

地上衛星間アップリンクレーザービームの大気伝搬による強度変動

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 beam wave intensity fluctuations of ground-to-satellite up-link caused by atmospheric turbulence. An intensity fluctuation in strong region seemed to be induced at a measurement of up-link beam in a past experiment. 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. Beam profile and scintillation index for up-link beam are calculated as a function of a parameter concerning intensity of atmospheric turbulence. Transmitting beam radius dependence of scintillation index is also presented.

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照射し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様と考えられるが、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異なることが予想される。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¹⁻⁵⁾や、様々な構成における実験報告⁶⁻⁹⁾がなされてきた。筆者も参加した1996年に行われたアップリンク伝送⁹⁾において、実験日によって様相の異なる強度変動が観測された。伝搬路上の大気環境により強度変動に差異が生じたと考えられるが、この状況をどのように説明するかが本論の主題である。当時取得したデータから屈折率構造定数の大気モデルを設定し、摂動解析に加えて、波動の確率モーメントを用いる方法に薄層近似を適用し大気揺動の算出評価を試みた。

2. 観測したアップリンク強度変動

図1のような構成で地上装置から人工衛星へ向けてレーザービームを伝送した⁹⁾。表1にレーザー射出と受光の主な仕様を記す。ビームウエストが射出端にあるコリメートした状態で伝送した。設定したビーム径に対する拡がり角は約 $5.7\mu\text{rad}$ となるが、別に行ったビーム拡がり角の測定では大気伝搬の影響のために全角で約 $23\mu\text{rad}$ との結果が得られている。長楕円の衛星軌道の状況から、衛星追尾時の地上装置から衛星への視線方向の変化は毎秒約 $20\mu\text{rad}$ であり、ビーム光軸と視線方向とのずれ(指向誤差角)が変動している状況であった。口径 7.5cm の衛星受光器はビームの放射パターンや光波のFresnel長と比較して十分に小さいため、ポイントレシーバとして受光開口での放射照度を均一と見做せる。受光

のサンプル間隔(2 msec)は一般的な大気揺動の時定数より短い。また、衛星搭載機器の捕捉追尾性能から姿勢変動の受光強度への影響はないと言える。搭載装置の制限から連続して取得できるデータは8秒程であったが、変動の様子を対比するために代表的な1秒間の結果を抽出し図2と図3に示す(1996年1/24と1/27)。図3については、中央付近に受光強度が大きい部分が見られ、これは衛星への指向方向のずれが連続的に推移したためにビームパターンの一部を走査したためと考えられる。一方、図2の結果ではスパイク状の変動が連続し、8秒間の全データを通して平均受光強度や分散値の変化は小さかった。両結果の約8秒間の受光データ4000サンプルの確率密度分布を図4に示す。各分布とも指数分布に沿っており、図2の結果の方が分布の減少が急峻で指数の係数がより小さい。両日の受光データの強度分散 $\sigma_{I,up}^2$ を平均強度 $I_{0,up}$ の二乗で除した規格化強度分散 $\sigma_{I,up}^2/I_{0,up}^2$ を表2に記す。また、口径 20cm の望遠鏡にてレーザー伝送とは別の時刻に測定した恒星観測時の星像の強度変動の分散 $\sigma_{I,star}^2/I_{0,star}^2$ を表2に追記した。

Table 1 Major specification of laser beam transmission.

Ground laser transmitter	
Wavelength	514.5 nm
Transmitting power	7.1 W
Beam radius	38.9 mm (1/e intensity)
Satellite optical receiver	
Telescope aperture diameter	75 mm
Optical detector	Si-APD
Data sampling interval	2 ms

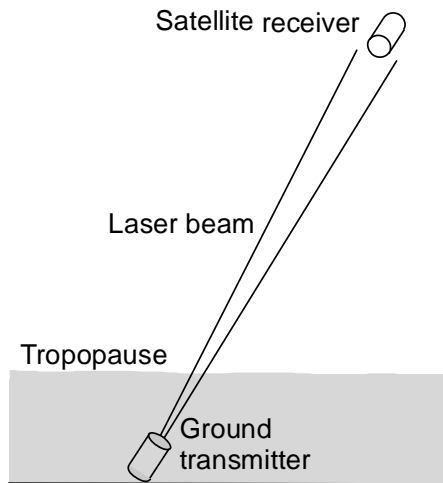


Fig. 1 A sketch of ground-to-satellite laser beam transmission.

