

遥控武器站跟踪线隔离连续射击扰动分析

向学辅¹, 李永成¹, 万海兵¹, 马永逸²

(1. 西南自动化研究所, 四川 绵阳 621000; 2. 重庆建设工业公司, 重庆 400054)

摘要:根据跟踪线和火力线方位共轴的遥控武器站的架构特点,分析连续射击的冲击力对跟踪线产生的扰动的动力学特性,提出了电机控制回路耦合扰动的概念。通过对比分析图像闭环和内环稳定2种模式的隔离扰动性能,设计了将光纤陀螺作为反馈器件的内环稳定控制器隔离射击扰动并获取足够带宽,有效降低了射击扰动对跟踪线跟踪精度的影响。根据分析结果,设计了图像闭环和内环稳定2种隔离模式的SIMULINK仿真模型,仿真结果表明,内环稳定模式能提高隔离扰动的性能。

关键词:遥控武器站;观瞄转台;跟踪线;内环稳定控制器

本文引用格式:向学辅,李永成,万海兵,等. 遥控武器站跟踪线隔离连续射击扰动分析[J]. 四川兵工学报,2014(9): 105-109.

中图分类号:U666.1

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2014)09-0105-05

Research on Line-of-Sight Isolating the Disturbance from Fusillade for Remote Control Weapon Systems

XIANG Xue-fu¹, LI Yong-cheng¹, WAN Hai-bing¹, MA Yong-yi²

(1. Southwest Automation Research Institute, Mianyang 621000, China;

2. Chongqing Jianshe Industries Co. Ltd., Chongqing 400054, China)

Abstract: On the basis of the systematic characters of remote control weapon systems (RCWSs) which is the line-of-sight and line-of-fire azimuth coupling together, an analysis of the dynamics of disturbance generated by the wallop is shown, and a concept of disturbance coupled by motor control loop is proposed. Based on the analysis of comparing the performance of isolating the disturbance of image close loop mode with inner loop stable mode, the inner loop controller of inner loop stable mode is designed to isolate the disturbance and obtain the sufficient bandwidth with the FOG feeding back the velocity. And then the tracking error generated by fusillade can be availably reduced. Finally, the SIMULINK model of image close loop mode and inner loop stable mode is designed. The result of simulation verifies that inner loop stable mode can improve the performance of isolation.

Key words: RCWSs; sight platform; line-of-sight; inner loop stable controller

Citation format: XIANG Xue-fu, LI Yong-cheng, WAN Hai-bing, et al. Research on Line-of-Sight Isolating the Disturbance from Fusillade for Remote Control Weapon Systems[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014 (9): 105-109.

遥控武器站配置的外部提供动力源的链式炮可以自动连续射击打击目标,膛内压力、自动机冲击力连续作用于缓冲机构和连接机构上,通过摇架、耳轴、托架传递^[1-3],最终

耦合到方位共轴安装的观瞄转台上并对跟踪线产生扰动,影响跟踪线跟踪和瞄准。文献[4-5]中对车载系统的跟踪线隔离行进间道路谱扰动做了详细分析并提出了有效的解决

方法;机载光电设备稳定平台采用光纤陀螺敏感扰动和内环控制隔离扰动模式有效克服飞行器飞行过程中气流、机动和机体本身振动带来的扰动^[6-8];文献[9-10]中详细分析风浪对稳定平台的影响并建立数学模型,分别提出了单神经元自适应PID控制算法的二级稳定模式和位置补偿模式隔离风浪扰动,提高舰载稳定平台的稳定精度;上述文献只对系统外部扰动影响进行了详细分析和提出了有效解决方法,对内部扰动分析却很少。本文对系统内产生的扰动,主要是连续射击时后坐力和自动机冲击力产生的扰动动力学特性进行详细分析,建立扰动耦合到跟踪线的数学模型以及分析扰动对跟踪线跟踪精度的影响;在观瞄转台模型基础上,对比分析图像闭环和内环稳定2种模式隔离扰动的性能,根据上述分析,设计隔离扰动的内环稳定控制器。建立2种模式的SIMULINK仿真模型,仿真结果表明内环稳定模式隔离扰动性能优于图像闭环模式。

