

星载激光测距大气校正算法与模型研究

袁宏武^{1,2,3} 梅海平¹ 黄印博¹ 饶瑞中¹

(¹中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031
²中国科学院研究生院, 北京 100049; ³解放军炮兵学院, 安徽 合肥 230031)

摘要 考虑大气折射对星载激光测距的影响,研究了基于光线追迹理论的激光程差计算方法。综合利用气象探空数据和高层大气模式数据,拟合得到了全国 46 个典型地区的年度平均大气折射率模数高度分布廓线。据此,比较分析了光线追迹算法结果与 Marini-Murray 模型计算结果,给出了激光程差的全国性分布状况。最后,分析了激光程差与海拔高度和卫星高度角之间的关系。

关键词 大气光学;星载激光测距;光程差;光线追迹;大气校正;大气折射

中图分类号 P427.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0401004

Research on Atmospheric Refraction Correction Algorithm and Model for Satellite Laser Range-Finding

Yuan Hongwu^{1,2,3} Mei Haiping¹ Huang Yinbo¹ Rao Ruizhong¹

(¹Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³Artillery Academy of People's Liberation Army, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract Considering the influences of atmospheric refraction on the satellite laser ranging, an algorithm for calculating the optical path differences based on ray tracing is studied. Firstly, the annual mean atmospheric refractivity modulus height profiles of 46 typical regions in China are fitted by using meteorological sounding datum and high level model datum synthetically. Secondly, the results calculated by the Marini-Murray model and ray tracing which is based on the monthly average model and the annual mean model are compared and analyzed. Then, the national distribution of the optical path difference of satellite laser ranging is presented. Finally, the relations between the optical path difference with the height above sea level of ranging site and the elevation of satellite are numerically investigated.

Key words atmospheric optics; satellite-borne laser range-finding; optical path difference; ray tracing; atmospheric correction; atmospheric refraction

OCIS codes 010.0010; 010.1285; 010.3310

1 引 言

卫星对地激光测距中,激光需往返经过大气层后才能返回卫星,而包围地球的大气由于受到重力的作用,其密度分布不均匀,折射率大于 1,因此当激光在其中传播时,必然受到大气的折射,从而造成

激光光路的弯曲和时间的延迟,其造成的激光程差是星载激光对地测距误差的主要来源^[1~13]。其值通常在米级以上,给高精度测绘、导航和定位等应用带来较大影响,所以研究大气校正算法与模型十分必要。

收稿日期: 2010-09-08; **收到修改稿日期:** 2010-10-25

基金项目: 国家 863 计划和国家自然科学基金(40905009)资助课题。

作者简介: 袁宏武(1979—),男,讲师,博士研究生,主要从事激光传输方面的研究。E-mail: yuan_hong_wu@163.com

导师简介: 饶瑞中(1963—),男,博士,研究员,主要从事大气湍流、激光传输等方面的研究。E-mail: rao@aiofm.ac.cn

本文电子版彩色效果详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

20 世纪 70 年代 Marini 和 Murray 提出了一个激光测距大气校正模型,由于模型简单,只需要测站点的温度、湿度和大气压强就可以完成大气延迟的计算,因此该模型被广泛使用至今^[2,3]。Gardner 在此基础上考虑到水平方向大气折射率分布不均匀,对此进行了改进^[4]。近年来,随着高精度导航与定位应用方面的需求,人们提出了一些新的大气校正模型,如 Zenith Delay (ZD) 模型^[5,7]、Mapping Function(MF)模型^[6,7]、Yan-Wang 模型^[8],但这些简化计算模型都是对特定地区光线追迹算法的计算结果进行拟合近似而得到的,具有局域性,推广到其他区域,其精确度就可能无法保障。我们知道,气象探空站点遍布世界各地,利用这些数据拟合得到折射率模数的高度分布廓线,即可根据光线追迹算法来获取对应区域最为精确的激光程差。反之,利用这些结果也可以判断上述模型在哪些区域比较适用,在哪些区域误差较大。

