

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.05.003

转动拉曼激光雷达用于大气折射修正的研究

刘玉丽^{1*}, 王钰茹¹, 谢晨波²

(1 陆军步兵学院基础部理化教研室, 江西 南昌 330103;

2 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院大气光学重点实验室,
安徽 合肥 230031)

摘要: 为了分析大气折射导致的定位误差, 采用转动拉曼激光雷达测量的回波信号反演了大气折射指数廓线, 根据目标定位误差理论获得不同高度处目标物的仰角定位修正值和距离定位修正值。研究表明: 相同高度处目标物的仰角定位修正值和距离定位修正值随视仰角的增大而减小。当视仰角为 10° 时, 位于10 km高度处目标物的仰角定位修正值为 $4.49'$, 距离定位修正值为10.37 m; 当视仰角为 40° 时, 相同高度处目标物的仰角定位修正值为 $1.19'$, 距离定位修正值为2.80 m。该结果对目标定位误差的修正有一定的参考价值。

关键词: 激光雷达; 大气折射; 仰角修正; 距离修正

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)05-426-008

Investigation of atmospheric refractive modification based on rotational Raman lidar

LIU Yuli^{1*}, WANG Yuru¹, XIE Chenbo²

(1 Department of Physics and Chemistry, The Army Infantry Academy, Nanchang 330103, China;

2 Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to analyze the location error caused by atmospheric refraction, the vertical profiles of atmospheric refractive index are deduced based on the rotation Raman lidar return signals, and then, the elevation angle error and range error at different altitude are corrected according to the error correcting theory for target positioning. The results indicate that the target elevation angle error and range error decrease as the visual angle increases at the same altitude. When the visual angle is 10° , the elevation angle error of the target at 10 km reaches $4.49'$ and the range error is 10.37 m. When the visual angle increases to 40° , the elevation angle error of the target at the same altitude is only $1.19'$ and the range error is only 2.80 m. These analysis results have a certain reference value for the correction of target positioning error.

Key words: lidar; atmospheric refractivity; elevation angle correction; range correction

基金项目: 陆军步兵学院自主立项课题

作者简介: 刘玉丽(1979-), 女, 山东青州人, 硕士, 讲师, 主要从事物理学教学与激光雷达系统研究工作。E-mail: 13956989561@139.com

收稿日期: 2022-07-20; 修改日期: 2022-08-19

*通信作者。

0 引言

对流层是靠近地球表面的一层大气, 包含的空气质量约占大气总质量的 75%, 空气密度大, 折射率梯度大, 对流现象比较明显, 空气的动态变化容易导致大气的非线性分布和各向异性, 从而引起大气折射率的随机起伏^[1]。激光在这种大气中传输时, 其轨迹不再是一条直线而是一条曲线, 从而影响系统 (如激光定位系统、激光测距系统等) 的探测精度^[2]。为了提高系统的测量精度, 通常情况下需要对系统测量误差进行修正。对目标的定位主要涉及角度、距离、高度、速度等信息^[3]。2008 年, 李双刚等^[4]利用大气温度和压强随海拔高度分布的特点, 建立了大气折射率廓线, 分别计算了波长为 0.55、1.06、10.6 μm 的激光对目标进行斜程探测时的距离修正值和仰角修正值。2009 年, 王敏等^[2]用波长为 532 nm 的激光雷达测量的折射率对目标定位的总偏折角和高度进行了修正。本文利用 355 nm 转动拉曼激光雷达测得的大气折射率计算了不同视仰角下目标物的仰角和距离修正值。同时, 将此修正值与大气折射指数伽马模型修正值进行了对比。

1 原理

1.1 目标定位误差修正理论

由于大气折射率在水平方向上的变化比竖直方向上少 1~3 个数量级, 可以认为大气折射率在水平方向是不变的, 只随着高度发生变化, 即大气层是球面分层结构。设 R_e 为地球半径, 与地球同心的任一薄层大气内折射率都相同, 层与层之间会发生折射^[2,4]。激光定位系统与目标之间的光路图如图 1 所示, 其中 A 点为激光发射点, B 点为目标点, 目标的视仰角为 θ_0 , 目标的真实视仰角为 β , 仰角定位修正值 $\alpha = \theta_0 - \beta$, 过 A 点的入射线和 B 点的折射线的延长线之间的夹角称为总偏折角, 用 τ 表示, A 、 B 之间的真实距离为 L_0 , 光实际所经路径的长度为 L , 距离定位修正值 $\Delta L = L - L_0$ ^[5,6]。

