

激光与经纬仪高精度对接技术

王 光^{1,2}, 高云国¹, 马亚坤¹, 薛向尧¹, 张文豹¹, 邵 帅¹

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 激光发射系统中激光与经纬仪高精度对接保证了激光的高精度定向发射, 针对激光器与经纬仪机下对接方式, 从理论上建立整体坐标系下基于库德光路传导激光的库德镜空间归一化模型, 精确标定激光在各库德镜空间中的位置及其变化, 通过该模型提出内场分级、外场秒级的激光与经纬仪高精度对接技术, 结合某长波激光发射系统进行实验验证, 可实现激光与经纬仪 2" 以内高效精准对接, 从工程上验证了该技术的正确性和实用性, 为该类型激光对接提供了技术支撑。

关键词: 激光发射系统; 高精度对接; 库德光路; 空间归一化模型

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0706006

High accurate docking technology of laser and theodolite

Wang Guang^{1,2}, Gao Yunguo¹, Ma Yakun¹, Xue Xiangyao¹, Zhang Wenbao¹, Shao Shuai¹

(1. Changchun Institute of Optic, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In a laser emission system, the high accurate docking of laser and theodolite ensures the high-precision orientation laser emission. For the under-the-machine docking, the Coude mirror space normalization theoretical model of the overall coordinate system based on the Coude optical path which transmits laser was established, and it accurately calibrated the position and variation of the laser in each Coude mirror space. Based on this theoretical model, a high accurate docking technology of laser and theodolite was proposed, which achieved the minute level of inner field and the second level of outside field. In a experiment of a long wave laser emission system, the technology realized a fast accurate docking which has an error of less than 2". Its correctness and practicality are verified from the engineering, it also provides the technical support for this type of docking of laser and theodolite.

Key words: laser emission system; high accurate docking; Coude optical path; spatial normalization model

收稿日期: 2018-02-01; 修订日期: 2018-03-12

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目(061X20C060)

作者简介: 王光(1987-), 男, 研究实习员, 博士生, 主要从事光机一体化设计方面的研究。Email: wg_hit@163.com

导师简介: 高云国(1955-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电仪器总体设计方面的研究。Email: gaoyunguo@163.com

0 引言

激光发射系统核心为激光器和经纬仪, 激光器为发射源, 经纬仪为定向器, 两者对接实现激光的高精度定向发射。激光与经纬仪的高精准对接是将激光发射光轴与经纬仪光轴之间的偏差调整至最小, 乃至重合, 实现经纬仪指向目标和激光作用目标的一致性。高精度的对接可实现小发散角、高能量密度的激光发射, 将直接影响到激光远场的光束质量及作用效果^[1-7]。

目前, 常用的激光与经纬仪对接方式为机下对接方式, 即激光经过库德光路传导至经纬仪发射轴后发射。该方式对激光器和经纬仪的重量、体积等自身条件几乎没有限制, 且便于对两者对接调整, 适用于不同波段、单个或者多个激光器与经纬仪的对接, 应用十分广泛。

对于该类对接方式, 工程上常采用近场或远场打靶试验来提高激光与经纬仪的对接精度, 然而针对该类对接方式的理论分析文献或报道较为少见, 一些文献集中在库德镜光路与轴系之间的误差源分析上^[1-3], 而对激光源位置及角度变化引起激光光束在空间中的变化则没有精准标定, 并且针对该类对接方式的具体过程鲜有介绍。

文中针对该对接方式, 从理论上建立了整体坐标系下基于库德镜空间的归一化模型, 精确标定激光在该空间内的变化, 以此提出了激光与经纬仪的高精准对接技术, 而后结合某长波激光发射系统, 运用该技术对长波激光与经纬仪进行高精度对接, 实现了对激光光束在内场、外场调试过程中的高效精确标定。

