

一种机载激光雷达偏振探测优化设计方案的理论研究

刘厚通¹ 赵建新²¹ 安徽工业大学数理学院, 安徽 马鞍山 243002
² 安徽工业大学后勤与基建管理处, 安徽 马鞍山 243002

摘要 提出了一种机载激光雷达偏振探测方案, 该方案去掉了传统方案中偏振探测的“瓶颈”通道——垂直探测通道, 能够减小 532 nm 非偏振探测通道和 532 nm 偏振平行探测通道在进行偏振探测时回波信号的差距, 两通道回波信号的比例可人为调整。在与传统方案能量配置相同的情况下, 加强了偏振探测通道的探测能力。这种方案能减小 532 nm 对卷云进行偏振测量时光电倍增管饱和的几率, 降低激光器的能量配置, 实现真正的 532 nm 与 1064 nm 双波长探测。

关键词 大气光学; 机载激光雷达; 偏振垂直探测通道; 卷云; 退偏比

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.040103

Theoretical Study on Optimized Design Scheme of Polarization Sounding by Airborne Lidar

Liu Houtong¹ Zhao Jianxin²

¹ *Mathematical Physics College, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China*
² *Logistics and Capital Construction Management Department, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China*

Abstract A polarization sounding scheme of airborne lidar is proposed, in which the polarization sounding “bottle-neck” channel i. e., the perpendicular sounding channel in the traditional scheme is obliterated. Return signal differences between 532 nm depolarization sounding channel and 532 nm polarization parallel sounding channel can be diminished in the polarization sounding courses. The energy ratio of two channels, return signals can be adjusted. This scheme strengthens the polarization sounding capacity when it has the same energy as first scheme. It can reduce the photomultiplier (PMT) saturation probability when cirrus is sounded by 532 nm polarization channel. This scheme also can reduce laser energy and actualize genuine 532 nm and 1064 nm dual-wavelength sounding.

Key words atmospheric optics; airborne lidar; polarization-sounding perpendicular channel; cirrus; depolarization ratio

OCIS codes 010.3640; 0101290; 010.1310

1 引言

传统的 532 nm 机载偏振激光雷达, 其垂直探测通道是偏振探测的“瓶颈”通道, 当探测气溶胶时, 其回波信号很小, 和平行探测通道的信号量级相差很大; 在探测某些目标时, 有可能出现平行探测通道的信号有足够的信噪比(SNR), 而垂直探测通道信噪比达不到测量要求的情况; 对卷云进行偏振探测时, 由于飞机有可能离卷云很近, 甚至在卷云中穿行, 这样偏振平行通道的信号有可能很大, 甚至造成光电倍增管(PMT)的饱和。

为了克服以上缺点, 本文在传统偏振探测方案(称为“方案一”)的基础上, 设计出一种新的偏振探测方案(称为“方案二”), 这种方案能均衡两偏振探测通道回波信号的大小, 在与方案一探测能力相同时, 其激光器

收稿日期: 2012-11-20; **收到修改稿日期**: 2013-01-24; **网络出版日期**: 2013-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(41075027)资助课题。

作者简介: 刘厚通(1969—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光雷达研制及数据处理等方面的研究。

E-mail: liuhoutong6@163.com

能量配置更小。方案二本身具有 532 nm 非偏振探测通道,避免了方案一用 532 nm 垂直探测通道和平行探测通道信号反演 532 nm 非偏振探测信号带来的误差。532 nm 非偏振探测通道、532 nm 偏振平行探测通道和 1064 nm 探测通道并存,在用 532 nm 非偏振通道和 532 nm 平行探测通道对卷云和沙尘实现偏振探测的同时,用 532 nm 非偏振探测通道和 1064 nm 信号实现真正的双波长探测。

2 机载激光雷达设计的两种方案

2.1 方案一

机载偏振大气探测激光雷达第一种设计方案也是现阶段普遍使用的一种方案如图 1(a)所示^[1~5]。偏振探测是通过在 532 nm 的通道上放置一偏振棱镜来实现的,采用偏振技术,能够从回波信号的偏振特性中识别沙尘粒子及区分冰晶云和水云。

