

文章编号 1004-924X(2016)06-1399-08

# 机动车载快速反射镜激光指向修正量的解算

王鹤淇<sup>1</sup>, 王伟国<sup>1</sup>, 徐新行<sup>1,2</sup>, 刘廷霞<sup>1</sup>, 彭树萍<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. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:** 为了提高机动车载跟瞄发射系统的瞄准精度, 提出在其发射光路中引入快速反射镜来修正发射激光的方向。研究了快速反射镜激光指向修正量和粗红外跟踪脱靶量以及反射镜空间实时绝对角度的关系, 结合激光发射光路和红外跟踪光路的结构特点, 提出了将船摇坐标变换理论应用到快速反射镜激光指向修正量的解算中。建立了快速反射镜激光指向修正量与粗红外跟踪、快速反射镜空间位置的关系, 并通过 MATLAB 编写了 M 函数, 建立了 SIMLINK 仿真模型。基于仿真模型得出了激光指向修正量与快速反射镜转角的关系数据以及在快速反射镜工作范围( $\pm 6'$ )内的简化公式。试验结果表明: 该解算算法正确, 解算精度较高, 最大静态解算误差为  $2.9''$ ; 载车在三级公路上以  $20 \text{ km/h}$  的速度跑车时, 激光指向的控制精度为方位角  $11.65''$ 、俯仰角  $15.38''$ , 均满足项目指标要求。

**关键词:** 跟瞄系统; 快速反射镜; 激光指向; 修正量; 船摇坐标变换;

**中图分类号:** TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162406.1399

## Solution of correcting values on laser beam directing of fast steering mirror for mobile vehicle

WANG He-qi<sup>1</sup>, WANG Wei-guo<sup>1</sup>, XU Xin-hang<sup>1,2</sup>, LIU Ting-xia<sup>1</sup>, PENG Shu-ping<sup>1</sup>

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

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: liutingxia2001@sohu.com*

**Abstract:** To improve the tracking and pointing accuracy of the laser shoot system for a mobile vehicle, a two-dimensional fast steering mirror was induced to the shooting system to correct the direction of laser beam. The relationship between the correction values of laser beam pointing of the fast steering mirror and the miss value of laser tracking as well absolute angles of the mirror in space was investigated. On the basis of the characteristics of laser shoot system and infrared tracking system, the ship-swaying coordinate transformation theory was applied to solution of the correcting values of the laser beam directing and the MATLAB was used to write the M-function and establish the SIMLINK model. The simulated result educes the related data between the laser direction correction value and the fast-reflector angle and a simple formula in the  $\pm 6'$  working range of the fast steering mirror. The

收稿日期: 2015-08-20; 修订日期: 2015-09-27.

基金项目: 吉林省自然科学基金资助项目 (No. 201115123); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2011AA7031024G)

experiment results indicate that arithmetic solution is correct, and the max static state error is  $2.9''$ , showing a higher precision. This arithmetic solution has been applied to control of the laser directing of the mobile armored car weapon equipment and its dynamic precision is the azimuth angle of  $11.65''$ , the pitch angle of  $15.38''$ , which satisfies the project needs.

**Key words:** tracking and pointing system; fast steering mirror; laser directing; correcting value; ship-swaying coordinate conversion

## 1 引言

随着光电对抗技术的飞速发展, 装载于机动车辆等移动平台上的光电跟瞄发射设备越来越多, 且要求其具备行进中瞄准与干扰等能力, 即要求跟瞄发射设备在高振动、冲击等恶劣的工作环境下能够保持较高的激光指向精度, 从而为有效干扰或毁伤目标奠定基础。跟瞄发射设备采用陀螺数字自稳定技术实现动平台下的高精度跟踪, 从控制原理上可以完全消除振动的影响。但考虑到设备的工作条件恶劣, 且要求系统的瞄准精度达到  $30''$ , 单纯依靠经纬仪自身无法实现。因此在激光发射光路中增加了快速反射镜 (Fast Steering Mirror, FSM)<sup>[1-4]</sup>, 根据红外跟踪脱靶量和 FSM 的空间位置实时校正光路, 即使在瞬时加速度过载的情况下, 粗红外跟踪偏差达到  $1 \sim 3'$  以上, 大于激光的发射要求时, 依然能够实现对目标的高精度瞄准。