1 长波激光发射系统

系统中, 长波激光与经纬仪采用机下对接方式, 以激光发射出口处为坐标原点, 建立右手笛卡尔整体坐标系, 如图 1 所示。

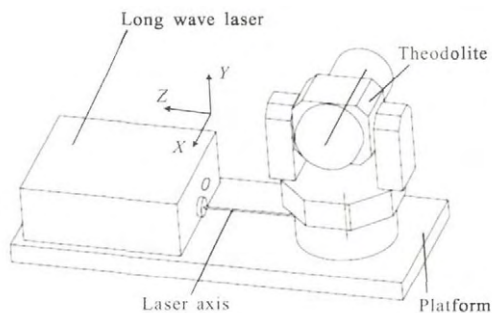
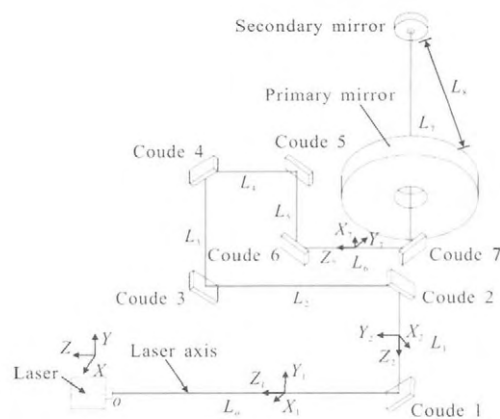


图 1 长波激光器发射系统示意图

Fig.1 Emission system of a long wave laser

长波激光器和经纬仪安装在同一个平台上, 其工作模式为: 激光器发射激光, 激光通过经纬仪中库德光路传导, 而后经主、次镜扩束(8 倍扩束)后发射, 实现激光高精度定向发射, 如图 2 所示。



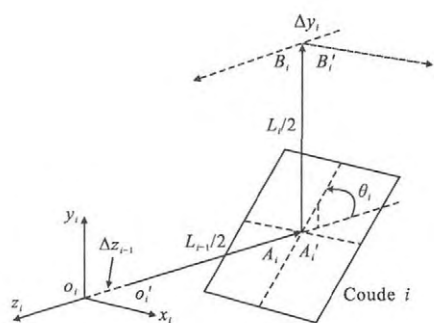

 图 3 库德镜 i 空间归一化模型

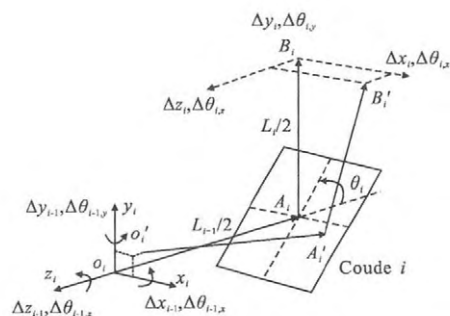
 Fig.3 Space normalization theoretical model of Coude mirror i


图 4 激光光束空间标定

Fig.4 Space calibration diagram of the laser beam

令激光在入射点的变化量为 $\Delta D_{i-1} = [\Delta x_{i-1} \ \Delta y_{i-1} \ \Delta z_{i-1} \ \Delta \theta_{i-1,x} \ \Delta \theta_{i-1,y} \ \Delta \theta_{i-1,z}]^T$ 。同样令激光在出射点的变化量为 $\Delta D_i = [\Delta x_i \ \Delta y_i \ \Delta z_i \ \Delta \theta_{i,x} \ \Delta \theta_{i,y} \ \Delta \theta_{i,z}]^T$, 前三项为沿三个坐标轴方向的位置平移量, 后三项为绕三个坐标轴的光轴旋转量。通过逐个分析 ΔD_{i-1} 中单一量对 ΔD_i 的影响, 可推导出两者之间关系, 过程如下。

(1) 平移量 Δx_{i-1} 对 ΔD_i 的影响, 如图 5 所示。

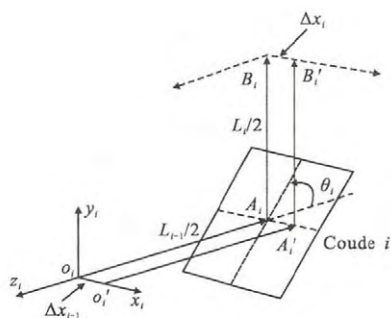

 图 5 Δx_{i-1} 对 ΔD_i 的影响

 Fig.5 Effect of Δx_{i-1} on ΔD_i

激光出射点、入射点变化量的关系式如下：

$$\begin{cases} \Delta x_i = \Delta x_{i-1} \\ \Delta y_i = 0 \\ \Delta z_i = 0 \\ \Delta \theta_{i,x} = 0 \\ \Delta \theta_{i,y} = 0 \\ \Delta \theta_{i,z} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