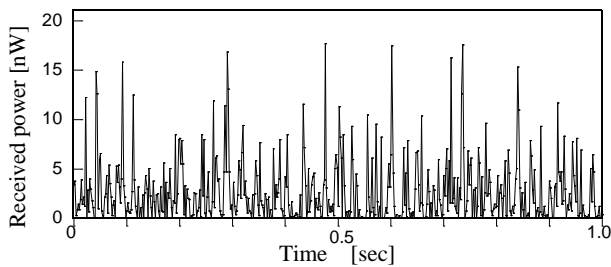


Fig. 2 Measured up-link intensity fluctuation on Jan. 24 1996, 21:17 (JST).

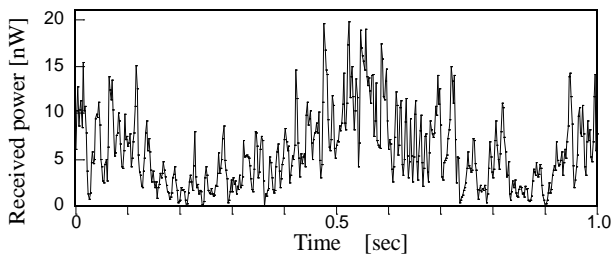


Fig. 3 Measured up-link intensity fluctuation on Jan. 27 1996, 21:25 (JST).

Table 2 Measured intensity variances of the up-link and stellar scintillation.

Date	Range[10 ⁶ m]	El.[deg.]	$\sigma_{I,up}^2/\bar{I}_{0,up}^2$	$\sigma_{I,star}^2/\bar{I}_{0,star}^2$
1996/Jan./24	25.9	55.0	1.97	0.17
1996/Jan./27	27.8	56.5	0.75	0.060

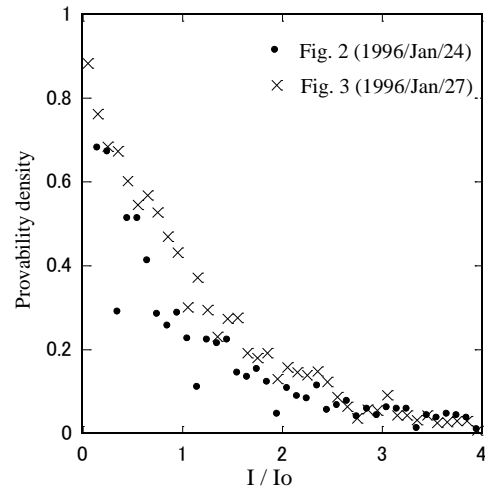


Fig. 4 Probability density function of the up-link intensity fluctuation shown on fig. 2 and fig. 3.

3. アップリンク揺動の解析

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揺らぎ媒質の層を仮定した薄層近似を適用してアップリンクビームの解析を試みた^{10, 11)}。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 とするモデルを設定した。圏界以後のアップリンク伝搬距離が非常に長いので、対流圏を揺らぎが均一な薄層と見做した。図 3 の中央の受光強度の大きい 0.2 秒間(100 サンプル)の規格化強度分散は約 0.2 であり、対流圏の C_n^2 を $1 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ としたときに Rytov 法により算出したビーム中央の分散値と凡そ合致する。また、恒星観測時の強度分散値は両日で約 3 倍の差があり、恒星からの光の大気伝搬路の C_n^2 の平均値も 3 倍程の差をもつと考えられる。これらから各日の C_n^2 を $3 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 、および、 $1 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ に設定し、その高度分布を代表的なモデルである H-V₍₅₇₎と比較して図 5 に示す。ビーム伝搬の設定は実験時に合わせて波長 λ 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、アウタースケール 10 m の Kolmogorov スペクトルを有する大気を仮定した。