机载大气探测激光雷达接收光学单元的 532 nm 偏振通道主要包括接收望远镜、视场光阑、分色分束片、偏振棱镜和窄带干涉滤光片等光学元件,进行两偏振通道增益比 k 的测量时,在偏振棱镜前需加 1/2 波片或退偏器。

2.2 方案二

方案二与方案一的主要区别在于偏振探测通道,如图 1(b)所示。方案一的 532 nm 偏振探测通道具有垂直探测通道,而方案二的 532 nm 偏振探测通道是在 532 nm 的接收光路上放置一分束镜,接收到的 532 nm 回波信号经分束镜分束后,一路分束信号经偏振棱镜后的偏振平行分量被光电倍增管接收,另一路的分束信号直接让光电倍增管接收。非常明显,方案二没有偏振垂直通道,直接用 532 nm 非偏振探测信号和 532 nm 偏振平行信号来反演 532 nm 垂直探测信号,然后由偏振垂直探测信号和平行探测信号反演出退偏比。

2.3 机载激光雷达偏振探测

处于高度 Z 的机载激光雷达垂直向地面发射 532 nm 的激光脉冲,对每一发激光脉冲,其接收到的离地面 Z' 高度处大气后向散射回波功率 $P(Z')$ 可以用米氏散射激光雷达方程表示^[1,6~8]:

$$P_p = K_p P_0 \frac{A_r h}{8\pi(Z-Z')^2} \beta_p \exp\left[-2 \int_0^{Z'} \alpha_p(Z') dZ'\right], \quad (1)$$

$$P_s = K_s P_0 \frac{A_r h}{8\pi(Z-Z')^2} \beta_s \exp\left\{-\int_0^{Z'} [\alpha_p(Z') + \alpha_s(Z')] dZ'\right\}, \quad (2)$$

式中下标 p 和 s 分别表示与发射激光偏振方向平行和垂直的两个方向, P 是激光发射功率(W), P_p 和 P_s 分别为激光雷达接收到的大气后向散射平行分量和垂直分量的回波功率(W), K_p 和 K_s 分别是接收平行分量通道和垂直分量通道的雷达系统常数(W·km³·sr), β_p 和 β_s 分别表示大气后向散射系数的平行分量和垂直分量(km⁻¹·sr⁻¹), α_p 和 α_s 分别表示大气消光系数的平行分量和垂直分量(km⁻¹)。

偏振激光雷达探测的退偏振比 $\delta(Z')$ 可表示为^[6,7]

$$\delta(Z') = \frac{P_s/K_s}{P_p/K_p} = \frac{\beta_s}{\beta_p} \exp\left[\int_0^{Z'} (\alpha_p - \alpha_s) dZ'\right]. \quad (3)$$

一般情况下, $\alpha_p(Z') = \alpha_s(Z')$ ^[5],所以(3)式可以写成^[6,7]

$$\delta(Z') = \frac{\beta_s}{\beta_p} = k \frac{P_s}{P_p}, \quad (4)$$

式中 $k = K_p/K_s$ 。这样,通过分析偏振激光雷达接收到的各个高度处大气后向散射回波功率的平行分量 P_p 和垂直分量 P_s 以及这两个通道的增益常数比 k ,利用(4)式,就可以获得大气退偏振比的垂直分布廓线

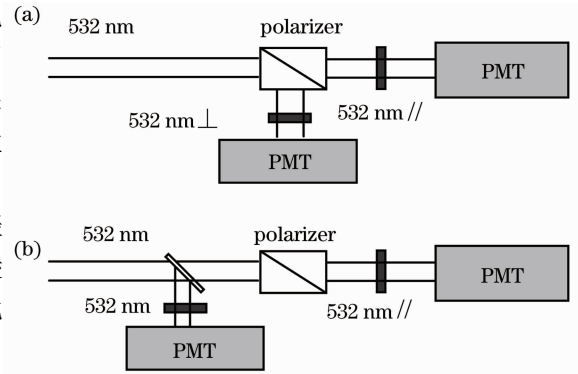


图 1 机载激光雷达(a)第一种和(b)第二种偏振探测方案

Fig. 1 (a) First- and (b) second- design scheme of airborne lidar polarization measurement