(2) 平移量 Δy_{i-1} 对 ΔD_i 的影响, 如图 6 所示。

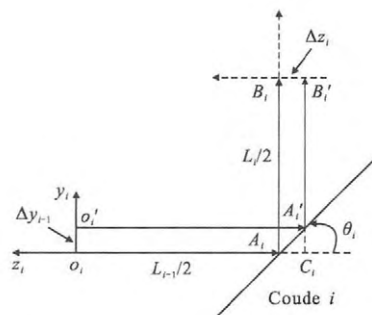

 图 6 Δy_{i-1} 对 ΔD_i 的影响

 Fig.6 Effect of Δy_{i-1} on ΔD_i

激光出射点、入射点变化量的关系式如下：

$$\begin{cases} \Delta x_i = 0 \\ \Delta y_i = 0 \\ \Delta z_i = -\Delta y_{i-1} / \tan \theta_i \\ \Delta \theta_{i,x} = 0 \\ \Delta \theta_{i,y} = 0 \\ \Delta \theta_{i,z} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

(3) 平移量 Δz_{i-1} 对 ΔD_i 的影响, 如图 7 所示。

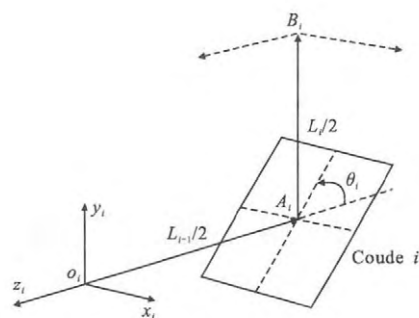

 图 7 Δz_{i-1} 对 ΔD_i 的影响

 Fig.7 Effect of Δz_{i-1} on ΔD_i

激光出射点、入射点变化量的关系式如下：

$$\begin{cases} \Delta x_i = 0 \\ \Delta y_i = 0 \\ \Delta z_i = 0 \\ \Delta \theta_{i,x} = 0 \\ \Delta \theta_{i,y} = 0 \\ \Delta \theta_{i,z} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

(4) 旋转量 $\Delta\theta_{i-1,x}$ 对 ΔD_i 的影响如图 8 所示。

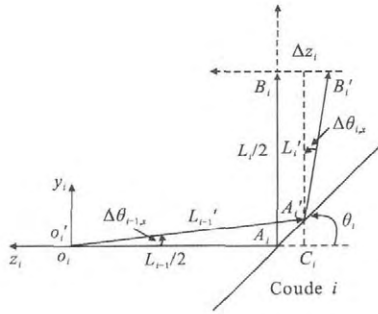


图 8 $\Delta\theta_{i-1,x}$ 对 ΔD_i 的影响

Fig.8 Effect of $\Delta\theta_{i-1,x}$ on ΔD_i

激光出射点、入射点变化量的关系式如下：

$$\begin{cases} \Delta x_i = 0 \\ \Delta y_i = 0 \\ \Delta z_i = (L_{i-1}/2 - L_{i-1}' \cos \Delta\theta_i) + L_i' \tan \Delta\theta_{i,x} \\ \Delta\theta_{i,x} = -\Delta\theta_{i-1,x} \\ \Delta\theta_{i,y} = 0 \\ \Delta\theta_{i,z} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$L_i' = L_i/2 - L_{i-1}' \sin \Delta\theta_{i-1,x}$$

$$L_{i-1}' = (L_{i-1}/2) \cdot \sin \theta_i / \sin(\theta_i - \Delta\theta_{i-1,x})$$

推导 L_{i-1}' 时有两种情况：当 $\Delta\theta_{i-1,x}$ 为正时，如图 8 所示，由正弦定理可得， $L_{i-1}' = (L_{i-1}/2) \cdot \sin(\pi - \theta_i) / \sin(\theta_i - \Delta\theta_{i-1,x})$ ；当 $\Delta\theta_{i-1,x}$ 为负时，同理可得， $L_{i-1}' = (L_{i-1}/2) \cdot \sin \theta_i / \sin(\pi - \theta_i + \Delta\theta_{i-1,x})$ ，因 $\sin(\pi - \theta_i + \Delta\theta_{i-1,x}) = \sin(\theta_i - \Delta\theta_{i-1,x})$ ， $\sin(\pi - \theta_i) = \sin \theta_i$ ，故两式可统一表述。