本文涉及的光电跟瞄发射设备中 FSM 与红外接收光路构成非共口径高精度复合轴激光控制系统<sup>[5-9]</sup>; FSM 根据红外跟踪的脱靶量 (即主系统跟踪误差) 进行数引跟踪, 实现发射激光对目标的高精度瞄准, FSM 的闭环误差即系统的瞄准精度。FSM 的实时修正量与红外主跟踪的目标脱靶量、FSM 的空间实时绝对位置有关, 本文详细研究了以上三者关系, 结合激光发射光路与红外接收光路的结构特点, 将船摇坐标变换理论<sup>[10]</sup>应用到 FSM 控制量的解算中, 建立了 FSM 的二维控制量与发射激光指向、FSM 空间位置之间的关系算法, 并通过等效的高精度复合轴控制实现了光电跟瞄发射设备精确的激光指向。

## 2 快速反射镜激光指向控制原理

为了避免发射激光对红外跟踪成像系统的影

响, 光电跟瞄发射系统采用激光发射轴和红外跟踪轴同轴但不共口径方式, 实物如图 1 所示。红外跟踪轴用来对目标进行捕获并实现粗跟踪, 发射轴用来对目标精确瞄准并发射激光对目标进行干扰, 两者构成非共口径复合轴。

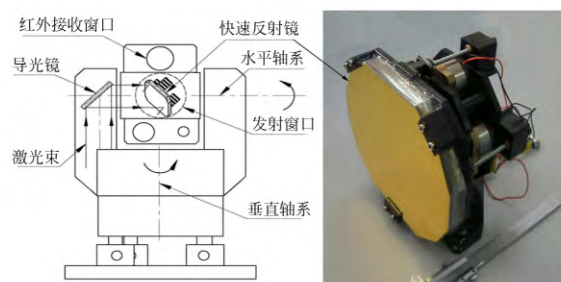


图 1 光电跟瞄发射系统的结构组成及 FSM 的实物照片

Fig. 1 Configuration chart of laser shoot and photograph of FSM

激光束通过库德光路及 FSM 导入转台的发射窗口, 并通过 FSM 对发射激光的传播方向进行快速实时修正。由于红外跟踪的脱靶量值反应了激光光束偏离目标误差值, 因此, 该误差值即为 FSM 的调节依据。

图 2 所示为 FSM 控制激光指向的复合轴伺服控制单元原理图, 激光发射光路中的 FSM 与红外跟踪系统构成等效的非共口径激光复合轴控制, 进而实现激光指向的高精度瞄准。激光指向误差主要由红外跟踪误差和机动载车颠簸引起 FSM 的振动, FSM 系统采用位置和速度双闭环控制, FSM 控制量 (即激光指向的修正量) 的解算是该复合轴控制的关键。

## 3 快速反射镜控制量解算原理

### 3.1 坐标系的建立

(1) 大地坐标系  $(X_g, Y_g, Z_g)$

大地坐标系  $O-X_g Y_g Z_g$ : 表示载体行进中所在

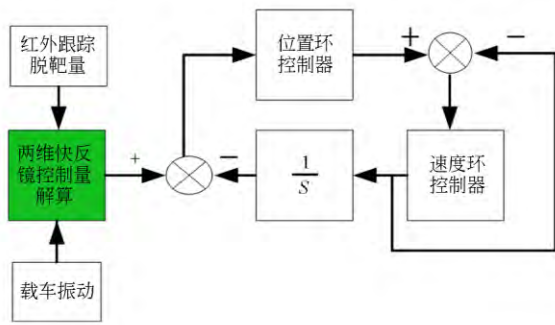


图 2 激光指向控制原理图

Fig. 2 Basic diagram of laser point

位置的东向、北向和垂线方向的坐标系。一般原点  $O$  是载体重心在地球表面上的投影,  $X_g$ 、 $Y_g$  轴位于当地水平面内,  $X_g$  轴指向东,  $Y_g$  轴指向北,  $Z_g$  轴沿当地地理垂线向上。

