

基于转动拉曼测温激光雷达数据采集系统的 阈值校正和延时补偿技术

孔卫国 陈思颖* 张寅超 陈 和 邱宗甲 王玉诏 刘 鹏 倪国强

(北京理工大学光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要 针对转动拉曼测温激光雷达数据采集系统中光子计数卡各通道阈值及延时之间的误差,结合光子计数卡的工作原理以及方波信号幅值电压的波动性,构建阈值测量系统,以方波信号作为通道的输入,通过调整阈值电压设定值,使计数值达到最大的方法对通道的阈值误差进行了测量,并对其进行了曲线拟合。构建延时测量系统,测量各通道之间的延时差,并提出了对其进行补偿的方案。对阈值误差测量数据及拟合结果进行了分析,分析结果表明通过拟合曲线对各通道阈值电压进行设定,可更快地设置所要求的阈值电压。对延时差的补偿可以使温度分布廓线定位精度提高约 10 m。

关键词 大气光学; 转动拉曼激光雷达; 阈值校正; 延时补偿; 光子计数

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.022801

Threshold Amendment and Time-Delay Compensation of Rotational Raman Lidar for Atmospheric Temperature Measurement

Kong Weiguo Chen Siying Zhang Yinchao Chen He Qiu Zongjia
Wang Yuzhao Liu Peng Ni Guoqiang

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract Differences exist among the trigger channel and two count channels of multiscaler, which is an essential component of the rotational Raman lidar system for atmospheric temperature measurement, both in the threshold and time-delay aspects, and they will impact the temperature measurement results. A measuring system is established for the threshold differences, based on the working principle of the multiscaler and the voltage fluctuation of square waves. In the measuring system, square waves with different voltage values are input to the two count channels successively. Through changing the set threshold value, the count value will be at the peak under a particular set threshold value. By this way, pairs of respective set threshold values of the two count channels corresponding to the same input square wave can be obtained, and furthermore the threshold curves can be fitted. One more measuring system is established for the time-delay differences, and the method for compensating the differences is also proposed. Analysis shows that with the threshold value set according to the fitted curves, the appropriate thresholds can be set more quickly, and the positioning accuracy of atmospheric temperature profile can be improved by about 10 m with the time-delay differences compensated.

Key words atmospheric optics; rotational Raman lidar; threshold amendment; time-delay compensation; photon counting

OCIS codes 280.6780; 010.3640; 290.5860

收稿日期: 2010-08-21; 收到修改稿日期: 2010-10-26

基金项目: 国家 973 计划(2009CB72400402)和国家自然科学基金(40905016)资助课题。

作者简介: 孔卫国(1984—),男,博士研究生,主要从事测温激光雷达及对地三维成像激光雷达等方面的研究。

E-mail: kongwg@bit.edu.cn

导师简介: 倪国强(1946—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: nigq01@sina.com。

* 通信联系人。E-mail: csy@bit.edu.cn

1 引言

对流层温度是大气物理、天气预报和分析以及大气环境研究的重要气象参数。长期实验观测和研究表明大气温度分布在变化,对流层下部温度在升高,而对流层上部至平流层和中间层温度在降低^[1]。发展和研究有效检测大气温度分布的手段已经十分重要。转动拉曼激光雷达探测技术是近年重点发展的新型对流层温度探测方法。该雷达所利用的回波信号间的光谱距离很近,因而受大气气溶胶的影响非常小^[2,3]。此外,转动拉曼激光雷达能够直接根据大气中氮气分子(N₂)或氧气分子(O₂)的转动拉曼散射信号来反演大气的温度分布廓线,获得的数据受人造因素影响较少,因此该方法测得的大气温度空间分布数据具有较高的精度和可信性。

