

中距離伝搬実証実験用デュプリケート光学系の検討

中山 朋子^{*1}, 高山 佳久^{*2}, 藤川 知栄美^{*3}, 小舘 香椎子^{*4}

Design of Optical Duplicate System for Medium Range Propagation Verification Experiment

by

Tomoko NAKAYAMA^{*1}, Yoshihisa TAKAYAMA^{*2},
Chiemi FUJIKAWA^{*3} and Kashiko KODATE^{*4}

(received on Mar.31, 2017 & accepted on Jul.13, 2017)

あらまし

近年注目されている衛星-地上局間宇宙光通信の大気ゆらぎの影響の低減のため、複数ビーム生成素子としてデュプリケート光学系の使用を提案し、シミュレーションによりその有効性を確認してきた。現在、我々はデュプリケート光学系の生成した複数ビームを中距離伝搬する実証実験の実施に向け準備を進めている。本論文では、中距離伝搬実証実験用デュプリケート光学系の設計条件、および、設計における着目点を挙げ、2つの新たな構成素子の使用方法の提案により、中距離伝搬実証実験用デュプリケート光学系の具体的な設計を行った。さらに、シミュレーションにより、設計したデュプリケート光学系の生成ビームが設計条件を満たすことを確認したので報告する。

Abstract

We have proposed an optical duplicate system for the reduction of atmospheric turbulence in satellite-ground laser communications and confirmed the validity by the numerical calculations. Now we are preparing verification experiments to transmit multiple beams generated by the optical duplicate system at medium range. In this paper, we report on the newly designed optical duplicate system for this experiment by suggesting design conditions and points of interest in design and proposing the two use of constituent elements. We also confirmed that the designed optical duplicate system satisfies the conditions for the medium-range propagation experiment by simulations.

キーワード: 衛星-地上局間宇宙光通信, 大気ゆらぎ, 平均化効果, 複数ビーム生成, デュプリケート光学系

Keywords: Satellite-Ground Laser Communication, Air Fluctuation, Averaging Effect, Multi-beam generation, Optical Duplicate System

1. はじめに

近年の地上と衛星間のデータ量の増加に伴い、宇宙でのレーザー光の空間伝搬を利用した宇宙光通信は、高速・大容量化、小型・軽量化可能など優れた特徴を持ち、電波では達成できない次世代の大容量の通信として期待が高まっている (Fig. 1) ¹⁾。

我々は衛星-地上局間宇宙光通信の課題の1つである大気ゆらぎによる光の伝搬方向の変動を低減し、安定した光回線を形成する手法を検討してきた ²⁻⁷⁾。様々な大気ゆらぎの影響の軽減の手法が提案されて

いるが、我々は大気ゆらぎの影響を受け時間的、空間的に強度がランダムに変化する複数の光を重ね合わせ、時間的、空間的な強度の変動を低減する平均化効果 ⁸⁾ に着目した。

光情報処理の分野で利用されるデュプリケート光学系が並列に複製像を生成することに着目し、平均化効果のキーである複数ビーム生成デバイスとしてデュプリケート光学系の利用を提案してきた ^{2,3)}。すでに使用を提案されている従来の複数ビーム生成素子と比べ小型・軽量で、同軸配置であるため既存の光地上局に挿入可能、アライメント部なしで生成ビ

*1 工学部光・画像工学科 臨時職員

School of Engineering, Department of Optical and Imaging Science and Technology, Temporary staff

*2 情報通信学部通信ネットワーク工学科 教授

School of Information and Telecommunication Engineering, Department of Communication and Network Engineering, Professor

*3 工学部光・画像工学科 教授

School of Engineering, Department of Optical and Imaging Science and Technology, Professor

