

基于拉曼激光雷达的南京上空大气温度廓线观测

郭劲秋 卜令兵 王 敏 田 力 黄兴友 夏俊荣

(南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 江苏 南京 210044)

摘要 介绍了综合使用瑞利、拉曼、米散射三种技术的激光雷达的基本结构与拉曼散射温度反演原理。对其中的拉曼回波信号进行了背景噪声扣除、滑动平均和小波变换降噪,在此基础上分析了气溶胶对拉曼激光雷达温度廓线反演的影响。利用上述激光雷达信号处理方法对南京上空的温度廓线进行观测,反演了 2010 年 11 月 19 日 18 时 53 分至 19 时 35 分连续观测的数据。反演的温度廓线表明,观测开始至观测结束,5.5 km 处的温度变化为 2 K 的波动变化;对 2010 年 11 月整月的观测数据进行分析处理,得到 11 月份上中下三旬的平均温度廓线。在 10 km 高度处,下旬温度比上旬温度低 4 K,随着入冬的进程,低空段的大气温度递减率有明显增大的趋势;11 月的月平均温度在 5~10 km 处低于模式值 4 K 左右,并且两者几乎平行,说明 11 月份 5~10 km 各高度温度比模式均低 4 K 左右。

关键词 大气光学;拉曼激光雷达;温度廓线;温度变化;模式

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s114009

Measurement of Temperature Profiles above Nanjing Using Raman Lidar

Guo Jingqiu Bu Lingbing Wang Ming Tian Li Huang Xingyou Xia Junrong

(Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

Abstract The basic structure of Rayleigh-Raman-Mie (RRM) lidar as well as the principle of temperature retrieval algorithm using Raman scattering are introduced. Background correction, slide average and wavelet transform are employed to denoise the Raman backscattering signal, and then the effect of aerosols to temperature profile is analyzed. Using the algorithm described, temperature profiles above Nanjing from 5 km to 18 km during 18:53 to 19:35 on November 19, 2010 are retrieved. The measured results showed that the temperature variation at altitude of 5.5 km is less than 2 K; The entire month of observation data during November 2010 are analyzed and processed, average temperature profiles of three ten days are obtained. At altitude of 10 km, temperature of first ten days is 4 K higher than that of the third ten days. With winter approaching, the temperature lapse rate has significantly increased in low-altitude section. Monthly mean temperature in the range of 5~10 km is 4 K lower than the model value, and the two profiles are almost parallel which showed temperatures at most altitude below 10 km are 4 K lower than that of model.

Key words atmospheric optics; Raman lidar; temperature profile; temperature variation; model

OCIS codes 010.3640; 010.1110; 010.1290; 280.1350; 070.2615

1 引 言

对流层是地球大气层里密度最高的一层,它蕴含了整个大气层约 75% 的质量,以及几乎所有的水蒸气及气溶胶。所以从广义上讲,风雨雷电云雾霜

雪等天气现象的起因和形成基本都是在对流层大气里面发生的。同时对流层与人类生存环境密切相关,因此,对其进行有效的探测和研究就显得十分重要。对流层温度是一个始终贯穿于所有的大气物理

收稿日期: 2012-03-01; **收到修改稿日期**: 2012-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(40805016)资助课题。

作者简介: 郭劲秋(1985—),男,硕士研究生,主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: 358490769@qq.com

导师简介: 卜令兵(1976—),男,博士,副教授,主要从事激光大气探测方面的研究。

E-mail: lingbingpu@gmail.com(通信联系人)

