

用太阳光度计获取激光波段大气透过率

陈新民¹, 李建玉^{2*}, 魏合理^{1,2}, 黄宏华², 钱仙妹²

(1. 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

2. 中国科学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: 随着激光技术在众多科学领域的应用, 激光波段大气透过率的实时获取尤为重要。基于测量和模拟计算分析研究, 提出利用太阳光度计测量的数据获取红外波段激光大气透过率的方法, 该方法低成本、高时效、可同时获得多激光波段的大气透过率。通过与 532 nm 激光雷达实测结果的对比, 误差小于 5%, 并将该方法与激光传输评估软件根据实时测量的大气参数模拟计算得到的两个红外激光波段透过率进行了对比, 统计误差分别小于 8.5% 和 8.0%。该方法对激光工程在实际大气中的应用具有参考价值。

关键词: 太阳光度计; 大气透过率; 激光传输; 红外波段; 对比验证

中图分类号: P412.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.S209002

Extraction of atmospheric transmittance of laser waveband using sun-photometer

Chen Xinmin¹, Li Jianyu^{2*}, Wei Heli^{1,2}, Huang Honghua², Qian Xianmei²

(1. School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: It is important to obtain the real-time atmospheric transmittance of laser waveband with the application of laser technology in numerous scientific fields. Based on measurements and researches of analysis on analogy calculation, a methodology making use of the measurements of sun-photometer to obtain the atmospheric transmittance of infrared laser was proposed. The method was low-cost, high effective, and simultaneous for multiple laser wavebands. Compared with the measurements by 532 nm lidar, the transmittance error is less than 5%. The statistical errors of two infrared laser wavebands are less than 8.5% and 8% respectively, compared with the calculated results by use of the laser transmittance evaluation software based on the real-time measurements of the atmospheric parameters. This method is valuable for the applications of laser engineering in the real atmosphere.

Key words: sun-photometer; atmospheric transmittance; laser transmission; infrared waveband; comparison certification

收稿日期: 2019-05-10; 修订日期: 2019-06-20

基金项目: 中国科学院合肥物质科学研究院院长基金(YZJJ201608); 中国科学院 GF 实验室创新基金(CXJJ-16S081)

作者简介: 陈新民(1994-), 男, 硕士生, 主要从事大气探测技术方面的研究。Email: chenxm16@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 魏合理(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事红外辐射大气传输、大气微量成分遥感、卷云红外辐射特性方面的研究。Email: hlwei@aiofm.ac.cn

通讯作者: 李建玉(1983-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事大气探测技术及辐射传输方面的研究。Email: lijianyu@aiofm.ac.cn

0 引言

激光具有高亮度、良好的单色性、方向性及相干电磁波的一切通性,在很多科学领域都得到了广泛应用。任何波长的激光在大气中传输时都会因大气中的分子和气溶胶的吸收、散射而引起强度衰减,这种衰减直接影响其在激光探测、激光制导、激光测距、激光通信等激光工程中的应用^[1-3]。激光在大气中的传输通常用大气透过特性来表述,大气透过率是这些激光工程应用中的重要参数^[4]。了解与掌握激光大气透过率规律不仅具有重要的学术价值,而且利用其特性所设计的装置在天文、气象以及国防上都具有重要的应用前景。因此,获取实时的激光波段大气透过率具有重要意义。

目前,国内一些学者利用 Lowtran、Modtran、Fascode 等系列大气透过率计算软件包计算获取激光大气透过率^[5],依据所处地域的气象特点及当天天气因素选择特定的模式进行模拟计算,这些软件包利用经过统计得到的经验公式反演当前大气光学传输特性,需要实时确定大气气溶胶的组成、谱分布、总含量及温湿度等气象参数,因此在计算大气光学透过率的实时性方面存在一定的缺陷;另外一种方法是以激光为光源的主动式探测技术^[6-7],对于双端收发式的测量,仅能局限于近地层水平大气透过率,很难得到斜程大气透过率;采用后向散射的单端法,如激光雷达,但其探测高度有限,成本较高,且一台激光器仅能用于实测某一特定激光波段的大气透过率。因此,需要寻求一种低成本、高效、能同时获取多激光波段大气透过率的方法。

