

doi:10.3788/gzxb20184706.0601001

# 激光雷达探测信号数据融合算法

冯长中, 吴松华, 刘秉义

(中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

**摘 要:**提出基于二次多项式拟合的数据融合算法用于激光雷达信号探测,充分考虑模拟探测和光子计数的非线性关系,选择有效增大数据融合区间;分析云对区间内的模拟探测和光子计数数据质量的影响并进行质量控制,获得稳定的融合系数;同时利用模拟探测和光子计数的非线性关系校正脉冲堆积引入光子计数信号的非线性误差.以直接探测多普勒激光雷达为例,开展与探空气球的同步对比实验.结果显示:本文算法较之现有商用算法,风速相关系数从0.8提高到0.85,均方根误差从3.37 m/s降低至2.41 m/s,偏差从0.60 m/s降低至0.06 m/s,证明改进后的融合算法能够有效提高直接探测多普勒激光雷达风场探测的精度,可更好地应用于大气探测激光雷达的远场和近场信号的融合处理.

**关键词:**激光雷达;光电探测;光子计数;模拟探测;融合系数

**中图分类号:**TP79; TN958.98

**文献标识码:**A

**文章编号:**1004-4213(2018)06-0601001-9

## Gluing Method of Detected Signal Based on Lidar

FENG Chang-zhong, WU Song-hua, LIU Bing-yi

(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

**Abstract:** A data gluing method of quadratic polynomial fitting for lidar signal detection is proposed referring to the small gluing region and singular points. The data gluing region is extended to fully take the non-linear relationship between analog-to-digital and photon counting into account. The influence of cloud height on data quality is analyzed and the quality control is implemented to obtain stable gluing coefficient. The pile-up photon counting data is corrected according to the computational non-linear relationship between analog-to-digital and photon counting data. The synchronous comparison experiment between direct-detection Doppler lidar and balloon was carried out to verify this modified gluing method. The result shows that correlation coefficient increases from 0.80 to 0.85, the root mean square error decreased from 3.37 m/s to 2.41 m/s, and the deviation decreased from 0.60 m/s to 0.06 m/s. The result demonstrates that the modified gluing method could improve the accuracy of wind field detected by direct-detection Doppler lidar and is useful for atmosphere detection lidar to glue far-field and near-field signal.

**Key words:** Lidar; Photoelectric detection; Photon counting; Analog detection; Gluing coefficient

**OCIS Codes:** 010.3640; 040.5160; 010.1310; 170.3340

## 0 引言

激光雷达是目前重要的主动遥感测量技术之一,它具有高精度、高时空分辨率的特点,在大气和海洋环境探测等领域得到了广泛应用.对于地基式大气探测激光雷达系统,其大气后向散射信号既有远场大气分子

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos.123456789, 987654321),国家高技术研究发展计划(No. 12349876)和国家重点研究发展计划(No. 432156789)资助

**第一作者:**冯长中(1987-),男,博士研究生,主要研究方向为激光遥感技术、机器学习以及大气环境监测应用等.Email: changzhong606@163.com

**导师(通讯作者):**吴松华(1976-),男,教授,博士,主要研究方向为激光遥感技术及其海洋大气动力学和环境监测应用.Email: wush@ouc.edu.cn

**收稿日期:**2017-12-13; **录用日期:**2018-03-09

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

的瑞利散射信号,也有近场气溶胶颗粒物与云粒子的米散射信号,动态范围极大.接收系统通常使用光子计数(Photon Counting, PC)模式<sup>[1]</sup>记录单光子产生的脉冲来探测远场弱信号,同时使用模拟探测(Analog-to-Digital, AD)模式<sup>[2]</sup>来探测近场强信号.由于近场 AD 信号和远场 PC 信号的探测模式不同,系统在实现探测数据反演前的重要环节之一就是完成 AD 和 PC 数据的融合处理,因此,数据融合算法的设计使用成为影响激光雷达系统反演最终结果的探测精度的关键.目前商业化融合算法的做法是假定某小范围区间内的 AD 和 PC 信号呈线性变化关系,通过线性回归计算融合系数,根据融合系数将近场 AD 信号转换成 PC 信号,再与远场 PC 信号进行融合.但是,云和太阳背景光的影响使测量时出现大量数据奇异点,在小区间范围内计算融合系数的方法对奇异点敏感,会导致融合系数起伏较大、融合精度下降,从而引起激光雷达探测误差增大的问题<sup>[1-3]</sup>.此外,小范围区间内 AD 和 PC 的线性关系假设能够简化处理过程,但是由于假设区间范围小,只能选择较少的数据点,同样会导致融合系数的不稳定,造成算法鲁棒性差,影响融合精度乃至探测精度.

针对上述问题,相关研究人员通常是在原方法的基础上,使用小范围的数据融合区间,利用晚上晴空大气条件下的测量数据计算融合系数,并应用到所有测量数据中:WHITEMAN 等<sup>[1,3]</sup>使用晚上晴空测量的数据,利用 1~20 MHz 区间范围内的 AD 和 PC 信号的线性关系,计算平均的融合系数,并应用到所有测量数据中;为进一步消除云和太阳背景光的影响,WALKER 等<sup>[4]</sup>在晚上晴空下使用灯泵光源作为接收信号,调节灯泵与光轴的距离来改变接收光强,通过 AD 和 PC 信号在 0.05~1 MHz 范围内的线性变化关系来计算融合系数;NEWSOM 等<sup>[2]</sup>研究发现,在利用 0.5~50 MHz 范围内的 AD 和 PC 信号的线性关系计算融合系数时,PC 信号作为自变量时融合系数的起伏变化受太阳背景光的影响更小<sup>[5]</sup>.上述研究方法采用规避云和太阳背景光天气的工作方式尽量避免云和太阳背景光引入的数据奇异点,降低对融合算法的影响.但是,当大气探测激光雷达系统(尤其是云激光雷达系统)长时间工作在非晴空或白天天气条件下,这种方式不再适用.同时,上述方法并未对较小融合区间影响融合精度的问题给出有效解决方案.可见,现有的研究并未从根本上解决由云和背景光引入奇异点和数据融合区间较小导致融合系数不稳定,造成探测误差大的问题.此外,在对信号融合前需要对 PC 信号进行预处理,校正脉冲堆积<sup>[1,6,8-9]</sup>引入的非线性误差.目前商业化校正方法是通过理论模型<sup>[10-11]</sup>对 PC 信号进行校正,但是硬件系统的不确定性以及模型本身的误差会引入新的校正误差,尤其是随着远场弱信号的相对增强,校正误差也随之增大<sup>[12-13]</sup>.