化学过程的一个物理量,对它的探测自然就成为了大气探测方面的重中之重。对流层大气温度的探测方法主要有两种:直接测量和遥感,其中直接测量准确但很难在大尺度空间中获得高时间分辨率的数据,遥感方法虽然有一些因素导致测得结果不够客观,但在时空分辨率上优势明显,因此大气温度的遥感特别是主动遥感技术发展迅速。激光雷达作为一种具有高时空分辨率的主动遥感仪器可以完成对大气温度廓线的测量工作。瑞利激光雷达可以使用大气分子的后向散射信号反演大气温度,其测量区间是在气溶胶散射可以忽略的 20 km 以上至 50 km 的空间,转动拉曼激光雷达能够测量边界层大气温度廓线一般是在 5 km 以下。拉曼激光雷达则成为瑞利激光雷达和转动激光雷达为获得从低空到高空整条温度廓线的一个必要补充,其测量区间一般为 5~20 km。拉曼激光雷达不像转动拉曼激光雷达那样需要高分辨率光谱部件,又测量波长与大气的弹性散射波长相去甚远受气溶胶的影响较小,所以,拉曼激光雷达技术在国内外均受到一定程度的关注^[1~9]。

本文介绍了基于氮气拉曼散射的激光雷达系统,对温度廓线反演中降噪方法以及气溶胶存的影响进行了分析探讨,并使用激光雷达对南京上空的温度廓线进行观测,观测结果表明:对 2010 年 11 月 19 日 18 时 53 分至 19 时 35 分的连续观测结果来说,5.5 km 处的温度变化为 2 K 的波动变化;对 2010 年 11 月整月的观测数据进行分析处理,结果表明 11 月份上中下三旬的平均温度廓线表明,在 10 km 高度处,下旬温度比上月温度低 4 K,随着入冬的进程,低空段的大气温度递减率有明显增大的趋势;11 月的月平均温度在 0~10 km 处低于模式值 4 K 左右,并且两者几乎平行,说明 11 月份 0~10 km 各高度温度比模式均低 4 K 左右。

2 系统和反演方法

2.1 拉曼激光雷达系统

使用的瑞利-拉曼-米散射激光雷达系统结构如图 1 所示。系统采用 532 nm 的激光作为发射光源,其单脉冲能量为 200 mJ,重复频率为 20 Hz,接收系统使用直径为 400 mm 的卡塞格林望远镜。系统发射 532 nm 波长的激光,回波信号中包含 532 nm 的瑞利散射与米散射信号,以及 607 nm 的拉曼散射信号。卡塞格林望远镜接收到的大气散射信号经准直镜后变为平行光,平行光经过 607 nm 波长全反、

532 nm 波长高透的分色镜分离,607 nm 散射光信号由拉曼通道接收,随后 532 nm 散射光再经 96% 透射,4% 反射的分束镜分为两路:532 nm 高层散射信号被瑞利通道接收,532 nm 低层散射信号由米通道接收。米散射信号采集使用 PCI-9812 型模/数(A/D)数据采集卡,瑞利和拉曼高层回波信号很微弱,为提高其信噪比,采用高灵敏度、高量子效率的光电倍增管(PMT),结合 P7882 型光子计数卡进行检测。所有采集的信号数据通过计算机进行保存处理。由于瑞利通道与拉曼通道共用一个光子计数卡,两通道的垂直分辨力分别为 150 m 和 30 m,在实际测量过程中,只能对高低空进行分别测量,一般以 10000 脉冲积分作为一个数据文件,5 次积分为一组。

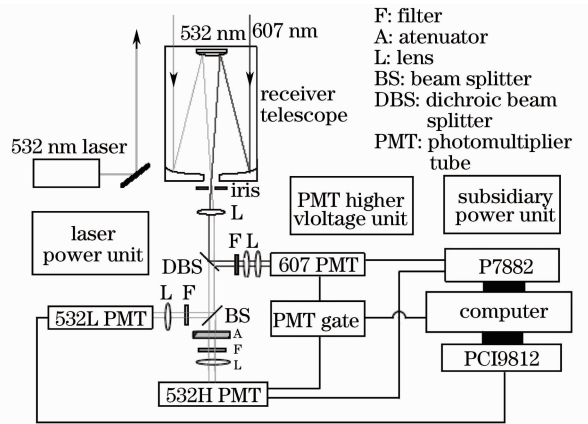


图 1 激光雷达系统结构图

Fig. 1 Diagram of the lidar system

2.2 拉曼激光雷达反演大气温度原理

若记 λ_0 为发射激光波长, λ_N 为 N_2 分子振动拉曼散射波长,则 N_2 分子拉曼散射回波可由激光雷达方程表示为^[3]