(2) 甲板坐标系 ( $X_c, Y_c, Z_c$ )

甲板坐标系  $O-X_c Y_c Z_c$ : 是固连在甲板上的坐标系。坐标原点  $O$  位于甲板的重心处,  $X_c$  轴沿甲板横轴指向右,  $Y_c$  轴沿甲板纵轴指向载体前端,  $Z_c$  轴垂直于  $X_c$ 、 $Y_c$  轴, 构成右手坐标系。甲板相对于大地坐标系的转角就是载体的姿态角, 即航向值  $H$ 、纵摇值  $P$ 、横滚值  $R$ , 两者的关系如图 3 所示, 在 3 个方向姿态角都为 0 时,  $g$  系与  $c$  系重合; 当惯导具有偏航角  $H$ 、俯仰角  $P$  和横滚角  $R$  时, 将  $g$  系依次绕  $O-Z_g$  轴旋转  $H$  角、绕  $O-$

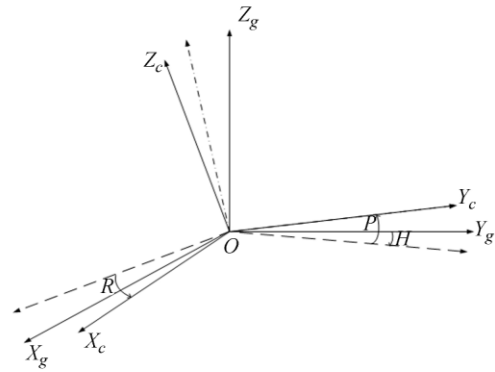


图 3 大地坐标与甲板坐标系的关系

Fig. 3 Relation of geodetic coordinates and the hull coordinates

$X_g$  轴旋转  $P$  角、绕  $O-Y_g$  轴旋转  $R$  角, 即得  $c$  系。

(3) 坐标系与视轴关系的建立

安装在船体甲板上的光电设备随着船体的横摇、纵摇和艏摇运动, 设备的视轴也会产生摆动, 船体摇摆对仪器视轴的干扰是一个复杂的超越函数。引导信息给出的是目标的大地极坐标位置信息  $A$  和  $E$ , 船摇的位置干扰可以通过船摇坐标变换来解决, 即把目标的大地极坐标位置转换为在甲板极坐标位置, 然后在甲板坐标内以目标的甲板极坐标位置为跟踪伺服系统的输入量, 来控制光电设备跟踪目标<sup>[10-11]</sup>。

大地到甲板的坐标转换公式为:

$$\begin{cases} u1x = \cos(E) * (\cos(R) * \sin(A-H) + \sin(R) * \sin(P) * \cos(A-H)) - \sin(E) * \sin(R) * \cos(P) \\ u1y = \cos(E) * \cos(P) * \cos(A-H) + \sin(E) * \sin(P) \\ u1z = \cos(E) * (\sin(R) * \sin(A-H) - \cos(R) * \sin(P) * \cos(A-H)) + \sin(E) * \cos(R) * \cos(P) \\ R_1 = \sqrt{(u1x^2 + u1y^2 + u1z^2)} \\ A_c = \text{atan}(\frac{u1x}{u1y}) \\ E_c = \text{asin}(\frac{u1z}{R_2}) \end{cases} \quad (1)$$

甲板到大地的坐标转换公式为:

$$\begin{cases} u2x = \sin(E_c) * (\sin(R) + \cos(E_c) * \cos(E_c) * \cos(R) * \sin(A_c - H)) \\ u2y = \cos(E_c) * (\cos(P) * \cos(A_c - H) + \sin(P) * \sin(R) * \sin(A_c - H)) - \sin(E_c) * \sin(P) * \cos(R) \\ u2z = \cos(E_c) * (\sin(P) * \cos(A_c - H) - \cos(P) * \sin(R) * \sin(A_c - H)) + \sin(E_c) * \cos(P) * \cos(R) \\ R_2 = \sqrt{(u2x^2 + u2y^2 + u2z^2)} \\ A = \text{atan}(\frac{u2x}{u2y}) \\ E = \text{asin}(\frac{u2z}{R_2}) \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $P$  为纵摇,  $R$  为横摇,  $H$  为艏摇;  $A, E$  为目标的大地极坐标,  $A_c, E_c$  为目标的甲板极坐标;  $u1x, u1y, u1z$  为目标的甲板直角坐标,  $u2x, u2y, u2z$  为目标的大地直角坐标。

