大気揺らぎ環境下における高安定光送受信技術

安藤 俊行¹, 矢吹 麻菜¹, 原口 英介²

¹三菱電機株式会社 情報技術総合研究所 (〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1)

²三菱電機株式会社 鎌倉製作所 (〒247-8520 神奈川県鎌倉市上町屋 325 番地)

Highly Stable Optical Free-Space Transmission Technology Under Atmospheric Fluctuation

Toshiyuki ANDO,¹ Mana YABUKI,¹ and Eisuke HARAGUCHI²

¹Mitsubishi Electric Corporation, Information Technology R&D Center, 5-1-1 Ofuna, Kamakura, Kanagawa 247-8501

²Mitsubishi Electric Corporation, Kamakura Works, 325 Kami-Machiya, Kamakura, Kanagawa 247-8520

(Received July 20, 2019)

We present preliminary study on optical phased array technology aiming free-space optical communication for optical feeder link of High Throughput Satellite in the future. The propagation of non-Gaussian beams produced with optical phased array has been estimated less affected by atmospheric turbulence than a single Gaussian beam. 2-elements optical phased array has also demonstrated both beam pointing control and 5.6 Gbps free-space optical communication.

Key Words: Optical phased array, Free-space optical communication, Atmospheric turbulence

1. はじめに

近年の観測衛星の大容量データ伝送や 100 Gbps 超級のブロードバンド衛星通信に適合する光衛星通信ネットワークが望まれている。観測衛星のデータ伝送に向け欧州ではデータ中継衛星 EDRS-A (European Data Relay System-A) が 2016 年に打上げられ¹⁾、運用フェーズに入った²⁾。通信方式・レートは波長 1.06 μm , BPSK (Binary Phase Shift Keying) ホモダイン方式, 1.8 Gbps である¹⁾。米国では, LCRD (Laser Communication Relay Demonstration) により波長 1.5 μm 帯 DPSK (Differential Phase Shift Keying) 方式 1.25 Gbps の衛星間と衛星地上間の光通信デモが 2019 年に予定されている²⁾。国内でも JDRS (Japanese Data Relay System) が, 波長 1.5 μm 帯 DPSK (Differential Phase Shift Keying) 方式, 1.8 Gbps の通信実証実験に向けて 2019 年に衛星の打上げを予定している³⁾。さらに衛星間の光データ伝送だけでなく, 衛星～地上間光伝送に向けた光地上局の開発も報告されている⁴⁾。大容量の静止通信衛星に向けては, 70 Gbps の Ka-Sat や 140 Gbps の ViaSat-1 などの High Throughput Satellite: HTS が打上げられ, ブロードバンド通信が展開されている。HTS

における現状の衛星～移動局間のユーザリンクと衛星～地上固定局間のフィーダリンクはともに, RF 通信であるが⁵⁾, 将来的には RF 帯域不足が課題として考えられており⁵⁾, この解決手段として光フィーダリンクによる広帯域伝送が期待されている⁶⁾。以上より, 光衛星通信機器に望まれる特性として, 複数方式に対応できる小型で高感度特性, 衛星～地上間での背景光抑圧性能や大気揺らぎの補償特性が必要と考えられる。我々は, 波長 1.06/1.5 μm 帯の Dual 光受信方式の検討⁷⁾や, 追尾角度センサ機能と光コヒーレント受信機能とを統合した高感度で背景光抑圧特性の優れた受信フロントエンドを試作した⁸⁻¹⁰⁾。また光コヒーレント送受信技術を用いた衛星地上間の光通信システムの回線検討を実施した。ここでは, 将来の光フィーダリンク適用に向けた光フェーズドアレイを用いた光空間通信技術の予備検討結果を報告する。

2. 衛星地上間光伝送時の大気伝搬特性

衛星地上間の光伝送においては, 大気伝搬に伴う, エアロゾルや特定気体分子での散乱による損失に加え, 大

¹⁾ <http://www.edrs-spacedatahighway.com/news/items/actionable-information>

²⁾ <http://www.edrs-spacedatahighway.com/news/items/first-image>

気分子の流れによる屈折率変動の影響によるビーム広がり角の増加や、波面収差による受信光の結合効率の低下が発生する。衛星から地上へのダウンリンク光伝送において、伝搬光が大気揺らぎにより受けた影響を、地上局での受信光の波面変化として検出・補正する補償光学技術の適用が進められている¹¹⁾。しかしながら地上からのアップリンク光伝送において大気揺らぎの影響の衛星側での補償は困難である。これは大気揺らぎの媒質層が地上～静止衛星間の距離 36000 km に対して、極めて地表近傍(10 km 程度)に局在するためである。すなわちアップリンク伝送光は、送出直後に大気揺らぎの影響を受けて広がって伝搬する結果、衛星に到達する伝搬光サイズが受信開口に比べて拡大するためである。アップリンク伝送における通信品質劣化の影響を受信側での信号処理により低減する例が報告されているが¹²⁾、アップリンク光そのものの伝送特性を改善した報告例は無い。大気揺らぎ媒質中の伝搬光の空間モード解析によると、高次モードが多く含まれるビームほど大気揺らぎによる広がりの影響を受けにくいことが知られている¹³⁾。この特性を利用し、大気揺らぎの状態に応じたアップリンク光のモードを制御することで、大気揺らぎによる広がり影響を低減した伝送の実現が期待できる。

