

主被动双光复合系统平行度校正研究

刘 飞, 陈秀芬, 李松山, 聂子晨

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要: 针对主被动双光复合系统中存在激光主动发射视场与红外被动成像视场平行度(一一对应位置)偏差问题,提出了主被动双光复合系统平行度校正方法,并开展了理论研究和实物仿真测试。首先,推导了激光主动发射视场与快速反射镜(Fast Steering Mirror, FSM)角度对应关系;其次,根据激光发射视场与红外探测视场提出了一种基于多项式拟合的平行度修正校正方法;最后,通过构建实际测试平台,进行平行度标定、求解、修正。试验结果表明:在 $\pm 1.4^\circ$ 的激光指示视场和 $\pm 1.4^\circ$ 的红外中心视场中,经过系统平行度修正后,实际平行度偏差可由 0.8 mrad 降低至 0.1 mrad,进一步提高激光对目标的指向精度。

关键词: 主被动双光复合系统; 平行度; 多项式拟合

中图分类号: TN209 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210771

Research on the parallelism of the active and passive dual-band (laser/IR) composite system

Liu Fei, Chen Xiufen, Li Songshan, Nie Zichen

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Aiming at the deviation of the parallelism(on to one correspondence position) between the active laser field of view and the infrared passive field of view in the parallelism correction of the active and passive dual-band (laser/IR) composite system, the parallelism correction method of the active and passive dual-band (laser/IR) composite system was proposed and the theoretical research and physical simulation test were carried out. First, derived the angle correspondence between the active laser emission field of view and the fast steering mirror. Secondly, a parallelism correction method based on polynomial fitting is proposed according to the laser emission field of view and infrared detection field of view. Finally, the actual test platform is constructed to calibrate, solve and correct. The test results showed that the actual maximum deviation can be reduced from 0.8 mrad to less than 0.1 mrad in the $\pm 1.4^\circ$ indicated field of view of laser and $\pm 1.4^\circ$ infrared central field of view, which further improve the aiming accuracy of the laser.

Key words: active and passive dual-band (laser/IR) composite system; parallelism; polynomial fitting

收稿日期:2021-10-25; 修订日期:2021-11-24

作者简介:刘飞,男,工程师,硕士,主要研究方向为激光对抗系统总体设计。

0 引言

随着军事需求和光电对抗技术的不断发展,越来越多的光电对抗系统开始应用在机载、弹载、星载等平台上。为了实现敌方光电探测器的有效持续干扰、损伤,该类光电对抗系统需要对目标进行高精度和持续跟踪、瞄准,实现对目标的干扰或破坏^[1-3]。为了实现对运动目标的高精度跟踪或瞄准功能,一般采用复合轴跟踪系统,最早的复合轴跟踪系统发表于 1966 年 Thomas W. 的文章^[4]。传统的复合轴跟踪系统包含双探测器型复合轴系统和单探测器型复合轴系统,其中双探测器型复合轴系统可实现高精度跟瞄(一般可实现几个微弧度跟瞄精度),技术成熟。但其光路设计难度大、体积大等缺点往往限制其在小平台上的应用。单探测器型复合轴系统在跟踪精度方面不如双探测器型复合轴系统,但其具有构成简单、装配难度低、功耗低、稳定性和可靠性高等优点,便于小型化^[5]。

采用单探测器跟踪系统,成像与激光光路分离设计,如图 1 所示。该设计不仅紧凑、轻小,容易满足弹载、机载等平台的装机条件,而且光学设计难度小,可实现多目标跟踪、干扰。由于激光与图像没有采用共光路设计,激光无法跟随红外目标实现图像闭环控制,致使激光跟瞄精度不高;并且激光与成像系统间存在机械安装、光学镜头畸变、两轴平行度、快反镜正交性等多种偏差,导致光轴一致性差。目前,国内外针对多光轴一致性常用测量方法有:离轴抛物镜法,平行光管法,激光光轴仪法,五棱镜法和投影靶板法等^[6-9]。上述方法虽然测量精度高,但是在实际应用过程中,如何在已知测量误差的前提下通过装调保证光轴一致性是亟需要解决的问题。装调方式一般有两种:一种是提高机械结构件的加工精度、辅助测量和微装配,另一种是增加监控手段,实时观测轴系间的变化情况再辅助增加调整机构进行动态调整^[10]。上述方式虽然可实现光轴一致性,但是也存在一些问题,例如对加工精度要求极高,微调的可操作性和稳定性不强,增加系统的复杂性等。