光线追迹算法是计算大气折射延迟的最广泛、精确度最高的方法^[9,14,15]。计算过程基于几何光学理论,首先视大气层为球面分层大气,每一层具有相同的折射率系数;然后利用斯涅尔(Snell)定律从第一层开始通过对光线追迹计算每层的延迟,最后累积得到整个大气的延迟量,从而得出激光程差。本文研究的卫星高度角较大(大于等于 60°),水平方向大气折射率分布不均匀造成的延迟误差较小^[9],可认为大气折射率在水平方向是均匀分布的,因此,只需考虑大气高度分布的不均匀性所造成的激光程差。本文给出了光线追迹法的基本原理和折射率模数的高度分布模型,比较分析了基于月均和年均模型的光线追迹结果、Marini-Murray(以下简称 M-M)模型的计算结果与基于每天探空气象数据的光线追迹结果间的相对误差。在此基础上,给出了基于年均模型的全国 46 个探空站点的光线追迹结果,得出了激光程差的全国分布情况,并给出了激光程差与测站点的高度、卫星高度角等的相关性分析。

2 光线追迹算法原理

2.1 光线追迹算法

将地球大气分成许多同心球层,每一球层具有相同的折射率,则进入大气的光线只有在球层的界面上才发生折射^[1,10]。

图 1 给出激光测距的几何模型, A 为测站点, B 为卫星, C 为光路中任一点, E 为卫星高度角, O 为

地心, R 为地球半径, R_s 为 A 到 B 的直线距离, R₀ 为激光实际所走的路程,称为实际距离, n₀ 为测站点 A 的折射率系数, r₀ 为 A 到 O 的距离, θ₀ 为入射角, r₁ 为 B 到 O 的距离, φ 为地心张角。由 Snell 定律、三角正弦定理,可得到大气光路方程^[1]

$$n r \sin \theta = \text{Constant}. \quad (1)$$

图 1 中 R₀ 和 φ 为^[11,14]

$$\begin{cases} R_0 = \int_{r_0}^{r_1} \frac{n^2 r}{\sqrt{n^2 r^2 - n_0^2 r_0^2 \cos^2 \theta_0}} dr \\ \varphi = n_0 r_0 \cos \theta_0 \int_{r_0}^{r_1} \frac{dr}{r \sqrt{n^2 r^2 - n_0^2 r_0^2 \cos^2 \theta_0}} \end{cases} \quad (2)$$

在图 1 △ABO 中, R_s 可由三角几何关系得到:

$$R_s = \sqrt{r_0^2 + r_1^2 - 2r_0 r_1 \cos \varphi}, \quad (3)$$

由此,可以得到激光光程差 ΔL:

$$\Delta L = R_0 - R_s. \quad (4)$$

由(2)式易知,获取光传播路上的大气折射率 n 是进行光线追迹的前提条件。大气折射率是所在高度的温度、湿度和压强的函数,可从气象探空数据中获得。

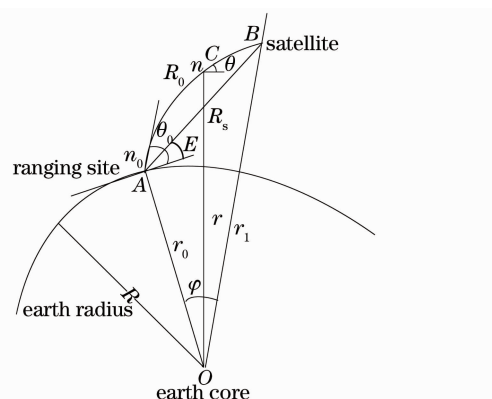


图 1 星载激光测距的几何模型

Fig. 1 Geometry model of satellite-borne laser range-finding

2.2 大气折射率模数高度廓线模型

为了方便计算,将大气折射率 n 用大气折射率模数 N(h)来表达:

$$n = 1 + 10^{-6} N(h). \quad (5)$$

通常情况下,大气折射率模数随着高度的增加按照指数规律下降,可以用指数模型或者伽马模型进行拟合:

$$N(h) = N_0 \exp\left(-\frac{h}{H_N}\right), \quad (6)$$

$$N(h) = ah^b \exp(-ch). \quad (7)$$

(6)式中 h 为海拔高度, N₀ 为地面折射率, H_N 为大

气折射率标高,在美国无线电波的平均模型中 $N_0 = 313$, $H_N = 6.95 \text{ km}$ ^[10]。文中并没有采用这两个数值,而是利用实际的值进行拟合得到的。(7)式中 a, b, c 为待拟合的参数, h 为海拔高度。该式表明,在高度 $h=0$ 时无法得到正确的折射率模数,考虑到 1 km 以下,折射率模式基本上满足线性关系,采用分段模型来表达即在小于 1 km 高度采用线性模型,大于 1 km 采用伽马分布模型,即

$$N(h) = \begin{cases} N_0 + kh, & 0 \leq h < 1000 \text{ m} \\ ah^b \exp(-ch), & h \geq 1000 \text{ m} \end{cases} \quad (8)$$

式中 k 为直线的斜率, N_0 为地面折射率,其它参数与(7)式相同。

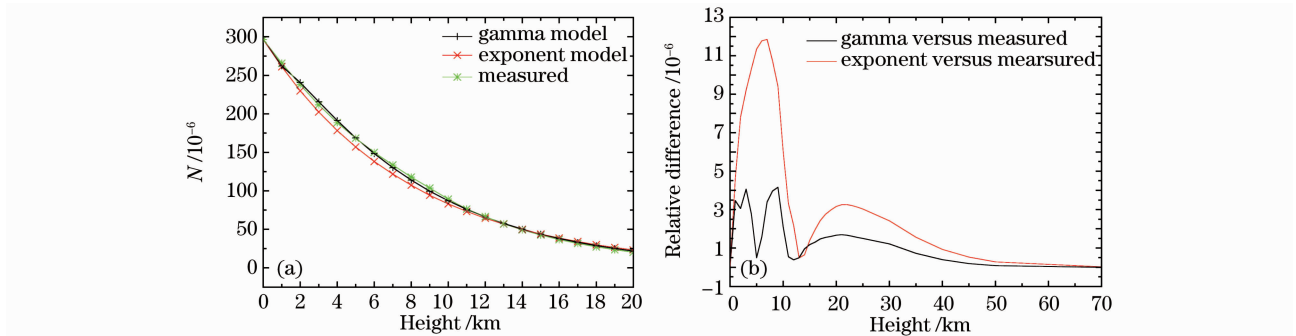


图 2 大气折射率模数廓线模型及偏差。(a)大气折射率模数高度廓线模型,(b)拟合与实测值的偏差

Fig. 2 Atmospheric refractive-index modulus height profiles of the three models and the differences. (a) height profiles model of the atmospheric refractivity modulus, (b) difference between the measured atmospheric refractivity and the fitted models

3 计算结果与分析

3.1 激光程差计算结果

世界气象组织对外公开并可免费获取的高空气象数据^[12],基本涵盖了全球所有气象探空站点(下称测站点),每个站点每天在 0:00 和 12:00 分别记录各个高度的气象数据,包括大气压强、温度、水汽压、相对湿度、风速和风向等信息。假设卫星高度为 500 km,卫星相对于测站点的高度角为 80° ,激光波长为 1064 nm,光线追迹的步长为 1 m。图 3(a)~(l)分别给出了北京测站点 2009 年 1~12 月 M-M 模型和月均模型计算结果与每天探空数据追迹结果的偏差。图 4(a)~(d)分别给出了北京测站点 2006~2009 年 M-M 模型和年均模型计算结果与每天探空数据追迹结果的偏差。

从图 3 可以看出,除了 7~9 三个月 M-M 模型和月均模型起伏相当以外,其他月份 M-M 模型的起伏要明显大于月均模型的起伏。对于 M-M 模型来说,其平均偏差随月份变化较大,最大值出现在 1 月份,其平均偏差达到了 10 cm,最小值出现在 8 月