基于目前已有的研究状况,针对小范围融合区间以及云和太阳背景光影响引入的测量奇异点导致融合误差较大的问题,一方面提出基于二次多项式拟合的数据融合方法,从而有效地增大数据融合区间,提高融合系数的稳定性;另一方面分析云高对融合系数的影响,提出剔除奇异点的质量控制方法,将质量控制后的数据用于融合系数计算,减小融合误差.数据融合前 PC 信号脉冲堆积校正采用理论模型校正的方法存在较大校正误差的问题,利用上述二次多项式拟合的结果进行校正.最后通过对比直接探测多普勒激光雷达与探空气球的同步测量数据来印证改进融合算法的有效性.

## 1 商业化的数据融合算法

一般而言,商业化的数据融合算法包括脉冲堆积校正和数据融合两步.

AD 和 PC 探测模式记录的是光信号经过光电倍增管(PhotoMultiplier Tube, PMT)后转换成的电信号. Licel 瞬态记录仪兼具 AD 和 PC 模式,是目前激光雷达常用的数据采集设备.使用时将 Licel 瞬态记录仪连接 PMT 并记录 AD 和 PC 信号:AD 记录电信号的电压值,单位是 mV;PC 表示测量信号的光子计数率,单位是 MHz.当进入探测器的光子数增加,PMT 输出的脉冲信号密集堆积一起,使得 PC 模式在计数脉冲个数时很难区分堆积的脉冲信号,产生非线性误差.目前常用的校正方法是假定 PC 通道是非瘫痪系统<sup>[10-11]</sup>,通过理论模型进行校正,即

$$N_c = \frac{N_m}{1 + \tau N_m} \quad (1)$$

式中, $N_m$ 表示测量的光子计数率, $N_c$ 表示经过脉冲堆积校正后的光子计数率, $\tau$ 表示 dead time<sup>[14]</sup>,为最小脉冲分辨率时间,等于最大光子计数率的倒数<sup>[6]</sup>,或者由经验模式<sup>[1]</sup>来确定取值.上述方法可以在一定程度上校正脉冲堆积,但是,由于硬件系统本身的原因,脉冲堆积校正模型误差不可忽略.此外,随着信号的增强校正误差也增加.脉冲堆积校正后,将 AD 和校正后的 PC 信号进行融合处理. Licel 提供的商用数据融合方

法假定某个小区间范围内的 AD 和 PC 信号线性变化,即

$$\sum_{N_{PC}=1\text{MHz}}^{10\text{MHz}} \{N_{PC} - [a \cdot V_{AD} + b]\}^2 = \text{minimum} \quad (2)$$

式中,  $N_{PC}$  和  $V_{AD}$  分别表示在融合区间的 PC 信号和 AD 信号,融合区间典型取值为 1~10 MHz;  $a$  和  $b$  表示 PC 和 AD 信号线性回归的斜率和截距,  $b$  近似 0,  $a$  为融合系数,其作用是将 AD 信号换算成 PC 信号.融合系数  $a$  受假定 AD 和 PC 线性变化的小区间范围以及云和太阳背景光引入奇异点的影响,起伏变化不稳定,导致融合精度下降,引起激光雷达探测误差增大.

## 2 基于二次多项式拟合的数据融合算法

提出二次多项式拟合的数据融合算法,主要步骤包括数据质量控制、脉冲堆积校正、数据融合三部分.

### 2.1 数据预处理

在对信号融合处理前,需要进行数据预处理,包括 AD 信号的延迟校正和背景直流信号的剔除.

首先,由于 Licel 瞬态记录仪在记录 AD 和 PC 数据序列的时间不同,AD 信号相对 PC 信号的存储有一个固定时间差.图 1 表示一组实际测量的 AD 和 PC 信号的强度在第 760~810 距离 bin 的变化,AD 信号最大值相对 PC 信号最大值出现的位置有所不同,相差约 10 个距离 bin.在融合前需要将延迟时间校正,也就是将 AD 信号向前移动 10 个距离 bin.

其次,通常在数据融合前去除 AD 和 PC 的背景直流信号,具体是将远距离某个范围内信号的均值作为背景直流信号并剔除.AD 信号的直流项是与硬件有关的固定偏压值,PC 信号的直流项通常是太阳背景光.太阳背景光作为 PC 接收信号的一部分,如果在融合前去除将会影响 AD 和 PC 的函数关系,还会导致计算的融合系数随着太阳背景光的增强而增加<sup>[1]</sup>.因此,本文在信号预处理时只剔除 AD 信号的背景直流信号,而 PC 信号的背景直流项在融合后剔除.