1 连续射击扰动动力学分析

1.1 应用坐标定义

遥控武器站将观瞄转台方位角转台置于火力线方位转台上,形成跟踪线和火力线方位共轴模式,分别定义遥控武器站、观瞄转台方位框和俯仰框坐标系,其关系如图1所示。其中 $O_p-x_p y_p z_p$ 是遥控武器站坐标系, O_p 定义为遥控武器站方位旋转轴和耳轴交点; $O_p x_p$ 定义为链式炮火线,指向为沿火线延长; $O_p y_p$ 垂直于 $O_p x_p$, $O_p x_p$ 逆时针旋转 $\pi/2$ 重合的 $O_p y_p$ 为正向,耳轴与 $O_p y_p$ 重合; $O_p z_p$ 与 $O_p x_p$ 和 $O_p y_p$ 垂直并指向上方,方位旋转轴与 $O_p z_p$ 重合,三者构成一个右手直角坐标系;根据右手定则,定义三个欧拉角 λ 、 α 和 γ ^[11]。 $O_p-x_{ga} y_{ga} z_{ga}$ 是观瞄转台方位框右手直角坐标系,观瞄转台方位旋转轴与俯仰旋转轴交点平移到 O_p 点; $O_p z_{ga}$ 与 $O_p z_p$ 重合; $O_p-x_{ge} y_{ge} z_{ge}$ 是观瞄转台俯仰框右手直角坐标系,观瞄转台耳轴与跟踪线交点平移到 O_p 点; $O_p y_{ge}$ 与 $O_p y_{ga}$ 重合; $O_p-x_{ge} y_{ge} z_{ge}$ 坐标系绕 $O_p y_{ge}$ 旋转 α 为观瞄转台俯仰角度^[12]。

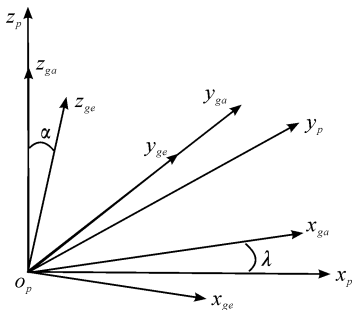


图1 遥控武器站与观瞄转台坐标关系示意图

假设在遥控武器站坐标系 $O-x_p y_p z_p$ 下有一矢量 X ,在观瞄转台俯仰框 $O-x_{ge} y_{ge} z_{ge}$ 坐标系下 X_p 为

$$X_p = \begin{bmatrix} c\lambda c\alpha & s\lambda & -c\lambda s\alpha \\ -s\lambda c\alpha & c\lambda & s\lambda s\alpha \\ s\alpha & 0 & c\alpha \end{bmatrix} X \quad (1)$$

其中: $c * = \cos *$, $s * = \sin *$;若 $\lambda = 0$ 或者 $\alpha = 0$,将其代入式(1)即可得到矢量 X 在 $O-x_{ge} y_{ge} z_{ge}$ 坐标系下的 X'_p 。

1.2 射击扰动动力学分析

在链式炮射击过程中,膛内压力和自动机冲击力作用力形成纵向射击冲击力 F_{sc} ;在结构布置中,纵向射击冲击力不通过遥控武器站质心,形成射击作用力臂 z_y 和 z_p 。在只考虑轴系干扰情况下,当火线俯仰角为 ϕ_f 时,纵向射击冲击力形成的力矩为

$$\begin{bmatrix} M_{scy} \\ M_{scp} \end{bmatrix} = F_{sc} \begin{bmatrix} \cos(\phi_f) & 0 \\ 0 & \sin(\phi_f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_y \\ z_p \end{bmatrix} \quad (2)$$

