

引用格式: LIU Jingjing, LI Kailing, XU Zixiang, et al. Atmosphere Temperature Profiling and a Fusion Algorithm Based on Polarization HSRL and MWR[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(7):0701001

刘晶晶,李开良,徐梓翔,等. 基于偏振高光谱激光雷达和微波辐射计的大气温度探测和融合算法研究[J]. 光子学报, 2021, 50(7):0701001

基于偏振高光谱激光雷达和微波辐射计的大气 温度探测和融合算法研究

刘晶晶,李开良,徐梓翔,庞景哲,王骏,闫庆,华灯鑫

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院,西安 710048)

摘 要:大气温度作为大气探测领域的基本参数,获得高精度大气温度廓线对于天气预报和气候研究至关重要。本文利用自行研制的偏振高光谱激光雷达实现了边界层内大气温度的全天时、高信噪比测量,提出了利用拼接法进行高光谱激光雷达和微波辐射计的数据拼接和融合,实现了二者的优势互补。结果表明:偏振高光谱激光雷达可实现 3.5 km 以下的大气温度有效探测,其误差主要在 ± 2 K 内,微波辐射计在 3 km 以内探测误差较低,而在 3 km 以上误差在 -4 K \sim -2 K,经过拼接后,在 3.5 km 以内误差为 ± 1 K,相关性由拼接前的 0.95 提升到 0.97。结果表明高光谱偏振激光雷达可有效进行边界层内大气温度的探测,经过与微波辐射计的融合,即可解决激光雷达的盲区问题,又可提升微波辐射计的探测精度。

关键词:高光谱分辨率激光雷达;偏振激光雷达;微波辐射计;大气温度

中图分类号:P412.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215007.0701001

Atmosphere Temperature Profiling and a Fusion Algorithm Based on Polarization HSRL and MWR

LIU Jingjing, LI Kailing, XU Zixiang, PANG Jingzhe, WANG Jun,
YAN Qing, HUA Dengxin

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Atmospheric temperature is the basic parameter for the detection of atmospheric fine structure, and obtaining high-precision atmospheric temperature profile is crucial for weather forecast and climate research. In this paper, the self-developed polarization high-spectral-resolution lidar is used to realize the all-day and high signal-to-noise ratio measurement of atmospheric temperature. The algorithm by combining polarization high-spectral-resolution lidar and microwave radiometer are proposed by linear splicing method, and the complementary advantages of the two are realized. The results show that the polarization high-spectral-resolution lidar can realize the effective detection of atmospheric temperature at a distance of 4 km, and the error is mainly within ± 2 K. The detection error of microwave radiometer is relatively low within 3 km, and the error is between -4 K and -2 K above 3 km. After splicing, the error is ± 1 K within 3.5 km, and the correlation increases from 0.95 to 0.97. The results show that the lidar can effectively detect the atmospheric temperature in the boundary layer. Through the integration with the microwave radiometer, the blind area problem of the lidar can be solved, and the detection accuracy of the

基金项目:国家自然科学基金(Nos.41975405, 41875034, 61675166)

第一作者:刘晶晶(1987—),女,副教授,博士,主要研究方向为云和气溶胶的大气遥感。Email: jingjingliu@xaut.edu.cn

通讯作者:华灯鑫(1964—),男,教授,博士,主要研究方向为激光雷达大气遥感。Email: dengxinhua@xaut.edu.cn

收稿日期:2021-03-30;录用日期:2021-06-03

<http://www.photon.ac.cn>

microwave radiometer can be improved.

Key words: High-Spectral-Resolution Lidar (HSRL); Polarization lidar; Microwave radiometer; Atmospheric temperature

OCIS Codes: 010.0280; 010.3640; 010.1350; 120.2230

0 引言

大气温度是大气中最重要的气象参数之一,也是大气探测领域的基本参数,高精度大气温度廓线对于短期天气预警以及提升天气预报精度具有至关重要的意义^[1-2]。近几十年来,常用的探测大气温度廓线的设备主要有探空气球微波辐射计和激光雷达。