3. 光フェーズドアレイによる高次モード生成

高次モード光の発生手段として、複数の素子ビームを空間配置し、各素子の位相を制御する光フェーズドアレイを用いることを考える。Fig. 1 に光フェーズドアレイの構成図を示す。基準レーザー光(Master Oscillator Laser: MO Laser)をビームスプリッターで分岐して素子ビームを形成、素子ビームごとに光位相制御と光増幅(Optical Amp.)の後、ビームコンバイナで空間合成する。位相検出器により取得した合成光の位相誤差を最小化するように各素子ビームの位相をフィードバック制御することでコヒーレントビーム合成(Coherent Beam Combine: CBC)が可能である。一方、各位相器に特定の分布を設定して合成光パターンの制御も可能である。

Fig. 1 の実証系として、光コンポーネントの入手性やアライメント容易性を考慮し、基準レーザーから光増幅器までを光ファイバ部品を接続して構成、光増幅器出力光をコリメート後に空間配置しビームコンバイナにより空間合成する構成とした。

Fig. 2 に素子ビーム配置として 19 素子、三角配列を

Fig. 1 Block diagram of an optical phased array transmitter.

Fig. 2 Examples of calculation for Gaussian beam and higher-order spatial mode pattern. (a) Near field pattern (intensity), (b) Gaussian beam condition: left: near field pattern (phase); right: far field pattern (intensity), (c) Higher-order spatial mode condition: left: near field Pattern (phase); right: far field Pattern (intensity).

仮定した場合の位相分布と合成光の遠方界ビームパターン計算例を示す。各素子ビームは理想的なコリメート状態で指向角が一致した状態を仮定し、また素子ビームの $1/e^2$ 径と素子ビーム間のピッチとの比を 0.9 に設定した。合成光の空間モードは各素子ビームの光位相器の設定により行う。ここでは、Fig. 2 (b) で示すような、出射開口面で等位相分布の Gaussian ビームパターン(左: 近傍界, 右: 遠方界)と、Fig. 2 (c) で示すような出射開口面で同心円状の位相分布の高次モードビーム(左: 近傍界, 右: 遠方界)とを設定して計算した。

4. 高次モード光の大気揺らぎ伝搬計算

高次モードビームの大気揺らぎ媒質中の光の伝搬特性を計算した。Fresnel 伝搬に基づく光の自由空間伝搬を前提とし、大気揺らぎの影響は、伝送方向に沿って分割した各層に位相マスクとして挿入した。位相マスクは大気構造定数により設定した。高次モードビームとして、Fig. 2 に示す素子ビーム配置と Fig. 2 (c) の位相分布に基づく光フェーズドアレイ出力とした。また、今後の実験検証を想定し、伝搬路は距離 1 km の水平パスとした。

大気構造定数 $C_n^2 = 1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ の場合の gaussian ビームと高次モードビームとを伝搬させた際の受信強度の 1000 回分の計算結果を Fig. 3 に示す。

各ビーム伝搬後の受信強度の 1000 回の計算結果の(平均値, 標準偏差)はそれぞれ

Fig. 3 Calculated results of intensity fluctuation, after 1 km propagation in $C_n^2 = 1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$.

ガウシアンビーム：(-15.6 dB, 5.4 dB)

高次モードビーム：(-4.7 dB, 2.6 dB)

であり、高次モードビームが伝搬損失、ばらつきをとともに低減する特性を有していることが分かる。

Fig. 4 に高次モード伝搬光の大気構造定数依存性を示す(等位相分布のコヒーレント合成光と比較)。

大気揺らぎが大きいほど高次モード伝搬による受信強度変動の低減効果が有効であると示唆される。

5. 光フェーズドアレイによる光空間通信

ここでは光フェーズドアレイを用いた光空間通信の実証実験を示す。Fig. 5 に 2 素子の光フェーズドアレイによる実験セットアップを示す。素子間位同期用の基準光源(Master Laser: λ_0)とデータ信号(2.8 Gbps, OOK (ON

Fig. 4 Fluctuation of propagated optical intensity depending on atmospheric structure coefficient.

