

〈制导与对抗〉

## 红外成像/被动微波复合制导技术研究

夏团结, 申 涛, 方 琛, 宋敏敏, 刘会文  
(上海航天控制技术研究所, 上海 201100)

**摘要:** 红外成像/被动微波复合技术在目标探测和识别系统中具有较大的优势。单一的红外成像探测精度高, 且不易受干扰, 但无法在雾天等恶劣环境下工作, 并且搜索范围有限; 单一的被动微波探测具有作用距离远、不易受天气干扰、可大范围搜索等优点, 但制导精度差<sup>[1]</sup>。红外成像/被动微波双模复合技术实现了互补, 克服了各自的不足, 综合了各自的优点, 可以大幅提高导弹的技战术指标, 实现精确制导。为此本文进行了复合制导方案设计, 深入研究了红外随动微波技术, 通过对复合交班流程的梳理, 建立了复合交班仿真模型, 最后基于动态目标模拟完成了复合制导技术的验证。

**关键字:** 红外成像; 被动微波; 双模复合; 精确制导

中图分类号: TN966 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2018)05-0481-06

## Composite Guidance Technology Research on Passive Microwave for Infrared Imaging

XIA Tuanjie, SHEN Tao, FANG Min, SONG Minmin, LIU Huiwen  
(Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201100, China)

**Abstract:** Infrared imaging/passive microwave composite technology in a target detection and identification system has inherent advantages. For example, infrared imaging detection accuracy is high, and not susceptible to interference, but cannot work in harsh environments, and search range is limited. Alternatively, millimeter wave detection has the advantage of distance and is not susceptible to weather interference, which allows a wide search range and other advantages, but produces poor guidance accuracy. Infrared imaging/passive microwave dual-mode composite technology provides a complementary system to overcome individual shortcomings, and the combined advantages can greatly improve a missile's technical and tactical indicators to achieve precise guidance. In this paper, the composite guidance scheme is designed, and the infrared follow-up microwave technology is studied in depth. Through the compound handover process, the composite model is established. Finally, verification of the composite guidance technology is performed based on dynamic target simulation.

**Key words:** infrared imaging, passive microwave, two-mode complex, precise guidance

### 0 引言

在现代战争中, 导引头技术对精确制导起到了至关重要的作用, 复合导引头的发展是这项技术的发展方向之一, 现阶段微波和红外成像导引技术必将引导导引头的发展方向, 通过攻关导引头中双模复合随动指向技术和复合交班技术对提高导弹的作用距离、精度, 解决导引头的功能化限制具有重要的意义<sup>[2]</sup>。

红外凝视成像导引头具有跟踪精度高、响应快的

特点, 但由于受到探测器性能、大气透过率、复杂背景干扰等影响, 因此作用距离相对有限, 限制了后续红外导引头未来的发展, 因此提出采用微波复合技术, 解决远距离时红外无法准确识别目标的问题<sup>[3]</sup>。随着武器系统对导引头的要求越来越高, 通过微波与成像的交班, 可以大幅提高导弹的作用距离, 大幅提高导引头在复杂战场环境下的适应能力。

### 1 红外成像/被动微波复合制导总体设计

收稿日期: 2017-07-04; 修订日期: 2018-01-14.

作者简介: 夏团结 (1989-), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事导引头控制系统设计。

红外成像/被动微波复合制导技术主要由传感系统和交班系统来完成。红外成像传感系统负责采集目标相对于外界辐射的红外能量，在图像处理上即目标灰度值与背景灰度值的对比，最终完成空间环境中目标与复杂背景的分离<sup>[4]</sup>。被动微波负责检测目标相对外界辐射的微波信号，利用微波天线在惯性空间中的旋转来解调目标相对于弹轴的角度，地面雷达按照要求把实测信息上传导引头用于微波对目标的比对分选，再利用微波时延跟踪原理实现电子角跟踪，输出目标视线与弹轴的夹角信号，最后在目标落入红外探测视场后，红外系统稳定截获目标后完成交班。该复合制导技术通常应用于末端反舰导弹上，目标具有强微波辐射，因此被动微波具有较远的作用距离，通常大于15 km，而反舰导弹类目标通常采用涡喷或涡扇发动机，红外特征较弱，作用距离仅有2 km到6 km；被动微波视场大、作用距离远但精度低，红外作用距离近但抗干扰能力强、精度高。因此采用红外成像/被动微波双模复合制导模式可以大幅提高导弹的技战术指标，兼具作用距离远、抗干扰能力强等优点<sup>[5]</sup>。