*4 日本女子大学 名誉教授

Japan Women's University, Professor Emeritus

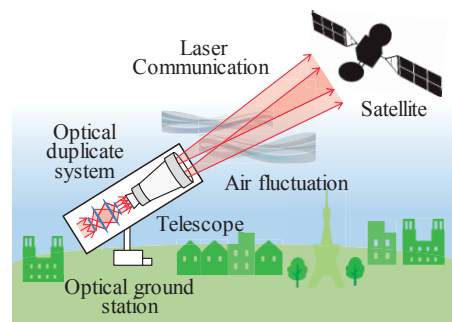


Fig. 1 Concept of satellite-ground laser communication

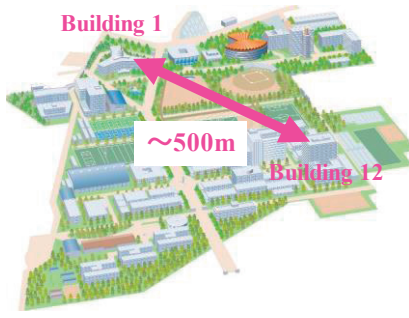


Fig. 2 Candidate site for propagation verification experiment (Shonan campus, Tokai University)

ーム数が可変であるなど、優れた特徴を持っている。

まず、シミュレーションによる原理確認として、本研究で提案したデュプリケート光学系による大気ゆらぎの影響の低減の検討を行った。宇宙光通信実験と比べ容易に実施可能な、2地点間の大気中の中距離伝搬実験によって取得した光強度画像を用い、シミュレーションにより光ビーム画像を複数のビームに分割し、さらに、様々な組み合わせでこの複数ビームを重ね合わせ、強度分布の確率密度分布を算出した。得られた確率密度分布から光強度のばらつきが小さくなることを確認した⁴⁾。これらの結果から、デュプリケート光学系による複数ビームの重ね合わせにより、大気ゆらぎの影響が容易に低減できることを示した⁵⁾。

さらに、小型・軽量のデュプリケート光学系の簡便で様々な応用に適応可能な設計方法を提案した。また、この設計法を用い、宇宙光通信用デュプリケート光学系の設計を行い、シミュレーションにより設計したデュプリケート光学系の性能を検討し、大気ゆらぎの状況に応じて構成を変えずにビーム数の制御が可能であることを確認した^{2,3)}。

また、デュプリケート光学系に液晶フィルタを挿入し開口を可変にすることで、出力ビームの総パワーを維持したまま、1つのビームを複数のビームに分歧する機能に加え、機械的な駆動部なしでビーム照射領域も制御できるデバイスとして適応可能であることも提案した⁶⁾。さらに、回折を考慮したシミュレーションを行い、デュプリケート光学系の入力面(IP)に液晶フィルタを挿入し、メッシュフィルタの開口数を変えることにより、衛星位置でのビーム照射の照射領域の制御が可能であることを確認した⁷⁾。

我々はこれらのシミュレーションによる検討を踏まえ、デュプリケート光学系の生成した複数ビームをFig.2に示す東海大学湘南キャンパス内の大気中の2点間の中距離(約500m)伝搬させる光回線安定化の実証実験の実施に向け、準備を進めている。

本論文では、中距離伝搬実証実験用デュプリケート光学系の設計条件をあげ、設計において2点に着目し、また、新たな2つのアレイレンズの使用法を提案により新たに中距離伝搬実証実験用デュプリケー

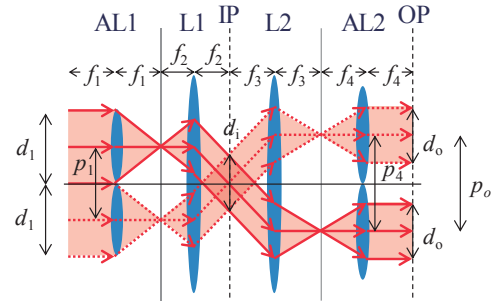


Fig.3 Optical duplicate system

ト光学系の設計を行った。また、シミュレーションを用い設計光学系の生成する2ビームが設計条件を満たし、さらに、このビームによる大気ゆらぎの影響の低減の有効性を確認したので報告する。