### 2.2 二次多项式拟合方法选择依据

二次多项式拟合具有较低的运算复杂度,并对简单的非线性具有较高的估计精度,可有效用于数据质量控制、脉冲堆积校正以及数据融合中.提出二次多项式拟合的数据融合方法,可有效地增大数据融合区间,充分考虑 AD 和 PC 的非线性关系,在大范围的融合区间中计算融合系数.如图 2,以激光雷达实际测量的 AD 与 PC 信号的散点图为例,当 PC 小于 10 MHz 时,AD 与 PC 具有较好的线性关系,说明该区域内 AD 与 PC 测量的结果具有较好的一致性.随着探测信号的增强(>10 MHz),由于脉冲堆积 PC 信号的非线性误差增大,AD 与 PC 间有很明显的非线性关系.通过二次多项式表示 AD 和 PC 之间的非线性关系(如图 2 中的拟合曲线),二次多项式曲线拟合可以表示为

$$E_2 = \sum_{i=1}^n [S_2(x_i - y_i)]^2 \quad (3)$$

$$S_2(x) = a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (4)$$

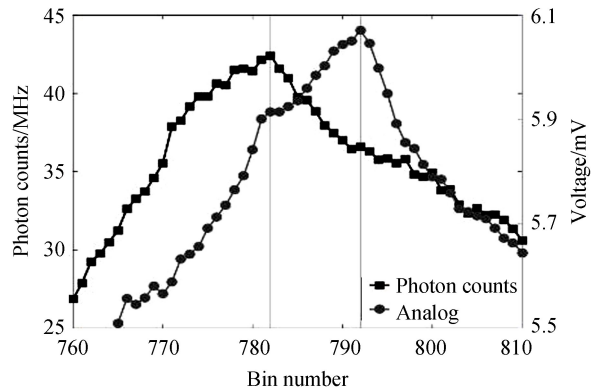


图 1 Licel 瞬态记录仪采集到的原始 AD 和 PC 信号  
Fig.1 Raw data of Licel-digitizer-sampled AD and PC signals

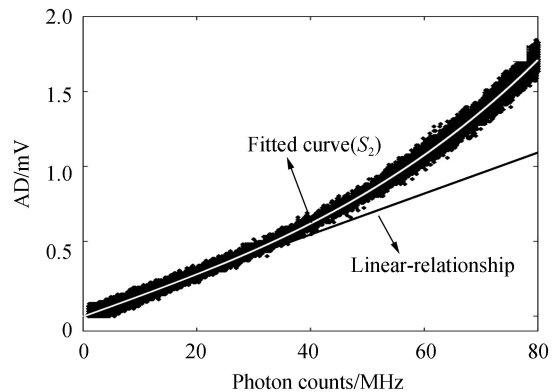


图 2 PC 和 AD 信号散点图  
Fig.2 Scatterplot of PC data and AD data

式中,  $S_2(x)$  是二次多项式的表达式,  $x_i$  表示拟合前的 PC 测量数据,  $y_i$  表示拟合前的 AD 测量数据,  $E_2$  表示二次曲线拟合的总残差.  $a_2, a_1, a_0$  表示二次多项式的系数.  $S_2(x)$  可以通过使  $E_2$  达到最小值时计算得到. 采用二次多项式拟合的方法能得到 AD 和 PC 稳定的非线性关系, 将二次多项式函数  $S_2(x)$  在  $x=0$  处的切线代替小范围区间内线性拟合的直线, 即

$$S_1(x) = ax + b \quad (5)$$

式中,  $S_1(x)$  表示线性拟合的表达式,  $a$  和  $b$  表示直线的斜率和截距, AD 信号去除背景直流后,  $b$  近似 0, 斜率  $a$  记为融合系数.

### 2.3 云层对数据影响分析与数据质量控制

分析云高对采集数据质量的影响, 提出剔除奇异点的数据质量控制方法. 以大气探测激光雷达系统在有云天气条件下的实测数据分析云高对数据融合的影响, 实测数据来源于中国海洋大学研制的水汽、云和气溶胶激光雷达 (WATER vapor, Cloud and Aerosol Lidar, WACAL). WACAL 系统可以输出 354.7、532 和 1064 nm, 重复频率为 30 Hz 的激光脉冲, 脉冲能量分别为 410、120 和 700 mJ. 354.7 nm 的波长用于探测氮气和水汽的喇曼信号, 532 nm 和 1064 nm 的信号用来探测气溶胶和云, 本文使用 532 nm 通道的信号.

用 WACAL 系统于 2016 年 5 月 8 日 18:56 至 21:04 在中国海洋大学进行了观测实验. 通过大气回波信号的时间高度指示图 (Time-Height Indicator, THI) (图 3(a)) 可以明显观察到云层高度变化: 第一层云在 3 km 左右, 第二层在 3 km 至 4 km 之间, 第三层云出现在 21:40 左右高度 6 km 附近, 其中大部分云层出现在 2 km 到 4 km 之间. AD 和 PC 信号的散点图如图 3(b) 所示, 横坐标表示 PC 信号强度, 纵坐标表示 AD 信号强度, 点的颜色表示数据点密度, 在图中明显存在大量奇异点. WACAL 系统于 2016 年 4 月 5 日 19:04 到 20:47 的大气回波 THI 图如图 4(a) 所示, 云层基本在 6 km 以上. AD 和 PC 信号的散点图如图