### 1.1 制导模式和工作阶段

红外成像制导是指接收目标热辐射信号，通过对目标热辐射能量和背景热辐射能量的提取对比，区分分选目标。被动微波制导是指接收目标主动辐射的微波信号，完成目标识别功能<sup>[6]</sup>。被动微波系统接收目标空间辐射传输的雷达信号，分解后按照装订雷达参数（包括载频、重频、脉宽等参数）分选目标。红外成像/被动微波复合制导技术方式分为复合制导模式和全程红外成像制导模式。复合制导模式是指导弹发

射并截获微波目标后，进入微波制导模式，当红外系统识别出红外目标并捕获后，由微波制导模式转入到红外制导模式，直至末端交汇；全程红外成像制导模式是指导弹在架上截获红外目标后，导弹发射，全程红外跟踪制导直至末端交汇。

导引头不同模式、不同阶段下工作原理如图1所示。

制导技术根据不同工作模式工作在不同的阶段：微波比例阶段，红外比例阶段。在复合制导模式下，仅有微波截获则红外随动微波为微波比例阶段，微波与红外均截获目标并判别为真实红外目标时转入红外比例阶段；在全程红外制导模式下，始终工作在红外比例阶段。

### 1.2 复合交班流程设计

复合制导系统接收武控、红外成像信息、微波信息的输入信号，判别复合制导技术的工作模式。在仅有微波截获时红外光轴随动微波视线指向，在红外与微波同时截获时判别是否满足交班判据，实现交班切换；在红外成像截获时按红外视线角速度生成制导指令。

具体交班流程如图2所示。

被动微波制导方式典型目标为各种亚音速和超音速反舰导弹，兼顾飞机类目标。目标飞行速度一般在200 m/s到800 m/s，最小飞行高度为3 m，典型机动方式是跃起俯冲。被动微波制导系统半视场不小于20°，工作频段在9 GHz到17 GHz。在目标功率增益积不小于28 dBW时，制导系统最大作用距离不小于15 km，而红外成像制导方式的典型目标为各种亚音