针对上述问题,采用单探测器跟踪系统,成像、激光发射光路分离设计的应用方式其光轴一致性不同

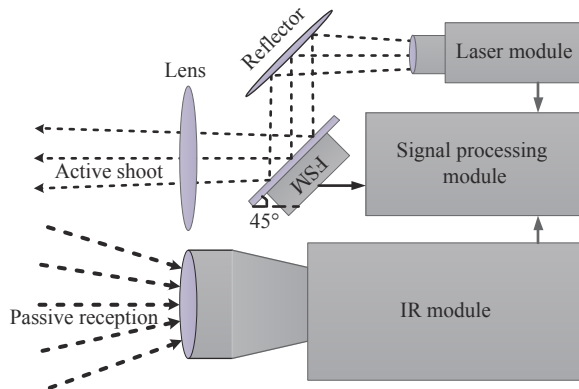


图 1 主被动双光复合系统示意图

Fig.1 Schematic of the active and passive dual-band (laser/IR) composite system

于以往系统,该系统要实现成像、激光多点匹配问题,并不仅仅是中心轴系的一致性,为此设计了一种平行度校正补偿方法,通过试验标定和软件算法校正,使红外成像、激光在相同视场范围内满足平行度小于 0.1 mrad 偏差,从而提升激光对目标的跟瞄精度,该方法对装调精度要求不高且可操作性和稳定性强。

1 基于多项式拟合的平行度修正方法

在成像光路与激光光路分离设计方案中,其工作原理为:通过红外成像系统获取目标位置信息,将目标位置信息与系统姿态信息进行融合处理后控制快反镜(FSM)转动,同时开启激光,激光束随快反镜(FSM)转动快速指向目标位置并持续跟踪,实现对目标光电载荷的精确跟瞄。完成上述过程,需明确以下两个问题:首先是快反镜的空间旋转与成像平面的对应几何关系,其次是快反镜旋转轴与成像多点对应关系。

1.1 目标位置与快反镜旋转角的空间关系

在实际应用过程中,快反镜(FSM)镜面与激光入射方向呈 45° 安装,激光入射光固定,通过 FSM 转动,实现激光光束在空间中的指向,如图 1 所示。

如图 2 所示,建立空间坐标系 $O-XYZ$ 。分别确立 FSM 镜面旋转方位角、旋转俯仰角与出射光线的角度关系,定义 FSM 镜面方位旋转角为 α ,俯仰旋转角为 β ;出射光方位角为 $\theta_{\text{方位}}$,俯仰角为 $\theta_{\text{俯仰}}$ 。

在方位旋转方向上,如图 2(a) 所示, OA 为激光原始入射方向, OE 为激光原始出射方向, OB 为法线,将

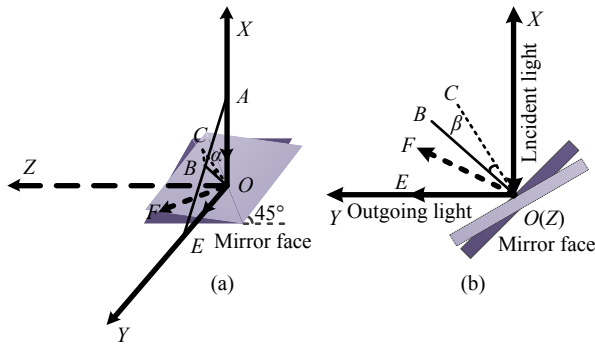


图 2 光线反射与镜面位置关系

Fig.2 Relationship between light reflection and mirror position

快反镜镜面沿着平面 XOY 顺时针旋转角度 α , OF 为旋转后的出射光线, OC 为法线 OB 经旋转后的法线, 即 $\angle BOC$ 为 α 。由于镜面方位旋转后, 出射光 OF 已经不在 ZOY 的方位平面内, 也就是说镜面的方位旋转引起了光线的俯仰运动, 因此为了得到方位角与出射光方位角的关系, 需要将出射光 OF 进行方位方向和俯仰方向投影, 可得 $\angle COF$ 方位投影和 $\angle COF$ 俯仰投影, 关系如下:

