

大気揺らぎ中での伝搬光波形維持

Waveform preservation of propagated beam in the atmospheric turbulence

椎名 達雄¹、吉田 啓²、伊藤 昌文²、本田 捷夫¹、岡村 康行³
Tatsuo Shiina¹, Kei Yoshida², Masafumi Ito², Toshio Honda¹, and Yasuyuki Okamura³

¹千葉大学工学部 情報画像工学科

²和歌山大学システム工学部 光メカトロニクス学科

³大阪大学大学院 基礎工学研究科

¹Faculty of Engineering, Chiba University

²Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

³Graduate School of Engineering Science, Osaka University

Abstract : The numerical analysis of beam propagation in the atmospheric turbulence was conducted. The atmospheric turbulence was simulated with Tatarski's model. By the analysis and the experiment, we confirmed that an annular beam was tough (less fluctuated) against the atmospheric turbulence in comparison to a Gaussian beam. It is because small cells of the turbulence influence the propagated beam shape, and the Gaussian beam fluctuates at the near distance while the annular beam does not.

1. はじめに

ライダー技術において送信ビーム径及び波面を制御することのメリットは大きい。送信ビーム径を大きくすることで、Eye-Safe を満たすことができ、回折によるビーム広がり抑制にもつながる。しかし、これまでのライダー技術では送信ビームへの考慮はあまりされてこなかった。これは、Biaxial型およびCoaxial型ライダーのライダーエコー特性が送受信視野重なり率 (Geometrical form factor) に依存し、送信ビーム径の拡大は視野重なり率の低下につながるために、結果としてライダー不感距離を伸ばすことになるためと考えられる。

マイクロパルスライダー (Micro Pulse Lidar) 技術の登場によってインライン型ライダーが実現し、送受信ビーム径を大きくしても実質的に視野重なり率の低下を補える構成が可能になった。一方で、送信ビーム波面を制御し、伝搬特性に特徴を持たせる報告もされている[1]。その中では大気揺らぎに対する非回折ビームの優位性が述べられているが、ライダー応用については検証されていない。

本研究ではこれまで、環状ビームを利用したインライン型ライダーを開発しており、伝搬に伴って環状ビームが非回折ビームとなること、また、その非回折ビームの大気揺らぎに対する“強さ”、波形を維持する性質について実験的に確認してきた[2]。本報告では環状ビームの大気揺らぎに対する優位性を解析的に検証し、あわせて地上実験の結果との整合を試みる。

2. 解析方法

2-1. 大気揺らぎモデル

大気揺らぎ中でのビーム伝搬を考察するにあたり、大気揺らぎの導入に Tatarski のモデルを用いた[3]。

$$\begin{aligned} u &= Ae^{iS} \\ \log A &= \log A_0 + \chi \\ S &= S_0 + S_i \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 u は揺らぎを受けた波動で、 χ は大気揺らぎによる伝搬ビームの振幅揺らぎを対数で表したものの、 S_i は位相揺らぎを表す。 A_0 、 S_0 は送信時の揺らぎのない波動の振幅および位相を表す。

このモデルでは扱う大気スケールによって揺らぎの表現式が変わる。特に本研究で対象とする大気スケールは、10m~100km であり、その場合の大気揺らぎについて解析では次式を用いた。

$$\begin{aligned} \langle S_1^2 \rangle &= 0.39k^2 C_n^2 L_0^{5/3} L \\ \langle \chi^2 \rangle &= 0.31k^{7/6} C_n^2 L^{11/6} \quad \frac{l_0^2}{\square} \ll L \ll \frac{L_0^2}{\square} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 k は波数である。 C_n^2 は屈折率の構造定数であり、 $10^{-13} \text{m}^{-2/3}$ (揺らぎの大きな場合) $\sim 10^{-17} \text{m}^{-2/3}$ (揺らぎの小さな場合) まで変化する。 l_0 、 L_0 はそれぞれ大気の内側のスケール、外側のスケールである。 l_0 は大気のかたまり (渦) の最小の大きさで決まり、 L_0 は地上からの高さに比例する。解析では $l_0=1\text{mm}$ 、 $L_0=1\text{m}$ 、 $C_n^2=10^{-13}$ 、 10^{-15} 、 $10^{-17} \text{m}^{-2/3}$ で計算を行い、 $\langle S_1^2 \rangle$ 、 $\langle \chi^2 \rangle$ を求めた。大気揺らぎ中を伝搬するビームへの揺らぎの付加は、これらの揺らぎの範囲内で乱数を使って与えた。一方、大気揺らぎの空間的な大きさは、ビーム径に対するセルの大きさで表現し、Fig.1 に示すセル分割で計算を行った。Fig.1 はグラフの水平方向がセルの大きさを表し、垂直方向が揺らぎの大きさ (図では振幅) を表している。位相揺らぎについても同様である。大気揺らぎの空間的な大きさが小さい程、その動きは活発になる。

