

# 地上衛星間アップリンクレーザービームの大気揺動の波長依存性

## Wave-length dependence of intensity fluctuation of laser beam transmitting through ground to satellite induced by atmospheric turbulence

豊田雅宏 情報通信研究機構

Masahiro Toyoda National institute of information and communication technology

**Abstract:** This paper reports wave-length dependence of beam wave intensity fluctuations of ground-to-satellite up-link caused by atmospheric turbulence. Beam wave fluctuations are estimated by numerical calculations carried out using the moment equation analysis by the thin phase screen approximation together with the conventional perturbation analysis. The value of the refractive index structure constant for the numerical calculation is set by using results of a past experiment. Scintillation index for up-link beam are calculated as a function of wave-length for the two case of the intensity of atmospheric turbulence using the Rytov method and the moment analysis.

**Key Words:** Turbulence, Beam, Scintillation

### 1. はじめに

人工衛星から地上へ向けてレーザービームを送ったときのダウンリンクの大気揺らぎによる影響は星像の揺らぎと同等と考えられるが、地上から衛星へのアップリンクについてはビーム形状や大気の状態により揺動の様子が大きく異なることが予想できる。このアップリンクの揺動については、これまでに、数多くの理論検討<sup>1-5)</sup>や、様々な構成における実験報告<sup>6-9)</sup>がなされ、その中で大気揺動の波長依存性については、波長の増加に連れて揺動の低下が想定されている。一方、衛星搭載のレーザー通信装置は、レーザーの高出力化に伴い実用段階に近づいており、現在、数ヶ国の機関において、波長 1.5  $\mu\text{m}$  のレーザーを用いたシステムの実験機の開発が進められている<sup>10)</sup>。この波長の装置が選択されたのは、光ファイバー通信において既開発の EDFA 技術の転用が最大の理由とされる。本論では、屈折率構造定数の大気モデルを設定し、摂動解析の適用できる範囲を超えた強い揺らぎの領域をも含めたアップリンクの強度分散の波長依存性を算出した。強い揺動を受けたビーム波の強度分散の解析には、波動の確率モーメント解に対して、揺らぎが生起する領域を薄い層に限定した近似を適用する。圏界面の高度を 10km に設定し、地上から衛星へのアップリンクの伝送において、対流圏を薄層とした近似を適用して波動モーメント解を導き、その解に対して数値計算を行った。波長を変化させたときのアップリンク光の強度分散を算出し大気揺動の波長依存性を求めた。

### 2. アップリンク強度分散の数値解析

図 1 のような構成にて地上装置から人工衛星へ向けてレーザービームを送る場合を考える<sup>9)</sup>。揺動したビームの規格化強度分散が 0.5 を超えるような強い波動揺動においては、厳密には摂動解析である Rytov 法は適用できない。このため、波動の確率モーメントを用いた解析に対し一様な薄い揺らぎ媒質の層を仮定した薄層近似を適用して解析を試みた