$$\angle COF_{\text{俯仰投影}} = \arctan\left(\frac{1 - \cos\alpha}{\cos\alpha}\right) \quad (1)$$

$$\angle COF_{\text{方位投影}} = \arcsin\left(\frac{\sqrt{2} \times \sin\alpha}{\sqrt{1 + \sin^2\alpha}}\right) \quad (2)$$

同理, 在俯仰旋转方向上, 如图 2(b) 所示, 由空间位置关系可知出射光 OF 在 XOY 平面内, 即 $\angle COF = \theta_{\text{俯仰}}$ 。可知出射光俯仰角与 β 的关系:

$$\theta_{\text{俯仰}} = 2\beta \quad (3)$$

综上, 激光出射角与快反镜旋转角的空间位置关系如下:

$$\theta_{\text{方位}} = \arcsin\left(\frac{\sqrt{2} \times \sin\alpha}{\sqrt{1 + \sin^2\alpha}}\right) \quad (4)$$

$$\theta_{\text{俯仰}} = 2\beta + \arctan\left(\frac{1 - \cos\alpha}{\cos\alpha}\right) \quad (5)$$

式中: 激光出射角 $\theta_{\text{方位}}$ 、 $\theta_{\text{俯仰}}$ 即为目标在被动探测系统视场中的方位角和俯仰角, 其值可通过目标识别算法计算得出。 α 、 β 为快反镜输入角度值, 需要根据公式 (4) 和公式 (5) 进行解算。为了保持快反镜高动态特性和激光的指示范围, 快反镜的转角范围设置在 $\pm 1^\circ$ 以内, 即 α 、 β 取值范围为 $-1^\circ \sim +1^\circ$ 。

由公式 (1) 和公式 (2) 可知, 快反镜在进行方位摆动时, 不仅会引起激光的方位方向的改变, 而且也会引起激光俯仰方向的改变。快反镜方位摆动引起激光方位、俯仰变化如图 3 所示。

快反镜在 $-1^\circ \sim +1^\circ$ 范围内进行方位轴摆动时, 不仅引起激光方位角摆动, 而且会引起激光俯仰角摆动。其中激光方位角变化范围为 $-1.414^\circ \sim +1.414^\circ$, 激光俯仰角变化范围为 $152.299 \sim 0 \mu\text{rad}$ 。由图 3 可知, 激光方位角与快反镜方位角间的变化规律可近似为二次曲线, 斜率取值范围基本在 $\sqrt{2}$ 上下浮动。若激光方位角与快反镜方位角以 $\sqrt{2}$ 倍关系近似计算时, 在整个摆动范围内引起的最大误差为 $2.505 \mu\text{rad}$, 其计算结果如表 1 所示。

