

空天目标测控信息多模态适配融合方法

李伟^{1,3}, 程先哲², 刘航², 王磊²

(1. 国防科技大学, 长沙 410073; 2. 信息支援部队工程大学, 武汉 430030; 3. 中国人民解放军 95983 部队, 酒泉 732750)

摘要: 针对单一的空天目标测控信息融合方法难以应对传感器突发失效、目标干扰突变及强电磁干扰等复杂场景的局限, 提出测控信息多模态适配融合方法。在自适应加权融合方法的基础上集成了单台光电-雷达异构融合模型和航迹预报补偿机制, 能够适应弹道式目标、临近空间高超声速滑翔目标和航空飞行器等典型空天目标的运动特性。为进一步提升传感器网络对动态环境的适应性, 设计了基于动态门限决策的多模态切换方法, 以此作为实现适配融合的核心支撑, 动态门限也避免了融合模式频繁误切换或滞后切换。通过体系化创新方法, 构建了超越单一算法自适应调节能力的多模态融合体系。实验表明, 多模态适配融合方法显著提升了传感器网络对空天目标的全程测控能力和航迹融合处理精度。

关键词: 多模态; 融合; 适配; 测控信息; 空天目标

中图分类号: TP391.4; V556 **文献标志码:** A

Multi-modal Adaptive Fusion Method for Aerospace Target Tracking and Control Information

LI Wei^{1,3}, CHENG Xianzhe², LIU Hang², WANG Lei²

(1. National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. Information Support Force Engineering University, Wuhan 430030, China; 3. Unit 95983, PLA, Jiuquan 732750, China)

Abstract: Conventional single-mode information fusion methods for aerospace target tracking and control often struggle with complex scenarios such as sudden sensor failure, abrupt target interference, and intense electromagnetic jamming. To address these limitations, the paper proposes a multi-modal adaptive fusion method that accommodates the kinematic characteristics of typical aerospace targets, including ballistic missiles, near-space hypersonic glide vehicles and aircrafts. To further enhance the sensor network's adaptability to dynamic environments, a dynamic-threshold-based multi-modal switching strategy is designed, serving as the core mechanism for adaptive fusion while effectively preventing frequent false or delayed mode switching. Through systematic innovation, a multi-modal fusion architecture is established that surpasses the adaptive capability of the single algorithm. Experimental results demonstrate that the proposed method significantly improves both the full-course tracking and control capability for aerospace targets and the accuracy of trajectory fusion processing.

Key words: multi-modal; fusion; adaptive; tracking and control information; aerospace target

基金项目: 国家自然科学基金(12402420); 基础加强计划技术领域基金(2023-JCJQ-JJ-0183)。

收稿日期: 2025-05-23; **修订日期:** 2025-08-03

引言

随着空天飞行器向临近空间、深空及高超声速领域加速拓展^[1-3],其飞行轨迹呈现跨域广、动态强等特征,给测控系统带来了极大的挑战^[4]。传统单一光电、雷达、遥测传感器受限于视距约束、波段衰减及抗干扰能力不足,难以独立完成全程高精度测量。为此,需构建广域分布式多传感器协同观测体系,通过时空接力和信息融合实现目标跟踪全覆盖^[5]。

信息融合是通过对多源数据进行检测、关联、组合以及计算等操作来挖掘比单个信息源更全面、更精细的信息的过程^[6],虽然已在航空航天测控领域广泛应用^[7],但在融合算法、稳定性、权重分配等关键技术方面仍存在诸多难点^[8]。现有基于固定规则或单一策略的融合方法,在面临传感器突发失效、目标机动突变、强电磁干扰等复杂动态场景时,表现出融合策略僵化、适应性不足的局限性。为解决多源异构传感器动态组网时融合模式适配和切换的问题,以及固定融合门限在复杂多变环境中融合性能下降的问题,提出测控信息多模式适配融合方法。在经典自适应加权融合算法的基础上进行体系化创新,集成了单台光电-雷达异构融合模型和航迹预报补偿机制,并设计了基于动态门限决策的多模式切换方法,作为实现适配融合的核心支撑,构建了超越单一算法自适应调节能力的多模式融合体系。多模式融合在某些模式缺失的情况下也可以有效保证信息传递的准确性^[9],为获取空天目标在复杂环境中的全程高精度测控信息提供了系统性解决方案。

1 目标跟踪特性与融合模式

1.1 典型空天目标跟踪特性

(1) 弹道式目标^[10]