$$P(\lambda_N, z) = CO(z)\beta(z)Q_m(\lambda_N, \lambda_0, z) \times Q_p(\lambda_N, \lambda_0, z)Q_o(\lambda_N, \lambda_0, z)/z^2, \quad (1)$$

式中

$$Q_m(\lambda_N, \lambda_0, z) = \exp\left\{-\int_{z_0}^z [\alpha_m(\lambda_0, z') + \alpha_m(\lambda_N, z')] dz'\right\},$$

$$Q_p(\lambda_N, \lambda_0, z) = \exp\left\{-\int_{z_0}^z [\alpha_p(\lambda_0, z') + \alpha_p(\lambda_N, z')] dz'\right\},$$

$$Q_o(\lambda_N, \lambda_0, z) = \exp\left\{-\int_{z_0}^z [\alpha_o(\lambda_0, z') + \alpha_o(\lambda_N, z')] dz'\right\},$$

$$\beta(z) = \sigma N(z),$$

$P(\lambda_N, z)$ 为 N_2 分子振动拉曼回波信号强度; C 为系统常数; $\beta(z)$ 为 N_2 分子振动拉曼后向散射系数; $O(z)$ 为发射激光束和接收视场之间的几何重叠系数, 又称几何因子; $Q_m(\lambda_N, \lambda_0, z)$ 、 $Q_p(\lambda_N, \lambda_0, z)$ 和 $Q_o(\lambda_N, \lambda_0, z)$ 分别为分子、气溶胶和臭氧对 N_2 分子拉曼回波的大气透射率; $\alpha(z)$ 为消光系数; 下标 m 、 p 和 o 分别代表分子、气溶胶和臭氧。 σ 和 $N(z)$ 为 N_2 分子振动拉曼散射截面和数密度。由(1)式知, N_2 分子拉曼散射回波不受弹性散射(米和瑞利散射)的影响, 但包含有气溶胶和分子的衰减。通常 N_2 分子体积混合比在空气中可视为常数, 若假定某一高度 z_0 处的大气数密度已知, 则通过校正大气透射率项, 可得到其他高度上的大气数密度 $N(z)$ 为^[8]

$$N(z) = \frac{P(\lambda_N, z) \times z^2}{P(\lambda_N, z_0) \times z_0^2} N(z_0) Q_m(\lambda_N, \lambda_0, z, z_0) \times Q_p(\lambda_N, \lambda_0, z, z_0) Q_o(\lambda_N, \lambda_0, z, z_0), \quad (2)$$

然后结合大气静力学和理想气体状态方程可以推出大气温度 $T(z)$ 的表达式为

$$T(z) = \frac{T(z_c) N(z_c) + \frac{M}{k} \int_{z_c}^z g(z') N(z') dz'}{N(z)}. \quad (3)$$

一般地, 瑞利激光雷达探测高度在 30 km 以上大气温度时, 常常认为大气透射率项影响较小, 并可忽略。但在对流层中由于分子和气溶胶的衰减较大, 因此需要校正大气的透射率^[10,11]。可以明显看出, 该方法中的不确定性因素包括拉曼回波信号噪声、参考温度或压力及大气透射率等的不确定性。其中, 理想气体状态方程、微分压公式、密度公式分别表示为

$$p(z) = kN(z)T(z), \quad (4)$$

$$dp(z) = -\rho(z)g(z)dz, \quad (5)$$

$$\rho(z) = N(z)M. \quad (6)$$

3 数据处理

3.1 降噪处理

激光雷达信号中的噪声主要存在于信号的高频部分, 小波分析可以将信号的高低频率分开, 通过对高频信号的抑制, 保留低频信号, 达到对噪声消除的同时保持信号的特征。相比硬阈值, 软阈值具有更加灵活的阈值选择, 能在抑制噪声的同时更好地保留信号特征, 因此本文采用软阈值的方法对回波信号进行降噪处理。

