

采用光束扫描的透射仪测量光路自动准直系统

周树道^{1,2}, 马忠良¹, 王敏^{1,2}, 彭舒龄¹

(1. 解放军理工大学气象海洋学院, 江苏南京 211101;
2. 南京信息工程大学气象灾害预警与评估协同创新中心, 江苏南京 210044)

摘要: 能见度是航空、航海及其他领域关系到安全保障的重要气象要素之一, 透射式能见度仪在安装和使用过程中测量光路的准直状态, 对能见度测量精度有重要影响。根据其光学系统的特点提出了一种基于扫描方式的透射仪测量光路自动准直方法, 并基于该方法设计了自动准直系统。系统通过电机驱动发射端探测光束与接收端接收视场分别在两个垂直方向上进行扫描, 计算发射端与接收端的准直方位角, 进而实现透射仪测量光路的对准。系统测试表明, 系统可以实现透射仪测量光路的自动对准, 方位角定位最大误差为 $66 \mu\text{rad}$, 准直时间小于 10 min, 系统具有准直精度高、过程自动化、易于安装等特点。

关键词: 大气; 透射仪; 自动准直; 扫描

中图分类号: TN12; P427.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1017001

Automatic alignment system for measuring optical path of transmittance meter using light beam scanning

Zhou Shudao^{1,2}, Ma Zhongliang¹, Wang Min^{1,2}, Peng Shuling¹

(1. College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;
2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Visibility was regarded as one of the most important meteorological complications affecting the safety in the field of aviation and navigation. The alignment status of transmittance meter has played an important influence on the accuracy of visibility measurement in the course of installation and application. A measuring light path alignment method based on scanning mode was proposed and the automatic alignment system was designed based on this method. The system drove the probe beam and received field of view scanning in two vertical directions by electric machinery, then the azimuth angle of the transmitter and the receiver was calculated, and the alignment of the optical path was realized. System test shows that the system could realize the automatic alignment of the optical path of the transmittance meter, the maximum error of azimuth position is $66 \mu\text{rad}$, alignment time is less than 10 min. The system has the characteristics of high collimation precision, process automation, easy installation and so on.

Key words: atmosphere; transmittance meter; automatic alignment; scanning

收稿日期: 2017-02-05; 修订日期: 2017-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(41775039, 41775165)

作者简介: 周树道(1964-), 男, 教授, 硕士, 主要从事大气探测技术方面的研究。Email: zhousd70131@sina.com

0 引言

基于透射法设计的透射式能见度仪(简称透射仪)因其在测量原理上直接测量大气消光系数^[1-4],在低能见度情况下测量精度比较高,目前广泛应用于机场跑道等水平能见度测量场合^[5]。世界气象组织(WMO)举行的大规模能见度测量仪器比对也是使用的透射仪作为比对标准^[6]。同等能见度条件下,透射仪的测量精度与发射端与接收端的直线距离(基线)长短有关,基线越长测量精度越高。基线越长会使得在安装过程中发射端与接收端测量光路对准变得十分困难。同时,在风力及热应力的作用下,透射仪在使用过程中测量光路的准直状态会发生变化,从而影响能见度测量。自动准直技术是透射式能见度探测技术中的一项关键技术^[7-10]。

目前,自准直技术在激光通信、激光制导、激光测量及激光雷达等领域中的应用非常广泛,该技术需要外加准直光源,在接收端需要使用两个 CCD 来分别作为光束的粗跟踪和精跟踪探测器,使得其自准直装置结构复杂,反馈过程迟钝。在气象领域从国外研制成功的能见度测量仪器产品上看,其在结构上由单端式(前向或后向散射体制)发展成为如今被普遍认同的双端式^[2]。在光源选择上从卤钨灯发展到发光二极管,提高了透射仪光源的稳定性,进一步改善了透射仪探测光束的准直性能,并通过电机驱动实现了透射仪的自动准直。目前,国内针对透射仪测量光路自动准直