弹道式目标助推段发动机喷焰产生强烈的光电辐射和可见光,雷达散射截面(Radar cross section, RCS)较大,光电和雷达最易探测;中段发动机关机,光电辐射显著减弱,主要依靠遥测和雷达探测;再入段强烈的气动加热使弹头表面温度极高,产生较强的光电辐射,但同时被等离子体鞘套包裹,等离子体对雷达波产生强烈吸收、反射和折射(“黑障”现象),对遥测、雷达无线电信号造成严重干扰甚至中断。

(2) 临近空间非弹道式目标^[11](高超声速滑翔目标)

临近空间非弹道式目标表面持续高温产生的强烈光电辐射为光电传感器提供了重要的跟踪信号源。雷达散射特性复杂,RCS通常较小,且随飞行姿态(迎角、侧滑角)和机动状态剧烈变化。气动加热导致等离子体鞘套相比弹道式再入体更薄、更不均匀。目标广泛采用低可探测性设计,如外形隐身、热管理、吸波材料等,进一步降低光电和雷达信号特征。

(3) 航空飞行器

包含亚声速(大中型飞机)、跨声速(部分小型飞机)和超声速(战斗机、轰炸机等),其速度远低于弹道式目标和临近空间非弹道式目标。RCS变化范围极大,外形、尺寸、材料和外挂物等均显著影响RCS。光电辐射主要来自发动机尾喷口(高温燃气)、机体蒙皮摩擦热和尾流,光电特征强度低于高超声速目标。

综上所述,传感器网络(包括光电、雷达、遥测传感器等)在跟踪这3类目标时,面临截然不同的挑战,需要采用不同的策略和技术。

1.2 测控信息融合模式

基于目标飞行特性、传感器探测跟踪特性及环境干扰等多重因素的综合影响,按有效参与融合的航迹数量,将传感器网络数据融合处理模式分为3种。不同模式及相应适配的信息融合处理方法如下:模式1,融合2路及以上有效航迹数据,适配自适应加权融合方法;模式2,融合单台光电角度数据与单台雷达

航迹数据(光电测量航迹数据需至少2台光电设备进行交会解算,单台光电设备只有方位和俯仰角度信息),适配单台光电-雷达异构融合方法;模态3,无有效航迹数据参与融合,适配航迹预报方法,根据空天目标不同类型,需2次适配航迹预报模型。

2 多模态适配融合方法

2.1 多模态数据预处理

(1)时空配准与误差校正

信息处理中心首先将采集到的测量数据进行时间对准^[12]、坐标变换^[13-14]、野值剔除与数据清洗等预处理,该过程也是保证数据融合质量的关键环节,之后再选用合适的方式进行融合。

(2)传感器网络模态感知

传感器网络模态感知划分为3个层级。首先通过解析各传感器端口号中预置的类别位和设备标识位实现设备级感知;其次基于报文结构中的跟踪目标标识字段完成目标级感知;最后,传感器网络信息处理中心依据设备级感知和目标级感知的结果,完成系统级的模态感知,为后续快速、精准适配融合方法奠定基础。

(3)局部航迹起始与关联

航迹关联即判断来自不同传感器的多条航迹是否代表同一目标^[15]。通过动态关联检测机制实现局部航迹起始与关联,传感器点迹优先与现有航迹进行相关性检测,未关联时触发新航迹起始判定,符合条件则生成初始化航迹。关联环节通过航向、位置、高程和速度构建多维度评估模型,划分支持域、模糊域、拒绝域三级决策区间。拒绝域直接排除关联,支持域明确匹配,模糊域则基于置信度权重优化计算,以最小关联代价(或不确定性)为准则确定最优关联解,实现多参数贡献度平衡。

2.2 自适应加权融合

自适应加权融合是依据每个传感器实时测量的数据,通过计算各自的测量方差,采用总均方差最小的原则,自适应地为每个传感器分配最优权值,使得整体融合结果达到最优。自适应加权数据融合方法如图1所示。假设n个传感器按照优化测量方差的方法,得到各自优化后的测量方差分别为 $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_n^2$;n个传感器在某一时刻独立测得的参数值分别为 x_1, x_2, \dots, x_n ;n个传感器的最优权值分别设为 w_1, w_2, \dots, w_n ;最终融合值为 \hat{x} 。则有

