

大气湍流尺度对角反射器回波闪烁指数的影响

韦宏艳¹ 程玲¹ 蔡冬梅¹ 马琳² 韩国霞³ 张洪建¹

(¹ 太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024; ² 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071)
³ 中国石油大学理学院物理与光电工程系, 山东 青岛 266580

摘要 卫星上的角反射器在空间探测、跟踪目标时不可避免要受到大气湍流的影响, 湍流效应会使光强产生明显的起伏, 即光强闪烁, 严重影响探测信号的质量。为了探索大气湍流的内外尺度对闪烁效应的影响, 基于随高度变化的 ITU-R 大气折射率结构常数模型, 应用受内、外尺度影响的湍流折射率起伏功率谱, 对激光从发射机到角反射器和从角反射器到接收机双斜程路径回波的闪烁指数进行了研究, 推导了反射器回波闪烁指数与非涅耳率的变化关系。数值计算结果表明: 在弱湍流区, 湍流内尺度对回波闪烁指数的影响大于外尺度; 在强湍流区时, 随着外尺度的增大, 回波的闪烁指数也在增加, 且大于内尺度对闪烁指数的影响。

关键词 大气光学; 闪烁指数; 反射器回波; 非涅耳率

中图分类号 TN21 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.s113002

Influences of the Atmospheric Turbulent Scales on the Scintillation Index of Reflector Echo

Wei Hongyan¹ Cheng Ling¹ Cai Dongmei¹ Ma Lin² Han Guoxia³ Zhang Hongjian¹

¹ College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China
² School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China
³ Department of Physics and Optoelectronic Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China

Abstract Corner reflectors on satellites are inevitably subjected to the influence of atmospheric turbulences in space explorations and tracking targets. Turbulence effects produce significant intensity fluctuations, seriously affecting the quality of the detected signal. In order to study the influences of atmospheric turbulent inner and outer scales on the scintillation index, researches about the corner reflector echo scintillation index from the transmitter to the reflector and from the reflector to the transmitter are carried on based on the ITU-R atmospheric structure constant model which is dependent on the altitude, while considering the influences of inner and outer scales. Numerical calculation results indicate that in the weak turbulence zone, inner scale turbulence scintillation indexes of the echo effects are greater than the outer scale; in the strong turbulence zone, with the outer scale increases, the echo scintillation index also increases, and it is larger than the inner scale.

Key words atmospheric optics; scintillation index; reflector echo; Fresnel rate

OCIS codes 010.1290; 030.7060; 010.1330

1 引言

角反射器是一种具有定向反射特性的光学元件, 普遍应用于卫星上作为跟踪、测距中的合作目标, 以提高返回光束的强度, 增加作用距离并提高探测成功率。在探测过程中激光信号在大气中传播时由于受到大气湍流的影响, 会产生光强闪烁、光束漂移、到

达角起伏和波前畸变等效应^[1], 其中光强闪烁(光强起伏)会导致接收到的功率发生损耗, 降低系统的信噪比, 甚至使接收到的信号值低于预测值^[2]。另外, 反射器目标对入射光束会产生散射作用。这两者联合效应直接影响光信号的传播, 造成激光光束质量下降, 因此为了保证系统性能的稳定性和可靠性, 有必

收稿日期: 2013-10-20; 收到修改稿日期: 2013-11-08

基金项目: 山西省自然科学基金(2013011006-3, 2013011006-4)

作者简介: 韦宏艳(1979-), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事大气湍流中激光光束传输及应用等方面的研究。

E-mail: why_1221@126.com

要对角反射器回波的闪烁效应进行研究。

众多学者对光强闪烁特性进行了广泛的研究^[3-5],但大多是关于闪烁指数随 Rytov 方差的变化关系^[2-3,6],关于斜程路径大气湍流内外尺度对反射器回波的光强闪烁效应的影响方面的研究较少。

本文应用考虑内、外尺度的湍流折射率起伏功率谱函数研究双斜程路径反射回波的闪烁指数,并进行了数值计算。结果表明:在弱湍流区,湍流内尺度对回波闪烁指数的影响要大于外尺度;在强湍流区时,随着外尺度的增大,回波的闪烁指数也在增加,且大于内尺度对闪烁指数的影响。将表征角反射器尺寸的非涅耳率 Ω_R 对回波闪烁指数影响的数值计算结果与 Rytov 方差对闪烁指数的影响作比较,结果表明:在这两种表示湍流强度的方法中,内、外尺度对闪烁指数影响的趋势是一致的。

