

同轴米散射激光雷达自准直系统设计

宋跃辉 鲁雷雷 华灯鑫 李仕春 辛文辉 闫庆

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 针对同轴米散射激光雷达,提出了判断出射激光束光轴和望远镜光轴是否同轴的准直判据。以判据最大化为控制目标,以二维电动镜架为执行机构,采用变步长调节算法,设计了同轴米散射激光雷达自准直系统。实验结果表明该系统可实现高精度快速自准直调节,调节精度可达 0.05 mrad,验证了准直判据和调节算法的有效性。这有利于实现激光雷达系统的自动化和无人值守。

关键词 遥感;米散射激光雷达;自准直;判据

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0710001

Design of Auto Collimation System for Coaxial Mie Lidar

Song Yuehui Lu Leilei Hua Dengxin Li Shichun Xin Wenhui Yan Qing

*School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China*

Abstract A criterion is proposed to judge if the axes of the emergent beam and the telescope of coaxial Mie lidar are in the same line. Then the auto collimation system of coaxial Mie lidar is designed, in which the control target aims at the maximization of the criterion, the two-dimension electric driving mirror is used as actuator, and the variable step size regulation algorithm is used. The experiment results show that the system can realize auto collimation regulation with high precision and high speed, and the regulation accuracy is up to 0.05 mrad. The effectiveness of collimation criterion and regulation algorithm is verified. The system is beneficial for realizing automation and unattended operation of lidar system.

Key words remote sensing; Mie lidar; auto collimation; criterion

OCIS codes 010.1290; 010.0280; 280.1100; 280.3640; 280.3640

1 引 言

同轴激光雷达要求出射激光束光轴与望远镜光轴重合,然而温度变化、机械振动等因素常常导致两光轴位置偏离。为保证探测距离和信噪比,激光雷达在使用前需要进行收发光路准直调节,手动调节繁琐费时,且精度无法保证^[1-3]。显然,高精度快速自准直系统不仅能保障激光雷达的探测性能,更是实现激光雷达自动化和无人值守的必要环节,具有重要的研究意义。

根据准直判据不同,激光雷达自准直系统分为两大类。第一类以回波信号成像位置作为调节判据。如 2011 年任德明等^[4]根据成像质心与标准质心的位置偏差来调节出射光方向从而实现自准直。另一类以远场回波信号强度作为调节判据,其中以星载正交极化云-气溶胶激光雷达(CALIOP)系统为代表。该系统首先通过激光束出射角度粗调使回波信号进入望远镜视场,然后进行细调使远场回波信号强度达到最大值^[5]。1998 年, Fiorani L 等^[6]提出了一种激光雷达自准直方案。该系统采用高精度二维电动调整镜架调节出射激

收稿日期: 2016-01-07; **收到修改稿日期:** 2016-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(61405158, 61308106)、陕西省教育厅基金(11JK0909)

作者简介: 宋跃辉(1980—),男,博士研究生,讲师,主要从事偏振激光雷达方面的研究。E-mail: songyuehui@xaut.edu.cn

导师简介: 华灯鑫(1964—),男,博士,教授,主要从事激光雷达遥感探测技术及光电检测技术等方面的研究。

E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn(通信联系人)

光束的发射方向,系统软件使激光束做十字扫描,当高空回波信号达到最大值时,调节过程结束。2009年刘小勤等^[7]也采用十字扫描法,设计了激光雷达自准直系统。此外,谭馄等^[8]和杜其成等^[9]分别采用上述判据实现了激光雷达系统的自准直。

以回波信号成像位置作为准直判据需要采用阵列式光电转换元件和图像处理技术,系统复杂,并且受光电转换元件性能的限制,调节精度较难保证。以远场参考高度处的回波信号强度作为准直判据,易受湍流等随机因素的干扰而产生误差。对于重在研究低空大气的激光雷达系统,如微脉冲激光雷达,由于其探测距离近使得这一影响尤为突出。另外采用此判据的自准直系统多采用等步长调节算法搜索最佳出射方向,调节过程繁琐。鉴于此,本文在深入研究几何重叠因子和米散射激光雷达回波信号特点的基础上,提出了同轴米散射激光雷达准直判据。依托西安理工大学激光雷达遥测研究中心,设计了同轴米散射激光雷达自准直系统,实现了光轴高精度快速自准直。