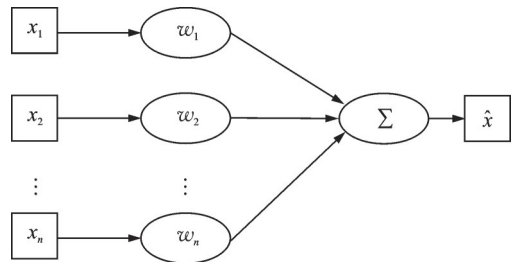


图1 自适应加权融合方法

Fig.1 Adaptive weighted fusion method

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n w_i = 1 \\ \hat{x} = \sum_{i=1}^n x_i w_i \\ \sigma^2 = \sum_{i=1}^n w_i^2 \sigma_i^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 σ^2 为总均方差,是各加权因子 w_i 的多元二次函数。

$$f(w_1, w_2, \dots, w_n) = \sum_{i=1}^n w_i^2 \sigma_i^2 \quad (2)$$

要使总均方差 σ^2 最小, $f(w_1, w_2, \dots, w_n)$ 需取极小值。因此,根据多元函数的极值定理可得

$$\begin{cases} \omega_i = \frac{1}{\sigma_i^2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}} \\ \sigma_{\min}^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}} \end{cases} \quad (3)$$

定义 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 为传感器的实测最优权值, 将式(3)代入式(1), 可求解 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 的值。

2.3 单台光电-雷达异构融合

靶场常用无激光测距功能的光电经纬仪, 单台光电设备探测目标时只有方位和俯仰角度信息, 用雷达数据进行时间匹配得到光电数据的距离信息, 再对带距离的光电数据进行后续滤波; 雷达和光电数据先进行一次野值剔除, 根据与航迹预报位置的偏差值为基准剔除野值, 剔除后的数据进入滤波器滤波并进行状态矢量融合, 输出更高精度的航迹。

将目标位置转换成三维直角坐标系下 x, y, z 的值, $\mathbf{X} = [x, y, z, v_x, v_y, v_z]$ 为具备位置和速度的测量数据, 则目标动态方程和传感器量测方程分别为

$$\begin{cases} \mathbf{X}(k+1) = \Phi[k] \mathbf{X}(k) + \Gamma(k) \omega(k) \\ \mathbf{Z}_k^i = \mathbf{H}_k^i[\mathbf{X}(k), k] + \mathbf{V}_k^i \end{cases} \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

式中: \mathbf{X} 表示目标状态矢量; Φ, Γ 分别代表目标状态矩阵和系统噪声矩阵; ω 为零均值的高斯白噪声。雷达和光电传感器的不同时空噪声和目标状态矢量互相独立。 \mathbf{Z} 为测量数据; \mathbf{H} 为观测矩阵; \mathbf{V} 为零均值的高斯白噪声, \mathbf{V} 与 ω 互不相干且不同时空互相独立, 上标 i 为 1 表示雷达测量值, i 为 2 表示光电设备测量值。

雷达和光电设备的测量数据, 作为点迹输入进行卡尔曼滤波。则航迹下一时刻的状态估计为

$$\hat{\mathbf{X}}^1(k+1) = \Phi \hat{\mathbf{X}}(k) + \mathbf{K}(k+1) [\mathbf{Z}^1(k+1) - \mathbf{H}(k+1) \Phi \hat{\mathbf{X}}(k)] \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{X}}^2(k+1) = \Phi \hat{\mathbf{X}}(k) + \mathbf{K}(k+1) [\mathbf{Z}^2(k+1) - \mathbf{H}(k+1) \Phi \hat{\mathbf{X}}(k)] \quad (6)$$

式中: \mathbf{K} 表示卡尔曼滤波增益矩阵。两个设备的观测数据经卡尔曼滤波后的结果, 再进行一次融合滤波输出, 作为最终航迹滤波结果

$$\hat{\mathbf{X}}^F(k+1) = \hat{\mathbf{X}}^1(k) + P(k+1) [\hat{\mathbf{X}}^2(k) - \hat{\mathbf{X}}^1(k)] \quad (7)$$

式中: P 为相关系数, 由 2 个设备的误差估计得到。

2.4 航迹预报

在航迹预报场景中, 由于没有传感器信息和目标加速度信息, 通常无法采用数值积分方法实现预报, 因此采用基于动力学模型的解析预报方法。

针对弹道式目标构建自由段和再入段弹道预报模型, 当预报精度要求较高时, 还需充分考虑地球高阶引力摄动的影响。经过多年持续研究, 本课题组在该领域积累了大量经验^[16-20]。针对临近空间非弹道式目标航迹预报中气动力参数(升力/阻力系数)未知导致加速度预测失准的核心矛盾, 文献[21]引入气动耦合状态变量构建非线性机动模型的创新解法, 解决了加速度趋势迭代更新问题, 从而实现对机动弹道的预报。针对航空飞行器运动的不确定性, 文献[22]提出了一种基于数据融合增强型粒子滤波算法, 为高动态飞行环境下的航迹预报提供了有效方法支撑。

