

椎名 達雄、吉田 啓、伊藤 昌文、岡村 康行

Tatsuo Shiina, Kei Yoshida, Masafumi Ito, and Yasuyuki Okamura

和歌山大学 システム工学部

Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

Abstract : An optical experiment was demonstrated for estimation of annular beam propagation characteristics. The diameter of the annular beam can be varied from 10mm to 50mm. The transformation into the non-diffractive beam is accomplished in the range of 20-400m. As a result of the fundamental experiment, the waveform variation was well coincide with the analysis. The annular beam of the diameter of 2cm^φ was transformed into the non-diffractive beam with the narrow center peak at less than 50m. The optical alignment, however, should be strict at the further propagation distance.

1. はじめに

インライン型ライダーシステムは送信ビーム開口径を拡大することによる瞳への安全性およびビーム広がり抑制、狭い受信視野での最近距離からの計測、および光学系の簡易メンテナンス等の特徴をもつ^{1),2)}。本研究では1999年よりLD励起パルスレーザを用いたインライン型マイクロパルスライダー (Micro Pulse Lidar : MPL) システムの製作を行ってきた³⁾⁻⁶⁾。特に本システムでは光サーキュレータ、アキシコンプリズム対といったユニークな光学系を採用し、ビーム射出効率3dB、p・s両偏光成分同時計測を実現するに至っている。その開発において、出射した環状ビームが伝搬に伴い擬似的な非回折ビームとなる過程を解析した⁷⁾⁻⁸⁾。非回折ビームは主に微小光学系において用いられる技術であり⁹⁾⁻¹²⁾、その長距離伝搬を扱った報告は少ない¹³⁾⁻¹⁵⁾。開口径30cm^φの環状ビームを用いる場合、非回折ビームへの波形の変換は15-20kmの距離において為される。実際のビーム伝搬・波形変換過程を調べるには距離が大きく、解析との整合を検討することも容易ではない。

本研究では非回折ビームへの変換過程をスケールダウンして実験を行い、解析によって得た光学的效果を検証することを目的とした。合わせて、大気揺らぎの影響、レーザのシンチレーション等による非回折ビームの挙動を追うことで環状ビームのライダーへの応用を客観的に評価していく。

2. 環状ビーム生成の原理

本研究では環状ビームの生成には1対のアキシコンプリズム対を用いている¹⁶⁾⁻²⁰⁾。アキシコンプリズム対による波形の変化をFig. 1に示す。入射させるガウスビームの大きさ(幅)を可変す

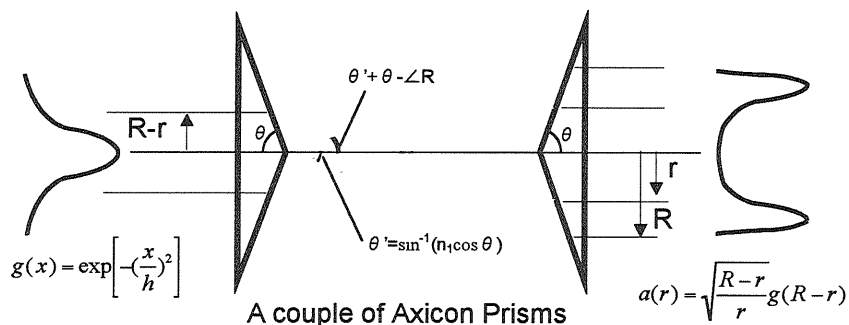


Fig. 1 Waveform transformation of a couple of axicon prisms.

ること環状ビームのリング厚を変化させることが可能である。プリズムに入射したガウスビームは光強度が高い中心部分がアキシコンプリズムの作用により、環状ビーム上では円周に変換される。逆にガウスビームの中心から離れた円周部分は環状ビーム上でより中心に配置されることとなる。

得られた環状ビーム波形を用いてキルヒホッフの回折積分を計算することで伝搬過程を解析する。計算結果の一例を Fig. 2 に示す。(a)は出射する環状ビームであり、その外径は 2cm^ϕ として計算している。尚、出射ビーム光強度は環状光と同一の開口径をもつ平面波の出射強度で正規化している。(b)は 55m ビームが伝搬したところでの波形であり、出射した環状ビームが伝搬にともなって非回折ビーム（その開口がもつ回折限界を超えた中心ピーク光強度）へと変換される様子が分かる。伝搬に伴う中心光強度の変化を Fig. 3 に示す。円形開口平面波の中心光強度の変化をあわせて示している。非回折ビームの強度は円形開口のそれよりも大きい。これは回折限界を超えて送信ビームエネルギーが中心ピークに集光されることを示している。