技术的研究较少,南京信息工程大学肖韶荣教授提出的基于四象限传感器设计的透射仪^[11],很好地解决了透射仪接收端接收光斑的跟踪问题,但不能解决发射端探测光束的对准问题。通过扫描的方式实现自动准直已经在激光雷达的准直系统中得到应用^[12],文中提出将扫描方式应用到透射仪测量光路的准直过程中,并结合方位角计算算法,以实现透射仪测量光路的自动准直。自动准直系统作为透射仪的辅助测量系统,主要包括主控模块、光源控制及光强信息采集模块、位置信息采集模块及电机驱动模块。

1 自动准直原理

1.1 透射仪光学子系统

透射仪光学子系统是透射仪测量系统的重要组成部分,直接反映了透射式能见度测量原理及测量光路准直原理,其结构如图 1 所示。透射仪光学子系统在结构上分为发射与接收两部分,发射端主要由光源、光阑、发射透镜组成,接收端主要由光电传感器、光阑、接收透镜组成。系统光源采用 LED 黄绿色光源,工作波长 557 nm。透射仪测量光路对准就是实现发射端探测光束与接收端接收视场的对准。透射仪测量系统中根据发射端光源发光光强及接收端接收光强计算能见度。当测量光路未对准时会使得接收端接收光强降低,在发射光强不变的条件下,测量光路未对准与能见度下降对接收光强的影响是一致的。因

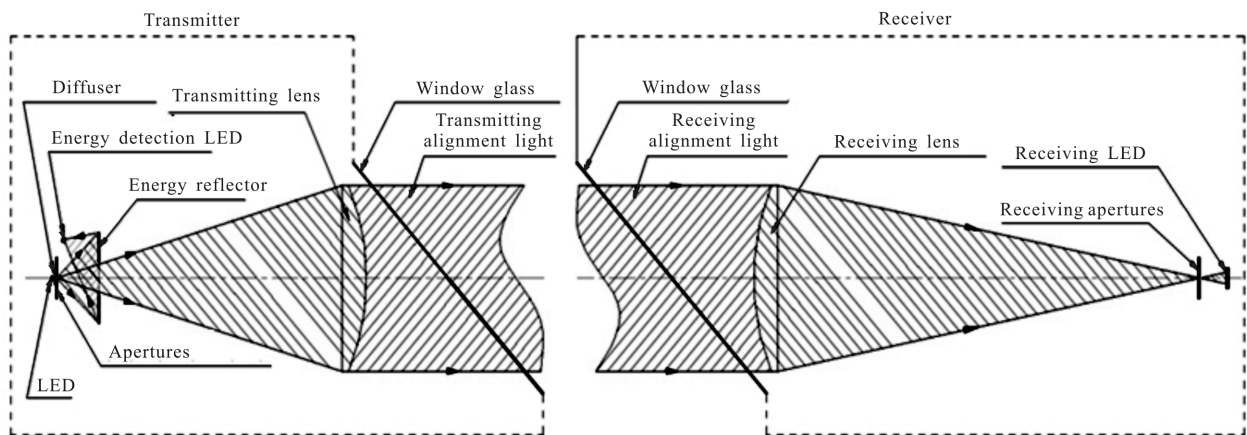


图 1 透射仪光学系统结构

Fig.1 Optical system structure of transmissometer

此,测量光路准直性直接能会影响能见度测量精度。探测光束扩散角由发射光阑孔径及发射透镜焦距

决定,接收视场视场角由接收光阑与接收透镜焦距决定。系统发射光束扩散角 5 mrad,接收视场角 3 mrad。

探测光束关于由光阑孔径中心与发射镜头中心确定的直线轴对称,接收视场关于由接收光阑中心与接收透镜中心确定的直线轴对称。因此可以将透射仪光学子系统简化,建立测量光路准直模型,如图 2 所示。

