

机载激光武器跟踪瞄准精度、误差源及控制分析

聂光成^{1,2}, 刘敏², 聂宜伟³, 徐保伟¹

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009;
3. 中国航天科工集团第九总体设计部, 武汉 430040)

摘要: 对机载激光武器跟踪瞄准精度要求进行了分析, 给出了复合轴的控制结构, 具体分析了跟踪瞄准的误差源, 采用 Matlab/Simulink 对复合轴伺服系统进行仿真研究。仿真结果表明, 系统动态性能良好, 跟踪精度和扰动抑制具有较好的效果, 复合轴伺服系统在机载激光武器跟踪瞄准系统中是一种十分有效的控制结构。

关键词: 机载激光武器; 粗跟踪; 复合轴; 精跟踪; 误差源

中图分类号: V271.4; TJ765 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)01-0073-05

Accuracy, Error Sources and Control of Tracking and Pointing of Airborne Laser Weapons

NIE Guang-shu^{1,2}, LIU Min², NIE Yi-wei³, XU Bao-wei¹

(1. Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471009, China;
3. The 9th Design Department of China Aerospace Science Industry Corp, Wuhan 430040, China)

Abstract: Analysis is made to tracking and pointing accuracy requirements of the airborne laser weapons, the control structure of the compound-axis is given, and the error sources of tracking and pointing are concretely analyzed. The compound-axis servo-system was simulated with Matlab/Simulink. The simulation results show that: 1) the system has good dynamic performance, high tracking accuracy and fine disturbance suppression effect; and 2) compound-axis of tracking and pointing of the airborne laser weapon is a quite effective control technology.

Key words: airborne laser weapon; coarse tracking; fine tracking; compound-axis; error source

0 引言

机载激光武器通过定向发射高能激光束来毁伤目标,除了具有高功率或高能量的激光器外,还需具有精密的跟踪瞄准系统,使激光束光斑锁定在目标的某一固定部位,并持续数秒。瞄准得不准确,如因跟踪传感器及其伺服控制系统的误差或抖动,引起光斑偏移,就会降低强激光的破坏效果。

机载激光武器对战术目标的跟踪瞄准精度一般要求在毫弧度量级^[1],这远高于目前战机的跟踪瞄准水平,为此必须分析跟踪瞄准误差,采用新的跟踪手段和

技术措施,提高跟踪瞄准精度。基于此,本文对机载激光武器跟踪瞄准的精度要求、误差源、跟踪瞄准的控制进行分析研究。

1 机载激光武器跟踪瞄准的精度要求

机载激光武器激光光束的远场功率分布近似呈高斯分布,为了尽量提高目标上光照的功率密度,需要使激光光束功率密度最大区域覆盖目标瞄准点区域,理想的情况是高斯光束的中心对准目标上的瞄准点。但受到光斑检测、跟踪带宽及其他各种跟踪瞄准误差因素限制,机载激光武器系统的跟踪瞄准精度不可能达到零误差,但显然跟踪瞄准误差又不能太大,否则引起的功率损耗相对严重,目标瞄准点区域光照功率密度会严重减小,影响杀伤效果。

若实际发射激光光束远场发射角(全角)为 θ ,要求跟踪误差 $\varepsilon \leq \frac{1}{5}\theta$,这样,由跟踪误差引起的积分光

收稿日期:2012-11-21

修回日期:2013-03-13

基金项目:光电控制技术重点实验室和航空科学基金联合资助项目(20115196018)

作者简介:聂光成(1971—),男,湖北天门人,博士,副教授,研究方向为航空武器系统建模、仿真及作战使用。

斑扩展导致的功率损耗可以忽略。光束瞄准损耗百分比 P_s 为^[2]

$$P_s = 1 - \exp\left[-8\left(\frac{\varepsilon}{\theta}\right)^2\right] \quad (1)$$