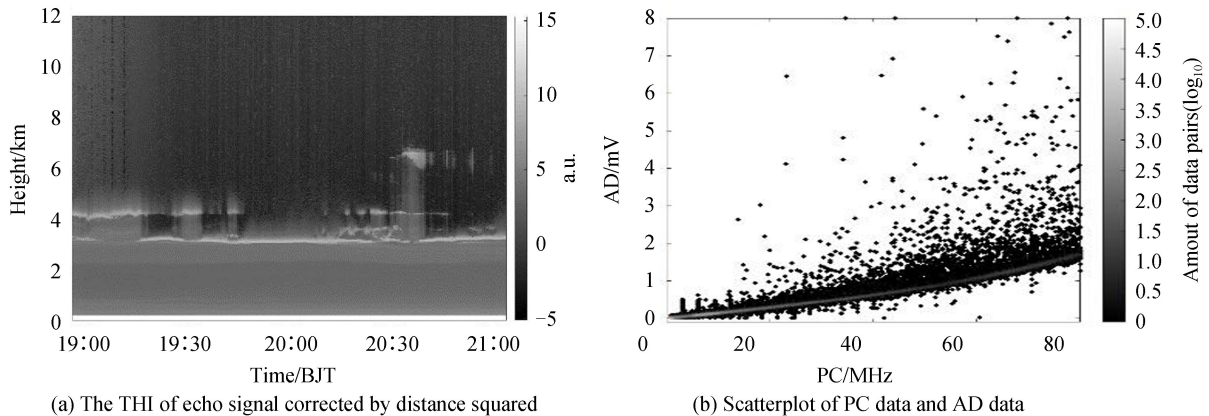


图 3 2016 年 5 月 8 日 18:56 至 21:04 WACAL 系统测量大气回波信号

Fig.3 Atmospheric echo signal measured by WACAL system from 18:56 to 21:04 May 8, 2016

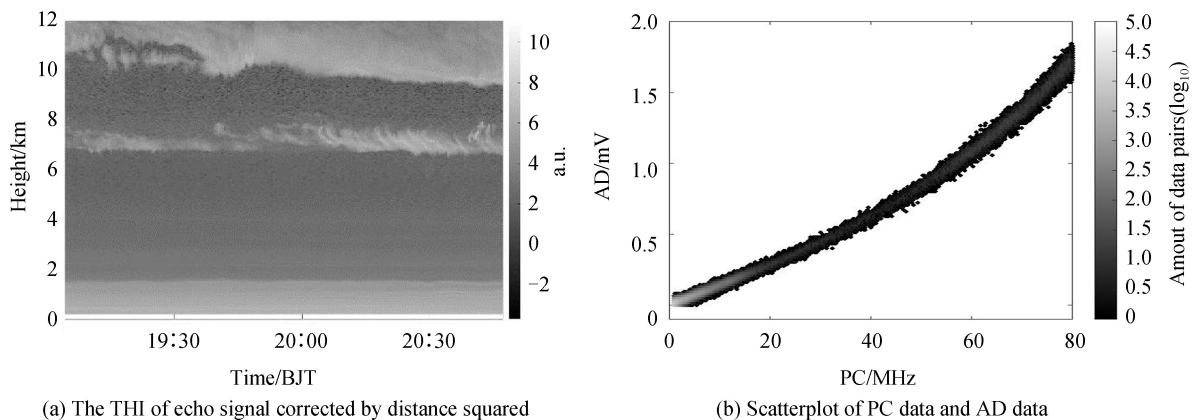


图 4 2016 年 4 月 5 日 19:04~20:47 WACAL 系统测量大气回波信号

Fig.4 Atmospheric echo signal measured by WACAL system from 19:04~20:47 April 5, 2016

4(b)所示,不同于图 3(b),散点图很好地反映了 AD 和 PC 的非线性关系,没有奇异点.上述两组数据都是在有云天气条件下的测量结果,第一组数据云层高度为 2~4 km,散点图有大量奇异点,第二组数据云层高度 >6 km,散点图没有奇异点,说明低层云是产生奇异点的主要原因.由于底层云的时空变化,PC 信号的非线性误差有明显起伏变化,系统在累计非线性变化的 PC 信号时出现奇异点.

利用二项式多项式拟合的方法去除奇异点,通过多次测试后,设置两个不同的阈值分别实现粗略和较为精细的质量控制:第一步去除与曲线距离超过 5 倍标准偏差的点,将剩余的点再进行二次多项式拟合;第二步去除与曲线距离超过 1.5 倍标准偏差的点.为了印证质量控制的有效性,对比 WACAL 系统在有云和晴空天气条件下经过质量控制后计算的融合系数,如表 1 所示.WACAL 系统在有云和晴空天气条件测量时间分别为 35 天和 21 天,融合系数  $a$  的均值分别为 0.013 9 和 0.013 8 mV/MHz,标准偏差分别为  $4.80 \times 10^{-4}$  和  $5.63 \times 10^{-4}$  mV/MHz.有云和晴空天气条件下均值和标准偏差基本一致,说明质量控制后云对融合系数的影响基本忽略不计,同时也印证了质量控制去除奇异点的方法的有效性.

表 1 2016 年 3 月至 5 月 WACAL 系统实验 56 天内测量的融合系数  $a$  在晴空和有云天气下的变化  
Table 1 Variation of gluing coefficient  $a$  in clear and cloudy condition for 56 days from March to May 2016

| Items     | Number of days | Mean value/(mV · MHz <sup>-1</sup> ) | Standard deviation/(mV · MHz <sup>-1</sup> ) |
|-----------|----------------|--------------------------------------|--|
| Cloudless | 21             | 0.0139                               | $4.80 \times 10^{-4}$                        |
| Cloudy    | 35             | 0.0138                               | $5.63 \times 10^{-4}$                        |

## 2.4 脉冲堆积校正

二次多项式曲线  $S_2(x)$  反映了 AD 信号和 PC 信号的非线性关系,自变量表示 PC 信号,函数值表示 AD 测量值.利用 AD 和 PC 的非线性关系对脉冲堆积导致 PC 信号的非线性误差进行校正:首先,将带有非线性误差的 PC 信号  $p_1$  代入二次多项式拟合的曲线  $S_2(x)$ ,得到没有非线性误差的 AD 信号值  $a_1 = S_2(p_1)$ ,然后,根据图 2 中的直线  $S_1(x)$  将  $a_1$  单位转换成 PC 信号单位  $p_2 = S_1^{-1}(a_1)$ .通过上述两个步骤,将 PC 信号  $p_1$  校正为  $p_2$ ,实现 PC 信号的脉冲堆积校正.