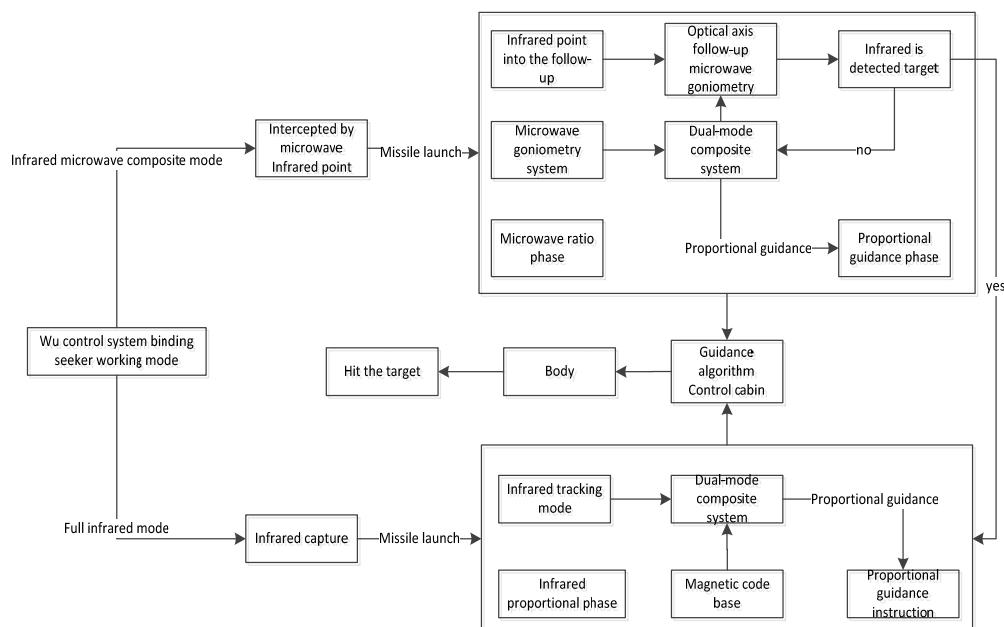


图1 复合制导技术工作原理 Fig.1 The principle of composite guidance technology

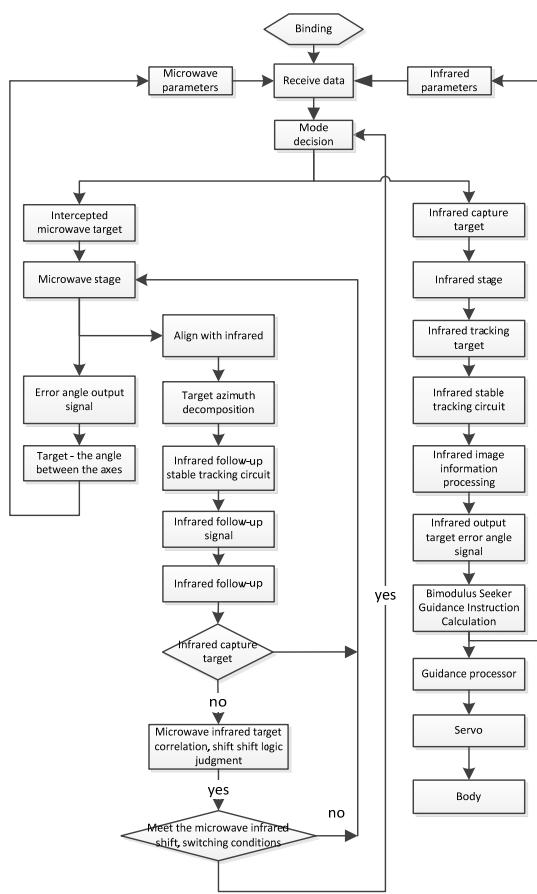


图2 复合制导技术交班流程

Fig.2 Composite guidance technology shift process

速和超音速反舰导弹的发动机,通过对发动机热辐射能量检测,获取目标源灰度值、尺寸大小、置信度等信息来分选目标,在实验室环境下,模拟目标要求在温度不低于 $250^{\circ}$ ,口径大小不低于0.2 mm的情况下,制导系统最大作用距离不小于6 km,正常情况下导弹先根据地面雷达装订的信息,在目标进入15 km以内按一定的方向和角度打出去后,微波先截获目标,制导距离拉近到6 km以内,红外成像系统可以有效执行。

在复合制导模式下,红外未截获目标而微波截获时,依据微波测角测得的目标相对于弹轴的夹角,经过坐标变换,解算出红外双框架所需进动的角度,从而控制框架指向目标,弹目距离接近到能够满足红外

的截获条件,则转入到红外跟踪,实现微波向红外的交班。在惯性空间中,导弹导引头交班的可能性主要取决于两个制导系统的探测视场以及随动时红外探测器指向轴的作用精度,由于被动微波的探测视场单边不大于 $20^{\circ}$ ,目标落入微波视场后,就会启动红外探测轴去指向该目标,而探测轴上的探测器视场只有 $1^{\circ}$ 到 $3^{\circ}$ ,因此如何设计随动系统使微波测角误差和红外探测轴指向误差之和最终小于 $1^{\circ}$ ,是交班的重要前提,红外探测轴精确指向目标的关键。