(5) 旋转量 $\Delta\theta_{i-1,y}$ 对 ΔD_i 的影响如图 9 所示。

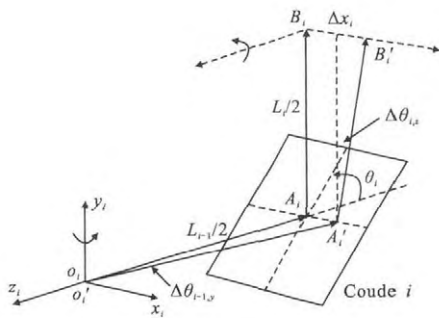


图 9 $\Delta\theta_{i-1,y}$ 对 ΔD_i 的影响

Fig.9 Effect of $\Delta\theta_{i-1,y}$ on ΔD_i

激光出射点、入射点变化量的关系式如下：

$$\begin{cases} \Delta x_i = -(L_{i-1}/2) \cdot \tan \Delta\theta_{i-1,y} - (L_i/2) \cdot \tan \Delta\theta_{i,z} \\ \Delta y_i = 0 \\ \Delta z_i = 0 \\ \Delta\theta_{i,x} = 0 \\ \Delta\theta_{i,y} = 0 \\ \Delta\theta_{i,z} = \Delta\theta_{i-1,y} \end{cases} \quad (5)$$

(6) 旋转量 $\Delta\theta_{i-1,z}$ 对 ΔD_i 的影响如图 10 所示。

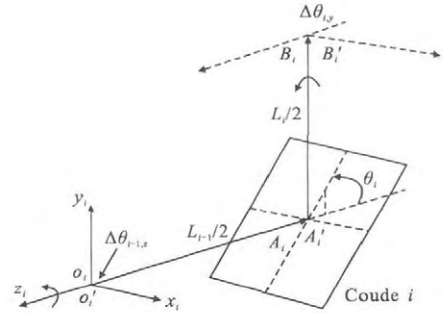


图 10 $\Delta\theta_{i-1,z}$ 对 ΔD_i 的影响

Fig.10 Effect of $\Delta\theta_{i-1,z}$ on ΔD_i

激光出射点、入射点变化量的关系式如下：

$$\begin{cases} \Delta x_i = 0 \\ \Delta y_i = 0 \\ \Delta z_i = 0 \\ \Delta\theta_{i,x} = 0 \\ \Delta\theta_{i,y} = \Delta\theta_{i-1,z} \\ \Delta\theta_{i,z} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

由公式(1)~(6)可得，激光出射点位置及角度的变化如下：

$$\begin{cases} \Delta x_i = \Delta x_{i-1} - (L_{i-1}/2) \cdot \tan \Delta\theta_{i-1,y} - (L_i/2) \cdot \tan \Delta\theta_{i,z} \\ \Delta y_i = 0 \\ \Delta z_i = -\Delta y_{i-1} / \tan \theta_i + L_i' \tan \theta_{i,x} + (L_{i-1}/2 - L_{i-1}' \cos \Delta\theta_{i-1,x}) \\ \Delta\theta_{i,x} = -\Delta\theta_{i-1,x} \\ \Delta\theta_{i,y} = \Delta\theta_{i-1,z} \\ \Delta\theta_{i,z} = \Delta\theta_{i-1,y} \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$L_i' = L_i/2 - L_{i-1}' \sin \Delta\theta_{i-1,x}$$

$$L_{i-1}' = (L_{i-1}/2) \cdot \sin(\theta_i) / \sin(\theta_i - \Delta\theta_{i-1,x})$$

为了便于表述，将上式中关系以传导矩阵 K_i 表示，即：

$$\Delta D_i = K_i \cdot \Delta D_{i-1} \quad (8)$$

结合激光理论光束，通过公式(8)即可在库德镜空间归一化模型中对入射激光进行精确标定。

2.2 整体坐标系下库德镜空间归一化模型

整体坐标系与库德镜子坐标系通过旋坐标变换法可相互转化。如图 11 所示,整体坐标系下的变量可转化到库德镜 i 子坐标系下进行求解。

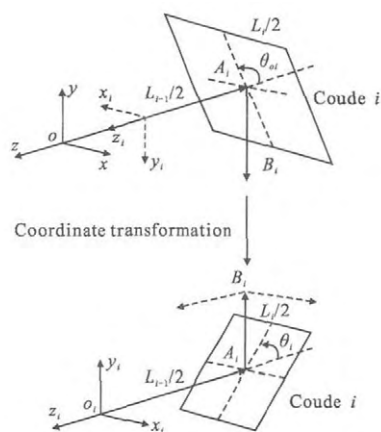


图 11 整体坐标系与子坐标系转化图

Fig.11 Transformation of the overall coordinate system and the sub coordinate system