2 准直判据

2.1 几何重叠因子

激光雷达的几何重叠因子 $Y(R)$ 是指在某探测距离 R 处,进入望远镜接收视场的后向散射光能量与后向散射光总能量的比值。假设激光束光斑能量均匀分布,那么几何重叠因子可简化为激光束光斑和望远镜接收视场的重叠面积 $S(R)$ 与激光束光斑总面积 $S_0(R)$ 之比^[10-12]:

$$Y(R) = \frac{S(R)}{S_0(R)}. \quad (1)$$

同轴激光雷达在准直和非准直状态下的激光束及望远镜视场,如图1所示。图中 $\theta(\theta \geq 0)$ 为望远镜光轴和出射激光束光轴的夹角, θ_T 为望远镜半视场角, θ_L 为激光束半发散角。为保证近场探测,激光雷达一般要求 θ_T 略大于 θ_L , 因此假设 θ_T 略大于 θ_L 。在近场,受望远镜副镜遮挡影响,只有部分光斑进入望远镜视场。在远场,如果 θ 为 0, 光斑全部位于望远镜视场,如果 θ 不为 0, 在一定探测距离后光斑会逐渐移出望远镜视场。

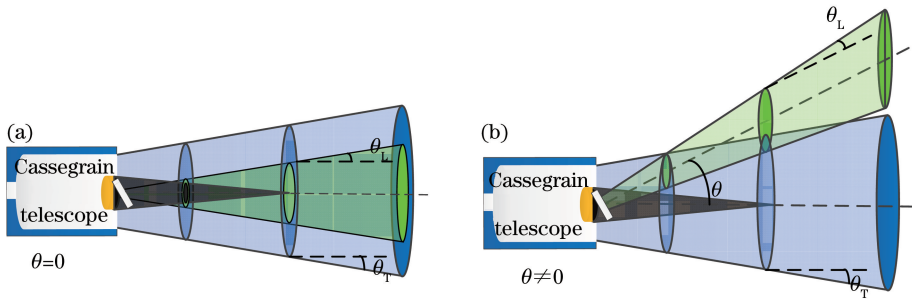


图1 同轴激光雷达的激光束和望远镜视场。(a)准直状态;(b)非准直状态

Fig. 1 Laser beam and field of view for telescope of coaxial lidar. (a) Alignment condition; (b) non-alignment condition

显然,几何重叠因子与探测距离 R 、望远镜半视场角 θ_T 、望远镜有效接收半径 r_T 、望远镜副镜半径 r_s 、激光束半发散角 θ_L 、出射光斑半径 r_L 及两光轴夹角 θ 有关。当 θ 取值较小时,不同探测距离处的激光束光斑半径 $r_L(R)$ 、望远镜视场半径 $r_T(R)$ 、望远镜副镜遮挡半径 $r_s(R)$ 和两光轴的间距 $d(R, \theta)$ 可分别为

$$r_L(R) = r_L + R \cdot \theta_L, \quad (2)$$

$$r_T(R) = r_T + R \cdot \theta_T, \quad (3)$$

$$r_s(R) = \begin{cases} r_s - R \cdot \theta_T & (R \leq r_s/\theta_T) \\ 0 & (R > r_s/\theta_T) \end{cases}, \quad (4)$$

$$d(R, \theta) = R\theta, \quad (5)$$

不同探测距离处激光束光斑的总面积可由下式计算:

$$S_0(R) = \pi r_L^2(R). \quad (6)$$

对于同轴激光雷达,考虑到望远镜副镜遮挡的影响,激光束光斑和望远镜接收视场的重叠面积 $S(R)$ 可由下式计算:

$$S(R) = S_T(R) - S_S(R), \quad (7)$$

式中, $S_T(R)$ 为光斑和望远镜视场的总重叠面积, $S_S(R)$ 为望远镜副镜遮挡区域与光斑的重叠面积。

不同探测距离处, 激光束光斑和望远镜视场截面存在 3 种位置关系, 即相离、包含和相交, 如图 2 所示。根据 2 者的位置关系, $S_T(R)$ 为

$$S_T(R, \theta) = \begin{cases} 0 & d(R, \theta) \geq r_T(R) + r_L(R) \\ \pi \min [r_L^2(R), r_T^2(R)] & d(R, \theta) \leq |r_T(R) - r_L(R)| \\ r_L^2(R)\phi_L + r_T^2(R)\phi_T - r_T(R)d(R, \theta)\sin\phi_T & |r_T(R) - r_L(R)| < d(R, \theta) < r_T(R) + r_L(R) \end{cases}, \quad (8)$$