纵向射击冲击力具有短时、峰值大和连续的特性,可以近似认为连续的脉冲函数,利用傅里叶级数将射击冲击力展开后有^[13]

$$F'_{sc} = \frac{F_{sc}}{2} + \frac{2F_{sc}}{\pi} (\sin\omega_0 t + \frac{1}{3}\sin 3\omega_0 t + \dots) \quad (3)$$

其中 $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 为射频。将 F_{sc} 用 F'_{sc} 替代,则式(2)可表示为

$$\begin{bmatrix} M_{scy} \\ M_{scp} \end{bmatrix} = F'_{sc} \begin{bmatrix} \cos(\phi_f) \\ \sin(\phi_f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_y \\ z_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

采用外部提供动力源的自动机在供输弹和抛壳时将产生的连续合冲击力形成横向射击冲击力 F_{sg} ,不通过遥控武器站质心,形成冲击力臂 z_r , F_{sg} 与平面 $O_p x_p y_p$ 在 $O_p y_p$ 方向上夹角为 ϕ_g ,则近似为连续脉冲函数的横向射击冲击力形成的力矩为

$$M_{scr} = F'_{sg} \sin(\phi_g) z_r \quad (5)$$

其中

$$F'_{sg} = F_{sg}/2 + (2F_{sg}/\pi) [\sin\omega_0 t + (1/3)\sin 3\omega_0 t + \dots]$$

根据动力学基本公式有

$$\begin{bmatrix} \sum M_x \\ \sum M_y \\ \sum M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 $\sum M_x$, J_x 和 $\dot{\omega}_x$ 分别为带动遥控武器站以 $O_p x_p$ 轴旋转的合力矩,转动惯量和角加速度; $\sum M_y$, J_y 和 $\dot{\omega}_y$ 分别为带动遥控武器站以 $O_p y_p$ 轴旋转的合力矩,转动惯量和角加速度; $\sum M_z$, J_z 和 $\dot{\omega}_z$ 分别为带动遥控武器站以 $O_p z_p$ 轴旋转的合力矩,转动惯量和角加速度。

作用在观瞄转台的合力矩为

$$\begin{bmatrix} \sum M_x \\ \sum M_y \\ \sum M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{scr} \\ M_{scp} \\ M_m + M_{scy} + M_f \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 M_m 为遥控武器站方位电机输出力矩, M_f 为遥控武器站方位其他扰动合力矩。将式(7)代入式(6)可得各个方向运动加速度表达式

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{scr}/J_x \\ M_{scp}/J_y \\ (M_m + M_{scy} + M_f)/J_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

对式(8)两端做积分运算,得到3个方向的运动角速度: $[\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ 。

当观瞄转台电机未工作时,遥控武器站以角速度 $[\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ 运动时,通过机械结构、摩擦力和线束弹力等因素耦合到观瞄转台俯仰框,带动跟踪线相对惯性空间运动角速度为

$$\begin{bmatrix} \omega_{lx1} \\ \omega_{ly1} \\ \omega_{lz1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\lambda c\alpha & s\lambda & -c\lambda s\alpha \\ -s\lambda c\alpha & c\lambda & s\lambda s\alpha \\ s\alpha & 0 & c\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ f_{ef}(\omega_y) \\ f_{af}(\omega_z) \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中 $f_{ef}(\omega_y)$ 和 $f_{af}(\omega_z)$ 为通过摩擦力和线束弹力等因素耦合到观瞄转台俯仰框坐标系下的运动角速度;设计性能优良的观瞄转台可使 $f_{ef}(\omega_y) \ll \omega_y$ 和 $f_{af}(\omega_z) \ll \omega_z$;在射击产生的高频低幅扰动情况下, $f_{ef}(\omega_y) \approx 0$ 和 $f_{af}(\omega_z) \approx 0$ 。