本文基于自行研制的一套转动拉曼测温激光雷达系统,其夜间探测高度可达 10 km 以上,白天探测高度可达 4 km,高度分辨率可达 30 m,温度精度达 1.12 K。由于转动拉曼散射信号非常微弱,普通的微光探测方法难以对其进行探测,必须采用光子计数的方法^[4]。在本系统中,采用 P7882 光子计数卡实现光子计数探测。光子计数卡阈值电压的设定是其完成计数及滤噪功能的关键,但各通道的阈值存在误差,会影响正确阈值的快速设定,降低实验效率,必须对其进行测量和校正。阈值误差的测量难点在于如何确定与实际阈值电压相对应的阈值电压设定值。本文提出了一种方法对各通道的阈值误差进行测量,并对其进行了曲线拟合。此外,光子计数卡各通道之间还存在延时误差,会造成探测的大气温度垂直分布廓线的平移,本文也提出了相应的测量和补偿方法。

2 转动拉曼测温激光雷达原理及系统组成

2.1 转动拉曼测温激光雷达原理

转动拉曼激光雷达基于拉曼散射理论,通过探测大气中 N₂ 或 O₂ 的纯转动拉曼散射信号来反演大气温度^[5]。N₂(O₂)的纯转动拉曼散射谱线包括 S 支和 O 支,分别由一系列波长间隔约几个埃(1 Å=0.1 nm)的分立拉曼散射谱线组成。S 支或 O 支纯转动拉曼散射谱线强度峰值的连线,称为转动拉曼散射谱线强度包络,它是转动量子数 J 和温度 T 的函数^[5],与转动量子数 J 和温度 T 的关系如图 1 所示。可以看出,纯转动拉曼散射谱线

强度包络的形状随温度变化而变化,通过探测 N₂(O₂)的纯转动拉曼散射谱线强度包络,便可探测大气温度。不过利用拉曼散射激光雷达探测大气中 N₂(O₂)完整的纯转动拉曼散射谱线强度包络曲线是较为困难的,在实际探测时常采用简化方法,通过 N₂(O₂)高低转动量子数对应的拉曼谱线强度比值反演温度,表达式为^[6]

$$T(z) = \frac{\alpha}{\ln[I(J_L)/I(J_H)] - \beta}, \quad (1)$$

式中 z 为探测高度, α 和 β 为常数,可通过标定确定, $I(J_H)$ 和 $I(J_L)$ 分别表示高低转动量子数对应的拉曼谱线强度。

2.2 P7882 光子计数卡与 DG535 数字延时/脉冲发生器

P7882 光子计数卡是转动拉曼测温激光雷达系统的重要组件之一,其端口如图 2 所示,它包含一个触发通道和两个计数通道,分别用于触发光子计数卡的计数功能和相对高低转动量子数对应的散射光子进行计数。

DG535 数字延时/脉冲发生器是转动拉曼测温激光雷达系统的另一个重要组件,它包含一个触发端口和多个输出端口,各个端口的时序图如图 3 所示,可工作在内外两种触发模式。DG535 各个输出信号的延时可以调节,延时分辨率可达 5 ps,各输出信号之间的相对延时误