2. 中距離伝搬実証実験用デュプリケート光学系の設計

2.1 デュプリケート光学系の原理

Fig.3にデュプリケート光学系を示す⁵⁾。デュプリケート光学系はアレイレンズ(AL)2枚とレンズ(L)2枚で構成される。入射光はアレイレンズ1(AL1)によりアレイ数だけ波面分割される。AL1とL1がアフォーカル系となっているため、分割光はそれぞれが平行光となり、入力面(IP)で重なり合う。IPに透過画像を表示すると、表示画像がレンズ2(L2)の焦点面においてフーリエ変換される。AL1を構成するレンズ数のフーリエ変換像はアレイレンズ2(AL2)により再びそれぞれフーリエ変換され、IPへの表示画像がAL2の焦点面である出力面(OP)にALの構成レンズと同数だけデュプリケート(複製)される。

また、幾何光学により、下記のデュプリケート光学系の出力ビームの原理式が得られる⁹⁾。出力ビームサイズ d_o は、

$$d_o = \frac{d_1 f_2 f_4}{f_1 f_3} \quad (1)$$

出力ビーム間隔 p_o は、

$$p_o = p_4 = \frac{p_1 f_3}{f_2} \quad (2)$$

と表される。ここで d_1 はAL1の構成レンズの直径、 p_1 はその間隔、 p_4 はAL2の構成レンズの間隔、 f_1, f_2, f_3, f_4 はAL1, L1, L2, AL2の焦点距離である。

なお、ビーム生成素子として生成された複数の光が互いに重ならないようにするための必須条件として、出力ビームサイズ d_o と間隔 p_o が

$$d_o < p_o \quad (3)$$

の関係を満たす必要がある。また、IPの大きさ d_i は、

$$d_i = d_1 \frac{f_3}{f_2} \quad (4)$$

となる。

2.2 デュプリケート光学系の設計

中距離伝搬実験用デュプリケート光学系の設計条件を Table 1 に示す．また，レンズの厚さを考慮し，近軸理論を適用し，設計を行う．Table 1 の全ての条件を満たし，1 ビームを 2 ビームに分岐する中距離伝搬実験用デュプリケート光学系の設計に向け，我々は下記の 2 点に着目した．

[設計の着目点]

- i) AL1 と AL2 は同一の AL を使用し，L1 と L2 の焦点距離 f_2, f_3 の比により要求される 2 ビームの実現を目指す．

(多様な焦点距離，開口サイズを持つ L が市販されているが，AL の場合は，焦点距離，構成レンズ間隔の組み合わせが少ないため．)

- ii) IP への液晶の挿入のため IP サイズ d_i を大きくする．

(液晶の IP に挿入により，出力ビーム数の制御により大気ゆらぎの影響へのリアルタイムの対応が可能，また，開口径および開口形状が可変となるため．)

デュプリケート光学系の原理式と設計の着目点 i) より，デュプリケート光学系の構成素子の焦点距離の条件を導くことができる．

まず，設計の着目点 i) AL1 と AL2 は同一の AL の使用により，AL1 と AL2 の焦点距離 f_1, f_4 は等しく，

$$f_1 = f_4 \quad (5)$$

となる．

さらに，AL1 を構成する個々のレンズ間に隙間がないと仮定する．この場合，AL1 の構成レンズの開口サイズ d_1 と間隔 p_1 は等しくなり，

$$d_1 = p_1 \quad (6)$$

となる．

式(3)と(6)より，L1 と L2 の焦点距離 f_2, f_3 は

$$\begin{aligned} \frac{f_2}{f_3} &< \frac{f_3}{f_2} \\ f_2^2 &< f_3^2 \\ f_2 &< f_3 \end{aligned} \quad (7)$$

の関係が得られる．

また，式(2)より，L1 と L2 の焦点距離 f_2, f_3 と AL1 と AL2 の間隔 p_1, p_4 の関係は

$$f_2 : f_3 = p_1 : p_4 \quad (8)$$

となる．

式(7)と(8)より，

$$p_1 < p_4 \quad (9)$$

と表される．

そこで，我々は，設計の着目点 i) AL1 と AL2 に同一の AL の使用し，式(9)を実現するため，2 つの AL の使用方法を提案した．

AL の提案使用方法 1 の AL の使用方法を Fig. 4 (1)