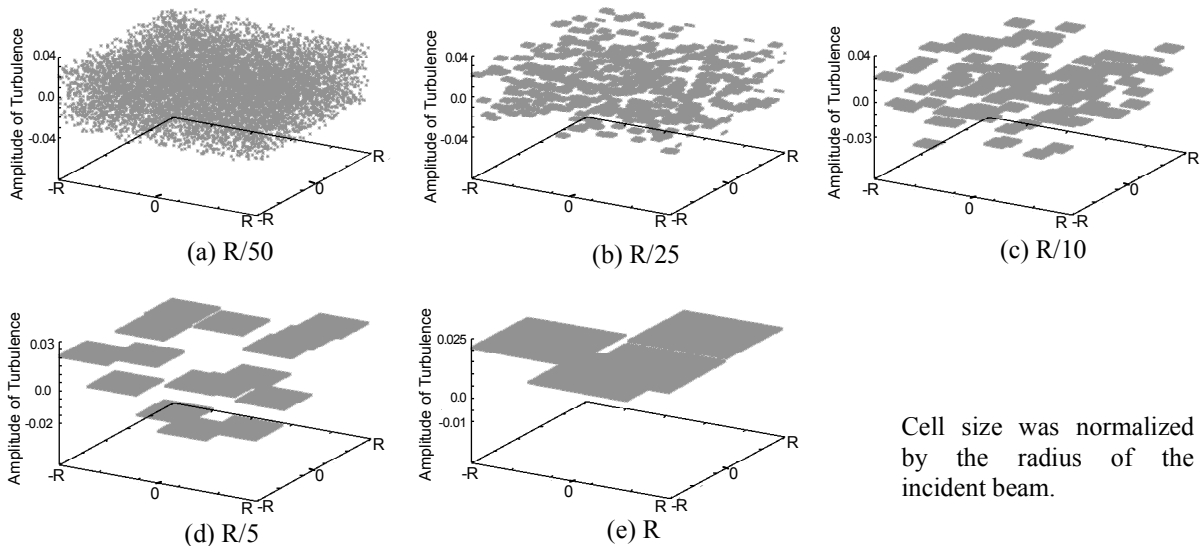


Fig. 1 Spatial cell sizes of the atmospheric turbulence model. ($C_n^2=10^{-15} \text{m}^{-2/3}$)

2-2. 伝搬光の性質

大気揺らぎ中を伝搬させる光には環状光を用いた。環状光の生成にはアキシコンプリズム対による生成方法を利用し、出射時の波面位相分布は一定である。出射径は送信望遠鏡開口半径 R で正規化している。環状光の外形は開発したインライン型ライダーでの出射光を基にしている。また、比較のため、同径、同エネルギーをもつガウス光についても伝搬特性を解析した。大気揺らぎのない空間を伝搬したときの環状光、ガウス光の伝搬特性を Fig.2 に示す。環状光は平行光として出射した際にも、外形に依存した距離で中心光強度が大きくなり、非回折ビームとなる。非回折ビームの中心光強度は同径の矩形光のそれよりも大きく、かつ中心光ビーム幅は出射時よりも狭くなる。しかも中心光の位相分布は平坦に近く、広がりにくい性質を示している。それに比べガウス光では出射時こそ位相分布は一定であるが、伝搬するに従って位相分布は球面状となる。その度合いは環状光のそれよりも大きく、結果としてビームが広がる要因となることが分かる。Fig.2 で m は距離に比例した無次元パラメータで、 $m=L\lambda/R^2$ (L は伝搬距離、 λ は波長) で定義される。 $\lambda=1\mu\text{m}$ 、 $R=15\text{cm}$ で $m=0.5$ のとき、 $L=11.25\text{km}$ となる。

