

斜程大气湍流中成像系统分辨率的影响因素研究

张洪建, 韦宏艳, 贾锐, 程玲

(太原理工大学 物理与光电工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 大气湍流是影响光学成像系统分辨率不可避免的因素之一。为了研究大气湍流内外尺度、湍流轮廓线及探测高度对光学成像系统分辨率的影响, 根据光学成像系统积分分辨率理论及修正 Von Karman 湍流谱, 推导了斜程传输路径下考虑湍流内、外尺度的光学成像系统的分辨率积分公式。数值计算中应用 ITU-R 公布的随高度变化的大气折射率结构常数模型, 结果表明: 湍流内尺度对光学成像系统分辨率的影响要远小于湍流外尺度对分辨率的影响, 而湍流内尺度又限制着外尺度对光学成像系统分辨率的影响; 斜程传输时, 湍流轮廓线的影响大于外尺度对积分分辨率的影响; 光学成像系统分辨率在近地面受近地面大气结构常数的影响大, 而当高度大于 5 000 m 时, 光学成像系统分辨率受风速的影响大。

关键词: 大气光学; 光学成像系统; 积分分辨率; 湍流内、外尺度; 修正 Von Karman 谱
中图分类号: P427.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1569-05

Effects factors of imaging system resolution in slant atmospheric turbulence

Zhang Hongjian, Wei Hongyan, Jia Rui, Cheng Ling

(Department of Physis and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Atmospheric turbulence is one of the inevitable influence factor of resolution of optical imaging system. In order to research the effect of inner scale, outer scale, turbulent contour lines and height on resolution of optical imaging system, the optical resolution of optical imaging system considering inner and outer scale of slant atmospheric turbulence was derived, according to the optical imaging system integral resolution theory and modified Von Karman turbulence spectrum. ITU-R atmospheric turbulence structure constant model changing with height was used in numerical calculation. The results show that the effect of inner scale of turbulence on optical resolution is much less than that of outer scale of turbulence; the changes of inner scale will limit the effect of outer scale of turbulence on optical resolution; in slant transmission, turbulent contour lines has more influence than the effect of outer scale of turbulence; atmospheric structure constant near the ground will affect the optical resolution of optical imaging system mainly in the low height; the wind speed will be the major influence factor when the

收稿日期: 2014-09-11; 修订日期: 2014-10-20

基金项目: 山西省自然科学基金(2013011006-3)

作者简介: 张洪建(1988-), 男, 硕士生, 主要从事大气湍流对成像系统成像质量影响方面的研究。Email: hj_zhang18@163.com

导师简介: 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方面的研究。Email: why_1221@126.com

height beyond 5 000 m.

Key words: atmospheric optics; optical imaging system; integral resolution; turbulence inner, outer scale; modified Von Karman spectrum

0 引言

光学成像系统的性能通常由所成像的信噪比、分辨率、相干性和对比度等参数来描述。其中,分辨率是评价成像系统性能高低的主要参量。分辨率一般会受到光学收发系统、大气湍流以及目标散射的影响。为了得到高分辨率的图像,前人对其影响因素和提高方法进行了一定的研究^[1-3]。而当光学成像系统工作在大气环境下时,影响其分辨率的主要因素不再是系统光学质量和目标散射,很大程度上受大气湍流的限制^[4]。D.L.Fried 对长曝光和短曝光大气湍流下的光学分辨率问题作了深入的研究^[5]。随着人们对湍流谱模型研究的深入,大气湍流内、外尺度作为影响光束传播和光学成像的重要因素受到人们的重视。程玲等人研究了内尺度对斜程大气湍流中激光回波的闪烁指数的影响^[6]。V.V.Voitsekhovich 等人研究了外尺度对自适应光学系统的影响^[7]。S.S.Chesnokov 等人研究了湍流外尺度对光学积分分辨率的影响^[8]。J.K.Thomas 推导了大气湍流下的合成孔径激光雷达成像分辨率公式^[9]。这些研究表明:在研究成像分辨率问题时,大气湍流的限制作用是不能忽视的。

另外,在实际应用中,成像系统探测光束的传输路径是斜路径的。因此,文中根据长曝光条件下的光学成像系统积分分辨率理论和 ITU-R 大气折射率结构常数模型,利用修正 Von Karman 谱推导了斜程大气湍流中光学成像系统积分分辨率公式。数值分析了湍流尺度、湍流轮廓线、探测高度和近地面大气结构常数及风速的变化对光学成像系统积分分辨率的影响。