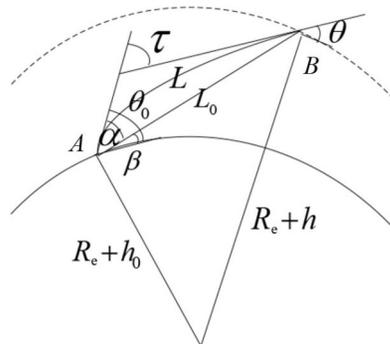


图 1 激光定位系统与目标之间的光路图

Fig. 1 Optical path diagram between laser orientation system and target

由 Snell 定律可得

$$(R_e + h_0)n_0 \cos \theta_0 = (R_e + h)n \cos \theta, \tag{1}$$

式中 h_0 、 n_0 、 θ_0 分别为 A 点的高度、折射率、视仰角, h 、 n 、 θ 分别为 B 点的高度、折射率、视仰角。由式 (1) 可求出 B 点的视仰角 θ 。利用图 1 的几何关系, 可得到仰角定位修正值 α ^[7], 其计算公式为

$$\alpha = \arctan \frac{\frac{\cos(\theta+\tau)}{\cos\theta} - \frac{n}{n_0}}{\frac{n}{n_0} \tan\theta_0 - \frac{\sin(\theta+\tau)}{\cos\theta}}. \quad (2)$$

如果起始仰角较大, 即 $\theta_0 \geq 5^\circ$, 偏折角 $\tau^{[7]}$ 近似为

$$\tau = N_0 \cot\theta_0 - N \cot\theta, \quad (3)$$

式中 N_0 和 N 分别为发射点 A 和目标点 B 处的大气折射指数。大气折射指数和折射率的关系为: $N = 10^6(n-1)$ 。由于大气折射率与真空折射率的值非常接近, 因此在气象探空中, 常用折射指数来描述大气的特性。

根据图 1 的几何关系, 当 $\theta_0 \geq 10^\circ$ 时, 距离定位修正值^[7,8]近似为

$$\Delta L = 10^{-6} \csc\theta_0 \int_{h_0}^h N dh. \quad (4)$$

要计算光电探测设备对空中目标的仰角定位修正值和距离定位修正值, 关键要知道大气折射指数随高度的分布。

1.2 大气折射指数的测量原理

在对流层内, 利用转动拉曼激光雷达可实现大气温度的高精度探测。其原理是大气中 N_2 和 O_2 分子的低量子数回波信号的强度比是温度的函数, 由此可以反演出大气温度^[9-11], 计算公式为

$$T(h) = \frac{A}{\ln \frac{N_L}{N_H} - B}, \quad (5)$$

式中 N_H 、 N_L 分别表示高、低量子数回波信号, A 、 B 为定标常数。

在对流层内, 大气压强^[4]可表示为

$$P(h) = P_0 \left(1 + \frac{\beta h}{T_0} \right)^{-\frac{\mu g}{R\beta}}, \quad (6)$$

式中 P_0 是标准大气压强, β 是温度梯度的平均值, 在本实验中测得 0 到 10 km 高度内温度梯度的平均值 $\beta = -6.427$ K/km, h 是高度, T_0 为地面大气温度, μ 是大气平均摩尔质量, g 是重力加速度, R 是气体普适常数。式 (6) 在 10 km 高度以内压强相对误差小于 0.2%。

任意气象条件下的大气折射指数^[12]可表示为

$$N(\lambda) = 2.8438 \times 10^{-3} N_0(\lambda) \frac{P}{T} - 0.1127 \frac{e}{T}, \quad (7)$$