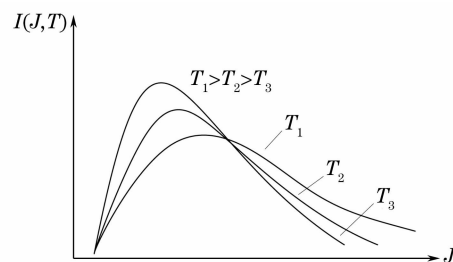


图 1 转动拉曼散射谱线强度包络与转动量子数 J 和温度 T 的关系曲线

Fig. 1 Curves of $I(J, T)$ versus J and T

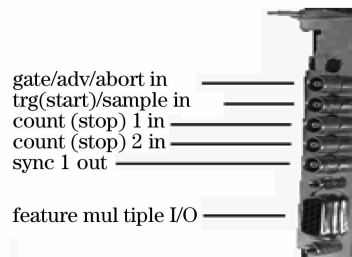


图 2 P7882 光子计数卡端口

Fig. 2 Ports of P7882

差在 50 ps 以内。此外,DG535 各输出信号的电压幅值也可以调节,分辨率为 10 mV。

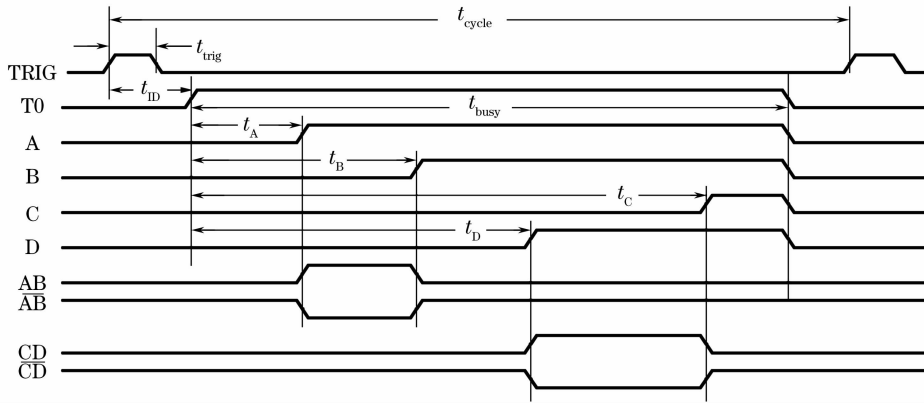


图 3 DG535 输出端口时序图
Fig. 3 Time sequence of DG535

2.3 转动拉曼测温激光雷达系统

转动拉曼测温激光雷达系统结构如图 4 所示。该系统由两路组成,其中一路,激光信号在发射端经光纤传输到光电转换装置得到电信号,继而传输到 DG535 控制其触发,DG535 的输出信号最终传输到光子计数卡的触发通道,控制光子计数卡计数功能的开启;在另一路,激光转动拉曼散射信号被望远镜接收并汇聚到焦点,然后经光纤传输到光谱仪对高低转动量子数信号进行分光,再分别经过光电倍增管和放大器进行光电转换和放大,最后传输到光子计数卡两计数端口进行计数。转动拉曼测温激光雷达系统数据采集部分涉及两个关键技术,一是滤除噪声,提高信噪比;二是系统的同步。

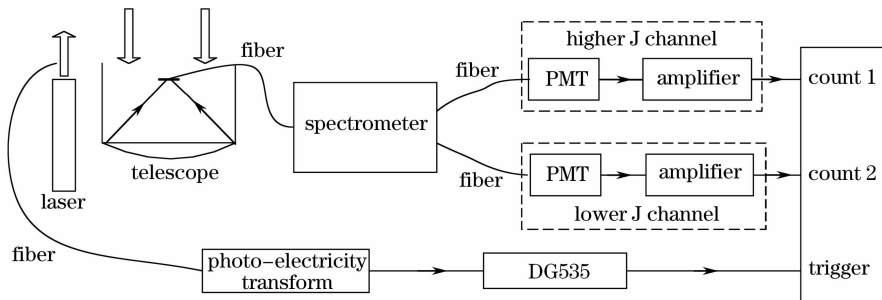


图 4 转动拉曼测温激光雷达系统
Fig. 4 Rotational Raman lidar system for atmospheric temperature measurement

3 转动拉曼测温激光雷达滤噪及阈值电压误差校正

3.1 转动拉曼测温激光雷达系统中的噪声及其滤除

到达光子计数卡计数端口的除了有效的拉曼散射光电子信号之外,还包括热噪声以及其他一些噪声。图 5 是系统中光电倍增管典型的输出脉冲电压幅值分布,横坐标是倍增管输出脉冲幅值,纵坐标是脉冲计数率^[7]。峰 I 主要是由热噪声造成的,峰 II 是由有效的光电子信号造成的,而向大幅值方向拖长的尾巴则是其他噪声,主要是由高能粒子造成的。

光子计数卡需要对其计数通道阈值电压进行设置才能正常工作,只有幅值电压大于计数通道阈值电压的信号才能被计数。从图 5 可看出热噪声幅值电压小于有效的光电子信号幅值电压,因此将计数通道的阈值电压设置在

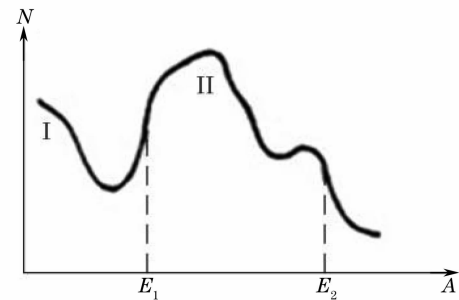


图 5 光电倍增管典型输出脉冲电压分布
Fig. 5 Typical pulse amplitude distribution of photomultiplier