1 光学系统的成像分辨率

大气湍流中光学系统的成像分辨率可以用下式

$$\int_0^{\infty} \kappa^{2\mu} \frac{\kappa^{2n+1} \exp(-\kappa^2/\kappa_m^2)}{(\kappa_0^2 + \kappa^2)^{11/6}} d\kappa = \frac{1}{2} \kappa_0^{2\mu-8/3} \Gamma\left(\mu + \frac{1}{2}\right) U\left(\mu + \frac{1}{2}; \mu - \frac{1}{3}; \frac{\kappa_0^2}{\kappa_m^2}\right) U(a; c; z) \cdot \begin{cases} \frac{\Gamma(1-c)}{\Gamma(1+a-c)} + \frac{\Gamma(c-1)}{\Gamma(a)} z^{1-c}, |z| < 1 \\ z^{-a}, \operatorname{Re}(z) > 1 \end{cases} \quad (7)$$

表示^[8]:

$$R = 2\pi \int_0^{\infty} \langle \tau(\Omega) \rangle \Omega d\Omega \quad (1)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 为求系综平均; $\tau(\Omega)$ 为光学传递函数; Ω 为角频率。

当波长为 λ 的光波在大气中传输时,光学系统的长期曝光平均光学传递函数近似为^[8]:

$$\langle \tau(\Omega) \rangle_{\text{LE}} = \tau_0(\Omega) \exp\left\{-\frac{1}{2} D(\lambda\Omega)\right\} \quad (2)$$

式中: $\tau_0(\Omega)$ 为成像系统薄透镜的光学传递函数:

$$\tau_0(\Omega) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right) - \frac{\Omega}{\Omega_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^2} \right] & (\Omega \leq \Omega_0) \\ 0 & (\Omega > \Omega_0) \end{cases} \quad (3)$$

截止角频率 $\Omega_0 = D_0/\lambda$, D_0 是光学系统入瞳直径, $D(\rho)$ 是波结构函数,可以近似表示为^[10]:

$$D(\rho) = 8\pi^2 k^2 z \int_0^{\infty} [1 - J_0(\kappa\rho)] \Phi_n(\kappa) \kappa d\kappa \quad (4)$$

式中: J_0 为零阶贝塞尔函数; $\Phi_n(\kappa)$ 为湍流谱模型。

文中要考虑大气湍流的内、外尺度对光学成像系统积分分辨率的影响,文中用修正 Von Karman 谱模型,表示为^[10]:

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033 C_n^2 \frac{\exp(-\kappa^2/\kappa_m^2)}{(\kappa^2 + \kappa_0^2)^{11/6}} \quad (5)$$

式中: $\kappa_m = 5.92/l_0$; $\kappa_0 = 2\pi/L_0$, L_0 和 l_0 分别为湍流外尺度和内尺度。

把公式(5)代入公式(4)并对零阶贝塞尔函数展开得到:

$$D(\rho) = 2.61 C_n^2 k^2 z \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1} \rho^{2n}}{2^{2n} (n!)^2} \times \int_0^{\infty} \frac{\kappa^{2n+1} \exp(-\kappa^2/\kappa_m^2)}{(\kappa^2 + \kappa_0^2)^{11/6}} d\kappa \quad (6)$$

利用积分公式和近似关系^[11]得:

及近似^[11]

$${}_1F_1\left(-\frac{5}{6}; 1; -x\right) - 1 \cong \frac{5x}{6}(1+0.232x)^{-1/6}, x \geq 0 \quad (8)$$

可以得到:

$$D(\rho) = 3.280 C_n^2 k^2 z l_0^{-1/3} \rho^2 \times \left[\frac{1}{(1+2.03\rho^2/l_0^2)^{1/6}} - 0.715(\kappa_0 l_0)^{1/3} \right] \quad (9)$$

至此,已经求得了修正 Von Karman 谱的波结构函数。

把公式(2)、(3)、(9)代入到公式(1)并令 $u = \Omega/\Omega_0$, 得到光学成像系统的积分分辨率:

$$R = 4\Omega_1^2 \int_0^1 [\arccos(u) - u\sqrt{1-u^2}] \exp\{-3.89D_0^{1/3} l_0^{-1/3} \cdot u^2 \left(\frac{D_0}{r_0}\right)^{5/3} \left[\frac{1}{(1+2.03\rho^2/l_0^2)^{1/6}} - 0.715(\kappa_0 l_0)^{1/3} \right]\} u du \quad (10)$$