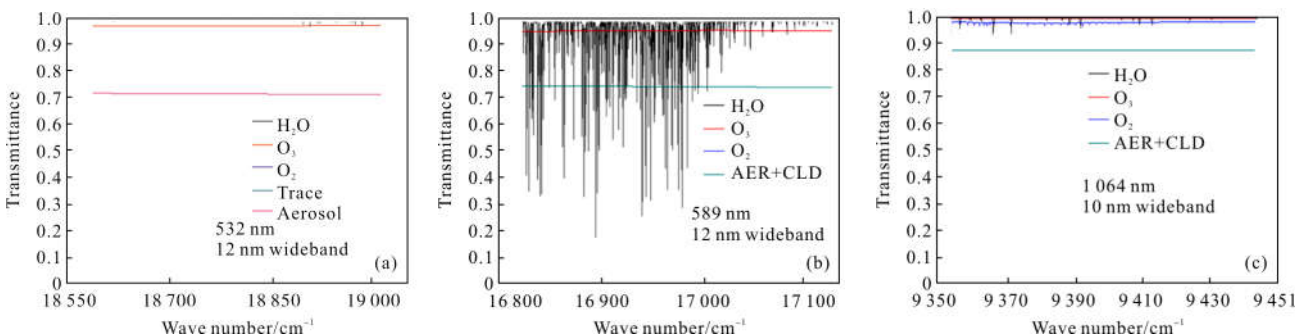
以太阳为光源的太阳光度计技术成本低,测量波段多,它是目前地基遥感探测大气透过率、气溶胶和水汽总量的一个常用且有效的监测手段,不仅广

泛应用于大气探测、环境检测、气候变化等研究,也是卫星遥感大气订正、定标与可靠性检验的重要工具^[8],且我国及全球有多个气溶胶观测网站点的太阳光度计的测量数据可供使用。文中提出基于太阳光度计技术的外推法获取激光波段大气透过率方法,主要基于多个其他非吸收波段的太阳直接辐射测量可拟合得到需要的激光波段气溶胶透过率^[9],再与由实测的水汽含量和当地大气模式模拟计算的水汽透过率及其他分子吸收和散射透过率进行透过率综合得到非直接测量的激光波段大气透过率,也称之为外推法。这也为利用 AERONET、SKYNET、SONET 等气溶胶观测网站点数据建立激光波段大气透过率数据库奠定基础。

1 各激光波段大气衰减特性模拟计算分析

激光通过大气传输时由于气体分子和气溶胶的吸收和散射作用会引起能量损失,利用大气辐射传输软件 MOTRAN5 的高分辨率(0.1 cm⁻¹)版本模拟计算了 532、589、1 064、1 315、1 540、3 800 nm 六个激光波段在中纬度夏季乡村型气溶胶能见度 23 km 大气模式下一定带宽的透过率,如图 1 所示。不同吸收气体下各波段宽带与激光窄带平均透过率取值如表 1 所示,表 1 中 * 代表透过率大于 0.999 9。

图 1 和表 1 给出了对应激光波段一定带宽下各种主要吸收气体和气溶胶的透过率,从图和表中可以看出,所有激光波段在大气中传输时都受到气溶胶的影响而衰减,而 589、1 315、3 800 nm 透过率受水汽吸收影响较大,尤其 1 315 nm 波段,在激光波数上的水汽透过率是 0.956,而一定带宽下的平均透过率仅 0.756,并不像 532、589、1 064 nm 虽受到 O₃、O₂ 的些许影响,但整个带宽上 O₃、O₂ 的吸收比较平缓,故宽带平均透过率与窄带平均透过率的差