(a)に示す．従来のデュプリケート光学系は，AL2 の隣り合う構成レンズを使用し，複数ビームを生成する．我々は，隣り合う構成レンズではなく離れた構成レンズを用いることで間隔の大きなアレイレンズの利用の効果を得る．実際の AL2 の構成レンズの間隔 p_4 であるが，AL の提案使用方法 1 により AL2 の個々のレンズ間隔 p_4'

$$p_4' = np_4 \quad (n = 2, 3, 4, \dots) \quad (10)$$

となる．ただし，AL1 の構成レンズの開口サイズ d_1 は変化しない．

2 枚同じ仕様の市販 AL (構成レンズの間隔 $3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$) を用い，中距離伝搬実験用デュプリケート光学系を設計した．Fig. 4 (1) (a)に示すように，2 つ離れた構成レンズを用いることで 3 倍の間隔を持つアレイレンズ

$$p_4' = 3p_4 \quad (11)$$

として利用する．よって $p_1 = 3 \text{ mm}, p_4' = 9 \text{ mm}$ となった．

$$p_1 : p_4 = 3 : 9 = 1 : 3 \quad (12)$$

の関係，および，式(8)より，L1 と L2 の焦点距離 f_2, f_3 は

$$f_2 : f_3 = p_1 : p_4 = 1 : 3 \quad (13)$$

の関係を持つ必要がある．この関係と同時に，全ての光をもれなく受光開口サイズを持つ市販の L を選択し，L1 と L2 の焦点距離は $f_2 = 15.2 \text{ mm}, f_3 = 45.5 \text{ mm}$ とした．設計した光学系を Fig. 4 (1) (b)に示す．

AL 提案使用方法 2 を Fig. 4 (2) (a)に示す．複数の円形 L，あるいは，正方形 L が配列されている市販 AL が多いが，構成レンズが長方形の AL を用い，AL2 では AL1 の 90° 回転し使用する．AL を構成する個々のレンズが長方形であるため，AL1 よりも AL2 の方がピッチの大きな AL としての効果を得て，式(9)の条件を満たす．

AL の提案使用方法 2 も，AL の提案使用方法 1 と同様に，2 枚の AL (構成レンズの間隔 $3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$) を用い，設計を行った．AL を回転させることで，AL1 と AL2 の構成レンズの間隔は $p_1 = 3 \text{ mm}, p_4 = 4 \text{ mm}$ となる．よって，