图 2(a)给出了在 0~20 km 高度上分别利用分段伽马模型和指数模型拟合得到的大气折射率模数。图 2(b)给出了在 0~70 km 高度上分段伽马模型和指数模型与实测的大气折射率模数的偏差。从图 2 可以看出,由于伽马分布模式具有较多的调整参数,在 0~20 km 高度上拟合效果比指数模型要好。由于 5 km 以下大气对激光程差的贡献约占整层的一半,20 km 以上的贡献仅占整层的 5%^[10],因此伽马模型具有较高的适用性。从图 2(b)的偏差也可以看出,伽马模型相对实测值的偏差小,起伏小,精度高。因此,本文选用分段的伽马模型来拟合大气折射率模数高度廓线模型。

份,其平均偏差为 2.3 cm。而月均模型的平均偏差基本稳定,为 1.7 cm 左右。由图 4 可得,除在某些天以外,使用年均模型的偏差要比使用 M-M 模型的偏差要小。2006 年 M-M 模型的平均偏差为 5.6 cm,年均模型的平均偏差为 2.5 cm;2007 年 M-M 模型的平均偏差为 5.7 cm,年均模型的平均偏差为 2.3 cm;2008 年 M-M 模型的平均偏差为 5.9 cm,年均模型的平均偏差为 2.2 cm;2009 年 M-M 模型的平均偏差为 6.2 cm,年均模型的平均偏差为 2.1 cm。M-M 模型的平均偏差要比年均模型的平均偏差大 50%~60%左右。另外从图 4 中也可以看出 M-M 模型的起伏比较大,冬季起伏较大,夏季起伏较小,而年均模型相对比较稳定,这与图 3 是一致的。因此,虽然月均和年均模型存在 2 cm 左右的平均误差,但相对于 M-M 模型,月均和年均模型提高了 50%左右的计算精度。所以,文中使用月均和年均模型用于激光程差的计算,选取了我国具有代表性的 46 个测站点,用分段模型拟合了 2009 年年均大气折射率模数高度廓线模型,运用光线追迹法计算了激光程差,如表 1 所示。