令整体坐标系下的变量为 x_i^o, y_i^o, z_i^o , 子坐标系下的变量为 x_i, y_i, z_i , T_i 为转换矩阵, 两者转换关系^[5]如下:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = T_i \begin{bmatrix} x_i^o \\ y_i^o \\ z_i^o \end{bmatrix} = T_{xi} \cdot T_{yi} \cdot T_{zi} \cdot \begin{bmatrix} x_i^o \\ y_i^o \\ z_i^o \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 分别为其绕 x 轴、 y 轴、 z 轴逆时针旋转角度。对应的转换矩阵为:

$$T_{xi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & \sin \alpha_i \\ 0 & -\sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{bmatrix}$$

$$T_{yi} = \begin{bmatrix} \cos \beta_i & 0 & -\sin \beta_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta_i & 0 & \cos \beta_i \end{bmatrix}$$

$$T_{zi} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_i & \sin \gamma_i & 0 \\ -\sin \gamma_i & \cos \gamma_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

涉及六个变量转换时, 可将旋转矩阵扩展为:

$$TT_i = \begin{bmatrix} T_{xi} & 0 \\ 0 & T_{yi} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{yi} & 0 \\ 0 & T_{zi} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{zi} & 0 \\ 0 & T_{xi} \end{bmatrix} \quad (10)$$

令整体坐标系下, 激光在入射点 o_i 的变化量为 ΔD_{i-1}^o , 由公式(8)、公式(10)可得激光在出射点 B_i 的变化量为:

$$\Delta D_i^o = TT_i^{-1} \cdot (K_i \cdot (TT_i \cdot \Delta D_{i-1}^o)) \quad (11)$$

2.3 整体坐标系下多个库德镜空间中激光光束标定

假设激光经过 n 块库德镜传导后发射, 令激光源处激光光束变化量为 ΔD_0^o , 由公式(11)可得, 各库德镜空间中激光入射点和出射点变化量关系如下:

$$\begin{cases} \Delta D_i^o = TT_i^{-1} \cdot (K_n \cdot (TT_n \cdot D_{n-1}^o)) \\ \dots\dots \\ \Delta D_2^o = TT_2^{-1} \cdot (K_2 \cdot (TT_2 \cdot D_1^o)) \\ \Delta D_1^o = TT_1^{-1} \cdot (K_1 \cdot (TT_1 \cdot D_0^o)) \end{cases} \quad (12)$$

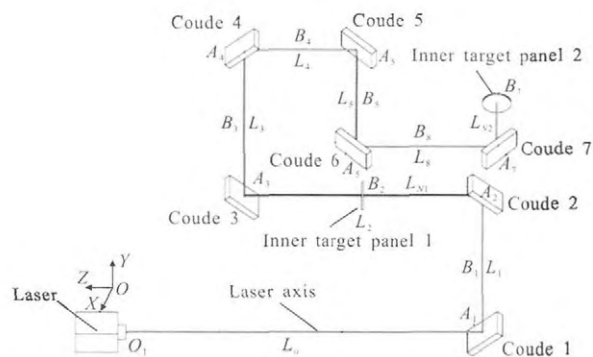
结合理论光束逐个对库德镜空间中的激光光束进行精确标定, 即可完成整个发射系统中激光光束标定。

3 激光与经纬仪高精度对接技术

激光与经纬仪高精度对接技术是在整体坐标系下, 利用激光光束在空间归一化模型中的精确标定理论实现内场分级、外场秒级的激光与经纬仪高效、高精度对接。

3.1 激光与经纬仪的内场粗调对接

内场粗调对接示意图如图 12 所示, 激光器及各库德镜的间距如表 1 所示。



整体坐标系与各库德镜子坐标系的转换角度关系(单位: (°)), 如表 2 所示, Coude i 简称 C_i 。

表 2 各库德镜角度转换参数(单位: (°))

Tab.2 Conversion angle of each Coude mirror

(Unit: (°))