<sup>11, 12)</sup>。薄層近似による波動揺動のモーメント解析では、初めに、方物型の波動方程式を仮定し波動モーメントの満たす方程式を導く。薄層にて揺動が発生すると近似によりモーメントの表現式を単純化する。そして、モーメント(期待値)を求めるに当り、演算子を導入し、その演算子に対する特性関数を用いて、モーメント解を表す。このとき、直接の関数展開が不可なため、フーリエ積分による Green 関数の重ね合わせを用いる。さらに、デルタ関数の導入し、揺らぎのないときのモーメント解と、揺らぎによる影響を結合させる。以上によって得られた波動強度モーメントに対して数値積分計算を行い波動強度の平均と分散を求めた。ここでは、屈折率構造定数の二乗である  $C_n^2$  を対流圏内で一定とし、かつ、圏界面の高度を 10km とする図 1 の伝搬路のモデルを設定した。筆者も参加した 1996 年に行われたアップリンク伝送<sup>9)</sup>の結果から、大気揺らぎが強い場合として  $C_n^2$  を  $3 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 、および、弱い場合として  $1 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$  に設定した場合に、代表的な実験結果との整合を得ることができた。 $C_n^2$  の高度分布の一般的なモデルである H-V<sub>(57)</sub>と比較して図 2 に示す。ビーム伝搬の設定は実験時に合わせて波長  $\lambda$  が 0.5145  $\mu\text{m}$ 、伝搬長  $z$  が 2.8 万 km、ビーム半径 38.9 mm のコリメート出射、仰角 56°とした。このとき、伝搬の Fresnel 長  $(\lambda z/2\pi)^{0.5}$  は約 1.5 m となる。なお、揺動の解析においてインナースケール 3 mm、アウトースケール 10 m の Kolmogorov スペクトルを有する大気を仮定した。以上の設定にて  $C_n^2$  に対する規格化強度分散  $\sigma_I^2$  を Rytov 法とモーメント法を用いて算出し図 3 に示す<sup>12)</sup>。摂動解析である Rytov 法では  $\sigma_I^2$  が 0.5 程度までがその適用可能な弱い揺らぎの状態とされる<sup>13)</sup>。Rytov 法とモーメント法による計算結果が  $C_n^2$  の増加に伴い乖離するが、図 2 に示した二値の  $C_n^2$  に対してはモーメント法による算出にて飽和を迎える前にあたり、両解析手法の算出値に大きな差が出ないことが示された。さらに、二値の  $C_n^2$  の場合に、送信レーザーの波長を変えたときの  $\sigma_I^2$  を Rytov 法とモーメント法にて算出し、大気揺動の波

長依存性を求めた。波長が $0.5 \mu\text{m}$  から  $10 \mu\text{m}$  の場合の  $\sigma_I^2$  を図 4 に示す。Rytov 法と薄層近似下のモーメント解析による結果は、アップリンクレーザーの波長が可視帯から赤外帯へと伸びるにつれて分散値が漸減し、波長依存性の傾向は同様であると考えている。また、各  $C_n^2$  に対しモーメント法による計算結果が Rytov 法によるそれを上回る図 3 の傾向が、他の波長においても変わらないと言える。

### 3. おわりに

設定した屈折率構造定数の大気モデルに対して、地上から衛星へのアップリンクビームの強度分散の波長依存性を数値計算により求めた。摂動解析である Rytov 法とモーメント解析による結果において、両者とも波長の増加につれて分散値が漸減する傾向を示した。ここで述べたモーメント法を用いた強い揺らぎの領域におけるアップリンクビーム揺動の波長依存性の解析評価は、筆者の知るところ、これまでに行われていない。また、衛星搭載レーザー通信機の性能評価のために、地上からレーザービームを衛星に照射する場合において有用な解析結果と考えている。

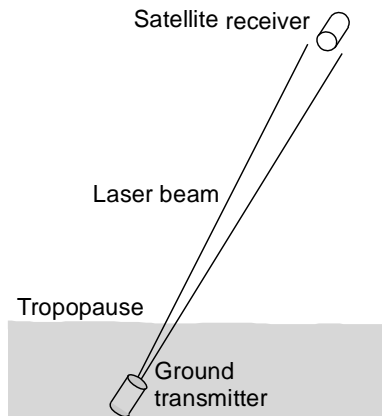


Fig. 1 A sketch of ground-to-satellite laser beam transmission.