式中, \min 表示取最小值, ϕ_T, ϕ_L 计算公式如下

$$\begin{cases} \phi_L = \arccos \left[\frac{d^2(R, \theta) + r_L^2(R) - r_T^2(R)}{2r_L(R)d(R, \theta)} \right] \\ \phi_T = \arccos \left[\frac{d^2(R, \theta) + r_T^2(R) - r_L^2(R)}{2r_T(R)d(R, \theta)} \right]^\circ \end{cases} \quad (9)$$

望远镜副镜遮挡区域与激光束光斑也存在以上 3 种位置关系, 因此 $S_S(R)$ 的计算方法与 $S_T(R)$ 的计算方法相同, 此处不再赘述。利用(1)~(9)式即可计算不同探测距离处的几何重叠因子。

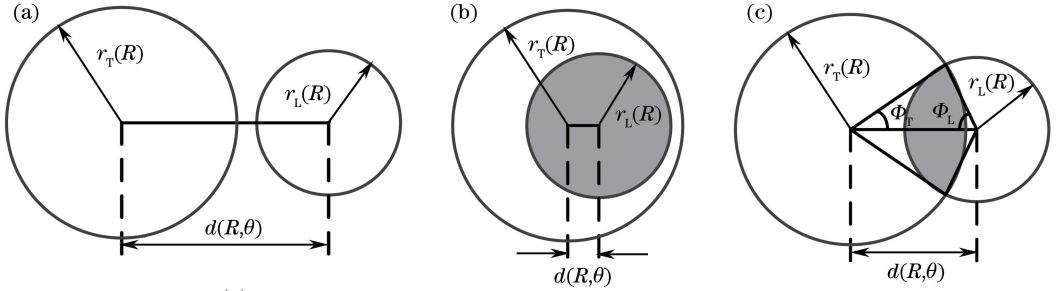


图 2 激光束光斑和望远镜视场位置关系。(a) 相离; (b) 包含; (c) 相交

Fig. 2 Relation of laser beam spot and field of view of the telescope. (a) Disjoint; (b) inclusion; (c) intersection

图 3 是参照本系统参数仿真计算的几何重叠因子, 详细参数可参照表 1。在近场几何重叠因子从 0 逐渐增加至 1。在远场, 如果两光轴夹角为 0, 则几何重叠因子将始终保持为 1。如果两光轴夹角不为 0, 则某一探测距离后几何重叠因子会由 1 开始逐渐衰减。

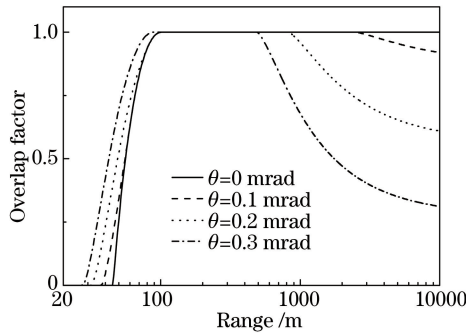


图 3 同轴激光雷达的几何重叠因子

Fig. 3 Overlap factor of coaxial lidar

表 1 激光雷达自准直系统主要参数表

Table 1 Major parameters of auto collimation system for lidar

Transmitter	Nd:YAG solid laser
Wavelength	532 nm
Pulse energy	6 μ J
Pulse repetition frequency	1000 Hz

Transmitter	Nd:YAG solid laser
Pulse duration	6 ns
Beam divergence	2 mrad
Beam expander	5×
Receiver	Schmidt-Cassegrain telescope
Diameter of primary mirror	254 mm
Diameter of secondary mirror	50 mm
Field of view	0.5 mrad
Actuator	Two-dimension electric driving mirror
Minimum step size	0.7 μrad
Detector	PMT: Hamamatsu R3896
Quantum efficiency	25%