当观瞄转台电机工作时,通过两轴电机控制回路耦合到观瞄转台俯仰框,跟踪线惯性空间运动速度为

$$\begin{bmatrix} \omega_{lx2} \\ \omega_{ly2} \\ \omega_{lz2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\lambda c\alpha & s\lambda & -c\lambda s\alpha \\ -s\lambda c\alpha & c\lambda & s\lambda s\alpha \\ s\alpha & 0 & c\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ G_{ec}(\omega_y) \\ G_{ac}(\omega_z) \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中 $G_{ec}(\omega_y)$ 和 $G_{ac}(\omega_z)$ 为遥控武器站扰动通过控制回路耦合到观瞄转台俯仰框坐标系下的运动速度。在s域有

$$\begin{aligned} G_{ec}(s) &= W_y(s)G_{ec}(s) \\ G_{ac}(s) &= W_z(s)G_{ac}(s) \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $W_y(s)$ 和 $W_z(s)$ 分别为 ω_y 和 ω_z 的拉氏变换表示; $G_{ec}(s)$ 和 $G_{ac}(s)$ 分别为俯仰和方位从力矩扰动作用到扰动被敏感之间的闭环伺服系统传递函数。

观瞄转台控制回路工作时,电机带动跟踪线运动速度为

$$\begin{bmatrix} \omega_{lx3} \\ \omega_{ly3} \\ \omega_{lz3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_\lambda \sin(\alpha) \\ \omega_\alpha \\ \omega_\lambda \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中 ω_λ 和 ω_α 分别为观瞄转台方位和俯仰运动角速度。跟踪线最终运动角速度为

$$\begin{bmatrix} \omega_{lx} \\ \omega_{ly} \\ \omega_{lz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{lx1} \\ \omega_{ly1} \\ \omega_{lz1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{lx2} \\ \omega_{ly2} \\ \omega_{lz2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{lx3} \\ \omega_{ly3} \\ \omega_{lz3} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中角速度和角度是矢量,在叠加过程中要注意方向。在稳定系统中,系统控制 ω_λ 和 ω_α 使 $\omega_{ly} \rightarrow 0$, $\omega_{lz} \rightarrow 0$,但不可能使 $\omega_{lx} = 0$ 和 $\omega_{ly} = 0$ 。

1.3 射击扰动对跟踪线精度影响

当观瞄转台 t 时刻的方位角为 λ_t 和俯仰角为 α_t 时,为了隔离扰动,电机拖动跟踪线以 $\omega_{\lambda,t}$ 和 $\omega_{\alpha,t}$ 运动,将式(9)、式(10)和式(12)代入式(13)得到跟踪线运动角速度为

$$\begin{bmatrix} \omega_{lx,t} \\ \omega_{ly,t} \\ \omega_{lz,t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{\lambda,t}s\alpha_t + K_{1y}\omega + K_{1c}\omega \\ \omega_{\alpha,t} + K_{2y}\omega + K_{2c}\omega \\ \omega_{\lambda,t}c\alpha_t + K_{3y}\omega + K_{3c}\omega \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中:

$$\begin{bmatrix} K_{1y}\omega \\ K_{2y}\omega \\ K_{3y}\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\lambda_t c\alpha_t \omega_x + s\lambda_t f_{ef}(\omega_y) - c\lambda_t s\alpha_t f_{af}(\omega_z) \\ -s\lambda_t c\alpha_t \omega_x + c\lambda_t f_{ef}(\omega_y) + s\lambda_t s\alpha_t f_{af}(\omega_z) \\ s\alpha_t \omega_x + c\alpha_t f_{af}(\omega_z) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} K_{1c}\omega \\ K_{2c}\omega \\ K_{3c}\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s\lambda_t G_{ec}(\omega_y) - c\lambda_t s\alpha_t G_{ac}(\omega_z) \\ c\lambda_t G_{ec}(\omega_y) + s\lambda_t s\alpha_t G_{ac}(\omega_z) \\ c\alpha_t G_{ac}(\omega_z) \end{bmatrix}$$

