

# 经纬仪分离透镜法自动调焦模型建立与分析

吴林涛<sup>1,2</sup>, 蔡盛<sup>1,2</sup>, 乔彦峰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**为实现经纬仪实时自动调焦,设计了一种用于经纬仪的分离透镜法自动调焦方案,建立了相应的数学模型并作分析。物光经放置在经纬仪第一像面后的两块分离透镜后,在 CCD 上成像,形成两光斑,以对焦准确时 CCD 上两光斑间距为基准,给出了离焦量与光斑间距变化之间的关系,据此进行调焦。同时分析了跟踪中心漂移、发散角等对调焦精度的影响。与经纬仪传统调焦方案相比具有精度高、算法简单、受环境温度变化影响小、结构简单等优点。初步实验结果显示其调焦精度优于 0.056mm,满足经纬仪工程实际的需要。

**关键词:**分离透镜;经纬仪;自动调焦;建模

**中图分类号:**TH761.1      **文献标识码:**A

## Modeling and Analysis of Diallyte-lens Auto-focusing Technology for Theodolite

WU Lin-tao<sup>1,2</sup>, CAI Sheng<sup>1,2</sup>, QIAO Yan-feng<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In order to realize real-time auto-focusing for theodolite, lens-apart method was designed with the corresponding math model built and analyzed. An Object beam splitted after the first image surface of the theodolite traveled through two dialyte lens and then was imaged on CCD. The distance between two spots when exactly focused was set as the calibration value, and the relationship between defocus distance and spot offset was given. The influence of tracking center shift and divergence angle etc. on focusing accuracy was analyzed. Compared with the traditional focusing method, this scheme has a higher accuracy, faster calculation, higher tolerance for environment temperature and a simpler construction. The experiment result exhibited a resolution higher than 0.056mm, which shows a bright engineering application prospect for this method.

**Key words:** theodolite; auto-focusing; dialyte lens; model building

### 1 引言

光电经纬仪是现代化靶场用来测试外弹道数据和飞行状态的一种光学测量仪器<sup>[1]</sup>,主要采用摄影和电视跟踪系统对空中飞行目标进行连续跟踪和测量。由于飞行目标距离不断变化,为使摄影和电视跟踪系统始终能得到清晰的像,系统中自动调焦机

构是必不可少的<sup>[2-3]</sup>。现在诸多经纬仪是由雷达或激光测距机送来的距离信息来控制调焦机构,但由于外界温度影响,透镜焦距随温度变化而变化,从而

**作者简介:**吴林涛(1984-),男,硕士研究生,主要从事光电测量技术研究。E-mail:wulintao2001@163.com  
**收稿日期:**2008-06-17; **修订日期:**2008-09-11

使调焦产生偏差。目前主要采用温度修正系统利用补偿公式根据外界温度变化进行调整,但因计算公式经验不足,常需要在外场实际应用中加以修正,且效果差精度低,给使用带来很多不利因素。为解决此问题提出了分离透镜法自动调焦方案,通过检测经纬仪的成像信息进行调焦。此方案为被动式检焦,与经纬仪传统调焦方案相比具有受外界环境影响较小、结构简单、精度高的特点。

## 2 模型建立

### 2.1 基本结构

经纬仪的调焦系统主要根据检焦系统提供的离焦信息移动放置在望远光路中的准直物镜来实现调焦的。以牛顿式结构经纬仪(如图 1 所示)为例,光线经望远主镜与反射镜后成像于第一像面,调焦系统需移动准直透镜使其前焦面与第一像面重合,保证进入后方处理机构的光线为平行光。

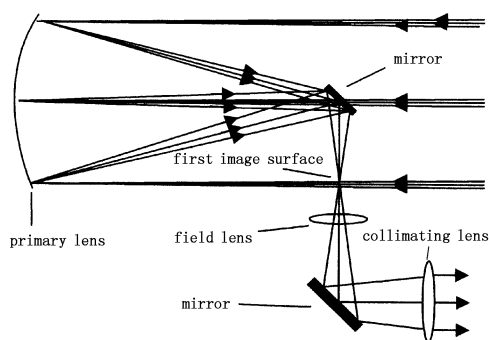


图 1 牛顿式经纬仪结构图(部分)

