

星载激光测高仪大气传输延迟对测距精度的影响

赵 欣, 张 毅, 赵平建, 涂碧海

(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, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 地球表层的大气折射可对激光测高仪的激光脉冲传输造成延迟, 该延迟对激光飞行时间的测量精度以及地球表面三维轮廓的监测造成显著影响。因此, 激光测高仪测距精度需要通过大气传播误差函数进行修正。着重讨论了激光脉冲基于天顶延迟的计算方法和相关映射函数模型的选择, 并采用 NMF 连分式映射函数分别对干项和湿项进行计算。结果表明, 在 1.064 μm 波长, 指向角偏差不超过 10° 的激光测高仪系统中, 干项延迟可达 2.35 m, 为主要误差源, 湿项延迟变化从 1~4 mm 不等, 基本可以忽略。

关键词: 激光测高; 大气延迟; 映射函数; 天顶延迟

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2011)03-0438-05

Influence of atmospheric transmission delay of satellite laser altimeter on ranging precision

Zhao Xin, Zhang Yi, Zhao Pingjian, Tu Bihai

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Atmospheric delay of laser pulse is the dominant error source for high precision range measurements of laser altimeter arisen from atmospheric refraction, the error source will greatly influence the measurement precision for pulse laser flight time, and faulty estimation in the three-dimension prediction. So the atmospheric model is needed to correct the propagation delay of the laser transmission in air. How to calculate the ray paths delay in atmosphere near zenith was presented, and some models of relative map function were given out. Through calculating and comparing these functions, the NMF function in a continued fraction was used to calculate separately for hydrostatic and wet components of the air. Result shows that laser altimeter transmitting with 1.064 μm laser and point angle under 10° off nadir, the zenith hydrostatic delay is approximately 2.35 m and is the major component of total delay; the corresponding zenith wet delay varying from 1 mm to 4 mm can be ignored.

Key words: laser altimeter; atmospheric delay; map function; zenith delay

收稿日期: 2010-06-09; 修订日期: 2010-07-23

基金项目: 中国科学院合肥物质研究院院长基金资助项目

作者简介: 赵欣(1978-), 男, 博士生, 主要从事激光测距测高方面的研究。Email: zhaoxin79@163.com

导师简介: 张毅(1955-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光电探测方面的研究。Email: yzhang@aiofm.ac.cn

0 引言

随着空间科学技术的发展和人类急需对地球地貌以及空间环境的认知,星载激光测高仪作为高效精确的测量手段得到了迅猛发展。激光测高仪的工作原理是安装在飞行平台上的激光器以固定频率向探测空间发射激光脉冲,激光光束穿越大气经目标散射产生回波被测高仪上的望远镜所接收,通过光电探测器将激光脉冲转换成电脉冲回波,通过分析该电脉冲回波的飞行时间(TOF)可以计算出测高仪与探测目标之间的距离,因此其在沟壑、冰盖、植物冠盖等的三维测绘和海洋测深等领域发挥了巨大作用。

美国于2001年发射了ICESat (Ice, Cloud and Elevation Satellite) 卫星,该卫星的主要任务是使用GLAS(Geoscience Laser Altimeter System)激光测高系统描绘地球极点冰架的地貌结构,以此监测极地冰架轮廓收缩情况与全球海平面变化之间的联系。监测表明,冰架厚度每变化0.1%,全球海平面将升高8.3 cm。可见:精确监测两极冰架尺度的变化,对研究全球气候变暖和预警灾害有着极其重要的作用。为了精确获得卫星到冰架的距离,仅基于硬件测量飞行时间是不准确的,因为地球大气可对激光脉冲传输造成延迟影响。大气对激光脉冲造成的延迟主要取决于固定波长的激光在大气传输路径上的折射系数,而该系数又是空气的密度函数。因此对于从天顶角出发的光程来说,大气延迟直接与地球表面的大气压力、柱状路径内的水分子密度以及由于海拔高度和大气非静态力造成的重力变化相关。通常,观测角不同,大气参数分布不同,导致大气延迟量存在差异。因此,总大气延迟 ΔL 可表示为天顶延迟 ΔL_z 和与高度角相关的映射函数 $m(\varepsilon, \vec{P})$ 的乘积。