为说明简单,在不考虑其他因素情况下,假设对一静止的目标连续射击,持续时间周期为 T_{fire} ,根据式(4)和式(5)可知,运动速度 $\omega_{lx,t}$ 和 $\omega_{ly,t}$ 是有界的,两轴系跟踪线跟踪误差为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_\tau \\ \Delta\alpha_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \\ \tau \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \int \omega_{lx,t} dt \\ \int \omega_{ly,t} dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\lambda_0 \\ \Delta\alpha_0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中 $0 \leq \tau \leq T_{fire}$,在无静差跟踪控制系统中 $\Delta\lambda_0 = 0$ 和 $\Delta\alpha_0 = 0$ 。 $\omega_{lx,t}$ 引起图像旋转,在两轴的观瞄转台中,跟踪线误差无法表征,也无法消除旋转。

2 内环稳定模式

跟踪线稳定是为了使跟踪线在射击过程中任意时刻,跟踪误差 $\Delta\lambda_\tau \approx 0$ 和 $\Delta\alpha_\tau \approx 0$,则有

$$\begin{bmatrix} \omega_{\alpha,t} \\ \omega_{\lambda,t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(K_{2y}\omega + K_{2c}\omega) \\ -(K_{3y}\omega + K_{3c}\omega)/c\alpha_t \end{bmatrix} \quad (16)$$

采用光纤陀螺直接敏感跟踪线相对惯性空间的运动速度模式,设计内环稳定控制器控制观瞄转台方位和俯仰运动以满足式(16)。

2.1 观瞄转台模型

观瞄转台采用直流力矩电机直接驱动方式驱动转台运动方位和俯仰轴运动,在此只以方位轴为例进行说明,系统方位轴模型框图如图2所示。

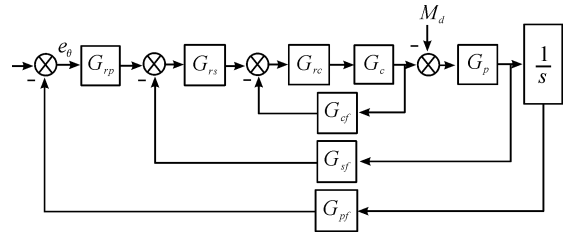


图2 观瞄转台方位轴模型框图

其中 G_{pp} 、 G_{rs} 和 G_{rc} 分别是位置环、速度环和电流环控制器; G_c 和 G_p 分别是电流环被动对象和转台传递函数; G_{pf} 、 G_{sf} 和 G_{of} 分别是位置、速度和电流反馈传递函数,一般都近似为1。 M_d 为转台所受合扰动力矩; e_θ 为扰动引起的位置偏差。

由式(9)和式(12)可知,遥控武器站的扰动不可能完全耦合到观瞄转台俯仰框,为了测量扰动对跟踪线的真实影响,将Z轴和Y轴光纤陀螺安装都安装在俯仰框内, G_{sf} 即光纤陀螺传递函数;从模型框图可知,Z轴光纤陀螺敏感 ω_{lx} ,包括扰动和转台自身运动角速度,作为内环稳定的速度反馈器件。

2.2 隔离扰动性能分析

图像闭环隔离模式的系统方位轴模型框图如图3所示。其实现过程是通过图像处理算法提取跟踪线跟踪误差,控制回路消除误差达到隔离扰动的效果。

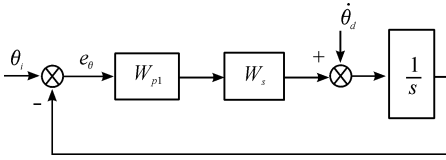


图3 图像闭环模式的模型框图

其中 W_{p1} 和 W_s 分别是位置环控制器、速度闭环传递函数。 θ_i 为位置给定; $\dot{\theta}_d$ 为扰动速度; e_θ 为扰动引起的跟踪误差; e_θ 相对 θ_i 和 $\dot{\theta}_d$ 的传递函数为

$$E_1(s) = \frac{1}{1 + W_{p1}W_s(s)} \frac{1}{s} \theta_i(s) + \frac{1}{s(1 + W_{p1}W_s(s))} \dot{\theta}_d(s) \quad (17)$$