### 3.2 激光指向与 FSM 控制量关系的建立

图 4 所示为激光指向与 FSM 空间位置及其两轴的关系图。FSM 坐标系的建立:

(1) 把 FSM 看成船体甲板, 在 FSM 上建立甲板坐标系, 甲板坐标系是固连在 FSM 上的坐标系, FSM 初始位置与激光方向  $45^\circ$  放置, 激光出射光束轴线看成光电设备的视轴。

(2) 坐标原点  $O$  为激光入射光束轴线与 FSM 法线的交点, 如图 4 所示,  $X_c$  轴沿 FSM  $45^\circ$  方向指向前端,  $Y_c$  轴沿 FSM 横向指向右,  $Z_c$  轴垂直  $X_c, Y_c$  轴, 构成右手坐标系。

(3) 根据 3.1 节 FSM 绕  $O-Y_g$  轴方向的旋转角, 定义为甲板坐标系姿态角的纵摇值  $P$ , FSM 绕  $O-X_g$  轴方向的旋转角, 定义为甲板坐标系姿态角的横滚角  $R$ , 对于 FSM 只能纵向和横向两个方向旋转, 所以定义航向角  $H=0$ 。

(4) FSM 与激光方向  $45^\circ$  安装, 所以激光光束偏离中心的误差是 FSM 偏离  $45^\circ$  零位的角度值, FSM 绕  $O-X_c$  的转角为 FSM 的方位转角  $\Delta A_f$ , 绕  $O-Y_c$  的转角为 FSM 的俯仰转角  $\Delta E_f$ 。因此, 通过控制 FSM 的旋转轴  $O-X_c$  和  $O-Y_c$ , 即可对激光指向进行实时控制。

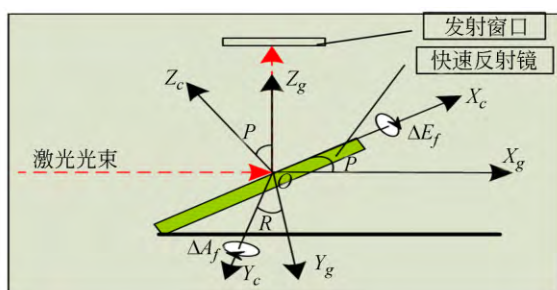


图 4 FSM 坐标系关系图

Fig. 4 Coordinate system relation of FSM

由以上建立的坐标关系可知, FSM 控制量和激光指向是以 FSM  $45^\circ$  为初始位置的, FSM 控制量  $\Delta A_f, \Delta E_f$  与激光光束指向和 FSM 空间实时绝对角度  $P, R$  有关, 通过船摇坐标转换理论建立它们之间的关系。

(1) 第一次坐标转换, 大地坐标到甲板坐标的

转换, 激光光束投射到  $45^\circ$  FSM 上。根据式(1), 假设激光光束瞄准大地坐标系下  $A=0^\circ, E=0^\circ$  的目标, 根据 FSM 安装结构特点取  $P=45^\circ + \Delta E_f$ ,  $R=\Delta A_f, H=0$  即 FSM 的空间绝对位置, 带入式(1)进行第一次坐标转换, 求出  $u1z, u1y, u1x$ , 即激光光束入射到  $45^\circ$  的反射镜上, 目标的甲板直角坐标值。根据光反射原理, 激光光束通过 FSM 反射出去, 所以  $u1x = -u1x, u1y = -u1y, u1z = -u1z$ , 这时根据式(1)中的  $A_c = \text{atan}(\frac{u1x}{u1y}), E_c = \text{asin}(\frac{u1z}{R_2})$  求出甲板坐标系下激光瞄准目标的极坐标值;