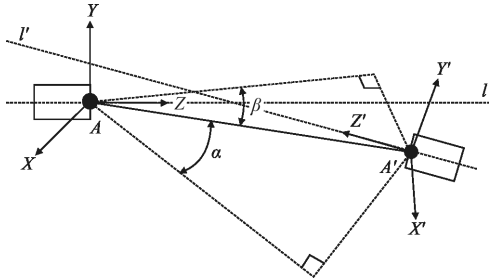


图 2 测量光路准直模型

Fig.2 Alignment model of measurement optical path

图 2 中, A 点表示发射镜头中心, A' 表示接收镜头中心, 直线 l 表示探测光束对称轴, l' 表示接收视场对称轴。当 l 与 l' 不重合时, 透射仪测量光路处于非准直状态。当直线 l 过点 A' 时, 发射端对准; 当直线 l' 过点 A 时, 接收端对准; 当发射端与接收端均对准时, l 直线与 l' 直线重合, 透射仪测量光路处于准直状态。

为了定量描述透射仪测量光路准直状态, 以 A、A' 为原点, 以直线 l 与 l' 为坐标轴, 分别建立如图 2 所示直角坐标系。以发射端对准为例, 通过接收镜头中心 A' 在发射端准直直角坐标系中的位置 $(L\sin\alpha, L\sin\beta, \sqrt{L^2\cos^2\beta-L^2\sin^2\alpha})$ 描述发射端准直状态。其中 L 为发射端与接收端基线长度, AA' 与平面 XAZ、YAZ 的夹角分别为 α 、 β 。经过分析, 当 $\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ$ 时发射端对准。同理可描述接收端准直状态。因此, 可以通过两个方位角 α 、 β 描述发射端准直状态。测量光路准直过程即是使得发射端或接收端各方位角变化为 0° 的过程。

1.2 基于扫描方式的测量光路自动准直方案

实现测量光路准直的关键在于测得发射端或接收端的方位角。以发射端准直为例, 基于扫描方式的测量光路自动准直方案是: 首先使得探测光束以 A 为中心绕 X 轴旋转, 旋转过程中测量接收端接收光强, 根据接收光强随旋转角度的变化关系计算方位角 β ; 其次, 驱动发射端探测光束以同样的方式旋转至方位角 β 指定的位置; 再次, 使得探测光束以 A 为中心绕 Y 轴旋转, 根据接收光强随旋转角度的变化关系计算方位角 α ; 最后, 驱动发射端探测光束以同样的方式旋转至方位角 α 指定的位置, 进而完成

发射端对准; 同理, 可进行接收端对准。扫描过程中发射端与接收端以 A 或 A' 为中心绕坐标轴旋转, AA' 保持不变。在进行接收端对准时, 发射端位置保持不变。要注意的是, 必须两端各进行一次对准, 才能实现准直。

1.3 方位角算法

由于透射仪光学子系统具有对称特性, 在探测光束扫描过程中, 接收光强会随旋转角度变化, 当旋转角度位于相应方位角位置时, 接收光强最大且在方位角位置两边呈现递减趋势。以方位角 α 为例, 扫描过程中接收端接收光强随旋转角度变化如图 3 所示。

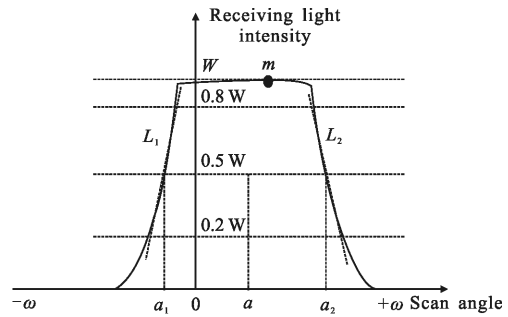


图 3 方位角计算方法示意图

Fig.3 Sketch map of calculation method for azimuth

基于变化过程中的对称特性计算方位角 α , 首先根据扫描过程中接收光强最大值 W 截取下沿中线线性度较好的数据; 其次, 根据公式(1)进行线性拟合, 得到两条拟合直线 L_1 与 L_2 ; 最后, 根据公式(2)将拟合直线中的等值点中心作为方位角 α 的测量结果。

$$\begin{cases} a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \\ b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: a 表示拟合直线斜率; b 表示拟合直线截距。 x_i 表示在扫描过程中发射端探测光束旋转的角度; y_i 表示扫描过程中接收端接收到的接收光强。