## 2.5 数据融合

数据融合的流程如图 5 所示,首先,将质量控制后 AD 信号和 PC 信号作散点图,进行二次多项式拟合得到 AD 和 PC 的非线性关系与融合系数,然后对 AD 和 PC 信号进行单位转换和脉冲堆积校正,最后通过加权平均融合,即

$$S_{\text{Glued}} = (1-W)S'_{\text{PC}} + W \cdot S'_{\text{AD}} \quad (6)$$

$$W = \begin{cases} 0 & S'_{\text{PC}} \leq C_{\min} \\ \frac{S'_{\text{PC}} - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} & C_{\min} < S'_{\text{PC}} < C_{\max} \\ 1 & S'_{\text{PC}} > C_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $S_{\text{Glued}}$  表示融合后的数据,  $S'_{\text{PC}}$  表示校正后的 PC 信号,  $S'_{\text{AD}}$  表示转换单位的 AD 信号,  $W$  表示权重函数,  $1-W$  和  $W$  分别表示 PC 和 AD 信号的加权系数,  $C_{\max}$  和  $C_{\min}$  分别表示融合区间的最大值和最小值.

## 3 实验结果与分析

### 3.1 同步对比实验

为了印证本文数据融合方法的有效性,使用直接探测多普勒激光雷达与探空气球同步测量数据,与商用数据融合方法进行对比.2011 年 3 月 21 日至 2011 年 4 月 19 日,车载直接探测多普勒激光雷达在中国南郊气象测量中心开展了与探空气球的同步对比实验,如图 6,每天早晚 7 点左右开始测量.车载直接探测多普勒激光雷达由中国海洋大学研制,原理和相关技术参数可参考文献[15-16].该系统包括激光发射、信号接收及

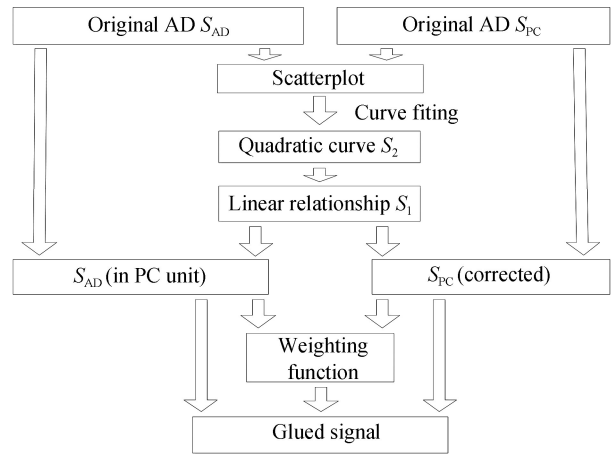


图 5 PC 和 AD 信号融合算法流程  
Fig.5 Flow diagram of gluing algorithm for PC and AD data

鉴频、信号采集和处理、扫描控制几个子系统.系统测量时以仰角  $60^\circ$  采集东西南北以及垂直共 5 个方向上的大气回波信号,通过碘分子鉴频器探测多普勒频移信息,进而反演风廓线数据.GTS1 型数字式探空仪具有探测精度高、速度快和抗干扰能力强等特点,是目前我国比较先进的高空探测仪器.探空仪包含了气压、温度、湿度传感器、位置传感器以及电池和发射机等,由氢气球携带升空并与 GFE(L)1 型二次测风雷达配合使用,观测不同高度层的大气温度、湿度、压力、风速和风向等气象数据.

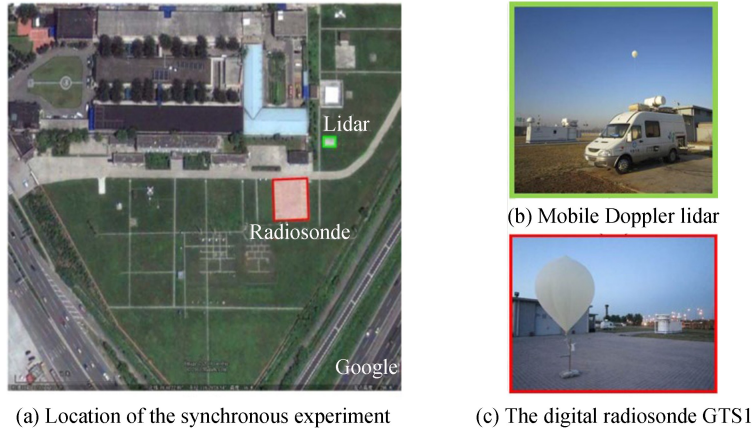


图 6 车载多普勒激光雷达与探空气球同步对比实验  
Fig.6 Synchronous experiment between mobile Doppler lidar and radiosonde

### 3.2 结果分析与讨论

2011 年 4 月 11 日车载多普勒激光雷达垂直测量的 AD 和 PC 信号如图 7.图 7(a)的 AD 信号低空趋势较好,但 10 km 以上起伏变化较大,信噪比较低;图 7(b)的 PC 信号在 10 km 以上信噪比明显优于 AD 信号,但 1 km 以下信号饱和和明显;图 7(c)融合后的信号在近场和远场分别具有 AD 和 PC 信号的特征,说明融合后的信号有效地增加了探测信号的动态范围.进一步分析融合参数随高度的变化:PC 信号的加权系数随高度的变化如图 8(a)所示,在 2.2 km 到 5 km 左右加权系数在  $0\sim 1$  之间变化,5 km 以上加权系数为 1,说