为判断第一像面与准直透镜间的离焦量并使其重新重合,从第一像面后光轴处分离部分能量(或波长)经分离透镜成像于 CCD 上(如图 2 所示)。这样可以尽可能地避免轴外杂散光的干扰,提高信噪比,但必须同时保证准直物镜与分离透镜和 CCD 在两个轴向上同步运动。系统通过检测 CCD 上两成像光斑间距离来判断离焦量。以对焦准确时(即第一像面与准直透镜前焦面重合) CCD 上两光斑距离  $AB$  作为基准,当第一像面位于准直物镜前焦点前方时,CCD 上两光斑间距离小于  $AB$ ,当第一像面位于准直物镜前焦点后方时,CCD 上两光斑间距离大于  $AB$ 。根据 CCD 上两光斑的位置的距离与  $AB$  的差值,由数据处理系统计算出准直镜前焦点离开经纬仪第一像面的距离,以及离焦方向。分离透镜, CCD, 后方数据处理系统共同组成调焦机构的检焦部分。调焦控制系统根据离焦信息同步移动准直镜

与检焦系统直至对焦准确。

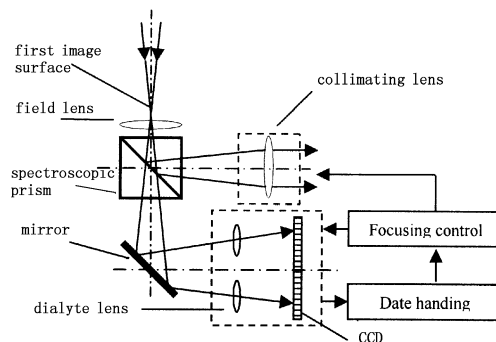
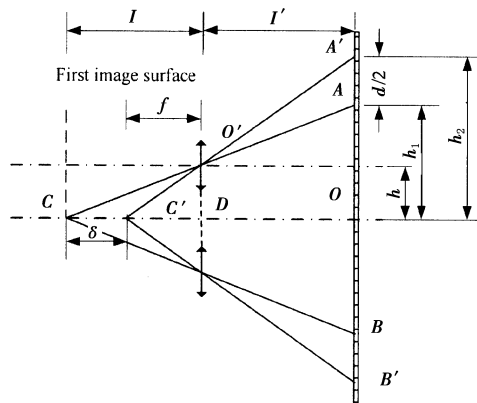


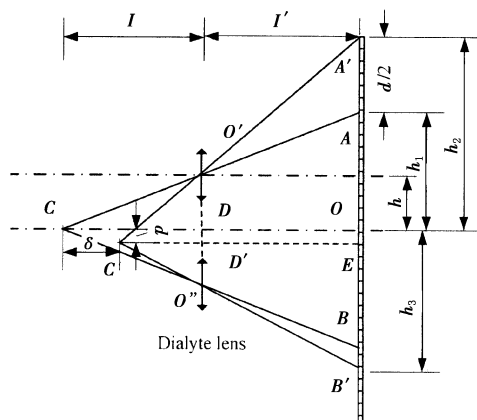
图 2 调焦结构示意图

### 2.2 数学模型建立

如图 3(a) 所示,当对焦准确时,光束经分离透镜成像于 CCD 上  $A, B$  处,此时第一像面经分离透镜成像的物距为  $l$ ,像距为  $l'$ 。设分离透镜焦距为  $f$ ,其中心与光轴间距为  $h$ 。当离焦量为  $\delta$  时,CCD 上像点位于  $A', B'$  处,与  $A, B$  分别产生  $d/2$  的偏移。



(a) 未漂移



(b) 漂移

图 3 离焦量为光斑移动位置关系示意图

由图 3(a) 可知  $\triangle CO'D \cong \triangle CAO$

$$\text{则 } \frac{O'D}{AO} = \frac{CD}{CO}, \text{ 即 } \frac{h}{h_1} = \frac{l}{l+l'}$$

又由高斯公式有： $\frac{1}{l} + \frac{1}{l'} = \frac{1}{f}$

则：

$$l' = \frac{fl}{l-f} \quad (1)$$

求得：

$$h_1 = \frac{l'h}{l} + h = \frac{fh}{l-f} + h \quad (2)$$

同理， $\Delta C'O'D' \cong \Delta C'A'O$ ， $\frac{O'D'}{A'O} = \frac{C'D'}{C'O}$

即：

$$\frac{h}{h_2} = \frac{l-\delta}{l+l'-\delta}$$

求得：

$$h_2 = \frac{l'h}{l-\delta} + h = \frac{l'fh}{(l-f)(l-\delta)} + h \quad (3)$$

因光轴上下两部分为对称分部，则 CCD 上两光斑距离变化为：

$$d = 2(h_2 - h_1) = \frac{2l'h\delta}{(l-\delta)l} = \frac{2fh\delta}{(l-\delta)(l-f)} \quad (4)$$

