

文章编号: 1001-3806(2009)01-0060-03

激光偏振技术压缩激光雷达信号动态范围

曹开法^{1,2}, 汪少林^{1,2}, 方欣^{1,2}, 谢军¹, 赵培涛^{1,2}, 胡顺星^{1*}, 胡欢陵¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 大气光学实验室, 合肥 230031; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 为了解决激光雷达信号的大动态范围引起远距离弱信号的失真问题, 采用通过压缩信号的动态范围的方法, 设计了一个利用电压调制系统透过率进而压缩激光雷达信号动态范围的方案。计算表明, 系统最小透过率为 4.05×10^{-5} , 可以压缩信号的动态范围达到 4 个数量级。利用激光雷达后向散射信号的两个方向偏振光, 避免了时控光衰减器只透过一个方向偏振光的弊端。研究结果为压缩激光雷达信号动态范围提供了有价值的新方法。

关键词: 大气与海洋光学; 动态范围; 激光雷达; 偏振

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

Suppression of lidar dynamic range based on polarizing cell

CAO Kai-fa^{1,2}, WANG Shao-lin^{1,2}, FANG Xin^{1,2}, XIE Jun¹, ZHAO Pei-tao^{1,2}, HU Shun-xing¹, HU Huan-lin¹

(1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institutes of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to reduce distortion of remote signal induced by wide dynamic range of lidar signal, a voltage controlled transmission modulation was used to suppress the dynamic range of lidar signal. The result of simulation indicates that the minimum transmissivity of the system is 4.05×10^{-5} and the dynamic range can be reduced to 4 orders of magnitude. The system receives both ordinary light and extraordinary light, so it can avoid the disadvantage of the time-dependent attenuator in which only polarizing light in one direction can be received. It provides new valuable approach to suppress lidar dynamic range.

Key words: atmospheric and ocean optics; dynamic rang; lidar; polarization

引言

激光雷达^[1-5]是高精度高分辨率探测大气成分和气象参量的有效手段。同时由于激光雷达自身的结构特点, 信号的动态范围往往很大^[1-4]。国内外很多研究者利用各种技术手段来解决这个问题。目前采取的措施有: (1) 加大发射光束与接收望远镜之间距离和缩小接收视场^[1], 通过增加盲区 and 过渡区的长度来减小近端强信号, 一般用于大型激光雷达, 要求实验室空间较大; (2) 光电倍增管加门控^[2], 主要是在光电倍增管阴极加上高压门控来降低光电探测器近端的光电转换效率, 这种方法会对电信号产生一定的干扰; (3) 斩光器^[3]是利用机械方法阻挡近端强后向散射光信号; (4) 时控光衰减器^[4]是利用电控信号光偏振性来降低近端光学系统效率来达到压缩信号动态范围的目的。

作者利用偏振光学元件^[4,6-8], 设计了可以通过电压控制系统透过率, 进而压缩激光雷达信号动态范围的系统。相对与时控光衰减器^[4]压缩信号动态范围的方法, 该系统可以利用激光雷达回波信号两个偏振方向的信号, 增大了接收信号, 同时避免了雷达信号退偏振对激光雷达回波信号的影响。

1 偏振光学的矩阵表示法

使用矩阵表示偏振器件组成的复杂系统可以不用追究其中每一个过程的具体物理意义, 可以简化系统的数学计算。电场的琼斯矩阵可以描述为^[6]:

$$E = \begin{bmatrix} E_1 e^{i\varphi_1} \\ E_2 e^{i\varphi_2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, E_1 和 E_2 是沿 x 轴和 y 轴的电场振幅; φ_1 和 φ_2 是这些分量的位相。位相中与空间、时间有关的项设有包含在琼斯矩阵中。这里主要介绍本文中涉及到电光晶体和偏光棱镜的琼斯矩阵。

偏光棱镜反射光和透射光的琼斯矩阵为^[6-7]:

$$J_r = \begin{bmatrix} -r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix}, J_t = \begin{bmatrix} t_p & 0 \\ 0 & t_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

基金项目: 国家八六三高技术研究发展计划资助项目 (2002AA135030)

作者简介: 曹开法 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光雷达系统的研究。

* 通讯联系人。E-mail: sxhu@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2007-11-09; 收到修改稿日期: 2008-01-31

式中, r 和 t 分别表示振幅反射系数和振幅透射系数。延迟器件的琼斯矩阵^[7]为:

$$J_{d1} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} & i \sin \frac{\delta}{2} \\ i \sin \frac{\delta}{2} & \cos \frac{\delta}{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, δ 为延迟器件的延迟量。

Wollaston 棱镜的 o 光和 e 光的的琼斯矩阵^[7]为:

$$J_{w_o} = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & \sin \beta \cos \beta \\ \sin \beta \cos \beta & \sin^2 \beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$J_{w_e} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos^2(\beta + \frac{\pi}{2}) & \sin(\beta + \frac{\pi}{2}) \cos(\beta + \frac{\pi}{2}) \\ \sin(\beta + \frac{\pi}{2}) \cos(\beta + \frac{\pi}{2}) & \sin^2(\beta + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, β 为 o 光矢量与水平方向成的角度。