探空气球作为探测大气温度廓线最重要最基本的工具,为天气预报和大气科学的研究提供了不可或缺的观测数据。但探空气球费用昂贵,时间分辨率低,会受到使用时间和空间的限制,且气球在高空的漂移也会对探空气球的精度产生很大影响^[3-4]。多通道微波辐射计是一种用于测量亚毫米级到厘米级波长的电磁波(微波)的辐射计,属于被动式遥感设备,经过相应的数据处理可得到大气在垂直和水平方向上的气象要素分布,如高时间分辨率的大气温湿廓线。由于其具有较强的全天候、全天时的工作能力,已经被广泛应用到大气探测研究中,极大地弥补了探空资料的不足^[5-8]。但不幸的是,由于地基多通道微波辐射计所有通道的反演权重函数从地面到高空都呈单调递减的形式,信息量有限,导致其反演精度及分辨率较低^[9-10]。激光雷达,作为一种主动遥感设备,是一种近几十年来快速发展的全新探测技术,凭借其高时空分辨率、高探测灵敏度和强抗干扰能力等优点,已成为一种有效的大气环境探测手段,在大气气象与环境探测中得到越来越广泛的应用^[11-12]。其中,高光谱-偏振激光雷达作为一种新型探测手段,综合运用偏振分光光路结合FPE透反射光谱的方法实现米信号和瑞利散射信号的精细分离,通过偏振光学器件抑制太阳背景光,提高了高光谱激光雷达系统的信噪比以及白天探测能力,可获得高时空分辨率大气温度的有效探测^[13-16]。但是,激光雷达存在反演需要其他手段作为辅助和验证、对于云层的探测能力有限难以实现云层内大气参数的高精度探测、能见度低时的高密度气溶胶散射和强白天背景光的干扰等问题,使得其探测范围及有效工作时段受到限制^[17]。

综上所述,探空气球、微波辐射计以及激光雷达在探测大气温度时各具优势,因此开展全天候、高精度大气温度廓线等参数的地基遥感技术以及多探测手段的数据融合等研究势在必行^[18-21]。因此,本文融合微波辐射计和激光雷达的大气温度探测数据,获得全天时大气温度垂直分布,既可弥补探空数据时间分辨率不足的问题,又可以实现激光雷达和微波辐射计的相互验证以及优势互补,并将融合结果与同期探空数据进行对比,进一步验证了融合方法的准确性。

1 仪器与算法

1.1 偏振-高光谱激光雷达探测大气温度

图1所示为西安理工大学自行研制的偏振高光谱激光雷达系统图(具体参数见表1),用来实现大气温度的全天时、高信噪比测量。首先为保证高光谱激光雷达探测大气温度的精度,采用控温碘分子吸收池作为鉴频器,通过PID控制算法对脉冲激光的输出频率进行锁定。Nd:YAG激光器经过锁频后向大气中发射波长为355 nm、偏振比为200:1的脉冲线偏振光,脉冲信号与大气中分子、气溶胶等物质相互作用后,产生的后向散射信号被直径为250 mm的卡塞格林望远镜接收,并以空间光传输进入如图1所示的偏振高光谱激光雷达分光系统。由于气溶胶的退偏振效应,回波信号中包含P(平行于纸面)和S(垂直于纸面)分量的偏振光,因此被准直的回波信号经过偏振分光棱镜(PBS1)后,其反射光束为S分量偏振光与部分太阳背景光,透射光束为带有Mie和Rayleigh信号的P分量偏振光,偏振方向和激励脉冲激光的偏振方向相同,再透射通过1/4波片(QWP1)变为圆偏振光,波片的快轴与激励脉冲激光的光矢量夹角为45°,最后透过FPE1,利用PMT1探测Mie散射信号,由FPE1反射的圆偏振光,再次通过QWP1变为S分量偏振光。被PBS1和PBS2反射后,透过QWP2变为圆偏振光,透过FPE2后由PMT2探测Rayleigh2通道信号强度。FPE2反射的圆偏振光,再次通过QWP2变为P分量偏振光,依次透射通过PBS2和FPE3,由PMT3探测Rayleigh1通道信号强度。回波信号中的太阳背景光噪声通过PBS1后减少1/2。根据米散射理论和辐射传输理论,大气中的分

子散射不会改变出射激光的偏振态,而不规则气溶胶粒子产生的Mie散射信号会产生退偏振效应。因此,大气分子的散射光束透过偏振分光棱镜PBS1而发生了退偏振效应的Mie散射信号被PBS1反射。在偏振HSRL系统中,FPE的光谱参数和设定参数如表2所示。FPE1透射光谱中心频率和出射激光频率重合,用于分离Mie信号。利用FPE2和FPE3接收Rayleigh信号,用于测量大气温度变化引起的Rayleigh散射光谱展宽变化。为了提高偏振HSRL系统探测精度,应使FPE获得较大的Rayleigh信号透射率并保持较高的温度灵敏度。此外,FPE也要具有较高的Mie散射抑制率和较窄的半高全宽。综合考虑以上因素,最终确定

