

4-3 光ダウンリンクのファイバ結合実験

4-3 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 inter-orbit 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]

レーザー通信, 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ーの周波数は数百テラ (10^{12}) 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するため、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]。

$$\eta_c = 8a^2 \int_0^1 \int_0^1 \exp\left[-\left(a^2 + \frac{A_R}{A_C}\right)(x_1^2 + x_2^2)\right] \quad (1)$$

$$\times I_0\left(2\frac{A_R}{A_C}x_1x_2\right)x_1x_2dx_1dx_2$$

$$a = \frac{D_R \pi W_m}{2 \lambda f} \quad (2)$$

$$A_C = \pi \rho_c^2 \quad (3)$$

$$A_R = \pi D_R^2/4 \quad (4)$$

$$\rho_c = (1.46C_n^2 k^2 L)^{-3/5} \quad (5)$$

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 Hufnagge-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]。

$$C_n^2(z) = 0.00594(v/27)^2(10^{-5}z)^{10} \exp\left(-\frac{z}{1000}\right) \quad (6)$$

$$+ 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{z}{1500}\right) + A \exp\left(-\frac{z}{100}\right)$$

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

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

となる。また、 H は

$$H = h_0 + L \cos(\zeta) \quad (8)$$

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 $1.2 \times 10^{-13} \text{m}^{-2/3}$ 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。

$D_R = 0.318 \text{ m}$ 、 $W_m = 5.2 \mu\text{m}$ 、 $\lambda = 850 \text{ nm}$ 、 $f = 0.1 \text{ m}$ 、 $h_0 = 122 \text{ m}$ 、 $\zeta = 58^\circ$ 、 $A = 1.2 \times 10^{-13} \text{m}^{-2/3}$ 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。