2 系统设计

设计的激光雷达系统如图1所示。系统发射

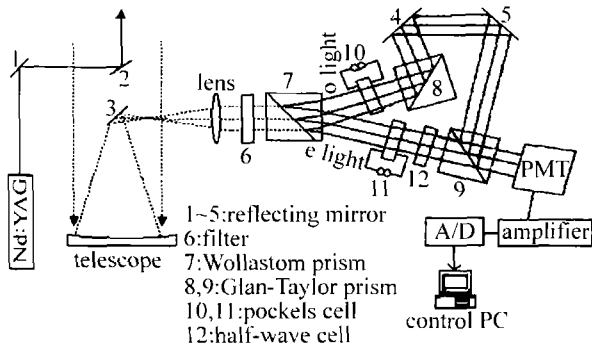


Fig.1 Schematic diagram of lidar system suppressing signal dynamic range based on polarizing optics

532nm 的激光, 激光与气溶胶和分子发生相互作用, 后向散射光由望远镜接收, 经透镜、滤光片和偏振光学系统, 最后由光电倍增管 (photomultiplier tube, PMT) 进行光电转换, 前置放大器进行电信号放大, 最后模数转换器将电信号采集保存在计算机中处理。激光雷达后向散射光含水平和垂直两个方向的偏振光, 经 Wollaston 棱镜分解出 o 光(水平偏振)和 e 光(垂直偏振)。压控延迟器上加不加电压时, o 光经过延迟器 10 后光的偏振状态不改变, 经偏振棱镜 8 全反, 经反射镜 5, 6 全反, 再经过偏振棱镜 9 全反进入 PMT。Wollaston 棱镜分解出的另一路 e 光, 经过延迟器 11 后光的偏振状态不变, 经过半波片后光的偏振方向从垂直变为水平方向, 经偏振棱镜 9 全透进入 PMT。这样, 激光雷达系统接收的两个偏振方向信号光经过偏振光学系统进入 PMT。当压控延迟器上加半波电压时, Wollaston 棱镜

分出的两路偏振光的偏振状态发生改变, Wollaston 棱镜分解出 o 光经过延迟器 10 后偏振方向变为垂直, 在偏振棱镜 8 不能反射, Wollaston 棱镜分解出 e 光经压控延迟器 11 后偏振方向发射改变, 在偏振棱镜 9 上发生反射也不进入光电倍增管, 两路光都不能到达 PMT。可以在激光雷达近端后向散射光较强的区域, 在压控延迟器上加半波电压阻挡信号光进入 PMT, 在光信号较弱的区域去掉高压使信号光大部分进入 PMT。这样可以压缩了激光雷达信号的动态范围, 避免了激光雷达的信号失真问题。

光在偏振器件上的传输如图 2 所示。图 2a 是

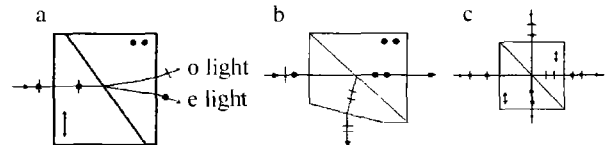


Fig.2 Transmission of polarizing light in prisms

Wollaston 棱镜(图 1 中的棱镜 7), 由光轴为水平和光轴为垂直的两块冰洲石组成, 光束经过后将分成两束光: o 光和 e 光; 图 2b 是偏振棱镜(图 1 中的棱镜 8), 使用两块光轴方向都为垂直的冰洲石构成, 中间为空气间隙, 与晶体光轴方向平行的偏振光透过棱镜, 而垂直于晶体光轴方向的偏振光在空气隙界面反射; 图 2c 是另一种偏振棱镜(图 1 中的器件 9), 使用两块光轴方向为平行方向的冰洲石构成, 中间为空气间隙, 从上往下传播的偏振光都会在空气隙界面向右反射, 而从左向右传播的水平偏振光会透过棱镜, 垂直方向的偏振光会被反射。

3 数值模拟计算及结果分析

上述激光雷达到达光电倍增管的光振幅为:

$$E = J_r' J_{d1} J_{w_o} E_0 + J_r' J_{d2} J_{\lambda/2} J_{w_e} E_0 \quad (6)$$

式中, E_0 表示经滤光片后激光雷达回波信号光两个偏

振方向的电场矢量, 琼斯矩阵为 $E_0 = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$ 。 J_{w_o} 和 J_{w_e}