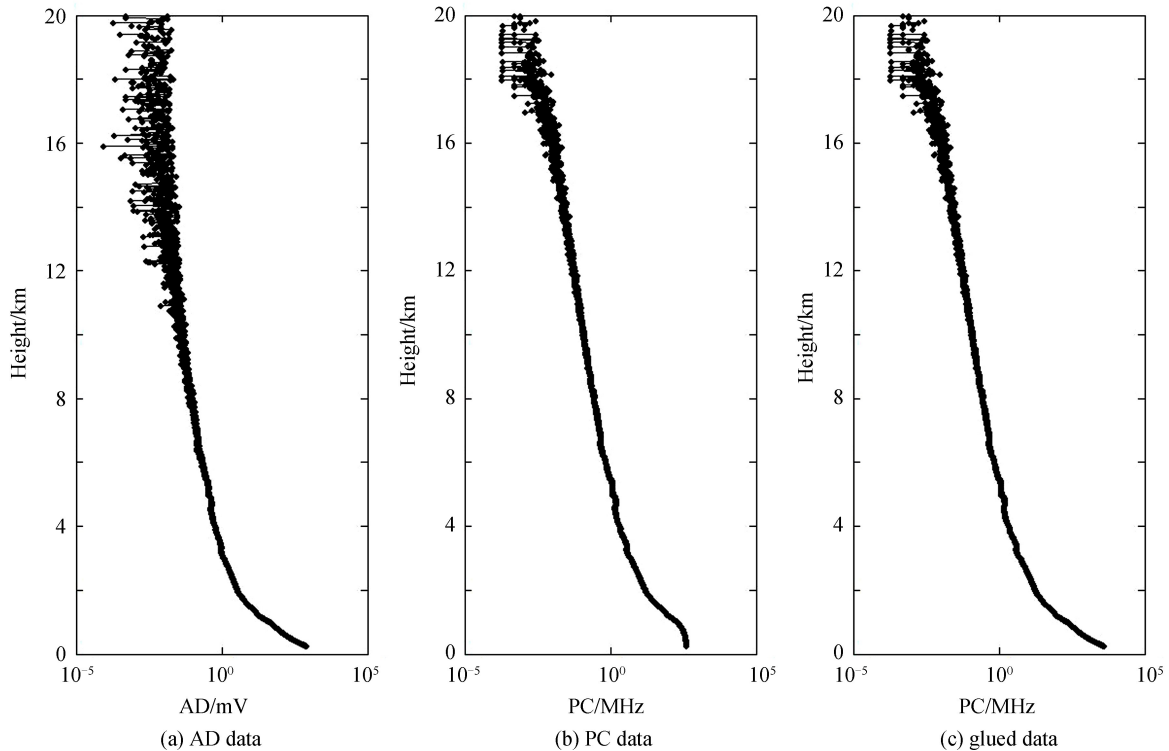


图 7 大气回波信  
Fig.7 Atmospheric echo signal

明融合信号中 PC 信号的权重随信号的减弱而逐渐增加;AD 和 PC 信号的绝对偏差和相对偏差分别如图 8(b)和(c)所示,1 km 以下 AD 信号的绝对偏差和相对偏差都明显较小,3 km 以上 PC 信号的绝对偏差和相对偏差接近 0,说明融合后的信号在低空和高空分别使用了 AD 和 PC 信号.