(2) 第二次坐标转换, 甲板到大地坐标转换, 建立激光入射光与反射光的关系。根据式(2), 把步骤(1)求出的  $A_c, E_c$  和  $P=45^\circ + \Delta E_f, R=\Delta A_f$ , 带入式(2)求出出射激光瞄准目标的大地极坐标值  $A', E'$ ;

(3) 第三次坐标转换, 甲板到大地坐标转换, 求出激光光束与 FSM 的关系。将式(2)中求出的  $A', E'$  和  $P=90, R=0, H=0$  带入式(2)中求出激光指向的变化量  $\Delta A_f, \Delta E_f$ , 至此建立了 FSM 控制量  $\Delta A_f, \Delta E_f$  与激光光束指向  $\Delta A_j, \Delta E_j$  和 FSM 空间实时绝对角度关系。

### 3.3 仿真模型的建立

根据 3.2 节中的算法编写 S 函数, 用 MATLAB 编程语言编写的 S 函数通常称之为 M 文件 S 函数。在 M 文件 S 函数中, 对 S 函数子函数的调用是通过 M 文件子函数实现的。MATLAB 提供了 S 函数 M 文件的标准模版, 使得开发效率大大提高, 开发 S 函数的可靠性显著增强。S 函数一旦被正确地嵌入位于 SIMULINK 标准模块库中的 S-Function 框架模块中, 它就象其它 SIMULINK 标准模块一样, 与 SIMULINK 的方程解算器 Solver 交互、实现其功能<sup>[12]</sup>。SIMULINK 仿真模型如图 5 所示。

根据解算算法定义一个 4 输入、2 输出的 S 函数模块 Model 实现仿真模型的建立, 通过 MUX 模块把四个输入量送入 S 函数建模模块, 这 4 个输入量为: 横倾角  $R$  (FSM 偏离零位的方位角  $\Delta A_f$ )、纵摇角 (FSM 偏离零位的俯仰角  $\Delta E_f$ )、激光瞄准的目标方位角  $A$ 、激光瞄准目标俯仰角  $E$ ; 2 个输出量为: 激光指向偏离中心方位