2.2 米散射激光雷达回波信号特点

米散射激光雷达方程如下：

$$P(R) = KR^{-2}Y(R, \theta)\beta(R)\exp\left[-2\int_0^R \alpha(R) dR\right], \quad (10)$$

式中, $P(R)$ 为回波信号功率, K 为系统常数, $\beta(R)$ 为后向散射系数, $\alpha(R)$ 为消光系数。

准直状态下, 探测范围内无云时, 米散射激光雷达回波信号的一般形式如图 4 所示。从 0 到 R_a 回波信号逐渐增强, 这是由近场几何重叠因子逐渐增大引起的。从 R_a 到 R_b 信号逐渐减小, 这主要是由距离平方因子和传输因子引起的。从 R_b 到无穷远回波信号保持恒定, 此时回波信号可认为是背景噪声。

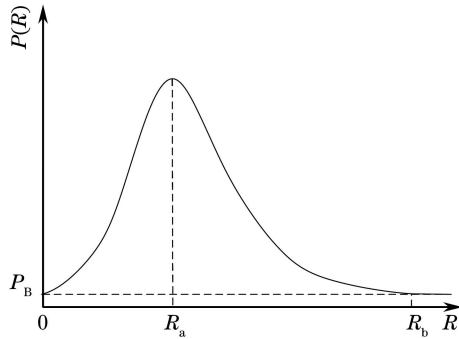


图 4 同轴米散射激光雷达回波信号

Fig. 4 Echo signal of coaxial Mie lidar

2.3 准直判据

假设准直调节过程中, 激光束出射方向始终在望远镜轴线附近, θ 变化范围较小, 此时可认为相同探测距离处的大气状态保持不变。因此 $\alpha(R)$ 和 $\beta(R)$ 不随激光束出射方向变化而变化, 几何重叠因子是调节过程中影响回波信号强度变化的唯一因素。

1) 定义准直状态下几何重叠因子达到 1 时的最小距离为准盲区距离, 用 R_{blind} 表示, 可利用下式计算:

$$R_{\text{blind}} = r_s / \theta_T, \quad (11)$$

显然, R_{blind} 是准直状态下完全消除副镜遮挡影响的最小距离。同时还发现当 θ 不为 0 时, 同轴激光雷达系统完全消除副镜影响的距离小于 R_{blind} 。因此在探测距离大于 R_{blind} 时, 几何重叠因子不再受副镜的影响, 只与探测距离 R 处的激光束光斑半径 $r_L(R)$, 望远镜视场半径 $r_T(R)$, 和两光轴的间距 $d(R, \theta)$ 有关。

图 5 所示为当 θ 取不同值时, 本系统在 R_0 (2 km) 处的几何重叠因子。 θ_a 和 θ_b 是转折角, 可利用下式计算:

$$\begin{cases} \theta_a = \theta_T - \theta_L + \frac{r_T - r_L}{R_0} \\ \theta_b = \theta_T + \theta_L + \frac{r_T + r_L}{R_0} \end{cases} \quad (12)$$

当 θ 小于 θ_a 时,光斑完全位于视场范围内,几何重叠因子为 1。当 θ 大于 θ_a 小于 θ_b 时,光斑和视场相交,几何重叠因子大于 0 小于 1。在此范围内, θ 增加时重叠面积会逐渐减小,即几何重叠因子随 θ 增加而减小。当 θ 大于 θ_b 时,光斑和视场相离,几何重叠因子为 0。