2 高斯波束参数

在双斜程路径传输过程中,可以通过高斯波束参数更清晰地描述传输光波的特性。在发射机处的无量纲曲率参数可表示为^[7]

$$\theta_0 = 1 - \frac{L}{F_0}, \quad \Lambda_0 = \frac{2L}{kW_0^2}, \quad (1)$$

式中 L 为传输距离, W_0 为发射机处波束的有效半径, F_0 为相前曲率半径, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长。当光束经过大气湍流传输后入射到目标时,入射光波的曲率参数表示为

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{\theta_0}{\theta_0^2 + \Lambda_0^2} = 1 + \frac{L}{F_1}, \\ \bar{\theta}_1 &= 1 - \theta_1, \\ \Lambda_1 &= \frac{\Lambda_0}{\theta_0^2 + \Lambda_0^2} = \frac{2L}{kW_1^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 W_1 为入射光波的半径, F_1 为入射波的曲率半径。当光波经目标反射后再次通过大气湍流返回到接收机处时,在接收机处的曲率参数和非涅耳率的关系为

$$\begin{aligned} \theta_2 &= \frac{2 - \theta_1}{(2 - \theta_1)^2 + (\Lambda_1 + \Omega_R)^2} = 1 + \frac{L}{F}, \\ \bar{\theta}_2 &= 1 - \theta_2, \\ \Lambda_2 &= \frac{\Lambda_1 + \Omega_R}{(2 - \theta_1)^2 + (\Lambda_1 + \Omega_R)^2} = \frac{2L}{kW^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 W 为接收机处光波的半径, F 为接收机处光波的曲率半径, Ω_R 是表征角反射器有限尺寸大小的非涅耳率。

3 考虑内、外尺度时,菲涅耳率对闪烁指数的影响

3.1 功率谱密度

光波在大气信道中传输时的闪烁指数主要依赖于湍流折射率起伏功率谱。同时考虑内、外尺度对闪烁指数的影响,因此根据文献[2]可知湍流折射率起伏功率谱表示为

$$\phi_n(\kappa) = 0.033C_n^2(\xi H)\kappa^{-11/3}f(\kappa l_0)g(\kappa L_0), \quad (4)$$

式中 ξ 为简化积分引入的积分变量, H 为目标距离地面的高度, κ 为空间波数, l_0 为湍流内尺度, L_0 为湍流外尺度, C_n^2 为随高度变化的大气折射率结构常数,其表式形式由文献[8]给出, $f(\kappa l_0)$ 为描述内尺度修正模型的因子, $f(\kappa l_0)$ 不同的表现形式对应不同的湍流折射率起伏功率谱模型, $g(\kappa L_0)$ 为描述外尺度模型的因子。为了便于计算及保证结果的合理性,内、外尺度因子可表示为^[2]

$$\begin{aligned} f(\kappa l_0) &= \exp\left(-\frac{\kappa^2}{\kappa_1^2}\right)\left[1 + 1.802\frac{\kappa}{\kappa_1} - 0.254\left(\frac{\kappa}{\kappa_1}\right)^{\frac{7}{6}}\right], \\ g(\kappa L_0) &= 1 - \exp\left(-\frac{\kappa^2}{\kappa_0^2}\right), \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\kappa_1 = 3.3/l_0$, 表示内尺度波数, $\kappa_0 = 8\pi/L_0$, 表示外尺度波数。

3.2 反射器回波的强度起伏

闪烁现象即为激光在大气中传输时,由于温度变化引起折射率起伏,最终导致信号光强发生起伏的现象。一般用光强起伏的归一化方差 σ_I^2 (即闪烁指数)来表征强度闪烁的强弱程度^[9],表示为

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle}{\langle I \rangle^2}, \quad (6)$$

式中 I 表示光照强度, $\langle \cdot \rangle$ 表示集平均。一束准直高斯波束从发射机发出,经过大气湍流传输入射到角反射器目标上发生散射,回波又沿相同路径回到接收机(假设湍流无变化)。接收机接收到的轴向回波闪烁指数为^[7]

$$\sigma_I^2(0, 2L) = \sigma_{I,b}^2(0, L) + \sigma_{I,s}^2(0, L) + 2C_I^r(0, L), \quad (7)$$