图 2 为原始拉曼信号经过小波降噪前后的效果对比图。可以明显地看出小波降噪对高频噪声信号

具有很强的抑制作用。

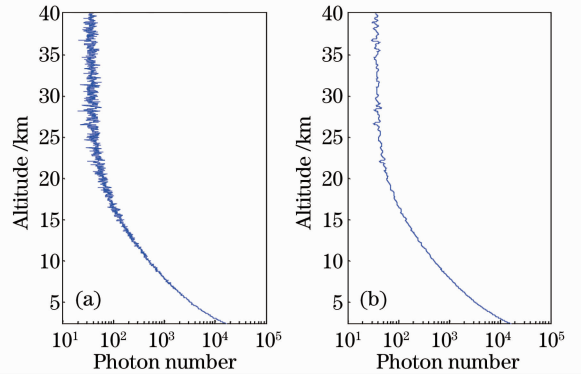


图 2 小波降噪前(a)和后(b)信号的对比图

Fig. 2 Comparison of the signal before (a) and after (b) wavelet noise reduction

除使用小波降噪外, 还使用背景扣除、滑动平均等常规处理方法。在背景扣除中, 是取 24~36 km 之间平均值作背景, 从原始回波中扣除。由于大气接近流体, 物理参数具有一定的连续性, 滑动平均则使反演的数据更加接近客观事实。

3.2 气溶胶消光对拉曼激光雷达反演结果的影响

拉曼散射是一种非线性散射, 其散射截面虽然比转动拉曼散射截面大, 与大气的弹性散射截面却又有几个数量级的差别。因此, 拉曼激光雷达中一般使用窄带滤波片对激光雷达接收到的弹性散射光及背景光进行高度抑制, 并且在大气比较清洁的夜晚才能达到温度测量效果。边界层气溶胶特别是云的存在都会影响拉曼激光雷达的测量结果, 而上述两者又具有时空变化性大的特点, 这就导致往往在一段时间的测量结果中存在一些不适合反演温度廓线的信号, 要得到好的反演结果必须将效果差的数据进行剔除。只看原始的回波信号很难直接判断出数据是否适合温度廓线的反演。所使用的激光雷达, 除接收拉曼激光信号外, 同时接收弹性散射信号。因此, 低空气溶胶的消光特性会直接影响到拉曼激光雷达拉曼信号的强度和信噪比(光子数除以光子数的开方)^[12]。

图 3(a)和(b)表明晴天时由于气溶胶较少, 信号的信噪比(SNR)在 16 km 时才降到 10 以下, 反演结果和探空资料吻合度较好。所以, 气溶胶对观测结果的影响往往不能忽视, 通过对拉曼信号的衰减, 可以明显地降低信号的信噪比。由于后向积分可以减小误差, 在信噪比足够高的情况下, 参考点往往取得较高, 由图 3 当参考点的信噪比在 10 以上时, 反演结果往往较好。

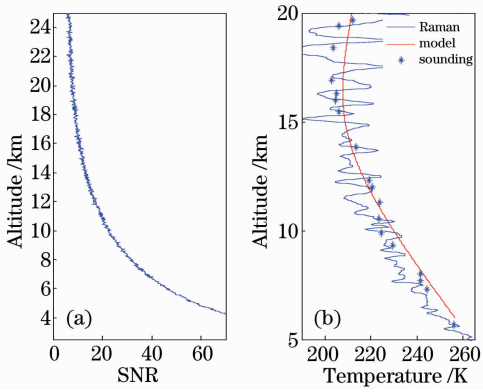


图 3 某晴天信号的信噪比(a)和反演结果(b)对比图
Fig. 3 Comparison of SNR (a) and inversion results (b) of the signal of a sunny day