$$\alpha = \frac{0.5W(a_1+a_2) - b_1a_2 - b_2a_1}{2a_1a_2} \quad (2)$$

式中: a_1 、 b_1 分别表示拟合直线 L_1 、 L_2 的斜率; b_1 、 b_2 分别表示拟合直线 L_1 、 L_2 的截距。

2 自动准直系统设计

2.1 硬件设计

透射仪测量光路自动准直系统是透射仪测量系

统的辅助系统,其外观结构如图 4 所示。基于扫描方式的测量光路自动准直方案借助于透射仪本身测量光路进行准直,无需增加新的准直光路。因此,自动准直系统中的控制模块、光源控制及光强信息采集模块与测量系统中相同,自动准直系统在测量系统的基础上增加电机驱动模块及位置信息采集模块,如图 5 所示,虚线上部分为透射仪本身测量光路,虚线下部分为准直系统增加的部分。

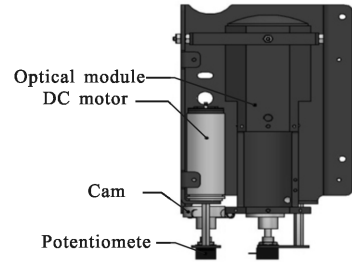


图 4 系统外观结构图

Fig.4 System appearance structure

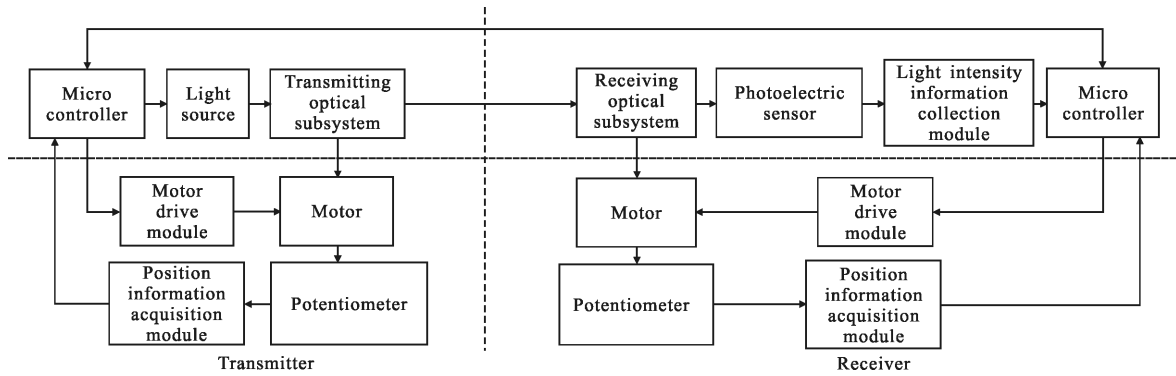


图 5 系统硬件结构图

Fig.5 System hardware structure diagram

微控制器主要用来控制系统各模块工作以及进行数据处理。由于发射端与接收端相距较远,在透射仪测量系统中是由两个微控制器组成,控制器之间通过通信总线相连接。光强信息采集模块用以测量准直过程中的接收光强信息。位置信息采集模块采