$\delta(Z')$ 。由于大气中气体分子的退偏振比很小,仅为 0.0297^[6],因此,偏振激光雷达探测大气中非球形粒子时获得的大气退偏振比 $\delta(Z')$ 主要来自这些非球形粒子的贡献。

3 两种偏振探测方案的比较

3.1 两偏振探测通道回波信号差距

按方案一设计时,无论是地基激光雷达还是机载激光雷达,偏振平行通道和偏振垂直通道的回波信号相差很大。图 2(a)是地基偏振-米氏散射激光雷达(PML)按方案一对 2005 年 5 月 9 日合肥卷云进行探测时,偏振 532 nm 垂直通道与平行通道的实际回波信号对比;探测 2005 年 5 月 9 日合肥卷云时,偏振平行探测通道的回波信号是偏振垂直探测通道回波信号的 3.6~5.0 倍,如图 2(b)所示;探测 2005 年 5 月 9 日合肥卷云高度下的气溶胶时,偏振平行通道回波信号与偏振垂直通道回波信号之比的最大值接近 60,如图 2(c)所示。

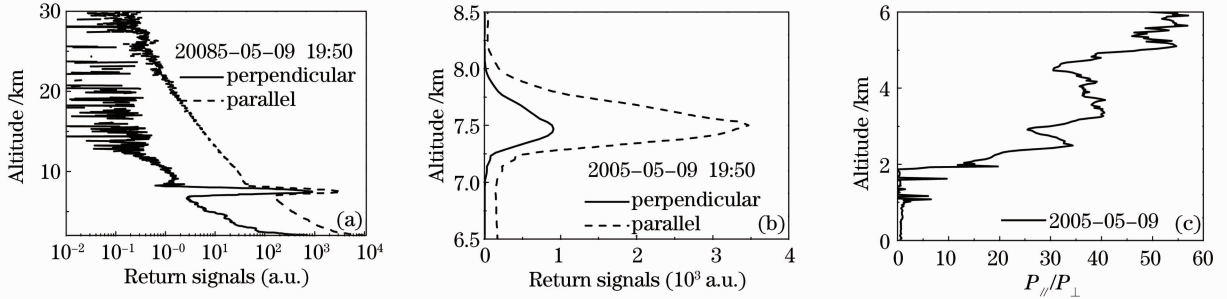


图 2 PML 的垂直通道与平行通道回波信号

Fig. 2 Return signals in perpendicular and parallel channels of PML

图 3(a)是机载激光雷达按方案一探测合肥卷云时,模拟计算的偏振垂直通道和垂直通道回波光子数对比图。根据对合肥地区卷云偏振比探测结果的统计分析,卷云的退偏振比在 0.25~0.45 之间^[8]。假定 2005 年 5 月 9 日合肥卷云的退偏振比为 0.25,每发激光脉冲能量为 100 mJ,根据相应的计算公式可以求得探测卷云偏振平行通道光子数的最大值为 153884 个,偏振垂直通道光子数的最大值为 38592 个,平行通道回波信号是垂直通道回波信号的 4 倍。在偏振探测时当能量设置满足垂直通道信噪比的要求时,平行通道的回波信号就会很强,甚至在对卷云等探测目标进行探测时,使得平行探测通道的光电倍增管出现饱和状态。