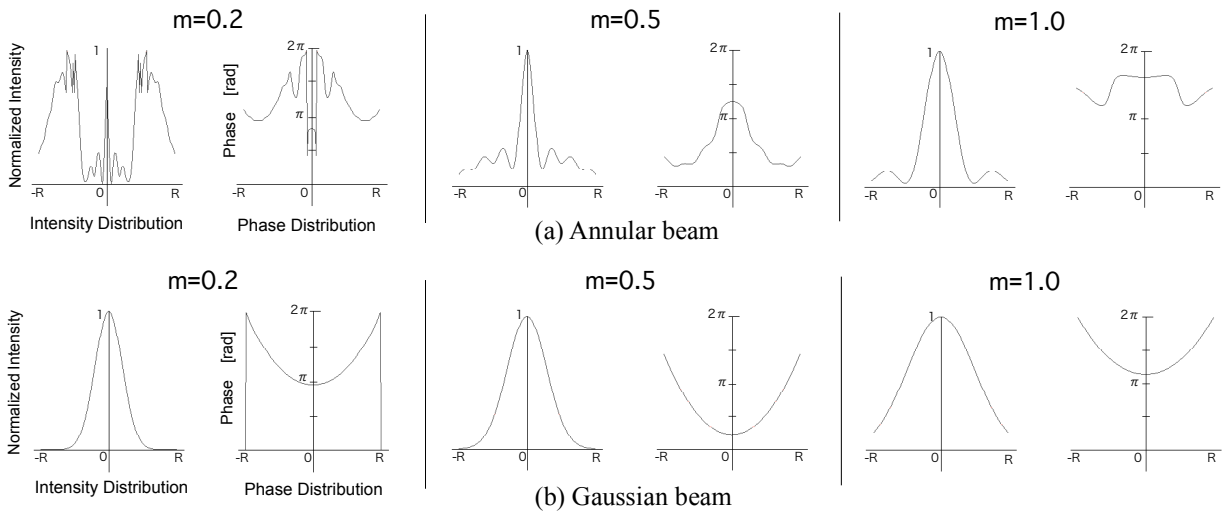


Fig. 2 Intensity and phase distributions of annular and Gaussian beam.

3. シミュレーション結果

構造定数 $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ (平均的な大気状況) で様々な空間的大きさをもつ大気揺らぎを与えた際の伝搬光の波形および中心光強度の変化を Fig.3 および Fig.4 に示す。光量の散逸、波形の崩れ方は大気揺らぎの空間的大きさに依存していることが分かる。これは空間的大きさの小さいセルは動きが速く、伝搬時の波形整形にも影響が大きいことを示す。一方で、非回折ビームとガウスビームとで大気揺らぎの影響に差が出るのは空間的大きさの大きいセルである。つまり動きの遅い大きなセルに対し、伝搬光中心で環状光とガウス光に違いが出ている。そのことがより顕著に表れているのが Fig.4 の中心光強度の大気揺らぎに対する変化を伝搬距離を横軸に表したものである。Fig.3 で示した $m=0.5$ と $m=1$ のところでガウス光では $R/2$ の大きさのセルと R の大きさのセルとによって揺らいだ中心光強度の大きさが入れ替わっている。これは近距離でより小さなセル、動きの速いセルへの影響を受けやすいことを示す。一方で伝搬に伴って非回折光となる環状光でも、 $m < 0.4$ の近距離ではより小さいセル (動