式中,当 $\varepsilon \leq \frac{1}{5}\theta$ 时, $P_s \leq 27.39\%$ 。

假设激光光束为基模高斯光束,取发射望远镜直径 $D = 1 \text{ m}$,激光波长 $\lambda = 10.6 \text{ }\mu\text{m}$,光束质量 $\beta = 3$,那么,激光光束的实际发散角 $\theta = \beta \frac{2\lambda}{\pi D} = 20.25 \text{ }\mu\text{rad}$,则跟踪误差应为 $\varepsilon \leq 4.05 \text{ }\mu\text{rad}$,这要求有精度极高的跟踪传感器及跟踪伺服控制系统。

由于机载激光武器所选用的高能激光器不同,即激光的波长 λ 会有不同的取值,同时,发射望远镜口径 D 的取值也会不同,这样,不同的机载激光武器跟踪瞄准精度会有所不同。3种典型的机载激光武器的有关参数和要求的跟踪精度如表1所示。

表1 3种机载激光武器的跟踪瞄准精度要求

Table 1 The tracking and pointing accuracy requirement of three kinds of airborne laser weapon

参数	$\lambda/\mu\text{m}$	β	D/m	$\theta/\mu\text{rad}$	$\varepsilon/\mu\text{rad}$
某机载激光武器	10.6	3	1	20.25	4.05
美国的机载战术激光武器 ATL	1.315	3	0.5	5.03	1.006
美国的机载激光武器 ABL	1.315	3	1.5	1.68	0.336

2 跟踪瞄准系统的控制结构

在机载激光武器的光电跟踪伺服系统中,采用复合轴控制来提高光束的跟踪和瞄准精度。复合轴伺服跟踪系统,以方位俯仰两轴跟踪机架完成较大误差的快速粗跟踪;在跟踪机架上安置卡塞格林结构的望远镜,用来观测目标,同时作为主激光的发射器,精跟踪时用望远镜接收目标光,并且,在望远镜的接收光路上有一个高低方位均可微动的低惯量的子反射镜系统(Fast Steering Mirror, FSM),它能精密控制使接收光轴和发射光轴的方向始终指向目标,从而对粗跟踪回路未能补偿的残留误差进行进一步校正,完成对目标的精跟踪^[3],达到所要求的近似“凝视”跟踪动目标的目的。图1所示为复合轴伺服系统示意图,其中, A 为方位轴, E 为俯仰轴。

图2所示为复合轴控制系统的结构。粗跟踪环具有较大的动态范围、较窄的控制带宽以及较低的谐振频率。精跟踪环以快速反射镜 FSM 作为执行机构,快速反射镜采用音圈电机或压电陶瓷(PZT)驱动,精跟踪环具有很宽的控制带宽和很高的增益,对宽功率谱扰动具有很强的抑制能力,可以达到很高的跟踪精度。

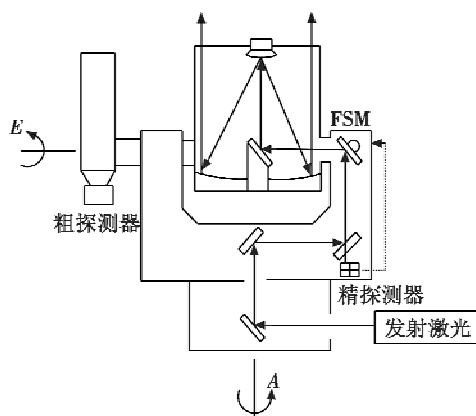


图1 复合轴伺服系统示意图

Fig. 1 Schematic constitution of the compound-axis servo system

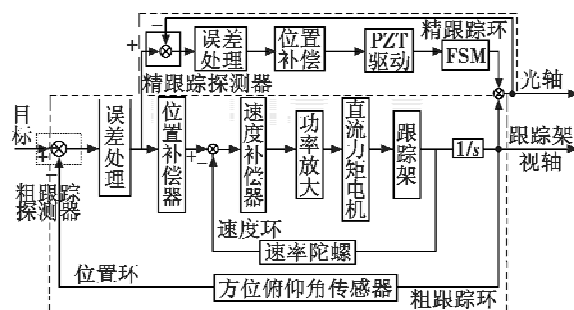


图2 复合轴控制系统结构图

Fig. 2 The structure of the compound-axis control system

3 跟踪瞄准的误差源分析

影响机载激光武器跟踪瞄准精度的因素是多方面的,包括光学、机械、传感器、目标特性、环境等,经过分析总结可将误差源归纳为:传感器误差、摩擦干扰力矩误差、动态滞后误差、飞机平台振动误差、机械结构误差、电气系统误差等^[4]。