集电位器输出的位置信息,电位器用以测量电机旋转角度,电机旋转角度正比于发射端或接收端旋转角度。位置信息采集模块硬件电路如图 6 所示。

电机驱动模块控制电机,与位置信息采集模块配合用以驱动发射端或接收进行扫描运动及在得到

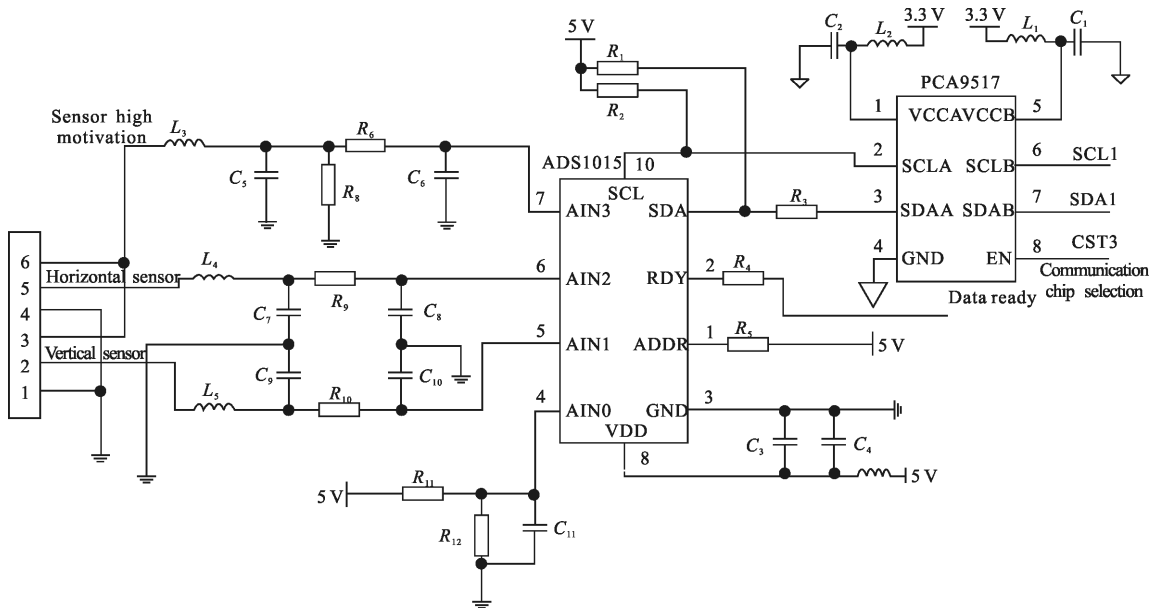


图 6 位置信息采集模块电路

Fig.6 Circuit of location information acquisition module

方位角以后对发射端或接收端进行定位。电机驱动模块硬件电路如图 7 所示。垂直方向与水平方向硬件电路相同。

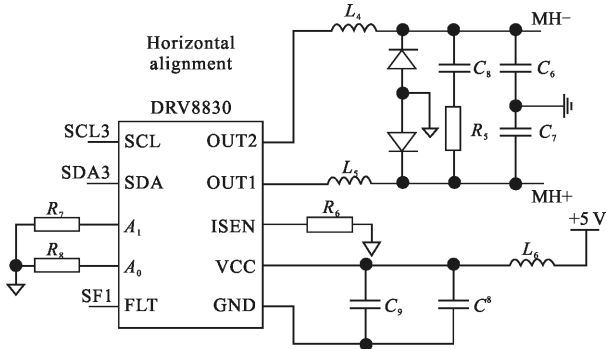


图 7 电机驱动模块电路

Fig.7 Circuit of motor drive module

2.2 软件设计

自动准直系统主要完成发射端或接收端的扫描、位置信息及光强信息采集、数据处理及方位角计算、定位等任务。透射仪在进行自动准直时,不进行能见度测量。考虑到如果发射镜头不在接收视场范围之内,发射端扫描过程中接收端接收光强将不发生变化。因此,先进行接收端准直再进行发射端准直,系统软件设计流程如图 8 所示。

为了克服电机的回程误差,在各端扫描之前先驱动电机反转一定角度,再进行正向扫描。同时,由于电位器工作过程中存在死区位置,在两端扫描之前需判断扫描行程是否超出死区位置,一旦超出死区位置需对电位器位置进行调整。