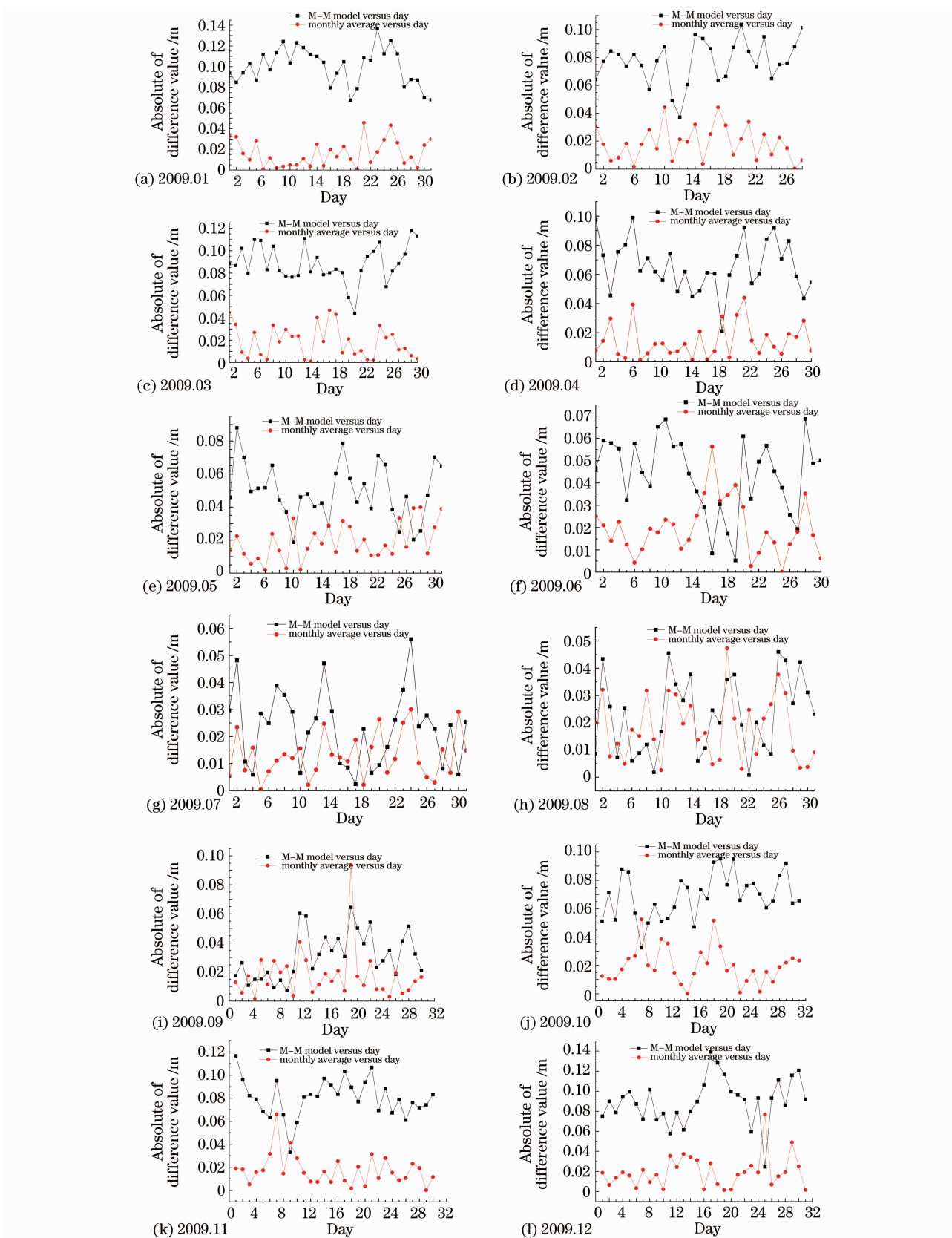


图 3 北京测站点 2009 年 1~12 月 M-M 模型和月均模型计算结果与每天探空数据追迹结果的偏差

Fig. 3 Difference values between results calculated by M-M model and ray tracing based on the monthly average model and results calculated by ray tracing with daily sounding datum in Beijing range-finding site