值  $\Delta A_j$ 、激光指向偏离中心俯仰值  $\Delta E_j$ 。仿真数据如表 1 所示。

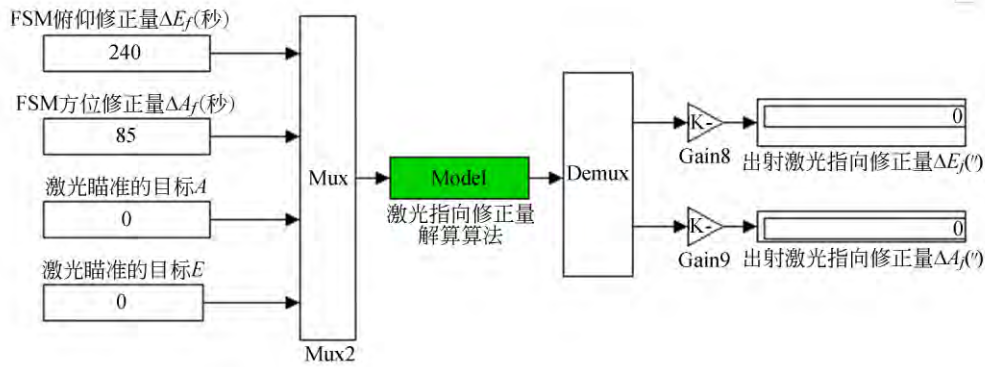


图 5 SIMULINK 仿真模型

Fig. 5 SIMULINK model

表 1 仿真数据

Tab. 1 Simulation data

FSM 方位角 $\Delta E_f(^{\circ})$	FSM 俯仰角 $\Delta A_f(^{\circ})$	激光指向变化量 $\Delta E_j(^{\circ})$	激光指向变化量 $\Delta A_j(^{\circ})$	$\sqrt{2}\Delta E_f$ 比较误差( $''$ )	$2\Delta A_f$ 比较误差( $''$ )
1	0	1.414 32	0.000 29	0.006 25	0.017 45
5	0	7.071 58	0.007 27	0.030 95	0.436 36
6	0	8.485 89	0.010 47	0.036 98	0.628 36
10	0	14.143 1	0.0290 9	0.0601 1	1.7454 5
15	0	21.213 2	0.0654 5	0.0856 8	3.9272 6
20	0	28.286 0	0.1163 6	0.1058 6	6.9817 5
0	1	0	2.000 15	0	0.008 84
0	5	0	10.000 74	0	0.044 196
0	10	0	20.001 47	0	0.088 40
0	15	0	30.002 21	0	0.132 59
0	20	0	40.002 95	0	0.176 78
5	5	7.081 89	9.993 44	0.649 411	0.393 43
6	6	8.500 74	11.990 37	0.927 95	0.577 53
7	7	9.920 43	13.986 72	1.256 17	0.796 88
1	5	1.414 21	10.000 44	0.129 94	0.026 691
5	1	7.073 64	1.992 87	0.154 43	0.427 78
5	10	7.092 24	19.994 16	1.270 57	0.350 52
10	5	14.163 75	9.971 56	1.297 02	1.706 34
1	15	1.420 53	30.001 91	0.378 95	0.114 98
20	20	-28.452 034	39.885 22	10.065 88	6.886 68

由仿真结果可知,在 FSM 工作范围  $\pm 6'$  以内,FSM 两轴耦合可以忽略,所以 FSM 的控制量与激光指向的关系可简化为式(3),两者误差见表 1 仿真数据,最大误差值在 FSM 的方位方向为  $0.927\ 95''$ ,在工程误差要求范围内可表示为:

$$\begin{cases} \Delta A_f = \frac{\Delta A_j}{2} \\ \Delta E_f = \frac{\Delta E_j}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (3)$$

对于快速反镜工作范围大于  $6'$  时,快速反镜两轴耦合很显著,误差最小值大于  $1'$ ,需要采用坐标转换建立的模型计算。



## 4 试 验

为验证 FSM 控制量与激光指向关系解算算法的正确性,进行了静态和动态试验验证。

### 4.1 静态试验

静态试验原理如图 6 所示。

通过控制 FSM 转动,靶板上指示激光光斑

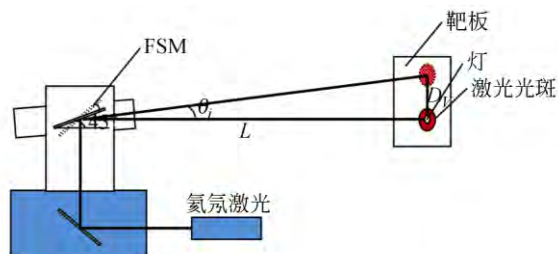


图 6 静态试验原理图

Fig. 6 Schematic diagram of static test

随之移动的距离与激光光束转动的角度关系如图 6 所示,静态试验具体方法如下:

(1) 在转台激光入口处安装一氦氖指示激光器,波长为  $0.6328\ \mu\text{m}$ ,调整该指示激光与发射激光同轴;

(2) 在距离转台  $L=500\ \text{m}$  处立一靶板,靶板上安装一指示目标(灯),转台红外跟踪视轴瞄准目标,利用数引跟踪方式把目标调整到红外跟踪 CCD 视场中心;

(3) 调整 FSM 方位轴  $\Delta A_i$  和俯仰轴  $\Delta E_i$ ,靶板上激光光斑随着 FSM 的调整而作水平和上下方向移动,测量靶板上激光光斑水平移动的距离  $D_L$  和上下移动的距离  $D_V$ ;

(4) 由激光光斑的移动距离解算出激光偏离中心的角度值:

$$\Delta A_j = \frac{D_L}{L \times 1000} \times \frac{180}{\pi} \times 3600, \Delta E_j = \frac{D_V}{L \times 1000} \times \frac{180}{\pi} \times 3600;$$