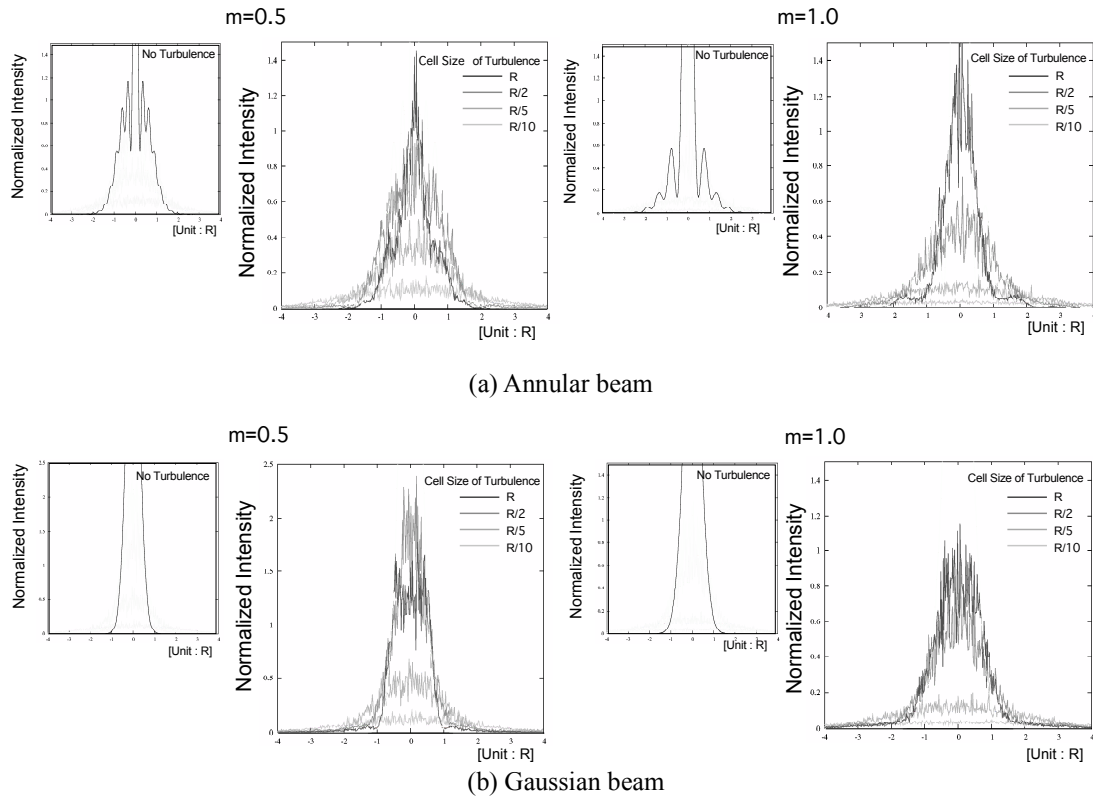


Fig. 3 influence of the atmospheric turbulence.

きの速いセル) への影響が大きくなっているが、環状光として出射した光は近距離では波形中心に光強度を持たず、結果として $m=0.5-1.0$ の領域で非回折光となった波形が大気揺らぎに対して崩れにくい、揺らぎにくい性質をもつ。ガウス光では中心光強度が近距離から大きいため、結果として大気揺らぎの影響が大きい。

Fig.5 に実験での結果を示す。出射光の直径は環状光、ガウス光共に $35\text{mm}\phi$ 、伝搬距離 100m である。実験では実大気揺らぎを観測した他、人工的に風を送り、伝搬光の揺らぎ方を調べた。ガウス光は平行光および集光させて実験を行った。開口径 $12\text{mm}\phi$ の受光器にて測定された伝搬光の揺らぎへの影響は非回折光の中心光の方が、平行もしくは集光時のいずれのガウス光の中心部と比べても揺らぎが少ないことを確認した[4]。また、非回折光サイドローブ(周辺光)の揺らぎはガウス光のそれと比べて同等の大きさを持つことも確認している。