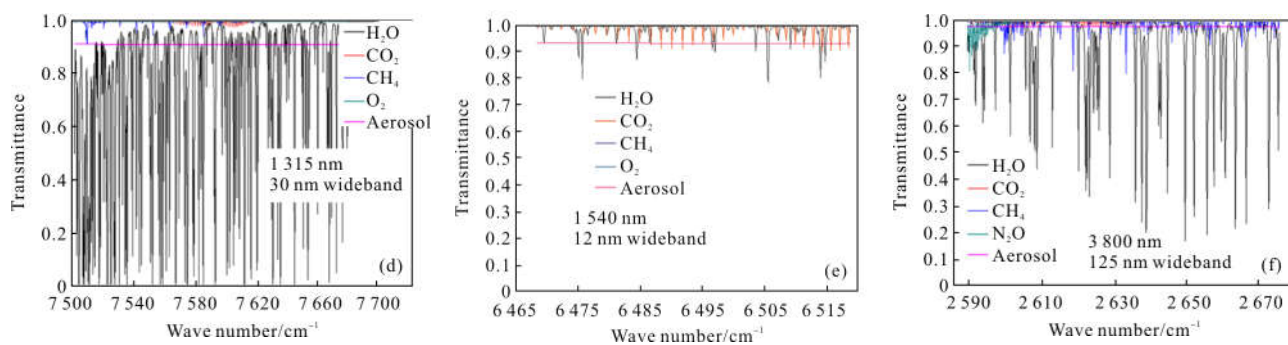


图 1 MODTRAN5 模拟计算得到的各激光波段主要气体成分及气溶胶的透过率

Fig.1 Transmittance of main gas components and aerosol of each laser waveband calculated by MODTRAN5

表 1 各激光波段不同带宽分子平均透过率

Tab.1 Average transmittance of molecules of each laser waveband in different bandwidths

Length/nm	Waveband/nm	H ₂ O	O ₃	O ₂	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
532	10	0.999 6	0.972 9	0.998 31	*	*	*
	2	0.999 7	0.972 3	0.998	*	*	*
	0.5	0.999 7	0.972 3	0.998	*	*	*
	0.1	0.999 8	0.972 2	0.998	*	*	*
589	10	0.958 8	0.955 3	0.998 64	*	*	*
	2	0.927 8	0.955 8	0.999 02	*	*	*
	0.5	0.906 0	0.955 8	0.999 04	*	*	*
	0.1	0.956 6	0.955 8	0.999 03	*	*	*
1 064	10	0.999 1	*	0.983 5	0.999 9	*	*
	2	0.999 3	*	0.982 48	0.999 9	*	*
	0.5	1	*	0.982 46	0.999 9	*	*
	0.1	1	*	0.982 16	0.999 9	*	*
1 315	10	0.819 7	*	0.999 43	0.998 7	0.999 1	*
	2	0.782 7	*	0.999 49	0.997 2	0.999 3	*
	0.5	0.756 4	*	0.999 5	0.997 3	0.999 1	*
	0.1	0.823	*	0.999 5	0.995 3	0.998 9	*
1 540	7 603.15	0.956 3	*	0.999 5	0.998 5	0.999 7	*
	10	0.985 6	*	*	0.993 3	1	1
	2	0.989 2	*	*	0.991 1	1	1
	0.5	0.997 5	*	*	0.992 6	1	1
3 800	0.1	0.999 1	*	*	0.972 0	1	1
	80	0.909 5	*	*	0.997 0	0.991 1	0.999 7
	50	0.917 0	*	*	0.996 5	0.990 6	1
	10	0.968 9	*	*	0.995 2	0.986 9	1

别不太大。部分激光波段受 CO₂、O₂、CH₄、N₂O 的影响很小, 选取合适的带宽也可减少一些吸收气体的影响, 如 3 800 nm 波段, 选取 80 nm 带宽以下时可以减少 N₂O 的影响。

针对水汽吸收线多且复杂的 589、1 315、3 800 nm 需要探寻宽带透过率与窄带透过率的关系。我国地势复杂, 不同地区大气水汽含量差异较大, 即使同一地区不同月份的水汽含量差异也会较大, 因此, MODTRAN5 下的美国大气模式不适用于我国使用, 图 2 利用适用于我国大气模式的通用大气辐射传输计算软件 CART 计算了 1 315、3 800 nm 不同水汽含量下宽带平均透过率与窄带平均透过率随水汽含量的变化^[10]。