采用陀螺敏感相对惯性空间速度的内环稳定隔离模式的模型框图如图4所示。这种模式采用光纤陀螺直接敏感跟踪线相对惯性空间的运动速度作为内环稳定的反馈数据,从而控制系统补偿运动以实现隔离扰动的目的。

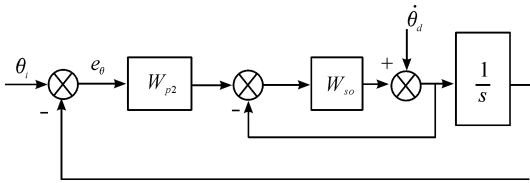


图4 内环稳定模式的模型框图

跟踪线误差 e_θ 相对 θ_i 和 $\dot{\theta}_d$ 的传递函数为^[14]

$$E_2(s) = \frac{1}{1 + W_{p1}W'_s(s)} \frac{1}{s} \theta_i(s) + \frac{1}{s(1 + W_{p1}W'_s(s) + W_{so}W_{po}(s))} \dot{\theta}_d(s) \quad (18)$$

其中 $W'_s(s) = W_s(s) = W_{so}/(1 + W_{so})$ 为速度闭环传递函数并且将 $W_{so}(s)$ 校正为 I 型系统; 位置环开环传递函数 $W_{po}(s) = W_{p2}W'_s(1/s)$ 。

分析式(17)和式(18)的 $\dot{\theta}_d$ 项有

$$N(W_{so}W_{po}(s)) > N(W_{p1}(s)) \quad (19)$$

其中 $W_{p1} = W_{p1}W_s(s)(1/s)$, $N(*)$ 运算表示传递函数 * 的型别。因为可以设计 W_{p2} 使 $W_{p2} = W_{p1}$, 并且 $W'_s(s) = W_s(s)$, 则 $W_{p1} = W_{po}$; 而 $W_{so}(s)$ 为 I 型系统, 所以不等式(19)成立。即内环稳定控制模式的隔离性能优于图像闭环模式; 比如 W_{p1} 为 III 型系统, 当扰动信号 $\dot{\theta}_d(s) = A_d/s^3$ 时, 图像闭环模式的稳态误差为 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_\theta(t) = A_d/G'_1(0)$, 而内环稳定模式的稳态误差 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_\theta(t) = 0$, 其中 $W_{p1} = G'_1(s)(1/s^3)$ 。

2.3 内环稳定控制器设计

直流力矩电机直接驱动观瞄转台, 电流环被控对象数学

模型为: $G_c = (s/R_a)/(\tau_e s^2 + s + 1/\tau_m)$, 其中 R_a 为电机电阻, τ_e 为电机电气时间常数, τ_m 为机电系统时间常数。设计合适的 PI 校正器 $G_{rc} = K_{rc}(\tau'_e s + 1)/\tau'_e s$, 当 $\tau'_e < \tau_e$, 在一定宽的频率范围内, 电流环闭环传递函数可近似为 $G_{cc} \approx K_{mc}$, 速度环被控对象的传递函数为: $G_s \approx K_{mc}G_p = K_{mc}/J_Y s$, 速度环校正器设计为

$$G_{rs} = K_{rs} \frac{\tau_{s1}s + 1}{\tau_{s2}s + 1} \quad (20)$$

其中 $\tau_{s1} < \tau_{s2} < \tau'_e$ 。速度环闭环传递函数可近似为 $G_{cs} \approx 1/\tau_{sc}s + 1$, 其中 $\tau_{sc} \approx \tau_{s2}$ 。