表示 Wollaston 棱镜的水平偏振和垂直偏振光的琼斯矩阵, 调节 Wollaston 棱镜的角度使得 $\beta = 0$ 。 J_{d1} 和 J_{d2} 表示图 1 中延迟器 10 和延迟器 11 的琼斯矩阵, 具有相同的延迟量 δ 。 J_r 表示偏光棱镜 8 反射光的琼斯矩阵。 J_r' 和 J_t' 表示偏光棱镜 9 反射光和透射光的琼斯矩阵。 $J_{\lambda/2}$ 表示半波片 12 的琼斯矩阵。将 (2) 式 ~ (5) 式代入 (6) 式可得:

$$E = \begin{bmatrix} -r_p' & 0 \\ 0 & r_s' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} & i \sin \frac{\delta}{2} \\ i \sin \frac{\delta}{2} & \cos \frac{\delta}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_p' & 0 \\ 0 & t_s' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} & i \sin \frac{\delta}{2} \\ i \sin \frac{\delta}{2} & \cos \frac{\delta}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ar_p' r_p \cos \frac{\delta}{2} + bt_p' \cos \frac{\delta}{2} \\ iar_s' r_s \sin \frac{\delta}{2} + ibt_s' \sin \frac{\delta}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据菲涅耳公式^[6]在 p 光(平行于入射面的偏振光分量)处于临界角条件下,(7)式的部分参量值为: $r_p' = r_p = 1; r_s' = r_s = 0.0952; t_p' = 0.9955; t_s' = 0$ 。代入(7)式得:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} a \cos \frac{\delta}{2} + 0.9955b \cos \frac{\delta}{2} \\ i0.991a \sin \frac{\delta}{2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

偏振系统透过率为: $T = \frac{(\mathbf{E})^2}{(E_0)^2} =$

$$\frac{(a + 0.9955b)^2 \cos^2 \frac{\delta}{2} + 8.1 \times 10^{-5} a^2 \sin^2 \frac{\delta}{2}}{a^2 + b^2} \quad (9)$$

使用半波电压(对于 532nm)较小的 KD*P 晶体,其半波电压为 3.25kV。图 3 显示系统透过率随 pockels 盒上所加电压的变化图,系统透过率可以通过电压来

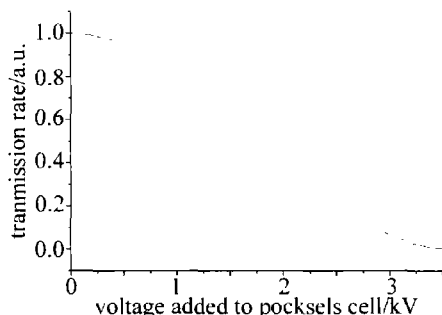


Fig. 3 Transmission rate of light in polarizing system vs. voltage added to pockels cell

调制,计算时假设了 $a = b$,实际上 a 和 b 的大小对(10)式影响很小。图 3 中对应半波电压 $U = 3.25\text{kV}$ 时, $\delta = \pi$, T 有最小的透过率 4.05×10^{-5} ,这样可以压缩动态范围大于 4 个数量级。

4 结论

设计了一个透过率通过电压控制的激光雷达系统。计算表明系统透过率最小可以控制在 10^{-5} 数量级,可以压缩信号的动态范围达到 4 个数量级。激光雷达发射光源往往不是偏振光,同时大气具有退偏作用,使得大气后向散射光为非偏振光。作者设计的系统利用可激光雷达后向散射信号的两个方向偏振光,避免了时控光衰减器只透过一个方向偏振光的弊端,为压缩激光雷达信号动态范围提供了有价值的新方法。

参考文献

- [1] DAVID W R, GARY G G. Optimizing lidar dynamic range by engineering the crossover region [J]. Proc SPIE, 2002, 4723: 120-129.
- [2] PAVLO A M, VINCENT M C, BRIAN M C, et al. Nanosecond gated PMT for lidar-radar applications [J]. Proc SPIE, 2006, 6294: 1-12.
- [3] WHITEMAN D N, MELFI S H, FERRARE R A. Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the earth's atmosphere [J]. Appl Opt, 1992, 31(16): 3068-3082.
- [4] STEFAN L, VOLKER W, JENS B. Time-dependent attenuator for dynamic range reduction of lidar signals [J]. Appl Opt, 1997, 36(15): 3469-3474.
- [5] MEASURE R M. Laser remote sensing: fundamentals and application [M]. New York: Wiley, 1984: 237-276.
- [6] YU D Y, TAN H Y. Engineering optics [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1999: 322-370 (in Chinese).
- [7] ZHAO P T, LI G H, WU F Q, et al. Study on the performance of high precision achromatic retarder [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(9): 4582-4887 (in Chinese).
- [8] ZHAO P T, LI G H, PENG H D, et al. New design of optical activity measurement system [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 504-506 (in Chinese).

· 简 讯 ·

入编信息

为适应我国信息化建设,扩大本刊及作者知识信息交流渠道,本刊已加入“万方数据千种精品核心刊”计划,被中国核心期刊遴选数据库收录,并通过万方数据资源系统及其镜像系统等对外提供无偿或有偿信息服务,其作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。本刊可免费为作者文章引文统计分析资料。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将作适当处理。

《激光技术》编辑部