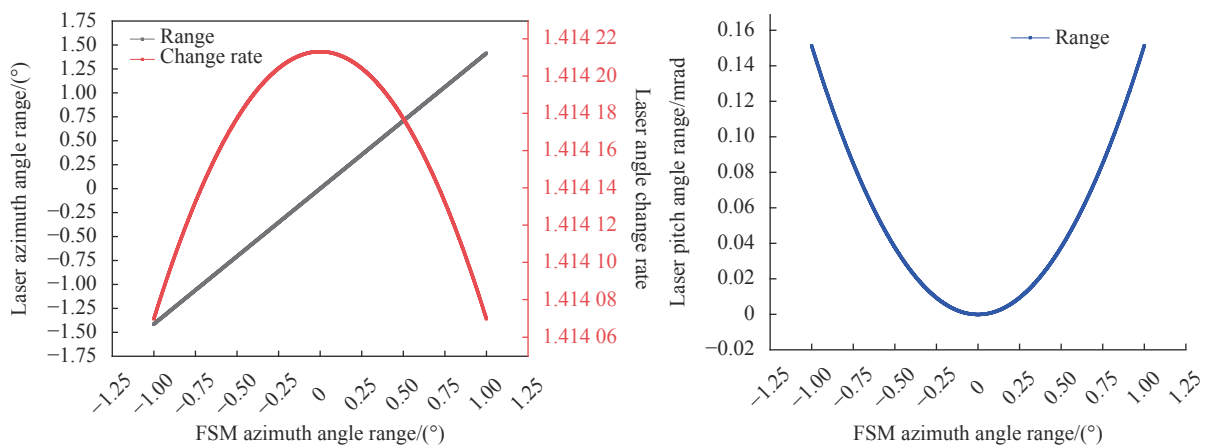


图 3 快反镜方位摆动与激光方位、激光俯仰投影关系

Fig.3 Projection relationship between the azimuth swing of the FSM and the laser azimuth, laser pitch

表 1 快反镜方位摆动引起激光方位、俯仰变化计算结果

Tab.1 Calculation results of the changes in laser azimuth and pitch caused by the azimuth swing of the FSM

FSM azimuth angle/(°)	Laser azimuth angle			Laser pitch angle/μrad
	Theoretical calculation/(°)	Approximate calculation/(°)	Error Δ/μrad	
-1.00	-1.414069	-1.414213	2.505175	152.2993
-0.75	-1.060599	-1.060660	1.056983	85.66360
-0.50	-0.707088	-0.707106	0.313204	38.07120
-0.25	-0.353551	-0.353553	0.039152	9.517574
0.00	0	0	0	0
0.25	0.353551	0.353553	-0.039152	9.517574
0.50	0.707088	0.707106	-0.303204	38.07120
0.75	1.060599	1.060660	-1.056983	85.66360
1.00	1.414069	1.414213	-2.505175	152.2993

实际工程中,为了便于对 α, β 计算,对公式 (4) 和公式 (5) 进行近似处理,即快反镜旋转角(二维)与激光出射角(二维)可近似为公式 (6) 和公式 (7):

$$\alpha = \frac{\sqrt{2}}{2} \theta_{\text{方位}} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \theta_{\text{俯仰}} \quad (7)$$

上述处理过程中引入了一定的计算误差量和旋转增量,将会导致成像、激光光轴对应平行度偏差。其次,在成像光路、激光光路分离设计中,存在成像镜头的光学窗口畸变、快反镜的正交偏差以及传感器安装过程中的机械偏差等因素均会影响成像、激光光轴平行度偏差,上述偏差因素难以精确测量。因此,为了实现激光对目标的高精度指向,上述偏差均需要进行补偿修正。

1.2 多项式拟合校正原理

为了实现上述偏差的补偿修正,需要测量系统中的上述固有偏差。首先在红外视场中心向外均匀选取 N 个点 $(\alpha_i, \beta_i)(i=1, 2, \dots, N)$ 作为快反镜的输入角度值;开启激光光源,快反镜将按照 N 个点的位置摆动;激光束经过反射镜后形成 N 个点源;红外热像仪可通过反射镜观测到 49 激光光斑,并计算出激光光斑的实际位置 $(\alpha'_i, \beta'_i)(i=1, 2, \dots, N)$ 。基于上述 (α_i, β_i) 和 (α'_i, β'_i) 两组数据进行公式 (8) 和公式 (9) 的计算,采用 4 阶多项式最小二乘法拟合,可计算出系数 $k_0 \sim k_{29}$ 值。

$$\alpha'_i = k_0\beta_i^4 + k_1\beta_i^3\alpha_i + k_2\beta_i^2\alpha_i^2 + k_3\beta_i\alpha_i^3 + k_4\alpha_i^4 + k_5\beta_i^3 + k_6\beta_i^2\alpha_i + k_7\beta_i\alpha_i^2 + k_8\alpha_i^3 + k_9\beta_i^2 + k_{10}\beta_i\alpha_i + k_{11}\alpha_i^2 + k_{12}\beta_i + k_{13}\alpha_i + k_{14} \quad (8)$$