$$p_1 : p_4 = 3 : 4 \quad (14)$$

の関係が得られる．したがって，式(8)より，L1 と L2 の焦点距離 f_2, f_3 は

$$f_2 : f_3 = p_1 : p_4 = 3 : 4$$

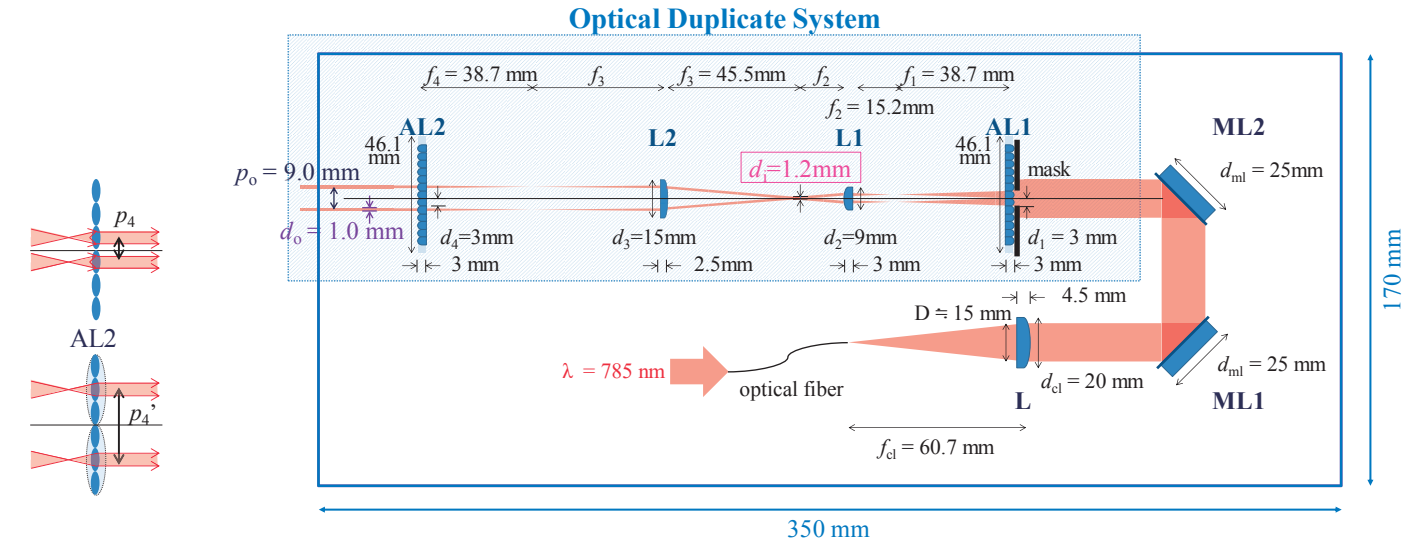
の条件を満たす必要がある．Table 1 の設計条件，および，式(9)を満たす，焦点距離 $f_2 = 30.3 \text{ mm}, f_3 = 40.4 \text{ mm}$ の市販 L を選択した．設計した光学系を Fig. 4 (2) (b)に示す．

AL 提案使用方法 1 での入力面の大きさ $d_i = 1.2 \text{ mm}$ ，提案手法 2 では $d_i = 2.4 \text{ mm}$ となった．よって，設計の着目点 ii) より，IP への液晶の挿入を考慮し，IP サイズ d_i の大きい提案使用方法 2 による設計を採用した．

また，各レンズの球面収差を押さえるため，平行

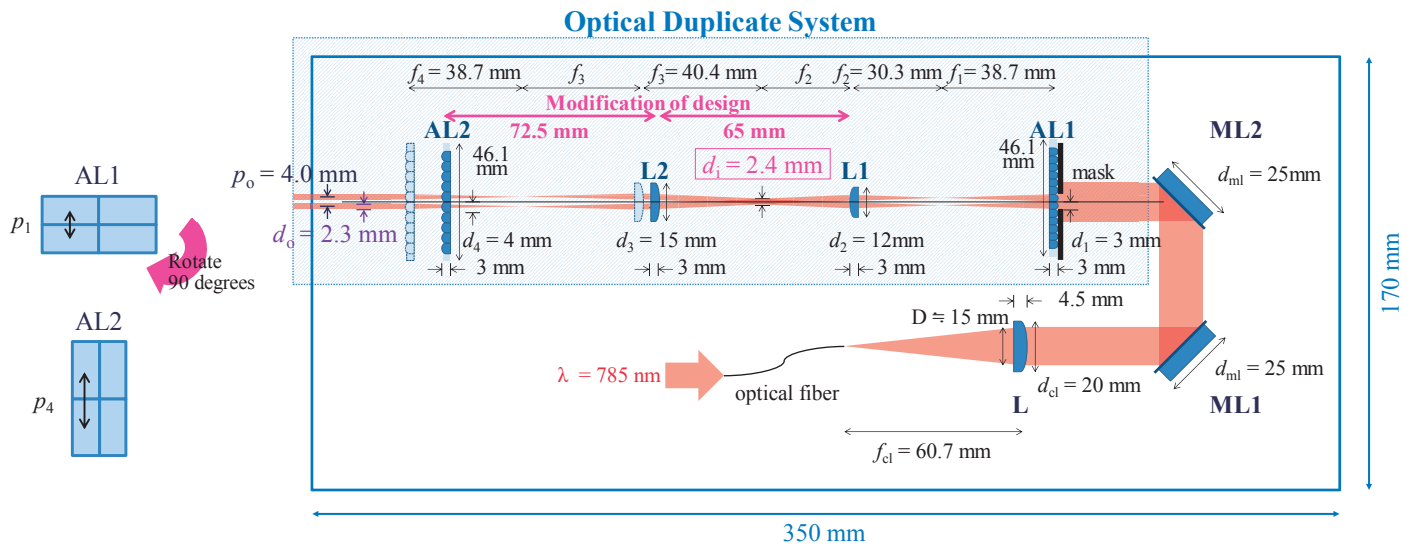
Table 1 Design condition of optical duplicate system