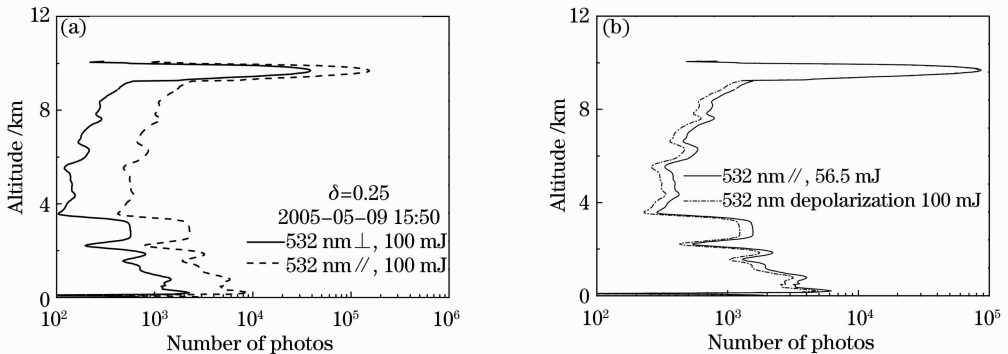


图 3 两种方案的回波光子数

Fig. 3 Return photoelectrons of two schemes

方案一偏振探测两通道回波信号强弱之间的比例是由探测目标的退偏特性决定的,无法人为调控两偏振探测通道回波信号的比例。

3.2 两通道回波信号的比例配置

第二种设计方案偏振探测通道的能量分配比率可以根据探测的目标,改变偏振两探测通道的分束比来实现。大量反演结果表明,当方案二的偏振平行通道和非偏振通道对卷云的探测能力大致相等时,探测其他目标时两通道的回波信号较为均衡,也能够最大限度地避免探测卷云时光电倍增管出现饱和,下面举例说明。

设激光器的 532 nm 波长每一发脉冲的能量为 100 mJ, 由于卷云退偏振比的范围在 0.25~0.45 之间, 而沙尘退偏振比的范围大约在 0.2~0.4 之间^[7], 取卷云的退偏振比为 0.3, 532 nm 非偏振探测通道和 532 nm 平行探测通道探测 2005 年 5 月 9 日合肥卷云的回波信号相等时, 激光脉冲的能量分别为 43.5 mJ 和 56.5 mJ, 如图 3(b) 所示。用这种能量分配方案对其他的卷云和气溶胶进行模拟计算, 所得到的 532 nm 非偏振探测通道和 532 nm 平行探测通道回波信号相差不大。

下面的模拟计算就以这种能量分配比例进行分析。

3.3 方案二加强偏振通道探测能力

图 2 是地基偏振-米氏散射激光雷达 532 nm 垂直通道与平行通道的回波信号对比, 从图 2 中可以看出, 垂直通道的有用信号约在 12 km, 而平行通道的有用信号可达 20 km, 对某些高度的卷云进行探测时, 就可能因垂直探测通道卷云的回波信号太弱而无法反演卷云的退偏振比, 尽管这时平行探测通道卷云的回波信号有足够的信噪比。532 nm 偏振平行通道和垂直通道回波信号除了用来反演探测目标的退偏振比以外, 还要用来反演非偏振的 532 nm 波长回波信号。以图 2 中的探测信号为例, 12 km 高度以上垂直通道探测气溶胶的回波信号太弱, 尽管平行通道的有用信号可达 20 km, 反演的非偏振 532 nm 波长有用的回波信号也只能在 12 km 以下。方案一的偏振测量与反演受偏振垂直通道探测能力的制约, 垂直探测通道是偏振探测的“瓶颈”通道。

图 4 是方案一的偏振垂直通道和方案二的偏振平行通道探测卷云的回波光子数比较, 模拟计算中两种设计方案的每发激光脉冲能量均为 100 mJ, 方案二按 3.2 节的能量分配方案分束后, 偏振平行通道接收到激光脉冲能量为 56.5 mJ 的回波信号。当退偏振比分别为 0.25、0.35、0.45, 探测 2005 年 5 月 9 日合肥卷云时, 方案二的偏振平行通道的回波光子数分别是方案一偏振垂直通道回波光子数的 2.27、1.47 和 1.20 倍。