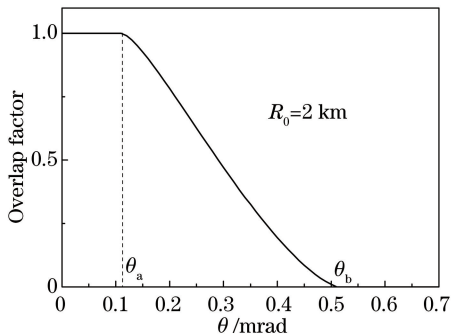


图 5 θ 取不同值时 R_0 处的几何重叠因子

Fig. 5 Overlap factor at R_0 with different θ

事实上对于同轴激光雷达,当 θ 增加时,在任意高度处,望远镜视场中心和光斑中心的距离都会逐渐增加,光斑将逐渐移出望远镜视场,在此过程中几何重叠因子都将保持不变或者减小:

$$\frac{dY(R, \theta)}{d\theta} \leq 0. \quad (13)$$

综上所述,在大于准直盲区距离的任意探测距离处, θ 为 0 时几何重叠因子都将达到最大值 1,当 θ 增加时几何重叠因子都将减小或者保持不变。

2) 综合考虑几何重叠因子、准直盲区距离、距离平方因子、背景噪声、有效探测范围等因素,引入准直判据 C :

$$C = \int_{R_{\text{blind}}}^{R_{\text{max}}} R^2 \cdot [P(R) - P_B] dR, \quad (14)$$

式中, R_{blind} 为准直盲区距离, R_{max} 为准直状态时的最大探测距离, P_B 是背景噪声。 R_{max} 可在手动调节准直之后,在天气晴朗、空气质量好的天气条件下,通过实验观测获得。

C 是 $[R_{\text{blind}}, R_{\text{max}}]$ 区间范围内回波信号 $P(R)$ 的加权和,其加权的权值为探测距离平方与激光雷达距离分辨率的乘积,即 $R^2 dR$ 。 θ 增加时,积分区间内任意高度处的 $P(R)$ 和 $P(R)R^2$ 都将保持不变或者减小。因为,判据 C 是 $P(R)$ 的加权和,所以

$$\frac{dC(\theta)}{d\theta} \leq 0. \quad (15)$$

因此,当 θ 增加时, C 保持不变或者减小。反之 θ 减小时, C 就保持不变或者增加。显然, C 与 θ 负相关,当判据 C 达到最大值时, θ 等于 0,即系统处于准直状态。

该判据采用积分的形式,既考虑了不同高度处距离回波信号的强度,又考虑了有效探测范围,同时消除了距离平方因子和系统噪声的影响。与远场回波信号强度判据相比,该判据具有更高的灵敏度,即 $dC/d\theta$ 的值较大。同时该判据考虑了积分区间内的全部回波信号,可有效抑制随机因素引起的判据扰动,可靠性更高。

3 自准直系统设计

3.1 系统结构

本课题组依托西安理工大学激光雷达遥测研究中心的微脉冲米散射激光雷达设计了自准直系统,如图 6 所示。该系统采用二维电动转镜(X-Y PICOMOTOR)及其驱动器(PICOMOTOR Driver)实现激光束出射方向的调节。激光雷达回波信号由数据采集卡采集后送入计算机进行数据处理。计算机首先计算准直判据,然后根据调节算法做出判断,并通过串口向驱动器发出控制指令。驱动器接收到控制指令后,驱动微动步进电机带动二维转动镜架作绕 X 轴和 Y 轴的二维旋转,从而改变激光束出射方向。

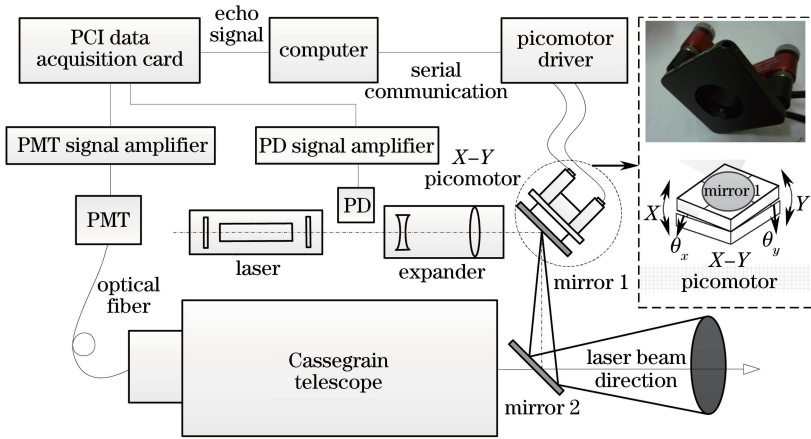


图 6 同轴米散射激光雷达自准直系统结构图

Fig. 6 Schematic of auto collimation system for coaxial Mie lidar

3.2 调节算法

为实现快速高精度调节,设计了变步长调节算法。假设可旋转镜片偏离了准直位置,此时可旋转镜片实际位置与理想准直位置之间的偏差用 θ_x 、 θ_y 来描述,其中 θ_x 和 θ_y 分别表示镜片绕 X 轴和 Y 轴相对于准直位置转过的角度。如图 7 所示,其中 OT 为望远镜光轴,OL 为激光束光轴。