## 2 红外随动微波设计

在红外随动阶段,通过红外与微波之间的传感器测量值之差调制到红外坐标系下俯仰偏航方向转动指令,红外光轴利用此信号控制红外两轴框架向误差减小的方向运动。

### 2.1 红外随动原理

红外测角信号由测量红外俯仰、偏航方向光轴与弹体夹角的传感器与旋转方向的传感器信号合成后转换到微波坐标系下得到。

微波信号测得的是弹体坐标系下目标视线轴的位置,具体流程如图3所示。

指向轴有两个框架,分别是俯仰框架和偏航框架,跟随控制回路包含一个速度稳定回路、一个位置反馈回路。速度稳定回路是由陀螺敏感出指向轴的两轴框架误差角速度,反馈于电机的输入端,用于提高电机的快速性及稳定性。跟踪回路是指向轴的两轴框架测出的俯仰、偏航方向相对于目标的视线角,再通过和框架码盘反馈的框架角解算出误差角,将误差角积分、放大校正后送给电机输入端,控制电机使得误差角逐渐减小。

### 2.2 红外随动调制解调算法设计

红外成像/被动微波调制解调算法包括将红外方位和俯仰角度转换为微波平面极坐标系下和将微波/红外误差角调制解调到红外俯仰、偏航误差角两部分内容。

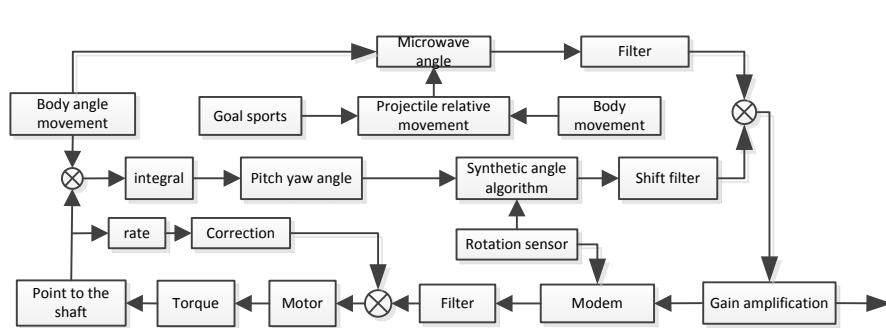


图3 红外随动原理

Fig.3 Infrared follow-up principle

红外框架方位和俯仰角度转换为天线平面极坐标的方程如公式(1)~(3)所示:

$$\cos\phi = \cos\theta_n \cos\theta_w \quad (1)$$

$$\phi = \alpha \cos(\cos\theta_n \cos\theta_w) \quad (2)$$

$$U_\phi = \phi \sin \left( \arctan \left( \frac{-\tan\theta_n}{-\sin\theta_w} \right) + \theta_x + \gamma \right) \quad (3)$$

式中:  $\theta_n$ 、 $\theta_w$  为俯仰、偏航的角度;  $\phi$  为红外测角幅值;  $U_\phi$  为红外测角;  $\gamma$  为弹旋补偿角度;  $\theta_x$  为弹体旋转角度。

通过公式(4)形成微波误差:

$$U_N = U_w - U_\phi \quad (4)$$

误差指令通过公式(5)~(8)解调至俯仰、偏航框架坐标系:

$$X_N = U_N \cos \Delta r_1 - U_{N-1} \quad (5)$$

$$Y_N = U_N \sin \Delta r_1 \quad (6)$$

$$\rho_N = \sqrt{X_N^2 + Y_N^2} / \sin \Delta r_1 \quad (7)$$

$$\theta_N = \arctan(Y_N, X_N) - \theta_x \quad (8)$$

最终解算到框架方位和俯仰误差如公式(9)和(10)所示。

$$\Delta\theta_n = \rho_N \sin(\theta_N) \quad (9)$$

$$\Delta\theta_w = -\rho_N \cos(\theta_N) / \cos(\theta_w) \quad (10)$$

式中:  $U_w$  为微波测角;  $U_N$  为红外测角与微波测角差值;  $X_N$ ,  $Y_N$  为极坐标系下俯仰偏航角度分解;  $\Delta r_1$  为  $U_{N-1}$  和  $U_N$  相关时刻间弹旋转角度变化;  $\rho_N$ ,  $\theta_N$  为极坐标系下失调角;  $\Delta\theta_n$ ,  $\Delta\theta_w$  为微波指向角解算到红外俯仰偏航方向的失调角。