(5) 重复(3)和(4),测量数据如表 2 所示。

表 2 静态试验测试数据

Tab. 2 Static test data

FSM 调整 角度(")		光斑移动距离 (mm)		实测激光光斑偏离 中心角度(")		仿真结果		解算误差(")	
俯仰 $\Delta E_i$	方位 $\Delta A_i$	上下 $D_V$	左右 $D_L$	$\Delta E_j$	$\Delta A_j$	俯仰	方位	上下	左右
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-30	25	-109	125	-44.965 7	51.566 2	-42.42	50.004	2.55	-1.57
-75	-180	-262	-877	-108.083	-361.788	-106.16	-359.97	1.923	1.82
-100	190	-348	924	-143.56	381.177 4	-141.29	380.05	2.27	-1.13
-170	-20	-587	-104	-242.155	-42.903 1	-240.44	-39.86	1.72	3.04
90	-110	315	-536	129.946 8	-221.116	127.35	-219.96	-2.596	1.156
130	-85	450	-417	185.638 3	-172.025	183.92	-169.92	-1.72	2.11
160	125	551	609	227.303 8	251.230 5	226.14	250.12	-1.16	-1.11
240	85	820	410	338.274 3	169.137 1	339.27	170.28	0.9957	1.14

对比表 2 中实测激光光斑偏移角度和仿真结果可以看出,最大静态解算误差在方位方向为  $3.04''$ ,此误差的引起主要是光斑移动距离的测量误差。因此由表 2 可知 FSM 控制量与激光指向关系的解算算法完全正确,由于本项目中 FSM 方位与俯仰的工作范围只有  $\pm 4'$ ,所以静态试验只能在此范围内。

### 4.2 动态试验

动态试验时,轮式装甲车在三级公路上以 20

km/h 的速度行驶,装甲车上的红外跟踪设备瞄准 1.5 km 以外静止靶板上的指示灯,同时发射激光,激光光斑完全覆盖住指示灯目标,同时,通过 FSM 的实际跟踪误差来反映激光指向精度。经过 10 余次的动态跑车干扰试验满足了激光指向  $30''$  的指标要求,激光指向误差曲线如图 7、图 8 所示,采样频率 100 Hz:方位方向激光指向精度均方根值为  $11.65''$ ,俯仰方向激光指向精度均方根值为  $15.38''$ 。

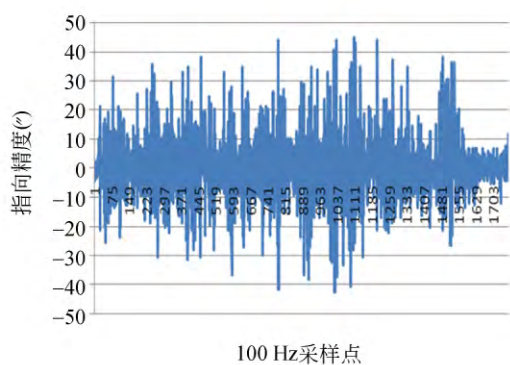


图7 方位方向激光指向精度  
Fig. 7 Laser pointing error of A

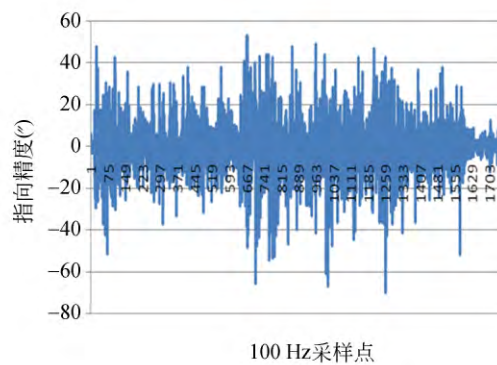


图8 俯仰方向激光指向精度  
Fig. 8 Laser pointing error of B

## 5 结论

为了实现机动车载高精度激光瞄准,在发射光路中采用FSM对激光发射方向进行快速修正。本文在研究FSM修正量与红外跟踪目标脱靶量和反射镜空间实时绝对角度关系的基础上,结合激光发射光路和红外跟踪光路结构特点,创