図 6 に横軸 ρ を衛星付近の受光面上でのビーム光軸からの距離として、ビームの平均強度を示す。図 5 に示した二値の C_n^2 の場合と、自由空間に対してビームパターンを算出した¹¹⁾。 C_n^2 の増加に伴いビ

ームの広がりやビーム光軸付近での強度低下を示している。これにより、図 2 のケースではビームの広がりのためアップリンク指向方向のずれによるビームパターンの包絡線が図 3 のようには見られないことの説明がつく。なお、強い揺らぎの場合においても、波動振幅の二次モーメントである平均強度は Rytov 法を含めて揺動の解析手法に依らず同様の結果が得られる¹²⁾。

均一と見立てた対流圏内の C_n^2 に対する規格化強度分散を図 7 に示す¹¹⁾。Rytov 法とモーメント法を用いて算出した。摂動解析である Rytov 法では強度分散の飽和を表現できず、 σ_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¹²⁾。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 5 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差がないことが示された。強度分散のビーム幅依存性を Rytov 法にて算出し図 8 に示す。大気のコヒーレンス径と呼ばれる Fried パラメータと同程度のビーム径のときに分散が極小となり文献 5 の Fig.4 との類似を確認した。

衛星近傍の受光面における波動強度の共分散を算出すると、揺らぎが生じる対流圏からの伝搬距離が長いことためビーム光軸からの距離が Fresnel 長のときに相関が約 0.1 となった。このことから、図 2 に示した変動は、衛星の航行によりビーム指向方向が変化するために、平均サイズが Fresnel 長程度で、かつ、時間的な明滅を伴うスペックルパターンを飛び々に受光したことにより、大きな分散値を示すスパイク状の変動が現れたと考えられる。一方、図 3 の中で平均強度の大きい部分は弱い揺らぎの範疇にあり、ビーム指向方向のずれにより、ビームパターンの一部を走査したことにより包絡線状に受光強度が変化しただと考える。

4. おわりに

図 2 と図 3 に示した強度変動は、弱い揺らぎ、および、強い揺らぎと大気揺動が異なる状況の中で、ビーム指向方向の変化により、どちらも解析による分散値を上回る結果となり、確率密度は指数分布を示した。その中で、衛星仰角や大気状況に依っては、アップリンクに強い揺らぎが生じた場合においても、大気揺動を Rytov 法による摂動解析にて評価できることが示された。ここで述べたモーメント法を用いたアップリンクビームの強い揺らぎに関する解析評価は、筆者の知るところ、これまでにされていない。

また、今回の解析評価により、ビームウエスト径の適切な設定によってアップリンクの分散を抑えることができることが再認識された。

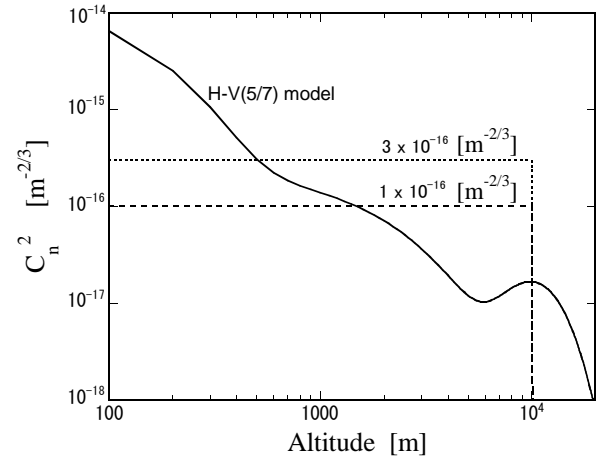


Fig. 5 Altitude dependence of C_n^2 using calculation of atmospheric turbulence compared with H-V_(5/7) model.