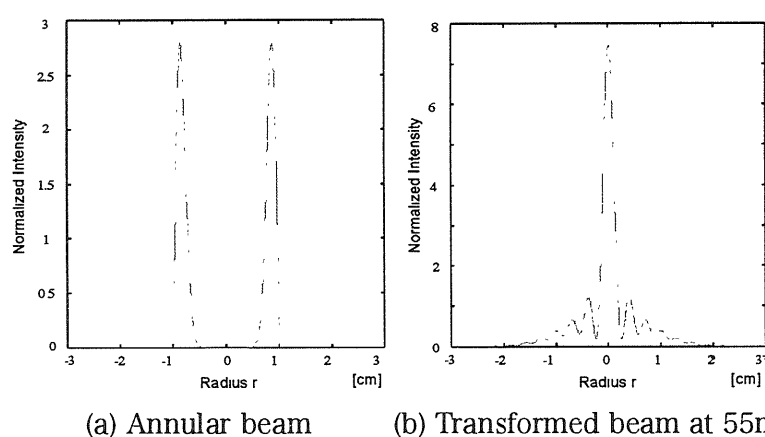


Fig. 2 Annular beam and its propagation.
(Gaussian beam of $h/\sqrt{2} = 0.175$ was incident.)

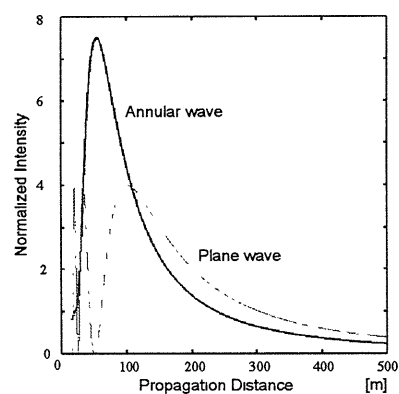


Fig. 3 Variation of center peak intensity.

3. 環状ビーム伝搬特性の実験

環状ビーム伝搬特性の実験構成を Fig. 4 に示す。また、レーザ、アキシコンプリズム対等の光学系諸特性を Table 1 にまとめる。この光学系で利用できる環状ビーム径は $1\sim 5\text{cm}$ である。環状ビームの波形外形はビームエキスパンダーによるガウスビームの拡大に依存する。一方、アキシコンプリズム対の間隔は環状ビームの波形外形を保ったまま開口径の拡大縮小を行うことに寄与する。上記の大きさの環状ビームに対する非回折ビームへの変化は $10\sim 350\text{m}$ の範囲で生じることを解析結果から得ている。レーザビームは 300m 以上大気中を伝搬させた場合を考慮して光量に十分な余裕を持たせている。偏光ビームスプリッターにより p 偏光成分を環状ビームに、s 偏光成分を参照用のガウスビームに利用している。ガウスビームはレーザ光自体の強度揺らぎの補正に使用する。併せて、ガウスビームは環状ビームと平行に伝搬させる。その間隔は 15cm 程であり、大気中を伝搬する際に大気ゆらぎ・変化の条件は同一とみなせる。

環状ビームの非回折ビームへの変換を利用するにはビームの広がり角・集光角を開口径に依存して十分小さく抑えることが必要になる。ビームエキスパンダー、アキシコンプリズム対は厳密な光軸調整が行えるよう x、y、z 軸それぞれの調整機構をもつ。光学系はブレッドボード上に配置され、さらにブレッドボードはワゴンに搭載している。伝搬距離、実験内容に応じて、屋内、野外での計測ができるようにしている。

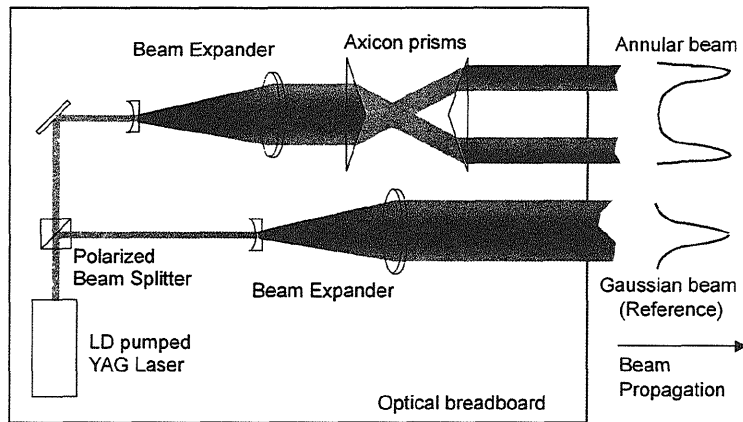


Table 1 Optical Specification

Laser	HCP Photonics
Power [CW]	100mW [max]
Wavelength	532nm
Polarization	7:1
Beam Expander	
Magnification	x 5 ~ x11
Axicon Prism	
Zenith Angle	150°
Size	50.8mm

Fig. 4 Experimental Setup of annular beam propagation.