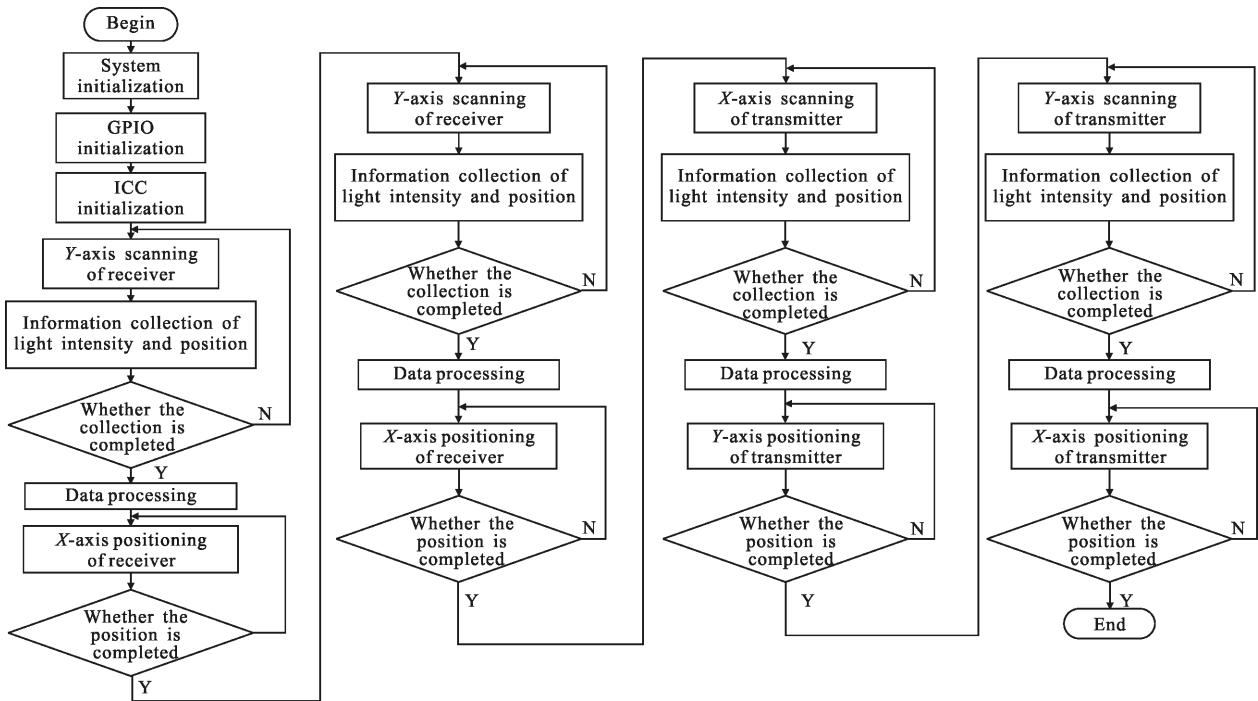


图 8 系统软件流程图

Fig.8 System software flow chart

3 自动准直系统测试

根据自动准直系统设计方案,文中将设计研制的透射仪自动准直系统安装到透射仪样机中进行测试。系统电机选用带有减速器的 FAULHABER 公司 2224R006SR 直流微电机。测试过程中,发射端与接收

端基线长度为 30m。扫描范围 1°,扫描速度 0.02(°)/s。由于自动准直系统扫描范围的限制,系统进行自动对准之前,首先进行测量光路人工初始对准。由于系统单次准直过程中,需要经过四次扫描定位周期,文中记录了发射端与接收端各轴向方位角与定位位置对应的电位器位置,结合凸轮参数与透镜焦距

(150 mm)可计算得到各轴向定位误差,如表 1 所示。

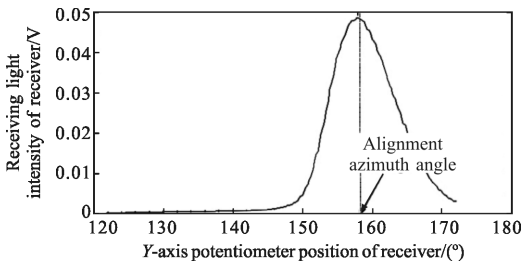
表 1 发射端与接收端方位角测量误差

Tab.1 Transmitter and receiver azimuth measurement error

Measurement error axial	Potentiometer alignment position/(°)	Potentiometer position/(°)	Error/ μ rad
Y axis of receiver	158.3	158	66
X axis of receiver	103.85	103.7	35
Y axis of transmitter	159.39	159.2	44
X axis of transmitter	186.5	186.3	46