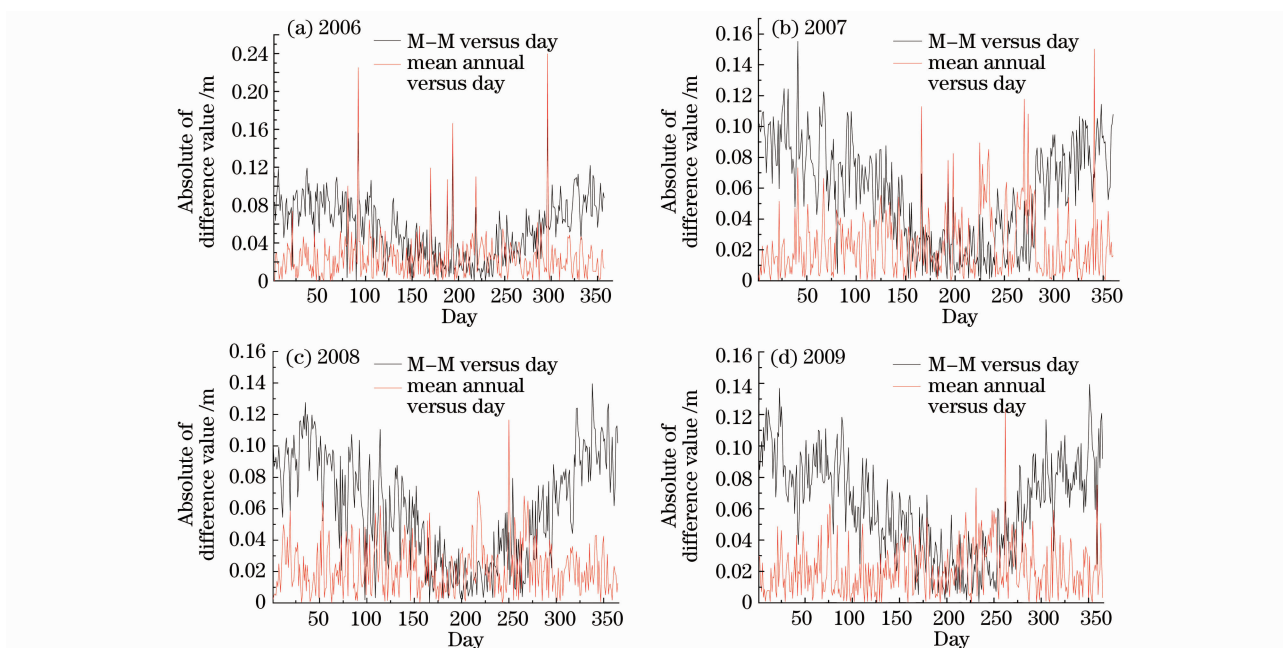


图 4 北京测站点 2006~2009 年 M-M 模型和年均模型计算结果与每天探空数据追迹结果的相对偏差

Fig. 4 Difference values between results calculated by M-M model and ray tracing based on the annual mean model and results calculated by ray tracing with daily sounding datum in Beijing range-finding site from 2006 to 2009 year

表 1 全国 46 个站点的激光程差

Table 1 Optical path difference of 46 ranging sites in China

Ranging site	Optical path difference /m	Ranging site	Optical path difference /m
Anqing	2.49	Beijing	2.44
Changdu	1.70	Changchun	2.36
Changsha	2.49	Dalian	2.42
Dunhuang	2.14	Fuzhou	2.50
Geerm	1.77	Guiyang	2.16
Guilin	2.44	Haerbin	2.39
Hami	2.24	Haikou	2.54
Hanzhong	2.34	Hangzhou	2.50
Huaihua	2.41	Jiuquan	2.08
Kashi	2.11	Kuche	2.15
Kunming	1.99	Lasa	1.60
Minfeng	2.09	Naqu	1.43
Nanchang	2.47	Nanjing	2.49
Nanning	2.47	Nanyang	2.42
Qingdao	2.47	Ruoqiang	2.21
Shantou	2.53	Shanghai	2.50
Shenyang	2.45	Taiyuan	2.25
Tongliao	2.39	Wulumuqi	2.21
Wuhan	2.51	Xichang	2.06
Xining	1.89	Xilinhaote	2.16
Xiamen	2.45	Yan'an	2.21
Yinchuan	2.15	Yushu	1.60
Zhengzhou	2.47	Chongqing	2.40

图 5 是利用光线追迹算法得到的全国激光程差的分布情况,卫星参数、激光波长和光线追迹的步长同表 1。从中可以看出,我国东部激光程差普遍要比西部的激光程差大,最小值出现在青藏高原腹地,最大值出现在东南沿海地区。但西部地区也有激光程差比较大的地方,如新疆北部地区。总体看来,激光测距表现出与当地气候条件及海拔等的高度相关性。

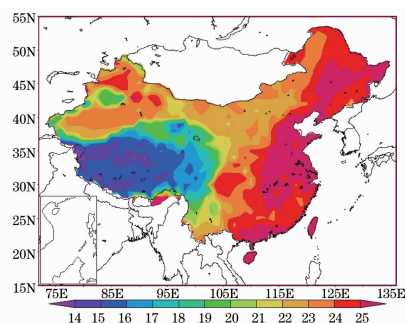


图 5 中国地区年均激光程差(单位:m)

Fig. 5 Annual mean optical path difference in China region (unit: m)

3.2 激光程差的相关性分析

图 6 给出了激光程差与测站点海拔高度间的关系,图 7 给出了激光程差随卫星高度角变化情况。

图 6 表明,激光程差随测站点海拔高度的增加总体呈下降的趋势,海拔越高,激光程差越小;海拔越低,激光程差越大。因为我国的地势东低西高,所

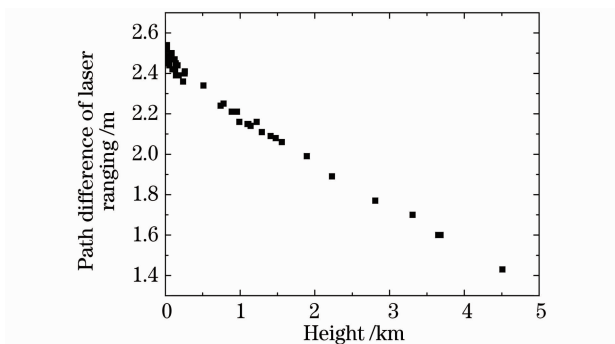


图 6 激光程差随测站点海拔高度的变化

Fig. 6 Optical path difference of laser versus the height above sea level of range-finding site