式中 $\sigma_{I,b}^2(0, L)$ 为入射高斯波束的轴向辐照强度方差, $\sigma_{I,s}^2(0, L)$ 为经角反射器散射的散射波强度方差, $2C_I^r(0, L)$ 为入射波和反射波的辐照强度相关函数,在轴向上该项为零,与目标特性无关。

(7)式中入射高斯波束的轴向辐照强度方差可表示为

$$\sigma_{i,b}^2(0, L) = 8\pi^2 k^2 L \int_0^{\infty} \kappa \phi_n(\kappa) \exp\left(-\frac{\Lambda_2 L \kappa^2 \xi^2}{k}\right) \left\{1 - \cos\left[\frac{L \kappa^2}{k} \xi(1 - \bar{\theta}_2 \xi)\right]\right\} d\kappa d\xi. \quad (8)$$

考虑内、外尺度对闪烁指数的影响时, 闪烁指数依赖于(4)式给出的湍流折射率起伏功率谱, 将该谱代入(8)式, 积分整理得

$$\begin{aligned} \sigma_{i,b}^2(0, L) = 1.06\sigma_0^2(L) \int_0^1 \frac{C_n^2(\xi H)}{C_{n0}^2} \times \\ \left\{ \Gamma\left(-\frac{5}{6}\right) \left[a_1^{5/6} - (a_1^2 + b_1^2)^{5/12} \cos\left(\frac{5}{6} \arctan \frac{b_1}{a_1}\right) + c_1^{5/6} - (c_1^2 + b_1^2)^{5/12} \cos\left(\frac{5}{6} \arctan \frac{b_1}{c_1}\right) \right] + \right. \\ \left. \frac{1.802}{Q_1^{1/2}} \Gamma\left(-\frac{1}{3}\right) \left[a_1^{1/3} - (a_1^2 + b_1^2)^{1/6} \cos\left(\frac{1}{3} \arctan \frac{b_1}{a_1}\right) + c_1^{1/3} - (c_1^2 + b_1^2)^{1/6} \cos\left(\frac{1}{3} \arctan \frac{b_1}{c_1}\right) \right] - \right. \\ \left. \frac{0.254}{Q_1^{7/12}} \Gamma\left(-\frac{1}{4}\right) \left[a_1^{1/4} - (a_1^2 + b_1^2)^{1/8} \cos\left(\frac{1}{4} \arctan \frac{b_1}{a_1}\right) + c_1^{1/4} - (c_1^2 + b_1^2)^{1/8} \cos\left(\frac{1}{4} \arctan \frac{b_1}{c_1}\right) \right] \right\} d\xi, \quad (9) \end{aligned}$$

式中 C_{n0}^2 为近似地面大气结构常数, $a_1 = 1/Q_1 + \Lambda_2 \xi^2$, $b_1 = \xi(1 - \bar{\theta}_2 \xi)$, $c_1 = 1/Q_1 + 1/Q_0 + \Lambda_2 \xi^2$, $\sigma_0^2(L) = 1.23 C_{n0}^2 k^{7/6} L^{11/6}$ 为均匀湍流介质中传输时平面波 Rytov 方差, $\Gamma(a)$ 是伽马函数, 无量纲内尺度参数 $Q_1 = L \kappa_1^2/k$, 外尺度参数 $Q_0 = L \kappa_0^2/k$.

(7) 式中散射波的强度方差可表示为

$$\begin{aligned} \sigma_{i,s}^2(0, L) = 8\pi^2 k^2 L \int_0^{\infty} \kappa \phi_n(\kappa) \exp\left\{-\frac{L \kappa^2}{k} [(1 - \bar{\theta}_1 \xi)(\Lambda_2 - \Lambda_2 \xi + \Lambda \xi) + \Lambda_1 \xi(\theta_2 + \bar{\theta}_2 \xi + \theta \xi)]\right\} \times \\ \left\langle 1 - \cos\left\{\frac{L \kappa^2}{k} [(1 - \bar{\theta}_1 \xi)(\theta_2 + \bar{\theta}_2 \xi + \theta \xi) - \Lambda_1 \xi(\Lambda_2 - \Lambda_2 \xi + \Lambda \xi)]\right\} \right\rangle d\kappa d\xi. \quad (10) \end{aligned}$$