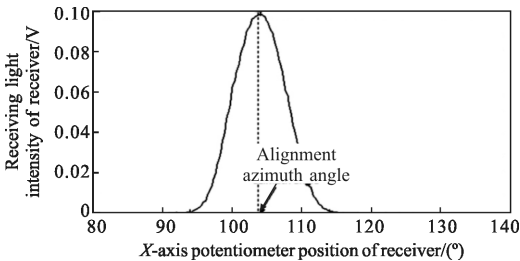
从表 1 可知,各轴向定位误差最大为 66 μ rad,在 100 m 基线条件下,会使得探测光束远场光斑或接收视场偏移 7 mm,能够满足透射仪测量光路准直要求。同时,为了研究自动准直系统准直效果,记录了各轴向定位过程中接收光强信息与扫描角度信息如图 9 所示。对准之后接收光强的变化,如图 10 所示。

由图 9 可知,准直过程中接收光强随扫描角度变化呈对称趋势,进一步说明基于扫描方式的准直方法的可行性。利用提出的方位角计算方法,可以得到各轴向的准直方位角,方位角位置如图 9 中虚线所示。



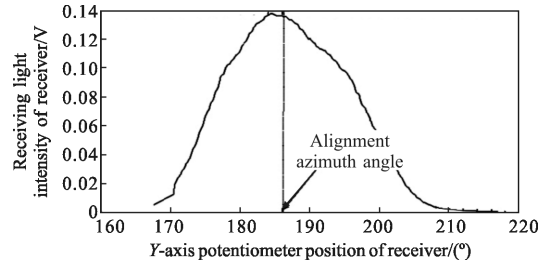
(a) 接收端 Y 轴对准

(a) Y axial alignment of receiver



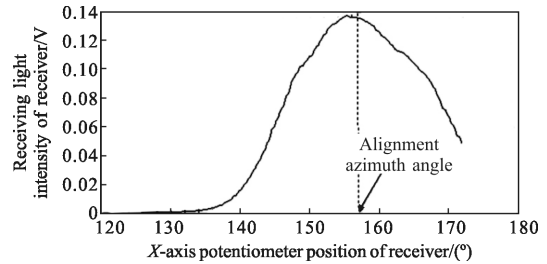
(b) 接收端 X 轴对准

(b) X axial alignment of receiver



(c) 发射端 Y 轴对准

(c) Y axial alignment of transmitter



(d) 发射端 X 轴对准

(d) X axial alignment of transmitter

图 9 各轴向接收光强与扫描角度关系示意图

Fig.9 Relation between axial receiving light intensity and scanning angle

由图 10 可知,人工粗调之后接收光强较小,进一步说明人工粗调的效果有限。经过自动对准之后,透射仪接收端接收光强明显增强,且接收光强趋于稳定。由接收光强变化趋势可以判断,经过发射端与接收端的准直,探测光束与接收视场更趋近于准直位置。系统测试表明,系统进行一次准直时间小于 10 min。

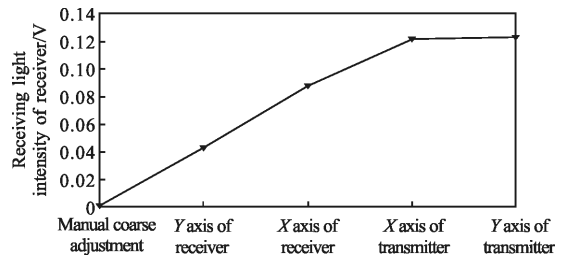


图 10 自动准直过程中接收光强变化趋势

Fig.10 Tendency of receiving light intensity in automatic alignment process

文中将研制的透射仪样机 (DNT1) 与芬兰 Vaisala 公司 (目前代表世界先进水平) 透射仪 LT31 进行了对比测试,对比趋势如图 11、图 12 所示。偏

差的计算结果为:

(1) MOR 小于 400 m 时, DNT1 与 LT31 的标准偏差为 8.7 m;

(2) MOR 为 400~800 m 时, DNT1 与 LT31 的标准偏差为 15.2 m;

(3) MOR 为 800~2 000 m 时, DNT1 与 LT31 的标准偏差为 7.9%;