式中 $N_0(\lambda)$ 为标准大气条件下的折射指数, 即 $N_0(\lambda) = 272.5794 + 1.5832\lambda^{-2} + 0.015\lambda^{-4}$, 入射光波长为 0.355 μm , P 为大气压强, T 为大气温度, e 为水汽压强, 在光波波段测量大气折射指数时可忽略湿度的影响^[13], 折射指数可表示为

$$N(\lambda) = 0.8136 \frac{P}{T}. \quad (8)$$

大气折射指数随高度分布的模型主要有两种^[14]: 指数模型、伽马模型。在无线电波段, 大气折射指数的指数模型有较高的精度; 在光波波段, 伽马模型比指数模型有更高的精度, 因此在光波波段常用大气折射指数的伽马模型: $N(h) = 300h^{-0.001} e^{-1.25 \times 10^{-4}h}$, 式中 h 为高度, 此模型是根据全球平均折射指数分布拟合得到的。

2 结果和讨论

2.1 大气折射指数廓线的测量

2014 年 11 月 2 日, 在北京怀柔国科大校区使用转动拉曼激光雷达进行了对流层大气折射指数观测。Nd: YAG 激光器向大气中发射 354.7 nm 激光, 激光与大气中的 N_2 和 O_2 分子发生转动拉曼散射, 后向散射光通过望远镜接收, 然后通过干涉滤光片来提取 354 nm 和 353 nm 的转动拉曼回波信号, 由此信号计算出大气温度, 进而得到大气折射指数, 结果如图 2 所示。由图可以看出, 转动拉曼雷达反演的折射指数垂直廓线与探空仪反演结果较为吻合, 地面折射指数是 291, 10 km 以内两者相对误差的最大值约为 3.1%; 与折射指数伽马模型的相对误差较大, 达到 14.5%。这是因为伽马模型是由多年积累的气象资料拟合得到的, 不同纬度折射指数并不相同, 高纬度折射指数大, 低纬度折射指数小; 不同季节折射指数也不相同, 冬季折射指数大, 夏季折射指数小, 因此理论模型跟某一天测量的折射指数是有一定差异的。可见, 转动拉曼激光雷达可以很好地反演大气折射指数的垂直分布。

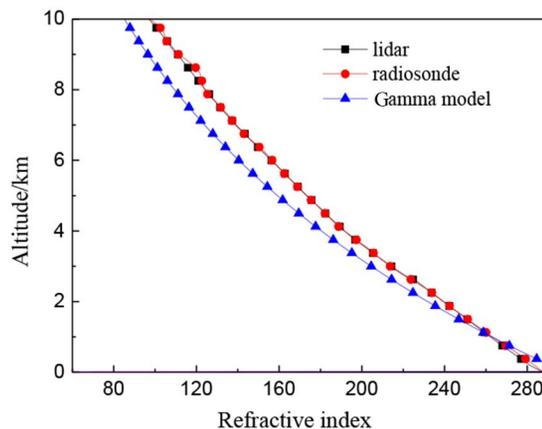


图 2 激光雷达与探空仪反演的折射指数廓线

Fig. 2 Refractive index profiles of lidar and radiosonde

2.2 仰角定位修正

根据实测大气折射指数廓线模拟计算了目标物的总偏折角和仰角定位修正值, 结果如图 3 所示。计算中激光发射点高度 h_0 取为 0, n_0 取地面处大气折射率。在模拟计算过程中发现式 (2) 对视仰角的度数相当敏感。当视仰角一定的时候, 随着高度的升高, 总偏折角和仰角定位修正值均增大; 在高度一定时, 随视仰角的增大, 总偏折角和仰角定位修正值均减小。当视仰角为 10° 时, 5 km 处总偏折角和仰角定位修正值分别为 $2.38'$ 和 $3.99'$, 10 km 处总偏折角和仰角定位修正值分别为 $3.86'$ 和 $4.49'$; 当视仰角为 40° 时, 5 km 处总偏折角和仰角定位修正值分别为 $0.48'$ 和 $1.12'$, 10 km 处总偏折角和仰角定位修正值分别为 $0.79'$ 和 $1.19'$ 。在 10 km 以下, 当视仰角大于 40° 时, 总偏折角和仰角定位修正值都小于 $1.19'$, 对定位精度要求不是很高的系统, 可