1 大气延迟计算模型

单程路径的中性大气延迟修正公式可表示为折射率的积分函数^[1]:

$$\Delta L = \int_{\text{curve}} n(s) ds - \int_{\text{straight}} ds \quad (1)$$

式中: $n(s)$ 为沿着大气光程的折射率;curve为激光脉冲在大气传输中的曲线路径;straight为激光脉冲在真

空中传输的直线路径。求解公式(1)中的第二项只需要知道卫星和激光测高仪在地面的激光足印坐标即可,而第一项积分的计算需要知道光程中大气的折射率,而精确的折射率通常采用追光法或数值积分得到。直接追光法不适用于大数据量的运算,使用半解析法可简化计算,在基于天顶角传输的条件下,其结果和追光法的偏差在1 mm以内。因此,笔者采用基于映射函数的天顶传输延迟公式,表示为:

$$\Delta L = m(\varepsilon, \vec{P}) \int_z^\infty (n(z)-1) ds \quad (2)$$

式中: $m(\varepsilon, \vec{P})$ 为映射函数; ε 为倾斜角; \vec{P} 为矢量函数;积分范围为沿着天顶方向从卫星到地面的路径 Z 。公式(2)中折射率 $(n-1)$ 通常表示为 $n-1=10^{-6}N$ 。对于不同波长的光,折射率 $N^{[2]}$ 表示为:

$$N = k_1(\lambda) \frac{P_d}{T} Z_d^{-1} + k_2(\lambda) \frac{P_w}{T} Z_w^{-1} \quad (3)$$

式中: $k_1(\lambda)$ 和 $k_2(\lambda)$ 为波长 λ 的函数, $k_1(\lambda)$ 对应于干燥大气成分中的分子密度折射率, $k_2(\lambda)$ 对应于大气中水汽密度的折射率; P_d 和 P_w 分别为干、湿空气的分压; T 为温度; Z_d 和 Z_w 为干空气和水汽的压缩率。压缩率可通过非理想状态下的气体定律来表达:

$$\rho_i = \frac{P_i}{T} \frac{M_i}{R} Z_i^{-1} \quad (4)$$

式中: ρ_i 为气体密度; M_i 为质量分子; Z_i 为气体压缩率; P_i 为气压; R 为气体普适常数。因此,公式(3)可表示为:

$$N = k_1 \frac{R}{M_d} (\rho_d + \rho_w) + \left(k_2 - k_1 \frac{M_w}{M_d} \right) \frac{R}{M_w} \rho_w \quad (5)$$

假设大气在柱状路程中处于静力平衡状态,且重力是一个常量,那么天顶方向大气延迟的主要部分,即大气静力延迟项可表示为:

$$\Delta L_H = 10^{-6} k_1 \frac{R}{M_d} g_m^{-1} P_{\text{pres}} \quad (6)$$

式中: P_{pres} 为大气压强; g_m 为重力加速度; M_d 为干空气分子质量。同样由公式(1)、(3)可得到大气湿项延迟部分为:

$$\Delta L_w = 10^{-6} (k_2 - k_1 \frac{M_w}{M_d}) \frac{R}{M_d} g_m^{-1} P_w \quad (7)$$

式中: P_w 为柱状大气内总降水量; M_w 为大气水分子质量。则总天顶延迟公式可表示为 $\Delta L_z = \Delta L_w + \Delta L_H$,因为星载激光测高仪中激光波长通常为 $1.064 \mu\text{m}$,此时的 $k_1 =$

0.786 61 K/Pa, $k_2=0.664 44$ K/Pa, 干空气分子量和水汽分子量分别为 $M_d=28.964 4$ kg/kmol, $M_w=18.015 2$ kg/kmol, 可得:

$$\Delta L_z = (2.302 \times 10^{-5} \text{ m/Pa}) P_{\text{pres}} + (8.085 \times 10^{-5} \text{ m/(kg} \cdot \text{m}^{-2})) P_w \quad (8)$$

在给定大气平均表面压力为 10^5 Pa 时, 静态延迟为 2.35 m, 为导致激光测高仪大气延时的主要误差项; 湿项延迟变化随降雨量不同而变化, 例如, 在极点地区降水量为 10 mm, 在热带地区降水量为 50 mm, 则相对应的湿项延迟变化范围为 1~4 mm。