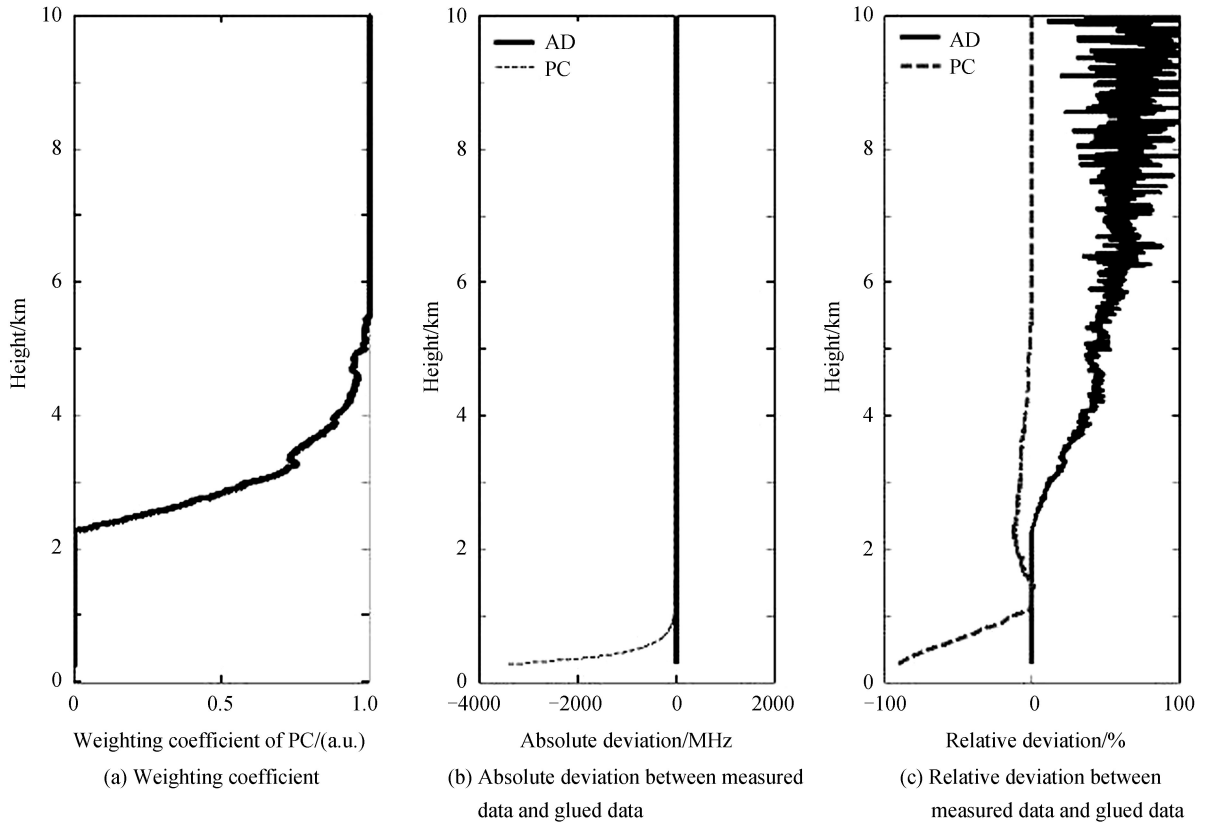


图 8 数据融合参数随高度变化关系  
Fig.8 The variation of gluing parameters with height

2011 年 4 月 11 日车载激光雷达与探空气球同步测量结果如图 9 所示.对比两种数据融合算法结果,风向变化不明显,但风速在 2 km 以上更接近于同步测量探空气球结果.说明本文的数据融合算法能够改善多

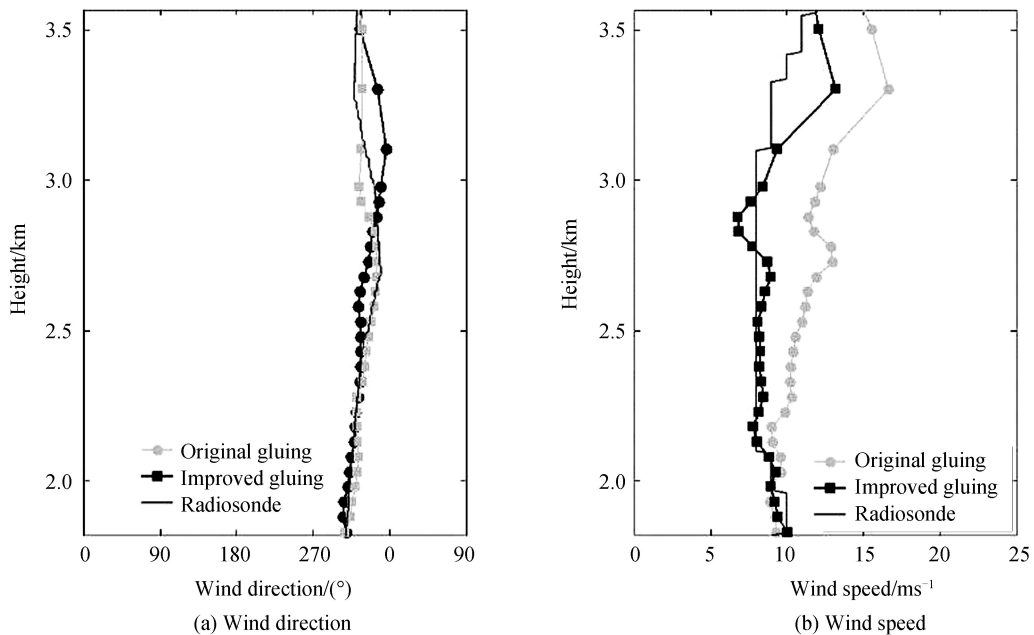


图 9 多普勒激光雷达与探空气球测量的风廓线  
Fig.9 The wind profile measured by Doppler lidar and radiosonde

普勒激光雷达的风场探测精度。

激光雷达的结果经过信噪比阈值质量控制后与探空气球统计对比,融合算法改进前后分别如图 10(a)和(b)所示.使用本文的数据融合算法后,风速相关系数从 0.80 提高到 0.85,均方根误差从 3.37 m/s 降低为 2.41 m/s,偏差从 0.60 m/s 降低为 0.06 m/s.结果显示本文提出的数据融合算法提高了直接探测多普勒激光雷达测量风场探测精度,能更好地融合 AD 和 PC 信号。

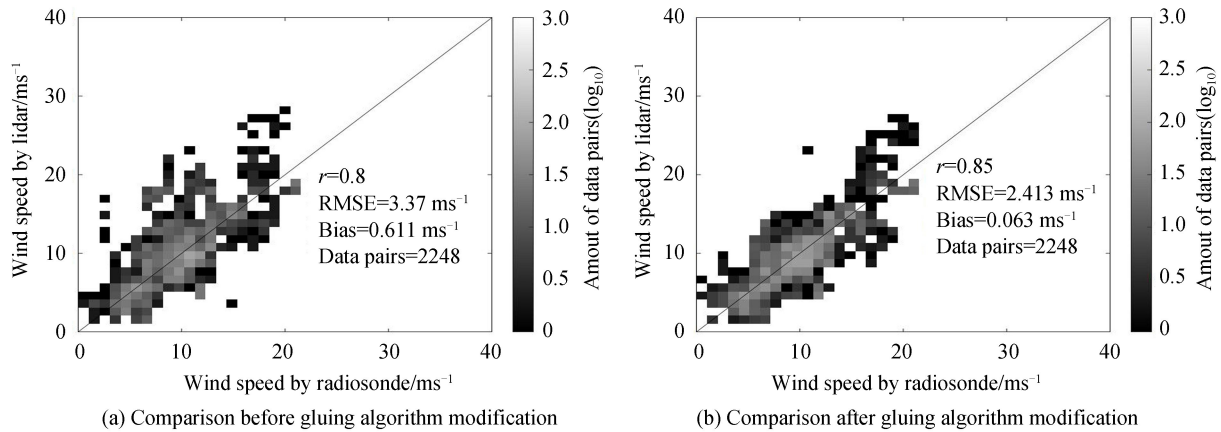


图 10 车载多普勒激光雷达与探空气球同步测量的风速对比  
Fig.10 Wind speed comparison between Doppler lidar and radiosonde