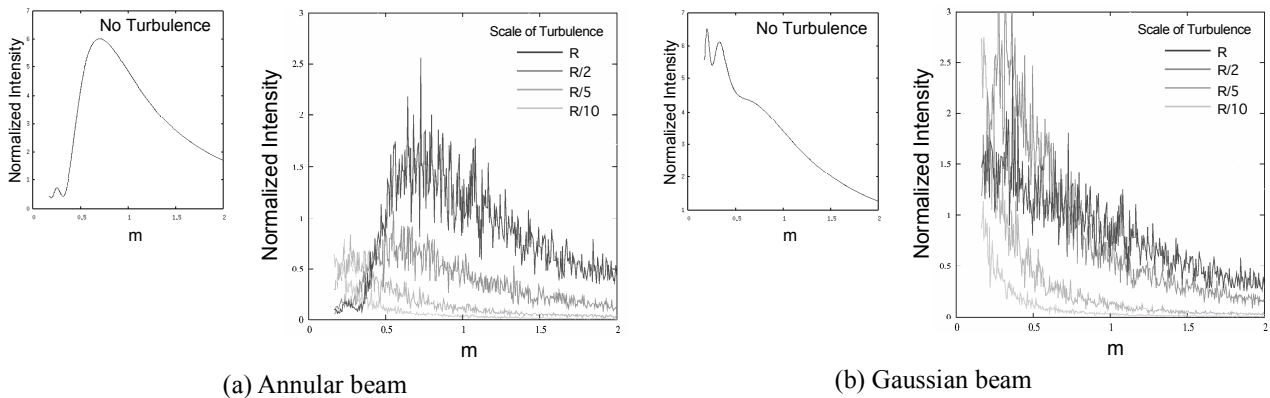


Fig. 4 Influence of the atmospheric turbulence on the center peak intensity of the propagated beam.

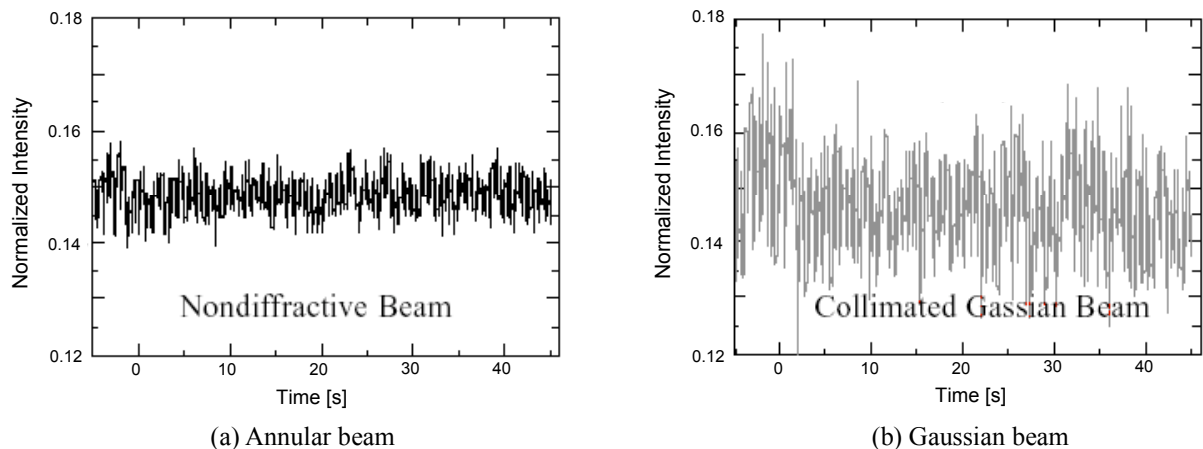


Fig. 5 Experiment of beam propagation in the turbulence. (Artificial wind)

4. まとめ

本研究では大気揺らぎに対する環状光の優位性を理論的に検証した。大気揺らぎの空間的大きさに依存した伝搬光の波形整形への影響を解析し、ガウス光との揺らぎ方の違いを評価した。解析で得られた結果は実大気下でのビーム伝搬実験の結果を良く説明するものであり、解析手法の適用性を確認できた。現在、雲や霧中でのビーム散乱過程の解析を進めており、本研究の結果を発展させた、ビーム伝搬特性の高効率化、長深度化を目指している。

参考文献

1. T. Aruga, S. W. Li, S. Yoshikado, M. Takabe, and R. Li, *Appl. Opt.*, Vol. 38, No. 15, pp.3152-3156, 1999
2. 吉田 啓, 相馬 邦彦, 椎名 達雄, 伊藤 昌文, 岡村 康行, レーザセンシングシンポジウム予稿集, pp.15-18, 2003
3. J. W. Strohbehn, *Progress in Optics IX*, pp.73-122, 1971
4. Tatsuo shiina, Kei Yoshida, Masafumi Ito, and Yasuyuki Okamura, 22th International Laser Radar Conference Proceedings, Volume I, pp.99-102, 2004