从而得出离焦量  $\delta$  与偏移量  $d$  之间的关系式为：

$$\delta = \frac{dl(l-f)}{2hf+d(l-f)} \quad (5)$$

根据式(5)，通过检测 CCD 上两像点间距变化即偏移量  $d$ ，即可就出相应的离焦量然后将离焦信息送至调焦控制机构以实现调焦。

设分离透镜放大率  $M = \frac{l'}{l}$ ，结合式(1)得：

$$l = \frac{(M+1)f}{M} \quad (6)$$

将其代入式(4)求得：

$$d = \frac{2M^2 h \delta}{M(f-\delta) + f} \quad (7)$$

可知若要得到更高的检焦分辨能力可以增大分离透镜与主光轴间距  $h$ ，提高第一像面经分离透镜成像的放大率  $M$ ，减小分离透镜焦距  $f$ 。

系统检焦精度要求  $\delta_{\min} < 40 \mu\text{m}$ ，选取 CCD 分辨率  $\Delta d = 8 \mu\text{m}$ ， $M = 3$ ， $f = 45 \text{mm}$ ， $h = 5 \text{mm}$  代入式(7)得  $\delta = 16 \mu\text{m} \ll \delta_{\min}$ 。若对 CCD 进行精度细分分辨率仍有较大的提升空间，可见此方案完全可以满足经

纬仪调焦的精度要求。

### 2.3 跟踪中心漂移及发散角影响分析

当跟踪中心出现纵向位移为  $p$  的漂移时(如图

3(b)所示)，此时：

$$h'_1 = h_1 = \frac{l'h}{l} + h = \frac{fh}{l-f} + h \quad (8)$$

$$\Delta C'O'D' \cong \Delta C'A'E, \frac{O'D'}{A'E} = \frac{C'D'}{C'E},$$

则：

$$\frac{h+p}{h_2+p} = \frac{l-\delta}{l+l'-\delta}$$

求得：

$$h'_2 = \frac{l'(p+h)}{l-\delta} + h = \frac{fl(p+h)}{(l-f)(l-\delta)} + h \quad (9)$$

$$\Delta C'O''D' \cong \Delta C'B'E, \frac{O''D'}{B'E} = \frac{C'D'}{C'E},$$

则：

$$\frac{h-p}{h_3-p} = \frac{l-\delta}{l+l'-\delta}$$

求得：

$$h'_3 = \frac{l'(h-p)}{l-\delta} + h = \frac{l'(h-p)}{l-\delta} + h \quad (10)$$

则 CCD 上两光斑距离变化为：

$$\begin{aligned} d' &= h'_2 + h'_3 - 2h'_1 = \frac{2l'h\delta}{(l-\delta)l} \\ &= \frac{2fh\delta}{(l-\delta)(l-f)} = d \end{aligned} \quad (11)$$

由此可见，光斑间距离变化只与离焦量  $\delta$  有关，而并不受跟踪中心漂移影响。

因入射到分离透镜上的光线具有一定的发散角，因此当  $h$  过大时分离透镜可能只被部分照亮，从而影响 CCD 上光斑位置进而给调焦带来误差。为此设最小入射光发散角为  $\theta_{\min}$ ，则要求：

$$h < l \cdot \tan \frac{\theta_{\min}}{2} - \frac{D}{2} \quad (12)$$

其中， $D$  为分离透镜直径。

### 3 实验结果与误差分析

根据实际经纬仪工作情况，我们在实验室搭建了一个仿真实验平台来确定本方案的调焦精度。实验装置布局如图 4 所示，光源为一星点，主镜  $f_1 = 200.0 \text{mm}$ ，分离透镜  $f_2 = 75.0 \text{mm}$ ，CCD 为美国 UNIC 公司生产的 UM-201 (CCIR)，黑白，像元尺寸为