3.3 数据反演和修正中的典型情况举例

3.3.1 气溶胶极少的情况

气溶胶极少的情况多发生在天气十分晴朗的时候。图 4(a)为某晴天晚上测得拉曼数据所反演的无修正的温度廓线与探空资料的对比,可以看出无论是高空段还是低空段的温度廓线与探空数据都有着较高的吻合度;图 4(b)中气溶胶从 2 km 开始就十分稀少了。

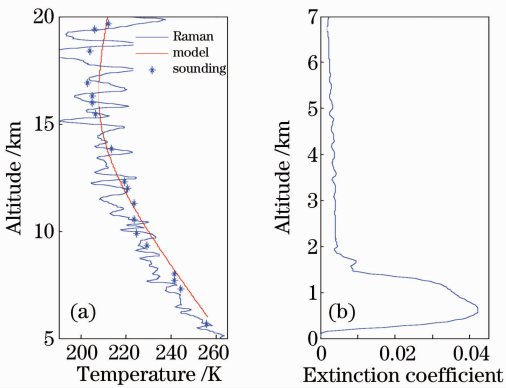


图 4 气溶胶极少时的反演结果(a)和气溶胶消光系数(b)廓线
Fig. 4 Inversion results (a) and extinction (b) profile in clear night

这种情况气溶胶层出现在反演的最低高度之下,该气溶胶对不同高度的拉曼散射信号具有几乎相同的消光作用。因此,可以不用进行气溶胶修正。

3.3.2 有气溶胶修正的情况

这种情况往往出现在有云但云较少的天气里。图 5(a)为某少云天晚上测得的拉曼数据所反演的无修正的温度廓线与探空资料的对比,可以看出 7~15 km 处的温度廓线与探空资料的吻合度较高,而低空的温度廓线很明显地偏小于探空数据,偏得最

大的地方将近 50 K;图 5(b)中原始信号的信噪比在 6.5 km 处发生了较为明显的非指数性变化,且其信噪比在 14 km 左右降为 10;图 5(c)在 6.5 km 处有一厚度约 0.5 km 的云层。

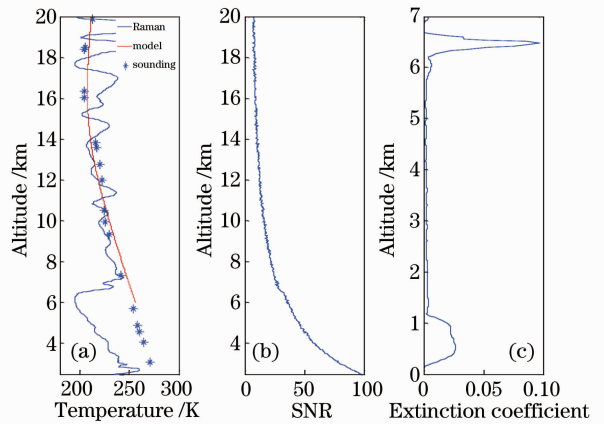


图 5 信号反演结果(a)及其信噪比(b)和气溶胶消光系数(c)

Fig. 5 Inversion results (a) and SNR (b) of the signal and aerosol extinction coefficient (c)

综合图 5 可知,之所以 7 km 以下的温度廓线明显偏小是由于 6.5 km 处的气溶胶层所引起的。但 7~15 km 处的温度廓线与探空资料的吻合度反而较高是因为 6.5 km 处的气溶胶层较薄,消光能力不太强,使得原始信号在 14 km 处还能保持一定高的信噪比。此时对温度廓线进行气溶胶修正具有极大的意义。图 6 为经过气溶胶修正前后的对比图。可以看出经过气溶胶修正后的温度廓线的准确度得到了极大的提高,最大修正了将近 50 K 的误差。此时气溶胶修正的重要性是不言而喻的。