$$\beta'_i = k_{15}\beta_i^4 + k_{16}\beta_i^3\alpha_i + k_{17}\beta_i^2\alpha_i^2 + k_{18}\beta_i\alpha_i^3 + k_{19}\alpha_i^4 + k_{20}\beta_i^3 + k_{21}\beta_i^2\alpha_i + k_{22}\beta_i\alpha_i^2 + k_{23}\alpha_i^3 + k_{24}\beta_i^2 + k_{25}\beta_i\alpha_i + k_{26}\alpha_i^2 + k_{27}\beta_i + k_{28}\alpha_i + k_{29} \quad (9)$$

公式 (8)、(9) 写成矩阵形式,即:

$$A'B' = \begin{pmatrix} \alpha'_i & \beta'_i \\ \vdots & \vdots \\ \alpha'_1 & \beta'_1 \\ \alpha'_0 & \beta'_0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$H = \begin{pmatrix} \beta_i^4 & \beta_i^3\alpha_i & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \beta_1^4 & \beta_1^3\alpha_1 & \dots & 1 \\ \beta_0^4 & \beta_0^3\alpha_0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$K = \begin{pmatrix} k_0 & k_{15} \\ \vdots & \vdots \\ k_{13} & k_{28} \\ k_{14} & k_{29} \end{pmatrix} \quad (12)$$

公式 (10)~(12) 可写成:

$$A'B' = H \times K \quad (13)$$

由公式 (13) 可得系数矩阵 K :

$$K = (H)^{-1}A'B' \quad (14)$$

式中: 系数矩阵 K 即代表了系统中红外给定位置量与激光实际指向位置量的对应关系, 属于系统固有属性, 为有效改善该种对应关系, 使红外给定位置量与激光实际指向位置量一一对应, 实际计算中系数矩阵以 K^{-1} 参与计算。因此, 可得如下计算关系:

$$AB = H \times K^{-1} \quad (15)$$

式中: 矩阵 H 中的 (α_i, β_i) 需满足公式 (6) 和公式 (7)

的关系, 矩阵 AB 即为快反镜的位置给定值。

2 平行度测试及校正

2.1 平行度测试过程

平行度测试平台如图 4 所示, 主要包含被测设备 (凝视热像仪、快反镜、激光源等)、离轴反射镜、激光靶面、显控计算机、目标识别器、指令操控台、光学平台及安装组件等。