2 映射函数

映射函数将任意仰角的总大气延迟与天顶延迟联系起来, 为 $\Delta L_z = m(\varepsilon, \vec{P}) \Delta L_z$, 反映了大气状态与激光传输延迟间的关系。早期的大气延迟映射函数用于甚长基线干涉测量技术, 最早由 Saastamoinen^[3] 提出的映射函数, 在大气均匀一致时, 可简单表述为 $m(\varepsilon, \vec{P}) = 1/\sin\varepsilon$, 而 Marini^[4] 在该式的基础上第一次提出了连分数形式的映射函数:

$$m(\varepsilon, \vec{P}) = \frac{1}{\sin\varepsilon + \frac{a}{\sin\varepsilon + \frac{b}{\sin\varepsilon + \frac{c}{\sin\varepsilon + \dots}}} \quad (9)$$

式中: a, b, c 等参数可根据气象数据来估计。Marini 发现该连分式和光线追迹法相比, 通过调整系数后计算误差不超过 0.1%, 因此, 后期大部分映射函数的发展即为该形式的扩展形式。系数 a, b, c 在经验资料的基础上获得, 它们的不同代表了射线在较低高度角下的弯曲程度不同, 其主要局限是没有什么明显的物理意义, 也不能随意改变以适应不同的地区和季节。许多学者在此基础上做了一些变化, 得出了不同的形式, 表 1 列出常用映射函数和其参数的对比, 表中, P 为地面总气压, e 为表面水蒸气气压, T 为表面温度, β 为减温率, h_i 为对流顶层高度, h_e 为等温面高度, λ 为纬度, H 为地面站高度, DOY 为从一年开始后的世界标准时间。Davis^[5] 等人在 CfA2.2 模型中指出: 该映射函数跟地球表面压力和温度相关, Herring^[6] 通过拟合高空探测数据, 改变连分式系数, 使其只和温度、站点纬度和站点海拔高度相关, 其三阶连分式为:

$$m(\varepsilon, \vec{P}) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1+c}}}{\sin\varepsilon + \frac{a}{\sin\varepsilon + \frac{b}{\sin\varepsilon}}} \quad (10)$$

Niell^[7] 的 NMF 模型基于该连分式并对其系数做了改进, 他推导出连分式系数与测站纬度和观测日期相关。该公式可忽视观察站点海拔高度的偏差, 并完全摆脱地球表面气象数据的影响, 因此 NMF 模型非常适合于无气象参数下的计算, 文中拟采取 NMF 模型进行计算。

表 1 各映射函数及其参数对照

Tab.1 Parameterization of coefficients for mapping functions

Mapping function	Reference	Minimum elevation /($^{\circ}$)	Coefficient parameterization	
			Hydrostatic	Wet
CfA2.2	Davis et al. [1985]	5	P, e, T, β, h_i	-
Ifadis	Ifadis [1986]	2	$P, T, e^{1/2}$	$P, T, e^{1/2}$
MTT	Herring [1992]	3	T, λ, H	T, λ, H
NMF	This paper	3	DOY, λ, H	λ
Lanyi	Lanyi [1984]	6	T, h_i, h_e, β (total)	

设地球在南北半球对称, 大气均匀一致的情况下, 可使用简单形式的映射函数 $m(\varepsilon, \vec{P}) = 1/\sin\varepsilon$ 来表示大气延迟状况。根据美国 ICESat 卫星参数, 激光测高仪天顶指向角差值不会超过 10° , 则简单式的数值结果应该和其他映射函数结果接近, 因此将以上简单式和 NMF 模型计算结果的差值进行比较, 来检验 NMF 模型和简单函数对大气延迟造成的不同影响。NMF 模型中系数的选取如表 2 和表 3 所示, 其中表 2 中 average 值表示 1 月份和 7 月份的平均值, amplitude 值表示 1 月份和 7 月份差值的一半, 因此对于干项延迟映射函数系数, 在确定了纬度 λ_i 和时间 t 后, 系数由公式(11)给出:

$$a(\lambda_i, t) = a_{\text{avg}}(\lambda_i) - a_{\text{amp}}(\lambda_i) \cos\left(2\pi \frac{t - T_0}{365.25}\right) \quad (11)$$