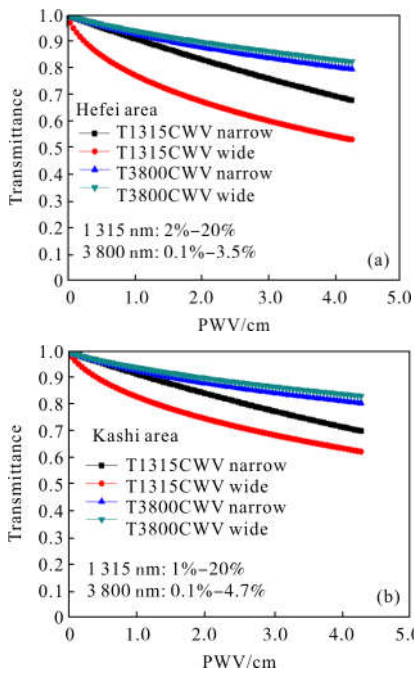


图 2 我国不同地区 1 315 nm 和 3 800 nm 宽带和窄带透过率随水汽含量变化及引起的相对偏差

Fig.2 Relative deviation of changing of water vapor with wideband and narrowband transmittances of 1 315 nm and 3 800 nm in different regions of China

由图 2 可见, 1 315 nm 宽带与窄带偏差较大, 不同地区引起的偏差程度也不同, 因此需结合当地大气模式下实测的水汽对宽带透过率进行修正, 得到激光波段透过率。因此, 这里考虑采用 CART 软件中我国多个典型地区的大气模式, 结合太阳光度计实测的水汽总量和气溶胶透过率, 从太阳光度计测量数据中得到激光大气透过率。

以上内容是采用 MODTRAN5 分析了 0.1 cm⁻¹ 分辨率的各激光波段受主要吸收气体和气溶胶的影响, 采用 CART 分析了我国大气模式下不同地区激光透过率随水汽含量的变化, 而对于 1 315 nm 波段, 实际工程应用时采用 0.1 cm⁻¹ 分辨率不足以计算水汽透过率精度, 因此, 实际计算时采用国际上计算精度最高的逐线积分辐射传输模式 LBLRTM 再结合 CART 中我国大气模式来计算水汽及其他分子的吸收和散射透过率。

2 外推法提取激光谱线透过率的计算模型

处理太阳光度计观测数据采用“截距法”, 对某时刻仪器测得的信号 $V(\lambda, t)$ 从以下公式获得大气总光学厚度:

$$\tau(\lambda, t) = \frac{1}{m(\theta)} \ln \frac{V_0(\lambda, t)}{V(\lambda, t)/(d_0/d)^2} \quad (1)$$

大气总光学厚度是由三部分组成的: 瑞利散射光学厚度 $\tau_R(\lambda)$ 、气体吸收(如 O₃、水汽吸收)光学厚度 $\tau_g(\lambda)$ 和气溶胶光学厚度 $\tau_a(\lambda)$, $\tau_a(\lambda)$ 可由公式(1)计算的总光学厚度扣除瑞利散射光学厚度和气体吸收光学厚度得到。即:

$$\tau_a(\lambda) = \tau(\lambda) - \tau_R(\lambda) - \tau_g(\lambda) \quad (2)$$

在大气气溶胶粒子谱分布符合 Junge 谱分布的条件下, 不同波长的气溶胶光学厚度满足 Ångström 公式:

$$\tau_a(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (3)$$

对公式(3)两边取对数, 利用实验室的 POM02 型 (400、500、675、870、940、1 020、1 627、2 200 nm) 太阳光度计实测的 400、500、675、870、1 020、1 627 nm 六个非吸收波段气溶胶光学厚度, 采用最小二乘法进行拟合可得 Ångström 指数 α 和大气浑浊度系数 β ^[11]。由公式(3)可得 532、589、1 064、1 315、1 319、1 540 和 3 800 nm 等激光波段气溶胶光学厚度, 则激光波段气溶胶透过率如下:

$$T_a(\lambda) = \exp(-\tau_a(\lambda)) \quad (4)$$

大气总的透过率是大气中各个组分(瑞利散射、臭氧吸收、水汽吸收、混合气体吸收和气溶胶消光)分别引起的大气衰减的乘积。从图 1 中可以看出, 影响这几个激光波段大气透过率的主要成分是大气气

溶胶和水汽。水汽与气溶胶同为大气中变化复杂,受时空影响较大,且最不确定的因素,气溶胶透过率 T_a 可由公式(4)得到,而水汽透过率则可根据太阳光度计实测的水汽含量借助于逐线积分辐射传输模式 LBLRTM 进行模拟计算得到,利用 POM02 太阳光度计 940 nm 实测的整层大气水汽总量计算得到激光波段水汽透过率 T_{LW} 。