1) 传感器误差。

光电跟踪传感器检测出目标位置,即跟踪误差。闭环控制系统根据该误差进行控制以减小该跟踪误差,而对于作为检测元件的光电跟踪传感器自身的误差,闭环控制系统是无法克服的,而是将其直接转变为系统的误差。光电跟踪传感器包括探测器件、光学系统及信号处理3个部分,误差源与该3个部分有关,如光电探测器的分辨率、帧频、滞后,光学系统的口径、焦距、畸变,信号处理电路的延迟、滞后等诸多因素均会引起相应的静态和动态误差。

为了减小光电跟踪传感器误差,应选用先进的高性能光电跟踪传感器(如帧频和分辨率较高的CCD传感器等)采用峰值跟踪、质心跟踪、相关跟踪等复合跟踪算法。

2) 摩擦干扰力矩误差。

在跟踪系统的机械传动机构中,由于轴承、力矩电机电刷、导电环等存在而必然产生摩擦。摩擦是对系统有较大影响的非线性因素之一,相应的摩擦力矩可分为 3 种,即静摩擦力矩、库仑摩擦力矩和粘性摩擦力矩。摩擦力矩会导致跟踪系统静差增加,精度降低;在跟踪低速目标时,会造成爬行现象,影响系统的低速平稳性。

同时,载体的低频振动以及在方位、滚动和俯仰方向上的角运动也由于摩擦的存在而耦合到跟踪架各轴,形成外部扰动力矩。

目前,为了减小摩擦干扰力矩误差,一般从以下 3 个方面着手:① 改变机械伺服系统的结构设计,减少传动环节;② 选择更好的润滑剂,减小动静摩擦的差值;③ 采用适当的控制补偿方法,对摩擦力矩进行补偿。

3) 动态滞后误差。

由于跟踪系统响应速度有限,跟瞄系统视轴(跟踪轴)将滞后于目标视轴,形成动态滞后误差^[5]。通常,对于一阶型伺服系统,这个误差就是速度滞后误差;对于二阶型伺服系统,这个误差就是加速度滞后误差。以此类推。

当目标的最大角速度 $\dot{\theta}$ 与角加速度 $\ddot{\theta}$ 确定后,随动系统的动态滞后误差 $\Delta\theta_d$ 可以简单表示为

$$\Delta\theta_d = \sqrt{\Delta\theta_1^2 + \Delta\theta_2^2} = \sqrt{\left(\frac{\dot{\theta}}{K_v}\right)^2 + \left(\frac{\ddot{\theta}}{K_a}\right)^2} \quad (2)$$

式中, K_v 、 K_a 分别为跟踪系统的角速度、角加速度误差系数,它们的值取决于系统传递函数。

可以采用动态高型控制方法来减小动态滞后误差。

4) 飞机平台振动残差。

对于机载激光武器跟踪瞄准系统存在机载平台振动引起的误差,平台振动给系统带来的跟踪误差为

$$\theta_{rms} = \sqrt{\int_{0.01}^{1000} S(f) df} \quad (3)$$

抑制后的平台振动残差可表示为

$$\theta'_{rms} = \sqrt{\int_{0.01}^{1000} S(f) |R(f)|^2 df} \quad (4)$$

式中: $S(f)$ 为振动的功率谱密度函数; $R(f)$ 为跟踪瞄准系统误差传递函数。可以看出,为了减小平台振动给系统带来的跟踪误差,必须减弱进入跟踪环的振动和提高跟踪瞄准系统的振动抑制能力。减少进入跟踪环的振动一般可通过振动隔离的被动减振方式来实现,隔离等效于一个低通滤波器,它能抑制高频并通过低频;提高跟踪瞄准系统的振动抑制能力则是设计速率陀螺稳定环和具有优良扰动抑制能力的精跟踪系统来实现主动抑振。