忽略它们的影响。

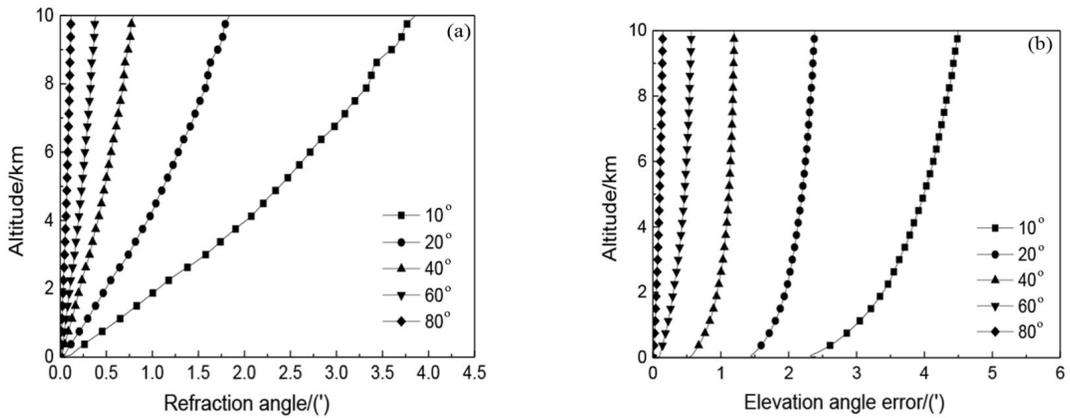


图3 不同视仰角下不同高度处目标的总偏折角 (a) 和仰角定位修正值 (b)

Fig. 3 Refraction angle (a) and elevation angle error (b) of target at different heights under different visual angles

2.3 距离定位修正

根据实测的大气折射指数廓线模拟计算了目标物的距离定位修正值,如图4所示。由图可知,在视仰角一定的时候,随着高度增加,距离定位修正值在增大;在高度一定的情况下,随视仰角的增大,距离定位修正值逐渐减小,这与仰角定位修正值的变化规律是一致的。当视仰角分别为 10° 、 20° 、 40° 时,位于10 km处目标点的距离定位修正值分别为10.37、5.26、2.80 m。可见,距离定位修正值跟仰角定位修正值一样,主要出现在低视仰角下,这是因为靠近地面处的大气密度大,折射率也大。

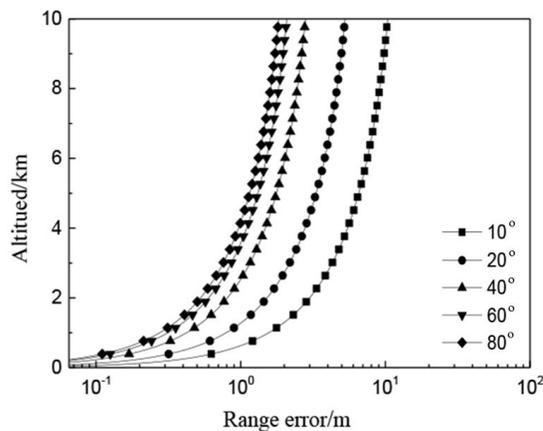


图4 不同视仰角下不同高度处目标的距离修正值

Fig. 4 Range error of target at different heights under different visual angles

2.4 误差分析

仰角定位修正值和距离定位修正值都与大气折射指数有关。因为大气折射指数是温度和压强的函数,所以转动拉曼激光雷达测量的大气折射指数的误差可看作是由温度和压强的相对不确定度引起的,在10 km处温度相对误差约为2%^[11],压强相对误差小于0.2%。温度和压强的相对误差都比较小,可以忽略,即

认为实测大气折射指数就是真实的大气折射指数。大气折射指数伽马模型是由多年积累的气象资料拟合得到的, 如果大气折射指数采用伽马模型, 就不可避免地引入修正误差。为了分析伽马模型在目标定位中修正值的误差, 将伽马模型与激光雷达实测大气折射指数目标定位修正值进行对比, 就可以估算出伽马模型在目标定位中的精度。对于 $0.355 \mu\text{m}$ 的激光, 在 10° 视仰角下, 通过实测大气折射指数和伽马模型修正时, 目标物的仰角定位修正值和距离定位修正值如图 5 所示。由图可以看出, 目标定位系统按照两种折射指数廓线修正目标定位误差时, 产生的偏差较小。