新性地提出把船摇坐标变换理论应用到FSM控制量的解算中,建立了FSM二维控制量与出射激光指向和FSM空间位置的关系算法。试验结果表明,该算法的正确性,且具有较高的解算精度,最大误差为 $2.9''$ 。目前,该算法已成功应用于机动装甲车武器装备的光束指向控制中,动态跑车激光指向控制精度方位为 $11.65''$ ,俯仰为 $15.38''$ ,满足项目 $30''$ 的指标要求。

### 参考文献:

- [1] 徐新行,王兵,韩旭东,等.音圈电机驱动的球面副支撑式快速控制反射镜设计[J].光学精密工程,2011,19(6):1320-1326.  
XU X H, WANG B, HANG X D, et al.. Design of fast-steering mirror with spherical pair supporting structure driven by voice coil actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1320-1326. (in Chinese)
- [2] 鲁亚飞,范大鹏,范世珣,等.快速反射镜两轴柔性支撑设计[J].光学精密工程2012,18(12):2574-2582.  
LU Y F, FAN D P, FAN SH X, et al.. Design of two-axis elastic support for fast steering mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 18(12): 2574-2582. (in Chinese)
- [3] 邓耀初.基于快速反射镜的光束指向稳定技术[D].西安:西安电子科技大学,2008.  
DENG Y CH. *The light-beam pointing stability techniques based on FSM* [D]. XI'an: XI'an University of technology, 2008. (in Chinese)
- [4] 徐新行,高云国,杨洪波,等.车载大口徑刚性支撑式快速反射镜[J].光学精密工程,2014,22(1):128-134.  
XU X H, GAO Y G, YANG H B, et al.. large-diameter Fast steering Mirror on Rigid Support Technology for dynamic platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1):128-134. (in Chinese)
- [5] 周远,鲁亚飞,黑沫,等.旋转双棱镜光束指向解析解[J].光学精密工程2013,21(6):1373-1379.  
ZHOU Y, LU Y F, HEI M, et al.. Analytic solution of optical beam steering based on rotational double prisms [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1373-1379. (in Chinese)
- [6] 马佳光,唐涛.复合轴精密跟踪技术的应用与发展[J].红外与激光工程,2013,42(1):218-227.  
MA J G, TANG T. Review of compound axis servomechanism tracking control technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1):218-227. (in Chinese)
- [7] 丁科,黄永梅,马佳光,等.快速反射镜的误差自适应前馈复合控制[J].中国激光,2011,38(7):1-6.  
DING K, HUANG Y M, MA J G, et al.. The error adaptive feedforward composite control of fast steering mirror [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(7): 1-6. (in Chinese)
- [8] 吴鑫.高性能快速控制反射镜研究[D].武汉:华中

- 科技大学 2012.  
WU X. *Research on high-performance fast steering mirror* [D]. wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012. (in Chinese)
- [9] 丁科, 黄永梅, 马佳光, 等. 抑制光束抖动的快速反射镜复合控制[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(9): 1991-1998.  
DING K, HUANG Y M, MA J G, *et al.*. Composite control of fast-steering-mirror for beam jitter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 1991-1998. (in Chinese)
- [10] 王航宇. 舰载火控原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.  
WANG H Y. *Shipborne Fire Control Theory* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [11] 薛定宇. 反馈控制系统设计与分析——MATLAB 语言应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.  
XUE D Y. *Feedback control system design and analysis—MATLAB Language application* [M]. Beijing: Qinghua University Press, 2000. (in Chinese)

#### 作者简介:



王鹤淇(1983—), 男, 吉林长春人, 博士, 助理研究员, 2007 年于吉林大学获得学士学位, 2012 年于中科院长春光机所获得博士学位, 主要从事光电经纬仪的精密控制及光电装备测试性设计方面的研究。E-mail: whq200808@sina.com



王伟国(1970—), 男, 吉林通化人, 博士, 研究员, 2002 年于吉林大学获得硕士学位, 2006 年于中科院长春光机所获得博士学位, 主要从事光电经纬仪的精密控制及总体设计方面的研究。E-mail: liutingxia2001@sohu.com

(版权所有 未经许可 不得转载)