当观察地面目标时,大气湍流层靠近目标远离观测系统,可以把光波看作球面波,此时的大气相干长度 r_0 为^[14]:

$$r_0 = \left[0.423k^2 \int_0^H C_n^2(h) \left(\frac{h}{H}\right)^{5/3} dh \right]^{-3/5} \quad (11)$$

式中: $k=2\pi/\lambda$; H 为观测系统距目标的高度; $C_n^2(h)$ 为大气折射率结构常数。文中采用 ITU-R(国际电信联盟)在 2001 年提出的随高度变化的大气结构常数模型^[12]:

$$C_n^2(h) = 8.148 \times 10^{-56} v_{RMS}^2 h^{10} e^{-h/1000} + 2.7 \times 10^{-56} e^{-h/1500} + C_0 e^{-h/100} \quad (12)$$

式中: h 为地面以上的高度; C_0 为地平面附近的大气结构常数(其典型值为 $1.7 \times 10^{-14} m^{-2/3}$); $v_{RMS} = (v_g^2 + 30.69 \times v_g + 348.91)^{1/2}$ 是垂直路径均方根风速, v_g 是近地面风速。

2 数值结果和分析

传统理论认为在斜程传输时,大气湍流外尺度 L_0 在几十米到几千米的十分大的范围内。然而实验研究表明:就整层大气而言, L_0 的值域范围仅在米的量级范围内,例如, Coulman 等人^[13]采用球载探空仪和星光闪烁技术测得 L_0 的最小值可达到 0.3~0.4 m。而内尺度 l_0 约为毫米到厘米量级,目前公认的湍流内尺度范围为 $0.0025 \leq l_0 \leq 0.012$ m, 参考文献^[14]指出清晨湍流内尺度可达到 0.03 m。因此,文中的数值计算中,内尺度 l_0 的取值为 0.0025~0.03 m, 外尺度 L_0 的取值为 1.4~7 m。

为比较光学成像系统积分分辨率的影响因素,文中选取在 Kolmogorov 湍流谱模型下,接收孔径 D_0 趋向于无穷时,得到分辨率最大值: $R_{max} = \pi(r_0/\lambda)^2/4$ 作为归一化因子,将求得的光学系统积分分辨率归一化处理。另外,因为 C_n^2 依赖高度变化,所以计算中需要考虑大气相干长度 r_0 随高度变化而变化,而不是一个定值。计算结果如图 1~图 4 所示。

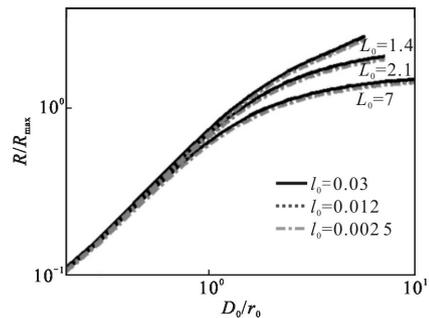


图 1 光学成像系统积分分辨率随湍流内、外尺度的变化关系
Fig.1 Resolution of optical imaging system along with the change of inner and outer scale

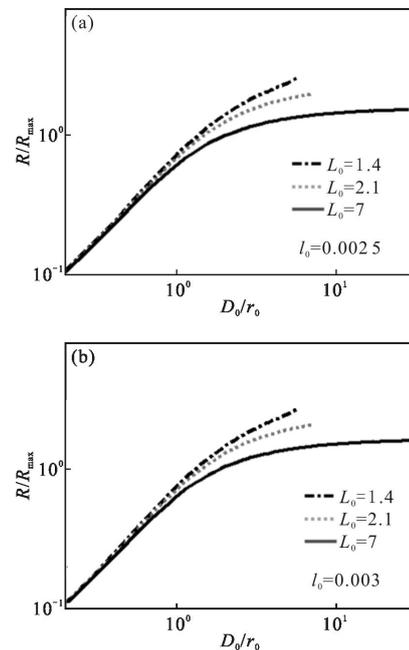


图 2 内尺度对外尺度变化的积分分辨率的影响

Fig.2 Inner scale effect on resolution along with the change of outer scale

图 1 为光学成像系统分辨率随湍流内、外尺度的变化关系。图中内尺度分别为 $l_0=0.03$ m、 0.0025 m、 0.012 m, 外尺度分别为 $L_0=1.4$ m、 2.1 m、 7 m。从图中可以看出,内尺度不同、外尺度相同的三条曲线基