(4) MOR 为 2 000~4 000 m 时 DNT1 与 LT31 的标准偏差为 15.4%。

从上述测试结果可知, 文中提出的含自准直系统的透射仪测量性能达到了国际同类先进产品的水平。

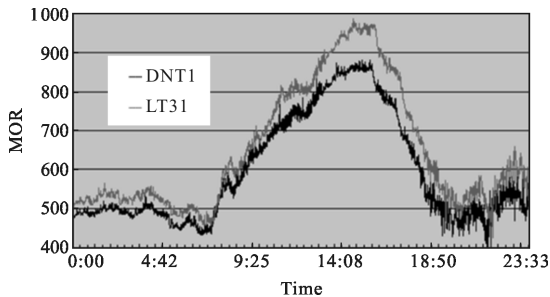


图 11 MOR 为 400~1 000 m 时对比数据

Fig.11 Contrast data of MOR in 400-1 000 m

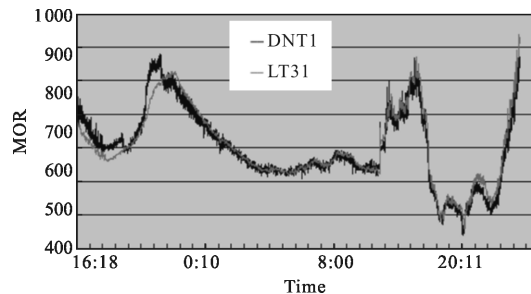


图 12 MOR 为 1 200~4 000 m 时对比数据

Fig.12 Contrast data of MOR in 1 200-4 000 m

4 结 论

基于扫描方式的透射仪测量光路自动准直系统,在透射仪测量光路基础上实现自动准直,降低了系统的复杂性,易于在透射仪测量系统中安装。测试表明,系统实现了透射仪测量光路高精度、自动化的准直,相对于人工对准大幅度改善了准直效果,且准直时间较短。由于系统提高了接收端接收光强,对提高透射仪能见度测量精度具有重要意义。

参 考 文 献:

- [1] Xiao Shaorong, Shang Guoqing, Zhou Jia, et al. Influence of detection wavelength drift on visibility measurement [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(5): 853-857. (in Chinese)
- [2] Tian Lin, Lu Yihuai, Gui Huaqiao, et al. Investigation on one-terminal transmission visibility meter based on using corner of reflector [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2011, 6(5): 390-397. (in Chinese)
- [3] Feng Shuai, Jiang Lihui, Xiong Xinglong, et al. Lidar visibility inversion with breakpoint signal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 330001. (in Chinese)
- [4] Gong Shaoqi, Sun Haibo, Wang Shaofeng, et al. Study on atmospheric transmittance of thermal infrared remote sensing (I): Derivation of atmospheric transmittance model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (6): 1692-1698. (in Chinese)
- [5] Chen Shaorong, Wei Qunjun, Lv Jun. The development of a new atmosphere transmittance meter [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(2): 144-150. (in Chinese)
- [6] Xing Xiangnan, Cui Yanmei, Li Tao, et al. Design and experiment research of visibility measuring device based on transmission method [J]. *Metrology & Measurement*, 2011, 31(3): 10-13. (in Chinese)
- [7] Xing Xiangnan, Cui Yanmei, Zhang Fuyin, et al. Summary of present situation and development trend of visibility measurement technology [J]. *Metrology & Measurement*, 2010, 30(5): 15-20. (in Chinese)
- [8] Song Yansong, An Yan, Li Xinhang, et al. Analyzing and suppressing of stray light in laser collimating system [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(6): 663-670. (in Chinese)
- [9] Zhao Huifu, Liu Hua, Sun Qiang, et al. Design of RIXR LED collimate system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(7): 1472-1479. (in Chinese)
- [10] Shi Yali. Changing hardware parameters to improve the measuring accuracy of CCD laser autocollimator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(4): 726-733. (in Chinese)
- [11] Xia Jiangtao. Design of an optical collimation and automatic tracking system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, 16 (5): 74-77. (in Chinese)
- [12] Tan Kun, Shao Shisheng. A self-alignment system of a mobile lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(5): 344-348. (in Chinese)