噪声幅值电压与光电子信号幅值电压之间即可滤除大部分电子噪声。这种方法并不能滤除高能粒子引入的噪声,但其数量很少,对计数结果的影响可忽略不计。

3.2 通道阈值电压误差测量

正确的计数通道阈值电压设定对转动拉曼激光雷达测温功能的实现非常重要,但光子计数卡各通道的阈值电压设定值与其对应的实际阈值电压之间,以及相同的实际阈值电压下各通道的阈值电压设定值之间,都存在误差。本文根据方波信号的特点及光子计数卡的计数原理,设计测量方案对其进行测量。实际上触发通道阈值也可能存在误差,但它只要可以触发计数功能就可以了,且其触发信号是由 DG535 提供的稳定的方波信号,不需对其阈值误差进行测量和校正。

实际的方波信号的幅值电压并不是一个恒定值,而是在一个小的范围内波动。以方波信号作为光子计数卡计数通道的输入,并在幅值电压波动范围内调整通道阈值电压,根据其工作原理,计数值将随着阈值电压的改变而改变,如图 6 所示。计数值最大时的阈值电压即是与方波信号幅值电压相对应的阈值电压设定值,而方波信号幅值电压则是实际的阈值电压,可通过数字示波器测量,由此即可获得阈值电压设定值与实际阈值电压值对。

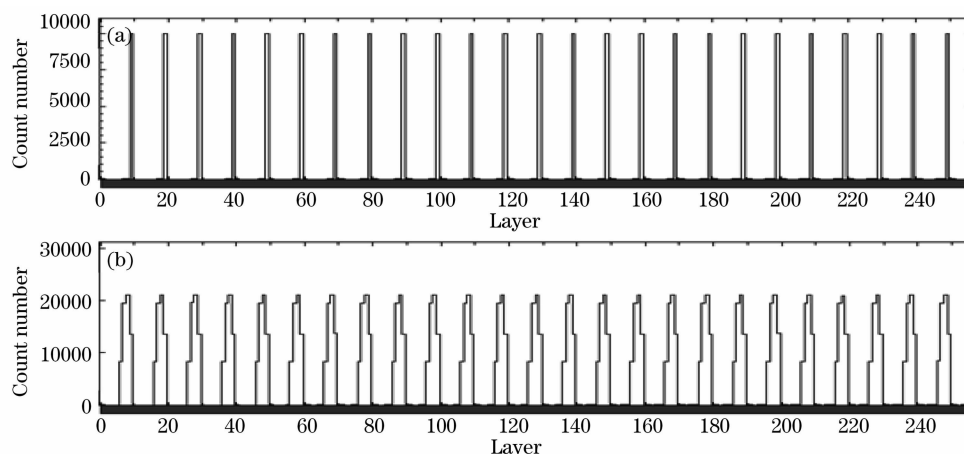


图 6 不同阈值电压下光子计数卡对方波信号的计数结果对比。(a)阈值电压在方波幅值电压波动范围以下,
(b)阈值电压在方波幅值电压波动范围内

Fig. 6 Counting results with threshold at different values. (a) counting result with threshold value below the fluctuation range, (b) counting result with threshold value within the fluctuation range

两计数通道阈值电压测量结果分别如表 1 和表 2 所示。表中 Actual threshold 表示实际的阈值电压值, Set threshold (ST)表示阈值电压设置值, Calculated threshold (CT)表示根据拟合曲线和实际阈值电压值计算得到的阈值电压设定值。表中还列出了分析结果,在 3.3 节中介绍。