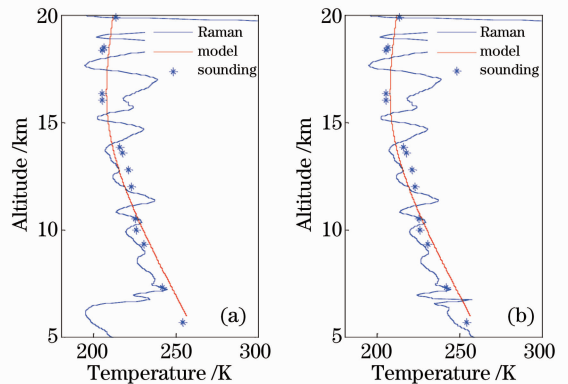


图 6 气溶胶消光修正前(a)和后(b)的温度廓线对比图
Fig. 6 Comparison of temperature profile before (a) and after (b) aerosol extinction correction

4 温度廓线观测

4.1 短时间内连续观测的数据反演结果

对2010年11月19日19时左右的南京上空对流层拉曼激光雷达回波数据进行处理,每10000个脉冲积累反演一条温度廓线,以5次积累为一组。由于激光雷达高的时间分辨率,每8分20秒就可得到一个廓线数据,41分40秒就可得到一组数据。图7中刚刚入夜时第二次积分的原始信号强度相对于第一次积分有很大的急增突变,虽然之后的信号还是有增强的趋势,但是增强的幅度趋于平缓。

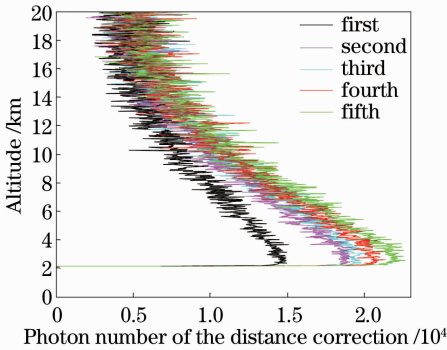


图7 短时间内连续观测数据的距离修正

Fig. 7 Range correction of continuous observation data in short time

图8为2010年11月19日19时左右的南京上空对流层温度廓线结果,可以很明显地看出南京上空的对流层温度在近1h内的变化趋势。在5.5 km高度处温度相对于当晚探空资料来说只有2℃左右的波动幅度。6~10 km之间结果与探空相比较存在0~10 K的误差波动,而10 km以上的误差最大达到了15 K,但是从总体上与探空资料吻合度较

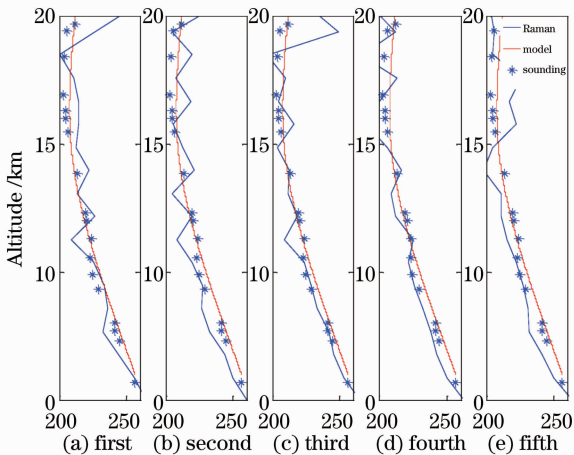


图8 短时间内连续观测的数据反演结果

Fig. 8 Inversion results of short time from the continuous observation data

高。通过与探空资料和模式进行对比,从中可以看出11月19日19时至20时对流层的温度处在一定的波动中,波动的幅度随着测量高度的增加而有增大的趋势。这种趋势是由于积分时间过短,导致高空的信号信噪比较低,从而反演出的温度廓线的误差就会变大。