8.6 $\mu\text{m}$   $\times$  8.3 $\mu\text{m}$ , 靶面尺寸 1/2in (1in = 2.54cm)。初始时,光源经主镜成像于第一像面,分离透镜前焦面与第一像面重合,记录此时 CCD 上光斑间距并作为基准。光源经主镜成像的垂轴放大率已知,前后方向移动光源并根据放大率与光源移动量计算等效离焦量,同时记录对应离焦量 CCD 上两光斑间距,然后进行数据分析处理。

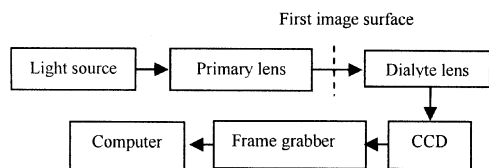


图4 实验设备布局图

实验结果如表 1 所示。

表 1 系统检焦性能实验结果

Defocusing amount	$\mu\text{m}$		
	Spot offset (theoretical)	Spot offset (experimental)	error
-224.0	-50.7	-52.0	-1.3
-168.0	-37.6	-39.0	-1.4
-112.0	-25.0	-26.0	-1.0
-56.0	-12.4	-13.0	-0.6
56.0	14.6	13.0	-1.6
112.0	25.9	26.1	0.2
168.0	39.7	39.1	-0.6
224.0	51.5	52.1	0.6

实验结果与理论值基本相符且检焦精度优于 56 $\mu\text{m}$ , 能够满足工程实际的需要。

上述测量的主要误差来源有:

(1) 光学系统像差影响。因为采用分离透镜成像时利用的是轴外光束,因此 CCD 上成像光斑存在一定像差,影响了定位精度。对此需要在以后的工作中对光学系统和图像处理程序进行相应优化。

(2) 杂散光影响。整个实验是在开放环境中采用分立元件进行的,因此杂散光的存在使得 CCD 信号信噪比降低带来一定误差,而实际工程应用时整个系统为封闭式,并进行消杂散光处理,可以基本消除此项误差。

(3) 各元件装调及仪器误差。实验各元件在进行装调时存在各种误差,如位置误差、CCD 平行度

误差、光学元件同轴误差等;在进行离焦实验时各种距离位置测量仪器误差及平移台定位误差。

#### 4 总结

本文对经纬仪分离透镜法自动调焦方案进行了理论探讨和可行性分析,实验结果表面分离透镜法自动调焦技术调焦精度优于 0.056mm,满足工程实际要求。与传统经纬仪调焦方法相比,此方案具有结构简单、调焦速度快、受环境影响较小等优点。本实验系统的光学结构设计、图像处理程序、各元器件装调精度还有较大的提升空间,因此系统调焦精度可以达到 0.01mm 甚至更高。同时因检焦系统与调焦机构为非同轴设计,如何使二者严格同步运动以保证检焦,调焦的准确性也是工程应用要解决的一个关键问题。

#### 参考文献:

- [1] E R Malamed, M N Sokolsky. Designing of optical system for large space telescopes[J]. SPIE, 2536:376-385.
- [2] 徐维安. 电影经纬仪自动调焦的结构设计[J]. 光学精密工程, 1996, 14(3): 52-57.
- [3] 梁翠萍, 张涛, 高岩, 等. 一种用于经纬仪的实时检焦系统[J]. 光电工程, 2007, 34(12): 17-20, 65.
- [4] Zhaohui Li, Keyong Wu. Autofocus system for space cameras[J]. Optical Engineering, 2005, 44(5): 1-4.
- [5] N Kehtarnavaza, H J Oh. Development and real-time implementation of a rule-based auto-focus algorithm[J]. Real-Time Imaging, 2003(9): 197-203.
- [6] 官光勇, 何文忠, 高旭辉. 红外系统中自动调焦爬山搜索算法的优化设计[J]. 激光与红外, 2007, 37(11): 1213-1215.
- [7] Brendan M Quine, Valery Tarasyuk, Henok Mebrahtu, et al. Determining star-image location: A new sub-pixel interpolation technique to process image centroids[J]. Computer Physics Communications, 2007, (177): 700-706.
- [8] 李玉峰, 郝志航. 星点图像超精度亚像元细分定位算法的研究[J]. 光学技术, 2005, 31(5): 666-668, 671.
- [9] 谢伦治, 卞洪林, 王振华. 面阵探测器的像元亚像素定位研究[J]. 光学与光电技术, 2003, 1(2): 51-56.
- [10] 郑毅. 基于空间矩的激光光斑中心亚像素定位[J]. 激光与红外, 2005, 37(7): 521-523.