表 1 计数通道 1 阈值测量结果及分析表

Table 1 Threshold measurement result and analysis of count channel 1

AT	ST	CT	ST-AT	ST-CT
2.066	2.095	2.101	0.029	0.006
1.545	1.583	1.562	0.038	0.021
1.065	1.054	1.065	0.011	0.011
0.545	0.526	0.527	0.019	0.001
0.233	0.202	0.204	0.031	0.002
0.137	0.095	0.104	0.042	0.009
-0.071	-0.108	-0.111	0.037	0.003
-0.169	-0.215	-0.212	0.046	0.003
-0.489	-0.529	-0.544	0.040	0.015
-0.975	-1.056	-1.047	0.081	0.009
-1.490	-1.584	-1.580	0.094	0.004
-2.013	-2.114	-2.121	0.101	0.007

表 2 计数通道 2 阈值测量结果及分析表

Table 2 Threshold measurement result and analysis of count channel 2

AT	ST	CT	ST-AT	ST-CT
2.066	2.083	2.090	0.017	0.007
1.545	1.570	1.549	0.025	0.021
1.065	1.039	1.050	0.026	0.011
0.545	0.509	0.510	0.036	0.001
0.233	0.184	0.186	0.049	0.002
0.137	0.077	0.086	0.060	0.009
-0.071	-0.127	-0.130	0.056	0.003
-0.169	-0.234	-0.232	0.065	0.002
-0.489	-0.549	-0.564	0.060	0.015
-0.975	-1.078	-1.069	0.103	0.009
-1.490	-1.609	-1.604	0.119	0.005
-2.013	-2.140	-2.147	0.127	0.007

3.3 曲线拟合及分析

根据阈值测量结果对两计数通道阈值电压设定值与实际阈值电压之间的关系曲线,以及两计数通道阈值电压设定值之间的关系曲线进行线性拟合,得到计数通道 1 阈值电压设定值 h_1 与实际阈值电压 A 之间的关系曲线为

$$h_1 = -0.03737 + 1.03515 \times A, \quad (2)$$

其中偏移量不确定度为 0.003,线性系数不确定度为 2.63×10^{-3} 。计数通道 2 阈值电压设定值 h_2 与实际阈值电压之间的关系曲线为

$$h_2 = -0.05616 + 1.03871 \times A, \quad (3)$$

其中偏移量不确定度为 0.003,线性系数不确定度为 2.67×10^{-3} 。两计数通道阈值电压设定值之间的关系曲线为

$$h_1 = 0.01859 + 0.99657 \times h_2, \quad (4)$$

$$h_2 = -0.01865 + 1.00344 \times h_1. \quad (5)$$

(4)式和(5)式中偏移量的不确定度均为 1.21×10^{-4} ,线性系数的不确定度均为 1.02×10^{-4} 。拟合曲线如图 7 所示,图中十字线表示测量得到的阈值电压对所对应的坐标点,实线表示拟合曲线。

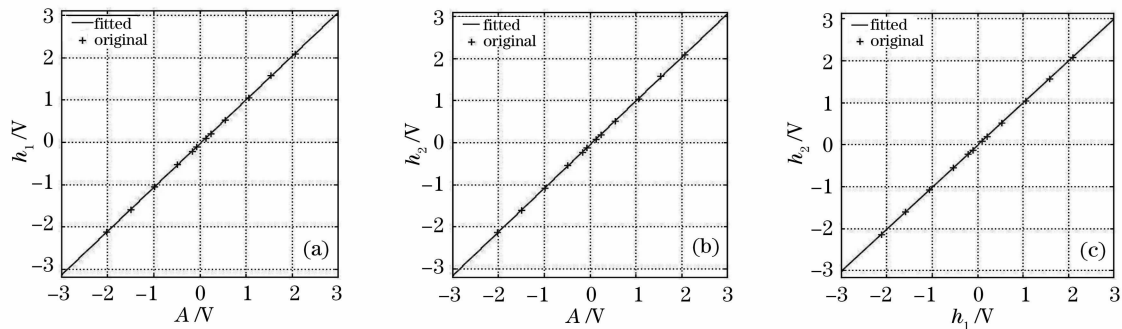


图 7 拟合曲线图

Fig. 7 Fitted curves

在没有对阈值电压关系曲线进行拟合的情况下,测量过程中将直接以要求的实际阈值电压作为光子计数卡的阈值电压设定值。表 1 和表 2 对拟合曲线进行了分析,其中 $|ST-AT|$ 表示阈值电压设定值与实际阈值电压值之间的差, $|ST-CT|$ 表示阈值电压设定值与阈值电压计算值之间的差。可以看出,以拟合曲线计算出的阈值电压比实际阈值电压更接近于阈值电压设定值,所以通过拟合曲线设定阈值电压可以更快地设定合适的阈值电压值,且依据两通道阈值电压设定值之间的关系曲线,在需要交换输入信号时,可快速设定新的阈值电压。