大气分子散射透过率和其他影响很小的吸收气体透过率也可通过当地大气模式进行模拟计算得到 T_{Lother} , 则外推法获取的激光透过率 T_L 可由下式表示:

$$T_L(\lambda) = T_a(\lambda) \cdot T_{LW}(\lambda) \cdot T_{Lother}(\lambda) \quad (5)$$

据上所述内容建立的外推法激光波段大气透过率提取模型如图 3 所示。

该方法首先利用太阳光度计测量的 400、500、675、870、1 020、1 627 nm 六个非吸收波段太阳直接辐射得到气溶胶光学厚度,再根据公式(3)、(4)得到需要的激光波段气溶胶透过率 T_a , 然后利用 940 nm 波段反演得到水汽总量^[2], 并对当地大气模式的水汽廓线进行修正, 根据实测的水汽总量及修正后的水汽廓线借助于辐射传输模式进行模拟计算得到水

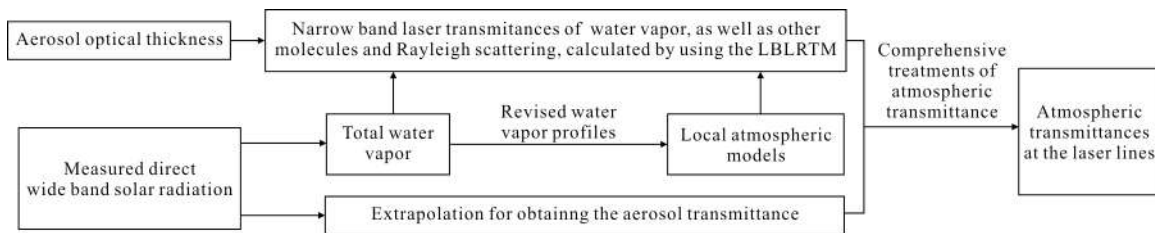


图 3 外推法提取激光波段大气透过率计算模型流程图

Fig.3 Calculation model flow chart of extrapolation method for extracting laser waveband atmospheric transmittance

汽窄带透过率 T_{LW} , T_{Lother} 也可根据当地大气模式模拟计算得到,最后根据公式(5)可得到激光波段透过率 T_L 。 T_a 和 T_{LW} 都是大气中最不确定的因素,由于增加了实际测量的气溶胶衰减和实际测量的水汽总量,相对仅用模式计算,获得激光大气透过率的精度有很大的提高。该方法不仅适用于日本 POM 型太阳光度计,也适用于法国的 CE 型和我们自行研制的 DTF 型太阳光度计,可获取多激光波段大气透过率。

3 外推法提取激光波段大气透过率的试验验证和误差分析

3.1 外推法提取多个激光波段大气透过率软件

针对 POM02 型太阳光度计,根据图 3 建立的外推法提取激光波段大气透过率模型,开发了 POM02 型太阳光度计激光波段大气透过率计算软件,如图 4 所示。

图 4 中上半部分显示的是实测的 500、675、870、940、1 020、1 627、2 200 nm 波段全天原始信号变化曲线,下半部分是反演的水汽总量及根据外推法提取的各激光波段透过率变化曲线,图中根据需要仅显示了 532、589、1 064、1 315、3 800 nm 波段透过率以及 550 nm 的气溶胶光学厚度,另外存储文档

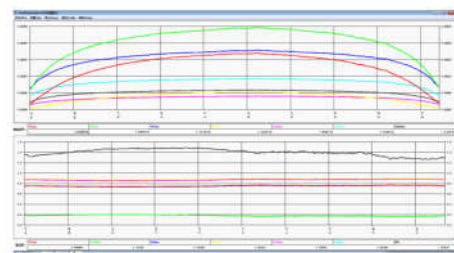
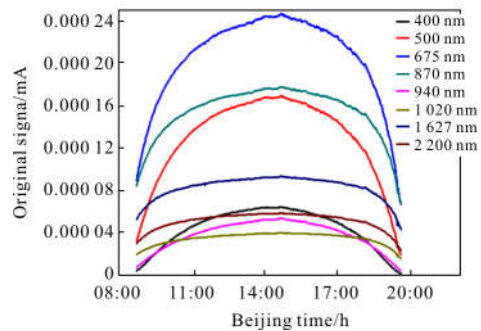