## 4 结论

本文提出使用二次多项式拟合计算融合系数的方法来有效地增大数据融合区间,提高融合系数的稳定性,并用于 PC 信号的脉冲堆积校正;对比不同云层高度对融合系数的影响,提出剔除受环境影响的质量较差数据点的质量控制方法,将质量控制后的数据用于融合系数计算,提高融合精度.使用直接探测多普勒激光雷达与同步测量的探空气球数据验证改进融合算法的有效性,结果表明改进前后激光雷达与探空气球测量风速的相关系数从 0.80 提高到 0.85,均方根误差从 3.37 m/s 降低为 2.41 m/s,偏差从 0.60 m/s 降低为 0.06 m/s.证明了改进后的融合算法能够更有效地融合 AD 和 PC 信号,提高直接探测多普勒激光雷达的风场探测精度.该方法同样适用于其它大气探测多普勒激光雷达。

考虑到实际应用中条件的复杂性,建议在有云天气条件下增加融合算法的输入数据量,以保证质量控制后二次多项式拟合时有足够多的有效数据点,避免有效数据点过少引起的融合系数计算误差较大的问题.下一步工作考虑将监督学习中的异常检测算法应用到数据质量控制中,提高数据质量控制效果,进一步提高激光雷达探测精度。

### 参考文献

- [1] WHITEMAN D N, DEMOZ B, DI GIROLAMOP, *et al.* Raman lidar measurements during the International H<sub>2</sub>O Project. Part I: Instrumentation and analysis techniques[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2006, **23**(2): 157-169.
- [2] NEWSOM R K, TURNER D D, MIELKE B, *et al.* Simultaneous analog and photon counting detection for Raman lidar [J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(20): 3903-3914.
- [3] WHITEMAN D N, DEMOZ B, DIGIROLAMO P, *et al.* Raman lidar measurements during the international H<sub>2</sub>O project. 2; instrument comparisons and case studies[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2006, **23**(2): 170-183.
- [4] WALKER M, VENABLE D, WHITEMAN D N. Gluing for Raman lidar systems using the lamp mapping technique [J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(36): 8535-8543.
- [5] ZHANG Yun-peng, YI Fan, KONG Wei, *et al.* Slope characterization in combining analog and photon count data from atmospheric lidar measurements.[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(31): 7312-7320.
- [6] LIU Zhi-shen, LI Zhi-gang, LIU Bing-yi, *et al.* Analysis of saturation signal correction of the troposphere lidar [J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, **7**(11): 1051-1054.
- [7] DARLAND E J, LEROI G E, ENKE C G. Pulse (photon) counting; determination of optimum measurement system parameters[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, **51**(2): 240-245.



- [8] INGLE J D, CROUCH S R. Pulse overlap effects on linearity and signal-to-noise ratio in photon counting systems [J]. *Analytical Chemistry*, 1972, **44**(4): 777-784.
- [9] ASH K C, PIEPMEIER E H. Double beam photon counting photometer with dead time compensation[J].*Analytical Chemistry*, 1971, **43**(1): 26-34.
- [10] OMOTE K. Dead-time effects in photon counting distributions [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 1990, **293**(3):582-588.
- [11] SRINIVASAN S K. Dead-time effects in photon counting statistics[J].*Journal of Physics A Mathematical General*, 1978, **11**(11):2333.
- [12] WANG Zhong-kun, ZHANG Yin-chao, CHEN He. Saturation correction near the ground for pure rotational Raman lidar[J]. *Optical Engineering*, 2015, **54**(1): 014107.
- [13] KOLB K. Signal-to-noise ratio of Geiger-mode avalanche photodiode single-photon counting detectors [J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(8): 081904.
- [14] YANG Zi-jian, CHEN Feng, LI Chao, *et al.* Transient effect of dead time of photon-counting in micro-pulse lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(2): 408-414.  
杨子健, 陈锋, 李抄, 等. 微脉冲激光雷达中的光子计数死区时间瞬态效应[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(2):408-414.
- [15] LIU Zhi-shen, LIU Bing-yi, WU Song-hua, *et al.* High spatial and temporal resolution mobile incoherent Doppler lidar for sea surface wind measurements [J]. *Optics letters*, 2008, **33**(13): 1485-1487.
- [16] LIU Bing-yi, LIU Zhi-shen, SONG Xiao-quan, *et al.* Modifications and moving measurements of mobile doppler LIDAR[C]. DLR: ESA-MOST DRAGON 2 Mid Term Results Symposium, 2010.**684**: 33-34.

---

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41375016,41471309), National Key Research and Development Plan (No. 2016YFC1400904) and National High Technology Research and Development Program of China (No. 2014AA09A511)  
引用格式:FENG Chang-zhong, WU Song-hua, LIU Bing-yi.Gluing Method of Detected Signal Based on Lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6):0601001  
冯长中,吴松华,刘秉义.激光雷达探测信号数据融合算法[J].光子学报,2018,**47**(6):0601001