Fig. 5 Experimental setup of free-space optical communication using optical phased transmitter.

– OFF Keying))を重畳した信号伝送光の2波(Tx#1: λ_1), (Tx#2: λ_2)とを波長多重カプラ(WDM)にて合波する。合波した光を局発光路と2つの信号光路とに分岐する。信号光路では位相制御用の光周波数シフタ(OFS)を介して光増幅器(OPA)にて増幅し、コリメータで空間出力する。一方、局発光路では、コリメータにて空間出力し、信号光とBSにて合波する。合波後、WDMにて λ_0 のみを透過させ、ヘテロダイン検波を行う。これにより、データ信号が重畳されていない λ_0 光のヘテロダイン検波信号から素子間位相誤差を検出することができる。検出した位相誤差信号は位相制御回路を介してOFSにフィードバックすることで、素子間の光位同期期が実現される。

また、空間出力した2素子信号光は空間伝播後、コリメータにて受信し、復調信号を波長多重カプラ(WDM)により λ_1 と λ_2 とに分岐後、各々フォトダイオード(PD)にてモニタする。

Fig. 6 に実証実験結果として、遠方界パターンと復調信号とを(a)光位同期期前(Free-running)と(b)光位同期期後に対して示す。光位同期期後の遠方界パターンに2素子の干渉パターンが得られ、素子間位同期期が確立していることがわかる。また光位同期期後の復調信号にアイの開口が確認される。さらに波長多重した2系統の空間通信信号が同期していることから5.6 Gbpsの伝送が実現できていることが分かる。

6. おわりに

将来の光フィーダリンク適用に向けた光フェーズドアレイを用いた光空間通信技術の予備検討を行った光

Fig. 6 Experimental data of free-space optical communication using optical phased array transmitter. (a) Before phase locking (free-running), (b) After phase locking of optical phased array.

フェーズドアレイにより発生させた高次モード光の大気揺らぎ伝搬特性を計算した結果、高次モードビームが伝搬損失、ばらつきをともに低減する特性を有していることが分かった。空間光伝搬による実験実証や高次モードビームの位相分布のパラメータ最適化などが今後の検討課題である。また、2素子フェーズドアレイを用いた光空間通信実験では、素子間位相同期により、波長多重した2系統の光空間通信の同期動作による5.6 Gbps伝送と、ビーム指向角制御とを両立できることが分かった。

参考文献

- 1) H. Hauschildt, F. Garat, H. Greus, K. Kably, J.-P. Lejault, H. L. Moeller, A. Murrell, J. Perdignes, M. Witting, B. Theelen, M. Wiegand, and A. Hegyi: *Proc. ICSOS 2014* (2014) S1-3.
- 2) E. Luzhansky, B. Edwards, D. Israel, D. Cornwell, J. Staren, N. Cummings, T. Roberts, and R. Patschke: *Proc. SPIE* **9739** (2016) 97390C.
- 3) 山本 静夫, 高畑 博樹: 第25回 科学技術・学術審議会宇宙開発利用部会 (2016) 資料25-1.
- 4) E. Fischer, Th. Berkefeld, M. Feriencik, M. Feriencik, V. Kaltenbach, D. Soltan, P. Adolph, R. Czichy, J. Kunde, F. Heine, K. Saucke, R. Meyer, I. Richter, and Z. Sodnik: *Proc. ICSO 2016* (2016) 105623K-1.
- 5) E. Lutz: *Int. J. Satellite. Commun. Netw.* **34** (2016) 461.
- 6) A. Mody and E. Gonzalez: *Proc. IEEE ICSOS 2017* (2017) 288.
- 7) T. Ando, E. Haraguchi, T. Sugihara, J. Suzuki, K. Kodeki, and T. Araki: *Proc. IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications 2014* (2014) p. 6.
- 8) 安藤 俊行, 原口 英介, 鈴木 二郎, 荒木 智宏: 第57回宇宙科学連合講演会, 鳥取 (2013) **3B11**.
- 9) 安藤 俊行, 原口 英介, 鈴木 二郎, 荒木 智宏: レーザー研究 **44** (2016) 52.
- 10) 安藤 俊行, 原口 英介, 鈴木 二郎, 遠藤 貴雄: 第59回宇宙科学連合講演会 (2015) 3F06.
- 11) K. Saucke, C. Seiter, F. Heine, M. Gregory, D. Tröndle, E. Fischer, T. Berkefeld, M. Feriencik, M. Feriencik, I. Richter, and R. Meyer: *Proc. SPIE* **9739** (2016) 973906.
- 12) J. Surof, J. Poliak, and R. M. Calvo: *Opt Lett.* **42** (2017) 2173.
- 13) 白井 智宏: 光学 **34** (2005) 581.