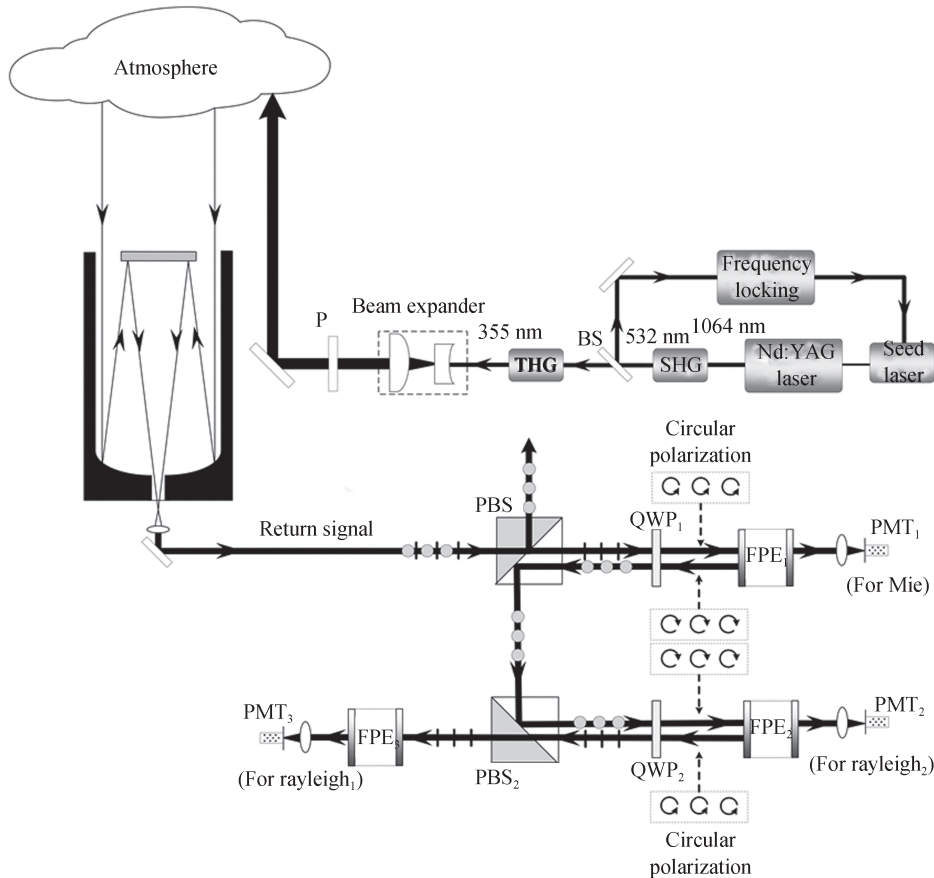


图1 高光谱偏振激光雷达系统图

Fig. 1 Spectroscopic system diagram of polarized high spectral resolution lidar

表1 高光谱偏振激光雷达系统参数
Table 1 System parameters of polarized HSRL

	Parameters	Values
Emitter and receiver system	Laser wavelength	354.7 nm
	Pulsed energy	50 mJ
	Repetition frequency	10 Hz
	Spectral linewidth	90 MHz
	Diameter of telescope	250 mm
	Field angle	0.1 mrad
	Spectroscopic system	Polarization beam splitter
Transmission extinction ratio		1 000:1
Quarter-wave plate		Precision of phase delay: $< \lambda/100$
Detector	PMTs	Hamamatsu R7056
	Quantum efficiency	0.23 @355 nm

表2 FPE的相关参数
Table 2 Performance parameters of the Filter

Item	Parameters		
FPE filter	FPE ₁	FPE ₂	FPE ₃
Frequency shift	0 GHz	+2.7 GHz	+1.25 GHz
FWHM	340 MHz	340 MHz	340 MHz
Mie rejection	/	4×10^{-7}	1×10^{-5}
Rayleigh transmittances	/	1.5%	4%
Temperature sensitivity	/	-0.011%/K	0.038%/K
Set temperature	309.5 K	313 K	311.2 K
FSR	10 GHz		
T_{peak}	0.6		

了FPE的各项参数,见表2。综上所述,上述分光系统实现了Mie和Rayleigh信号的精细分离,既提高了Rayleigh信号的利用率,又对Rayleigh通道的Mie散射噪声信号进行了有效抑制,采用该分光系统提高了激光雷达的探测信噪比。利用获得的两路Rayleigh通道的回波信号(Rayleigh1和Rayleigh2)即可进行大气温度反演,从而实现对大气温度廓线的全天时、高信噪比探测。

1.2 高光谱激光雷达的反演方法

高光谱激光雷达探测大气温度时^[22],在高度 z 处的后向散射信号功率表示为

$$P(\lambda, z) = P_0 \cdot Y(z) \cdot \frac{c \cdot t_p}{2} \cdot \frac{A_r}{z^2} \cdot \beta(\lambda, z) \cdot T^2(\lambda, z) \quad (1)$$