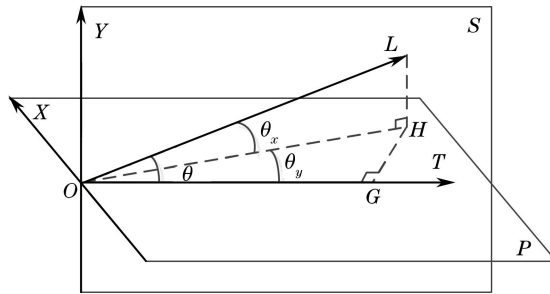


图 7 θ 分解示意图

Fig. 7 Decomposition diagram of θ

经数学推导可知

$$\theta = \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2}, \tag{16}$$

求偏导数得

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial \theta_x} = \frac{\theta_x}{\sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2}} \\ \frac{\partial \theta}{\partial \theta_y} = \frac{\theta_y}{\sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2}} \end{cases} \tag{17}$$

由(17)式可知当 θ_x 和 θ_y 中的某个参数固定时, θ 和准直判据是另外 1 个参数的单峰函数。针对这一特点,采用了分步调节,即先对 X 轴调节,再对 Y 轴调节;或先对 Y 轴调节,再对 X 轴调节。在单独对某个轴的调节过程中均采用变步长调节算法,其调节流程如图 8 所示。该调节算法首先以初始位置为原点,沿正、负 2 个方向分别调节最小步长 δ_m ,从而判断调节方向。然后,沿判据增加方向,进行变步长调节,当前调节步长是上次调节步长的 1.6 倍。如果当前调节导致判据减小,则以上一调节位置为中心,沿正、负 2 个方向分别调节最小步长 δ_m ,判断该位置判据是否大于等于两相邻最小步长处判据。如果是,则判定该位置是准直位置,停止搜索,如果不是,则以该位置为原点进入下一轮搜索。

最小调节步长 δ_m 是调节算法中的关键参数,其取值应小于系统误差。系统误差是指由固定不变的或按确定的规律变化的因素所造成的误差。在同轴自准直系统中,存在如下情况。虽然激光束光轴偏离了准直位置,但在任意高度处,激光束光斑仍完全位于望远镜视场内,此时系统仍认为处于准直状态。因此,同轴