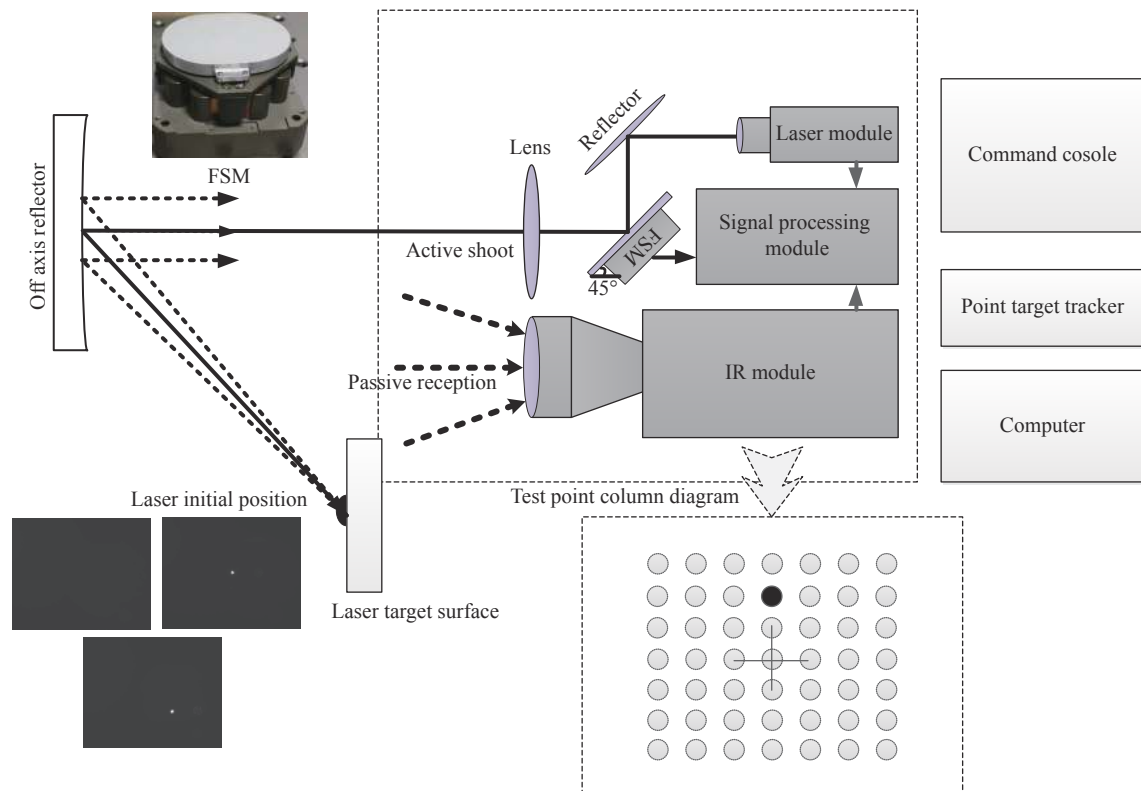


图 4 平行度测试原理图

Fig.4 Schematic diagram of the parallelism test

被测设备中, 凝视红外视场角为 $8^\circ \times 10^\circ$, 瞬时视场角为 0.5 mrad ; FSM 机械偏转角为 $\pm 1^\circ$, 角度分辨率为 $15 \mu\text{rad}$, 激光发散角为 0.5 mrad ; 红外与激光中心间距为 80 mm (由于实际应用过程中目标在几公里以外, 中心偏差产生的误差可不考虑)。离轴反射镜焦距为 2 m , 口径 250 mm ; 激光与红外波段相同。

首先, 将红外中心视场进行网格划分, 取与激光偏摆视场范围内的若干个点, 作为激光偏摆的基准点。然后, 将被测系统放置光学平台上, 在前方放置离轴反射镜, 在离轴反射镜的焦点上放置靶面或靶板。被测系统开机, 开启激光并给 FSM 加电驱动, 由

于快反镜上电后自行进入零位, 激光经快反镜反射后也即保持在零位, 该零位依靠结构精度保持与红外中心一致, 如图 5 所示。在红外相机输出的图像上可观测到靶板上的激光束光斑, 点目标识别器采用质心处理算法对光斑在红外视场中的位置计算, 可知激光束零点位置与红外视场中心位置偏差量。同理, 激光束按照在红外视场上确定的 49 个基准点, 依靠 FSM 进行方位、俯仰的偏摆, 形成多个激光束位置, 每偏摆到一个位置, 点目标识别器即可计算出当前激光束的在红外视场中的位置, 每个基准点位置与实际位置偏差即为平行度偏差。测量结果如表 2 所示。