式中, λ 为激光波长, P_0 为发射功率, $Y(z)$ 为几何重叠因子, c 为光速, t_p 为脉冲激光的光谱宽度, A_r 为望远镜接收面积, $\beta(\lambda, z)$ 为后向散射系数, $T(\lambda, z)$ 为大气透过率。

大气中分子弹性散射谱宽是关于温度的函数,当大气温度变化时Rayleigh散射光谱的谱宽会发生变化,此时位于激光中心频率同一侧的FPE接收的Rayleigh信号能量也会发生变化,因此通过获取两个FPE的能量变化信息即可反演大气温度的变化量。

响应函数 H_s ,用来表示温度变化引起的Rayleigh散射光谱强度的变化,表示为

$$H_s = \frac{(N_1 - N_2)}{N_1} \quad (2)$$

式中, N_1 、 N_2 表示为Rayleigh通道所接收到的光子数。温度测量的灵敏度 Θ 定义为在单位温度下归一化测量信号的变化率,表示为

$$\Theta = \frac{1}{H_s} \frac{\partial H_s}{\partial T} \quad (3)$$

结合式(2)和(3),即可获得大气温度

$$T(z) = T(z_0) + \frac{[H_s(z) - H_s(z_0)]}{\Theta} \quad (4)$$

式中, z 为高度, z_0 为参考高度, $T(z_0)$ 为参考高度的温度。

1.3 微波辐射计探测大气温度

多通道微波辐射计可以测量亚毫米级到厘米级波长,是一种电磁波(微波)的辐射计,属于被动遥感设备。由于大气中某些成分在一定频率上会出现强烈辐射,当接收到这些微波时,只需要经过相应的数据处理,就可以得到大气廓线在垂直方向上的分布^[23]。

本文使用微波辐射计数据来源于西安市气象局泾河观测站,具体参数见表3。该站台的微波辐射计可对22.235至58.80 GHz之间的12个通道的亮度温度进行时序测量,测量的主要变量是12个频率(22.234、23.034、23.834、26.234、30.000、51.248、52.280、53.848、54.940、56.660、57.288、58.800 GHz)下的亮度温度,不确定度在1 K。微波辐射计前5个频段为水汽敏感频段。微波辐射计后7个频段,是由于氧共振(60 GHz附近的频带)引起的敏感波段,即温度敏感波段。本文使用的微波辐射计的温湿度、亮温、压力、高度等数据

共有47层,在0到1 km范围内100 m一个数据,之后迅速降为250 m一个数据,为了匹配其它廓线,本文将数据插值为垂直分辨率统一为50 m的廓线数据,因此从0到10 km共有201个数据。

表3 微波辐射计的相关参数
Table 3 System parameters of microwave radiometer

Parameters	Values
Type	MP3156A
Accuracy	0.1~1 K
Channels	22.234, 23.034, 23.834, 26.234, 30.000, 51.248, 52.280, 53.848, 54.940, 56.660, 57.288, 58.800

2 拼接方法

激光雷达在无云天气时可提供到达对流层顶的大气温度廓线,且具有良好的垂直分辨率(30 m),在有云天气时其探测高度虽然会降低,但有效探测高度内的精度依然较高。微波辐射计在地表到1 km之间具有良好的垂直分辨率(100 m),当超过2 km时,垂直分辨率快速下降到250 m。因此,本文提出采用线性拼接法对两者进行融合^[24]。激光雷达温度廓线(X_{lidar})、微波辐射计温度廓线(X_{MWR})与二者结合温度廓线(X_{splice})关系如式(5)所示。

$$X_{\text{splice}} = A \cdot X_{\text{lidar}} + B \cdot X_{\text{MWR}}, \quad (5)$$

式中, A 为拉曼激光雷达的缩放系数, B 为微波辐射计的缩放系数, $B=1-A$ 。具体的拼接系数见表4,其主要在HAEFELE A等^[24]的研究基础上,结合激光雷达的盲区特点以及有效探测高度 x_0 km而制定。 z_1 和 z_2 分别表示起始高度和终止高度。因此,在激光雷达盲区范围内(<1 km)采用微波辐射计的温度廓线,在 $1 \sim x_0$ km采用线性拼接,具体系数见表4,在 x_0 km以上使用微波辐射计的温度廓线。当激光雷达有效探测距离在 $1 \sim 4$ km时,在 $1 \sim x_0$ km之间使用分段线性拼接法;当激光雷达温湿度廓线有效探测距离在 $4 \sim 10$ km之间时,在 $1 \sim 4$ km和 $4 \sim x_0$ km使用分段线性拼接法。这种分段线性拼接方法,不仅将微波辐射计与激光雷达廓线进行融合,还能够消除激光雷达底层数据的盲区、实现平滑过渡,而且使用了两种方法中质量最高的部分。

表4 微波辐射计与激光雷达温度的拼接
Table 4 Temperature splicing of microwave radiometer and lidar