Fig. 5 にプリズム出射直後から 50m 先までの環状ビーム伝搬過程を示す。ビーム伝搬実験は屋内で行った。(a)-(d)の波形から環状で出射したビームが強度分布を中心に集めるようにして伝搬していく様子が見て取れる。(e)の中心光スポットの大きさは出射した環状ビーム径(2cm^φ)よりも十分に小さく、Fig. 2 で示した非回折ビーム中心光と同様の変化をしていることが分かる。そのことは (f)の波形で中心光に同心円のサイドリングが現れていることからわかる。(a),(b)では内側に、(c)-(f)では外側に網目状（ヘアライン状）の光が現れている。これは入射側アキシコンプリズムの中心、つまり天頂付近の研磨痕が拡大され、それが伝搬に伴って回折された結果である。

解析の結果からは 50-55m の伝搬距離にて最大中心光強度を得るはずであったが、今回示した実験結果では 25m 付近で中心光が最大値となった。これは送信ビームが集光角をもつことを意味する。集光角度は 0.3mrad 程と見積もられる。今後より遠方 (<400m) で大気中を伝搬させる場合にはさらに厳格な光学系の調整が必要となる。

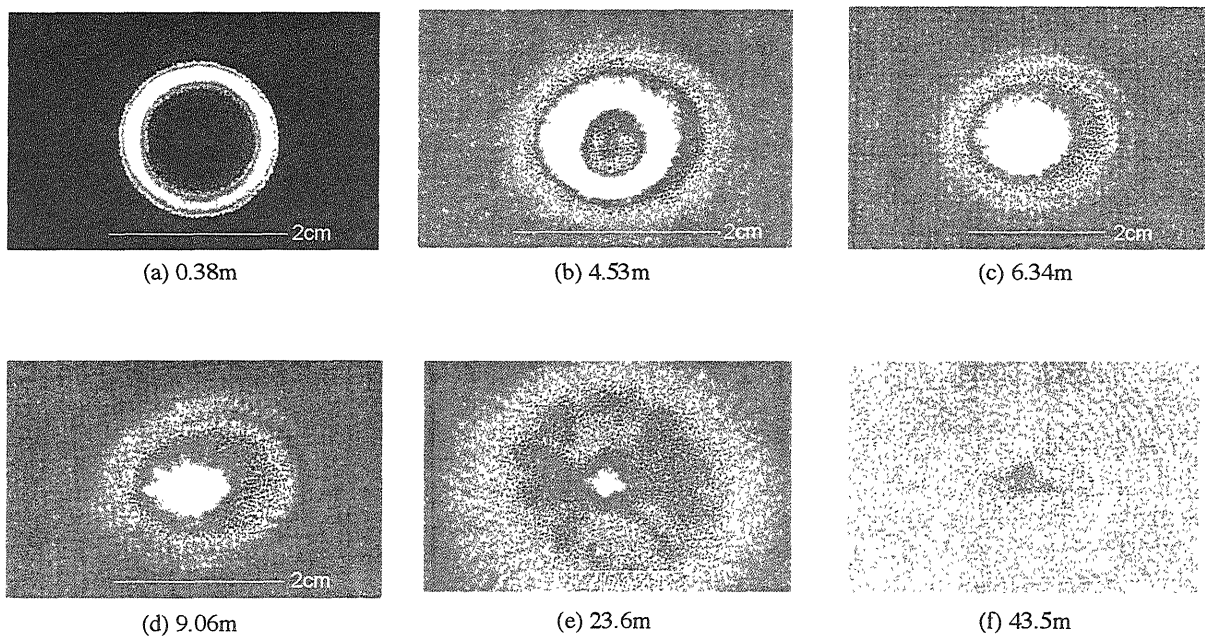


Fig. 5 Transformation of annular beam (2cm^φ) into the non-diffractive beam.

4. まとめ

本研究では製作中のインライン型ライダーシステムで使用している環状ビームの伝搬特性を、実験で検証することを目的としている。特に今回は実験光学系を構築し、その基礎特性として、屋内において環状ビームの伝搬実験を行った。伝搬距離 50m での実験による環状ビーム波形の変化は解析の結果とよく一致し、解析の検証とともに実験精度の確認を得た。望遠鏡（本実験系の場合はビームエキスパンダー）の焦点距離を固定して、より遠方までビームを伝搬させて、もしくはビーム径を大きくして、実験を精度よく遂行するためには、送信レーザービームの広がり角・集光角に対する許容誤差はさらに厳格になる。現在使用している光学系調整機構の精度が $10\mu\text{m}$ であることから、環状ビーム径 5cm^{ϕ} 、ビーム広がり角・集光角を制御した上で、その際に非回折ビームへの変換に要する伝搬距離 400m 以下が、本実験構成での精度の限界と見積られる。今後その範囲内において、大気揺らぎ、風を含む乱流中、および低視程時ランダム媒質中での環状ビーム伝搬過程を実験により検証していく予定である。