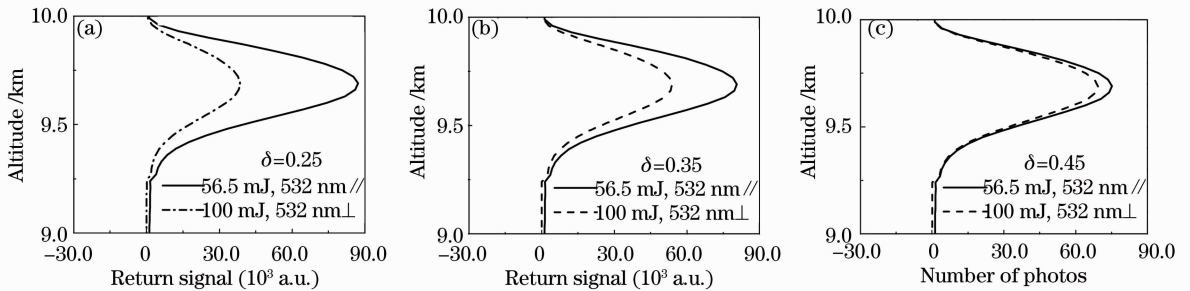


图 4 两种设计方案卷云的探测能力

Fig. 4 Cirrus sounding capacity of two design schemes

图 5 是飞机在 12 km 的高度上, 利用两种设计方案对 1999 年 4 月 15 日合肥地区的沙尘进行探测时回波光子数模拟的数据, 模拟计算中两种设计方案的能量配置同上。从图 5 中可以看出, 方案一 532 nm 垂直探测通道的回波光子数明显小于方案二 532 nm 偏振平行探测通道的回波光子数, 随着沙尘退偏振比的增大, 方案一的回波光子数与方案二的回波光子数的差异在减小, 但始终小于后者: 当 $\delta=0.2$ 时, 方案二探测沙尘的回波光子数大约是方案一的 3.33 倍, 当 $\delta=0.4$ 时, 方案二探测沙尘的回波光子数大约是方案一的

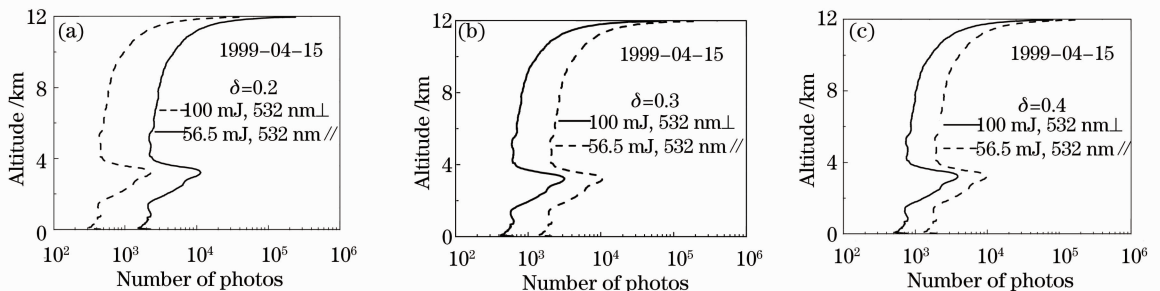


图 5 两种方案的沙尘偏振探测能力

Fig. 5 Dust polarization sounding capacity of two design schemes

2.5 倍。对 1999 年 4 月 15 日合肥地区的沙尘进行偏振探测时,方案一 100 mJ 的偏振探测能力相当于方案二 30~40 mJ 的偏振探测能力。

理论计算表明:当激光器每发 532 nm 激光脉冲的能量为 100 mJ,方案二的能量分配按 3.2 节配置时,方案二平行通道对气溶胶探测的回波光子数大约是方案一垂直通道对气溶胶探测的回波光子数的 23 倍(气溶胶的退偏振比取固定值 0.029,实际上它随高度的变化而变化)。