### 2.3 视线角速度提取

建立弹上指向轴坐标系和视线坐标系,  $O-X_a Y_a Z_a$  为指向轴坐标系, 记为  $A$ ;  $O-X_s Y_s Z_s$  为目标视线坐标系, 记为  $S$ 。导弹前端探测器指向轴的中心  $O$  记为原点, 探测器指向轴记为  $OX_a$ , 敏感弹体轴向目标位置, 以指向目标为正: 目标视线轴记为  $OX_s$ , 即目标与指向轴中心的连线, 指向目标为正, 主要敏感目标在视线方向的位置<sup>[7]</sup>。

从而得到视线角计算方法如公式(11)所示:

$$q_y = \int \omega_{ay} + \varepsilon_y \quad (11)$$

$$q_z = \int \omega_{az} + \varepsilon_z$$

式中:  $q_y$  为偏航视线角;  $q_z$  为俯仰视线角;  $\omega_{ay}$  为偏航指向轴角速度;  $\omega_{az}$  为俯仰指向轴角速度;  $\varepsilon_y$  为偏航失

调角;  $\varepsilon_z$  为俯仰失调角。

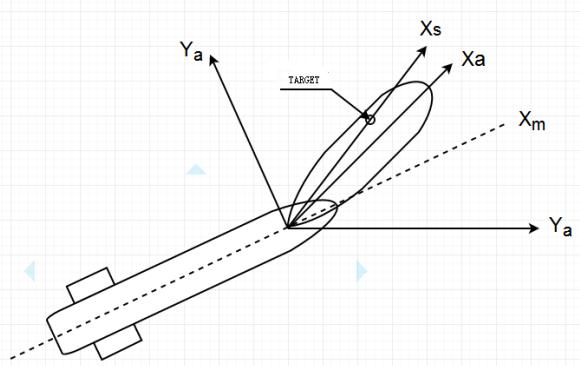


图4 弹上指向轴坐标系和视线坐标系

Fig.4 Shaped on axis and line of sight coordinate system

每次更新失调角后, 选取最新的 50 组视线角进行线性最小二乘拟合, 假设段时间内的视线角为线性曲线, 如公式(12)所示:

$$q = a + b * t \quad (12)$$

得到视线角速度  $q$  的估计值  $b$ :

$$b = \frac{n * \sum(t * q) - \sum t * \sum q}{n \sum t^2 - \sum t * \sum t} \quad (13)$$

式中:  $t$  为图像周期,  $n=50$ 。

当目标被干扰, 图像无法给出失调角信息时, 舍弃最新的两组视线角, 视线角速度保持匀速不变, 当目标重新被截获连续三次后, 利用干扰前最后一组视线角  $q_a$  以及干扰后第三组视线角  $q_b$  进行线性插值, 补充中间受干扰时刻的视线角  $q_i$ :

$$q_i = q_a + \frac{q_b - q_a}{t_b - t_a} * t_i \quad (14)$$

插值完毕后, 同样选取最新的 50 组视线角进行线性最小二乘拟合, 将视线角速度进行更新。

### 3 红外随动微波仿真实验

仿真模型中通过弹体前端指向轴下端固定的三向陀螺仪、加速度计以及指向轴在俯仰、偏航方向的数字码盘和光学探测仪等传感器采集的实时导引头角速度( $\omega_{mx}$ ,  $\omega_{my}$ ,  $\omega_{mz}$ )、导引头加速度( $a_{mx}$ ,  $a_{my}$ ,  $a_{mz}$ )、指向轴俯仰、偏航运动位置( $\lambda_y$ ,  $\lambda_z$ )及目标在俯仰、偏航方向的失调角( $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_z$ )和运动速度  $\dot{R}$  等数据, 并通过弹上计算机送出指向轴控制信号( $u_y$ ,  $u_z$ ), 实时控制指向轴稳定指向目标在空间中的位置, 同时把目标相对视线加速度( $\dot{q}_y$ ,  $\dot{q}_z$ )送到制导板, 形成舵机控制指令, 最终实现微波比例导引。