5) 机械结构误差。

主要包括框架轴系的不垂直度引起的框架轴间的耦合误差,由于跟踪架的质心偏离旋转轴而造成质量不平衡力矩,线缆的弹性产生的弹性约束力矩等,这些因素的影响可以在机械设计、加工以及安装时加以抑制或消除。

6) 电气系统误差。

主要包括电机本身的力矩波动、电机力矩饱和、输入/输出非线性特性、电气参数的波动以及功率驱动电路存在的电子线路噪声和量化误差等,这些是导致系统性能下降的不可忽略的影响因素。

上述各项误差中,前 4 项是主要误差源。对于其中的系统误差,绝大部分可进行调整或修正,但经修正后仍留有残差;对于其中的随机误差,由于具有随机性,不能修正,在总体设计时按其分布进行合理误差分配,以达到减小综合误差影响的目的。

4 跟踪瞄准系统复合轴的控制仿真分析

机载激光武器跟踪瞄准系统是一单输入单输出线性反馈控制系统,对于粗、精跟踪环,采用以传递函数模型为基础的经典频域设计方法,按照建立系统模型和分析系统设计指标、稳态设计、系统补偿设计的步骤进行设计^[6]。由于篇幅所限,在此略去设计过程。

建立机载激光武器基于复合轴的跟踪瞄准系统在 Matlab/Simulink 环境下的仿真模型,如图 3 所示。

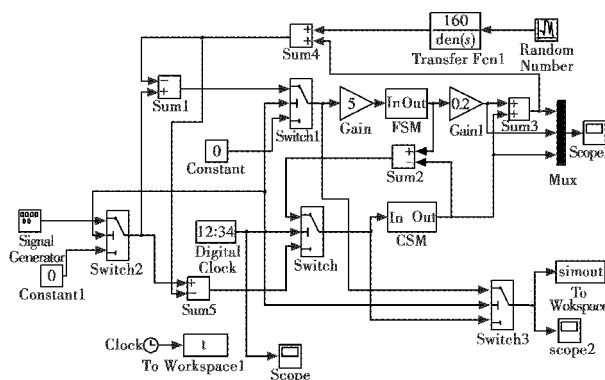


图 3 复合轴跟踪瞄准系统的 Matlab/Simulink 仿真模型

Fig. 3 The Matlab/Simulink simulation model of the compound-axis tracking and pointing system

图中:CSM、FSM 分别为封装的粗、精跟踪回路模块;粗、精跟踪切换通过时间来完成,切换时间 $t = 5$ s。

4.1 运动跟踪性能仿真

在进行系统运动性能仿真时,将振动干扰设为 0。

这里假设输入信号的最大角速度为 20 (°)/s,最大角加速度为 10 (°)/s²,即 $\dot{\theta}_{max} = 20$ (°)/s = 0.349 rad/s; $\ddot{\theta}_{max} = 10$ (°)/s² = 0.174 rad/s²。因此,系统的等效正弦

信号为

$$\theta = \theta_{i\max} \sin(\omega_e t) = \frac{\ddot{\theta}_{i\max}^2}{\ddot{\theta}_{i\max}} \sin\left(\frac{\ddot{\theta}_{i\max}}{\dot{\theta}_{i\max}} t\right) = 0.7 \sin(0.5t) \quad (5)$$

式中： ω_e 为等效正弦角频率； $\theta_{i\max}$ 为等效正弦幅度^[7]。

最大允许的跟踪误差为

$$\theta_{\max} = \frac{\theta_{i\max}}{|1 + G(j\omega_e)|} \approx \frac{\theta_{i\max}}{|G(j\omega_e)|} = \frac{\ddot{\theta}^2}{\dot{\theta} |G(j\omega_e)|} \quad (6)$$