4 光子计数卡通道延时误差测量及补偿

4.1 光子计数卡延时误差测量

根据光子计数卡的工作原理,如果将输入到光子计数卡的信号周期设置为光子计数卡每个计数单元的计数时间的 n 倍(n 为整数),且假设各通道之间的相对延时为 0,那么将只有等间隔的部分计数单元的计数值非零,且第一个计数值非零的计数单元的地址为 0(计数单元起始地址为 0)。考虑随机因素的影响,后续各计数值非零的计数单元的地址为 $kn-1$ 和 kn (k 为自然数),且统计意义下两单元计数值相等。但是延时误差的存在会使得实际计数值分布情况与理想情况不同。调节输入到光子计数卡各通道的信号之间的延时,使计数结果的分布与理想情况下相同,则此时各信号之间的延时就等于各通道之间的延时。DG535 输出的各信号之间的延时可以精确调节,因此可以由它供给光子计数卡所需的信号。信号之间延时为 0 时的计数情况如图 8(a)所示,信号的频率为 500 kHz,光子计数卡各计数单元的计数时间为 200 ns,则计数值非零的计数单元的地址间隔为 10。从计数结果可以看出,通道的第一个计数值非零的计数单元的地址均为 9,且计数值是分布在一个计数单元中,说明触发通道的延时大于计数通道,后续测量中应增加 DG535 输出的计数信号相对于触发信号的延时。实验测得,当第一个计数值非零的计数单元地址为 0,且其余计数值在数组相邻的两个计数单元中平均分布时,通道 1 计数信号和通道 2 计数信号相对于触发信号的延时分别为 69.780 ns 和 69.600 ns,此即两个计数通道分别相对于触发通道的延时。

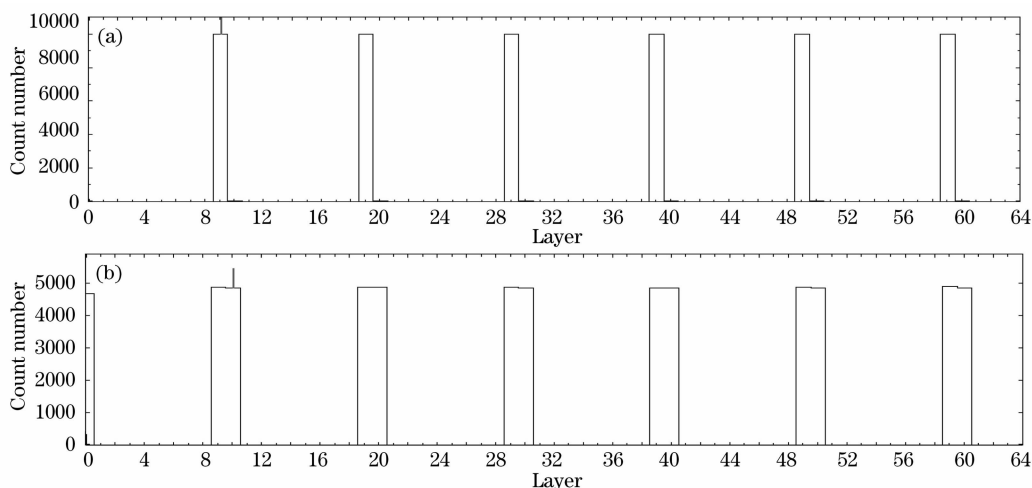


图 8 信号延时差为 0 (a)与延时补偿之后(b)光子计数卡的计数结果

Fig. 8 Counting results. (a) no time delay among signals, (b) time delay among channels compensated