式中: $T_0=28$, 同理系数 b, c 也用该公式计算。对于湿项延迟映射函数来说, 直接用表 3 中的参数计算。最后结

表 2 NMF 映射函数干项系数

Tab.2 Hydrostatic coefficients of NMF mapping function

Coefficient	Latitude(average)				
	15°	30°	45°	60°	75°
<i>a</i>	1.276 993 4e-3	1.268 323 0e-3	1.246 539 7e-3	1.219 604 9e-3	1.204 599 6e-3
<i>b</i>	2.915 369 5e-3	2.915 229 9e-3	2.928 844 5e-3	2.902 256 5e-3	2.902 491 2e-3
<i>c</i>	62.610 505e-3	62.837 393e-3	63.721 774e-3	63.824 265e-3	64.258 455e-3
	amplitude				
<i>a</i>	0.0	1.270 962 6e-5	2.652 366 2e-5	3.400 045 2e-5	4.120 219 1e-5
<i>b</i>	0.0	2.141 497 9e-5	3.016 077 9e-5	7.256 272 2e-5	11.723 375e-5
<i>c</i>	0.0	9.012 840 0e-5	4.349 703 7e-5	84.795 348e-5	170.372 06e-5

表 3 NMF 映射函数湿项系数

Tab.3 Wet coefficients of NMF mapping function

Coefficient	Latitude				
	15°	30°	45°	60°	75°
<i>a</i>	5.802 189 7e-4	5.679 484 7e-4	5.811 801 9e-4	5.972 754 2e-4	6.164 169 3e-4
<i>b</i>	1.427 526 8e-3	1.513 862 5e-3	1.457 275 2e-3	1.500 742 8e-3	1.759 908 2e-3
<i>c</i>	4.347 296 1e-2	4.672 951 0e-2	4.390 893 1e-2	4.462 698 2e-2	5.473 603 8e-2

果的高度矫正结果由 $\Delta L = \Delta L_z \left(\frac{1}{\sin(\varepsilon)} - f(\varepsilon) \right)$ 给出, $f(\varepsilon)$ 为连分式(10)。计算结果如图 1 所示,在不同纬度及观测角情况下,图(a)、图(b)分别给出了简化函数与 NMF 函数的差值结果。图(a)为 $t=12$ UT 标准世界时下的计算值,图(b)为 $t=1200$ UT 世界时下计算值。可以看出,当高度角大于 75° 时,简化映射函数与 NMF 映射函数相比非常接近,延迟误差影响小于 0.2 mm。当高度角大于 80° 时,延迟误差影响小于 0.1 mm,这对 2.35 m 的天顶总延迟来说是可以忽略的。

如果设计的星载激光测高系统在低高度角情况下工作,简化映射函数与 NMF 映射函数的误差则很明显,大气延迟误差可达 30 m 左右。通过计算,其他各种不同的映射函数在低高度角情况下都会出现较大差值,一方面是因为大气折射在低高度角的变化更为复杂,另一方面因为这些映射函数模型还有很多局限性,不能客观真实反应大气折射规律。现阶段星载非扫描型激光测距系统的角度控制精度都很高,一般天顶角指向角变化在 10° 以内,即高度角大于 80° ,因此对类似于 GLAS 的星载激光测高系统来说,大气延迟矫正可采用简单函数来计算。

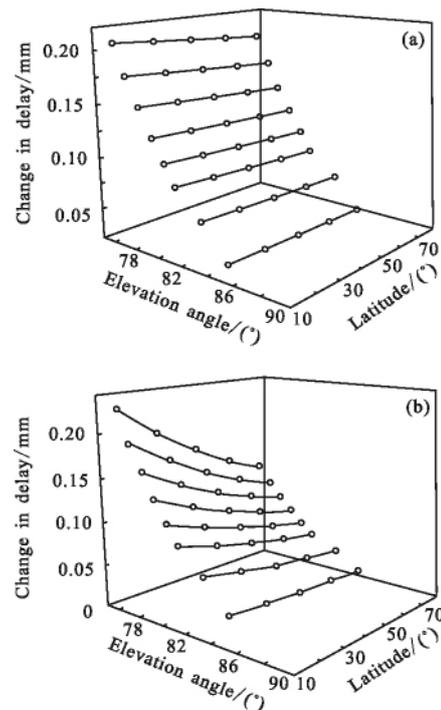


图 1 NMF 函数相对于简单函数的随高度角和纬度变化的大气延迟图

Fig.1 Change in delay of the simple function compared with Niell mapping function

3 指向角偏差

光束在大气中传输弯曲使激光足印位置产生偏移,可能造成卫星激光指向角的计算误差,该误差不会对大气延迟计算造成直接影响,但是在获得激光足印位置时,需要考虑在内用来校准激光指向角的偏差,因为该指向角被用于计算映射函数值。激光束的真实路径如图 2 中的虚线所示, P_1 为测高仪在指向角

