

大気擾乱中のレーザ光伝播シミュレータの開発 Development of simulator for laser beam propagation in atmospheric turbulence

今城 勝治、亀山 俊平、鈴木 二郎、玉川 恭久、平野 嘉仁
M. Imaki, S. Kameyama, J. Suzuki, Y. Tamagawa and Y. Hirano
三菱電機株式会社 情報技術総合研究所

Mitsubishi Electric Corporation, Information Technology R&D Center

A laser system designing tool, which simulates laser beam propagation in atmospheric turbulence, has been developed. In the simulation process, random phase masks corresponding to turbulence model are inserted into free space, and wave fronts at each plane are simulated using numerical simulation. Some examples of simulated results using this tool are also introduced.

1. はじめに

レーザレーダをはじめとしたレーザシステムでは、大気擾乱の影響により、伝搬する送信ビームの拡がりや受信波面の乱れが生じ、指向性や受信効率の低下といった性能劣化が生じる。我々は、システム設計においてこの性能劣化を予測し、かつ劣化を回避するためのシステム構成を検討するツールとして、大気擾乱中のレーザ光伝播シミュレータの開発を行っている。ここでは、このシミュレータの概要およびシミュレータを用いた計算結果例について紹介する。

2. シミュレータの概要

本シミュレータで用いるシミュレーションモデルを Fig.1 に示す。シミュレータは数値計算ベースであり、入出力波面、伝搬経路における波面、および位相マスクを、全てメッシュ状に細かく分割している。自由空間を伝搬方向に沿って等間隔に分割し、分割した1空間の揺らぎに相当する位相マスクを各自由空間の間に挿入する。伝搬シミュレーションでは、数値積分(回折積分)により自由空間を伝搬させた波面に対し、この位相マスクをさらに通過させることで、分割した空間長さあたりの揺らぎに相当する波面の乱れを模擬する。この演算を繰り返すことにより揺らぎ中の光伝搬をシミュレートする。

次に、位相マスクの生成方法について述べる。まず、位相マスクと同じサイズのメッシュ配列を生成し、使用する擾乱モデルに相当する屈折率パワースペクトルに対応する振幅値を各配列に割り当てる。次に、各配列にランダム位相を与えた後、この配列の2次元逆フーリエ変換により屈折率揺らぎの面内分布に相当する2次元配列を求める。この値と光波長、および自由空間1個あたりの距離とから、位相マスクを求める。位相マスクの計算例を Fig.2 に示す。

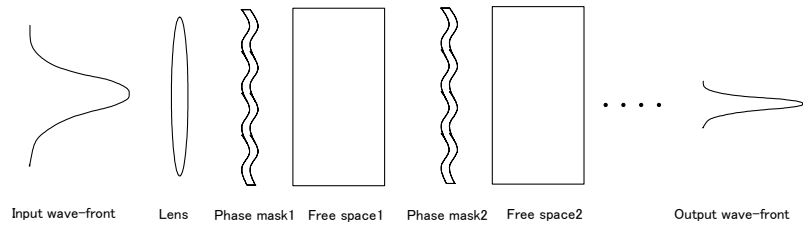


Fig. 1. Simulation model.

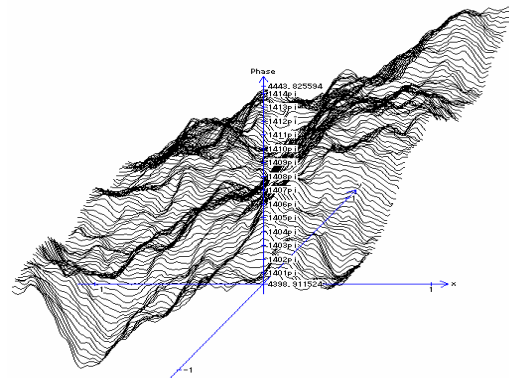


Fig. 2. Example of simulated phase mask.
($C_n^2: 1.7 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$, Free space length: 150m)

3. シミュレーション結果例

ここでは一例として、ガウシアンビームを大気擾乱中に伝搬させながら集光させた場合において、集光スポットでの強度パターンをシミュレートした。屈折率パワースペクトルには、次式で与えられる Von Karman スペクトルを用いた。

$$\Phi_n(\kappa) = \frac{0.033C_n^2}{(\kappa_d^2 + \kappa^2)^{11/6}} \exp\left(\frac{-\kappa^2}{\kappa_m^2}\right) \quad (1)$$