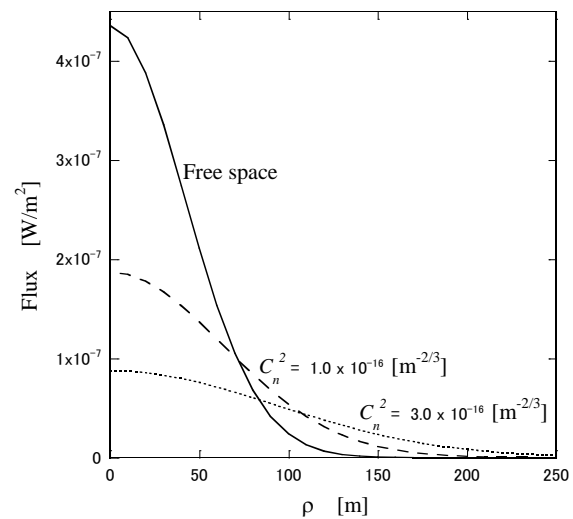


Fig. 6 Calculated optical flux nearly the satellite as a function of range from the beam axis for the two value of C_n^2 and for free-space.

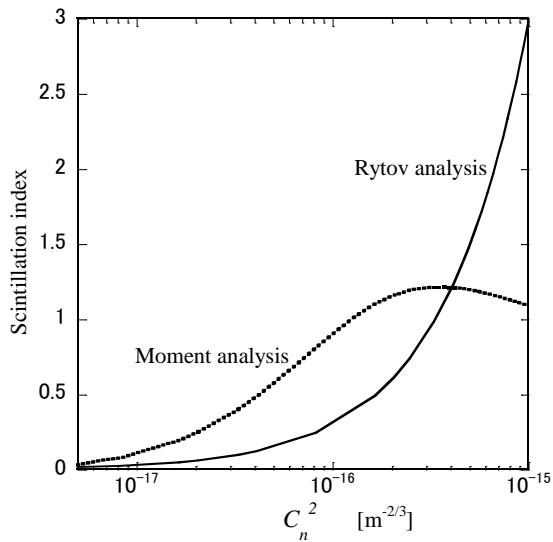


Fig. 7 Calculated scintillation index of the up-link for thin-screen model of atmospheric turbulence as a function of C_n^2 using the Rytov approximation analysis and the moment analysis.

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) 豊田雅宏: レーザー研究 38 (2010) 225.
- 11) 豊田雅宏: レーザー研究 40 (2012) 137.
- 12) J. W. Goodman: *Statistical optics* (Wiley, New York, 1985).

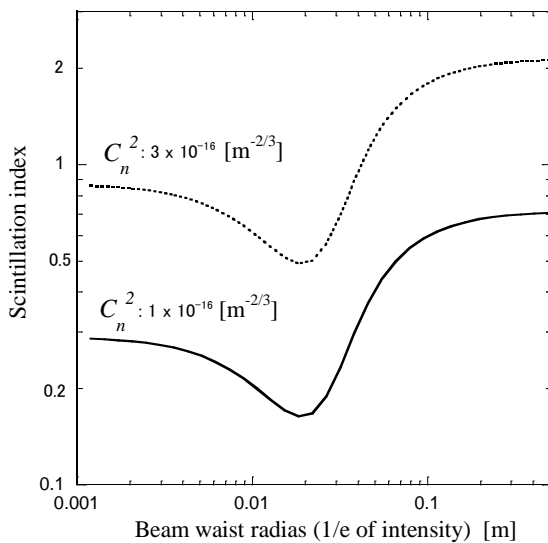


Fig. 8 Beam waist radius dependence of scintillation index of the up-link beam for the two value of C_n^2 calculated using the Rytov approximation analysis.