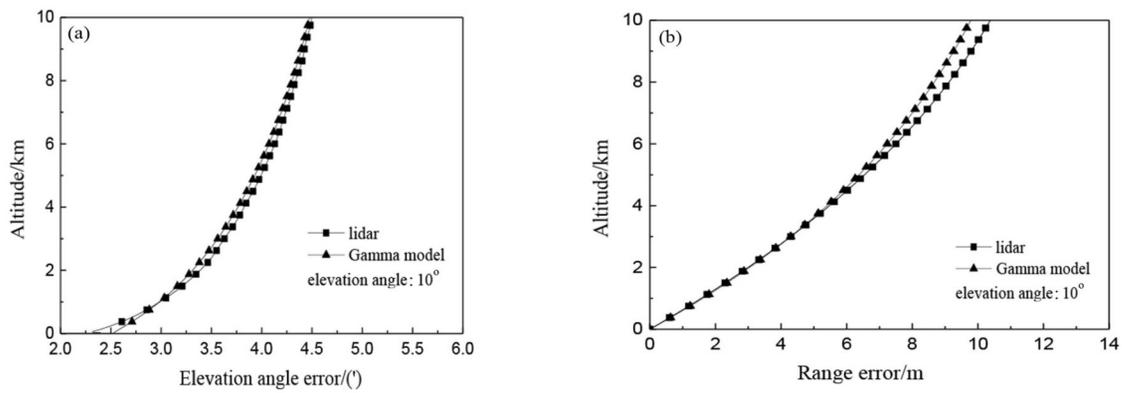


图 5 激光雷达与伽马模型的仰角修正值 (a) 和距离修正值 (b)

Fig. 5 Elevation angel error (a) and range error (b) of lidar and Gamma model

将大气折射指数伽马模型目标定位修正值与激光雷达修正值相减, 可以估算出伽马模型在目标定位中的精度。采用伽马模型修正激光目标定位时, 导致的仰角修正误差和距离修正误差如图 6 所示。由图可知, 在 10° 视仰角时, 10 km 以内仰角定位修正误差在 0.1' 以内, 距离定位修正误差在 0.59 m 以内。同激光雷达修正结果相比, 伽马模型在修正目标定位误差时偏差较小, 对于精度要求不是很高的光电探测定位系统 (例如高射炮、制导导弹、轰炸机等), 大气折射指数伽马模型完全能满足定位的需求。

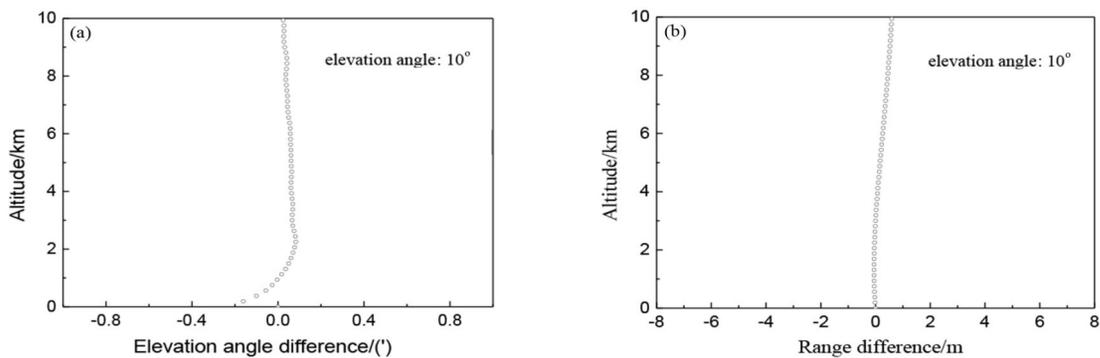


图 6 激光雷达与伽马模型的仰角定位修正误差 (a) 和距离定位修正误差 (b)

Fig. 6 Elevation angel difference (a) and range difference (b) of lidar and Gamma model