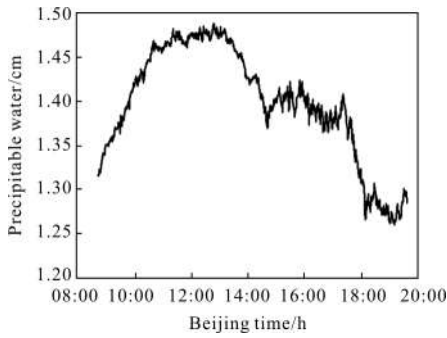
图 4 太阳光度计外推法提取多个激光波段大气透过率软件
Fig.4 Software of atmospheric transmittance of multiple laser wavebands based on the extrapolation of sun-photometer

里还有 1 319、1 540 nm 波段透过率。各波段某天原始信号、反演的水汽总量及透过率变化如图 5 所示。



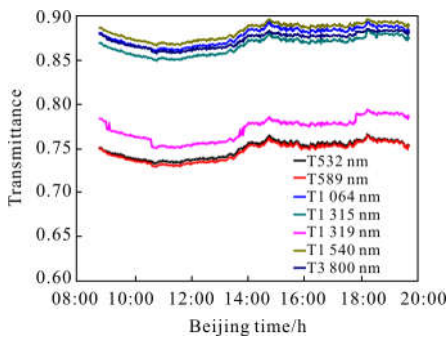
(a) 太阳光度计测量的原始信号

(a) Original signal measured by sun-photometer



(b) 太阳光度计反演的水汽总量

(b) Water vapor total amount reversed by sun-photometer



(c) 外推法提取的多个激光波段大气透过率

(c) Atmospheric transmittance of multiple laser waveband extracted by extrapolation method

图 5 原始信号、水汽和大气透过率

Fig.5 Original signal, water vapor and atmospheric transmittance

3.2 外推法提取的 532 nm 透过率的试验验证和误差分析

2014 年 10 月 3~20 日,在合肥地区,532 nm 激光雷达与 POM02 型太阳光度计进行了同时同地对比试验,试验期间共获取了 8 天有用数据,将太阳光度计外推的 532 nm 透过率与 532 nm 激光雷达对应时刻的透过率进行对比,结果如图 6 所示,由图可见,结果一致性很好,统计后的平均相对误差为 4.43%。

2016 年 7 月和 9 月在西北地区将 POM 型太阳光度计外推的 532 nm 气溶胶透过率与 532 nm 激光雷达测量的气溶胶透过率进行了对比,对应时刻对比结果如图 7 所示,从对比结果可以看出,各天透过率变化趋势基本吻合,统计得到 10 天的平均相对误差为 3.07%。从图 6 和图 7 也可见,合肥地区的气溶胶透过率明显低于西北地区,表明西北大气较清洁。

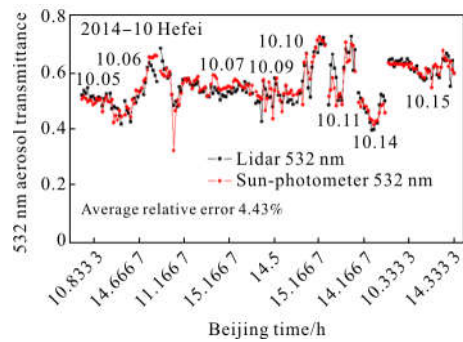


图 6 合肥地区用太阳光度计用文中外推方法获取的 532 nm 激光透过率与激光雷达测量结果的对比

Fig.6 Result comparison of 532 nm laser transmittance extracted by extrapolation method with sun-photometer and by laser radar in Hefei

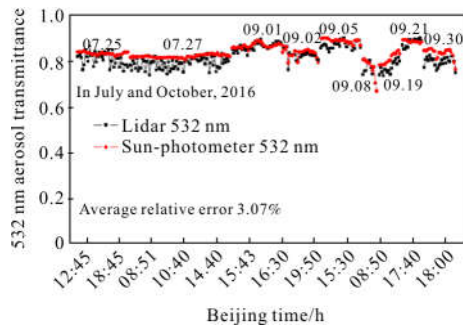


图 7 西北地区外推法获得的 532 nm 透过率与激光雷达的对比结果

Fig.7 Result comparison of 532 nm transmittance extracted by extrapolation method and by laser radar in the Northwest area