式中， $G(j\omega_e)$ 为跟踪瞄准控制系统在 ω_e 频率处的开环频率特性。

对于粗、精跟踪回路，在给出最大跟踪角速度、最大跟踪角加速度和跟踪精度等设计指标后，就可由式(6)初步确定系统总的开环增益。

对于等效正弦位置跟踪输入，最大粗跟踪输出为 18 mrad，而最大精跟踪输出为 71.87 μ rad，改善 250 倍，如图 4 所示。

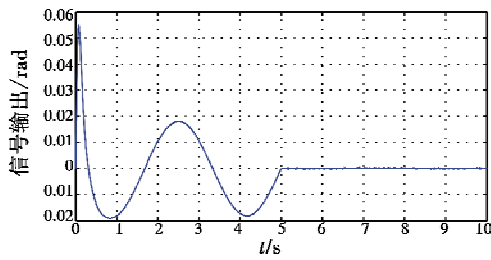


图4 跟踪性能仿真

Fig. 4 Simulation of tracking performance

4.2 对振动信号的抑制仿真

对机载平台的振动频率及幅值进行实际测试，通过数据分析和处理，可以得到其角位移振动功率谱密度曲线。虽然不同的飞机表现的振动特性不一致，但是，均可按式(3)根据振动功率谱密度曲线计算未经任何抑制的振动均方差^[8]，以便为跟踪瞄准系统提供扰动仿真输入。

对于平台振动的随机扰动输入，引起的最大粗跟踪输出为 14.9 mrad，最大精跟踪输出为 0.3 mrad，改善 50 倍，如图 5 所示。

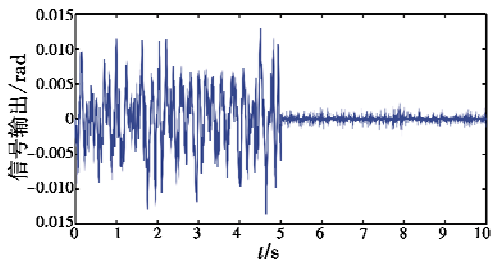
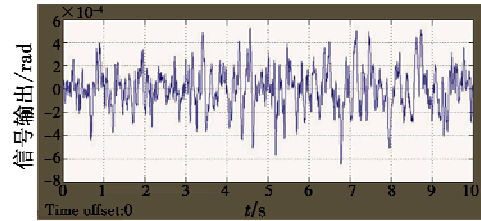


图5 振动抑制仿真

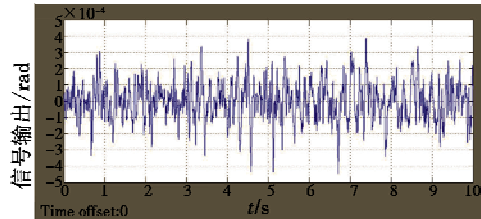
Fig. 5 Simulation of vibration suppression

复合轴系统的跟踪精度随着精、粗跟踪回路的带宽比增大而提高^[9]，如图 6 所示，为某一随机噪声输入

下精、粗跟踪带宽比分别为 3:1 和 7:1 时的随机误差抑制曲线。由于受到采样频率等因素的限制，精跟踪回路带宽的提高也会受到限制，在实际设计中，一般带宽比达到 10 倍左右^[10]。



a 精、粗带宽比为3:1



b 精、粗带宽比为7:1

图6 不同带宽比时的随机误差抑制曲线

Fig. 6 Curve of the stochastic error suppression according to different bandwidth ratio

上述仿真研究表明：复合轴控制(粗、精跟踪控制)在跟踪精度要求极高的机载激光武器跟踪瞄准系统中，是一种十分可行且先进的控制策略，并且精、粗跟踪环带宽及带宽比越大，随机扰动抑制能力越高，跟踪精度越高^[11]。

5 结束语

对复合轴跟踪系统进行了设计和仿真，在粗跟踪回路，以电机和跟踪机架作为控制对象；在精跟踪回路，以快速反射镜作为控制对象，分别对粗、精跟踪回路的速度环、位置环进行了补偿设计，并对粗跟踪回路的速度环采用速度滞后补偿。在复合轴控制结构的基础上，采用 Matlab/Simulink 进行仿真研究，仿真结果表明，复合轴跟踪系统能极大地提高跟踪精度并较好地抑制随机扰动。