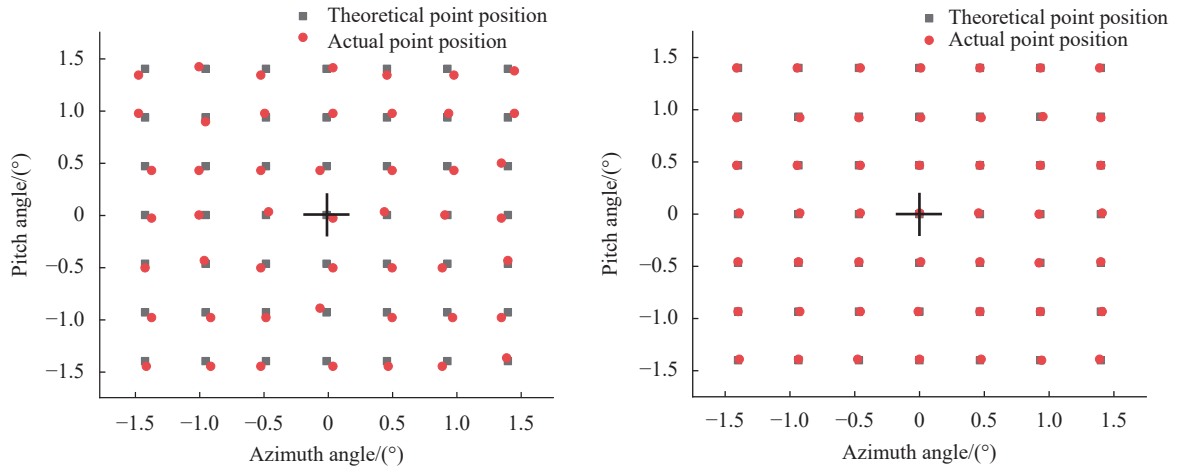


图 5 平行度校正前、后给定值与测量值对比图

Fig.5 Comparison chart of the given values and measured values before and after parallelism correction

表 2 测试数据记录表

Tab.2 Record form of the test data

Number	Theoretical setting value		Actual measured value	
	Azimuth/(°)	Pitch/(°)	Azimuth/(°)	Pitch/(°)
1	-1.4000	1.4000	-1.4537	1.3453
2	-1.4000	0.9333	-1.4535	0.9733
3	-1.4000	0.4667	-1.3556	0.4267
4	-1.4000	0	-1.3562	-0.0362
5	-1.4000	-0.4667	-1.4053	-0.5067
6	-1.4000	-0.9333	-1.3536	-0.9833
7	-1.4000	-1.4000	-1.3934	-1.4532
8	-0.9333	1.4000	-0.9833	1.4263
9	-0.9333	0.9333	-0.9333	0.8933
10	-0.9333	0.4667	-0.9833	0.4267
11	-0.9333	0	-0.9833	0.0243
12	-0.9333	-0.4667	-0.9433	-0.4367
13	-0.9333	-0.9333	-0.8933	-0.9835
14	-0.9333	-1.4000	-0.8933	-1.4521
15	-0.4667	1.4000	-0.5067	1.3421
16	-0.4667	0.9333	-0.4767	0.9744
17	-0.4667	0.4667	-0.5069	0.4267
18	-0.4667	0	-0.4452	0.0021
19	-0.4667	-0.4667	-0.5049	-0.5062
20	-0.4667	-0.9333	-0.4665	-0.9833
21	-0.4667	-1.4000	-0.5024	-1.4520
22	0	1.4000	0.0521	1.4150
23	0	0.9333	0.0213	0.9733

续表 2
Continued Tab.2

Number	Theoretical setting value		Actual measured value	
	Azimuth/(°)	Pitch/(°)	Azimuth/(°)	Pitch/(°)
24	0	0.466 7	0.018 9	0.426 7
25	0	0	0.023 8	-0.032 1
26	0	-0.466 7	0.045 7	-0.506 4
27	0	-0.933 3	0.056 2	-0.893 3
28	0	-1.400 0	0.028 6	-1.456 9
29	0.466 7	1.400 0	0.466 7	1.349 8
30	0.466 7	0.933 3	0.506 2	0.973 3
31	0.466 7	0.466 7	0.405 2	0.426 7
32	0.466 7	0	0.446 2	0.024 5
33	0.466 7	-0.466 7	0.508 9	-0.506 7
34	0.466 7	-0.933 3	0.501 1	-0.981 1
35	0.466 7	-1.400 0	0.476 7	-1.450 2
36	0.933 3	1.400 0	0.983 4	1.348 8
37	0.933 3	0.933 3	0.945 6	0.934 4
38	0.933 3	0.466 7	0.912 0	0.426 1
39	0.933 3	0	0.913 3	0.043 0
40	0.933 3	-0.466 7	0.895 8	-0.504 3
41	0.933 3	-0.933 3	0.972 6	-0.972 5
42	0.933 3	-1.400 0	0.964 3	-1.450 1
43	1.400 0	1.400 0	1.422 2	1.386 2
44	1.400 0	0.933 3	1.422 0	0.973 4
45	1.400 0	0.466 7	1.450 1	0.496 2
46	1.400 0	0	1.449 8	0.032 1
47	1.400 0	-0.466 7	1.446 0	-0.439 1
48	1.400 0	-0.933 3	1.450 8	-0.988 2
49	1.400 0	-1.400 0	1.399 4	-1.396 8