3.3 外推法提取的红外激光波段大气透过率的试验验证和误差分析

文中的激光大气传输系统在外场试验实时测量影响激光大气传输的主要大气参数,应用到激光大气传输评估软件 CLAP^[13]中可实时得到各激光波段大气透过率。课题组将太阳光度计外推的 1 315、3 800 nm 透过率与外场试验结果进行比较和误差分析,结果如下:

(1) 外推的 1 315 nm 激光透过率

图 8 给出了太阳光度计采用外推法获取的 1 315 nm 透过率 T_L 与激光大气传输系统通过实测的大气参数模式计算的 1 315 nm 透过率的对比。从对比结果可以看出,各天变化趋势基本吻合,部分天在部分时刻模式计算的结果有些突兀,而太阳光度

计在有薄云影响时,透过率变化会较明显,统计得到 10 天的平均相对误差为 8.08%。由图可以看出,外推的结果小于模式计算结果,这是因为激光大气传输评估软件通过实测的大气参数模式计算的是有限路径上的激光大气透过率,而太阳光度计测量的是整层大气透过率。

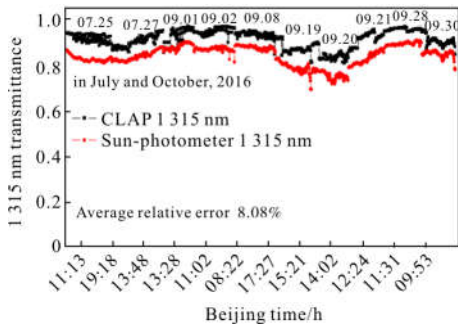


图 8 外推的 1315 nm 透过率与传输软件计算结果比较

Fig.8 Result comparison of 1315 nm transmittance extracted by extrapolation method and calculated by the transmission software

(2) 外推的 3800 nm 激光透过率

图 9 给出了太阳光度计采用外推法获取的 3800 nm 透过率与激光大气传输评估软件通过实测的大气参数模式计算的 3800 nm 透过率的对比。从对比结果可以看出,各天变化趋势基本吻合,统计得到 10 天的平均相对误差为 7.74%。由图可以看出,外推的结果小于模式计算结果,这也是因为激光大气传输评估软件通过实测的大气参数模式计算的是有限路径上的激光大气透过率,而太阳光度计测量的是整层大气透过率。

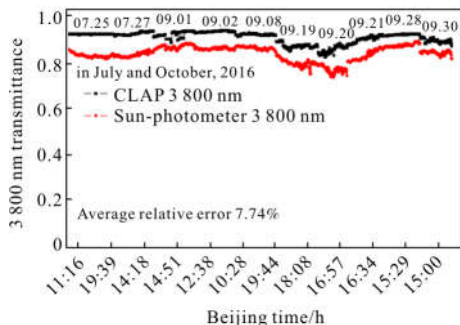


图 9 外推的 3800 nm 透过率与传输软件计算结果比较

Fig.9 Result comparison of 3800 nm transmittance extracted by extrapolation method and calculated by transmission software

4 结 论

通过模拟计算,分析了 532、589、1064、1315、1540、3800 nm 六个激光波段在不同带宽的大气透过率,发现这些激光波段主要受大气气溶胶和水汽影响,因此建立了基于太阳光度计技术的外推法获取激光波段大气透过率的计算模型。该方法主要基于多个非激光波段测量拟合得到激光波段气溶胶透过率,再与由实测的水汽含量和当地大气模式模拟计算得到的透过率,进行综合得到激光波段透过率,并基于 POM02 型太阳光度计,开发了外推法提取多个激光波段大气透过率软件。外推法提取的 532 nm 透过率在合肥和西北地区与 532 nm 激光雷达进行了对比试验和误差分析,统计平均相对误差 < 5%,还将外推得到的 1315、3800 nm 红外激光大气透过率与激光大气传输评估软件通过实测的大气参数模式计算透过率进行了对比试验和误差分析,统计平均相对误差分别 < 8.5% 和 < 8.0%,因此,基于太阳光度计技术的外推法获取激光波段大气透过率具有一定的可靠性,这为后续利用气溶胶观测网站点太阳光度计实测数据获取实时的激光波段大气透过率或为建立激光波段大气透过率数据库奠定了基础。

参考文献:

[1] Sabah anwer salman, Jasim mohammed khalel, Wedad hano abas. Calculation of the attenuation of infrared laser beam propagation in the atmosphere [J]. *Journal of Research Diyala Humanity*, 2009, 36(4): 81-91.