Item	Value	Remarks
Wavelength of incident beam	785 nm	For ease of experiment.
Size of optical system	350 mm × 170 mm or less	Taking into consideration of the size of the entire optical setup, it can be made portable by installation on a tripod
Distance between optical elements	$l \geq 30$ mm	For convenience in optical alignment.
Number of output beams	2 or more	
Diameter of output beam	$D_{\max} \leq 10$ mm	Considering the diameter of the mirror used for the optical communication system
Pitch of output beam	$p_o \geq 4$ mm	Considering the atmospheric fluctuations in urban areas and by using a telescope with a $5 \times$ magnification.



(1) Proposed usage method 1

Rectangular array lenses are used as array lenses with different pitch.



(2) Proposed usage method 2

AL1 rotated by 90° in the vertical plane against the optical axis is used as AL2.

Fig. 4 Design of optical duplicate system for medium range propagation verification experiment

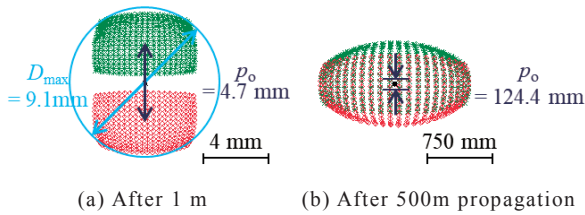


Fig. 5 Spot diagram

光を入射する場合は入射側，平行光を出射する場合は出射側レンズの凸面に配置した．また，AL1 の 2 つの構成レンズのみビームを入射させ，迷光の出力を避けるため，AL1 の前面にマスクを配置した．なお，AL1 の構成レンズが矩形のため，出力ビームは矩形ビームとなる．

さらに，光学設計ソフト CODE V を用いて，設計したデュプリケート光学系の生成した 2 つのビームを大気ゆらぎのない大気中 500 m を伝搬したところ，算出した光路図，スポットダイアグラムより，経路途中で 2 つのビームが交わり，さらに，それぞれのビームが集光することが分かった．経路途中で 2 ビームの交差により 2 ビームが同じ大気ゆらぎの状態を持つ大気中を通過することとなり，異なる大気ゆらぎの状態の大気中を伝搬した複数ビームの重ね合わせの効果を利用する平均化効果が得られず，大気ゆらぎの影響の低減を図ることができない．さらに，ビームの途中経路の集光は，ビームワンダ(送信ビームのふらつき)が大きくなることが知られている．そのため，Fig. 4 (2) (b) に示すように，L1 と L2 間の距離を 70.7 mm (= 30.3mm + 40.4mm) から 65.0 mm、L2 と AL2 間の距離を 79.1 mm (= 38.7mm + 40.4mm) から 72.5 mm とする設計の修正を行い，500 m の伝搬経路において 2 ビームが交差せず，また，それぞれのビームは集光することなく発散するよう光学系の改善を図った．

3. 設計デュプリケート光学系の有効性の確認

光学設計ソフト CODE V により，設計した中距離伝搬実験用プリケート光学系を組み込む光通信装置内(デュプリケート光学系の AL2 から望遠鏡の入力面までの 1 m)伝搬後のスポットダイアグラムを算出した(Fig. 5 (a))．設計したデュプリケート光学系の実光線追跡と 100% スポット径の算出により，2 ビームの間隔 $p_o = 4.7$ mm，光束直径 $D_o = 9.1$ mm となり，中距離伝搬実験に要求される $p_o \geq 4$ mm，光束直径 $D_o \leq 10$ mm の設計条件を満たすことを確認できた．