2.2 平行度校正结果

根据测试平台得到的标定值和测量值,可计算出修正系数 k_i 。在红外给定目标设置值时,利用 4 阶多项式校正公式对设定值进行修正,再输出给 FSM 执行。按照上述测试流程进行再次测量,可形成前、后的对比测试结果,如图 5 所示。从图中可以直观的看出经过校正后,给定值与测量值基本重合,即可实现激光与红外对应位置的一一对应。

为了定量分析校正前、后激光与红外的平行度偏差,可采用公式 (16) 进行评价,其中 δ 为平行度偏差,表示为:

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{i=n} \sqrt{(\alpha'_i - \alpha_i)^2 + (\beta'_i - \beta_i)^2} \quad (16)$$

平行度修正前,激光与红外的平行度偏差为 0.86 mrad;修正后,平行度偏差为 0.09 mrad,平行度偏差性能提升了 9 倍多。

3 结 论

文中对主被动双光复合系统光轴平行度校正方法进行了理论和实验分析。针对近似计算产生的误差、红外与激光间的机械安装误差以及红外成像器的

光学畸变偏差等误差因素,提出了多项式拟合的修正补偿方法。与传统的单纯靠机械结构来保障双光视场对应关系相比,该方式不仅具有精度高、便于操作等优点,还可以有效的消除传感器自身因素引起的各种偏差,而且在实际应用过程中稳定性很强。通过试验标定获取修正偏差,计算出多项式拟合函数的修正系数,试验结果表明修正补偿前、后平行度偏差性能提升 9 倍多。按上述方法校正修正后,主被动双光复合系统可实现激光对目标光电载荷的精确指向,从而进一步压缩激光出射发散角,提升激光干扰距离和干扰效果。

参考文献:

- [1] Zhang Hongyan, Xu Jin, Li Yanjun, et al. Application and analysis of the tactical laser weapon [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(3): 204-207. (in Chinese)
- [2] Wang Jingtao, Zou Jie. Study on concept of missile defense using airborne directed energy weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 37(S2): 365-370. (in Chinese)
- [3] Yang Songtao, He Liqing. Some problems of the design of compound-axis servomechanism using single detector [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(4): 457-462. (in Chinese)
- [4] Barnard T W, Fencil C R. Digital laser ranging and tracking using a compound axis servomechanism [J]. *Applied Optics*, 1966, 5(4): 497-505.
- [5] Yang Xiulin, Lu Peiqiang, Liu Xiaoqiang, et al. Simulation and analysis of the composite axis track control system for shipborne laser weapon [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(8): 943-947. (in Chinese)
- [6] Li Jianhua, Li Zhifeng, Niu Zhenhong, et al. A distortion correction method for large field-of-view star sensor [J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2017, 1: 103-106. (in Chinese)
- [7] Wang Pei, Li Yanjun, Tian Jin. Simulation system and analysis of airborne laser weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1238-1242. (in Chinese)
- [8] Wang Weibing, Jiang Zhenhua, Wang Tingfeng, et al. Op-to-electrical compound axis tracking control technology on satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4133-4139. (in Chinese)
- [9] Lan Shuo, Li Xinnan, Wu Chunfeng, et al. Analysis on thermal performance of fast steering mirror irradiated by high power CW laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1020003. (in Chinese)
- [10] Chen Jian, Wang Weiguang, Liu Tingxia, et al. The operational principle analysis of new airborne Electro-Optical Targeting System (EOTS) of US army [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(6): 777-781. (in Chinese)