以位于东部的测站点的激光程差要比西部的大,与图 5 的激光程差全国分布情况是一致的。由于测站点海拔高度决定了气压的大小,由此可见气压相对于温度和湿度来说对激光程差的影响更大,这与有关的研究结论^[16,17]是吻合的。由图 7 可得,随着卫星高度角的增加,激光程差逐渐减小,对此进行指数拟合,拟合的相关系数为 0.998,标准离差为 1.65×10^{-5} ,即从拟合效果来看,激光程差与卫星高度角间非常好地满足指数下降的关系。

图 8(a) 给出了北京测站点 2000~2009 年年

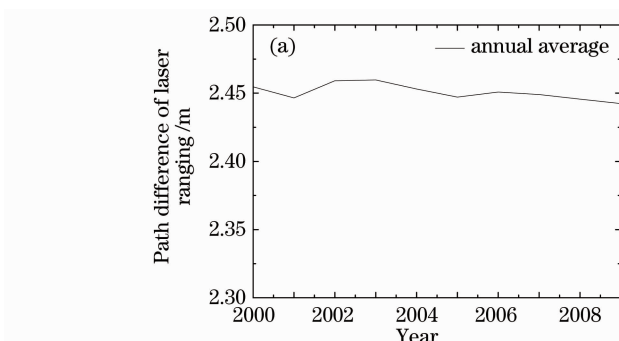


图 8 (a) 年均激光程差; (b) 10 年月均激光程差

Fig. 8 (a) Mean annual optical path difference of the laser; (b) monthly average optical path difference of 10 years

4 结 论

本文开展了星载激光测距大气校正算法与模型的研究。主要结论如下:

1) 基于光线追迹的大气校正算法,利用气象探空站点的大气参数数据,计算大气折射造成的激光程差,可以有效克服延迟校正模型的局域性,提高激光程差的计算精度。

2) 大气折射率模数随着高度增加呈指数下降,但从分析结果来看,采用分段的伽马模型拟合效果更好,可以作为大气折射率模数高度廓线模型。

3) 从计算结果来看,激光程差与测站点海拔

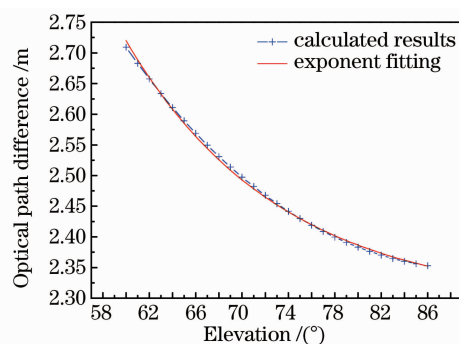
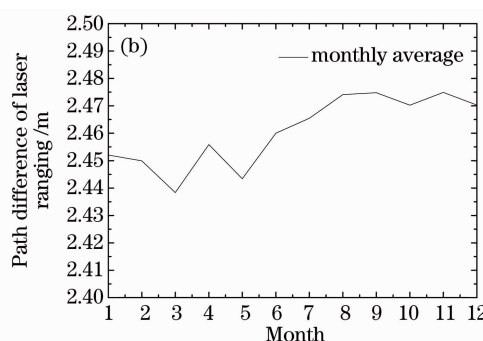


图 7 激光程差值随高度角变化

Fig. 7 Optical path difference of laser versus the elevation of satellite

均激光程差的变化,图 8(b) 给出了 2000~2009 年 10 年间月均激光程差的变化。图 8(a) 表明,年均激光程差随年份的变化而略有波动,但幅度很小,其 10 年的平均值为 2.45 m,平均相对变化仅为 0.36%,约为 1 cm。从图 8(b) 可以看出,月均激光程差与年均激光程差变化相似,随着月份变化而略有波动,月份间相对变化约为 2 cm,最大值出现在 8 月份,激光程差为 2.47 m,最小值出现在 3 月份,激光程差为 2.44 m,即夏季的激光程差要略大于冬季的激光程差。