机载激光武器跟踪瞄准系统是一个具有很强非线性、不确定性的难于精确建模的光机电控制系统，环境条件变化大，随机干扰因素多，因而，对系统控制方法提出了更高的要求：算法简单有效，具有快速动态响应特性和高质量稳定精度，对于模型参数变化具有自适应能力和鲁棒性。因此，要利用计算机采用现代控制技术(如最优控制、复合控制、自适应控制和模糊控制等)进行控制器的优化设计，以达到更高的跟踪瞄准精度。

参考文献

- [1] 王建华,张东来,李小将,等. 美军天基和机载激光反导研究计划及调整分析[J]. 激光与红外,2012,42(4):355-359.
WANG J H, ZHANG D L, LI X J, et al. Analysis of the research plan and adjustment of American spaceborne and airborne anti-missile laser[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(4):355-359.
- [2] 荣健,胡渝,钟晓春. ATP跟瞄精度与最佳信号光发射角的研究[J]. 中国激光,2005,32(2):221-223.
RONG J, HU Y, ZHONG X C. Study of ATP accuracy and the optimum optical signal transmitting angle[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(2):221-223.
- [3] 陈纯毅,杨华民,佟首峰,等. 空间光通信卫星平台振动实时模拟[J]. 系统仿真学报,2007,19(16):3834-3837.
CHEN C Y, YANG H M, TONG S F, et al. Real-time simulation of satellite-platform vibration of space optical communication[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(16):3834-3837.
- [4] 曹阳,艾勇,黎明,等. 空间光通信精跟踪系统地面模拟实验[J]. 光电子·激光,2009,20(1):40-43.
CAO Y, AI Y, LI M, et al. Ground simulation experiment of fine tracking for spatial optical communication[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2009, 20(1):40-43.
- [5] BOROSON D M, SCOZZAFAVA J J, MURPHY D V, et al. The Lunar Laser Communications Demonstration (LLCD) [C]//The 3rd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology, 2009: 23-28.
- [6] 宋延嵩,佟首峰,姜会林,等. 机载激光通讯系统精跟踪单元变结构控制技术[J]. 红外与激光工程,2010,39(5):934-938.
SONG Y S, TONG S F, JIANG H L, et al. Variable structure control technology of the fine tracking assembly in airborne laser communication system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(5):934-938.
- [7] 张秉华,张守辉. 光电成像跟踪系统[M]. 成都:电子科技大学出版社,2003.
ZHANG B H, ZHANG S H. Photoelectric imaging tracking system[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2003.
- [8] 白宏. 光电跟踪系统的视轴稳定控制[D]. 成都:电子科技大学,2008.
BAI H. The opto-electronic tracking system line-of-sight stabilization control[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008.
- [9] 王佩,吕梅柏,李言俊,等. 基于HLA的机载激光武器仿真系统设计[J]. 西北工业大学学报,2011,29(2):198-204.
WANG P, LÜ M B, LI Y J, et al. An Airborne Laser (ABL) weapon simulation system based on HLA [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(2):198-204.
- [10] 陶坤宇,王富,周彦平,等. 卫星光通信高速精确跟踪瞄准实现技术[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(11):1707-1711.
TAO K Y, WANG F, ZHOU Y P, et al. Hi-speed fine tracing pointing control for IOC[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(11):1707-1711.
- [11] 黄海波,左韬,陈晶,等. 复合轴精跟踪系统伺服带宽的优化设计[J]. 红外与激光工程,2012,41(6):1561-1565.
HUANG H B, ZUO T, CHEN J, et al. Optimum design of servo bandwidth for fine tracking subsystem in compound-axis system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6):1561-1565.

(上接第72页)

- [10] 崇阳,张科,吕梅柏. 基于“当前”模型的 IMM-UKF 机动目标跟踪融合算法研究[J]. 西北工业大学学报,2011,29(6):919-926.
CHONG Y, ZHANG K, LU M B. Exploring a better IMM-UKF fusion algorithm based on current statistical model in target tracking[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(6):919-926.
- [11] 孙松斌,宋建梅,张婧. 超低空拦截导弹武器系统的 UKF-IMM 目标跟踪算法[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(10):2367-2371.
SUN S B, SONG J M, ZHANG J. Target tracking algorithm of super-low altitude interceptors based on UKF-IMM [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(10):2367-2371.