应用与(9)式相同的推导方法, 对(10)式积分整理得

$$\begin{aligned} \sigma_{i,b}^2(0, L) = 1.06\sigma_0^2(L) \int_0^1 \frac{C_n^2(\xi H)}{C_{n0}^2} \times \\ \left\{ \Gamma\left(-\frac{5}{6}\right) \left[a_2^{5/6} - (a_2^2 + b_2^2)^{5/12} \cos\left(\frac{5}{6} \arctan \frac{b_2}{a_2}\right) + c_2^{5/6} - (c_2^2 + b_2^2)^{5/12} \cos\left(\frac{5}{6} \arctan \frac{b_2}{c_2}\right) \right] + \right. \\ \left. \frac{1.802}{Q_1^{1/2}} \Gamma\left(-\frac{1}{3}\right) \left[a_2^{1/3} - (a_2^2 + b_2^2)^{1/6} \cos\left(\frac{1}{3} \arctan \frac{b_2}{a_2}\right) + c_2^{1/3} - (c_2^2 + b_2^2)^{1/6} \cos\left(\frac{1}{3} \arctan \frac{b_2}{c_2}\right) \right] - \right. \\ \left. \frac{0.254}{Q_1^{7/12}} \Gamma\left(-\frac{1}{4}\right) \left[a_2^{1/4} - (a_2^2 + b_2^2)^{1/8} \cos\left(\frac{1}{4} \arctan \frac{b_2}{a_2}\right) + c_2^{1/4} - (c_2^2 + b_2^2)^{1/8} \cos\left(\frac{1}{4} \arctan \frac{b_2}{c_2}\right) \right] \right\} d\xi, \quad (11) \end{aligned}$$

式中

$$\begin{aligned} a_2 &= 1/Q_1 + (1 - \bar{\theta}_1 \xi)(\Lambda_2 - \Lambda_2 \xi + \Lambda \xi) + \Lambda_1 \xi(\theta_2 + \bar{\theta}_2 \xi + \theta \xi), \\ b_2 &= (1 - \bar{\theta}_1 \xi)(\theta_2 + \bar{\theta}_2 \xi + \theta \xi) - \Lambda_1 \xi(\Lambda_2 - \Lambda_2 \xi + \Lambda \xi), \\ c_2 &= 1/Q_1 + 1/Q_0 + (1 - \bar{\theta}_1 \xi)(\Lambda_2 - \Lambda_2 \xi + \Lambda \xi) + \Lambda_1 \xi(\theta_2 + \bar{\theta}_2 \xi + \theta \xi). \end{aligned}$$

由于入射波和反射波的辐照强度相关函数为零, 所以对(9)式和(11)式求和, 即可得光轴上高斯波束入射到角反射器后回波的闪烁指数 $\sigma_i^2(0, 2L)$ 。可以看出, 闪烁指数主要受到内尺度、外尺度和大气折射率结构常数共同调制作用的影响。

4 数值计算结果分析

在双斜程路径传输过程中, 本文根据(9)式和(11)式计算得到反射器回波闪烁指数与非涅耳率 Ω_R 的变化关系, 并将此结果与文献[4]的结果作对比, 结

果吻合较好。其中入射波长为 $10.6 \mu\text{m}$, 传输距离为 2000 m , 目标高度为 1000 m , 近地面大气折射率结构常数为 $C_{n0}^2 = 1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。

图 1 为高斯波束沿双斜程路径传输时, 回波闪烁指数受内、外尺度影响随菲涅耳率 Ω_R 的变化关系。从图中可以看到, 在弱湍流区 ($\Omega_R \gg 1$), 湍流内尺度对回波闪烁指数的影响要大于外尺度; 在强湍流区时, 外尺度对回波的闪烁指数有明显的影 响, 随着外尺度的增大, 回波的闪烁指数也在增加, 且大于内尺度对闪烁指数的影响。

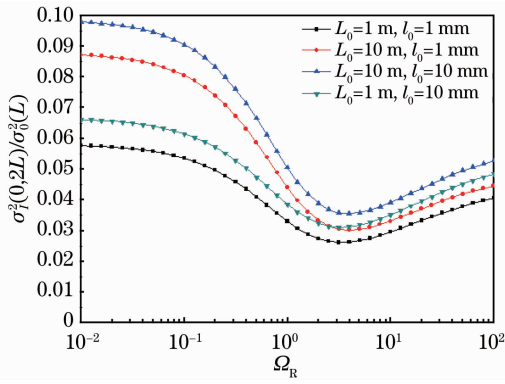


图 1 考虑内、外尺度效应时闪烁指数与 Rytov 方差之比随菲涅耳率的变化

Fig.1 Ratio of scintillation index and Rytov variance versus Fresnel rate when the turbulent inner and outer scales are considered