Effective detection altitude (x_0)	$x_0 < 1$ km	$1 \leq x_0 < 4$ km	$4 \leq x_0 < 10$ km	$x_0 = 10$ km
Values (A)	$A=0$	$1 \sim x_0$ km: $A = \frac{z - z_1}{x_0 - z_1}$ $x_0 \sim 4$ km: $A=0$	$1 \sim 4$ km: $A = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1}$ $4 \sim x_0$ km: $A = \frac{z - z_1}{x_0 - z_1}$	$A=1$
		$4 \sim 10$ km: $A=0$	$x_0 \sim 10$ km: $A=0$	

3 结果分析

图2为偏振高光谱激光雷达系统分别探测到的2020年8月7日20:00和9月4日20:00各通道的距离平方校正信号,由图可知,8月7日有效探测距离为3.5 km,而9月4日有效探测距离接近4 km,表明该偏振激光雷达系统可实现对边界层内大气温度的全天时、高信噪比测量。

图3为高光谱偏振激光雷达、微波辐射计以及探空气球获得的2020年8月7日20:00大气温度的垂直分布。由图3(a)可知:激光雷达有效探测高度为3.5 km,微波辐射计的有效探测高度为10 km,总体而言,三者的大气温度分布趋势较为一致。以探空数据探测的大气温度为真值,获得如图3(b)所示的有效探测范围内激光雷达和微波辐射计的温度误差垂直分布。高光谱偏振激光雷达在有效探测距离内的大气温度误差在 ± 2 K内,微波辐射计在3 km以下的温度误差也在 ± 2 K内,但在3 km以上,温度误差在 $-2 \sim -4$ K之间变化,说明在3 km以上的高度,微波辐射计反演的温度低于探空气球。

由图4可知,激光雷达有效探测距离为3.5 km,在其有效探测距离内进行了激光雷达、微波辐射计以及融合的大气温度廓线的对比分析,发现激光雷达数据经过与微波辐射计探测数据融合后,温度误差减小,尤

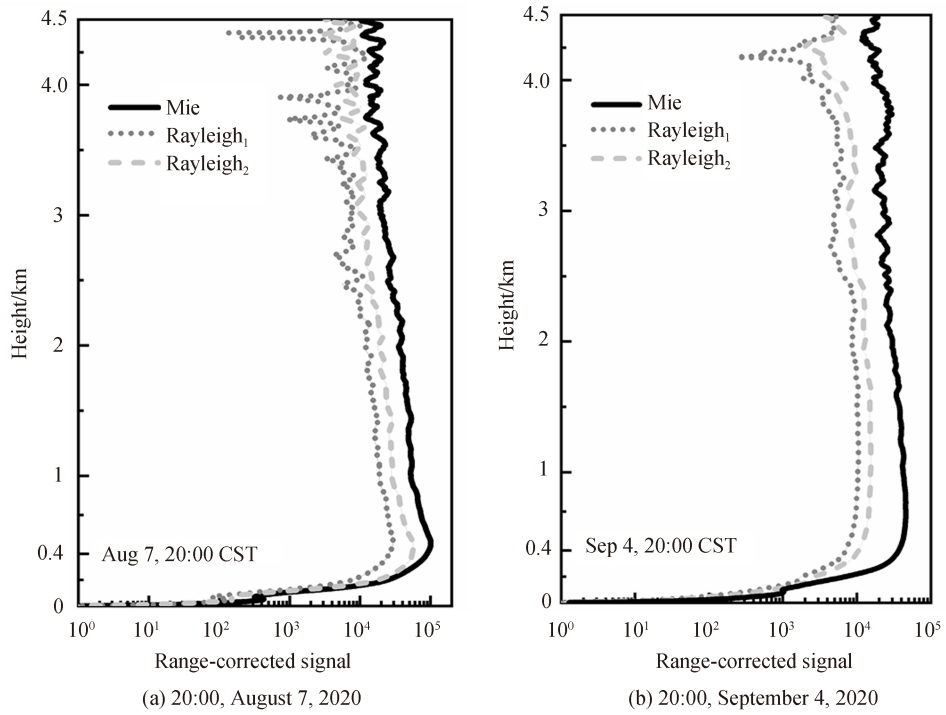


图2 高光谱偏振激光雷达各通道距离平方校正信号
Fig.2 Range-corrected signals under different channels from polarized HSRL