本上是重合在一起的,而内尺度相同、外尺度变化的曲线明显不同。可以得到结论:外尺度对光学成像系统积分分辨率的影响要大于内尺度对光学成像系统积分分辨率的影响。

图2为内尺度对外尺度变化的光学成像系统积分分辨率的影响。外尺度不同的情况下,改变内尺度得到了(a)、(b)两幅不同的光学成像系统的分辨率变化关系。其中,(a)、(b)两幅图中的内尺度分别为 $l_0=0.0025\text{ m}$ 、 0.03 m 。可以看出内尺度变化时,曲线有所变化,并且内尺度越大,这种变化越明显。也就是说内尺度的改变会影响到光学成像系统积分分辨率,而且内尺度越大,其对光学成像系统的积分分辨率的影响越明显。这是因为大气湍流可以看作不均匀的散射体,外尺度越大,其包含的小散射体越多,内尺度越大,湍流所包含的小散射体的体积越大,这就导致其对光束的影响越明显。

图3比较了不同湍流轮廓线和不同外尺度对积分分辨率的影响。图3(a)为分辨率随不同湍流轮廓线

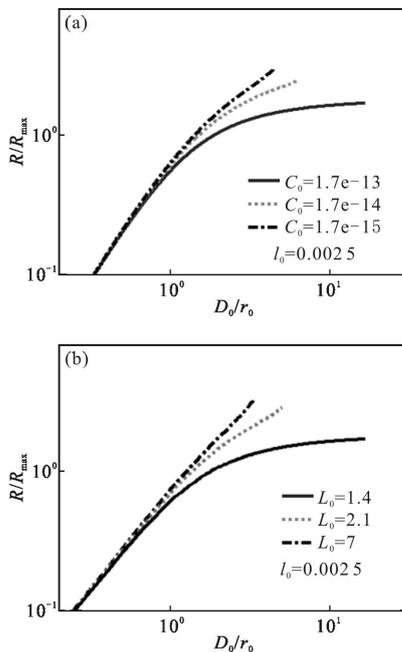


图3 不同湍流轮廓线和外尺度的积分分辨率比较

Fig.3 Integral resolution of different turbulent contour lines and out scales

的变化关系。可以看出:近地面大气结构常数越大,其对积分分辨率的影响越大。图3(b)为在同一湍流轮廓线下不同外尺度的积分分辨率关系。可以看出:外尺度越大,其对积分分辨率的影响越大。

比较这两幅图可以发现:在其他条件相同的情况下,湍流轮廓线对积分分辨率的影响要大于外尺度对积分分辨率的影响。

从图4中可以看出:当高度小于5000 m时,近地面大气结构常数对光学成像系统积分分辨率的影响非常明显,而高度大于5000 m,风速成为影响光学成像系统积分分辨率的主要因素。以 $C_0=1.7\times 10^{-13}$ 为基准,通过计算,高度在1000 m时, C_0 降低一个数量级,分辨率约改变59.7%, C_0 降低三个数量级,分辨率约改变76.9%;高度在3000 m时, C_0 降低一个数量级,分辨率约改变43.2%, C_0 降低三个数量级,分辨率约改变48.9%。以 $V_{\text{RMS}}=30\text{ m/s}$ 为基准,通过计算,高度在7000 m时, V_{RMS} 降低9 m/s,分辨率约改变17.1%, V_{RMS} 降低20 m/s,分辨率约改变29.9%;高度在9000 m时, V_{RMS} 降低9 m/s,分辨率约改变33.2%, V_{RMS} 降低20 m/s,分辨率约改变59.5%。所以,当在近地面探测目标时,应该将近地面大气结构常数作为主要影响因素,而当探测高度大于5000 m时,应该主要考虑风速对光学成像系统分辨率的影响。