3 仿真与分析

已知某遥控武器站的观瞄转台方位转动惯量 $J_Y = 1.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $R_a = 3.53 \Omega$, $\tau_e = 0.003$, $\tau_m = 1.05$ 。在 300 发/分的射频和 3 连发射击情况下, 式(14)中 $\alpha_i \omega_x$ 项通过机械结构约束直接耦合的且被 Z 轴光纤陀螺敏感, 当 $\alpha_i = 5^\circ$ 时, 某遥控武器站射击扰动实测数据 x_i 的曲线如图 5 所示。

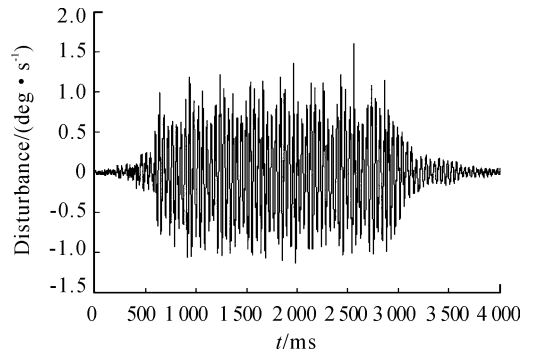


图5 射击扰动实测曲线

对实测数据按 $S(e^{j\omega}) = (1/n) |\sum x_k e^{-j\omega k}|^2$ 进行处理, 得到射击扰动功率谱密度, 结果如图 6 所示。

从图 5 和图 6 可知, 最大扰动速度为 $1.52^\circ/\text{s}$, 主分量频率为 25 Hz。仿真时选取 $\tau'_e = 0.002$, $\tau_{s1} = 0.001$, $\tau_{s2} = 0.001025$, $K_{rc} = 8.05$, $K_{rs} = 1000$, 位置环控制器选择速度前馈复合控制, 图像闭环稳定模式与内环稳定控制模式的 SIMULINK 仿真模型如图 7 所示, 其中 $\dot{\theta}_d = 1.52 \times \sin(25 \cdot 2 \cdot \pi \cdot t)$ 。