[2] Shen Zhenmin, Zhao Tong, Wang Yuncai, et al. Underwater target detection of chaotic pulse laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48 (4): 0406004. (in Chinese)
沈振民, 赵彤, 王云才, 等. 混沌脉冲激光雷达水下目标探测[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(4): 0406004.

[3] Yang Chenglong, Yan Changxiang, Yang Yufei. Isolation of optical antenna of inter-satellites laser communication terminals [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10 (4): 462-468. (in Chinese)
杨成龙, 颜昌翔, 杨宇飞. 星间激光通信终端光学天线的隔离度[J]. *中国光学*, 2017, 10(4): 462-468.

[4] An Ning, Chen Yufeng, Liu Chengzhi, et al. Maximum

- detection range of satellite laser ranging system based on characteristics of laser transmission in atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0901003. (in Chinese)
- 安宁, 陈煜丰, 刘承志, 等. 基于激光大气传输特性的卫星激光测距系统的最大探测距离 [J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0901003.
- [5] Jia Guangliang, Song Yuchen. Research on calculation method of infrared atmospheric transmittance based on MODTRAN[J]. *Electronics World*, 2018(1): 71–72. (in Chinese)
- 贾光亮, 宋雨宸. 基于 MODTRAN 的红外大气透过率计算方法研究[J]. 电子世界, 2018(1): 71–72.
- [6] Wu Qingchuan, Huang Yinbo, Tan Tu, et al. High-resolution atmospheric-transmission measurement with a laser heterodyne radiometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(6): 1678–1682. (in Chinese)
- 吴庆川, 黄印博, 谈图, 等. 基于激光外差技术的高分辨率整层大气透过率测量 [J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(6): 1678–1682.
- [7] Zhang He, Qiao Chuan, Kuang Haipeng. Target geolocation based on laser range finder for airborne electro-optical imaging systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(1): 8–16. (in Chinese)
- 张赫, 乔川, 匡海鹏. 基于激光测距的机载光电成像系统目标定位[J]. 光学精密工程, 2019, 27(1): 8–16.
- [8] Li Jianyu, Xu Wenqin, Qie Lili, et al. Development and application of the portable full autocontrol sun-photometer[J]. *Optical Technique*, 2012, 38(1): 30–35. (in Chinese)
- 李建玉, 徐文清, 伽丽丽, 等. 便携式全自动太阳光度计的研制及其应用[J]. 光学技术, 2012, 38(1): 30–35.
- [9] Li Jianyu, Wei Heli, Xu Qingshan, et al. Atmospheric aerosol optical characteristics measured at several typical zones in China [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1166–1174. (in Chinese)
- 李建玉, 魏合理, 徐青山, 等. 中国部分典型地区气溶胶光学特性观测[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1166–1174.
- [10] Wei Heli, Chen Xiuhong, Dai Congming. Combined atmospheric radiative transfer (CART) model and its applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3360–3366. (in Chinese)
- 魏合理, 陈秀红, 戴聪明. 通用大气辐射传输软件(CART)及其应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3360–3366.
- [11] Gong Chunwen, Li Jianyu, Li Xuebin, et al. Influence of straw burning and dust on aerosol optical properties [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 2768–2777. (in Chinese)
- 宫纯文, 李建玉, 李学彬, 等. 秸秆燃烧和沙尘对气溶胶光学特性的影响[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 2768–2777.
- [12] Dai Congming, Wei Heli. Comparison of atmospheric precipitable water vapor measured by ground-based microwave radiometer and sun-photometer [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2013, 8(2): 146–152. (in Chinese)
- 戴聪明, 魏合理. 地基微波辐射计和太阳光度计反演大气水汽总量的对比研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2013, 8(2): 146–152.
- [13] Zhu Wenyue, Huang Yinbo, Qian Xianmei, et al. Code for laser atmosphere propagation and its applications[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(6): 451–458. (in Chinese)
- 朱文越, 黄印博, 钱仙妹, 等. 激光大气传输模拟程序 CLAP 及其应用[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6): 451–458.