3 基于动态门限决策的模态切换方法

本文针对“基于动态门限决策的模态切换”设计, 目的是通过实时评估系统状态和环境条件, 动态切换不同的融合策略或工作模式, 解决在传感器突发失效、目标机动突变、强电磁干扰等复杂动态环境下融合策略僵化、无法自适应调整的问题, 以维持传感器网络最优的跟踪性能和数据融合效果。

3.1 关键组件设计

3.1.1 模态定义及适配流程

设融合模态集合为离散状态空间

$$S = \{S_1, S_2, S_3\} \quad (8)$$

式中: S_1 为自适应加权融合模态; S_2 为单台光电-雷达异构融合模态; S_3 为航迹预报模态。

S_3 按探测跟踪目标类型进一步划分为状态子空间

$$S_3 = \{S_{31}, S_{32}, S_{33}\} \quad (9)$$

式中: S_{31} 为弹道式目标航迹预报模态; S_{32} 为临近空间非弹道式目标航迹预报模态; S_{33} 为航空飞行器航迹预报模态。依据上述融合模态设计的适配流程见图2。

3.1.2 决策指标

定义 t 时刻的 N 维决策指标向量为

$$m_t = [m_t^{(1)}, m_t^{(2)}, \dots, m_t^{(N)}]^T \quad (10)$$

本文构建了以下四维核心指标体系,通过构建评估体系驱动 m_t 决策。该指标体系支持按需构建和扩展。

(1) 传感器层指标。通过信噪比(Signal-to-noise ratio, SNR)、丢包率(Packet loss ratio, PLR)、数据更新率(Data update rate, DUR)、野值率(Outlier ratio, OR)等表征传感器原始数据质量。

$$m_t^{(1)} = \{SNR, PLR, \dots\} \quad (11)$$

(2) 融合层指标。基于融合残差序列(观测值与融合预报值之差)的统计特性量化模型匹配度与传感器可靠性。

$$m_t^{(2)} = \|Z_t - HX_{\hat{t}-1}\|_2 \quad (12)$$

式中: $X_{\hat{t}-1}$ 为状态预报向量。

(3) 目标行为层指标。基于目标机动检测结果动态调节门限,如目标高机动段提升门限,抑制瞬态突变导致的模态误切换。

$$m_t^{(3)} = \|\hat{a}_t\|_2 \quad (13)$$

式中: \hat{a}_t 为加速度估计向量。

(4) 环境层指标。建立干扰自适应门限模型为

$$m_t^{(4)} = g(J_k) = a \cdot e^{bJ_k} + c \quad (14)$$

式中: J_k 为干扰强度; a 为基础门限系数,决定零干扰时的最低SNR要求; b 为环境敏感度因子,控制门限随干扰增长的斜率; c 为鲁棒性补偿项,保障极端干扰下的最低性能。

3.2 动态门限设计

设 μ_t, σ_t 分别为计算窗口内(最近 N 个时刻)指标的均值和标准差,则动态门限可设为

$$\tau_t^{(i)} = \mu_t^{(i)} \pm \kappa \cdot \sigma_t^{(i)} \quad (15)$$

$$\mu_t = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t m_i \quad (16)$$

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=t-N+1}^t (m_i - \mu_t)^2} \quad (17)$$