4.2 长时间连续观测的数据统计结果

图9和图10中给出了2010年11月份上、中、下三旬的旬平均温度廓线及其温度递减率。虽然5.0~5.5 km之间三旬的温度几乎没有变化,5.5~7.5 km之间只存在1℃左右的波动,但5~8 km处的温度递减率始终是中旬大于上旬且下旬大于中旬的;8~10 km之间的温差最大达到了4 K,并且从8 km开始大气温度递减率的旬变化处在不规则地波动变化之中。说明在11月入冬的过程中,对流层低空段整段的大气温度递减率会有明显增大的趋势,而这种趋势到了高空段之后又会变得不那么明显。从11月月平均温度廓线中可以看出反演结果从5~10 km之间的廓线几乎与大气模式值相平行,并且低于模式温度4℃左右,除了5~6 km温度递减率保持在7 K/km左右,一直到10 km之后温度的递减才变缓了很多,然后到了11 km之后又会有变大的趋势,一直到13 km才又渐渐平缓。10 km之后的数据与模式也有很高的吻合度。总得来说,低空段的温度廓线随着入冬的过程而会明显地小于长期模式值,但大气温度递减率不会发生较大变化,而高空段的温度廓线由于受地面影响较小,在绝对值上反而与模式值之间的差值会更小。

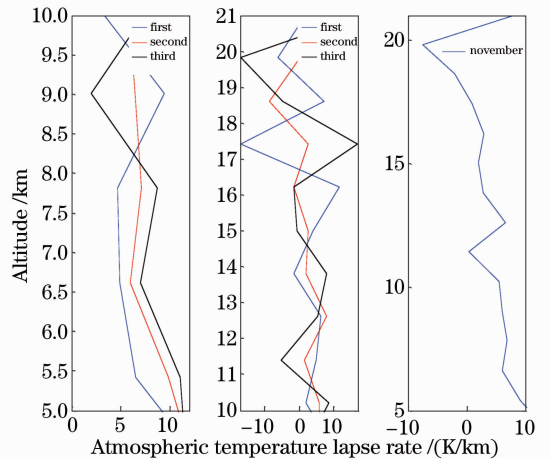


图9 长时间连续观测的数据统计结果(大气温度递减率)

Fig. 9 Statistical results from long continuous observation (atmospheric temperature lapse rate)

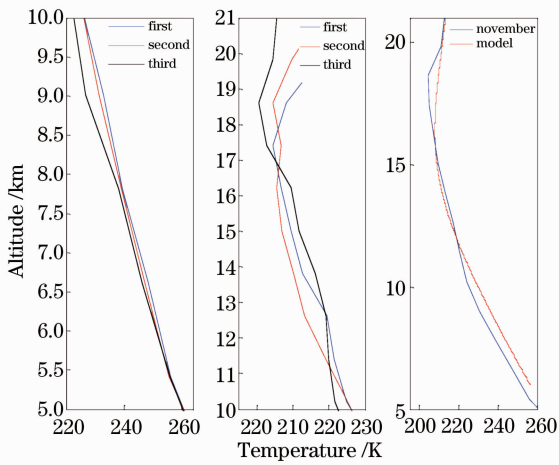


图 10 长时间连续观测的数据统计结果(温度)
Fig. 10 Statistical results from long continuous observation (temperature)