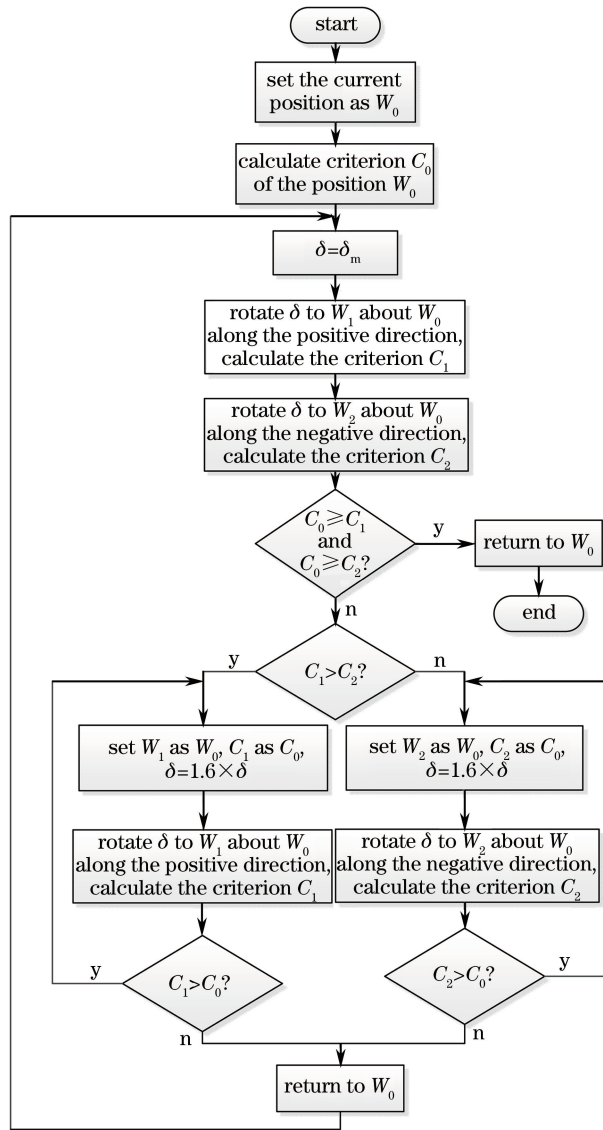


图 8 变步长调节算法流程图

Fig. 8 Flowchart of variable step size regulation algorithm

自准直系统的系统误差为

$$\theta_e \leq (\theta_T - \theta_L). \quad (18)$$

本系统中 θ_T 为 0.25 mrad, θ_L 为 0.2 mrad, 即系统误差为 0.05 mrad。为保证调节精度, 最小调节步长应小于 0.05 mrad。如果调节步长过小将会增加调节次数。综合考虑系统误差和调节次数, 本系统最小调节步长取为 0.02 mrad。

图 9 为偏离角度不同时, 分别采用等步长调节和变步长调节算法的调节次数。从图中也可以看出, 变步长调节算法的调节次数少于或与等步长调节次数相当。

4 探测实验

2015 年 2 月 12 日, 天气晴朗, 利用该系统进行了实际探测实验。实验在夜间进行, 积分时间为 2 s, 对应脉冲数为 2000 个。准直盲区距离取为 0.2 km, 最大探测距离取为 6 km。在保证系统能够接受到回波信号的条件, 使同轴自调节系统进入自调准直工作状态, 最小调节步长设置为 0.02 mrad, 最终实现了准直自调节。调节过程中的准直判据和调节前后的距离平方校正信号分别如图 10、图 11 所示。

由图可知, 系统经过 18 次调节后, 最终实现了准直判据的最大化。调节过程中, 准直判据的变化量很

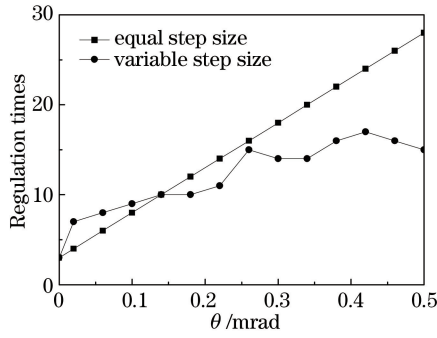


图 9 不同偏离角度时等步长调节和变步长调节的调节次数

Fig. 9 Regulation times of equal and variable step size regulation algorithm with different deviation angles

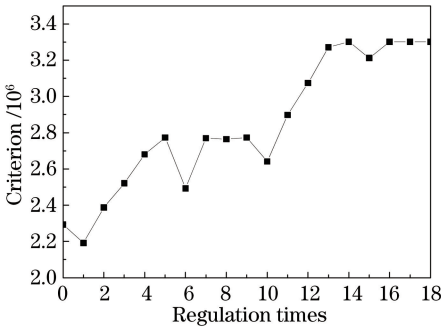


图 10 调节过程中的准直判据

Fig. 10 Collimation criterion in regulation

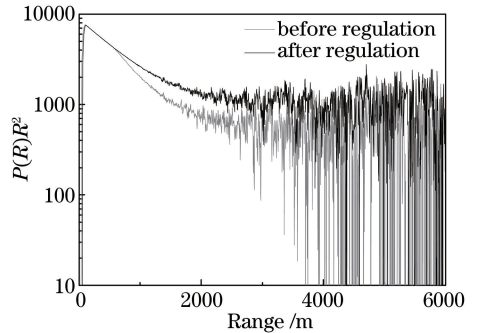


图 11 准直调节前后的距离平方校正信号

Fig. 11 Corrected signal of distance squared before and after collimation regulation