当两种探测方案对 1999 年 4 月 15 日合肥地区的沙尘的探测能力相等时,方案二的能量只是方案一的 0.3~0.4 倍。用其他沙尘数据进行统计分析,所得的结果相差不大,也就是说,用方案二进行偏振探测,在不降低探测质量的情况下,可以减小每发激光脉冲的能量,进一步减小探测卷云回波信号的强度,从而有效地预防探测卷云时光电倍增管的饱和。

方案二偏振探测的能量配置应以对沙尘的探测能力为准,因为卷云后向散射系数较大且所在的高度离飞机较近,回波光子数较大,只要偏振探测通道对沙尘探测有足够的信噪比,对卷云的探测也应具有足够的信噪比。方案二不仅减小了激光器能量,而且能有效避免对卷云进行探测时光电倍增管的饱和、提高偏振探测时气溶胶的回波信噪比。

3.4 降低光电倍增管饱和几率

光电倍增管的饱和是激光雷达大气探测无效数据的一个重要根源,大量的饱和数据造成人力物力等资源的浪费。机载激光雷达探测气溶胶时,飞机的飞行高度约在 10 km,这一高度是卷云集中出现的高度,机载激光雷达的激光发射口可能离卷云很近,探测卷云时回波光子数可能很大,极有可能造成光电倍增管的饱和。

第二种探测方案在减小卷云探测的回波光子数方面较方案一有以下优势:假定两种设计方案 532 nm 的能量配置相同(100 mJ),方案二能量配置比例见 3.2 节,其 532 nm 非偏振探测通道只接收每发激光脉冲中 43.5 mJ 的回波信号,532 nm 偏振平行探测通道只接收每发激光脉冲中 56.5 mJ 的回波信号,而方案一的偏振平行通道的光电倍增管却要接收每发激光脉冲能量为 100 mJ 的大气回波信号,很明显,方案二偏振平行通道接收的光子数是方案一平行探测通道的 56.5%(图 6)。在测量卷云和沙尘时,方案二中两光电倍增管接收到的回波光子总数要小于方案一,卷云和沙尘都有较为理想的偏振垂直通道回波信号,而方案二的偏振垂直回波信号被滤除(图 7),并没有被两探测通道的光电倍增管接收。方案二的 532 nm 非偏振通道和 532 nm 偏振平行探测通道的能量比例可调,在进行方案二的 532 nm 非偏振通道和 532 nm 偏振平行通道的能量设置时,可借助地基激光雷达探测卷云的大量数据,统计分析 532 nm 非偏振通道和 532 nm 偏振平行探测通道对卷云进行探测回波信号相等时的能量分配比例,从中找到合适的能量分配方案,按这一能量分配方案进行能量配置时,探测卷云强大的 532 nm 回波信号将被两光电倍增管均摊,这样就能够减小光电倍增管探测卷云饱和的几率,如图 3(b)所示。

每发激光脉冲的能量减小后,就可以减小激光束发散角,从而减小接收系统的接收视场角,使机载激光

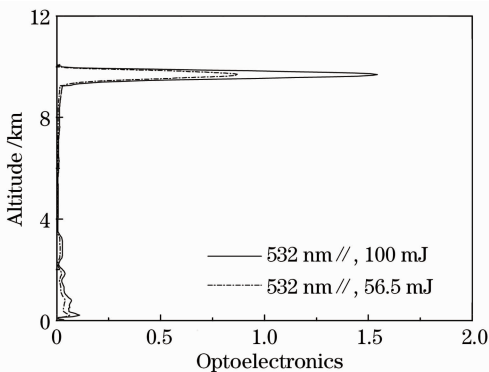


图 6 两种方案平行通道回波信号

Fig. 6 Parallel channels return photoelectrons of two schemes

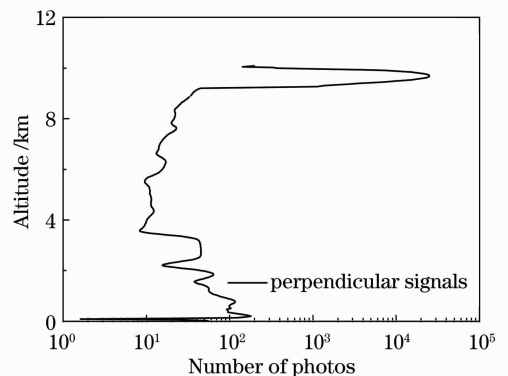


图 7 方案二垂直通道回波光子数被滤除

Fig. 7 Return photoelectron in perpendicular channel of the second scheme are filtered