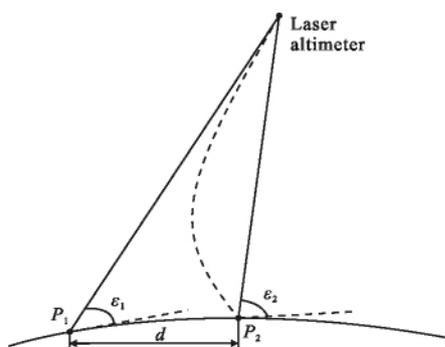


图 2 激光测高仪光束几何路径

Fig.2 Geometry ray path of laser altimeter

为 $\alpha_1=90^\circ-\epsilon_1$ 下激光足印的期望位置, P_2 为激光足印的实际位置,由于大气折射的原因, P_2 相对于 P_1 移动了距离 d ,如果卫星坐标和 P_2 点坐标被用来计算卫星的指向角 $\alpha_2=90^\circ-\epsilon_2$,则会造成误差 $\alpha_1=\alpha_2-\delta\alpha$ 。在激光指向角小于 75° 的情况下,该误差公式可用以下的简单表达式来描述^[8]:

$$\delta\alpha=0.00452^\circ P \tan\alpha_2(273+T) \quad (12)$$

以美国 NOAA 气象卫星平均数据为例,取 $T=15^\circ\text{C}$, $P=1013\text{ hPa}$,则 $\delta\alpha=0.016^\circ \tan\alpha_2$,在轨道高度为 600 km ,激光指向角变化范围为 10° ,可能造成指向角 $10''$ 的误差,而激光足印位置将会偏离真实值 30 m 左右。该公式同样适用于地球水平线大气压力场对激光足印位置造成影响的估算。

4 结论

星载激光测高仪的测距精度^[9]受大气传输延迟的影响较大,需要综合考虑地球表面大气气压、温度、湿度、纬度等参数,并结合映射函数进行修正。文中分别讨论了大气传输中激光测高仪测距精度的影响因素,并基于简单映射函数和 NMF 映射函数计算了大气延迟量,结果表明:光束传输延迟量主要由干项延迟所

决定,其最大延迟量达 2.35 m 。

当然仅仅通过以上公式来修正大气延迟是不够的,地球大气是一个动态系统,其各项参数变化的频率很快,因此,还需要大量的外部数据来获得激光足印内大气压强和水气的变化量。美国在 GLAS 系统中使用了国家环境预报中心(NCEP)全球分析系统,通过该系统可实时分析大气状况,并能从地面站、浮标、高空探测仪以及 NOAA 卫星上获得相关气象资料。该数据系统每 6 h 更新一次采样率,坐标精度可达经纬度 1° 以内,有力支持了测高仪光束路径内的大气状态分析。

参考文献:

- [1] Herring T A, Quinn K. Atmospheric delay correction to GLAS laser altimeter ranges [R]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 1999.
 - [2] Owens J C. Optical refractive index of air: dependence on pressure, temperature, and composition [J]. *Appl Opt*, 1967, 6: 51-59.
 - [3] Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites [M]// Henriksen S W, Mancini A, Chovitz B H. The Use of Artificial Satellites for Geodesy: Geophysical Monographs Series, vol. 15. Washington, D C: AGU, 1972: 247-251.
 - [4] Marini J W. Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile [J]. *Radio Science*, 1972, 7(2): 223-231.
 - [5] Davis J L, Herring T A, Shapiro I I. Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length [J]. *Radio Science*, 1985, 20(12): 1593-1607.
 - [6] Herring T A. Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data [C]// Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, 1992: 157-164.
 - [7] Niell A E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths [J]. *J Geophys Res*, 1996, 101 (B2): 3227-3246.
 - [8] US Naval Observatory, Royal Greenwich Observatory. The Astronomical Almanac for The Year 1999 [M]. Washington: United States Government Printing Office (USGPO); London: Her Majesty's Stationery Office(HMSO), 1998.
 - [9] Yao Pingping, Zhao Xin. Measurement of flight time for satellite laser altimeter based on FPGA[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 679-682. (in Chinese)
- 姚萍萍, 赵欣. 基于 FPGA 的星载激光测高仪飞行时间测量 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 679-682.