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
α	0	90	0	90	0	-90	0
β	0	0	180	180	0	0	0
γ	0	0	0	0	-90	90	90

在库德镜 2 和库德镜 7 后安装两个靶面: 靶面 N_1 和靶面 N_2 , 间距分别为 $L_{N_1}=425\text{ mm}$, $L_{N_2}=300\text{ mm}$ 。

如图 13 所示, 内场靶面上, o 点为理论激光光斑中心, o' 点为实际激光光斑中心, 靶面 N_1 、靶面 N_2 上脱靶量如表 3 所示。

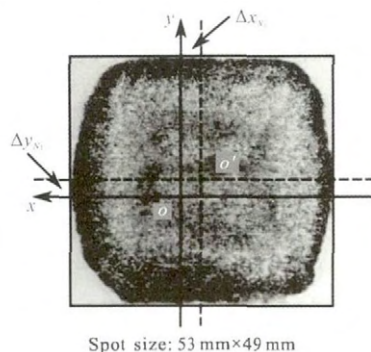


图 13 靶面 N_1 上激光光斑图

Fig.13 Laser spot of the target surface N_1

表 3 内场激光脱靶量(单位: mm)

Tab.3 Miss distance of the inner field laser

(Unit: mm)

Miss distance	Inner target panel 1		Inner target panel 2	
	Δx_{N_1}	Δy_{N_1}	Δy_{N_2}	Δz_{N_2}
Measured value	-3.0	2.8	-4.6	-4.9

令激光源处激光光束的变化量为 $\Delta D_0^o = [\Delta x_0^o \Delta y_0^o \ 0 \ \Delta \theta_{0,x}^o \ \Delta \theta_{0,y}^o \ 0]^T$, z 轴方向上的平移量和转角对实际光斑中心脱靶量无影响, 故不引入两个变量。根据表 3 中脱靶量值, 由公式(12)可反解得到 ΔD_0^o , 如表 4 所示。

表 4 激光光束变化量

Tab.4 Change of the laser beam

Change quantity	$\Delta x_0^o/\text{mm}$	$\Delta y_0^o/\text{mm}$	$\Delta \theta_{0,x}^o/(\text{''})$	$\Delta \theta_{0,y}^o/(\text{''})$
Calculated value	0.42	0.44	-129.1	136.3

粗调对接时, 可将激光源处激光光束变化量调整到平移误差小于 1 mm 和角度误差小于 $2.5'$, 如此既满足外场精调对接的需要, 亦减小弱小误差(如人眼判读、画线精准度等)对激光光束变化量值的影响。

3.1 激光与经纬仪的外场精调对接

外场精调对接时, 根据内场标定的经纬仪位置, 在远场设置两个靶板: 靶板 W_1 、靶板 W_2 , 两者与主镜的间距分别为 $L_{W_1}=500\text{ m}$, $L_{W_2}=1\ 000\text{ m}$, 如图 14 所示。

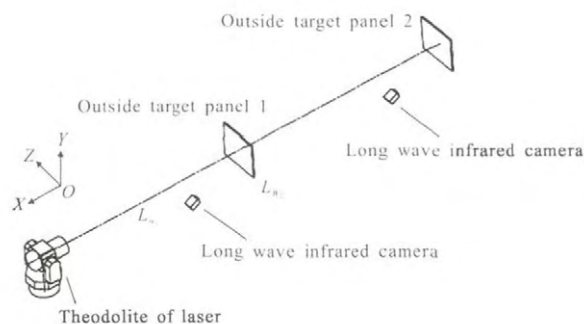


图 14 外场精调对接示意图

Fig.14 Accurate docking of outside field

与内场相似, 通过长波相机读取外场靶板上激光光斑的脱靶量, 如图 15、图 16 所示, 靶板 W_1 、靶板 W_2 上脱靶量如表 5 所示。

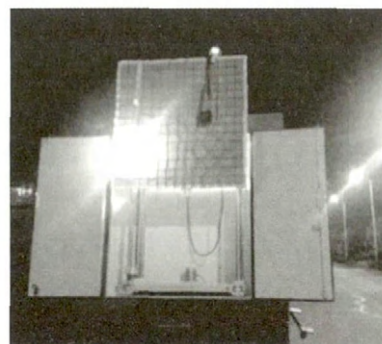


图 15 外场靶板图

Fig.15 Target plate of outside field

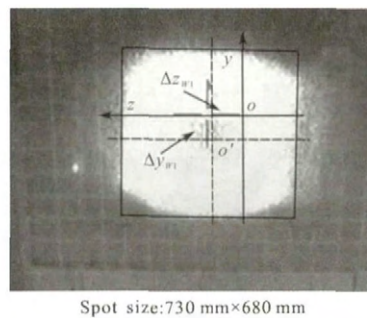


图 16 外场靶板 W_1 上激光光斑位置图

Fig.16 Laser spot of the outside field's target plate W_1

表 5 外场激光脱靶量(单位:mm)