ここで、 Φ_n は大気屈折率揺らぎの空間パワースペクトル (m^3)、 C_n^2 は大気構造定数 ($m^{-2/3}$)、 κ は空間波数 (m^{-1}) である。また、 κ_d は空間波数の下限値 (m^{-1})、 κ_m は空間波数の上限値 (m^{-1}) であり、ここでは地表付近での一般値である $0.06m^{-1}$ および $300m^{-1}$ とした。シミュレーション結果を Fig.3 示す。波面領域 $1m \times 1m$ 、メッシュ数 1024×1024 とし大気構造定数を変化させた。大気構造定数 C_n^2 は、それぞれ(a) $1.7 \times 10^{-14} m^{-2/3}$ 、(b) $5.0 \times 10^{-14} m^{-2/3}$ 、(c) $10.0 \times 10^{-14} m^{-2/3}$ 、である。大気構造定数が大きくなると揺らぎの影響は大きくなり、集光スポットが広がっていくことが分かる。

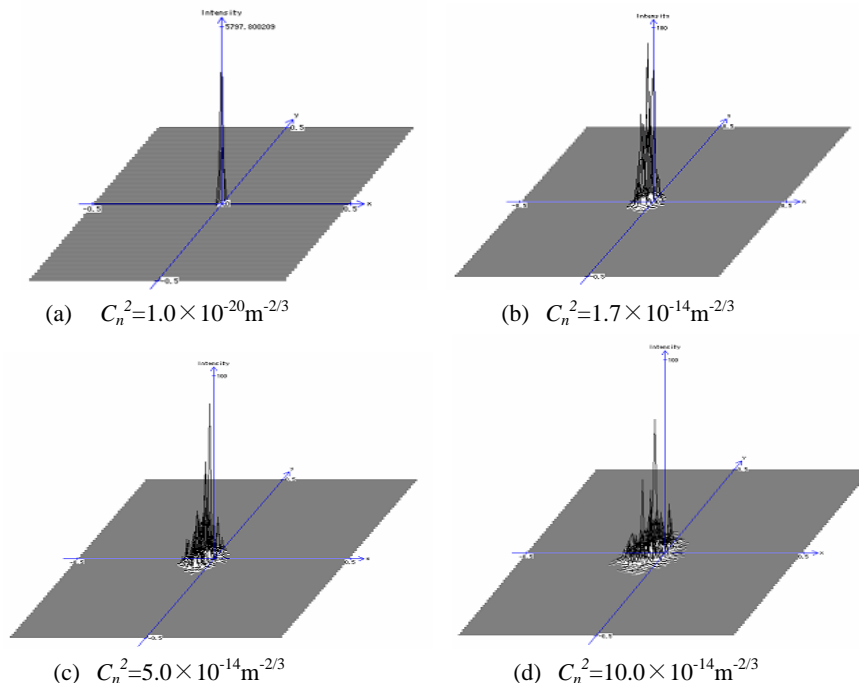


Fig. 3 Intensity pattern at focal plane.

次に、集光効果の程度を示す指標であるストレル比に関し、本シミュレータで求めた結果と文献[1]に示された式により求めた結果との比較を行った。また、シミュレーション結果から導出するストレル比は、回折限界スポットサイズと、ナイフエッジ法で求めた集光スポットサイズとの比から、 $SR=(w_0/w)^2$ より求めた。ここで、 w は集光スポットサイズ (m)、 w_0 は回折限界スポットサイズ (m) である。伝搬距離を L 、ビーム径を D とし、ビームが受ける擾乱の程度の指標として $D/(C_n^2 L)^{3/5}$ の値を横軸にとり変化させ、ストレル比を計算した。結果を Fig.4 に示す。図から、擾乱の程度が小さい領域では、解析式から求めた値と、本シミュレーションにより求めた値とはよく一致している。擾乱の程度が大きくなるにつれ、小さい擾乱のみを想定している解析値に対して顕著な差異が生じる結果が得られた。

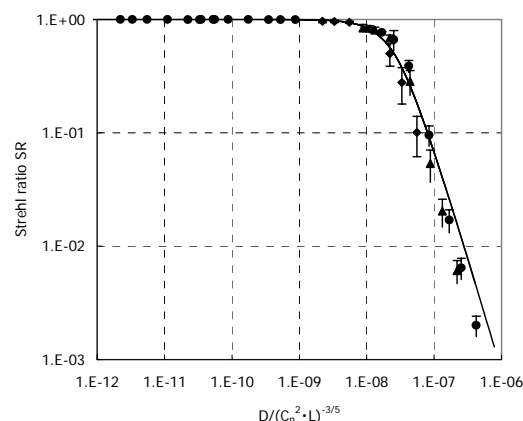


Fig. 4. Degree of turbulence versus Strehl intensity.

4. まとめ

大気擾乱中におけるレーザ光伝播シミュレータを開発した。その概要について述べるとともに、擾乱中に集光ビームを伝搬させた場合のシミュレーション結果について紹介した。このシミュレータは、レーザレーダをはじめとした、擾乱の影響を受ける各種レーザシステム的设计において有用であると考えられる。

参考文献

[1] G. A. Tyler, J. Opt. Soc. Am. A **1**, 251 (1984).