仿真中所用红外系统模型经过实验室及外场试

验验证, 模型与实物重合度很高, 可以用于设计指导, 具体流程如图 5 所示。

要控制红外凝视成像导引头前端探测器指向目标, 就要对指向轴实现俯仰和偏航两个方向的控制, 控制系统包含两个回路, 一个回路是指向轴角速度反馈回路, 另一个回路是目标误差角反馈回路, 速度回路有利于提高系统的稳定性, 位置回路有利于提高控制系统的快速性, 两个回路间存在耦合关系, 且速度回路传感器的测量精度要高于位置回路传感器的测量精度, 所以通过两个回路间的耦合关系, 建立合适的滤波器, 即可提高导弹导引头的复合随动性能。

复合导引头红外随动微波技术主要是使探测器指向轴根据微波在空间坐标系中测量出的目标运动角度差实时指向目标位置, 并在随动过程中通过导引头内部软件输出正比于目标实现角速度的误差电压量, 同时电压值对空间中弹体摆动对指向轴造成的影响具有解耦作用<sup>[8]</sup>。通常情况下, 红外随动微波系统由滤波器和反馈控制组成, 滤波器主要对产生随动角的信号进行毛刺滤波, 控制的任务则是有效地控制红外探测器指向目标并输出目标实现角速度。

仿真输入目标 4°/s 视线角速度, 弹体 3° 1 Hz 圆锥摆。仿真效果如图 6~图 8 所示。

复合模式下导引头输出视线角速度在 0.56 s 后与真实视线角速度吻合, 视线角速度输出时间常数为 0.19 s。弹体扰动为 3° 1 Hz 圆锥摆, 在此条件下对应的解耦系数最大值为 1.5%。通过仿真, 4°/s 视线角速度下导引头红外指向轴能够稳定随动射频测角视线

轴, 误差小于 0.6°, 在红外成像导引头视场土 1.0°内, 可以实现 4°/s 下交班概率 100%。

采用实物在微波环境下进行了验证。在实验室条件下, 使制导系统工作在复合模式下, 目标规定角速度运动, 转台按要求摆动, 100%可以完成交班。在外场环境下微波信号受多路径干扰输出较差, 但红外成像视场较大, 也均能完成微波到红外成像的正常交班。

图 9 为试验室内复合交班试验, 红外随动微波信号品质较好, 目标基本在视场中心, 全程均满足交班条件; 图 10 为外场的交班情况, 图中微波信号有直流偏差, 且波形较差, 但通过合理的流程设计、滤波设计及交班判据设定, 圆满完成了外场交班试验。

#### 4 结论

本文针对红外成像/被动微波复合制导技术进行了研究。分别从复合制导工作模式, 交班流程, 红外随动微波算法设计等方面论述了红外成像/被动微波复合制导的工作原理、工作流程、复合模式下的随动算法等, 并通过试验室内场试验和外场试验验证了设计的正确性。

红外成像/被动微波复合制导技术研究是光电探测领域的先进技术, 论文充分证明了红外探测指向轴在随动微波目标且目标 4°/s 速度以下运动时, 随动指向控制精度可以保证目标一直处于红外探测器光学视场中心处的±1.0°以内, 不会丢失目标, 为 100% 的交班概率提供了有力的支撑。