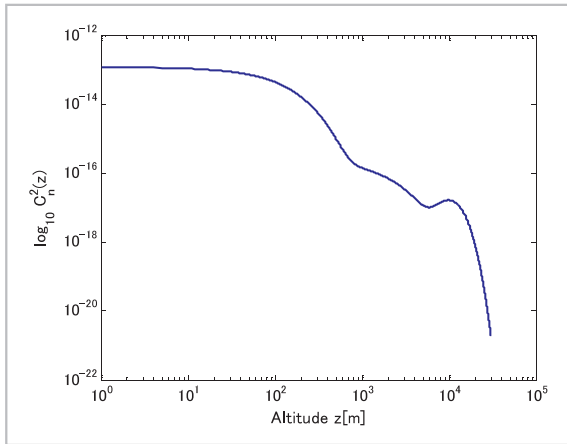


図1 大気ゆらぎによる構造パラメータの変化

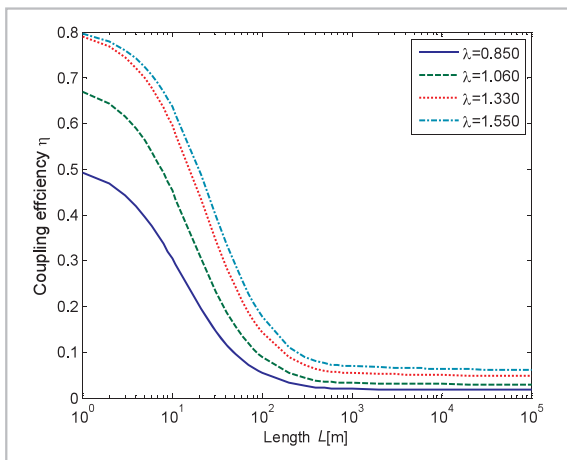


図2 通信距離Lを変化させたときのファイバカップリング効率

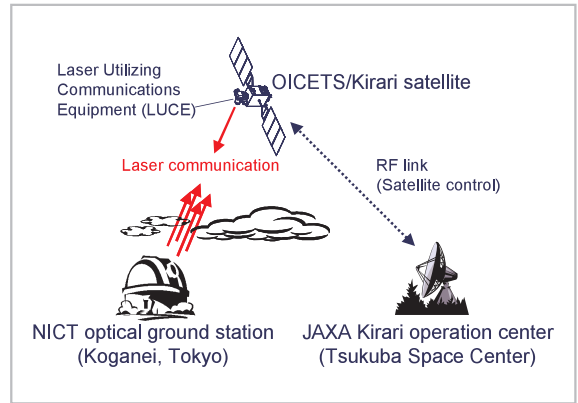


図3 OICETS 実験の概要

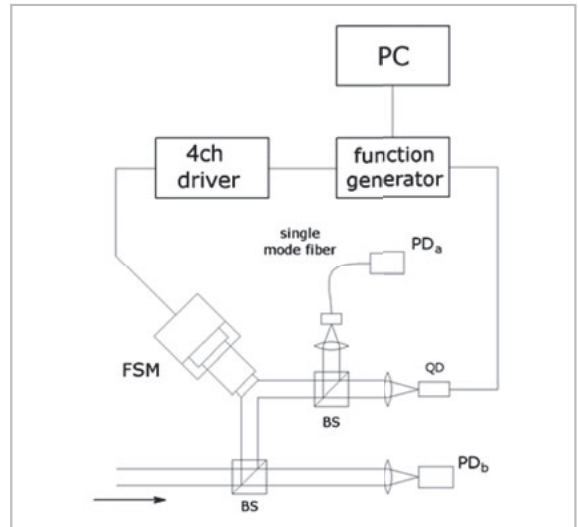


図4 精追尾機構の実験構成

3 実験システム構成

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し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ー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み立てられており、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ーを置き、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 2 kHz 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



図5 精追尾機構

表1 精追尾機構の仕様 [5]

item	value
Drive element	Piezoelectric
Drive voltage	0-150 V
Pre-road	900 N
Diameter of Mirror	20 mm ϕ
Angular range	± 2.7 mrad
Frequency response	> 2 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ckルが発生する。スペck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

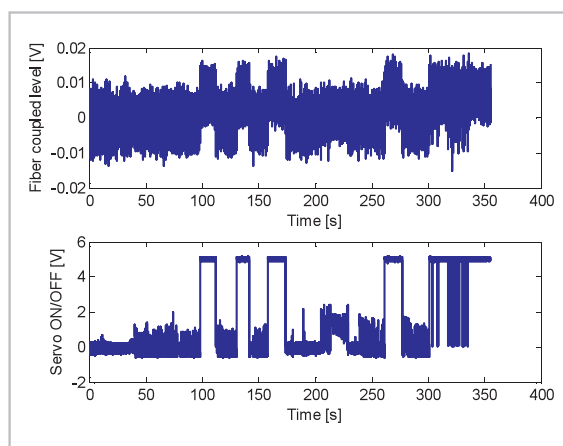


図6 ファイバ受光量と精追尾機構の ON-OFF

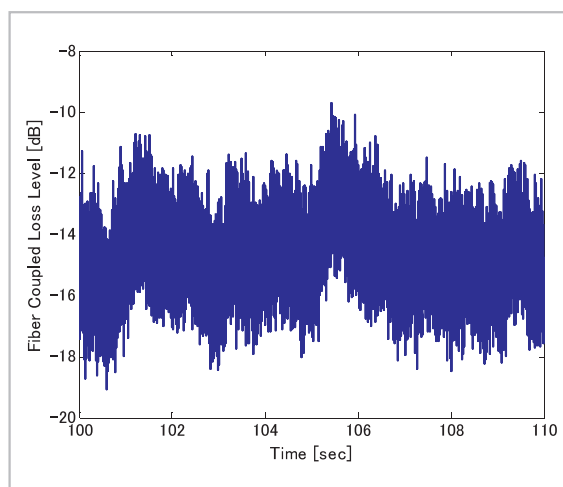


図7 ファイバカップリング損失

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	$5.2 \mu\text{m}$
v	90 m/s
D_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 ρ_z を用いて計算を行った。今回計算に用いた各パラメータ

参考文献

- 1 豊嶋守生, “衛星間レーザー通信の捕捉・追尾・指向技術—電波と光波通信システムの比較と利用動向—,” 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回レーザー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.

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。

(平成24年3月14日採録)



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



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