图 2 给出了只考虑内尺度影响时,回波闪烁指数随菲涅耳率的变化关系。从图中可以看出,随着菲涅耳率的增大,闪烁指数先减小后增大。比较图 1 和图 2,在其他条件相同的情况下,外尺度对闪烁指数的影响是不可忽略的。研究结果与闪烁指数随平面波 Rytov 方差的变化趋势^[6]是一致的。

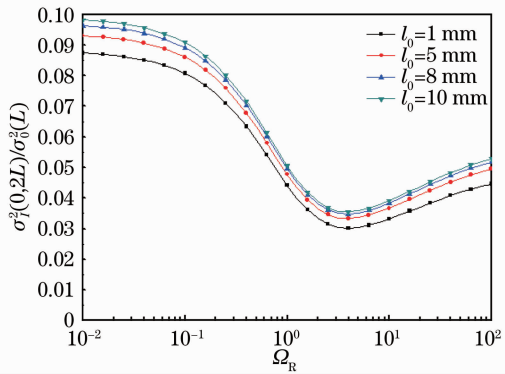


图 2 只考虑内尺度效应时闪烁指数与 Rytov 方差之比随菲涅耳率的变化

Fig.2 Ratio of scintillation index and Rytov variance versus Fresnel rate when only the turbulent inner scale is considered

5 结 论

根据光波传输理论对双斜程路径高斯波束入射角反射器回波的轴向闪烁指数进行了理论推导,得

到了考虑湍流内外尺度的目标回波闪烁指数理论模型。根据随高度变化的大气折射率结构常数模型,数值分析了回波闪烁指数随菲涅耳率的变化关系,讨论了内外尺度对闪烁指数的影响。仿真结果表明,在弱湍流区,湍流内尺度对角反射器回波闪烁指数的影响大于外尺度对闪烁指数的影响,而在强湍流区,闪烁指数受外尺度的影响更显著一些。该研究对于地-空路径的激光通信、激光雷达成像、遥感及探测等系统的实际应用具有重要的理论价值。

参 考 文 献

- Xu Jianwu, Wang Hongxing, Sun Xiaoming, *et al.*. Method of establishing channel model in multiple-beam transmission and reception FSO systems[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0305009.
- 徐建武, 王红星, 孙晓明, 等. 一种多光束发射和接收 FSO 系统的信道建模方法[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0305009.
- Andrews L C, Al-Habash M A, Hopen C Y, *et al.*. Theory of optical scintillation: Gaussian-beam wave model [J]. Wave Random Complex, 2001, 11(3): 271-291.
- Yi Xiuxiong, Guo Lixin, Wu Zhensen. Study on the optical scintillation for Gaussian beam propagation in the slant path through the atmospheric turbulence [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(4): 433-438.
- 易修雄, 郭立新, 吴振森. 高斯波束在湍流大气斜程传输中的闪烁问题研究[J]. 光学学报, 2005, 25(4): 433-438.
- Li Fei, Wu Yi, Hou Zaihong. Data processing of scintillation index measurement in real atmosphere[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(6): 1349-1352.
- 李 菲, 吴 毅, 侯再红. 实际大气中闪烁指数测量的数据结果 [J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1349-1352.
- L C Andrews, R L Phillips, C Y Hopen. Scintillation model for a satellite communication link at large zenith angles[J]. Opt Eng, 2000, 39(12): 3272-3280.
- Wu Zhensen, Wei Hongyan, Guo Lixin, *et al.*. Summary of scintillation for laser beam propagation on the slant path through the turbulent atmosphere[J]. J Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(5): 321-330.
- 吴振森, 韦宏艳, 郭立新, 等. 关于斜程湍流大气中激光波束闪烁指数研究的综述[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(5): 321-330.
- L C Andrews, R L Phillips. Laser Beam Propagation Through Random Media[M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1998.
- ITU-R. Document 3J/31-E. On Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Space-to-Earth and Earth-to-Space Optical Communication Systems [R]. Budapest: Radio Communication Study Group Meeting, 2001.
- Yu Jiping, Qi Wenzong, Guo Chunfeng, *et al.*. Numerical simulation of laser propagation through atmospheric turbulence [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(6): 523-527.
- 于继平, 齐文宗, 郭春风, 等. 激光大气传输特性的数值模拟 [J]. 激光与红外, 2008, 38(6): 523-527.