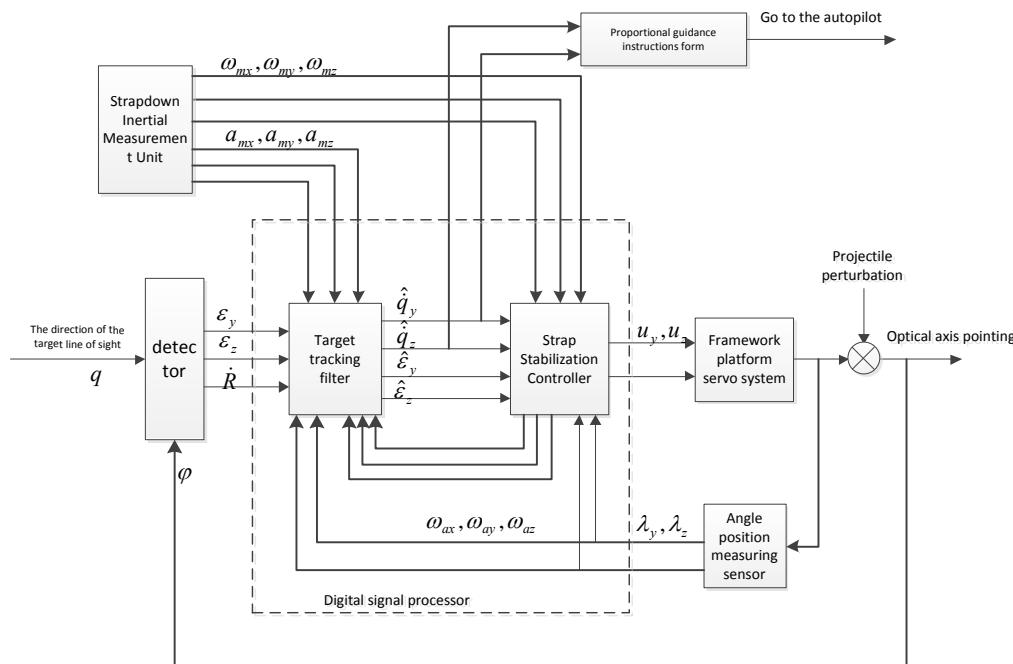


图 5 红外随动角跟踪仿真实验

Fig.5 Simulation of infrared follow angle tracking

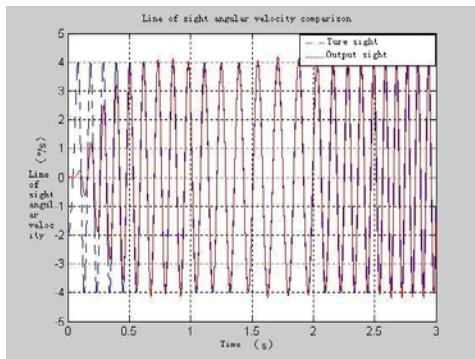


图6 真实角速度与输出角速度比较

Fig.6 Comparison of true angular velocity and output angular velocity

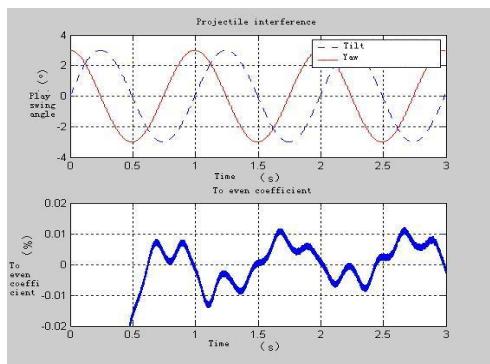


图7 摆动下解耦性能 Fig.7 Swing performance

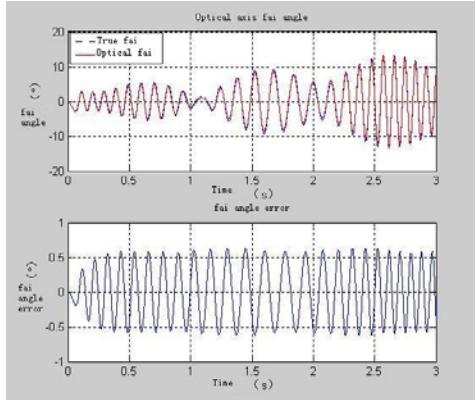


图8 交班性能仿真

Fig.8 Shift performance simulation

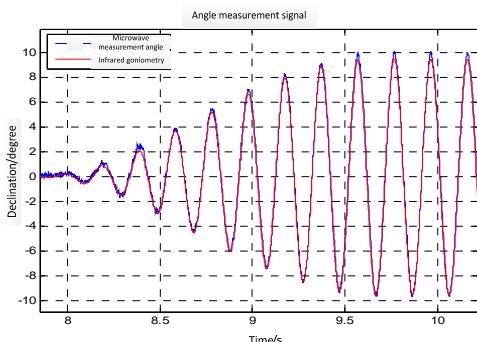


图9 实验室内红外/微波交班

Fig.9 Laboratory infrared microwave shift

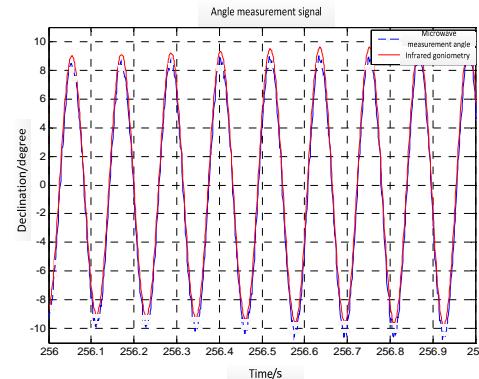


图10 外场试验红外/微波交班

Fig.10 Field experiment infrared microwave shift

通过对红外随动微波技术的研究，初步掌握了随动指向精度对红外有效视场交班的影响，并进行了系统仿真验证了交班算法的正确性，能正确输出红外探测随动角度。本文在复杂技术状态攻关的基础上，实现了在快速目标视线角速度移动的情况下，控制电机分解到指向轴坐标系下稳定跟随微波误差角，使红外系统正确指向目标。

## 参考文献：

- [1] 穆虹. 防空导弹雷达导引头设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1996: 41.  
MU Hong. Design of Air Defense Missile Seeker[M]. Bei Jing: Aerospace Press, 1996: 41.
- [2] 刘永. 微波被动/红外复合导引头制导信息合成方法研究[J]. 科学技术与工程, 2008(6): 12-16.  
LIU Yong. Research on Synthesis of Guidance Information for Microwave Passive/Infrared Composite Seeker[J]. Science and Technology and Engineering, 2008(6): 12-16.