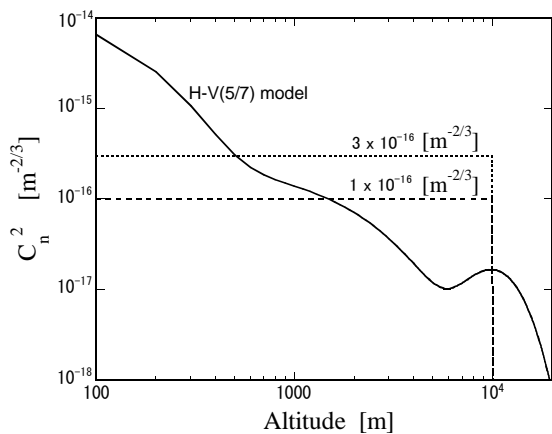


Fig. 2 Altitude dependence of  $C_n^2$  using calculation of atmospheric turbulence compared with H-V<sub>(5/7)</sub> model.

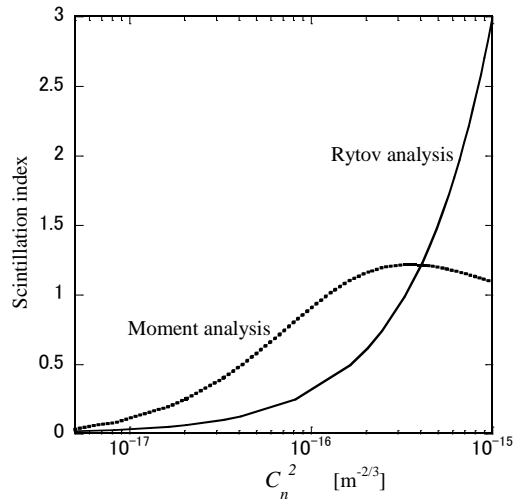


Fig. 3 Calculated scintillation index of the up-link which wave-length is  $0.5145 \mu\text{m}$  for thin-screen model of atmospheric turbulence as a function of  $C_n^2$  using the Rytov approximation analysis and the moment analysis.

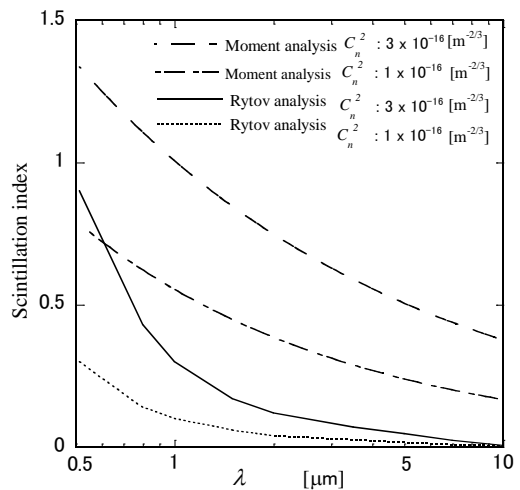


Fig. 4 Wave-length dependence of scintillation index of the up-link beam for the two value of  $C_n^2$  calculated using the Rytov analysis and the moment analysis.

### 参考文献

- 1) D. L. Fried: J. Opt. Soc. Am. 57 (1967) 980.
- 2) H. T. Yura and W. G. Mckinley: Appl. Opt. 22 (1983) 3353.
- 3) M. J. Beran and A. W. Whitman: Appl. Opt. 27 (1988) 2178.
- 4) J. D. Shelton: J. Opt. Soc. Am. A 12 (1995) 2172.
- 5) L. C. Andrews, R. L. Phillips and P. T. Yu: Appl. Opt. 33 (1995) 7742.
- 6) P. O. Minott: J. Opt. Soc. Am. 62 (1972) 885.
- 7) J. L. Bufton: Appl. Opt. 16 (1977) 2654.
- 8) P. A. Lightsey: Opt. Eng. 33 (1994) 2535.
- 9) M. Toyoda: Appl. Opt. 44 (2005) 7364.
- 10) 豊嶋守生: 光学 45 (2016) 67.
- 11) 豊田雅宏: レーザー研究 38 (2010) 225.
- 12) 豊田雅宏: レーザー研究 40 (2012) 137.
- 13) J. W. Goodman: *Statistical optics* (Wiley, New York, 1985).