気ゆらぎを低減できることが確認でき た。

図7に100~110 sec における追尾機構が動作 しているときのファイバカップリング損失のグラ フを示す。ローカル光源を用いたファイバカップ リング効率と OICETS からの光を用いたファイ バカップリング効率を比較した場合、ファイバ カップリング損失はおよそ-11~-18 dB の間 で推移していることが分かる。

5 実験結果の考察

大気ゆらぎを考慮した場合のファイバカップリ ング効率を求める。大気を通過すると光のコヒー レンスが崩れ、斑点のようなスペックルが発生す る。スペックルが発生する数によってファイバ カップリング効率が低下する。ファイバカップリ





表2 シミュレーションパラメータ		
parameter	value	
h_0	122 m	
L	1000 km	
A	$1.2\text{E-}13 \text{ m}^{-2/3}$	
$W_{ m m}$	5.2 μm	
v	90 m/s	
$D_{ m r}$	0.318 m	
λ	847 nm	
f	0.1 m	
ζ	58 deg	

ング効率がどの程度低下するか**2**の高度変化に も対応できるように拡張した式(7)の*p*₂を用い て計算を行った。今回計算に用いた各パラメータ を表2に示す。

実験で計測した 100 ~ 110 秒における、衛星 の 高 度 は 約 1000 km で あ る。 そ の た め、 1000 km におけるファイバカップリング効率は -17.05 dB であることがわかった。4 の実験 データから求めた、ファイバカップリング損失は -11 ~ -18 dB であるため理論から求めた値と 実験で得られた値は似通った値である。

6 まとめ

本稿では、従来の水平伝搬における理論式の拡 張を行い、大気ゆらぎを考慮したファイバカップ リング効率の計算を行った。理論式によって求め た値と実験データの比較を行ったところ似通った 値であることがわかった。

参考文献

- 豊嶋守生, "衛星間レーザ通信の捕捉・追尾・指向技術一電波と光波通信システムの比較と利用動向一,"電子 情報通信学会誌, Vol. 88, No. 4, pp. 276–283, 2005 年 4 月.
- 2 Y. Dikmelik, F. and M. Davidson, "Fiber-coupling efficiency for free-space optical communication through atmospheric turbulence," Applied Optics, Vol. 44, No. 23, 2005.
- 3 L. C. Andrews, R. L. Philips, P. and T. Yu, "Optical scintillation and fade statistics for a satellite-communication system," Applied Optics, Vol. 34, No. 33, pp 7742–7751, 1995.
- 4 豊嶋守生,高山佳久,國森裕生,城野隆,"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,"第25回レーザセンシングシンポジウム, p-30,2007.
- 5 阿部俊雄,木崎隆広義,國森裕生,高山佳久,豊嶋守生,"2軸可動鏡と高効率ドライバーの開発,"第52回 宇宙科学技術連合講演会,pp 487-490, 2008.

(平成 24 年 3 月 14 日 採録)



竹中秀樹

ロ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、レーザ通信 take@nict.go.jp



たかやま よし ひさ 高山佳久

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主任研究員 博士(工学) 非線形光学、位相共役光学、フォト ニック結晶、電磁波解析、宇宙光通信 takayama@nict.go.jp



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、レーザ通信、 量子暗号 morio@nict.go.jp

独立行政法人情報通信研究機構発行の技術情報誌「情報通信研究機構季報」 Vol.58 Nos.1/2 2012年3・6月号の記事を、筆者及び情報通信研究機構の 承諾を得て掲載しています。内容を一部加筆修正しています。