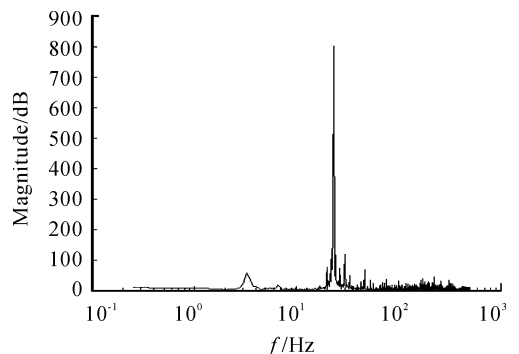


图6 射击扰动速度功率谱密度

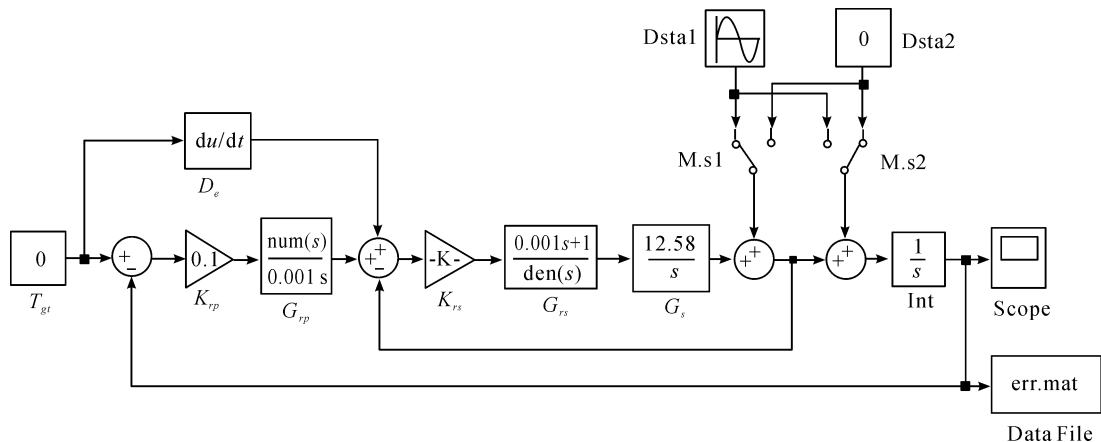


图7 2种模式 SIMULINK 仿真模型

跟踪线跟踪误差曲线如图8所示,图像闭环稳定模式跟踪线最大跟踪误差等于 0.0192° ,由实曲线表示误差曲线;内环稳定模式跟踪线最大跟踪误差等于 $0.75 \times 10^{-4}^\circ$,由点状曲线表示误差曲线。显然,内环稳定模式隔离扰动的性能明显优于图像闭环模式。

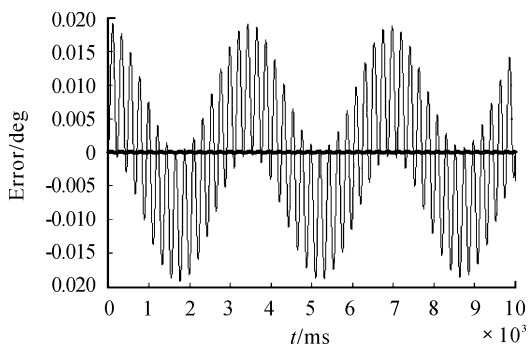


图8 2种模式跟踪线误差仿真曲线

4 结束语

采用观瞄转台与平台方位共轴的遥控武器站在射击时会产生一定频段的扰动,并通过机械、摩擦和闭环伺服系统等耦合到观瞄转台,影响跟踪线跟踪精度。在建立精确的观瞄转台数学模型基础上,通过分析扰动的动力学模型和耦合模型,以及隔离扰动的模型,对比图像闭环模式和内环稳定模式隔离扰动的性能差异。设计内环稳定控制器实现内环稳定模式隔离扰动,通过仿真验证,隔离扰动的性能得到明显提升。

参考文献:

[1] 毛保全,王传有.某型遥控武器站射击密集度仿真优化

- [J]. 装甲兵工程学院学报,2010,24(2):36-40.
- [2] 冯长根,温波,李才葆.自行火炮行进间射击动力学研究[J].兵工学报,2002,23(4):457-461.
- [3] 赵文彬,张铭.链式炮PMSM电机转速自适应反演控制[J].兵工自动化,2011,30(11):57-62.
- [4] 饶思诚,龙锐,张天桥.行进间跟踪轴线稳定技术[J].北京理工大学学报,2002,22(4):464-468.
- [5] 罗兵,黄国忠.行进间瞄准线稳定技术[J].中国惯性技术学报,2004,12(2):9-12.
- [6] 高宏昌.机载电视瞄准线稳定系统仿真研究与实施[J].电光与控制,1992,2(3):33-36.
- [7] 林浸序.机载光电稳定平台关键技术研究[D].吉林:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2012.
- [8] 王连明.机载光电的稳定与跟踪伺服控制[D].吉林:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2002.
- [9] 何永昌,王雷,韩昭旺.基于舰体坐标系的瞄准线与火力线稳定模型[J].火炮发射与控制学报,2008,24(2):24-27.
- [10] 王苏.舰载激光武器高精度稳定平台系统研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.
- [11] 薄煜明,郭治,钱龙军,等.现代火控理论与应用基础[M].北京:科学出版社,2012.
- [12] 罗护,范大鹏,张智勇,等.两轴陀螺稳定系统中陀螺安装的几种方法[J].兵工学报,2005,26(3):24-27.
- [13] 李伟,韩崇伟,张太平,等.自行高炮射击线稳定系统动力学建模与仿真[J].兵工学报,2013,34(10):1201-1208.
- [14] 何荣贤,蒋军.大型舰载卫通伺服随动系统船摇隔离[J].陕西工学院学报,2005,12(2):8-10.

(责任编辑 杨继森)