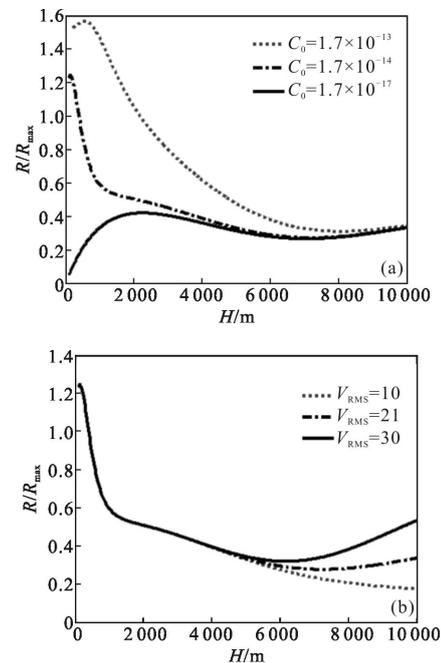


图4 光学成像系统积分分辨率随高度的变化关系

Fig.4 Resolution of optical imaging system along with the change of height

3 结论

文中推导了修正 Von Karman 湍流谱模型下光

学成像系统的积分分辨率,数值分析了斜程传输条件下大气湍流内外尺度、湍流轮廓线和探测高度对积分分辨率的影响。结果表明:湍流外尺度对积分分辨率的影响要远大于湍流内尺度对积分分辨率的影响,而湍流内尺度对积分分辨率的外尺度影响因素有调制作用;斜程传输时,湍流轮廓线的影响要大于外尺度对积分分辨率的影响;最后分析了大气结构常数对光学系统成像分辨率的影响,计算结果表明:在近地面探测时,近地面大气结构常数为主要影响因素,而在高度大于5000m时,风速则是主要影响因素。

参考文献:

- [1] Geng Wenbao, Zhai Linpei, Ding Yalin. Analysis of influence of vibration on transfer function in optics imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(2): 314–320. (in Chinese)
耿文豹, 翟林培, 丁亚林. 振动对光学成像系统传递函数影响的分析[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2): 314–320.
- [2] Zhu Rihong, Li Jianxin. A digital correction method of nonlinear distortion for optically imaging system[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2004, 28(4): 414–416. (in Chinese)
朱日宏, 李建欣. 光学成像系统中非线性畸变的数字校正方法[J]. *南京理工大学学报*, 2004, 28(4): 414–416.
- [3] Yang Zhongliang, Li Junsheng, Yang Weijun. High-resolution wide-area imaging of natural targets with lucky imaging technique [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1821–1825. (in Chinese)
杨忠良, 李均盛, 杨卫军. 应用幸运成像技术的宽视场自然目标高分辨率成像 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1821–1825.
- [4] Fried D L. Limiting resolution looking down through the atmosphere[J]. *J Op Soc Am*, 1966, 56(10): 1380–1384.
- [5] Fried D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures[J]. *J Opt Soc Am*, 1966, 56(10): 1372–1379.
- [6] Cheng Ling, Wei Hongyan, Zhang Hongjian, et al. Scintillation Index of Echo Wave in Slant Atmosphere Turbulence [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(9): 2262–2266. (in Chinese)
程玲, 韦宏艳, 张洪建, 等. 斜程大气湍流中激光回波的闪烁指数[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(9): 2262–2266.
- [7] Voitsekovich V V, Cuevas S. Adaptive optics and the outer scale of turbulence[J]. *J Opt Soc Am*, 1995, 12(11): 2523–2531.
- [8] Chesnokov S S, Skipetrov S E. Optical resolution through atmospheric turbulence with finite outer scale [J]. *Optics Communications*, 1997, 141: 113–117.
- [9] Karr Thomas J. Resolution of synthetic-aperture imaging through turbulence [J]. *J Opt Soc Am*, 2003, 20(6): 1067–1083.
- [10] Andrews Larry C, Phillips Ronald L. *Laser Beam Propagation Through Random Media*[M]. US: SPIE Press, 2005.
- [11] Andrews L C. *Special Functions of Mathematics for Engineers* [M]. US: SPIE Optical Engineering Press, 1998.
- [12] Wu Zhensen, Luo Zhimin, Guo Lixin, et al. Study on the scintillation of optical wave propagation in the slant path through the atmospheric turbulence [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2002, 17(3): 254–257. (in Chinese)
吴振森, 骆志敏, 郭立新, 等. 湍流大气中光波闪烁的斜程问题研究[J]. *电波科学学报*, 2002, 17(3): 254–257.
- [13] Coulman C E, Vernin J, Coqueugniot Y, et al. Outer scale of turbulence appropriate to modeling refractive-index structure profiles[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(1): 155–160.
- [14] Anna Consortini, Cochetti F. Inner-scale effect on irradiance variance measured for weak-to-strong atmospheric scintillation[J]. *J Opt Soc Am*, 1993, 10(11): 2354–2362.