5 结 论

介绍了综合瑞利-拉曼-米散射三通道激光雷达的基本结构与温度反演原理。对其中的拉曼回波信号进行了小波变换、扣除背景噪声和滑动平均等降噪处理。利用该算法反演出南京上空 5~18 km 的 2010 年 11 月份的温度廓线,再对其进行气溶胶消光修正。结果显示,短时间内连续观测的数据反演结果具有很高的时间分辨率,并且与探空资料吻合较好,但由于积分时间短的缘故使得数据反演结果存在一定波动。而对于长时间连续观测的数据统计结果来说,其与长期模式温度廓线具有很高的吻合度,并能明显看出 11 月入冬过程中的对流层温度变化趋势,验证了拉曼温度廓线气溶胶修正的重要性以及在非强对流天气中温度反演算法的可靠性和可行性。

参 考 文 献

1 P. D. Girolamo, A. Behrendt, V. Wulfmeyer. Spaceborne profiling of atmospheric temperature and particle extinction with pure rotational Raman lidar and of relative humidity in combination with differential absorption lidar: performance simulations[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(11): 2474~2494

2 Wu Yonghua, Hu Huanling, Hu Shunxing *et al.*. Atmospheric density and temperature measurement with lidar in the middle and upper stratosphere[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2000, **17**(5): 426~431
吴永华, 胡欢陵, 胡顺星 等. 激光雷达探测平流层中上部大气密度和温度[J]. *量子电子学报*, 2000, **17**(5): 426~431

3 Wu Yonghua, Hu Huanling, Hu Shunxing *et al.*. Rayleigh-Raman scattering lidar for atmospheric temperature profiles measurements[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7): 851~856
吴永华, 胡欢陵, 胡顺星 等. 瑞利-拉曼散射激光雷达探测大气温度分布[J]. *中国激光*, 2004, **31**(7): 851~856

4 J. A. Whiteway, A. I. Carswell. Rayleigh lidar observations of thermal structure and gravity wave activity in the high arctic during a stratospheric warming[J]. *J. Atmospheric Sciences*, 1994, **51**(24): 3122~3136

5 Mi Jide, Cui Jiliang, Cao Hongxing. Temperature statistics of up-air in Beijing[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, **57**(2): 236~241
米季德, 崔继良, 曹鸿兴. 北京高空温度的统计特征[J]. *气象学报*, 1999, **57**(2): 236~241

6 World Meteorological Organisation Commission for Basic Systems [R]. Working Group on Satellites, Third Session, Final Report, 1998. 73

7 Bu Lingbing, Guo Jinqiu, Tian Li *et al.*. Rayleigh-Raman lidar used for atmospheric temperature profile measurement[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **7**(22): 1449~1452
卜令兵, 郭劲秋, 田力 等. 用于大气温度廓线测量的瑞利-拉曼激光雷达[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **7**(22): 1449~1452

8 Bo Guangyu, Liu Bo, Zhong Zhiqing *et al.*. Development of Rayleigh-Raman-Mie lidar based on simulated signal[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(9): 1321~1325
伯广宇, 刘博, 钟志庆 等. 基于回波信号仿真的瑞利-拉曼-米激光雷达研制[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(9): 1321~1325

9 Wu Yonghua, Hu Huanling, Hu Shunxing *et al.*. Temperature measurement with Rayleigh scattering lidar in the mid and upper stratosphere[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(2): 137~140
吴永华, 胡欢陵, 胡顺星 等. 用瑞利散射激光雷达探测平流层中上部温度[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(2): 173~140

10 K. D. Evans, S. H. Melfi, R. A. Ferrare *et al.*. Upper tropospheric temperature measurement with the use of a Raman lidar[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(12): 2594~2607

11 P. Keckhut, M. L. Chanin, A. Hauchcorne. Stratosphere temperature measurement using Raman lidar[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(34): 5182~5186

12 Yang Chunhu, Sun Dongsong, Li Hongjing. Improved signal-to-noise ratio of imaging lidar with photon counting[J]. *Journal of Soochow University*, 2005, **25**(3): 53~57
杨春沪, 孙东松, 李洪敬. 利用光子累计改善成像激光雷达的信噪比方法[J]. *苏州大学学报*, 2005, **25**(3): 53~57

栏目编辑: 马 沂