雷达进行大气探测时背景光减小,提高探测的信噪比。关于怎样用 532 nm 非偏振探测通道和 532 nm 偏振平行通道的回波信号反演退偏振比的问题,将另文探讨。

4 结 论

利用新的机载激光雷达设计方案进行 532 nm 偏振探测时,其 532 nm 非偏振探测通道和 1064 nm 探测通道组成真正的双波长探测通道,避免了传统方案因用两偏振探测通道反演 532 nm 非偏振信号带来的反演误差。用 532 nm 非偏振探测通道和 532 nm 偏振平行探测通道进行偏振探测与反演,可调控 532 nm 两探测通道的能量分配,使两探测通道的信号大小基本均衡,避免了传统方案中垂直探测信号偏小的缺点。

理论计算表明:探测 1999 年 4 月 15 日合肥地区的沙尘时,当新方案平行探测通道的探测能力与传统方案垂直探测通道的探测能力相等时,新方案的激光器的能量配置只有传统方案的 0.3~0.4 倍,利用其他沙尘数据进行模拟,得到的结果相差不大,在不降低偏振探测能力的情况下,减小偏振探测的 532 nm 每发激光脉冲的能量,不但能够减小探测卷云时 532 nm 偏振探测通道光电倍增管饱和的几率,而且能降低激光器的功耗,压缩成本。

参 考 文 献

- Liu Houtong, Chi Ruli, Hu Shunxing *et al.*. Optimized design of 1/2 retardation sheet for measurement of airborne lidar polarization channels gain ratio [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(5): 715~720
刘厚通, 迟如利, 胡顺星 等. 用于机载激光雷达 K 值测量的 1/2 波片优化设计 [J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(5): 715~720
- H. Gadhavi, A. Jayaraman. Airborne lidar study of the vertical distribution of aerosols over Hyderabad, an urban site in central India, and its implication for radiative forcing calculations [J]. *Annales Geophysicae*, 2006, **24**: 2461~2470
- Juan Guesta, Pierre H. Flamant. Two stream lidar inversion algorithm for airborne and satellite validation [C]. Proceedings of 22nd International Laser Radar Conference, 2004, 471
- Zhou Jun, Yue Guming, Jin Chuanjia *et al.*. Two-wavelength Mie lidar for monitoring of tropospheric aerosol [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1412~1417
周 军, 岳古明, 金传佳 等. 探测对流层气溶胶的双波长米散射激光雷达[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1412~1417
- Hu Shunxing, Hu Huanling, Wu Yonghua *et al.*. L625 differential absorption lidar system for tropospheric ozone measurements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 597~601
胡顺星, 胡欢陵, 吴永华 等. L625 差分吸收激光雷达探测对流层臭氧[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 597~601
- Liu Dong. Cirrus and Dust Being Sounded by Polarization Lidar [D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, 2001. 20~50
刘 东. 偏振激光雷达探测卷云和沙尘气溶胶[D]. 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院, 2001. 20~50
- Xue Xinlian. Cirrus Being Sounded by Polarization Lidar [D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, 2005. 10~50
薛新莲. 卷云的偏振激光雷达探测[D]. 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院, 2005. 10~50
- Tao Zongming, Wu Decheng, Liu Dong *et al.*. Estimation of aerosol backscatter coefficient error in lidar data processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1214001
陶宗明, 吴德成, 刘 东 等. 激光雷达反演气溶胶后向散射系数误差估算[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1214001