参考文献

1. James D. Sphinhirne, "Micro Pulse Lidar", IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 31, No. 1, pp.48-55, 1993
2. I. H. Hwang, Matthew K. Nam, Belthur Ranganayakamma, and H. Sang Lee, "A Compact Eye-safe Dual Wavelength Lidar and Application in Biological Aerosol Detection", Lidar Remote Sensing in Atmospheric Earth Sciences Part I, Luc Bissonnette, Gilles Roy, and Gilles Vallee Eds., pp.205-208, 2002
3. Tatsuo Shiina, Masafumi Ito, and Yasuyuki Okamura, "Design Consideration of Compact Lidar Optical System for Disaster Prediction", 20th International Laser Radar Conference, pp.21, 2000
4. 南 英治、椎名 達雄、伊藤 昌文、岡村 康行、「インライン型ライダー送受信分離用光サーキュレータ」、信学技報, Vol.100, No.427, OCS2000-85, pp.43-48, 2000
5. Eiji Minami, Tatsuo Shiina, Masafumi Ito, and Yasuyuki Okamura, "In-Line Type Lidar System for Cloud Measurement", PIERS 2001, p.576, 2001
6. Tatsuo Shiina, Eiji Minami, Masafumi Ito, and Yasuyuki Okamura, "Optical Circulator for In-line Type Compact Lidar", Appl. Opt., Vol. 41, No. 19, pp.3900-3905, 2002
7. 椎名 達雄、南 英治、伊藤 昌文、岡村 康行、「インライン型コンパクトライダー光学特性の解析」、レーザーセンシングシンポジウム予稿集, pp.66-69, 2001
8. Tatsuo Shiina, Eiji Minami, Kei Yoshida, Masafumi Ito, and Yasuyuki Okamura, "In-line Type Compact Lidar with Nearly Non-diffractive Beam", 21th International Laser Radar Conference Proceedings 'Lidar Remote Sensing in Atmospheric and Earth Sciences' Part I, pp.101-104, 2002
9. L. L. Doskolovich, S. N. Khonina, V. V. Kotlyar, I. V. Nikolsky, V. A. Soifer, and G. V. Uspleniev, "Focusators into a Ring", Opt. Quant. Elect., Vol. 25, pp.801-814, 1993
10. Victor Soifer, Victor Kotlyar, and Leonid Doskolovich, *Iterative Methods for Diffractive Optical Elements Computation*, Tatlor & Francis, 1997
11. J. Durnin and J. J. Miceli, Jr., "Diffraction-Free Beams", Phys. Rev. Lett., Vol. 58, No. 15, pp.1499-1501, 1987
12. G. Indebetouw, "Nondiffracting Optical Fields: Some Remarks on their Analysis and Synthesis", J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 6, No. 1, pp.150-152, 1989
13. Tadashi Aruga, Shu Wing Li, Shin Yoshikado, Masao Takabe, and Ruiming Li, "Nondiffracting narrow light beam with small atmospheric turbulence-influenced propagation", Appl. Opt., Vol. 38, No. 15, pp.3152-3156, 1999
14. Tadashi Aruga and Shu Wing Li, "Super High Resolution for Long-Range Imaging", Appl. Opt., Vol. 38, No. 13, pp.2795-2799, 1999
15. Tadashi Aruga, "Generation of long-range nondiffracting narrow light beams", Appl. Opt., Vol. 36, No. 16, pp.3762-3768, 1997
16. Graeme Scott and Neil McArdle, "Efficient Generation of Nearly Diffraction-Free Beams using an Axicon", Opt. Engin., Vol. 31, No. 12, pp.2640-2643, 1992
17. Rieko Arimoto, Caesar Saloma, Takuo Tanaka, and Satoshi Kawata, "Imaging Properties of Axicon in a scanning optical system", Appl. Opt., Vol. 31, No. 31, pp.6653-6657, 1992
18. Pierre-Andre Belanger and Marc Rioux, "Ring Pattern of a Lens-Axicon Doublet Illuminated by a Gaussian Beam", Appl. Opt., Vol. 17, No. 7, pp.1080-1086, 1978
19. Keizo Kono, Mitsuru Irie, and Takumi Minemoto, "Generation of Nearly Diffraction-Free Beam Using a New Optical System", Opt. Rev., Vol. 4, No. 3, pp.423-428, 1997
20. Keizo Kono, Yasuo Mitarai, and Takumi Minemoto, "New Super-Resolution Optics with Double-Concave-Cone Lens for Optical Disk Memories", J. Opt. Mem. Neural Networks, Vol. 5, No. 4, pp.279-285, 1996