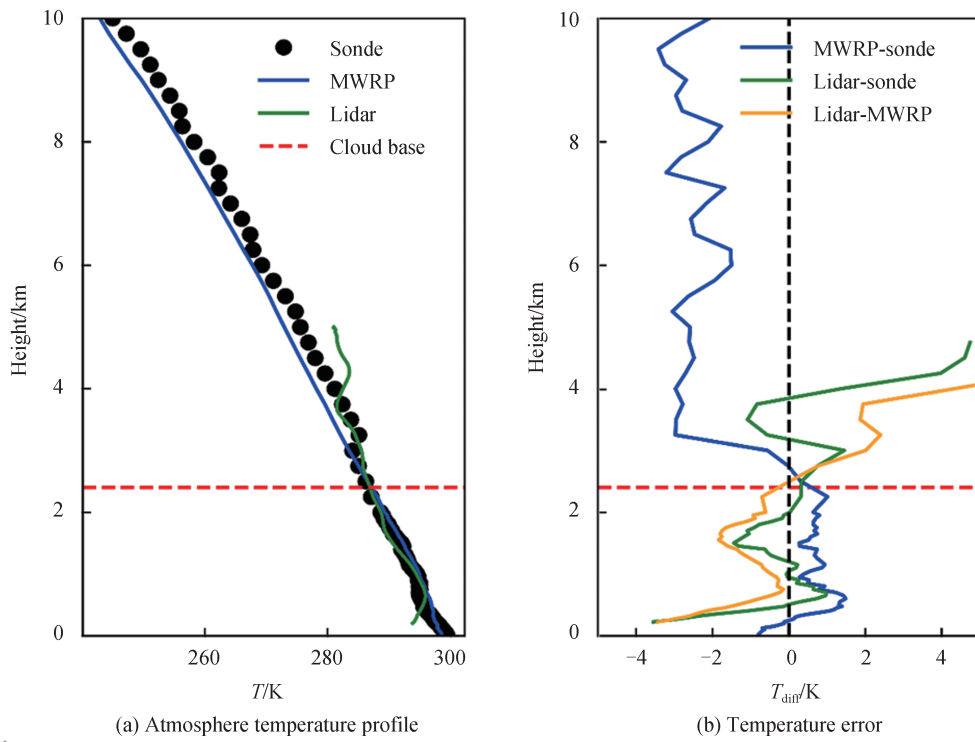


图3 2020年8月7日20:00在0~10 km内激光雷达、微波辐射计以及探空气球的大气温度廓线分布
Fig.3 Atmosphere vertical temperature profiles from lidar, Microwave radiometer (MWR), and sounding balloon between 0 and 10 km on 20:00, August 7, 2020

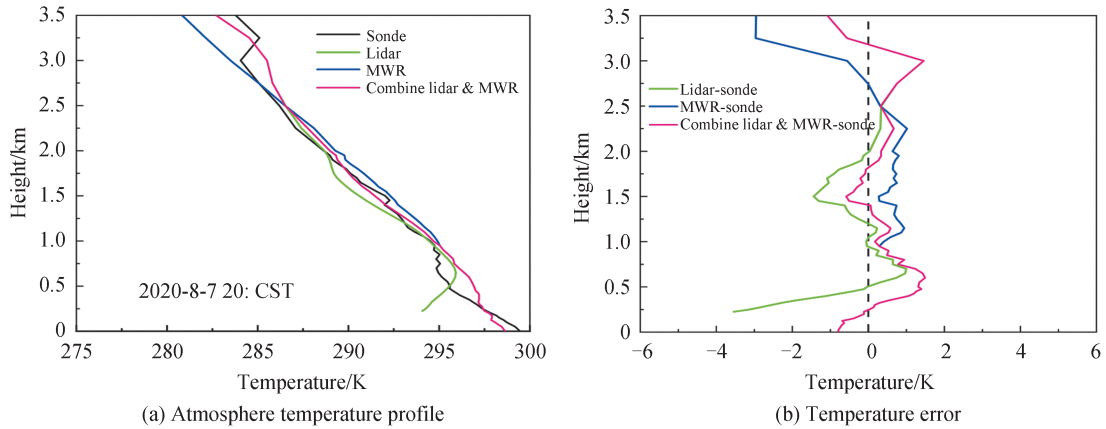


图4 激光雷达、微波辐射计及融合的大气温度廓线与探空数据的对比

Fig. 4 Comparison of atmosphere temperature profiles from lidar, MWR, and splicing data

其在 1.0~2.5 km 范围内温度误差在 ± 1 K 以内,说明在此范围内经过拼接后效果得到改善。

图 5 分别给出了探空数据与激光雷达、微波辐射计以及融合廓线在 1~3.5 km 范围内大气温度的相关性,分别为 0.95,0.96 和 0.97,说明激光雷达、微波辐射计均具有高精度探测大气温度的能力,但将二者进行融合后,获得的大气温度精度更高,并且既可弥补微波辐射计空间分辨率的不足,又可解决激光雷达的探测盲区,实现二者的优势互补。