Tab.5 Miss distance of the outside field laser
(Unit: mm)

Miss distance	Inner target panel 1		Inner target panel 2	
	Δy_{w_1}	Δz_{w_1}	Δy_{w_2}	Δz_{w_2}
Measured value	-90	-120	-185	-245

同样由公式(12)可反解得到激光源处激光光束变化量 ΔD_0^o , 将其与实际激光监视值进行对比, 如表 6 所示。

表 6 激光光束变化量及实际监测量对比

Tab.6 Comparison of the change of laser beam and actual value of monitoring

Change quantity	$\Delta x_0^o/\text{mm}$	$\Delta y_0^o/\text{mm}$	$\Delta \theta_{0,x}^o/(\text{''})$	$\Delta \theta_{0,y}^o/(\text{''})$
Calculated value	2.48	1.89	-39.19	51.57
Monitoring value	3.2	2.5	-40.7	50.4

经对比可知, 激光光束变化量与实际激光监测两者平移误差在 1 mm 以内, 角度误差在 2'' 以内, 该技术可实现激光光束的精确定标。

4 结 论

文中针对激光与经纬仪通过库德光路传导激光实现激光光束与经纬仪发射轴高精度对接的机下对接方式, 从理论上提出整体坐标系下的库德镜空间归一化模型; 基于该模型对入射该空间的激光光束进行精确标定; 针对该理论应用, 提出了激光与经纬仪的高精度对接技术; 在长波激光发射系统中运用该技术进行了内场分级、外场秒级的高效精确对接, 求解的激光光束变化量与实际激光监视量对比, 平移误差在 1 mm 以内, 角度误差在 2'' 以内, 可实现激光与经纬仪的高精度对接。

参考文献:

[1] Xue Xiangyao, Gao Yunguo. Correction of laser pointing

error of level mounting laser transmitter system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(3): 536-541. (in Chinese)
薛向尧, 高云国. 水平式激光发射系统指向误差的修正 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(3): 536-541.

[2] Xue Xiangyao, Gao Yunguo, Qiao Jian, et al. Analysis of optical axis parallelism error for the level mounting laser transmitter system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 335-337. (in Chinese)

薛向尧, 高云国, 乔健, 等. 水平式激光发射系统光轴平行度误差分析 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 335-337.

[3] Zhang Limin, Han Xida, Cao Yuyan, et al. Coude light path alignment scheme with spatial mechanism [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0818004. (in Chinese)

张丽敏, 韩西达, 曹玉岩, 等. 基于空间机构学的 Coude 光路装调方法 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(8): 0818004.

[4] Qiao Jian, Gao Yunguo, Han Guangyu, et al. Fast alignment of Coude optical system in alt-alt two axis tracking turntable [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 18(8): 1761-1764. (in Chinese)

乔健, 高云国, 韩光宇, 等. 水平式两轴转台中库德光路的快速装调 [J]. *光学精密工程*, 2011, 18(8): 1761-1764.

[5] Zhang Dongxiao, He Yongqiang, Hu Wengang, et al. Background projection modeling in the self-adaptive infrared stealth system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0304001. (in Chinese)

张冬晓, 何永强, 胡文刚, 等. 自适应红外隐身系统的背景投影建模 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(3): 0304001.

[6] Han Guangyu, Zhang Guoli, Cao Lihua, et al. Opto-mechanical structural design of laser emitting system for SLR [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(7): 1669-1670. (in Chinese)

韩光宇, 张国立, 曹立华, 等. 卫星激光测距中发射光路光机结构设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(7): 1669-1670.

[7] Han Guangyu, Guo Jin. Analysis and realization of day-time ranging of SLR [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(4): 885-890. (in Chinese)

韩光宇, 郭劲. 卫星激光测距中白天测距的分析与实现 [J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(4): 885-890.