4.2 光子计数卡延时补偿

延时补偿也是通过输出信号延时可调的 DG535 实现,有两种可能的方案可供选择,即减小触发通路的延时或者增加计数通路的延时。由于 DG535 输出的是一定电压值的方波信号,如果将其接入计数通路,将消除信号与噪声之间的差别,光子计数卡将不能通过阈值电压的设置滤除噪声,所以只能采用减小触发通路延时的方式,图 4 的系统框图中 DG535 即是采用的这种方式。不过两计数通道与触发通道之间的延时并不完全相等,DG535 无法同时完整地补偿两个通路的延时,但两者相差很小,仅为 0.18 ns,对廓线分布定位的影响可忽略不计,所以可取平均值,将触发通路的延时减小 69.690 ns。补偿后的计数结果如图 8(b)所示。就光子计数卡本身而言,延时补偿后温度分布廓线定位精度可提高 $3 \times 10^8 \times 69.690 \times 10^{-9} / 2 \approx 10.4$ m。

5 结 论

基于自行研制的转动拉曼测温激光雷达系统,构建了阈值测量系统对光子计数卡各计数通道阈值电压误差进行了测量,并进行了曲线拟合,有效实现了正确阈值的快速设定。需要说明的是,两计数通道阈值电压设定值之间的关系曲线只取决于光子计数卡本身,具有较高的精度,而阈值电压设定值与实际阈值电压之间的关系曲线还受到示波器测量精度的影响,精度稍低。

此外,还构建了测量系统对光子计数卡各通道之间的延时进行测量,并提出了对其进行补偿的方法。需要说明的是,系统触发通路 with 计数通路之间的延时差,不光包含光子计数卡触发通道与计数通道之间的延时差,还包括前端各个光电子学器件的延时,包括望远镜光路、传输光纤、光电转换模块、放大器等,目前还没有很好的方法对其总体延时进行测量或者标定,以更好地提高大气温度分布廓线定位精度。

参 考 文 献

- 1 Wu Yonghua, Li Tao, Zhou Jun *et al.*. Atmospheric temperature profile detection in upper part of troposphere by Raman lidar[J]. *Chinese J. Atmospheric Sciences*, 2002, **26**(5): 702~708
吴永华,李 陶,周 军等. Raman 激光雷达探测对流层中上部大气温度分布[J]. *大气科学*, 2002, **26**(5): 702~708
- 2 Andreas Behrendt, Takuji Nakamura, Yukihiro Sawai *et al.*. Rotational vibrational-rotational Raman lidar: design and performance of the RASC Raman lidar at Shigaraki (34.8° N, 136.1° E), Japan[C]. *SPIE*, 2002, **4484**: 151~162
- 3 Masahiro Funada, Chikao Nagasawa, Yasukuni Shibata *et al.*. Atmospheric temperature measurement with the rotational Raman lidar using Na vapor filter[C]. *SPIE*, 2001, **4153**: 183~190
- 4 Liu Yuli, Zhang Yinchao, Su Jia *et al.*. Rotational Raman lidar for atmospheric temperature profiles measurements in the lower-air[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(10): 43~48
刘玉丽,张寅超,苏 嘉等. 探测低空大气温度分布的转动拉曼激光雷达[J]. *光电工程*, 2006, **33**(10): 43~48
- 5 Sun Jingqun. *Laser Atmospheric Detection*[M]. Beijing: Science Press, 1986. 250
孙景群. *激光大气探测*[M]. 北京: 科学出版社, 1986. 250
- 6 Wang Shaolin, Su Jia, Zhao Peitao *et al.*. A pure rotational Raman lidar based on three-stage Fabry-Perotetalons for monitoring atmospheric temperature[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(6): 3941~3947
汪少林,苏 嘉,赵培涛等. 基于三级 Fabry-Perot 标准具的纯转动拉曼测温激光雷达[J]. *物理学报*, 2008, **57**(6): 3941~3947
- 7 Bo Guangyu, Zhong Zhiqing, Liu Bo *et al.*. Design of optical receiver and signal detection unit for combined Rayleigh-Raman-Mie lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3020~3025
伯广宇,钟志庆,刘 博等. 瑞利-拉曼-米氏激光雷达光学接收和信号检测设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3020~3025