大,这主要因为判据是距离平方校正信号的积分,这也证实了判据的高灵敏度。调节结束后,距离平方校正信号的强度有了明显改善,提高了系统的信噪比和实际有效探测距离。由前文可知,系统的调节精度受限于系统误差,因此调节结束后两光轴的夹角小于 0.05 mrad。

5 结 论

深入分析了激光束光轴与望远镜光轴夹角对同轴激光雷达几何重叠因子的影响。在此基础上,证明了以特定区间内距离平方校正信号的积分作为同轴米散射激光雷达准直判据的合理性。依托西安理工大学的微脉冲米散射激光雷达,以准直判据最大化为控制目标,以二维电动镜架为执行机构,研发了米散射激光雷达同轴自调节系统。该系统采用变步长调节算法,在保证收敛的前提下减少调节次数,系统调节精度可达 0.05 mrad。

参 考 文 献

- 1 Young S A. Lidar system optical alignment and its verification[J]. Appl Opt, 1987, 26(9): 1612-1616.
- 2 Liu B, Yi F, Chang M Y. Methods for optical adjustment in lidar system[J]. Appl Opt, 2005, 44(8): 1480-1484.
- 3 Tan Ying, Wu Xiaying, Peng Xinzhong, *et al.*. Implementation of self-aligning system with a single click for the lidar [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(s1): s114005.
- 谭莹, 吴夏颖, 彭新忠, 等. 激光雷达一键控制光束自动准直调节的实现[J]. 中国激光, 2011, 38(s1): s114005.
- 4 任德明, 陈振雷, 咎兴海, 等. 激光雷达的同轴发射与接收系统及该系统的同轴调整方法: 中国, CN102230962A [P]. 2011-11-02.
- 5 Seckar C, Guy L, Difronzo A, *et al.*. Performance testing of an active boresight mechanism for use in the CALIPSO space borne lidar mission[C]. SPIE, 2005, 5877: 58770X.
- 6 Fiorani L, Armenante M, Capobianco R, *et al.*. Self-aligning lidar for the continuous monitoring of the atmosphere[J]. Appl Opt, 1998, 37(21): 4758-4764.
- 7 Liu Xiaoqin, Wu Yi, Hu Zhixing, *et al.*. Design and implementation of automatic alignment system for the lidar[J].

Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2341-2345.

刘小勤, 吴毅, 胡质星, 等. 激光雷达光束自动准直系统设计与实现[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2341-2345.

- 8 Tan Kun, Shao Shisheng. A self-alignment system of mobile lidar[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2008, 3(5): 344-348.
谭 侃, 邵石生. 一种车载激光雷达自动准直系统[J]. 大气与环境光学学报, 2008, 3(5): 344-348.
- 9 Du Qicheng, Xu Chidong, Ji Yufeng. Development of transmission coaxial micro pulse lidar[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(5): 357-360.
杜其成, 徐赤东, 纪玉峰. 透射式同轴微脉冲激光雷达研制[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(5): 357-360.
- 10 Di Huige, Hua Dengxin, Wang Yufeng, *et al.*. Investigation on the correction of the Mie scattering lidar's overlapping factor and echo signals over the total detection rang[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(9): 242-248.
狄慧鸽, 华灯鑫, 王玉峰, 等. 米散射激光雷达重叠因子及全程回波信号标定技术研究[J]. 物理学报, 2013, 62(9): 242-248.
- 11 Wang Huanxue, Liu Jianguo, Zhang Tianshu. Calculation method of geometrical form factor and its enhancement for off-axis lidar system[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(6): 601001.
王欢雪, 刘建国, 张天舒. 基于 Monte Carlo 积分法的离轴激光雷达几何因子的计算及系统优化[J]. 光子学报, 2015, 44(6): 601001.
- 12 Wang Wei, Mao Feiyue, Gong Wei, *et al.*. Overlap factor calculation method based on laser intensity distribution and its sensitivity analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0228005.
王 威, 毛飞跃, 龚 威, 等. 基于激光强度分布的激光雷达重叠因子计算及其敏感性分析[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0228005.