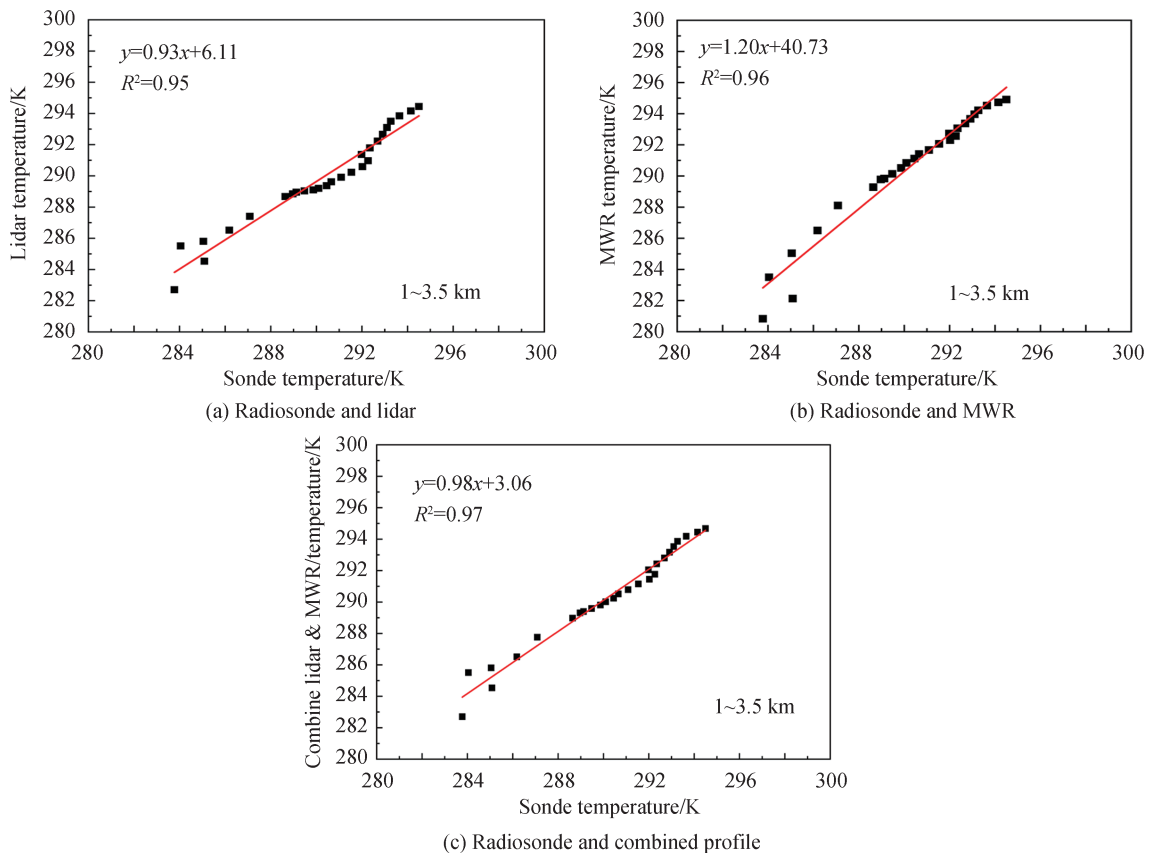


图5 激光雷达、微波辐射计及融合的大气温度廓线与探空数据的相关性分析

Fig. 5 The correlations of atmosphere temperature profiles from lidar, MWR, and splicing data

4 结论

本文利用偏振高光谱激光雷达实现了大气温度的全天时、高信噪比探测,结合同期探空数据、微波辐射

计数据验证了其探测大气温度的能力,并将激光雷达与微波辐射计数据进行了拼接融合,实现了二者的优势互补,获得了精度更高的大气温度廓线,研究成果将有助于数值天气预报,气象与气候变化等方面的研究。