3 结 论

利用实测转动拉曼散射信号反演了大气折射指数廓线,通过大气折射指数廓线模拟计算了不同视仰角下的仰角定位修正值和距离定位修正值。结果表明,在视仰角一定的情况下,仰角定位修正值和距离定位修正值随着高度的升高而增大;在高度一定的情况下,仰角定位修正值和距离定位修正值随着视仰角的增大而减小。并在 10° 视仰角下,将伽马模型与激光雷达的修正值进行了对比,两者的绝对误差在0.1和0.59 m以内,对于精度要求不是很高的探测系统,利用大气折射指数伽马模型进行修正就能满足需要。如果精度要求比较高,可依据激光雷达实时探测的大气折射指数进行修正。这些分析结果对目标定位误差的修正有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Fang X, Wang M, Hu S X. Distribution characteristics of atmospheric pollutions in meiyu season observed by lidar over Hefei [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0110003.
方欣,王敏,胡顺星.合肥梅雨季节大气污染物分布特征的激光雷达探测[J].中国激光,2019,46(1): 0110003.
- [2] Wang M, Hu S X, Fang X, et al. Precise correction for the troposphere target location error based on lidar [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(7): 5091-5097.
王敏,胡顺星,方欣,等.激光雷达精确修正对流层目标定位误差[J].物理学报,2009,58(7): 5091-5097.
- [3] Chen Y S, Wang X Y. Study on mathematical model of atmospheric refraction error correction of photoelectric measurement information [J]. *Laser Journal*, 2021, 42(8): 73-77.
陈雅颂,汪晓银.光电测量信息大气折射误差修正的数学模型研究[J].激光杂志,2021,42(8): 73-77.
- [4] Li S G, Nie J S. Effect of atmospheric refraction to electro-optical reconnaissance and orientation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S3): 170-173.
李双刚,聂劲松.大气折射对光电探测定位的影响[J].红外与激光工程,2008,37(S3): 170-173.
- [5] Song Z F, Ding Q. Atmospheric refraction corrections for angle and altitude measured with laser [J]. *Laser Technology*, 1988, 12(2): 8-13.
宋正方,丁强.激光测角与测高的大气折射修正[J].激光技术,1988,12(2): 8-13.
- [6] Zhang X J, Song Z F, Fu Z F. Atmospheric refraction correction for laser ranging [J]. *Infrared and Laser Echnology*, 1987, 3: 9-15.
张新家,宋正方,付祝法.激光测距的大气折射订正[J].红外与激光技术,1987,3: 9-15.
- [7] Song Z F, Ding Q. A model of atmospheric refraction-index profile for laser ranging [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1987, 4(4): 334-340.
宋正方,丁强.激光测距中的大气折射率分布模型[J].量子电子学报,1987,4(4): 334-340.
- [8] Cheng X H. High precision modification to atmospheric refractive errors [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 1996, 25(S2): 214-218.
程显海.大气折射误差的高精度修正[J].电子科技大学学报,1996,25(S2): 214-218.
- [9] Liu Y L. Rotational Raman lidar for detecting temperature profiles in boundary layer [J]. *Laser Technology*, 2018, 42(4): 541-544.

- 刘玉丽. 探测边界层大气温度的转动喇曼激光雷达 [J]. *激光技术*, 2018, 42(4): 541-544.
- [10] Jia J Y, Yi F. Atmospheric temperature measurements at altitudes of 5-30 km with a double-grating-based pure rotational Raman lidar [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(24): 5330-5343.
- [11] Liu Y L, Xie C B, Shang Z, *et al.* Retrieval and analysis of atmospheric temperature using a rotational Raman lidar observation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(6): 1978-1986.
- [12] Wang M, Hu S X, Su J, *et al.* Measurements of refractive profiles using a pure rotational Raman lidar in the lower-atmosphere [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(12): 1986-1991.
- 王敏, 胡顺星, 苏嘉, 等. 纯转动拉曼激光雷达反演低层大气折射率廓线 [J]. *中国激光*, 2008, 35(12): 1986-1991.
- [13] Kunz G, Heemskerk E, van Eijk L. Comparison of atmospheric refraction at radar and optical wavelengths [C]. *Proceedings SPIE 5981, Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems VIII*, October 13, 2005, Bruges, Belgium. 2005, 5981: 84-95.
- [14] Song Z F. *Fundamentals of Applied Atmospheric Optics* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990: 1-2.
- 宋正方. 应用大气光学基础 [M]. 北京: 气象出版社, 1990: 1-2.