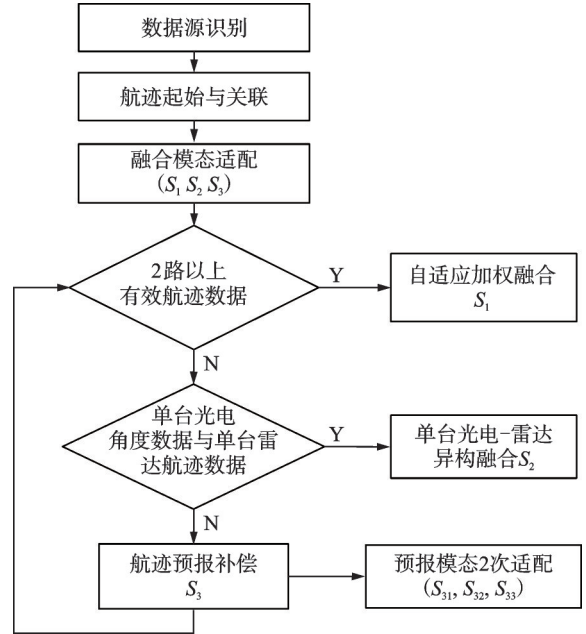


图2 融合模态适配流程

Fig.2 Fusion modality adaptation flow

κ 为可调系数,通过 κ 值实现环境自适应。

$$\kappa = \begin{cases} \kappa_s & \sigma_t < \sigma_w \\ \kappa_b & \sigma_t \geq \sigma_w \end{cases} \quad (18)$$

σ_w 为环境平稳性阈值(预设参数); κ_s 为小值(如1.5),环境平稳时收紧门限; κ_b 为大值(如3.0),环境波动时放宽门限。

根据指标类型区分门限方向,即上界约束型指标(如融合残差、干扰强度),表示为

$$\tau_t^u = \mu_t + \kappa \cdot \sigma_t \quad (19)$$

当 $m_t > \tau_t^u$ 时触发异常告警;下界约束型指标(如SNR)表示为

$$\tau_t^l = \mu_t - \kappa \cdot \sigma_t \quad (20)$$

当 $m_t < \tau_t^l$ 时触发异常告警。

3.3 模态切换逻辑

(1) 触发条件:当一个或多个关键决策指标连续 N 次超过对应的动态门限,则触发模态切换评估。

(2) 模态评估:综合当前所有决策指标和门限比较结果,结合预设的模态转移规则确定最可能的目标模态。

(3) 决策输出:输出需要切换到的目标模态。

(4) 防抖设计:为避免频繁的状态振荡,满足条件需持续一定的时间才切换。

(5) 切换回差设计: $\tau_{\text{return}} = \eta \cdot \tau_{\text{leave}}$,其中 $\eta > 1$ 。比如从 S_2 切换回 S_1 的门限高于从 S_1 切换到 S_2 的门限。需避免在模态边界因噪声导致的频繁切换。

(6) 优先级与互斥:定义模态优先级 $S_1 > S_2 > S_3$,确保同一时间只有一个主导模态生效。

(7) 切换执行与策略激活:融合中心加载并应用与目标模态对应的融合策略配置。

3.4 模态切换流程

融合模态切换流程如图3所示,整个方法可以概括为:

(1) 数据采集:实时获取各传感器数据、融合中间结果、环境监测数据等;

(2) 决策指标计算:并行计算各项决策指标 m_k ;

(3) 动态门限更新:根据指标计算结果更新动态门限 τ_k ;

(4) 触发条件判决:根据当前模态和指标、门限的比较结果,计算所有模态转移条件;

(5) 模态评估与决策:按照优先级顺序检查条件,如果条件满足,则触发模态转移;

(6) 执行切换:基于当前模态执行切换,得到最终融合结果并输出航迹;

(7) 循环反馈:将新的融合结果、传感器状态、环境信息反馈给指标计算和门限更新模块,形成闭环。

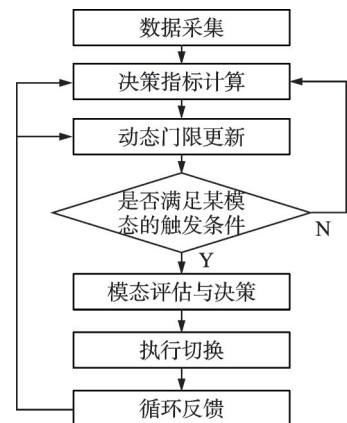


图3 融合模态切换流程

Fig.3 Fusion modality switching flow

4 实验与仿真分析

4.1 多模态仿真与分析

为对比多模态适配融合方法与单一规则融合方法的精度,以跟踪某弹道类目标为例,设置2组典型配置的传感器节点,每组均包含光电、雷达、遥测3个异构传感器节点,在同一传感器网络中进行时空接力测量。其中第1组为光电1、雷达1、遥测1;第2组为光电2、雷达2、遥测2。

实验设置各传感器的测距能力见表1,弹道目标全程飞行时间为500 s,高度与速度特征见图4,各传感器在跟踪探测性能、环境干扰等因素综合作用下的有效跟踪区间如图5所示,原始测量误差及均值如图6所示。在分布式的网络架构下,各传感器通过滤波算法完成本级测量数据预处理与局部航迹估计,随后通过网络将带有时间戳的局部航迹传输至信息处理中心进行多模态适配融合,信息处理中心选取的融合模式及变化情况如图7所示。