- [3] 张林, 龙飞, 潘莉莉. 外军舰载舷外有源诱饵技术现状[J]. 海军大连舰艇学院学报, 2010, 33(1): 114-116.  
ZHANG Lin, LONG Fei, PAN Lili. Technical Status of Active Gull Carrying Outboard Bait[J]. Journal of the Dalian Naval Academy, 2010, 33(1): 114-116.
- [4] 孙静, 于艳梅, 孙昌明. 多模复合制导技术与装备发展分析[J]. 制导与引信, 2005, 26(3): 5-10.  
SUN Jing, YU Yanmei, SUN Changming. Analysis of multimode composite guidance technology and equipment development[J]. Guidance and fuze, 2005, 26(3): 5-10.
- [5] 梁薇, 张科. 精确制导武器发展及其关键技术[J]. 火力与指挥控制, 2008(12): 5-7.  
LIANG Wei, ZHANG Kei. Precisely guide the development of weapons and their key technologies[J]. Fire and command control, 2008(12): 5-7.
- [6] 储小川, 赵芳铭, 汪朝群. 雷达/红外双模导引头中的红外子系统[J]. 红外与激光工程, 2002(8): 283-285.  
CHUN Xiaochuan, ZHAO Fangming, WANG Chaoqun. Infrared subsystem in radar/infrared dual-mode seeker[J]. Infrared and Laser Engineering, 2002(8): 283-285.
- [7] 高伟亮. 双模复合寻的制导的关键技术[J]. 飞航导弹, 2006(6): 54-57.  
GAO Weiliang. Key Technology of Dual - mode Compound Seeking Guidance[J]. Air Navigation Missile, 2006(6): 54-57.
- [8] 赵善彪, 张天孝, 李晓钟. 红外导引头综述[J]. 飞航导弹, 2006(8): 42-45.  
ZHAO Shanbiao, ZHANG Tianxiao, LI Xiaozhong. Infrared Seeker Overview[J]. Air Navigation Missile, 2006(8): 42-45.