高度呈线性关系,海拔高度越高,激光程差越小,从地图上看,西部地区的激光程差比东部的要小,最小值出现在海拔高度最高的青藏高原,最大值出现东南沿海地区。

4) 月均和年均激光程差随时间的变化而略有波动,但幅度很小。通常情况下,夏季激光程差要比冬季激光程差略大。随着卫星高度角的增加,激光程差呈指数下降。

参 考 文 献

1 Zhang Yixin, Chi Zeyang. Optical Wave Propagations and Image

- in the Turbulent Atmosphere [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997. 167~175
- 张逸新, 迟泽英. 光波在大气中的传输与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997. 167~175
- 2 J. W. Marini, C. W. Murray. Correction of laser range tracking data for atmospheric refraction at elevations above 10 degree[R]. NASA rep. 1973. X-591-73-351, Goddard Space Flight Cent., Greenbelt, MD; 1~19
- 3 J. A. Schwartz. Laser ranging error budget for the TOPEX/POSEIDON satellite [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(25): 3590~3596
- 4 C. S. Gardner. Effects of horizontal refractivity gradients on the accuracy of laser ranging to satellites[J]. *Radio Science*, 1979, **11**(12): 1037~1044
- 5 V. B. Mends, E. C. Pavlis. High-accuracy zenith delay prediction at optical wavelengths[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**(14602): 1~5
- 6 V. B. Mends, E. C. Pavlis, D. E. Pavlis *et al.*. Improved mapping functions for atmospheric refraction correction in SLR [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **29**(10): 1414
- 7 Yan Haojian. Progresses in research of atmospheric refraction [J]. *World Sci-Tech R&D*, 2006, **28**(1): 48~58
- 严豪健. 大气折射的研究进展[J]. 世界科技研究与进展, 2006, **28**(1): 48~58
- 8 Yan Haojian, Li Fengfeng, Wu Hainan. Frequency-related mapping functions at optical wavelength[J]. *Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica*, 1997, **18**: 163~166
- 严豪健, 李凤凤, 吴海南. 光学波段上的频率相关映射函数[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 1997, **18**: 163~166
- 9 G. Hulley, E. C. Pavlis. Improvement of current refraction modeling in satellite laser ranging (SLR) by ray tracing through meteorological data [C]. American Geophysical Union Fall Meeting, 2006. 1~6
- 10 Song Zhengfang. Applied Atmospheric Optics [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990. 1~3
- 宋正方. 应用大气光学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1990. 1~3
- 11 Chen Xiangming. Studied on Atmospheric Refractivity Profile Model and Radio Wave Refractive Error Correction Method [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008. 26~27
- 陈祥明. 大气折射率剖面模型与电波折射误差修正方法研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008. 26~27
- 12 <http://weather.uwyo.edu//upperair/sounding.html>
- 13 Yuan Hongwu, Mei Haiping, Huang Yinbo *et al.*. Time delay of atmospheric aerosol particles and its effect on the path difference of laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 1945~1949
- 袁宏武, 梅海平, 黄印博等. 大气气溶胶粒子的时延效应及其对激光程差的影响分析[J]. 光学学报, 2010, **30**(7): 1945~1949
- 14 Feng Dinghua, Pan Sha, Tian Zhengyu *et al.*. Research on ray tracing method in 3D discrete space with discretionary refraction index[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 696~701
- 冯定华, 潘沙, 田正雨等. 任意折射率的三维离散空间光线追迹方法研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(3): 696~701
- 15 Zhao Wenchuan, Su Xianyu, Zhang Qican *et al.*. Ray tracing and wavefront reconstruction based on structured-light imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1868~1871
- 赵文川, 苏显渝, 张启灿等. 基于结构光的光线追迹与波前重建方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(7): 1868~1871
- 16 Wang Gang, Sun Lingyu, Wang Weining *et al.*. Research on new portable laser rangefinder[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(7): 072801
- 王刚, 孙凌宇, 王卫宁等. 新型便携式激光测距仪的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(7): 072801
- 17 W. Mao, L. Yang, Q. X. Tie. Path bending correction for refraction delay of electromagnetic waves[J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2008, **32**(3): 335~341