参考文献

- [1] BAO Yansong, QIAN Cheng, MIN Jinzhong, et al. Study of retrieving 0~10 km atmospheric temperature and humidity profiles by Ground-based microwave radiometer data[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2016, 32(2): 163-171.
鲍艳松,钱程,闵锦忠,等. 利用地基微波辐射计资料反演0~10 km 大气温湿廓线试验研究[J]. *热带气象学报*, 2016, 32(2): 163-171.
- [2] LI J, OTKIN J, SCHMIT T J, et al. Warning information in a preconvective environment from the geostationary advanced infrared sounding system: a simulation study using the IHOP case[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(3): 776-783.
- [3] MILOSHEVICH L M, VÖMEL H, WHITEMAN D N, et al. Absolute accuracy of water vapor measurements from six operational radiosonde types launched during AWEX-G and implications for AIRS validation[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 2006, 111: d09S10.
- [4] ANDREAS F, BEMHARD P. Optimal estimation of water vapour profiles using a combination of Raman lidar and microwave radiometer[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10: 3325-3344.
- [5] WESTWATER W E. An analysis of the correction of range errors due to atmospheric refraction by microwave radiometric techniques[R]. *Institutes for Environmental Research Boulder Colo*, 1967.
- [6] WESTWATER E R, ZHENHUI W, GRODY N C, et al. Remote sensing of temperature profiles from a combination of observations from the satellite-based microwave sounding unit and the ground-based profiler[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1985, 2(2): 97-109.
- [7] HUANG Jianping, HE Min, YAN Hongru, et al. A study of liquid water path and precipitable water vapor in Lanzhou area using ground-based microwave radiometer[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 34(3): 548-558.
黄建平,何敏,阎虹如,等. 利用地基微波辐射计反演兰州地区液态云水路径和可降水量的初步研究[J]. *大气科学*, 2010, 34(3), 548-558.
- [8] XU G, WARE R, ZHANG W, et al. Effect of off-zenith observations on reducing the impact of precipitation on ground-based microwave radiometer measurement accuracy[J]. *Atmospheric Research*, 2014, 140-141: 85-94.
- [9] SOLJEIM F, GODWIN J R, WESTWATER E R, et al. Radiometric profiling of temperature, water vapor and cloud liquid water using various inversion methods[J]. *Radio Science*, 1998, 33: 393-404.
- [10] WESTWATER E R, CREWELL S, MÄTZLER C, et al. Principles of surface-based microwave and millimeter wave radiometric remote sensing of the troposphere[J]. *Quaderni Della Società Italiana Elettromagnetismo*, 2005, 1: 50-90.
- [11] GIROLAMO D P, MARCHESE R, WHITEMAN D N, et al. Rotational Raman lidar measurements of atmospheric temperature in the UV[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L01106.
- [12] KECKHUT P, CHANIN M L, HAUCHECORNE A. Stratosphere temperature measurement using Raman lidar[J]. *Applied Optics*, 1990, 29 (34): 5182-5186.
- [13] SHE C Y, ALVAREZ R J, CALDWELL L M, et al. High-spectral-resolution Rayleigh - Mie lidar measurement of aerosol and atmospheric profiles[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(7): 541-543.
- [14] HAIR J W. A high spectral resolution lidar at 532 nm for simultaneous measurement of atmospheric state and aerosol profiles using iodine vapor filters[J]. *Ph.D. Thesis*, 1998.
- [15] LIU D, HOSTETLER C, MILLER I, et al. System analysis of a tilted field-widened Michelson interferometer for high spectral resolution lidar[J]. *Optical Express*, 2012, 20: 1406-1420.
- [16] CHENG Z T, LIU D, ZHANG Y P, et al. Field-widened Michelson interferometer for spectral discrimination in high-spectral-resolution lidar: practical development[J]. *Optical Express*, 2016, 24: 7232-7245.
- [17] TUMER D D, GOLDSMITH J E M. Twenty-four-hour raman lidar water vapor measurements during the atmospheric radiation measurement program's 1996 and 1997 water vapor intensive observation periods[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1999, 16: 1062-1076.
- [18] MATTIS I, ANSMANN A, ALTHAUSEN D, et al. Relative-humidity profiling in the troposphere with a Raman lidar[J]. *Applied Optics*, 2002, 41: 6451-62.
- [19] MADONNA F, AMODEO A, BOSELLI A, et al. CIAO: the CNR-IMAA advanced observatory for atmospheric research[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4: 1191-1208.
- [20] FOTH A, BAARS H, DI GIROLAMO P, et al. Water vapour profiles from Raman lidar automatically calibrated by microwave radiometer data during HOPE[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15: 7753-7763.
- [21] BU Lingbing, PAN Honglin, KUMAR K R. LIDAR and Millimeter-Wave Cloud RADAR (MWCR) techniques for joint observations of cirrus in Shouxian (32.56°N, 116.78°E)[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*,

- 2016, 148: 64-73.
- [22] HUA Dengxin, UCHIDA M, KOBAYASHI T. Ultraviolet Rayleigh-Mie lidar with Mie-scattering correction by Fabry-Perot etalons for temperature profiling of the troposphere[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(7): 1305-1314.
- [23] CHURNSIDE J H, STERMITE T A, SCHROEDER J A. Temperature profiling with neural network inversion of microwave radiometer data[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1994, 11(1): 105-109.
- [24] HAEFELE A, BARRAS E M, MAIER O, et al. Composite temperature profiles from Raman lidar and microwave radiometer[C]. *Proc. 9th Int. Symp. on Tropospheric Profiling*, L'Aquila, Italien, 2012.