さらに，この 2 ビームが大気ゆらぎのない大気中 500 m 伝搬後のスポットダイアグラムも算出した．Fig. 5 (b) に示すように，2 ビームは中心間隔 $p_o = 124.4$ mm で重なり合い，光通信装置内の望遠鏡により拡大されない場合でも，都市部における大気のコヒーレンス長よりも大きくなっていることが分かる．よって，

平均効果により大気ゆらぎの影響の低減に有効なビームの生成が確認できた．

4. まとめ

デュプリケート光学系の生成する複数ビーム伝搬による大気ゆらぎの実証を目指した中距離伝搬実験(500 m)の実施に向け，まず設計した光通信装置に組み込む実験用デュプリケート光学系のための設計条件を挙げた．同時に挙げた設計の着目点に従い，全ての設計条件を満たすデュプリケート光学系の設計のため，2 つのデュプリケート光学系を構成する AL の使用方法を新たに提案した．この 2 つの AL の提案使用方法を用い，中距離伝搬実験用デュプリケート光学系の具体的な設計を行った．さらに，シミュレーションにより，設計したデュプリケート光学系が要求するビーム間隔，最大径を持つ出力ビームの生成を確かめ，設計したデュプリケート光学系が要求される中距離伝搬実験の条件を満たすことを確認した．さらに，生成ビームの大気ゆらぎのない大気中の 500 m 伝搬後のスポットダイアグラムから大気ゆらぎの影響の低減に有効な複数ビームが生成されることも確かめた．

今後，設計したデュプリケート光学系を構築し，作製した光通信装置に組み込み，デュプリケート光学系が生成する複数ビームの中距離伝搬により大気ゆらぎの影響の低減による光回線の安定化の実証を目指す．

謝辞

本研究の一部は、公益財団法人 JKA の平成 28 年度研究補助事業の助成(28-139)を受けて実施したものであり，ご支援いただいた関係各位に深く感謝いたします．



参考文献

- 1) M. Toyoshima, "Trends in satellite communications and the role of optical free-space communications" J. Opt. Networking, Vol. 4, No. 6, pp.300-311 2005
- 2) 中山朋子，高山佳久，藤川知栄美，渡邊恵理子，小舘香椎子：衛星-地上局間宇宙光通信のためのデュプリケート光学系，" 東海大学工学部紀要 Vol. 52，No. 2, pp.101-106 2013
- 3) T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, E. Watanabe, and K. Kodate, "Design of Compact Optical Duplicate System for Multi-Beam Generation and Application of Satellite-Ground Laser Communications" Tech. Dig. ODF'14 pp.155-156 2014
- 4) T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, E. Watanabe, and K. Kodate, "Application of Compact Optical Duplicate System as a Multi-Beam Generation Device for Satellite-Ground Laser Communications" ICOS0 2014, pp. 5-7 2014
- 5) T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, E. Watanabe, and K. Kodate, "Compact optical duplicate system for satellite-ground laser communications: application

- of averaging effects” Opt. Rev., Vol.21, No.5, pp.659-667 2014
- 6) T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, and K. Kodate, “Optical duplicate system for satellite-ground laser communication: reduction of the effects of atmospheric turbulence and simplification of the optical ground station” Tech. Dig. 20th MOC’15 pp.100-101 2015
- 7) T. Nakayama, Y. Takayama, C. Fujikawa, and K. Kodate, “Controlling laser beam irradiation area using an optical duplicate system to improve satellite-ground laser communications” Jpn. J. Appl. Phys., Vol.55, No.08RB05, pp.08RB05-1-08RB05-5 2016
- 8) M. Toyoshima, Y. Takayama, T. Takahashi, K. Suzuki, S. Kimura, K. Takizawa, T. Kuri, W. Klaus, M. Toyoda, H. Kunimori, and T. Jono, “Laser beam propagation in ground-to OICETS laser communication links” JSTS, Vol.23, No.2, pp.30-45 2007
- 9) K. Hamanaka, H. Nemoto, M. Oikawa, E. Okuda, and T. Kishimoto, “Multiple imaging and multiple Fourier transformation using planar microlens arrays” Appl. Opt. Vol.29, No.28, pp.4064-4070 1990