表1 传感器测距能力

Table 1 Ranging capability of sensors

传感器	理论作用距离	备注
遥测1	≥ 400 km	2 m 口径抛物面天线,S波段PCM-FM调制体制,码速率上限10 Mb/s,误码率优于 1×10^{-6} 。
遥测2	≥ 400 km	同上
雷达1	≥ 500 km(法线方向)	X波段相控阵体制,反射式跟踪,SNR=12 dB,RCS=1 m ² ,1 ms脉宽。
雷达2	≥ 350 km	C波段脉冲体制,反射式跟踪, $P_0 \geq 100$ W, $S_0 \geq -90$ dBW, $G_0 \geq -8$ dB,SNR=12 dB,RCS=1 m ² 。
光电1	≥ 300 km(对弹头目标)	400 mm口径中波红外探测器,分辨率320像素 \times 256像素,晴朗气象条件。
光电2	≥ 300 km(对弹头目标)	同上

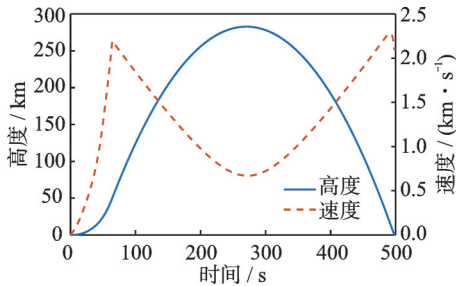


图4 弹道目标仿真高度与速度

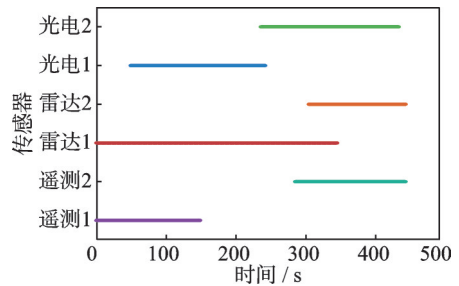


图5 传感器有效跟踪探测区间

Fig.4 Simulated altitude and velocity of ballistic target

Fig.5 Effective tracking and detection range of sensors

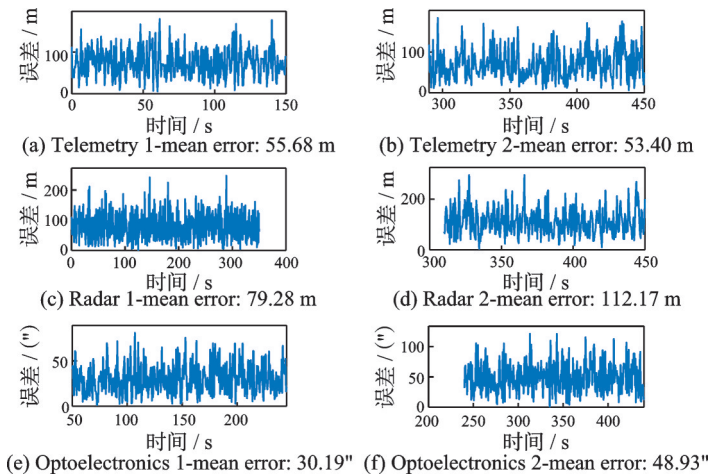


图6 传感器原始测量误差

Fig.6 Raw measurement error of sensors

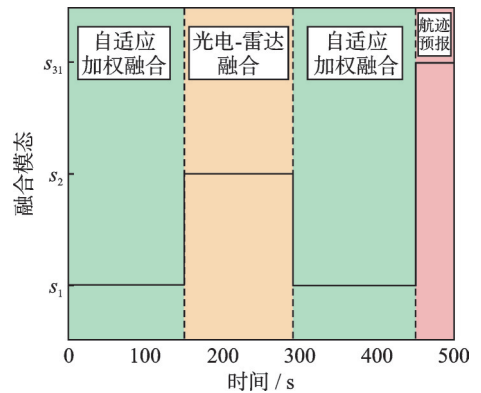


图7 融合模式变化

Fig.7 Fusion mode transition

(1) 位置估计精度分析

多模态适配融合与全程固定自适应加权融合、全程固定光电-雷达融合方法的位置均方根误差(Root mean square error, RMSE)如图8所示,数据分析见表2。

综上,对比3种融合方法在前450 s内位置RMSE的均值,多模态适配融合(50.4 m)优于自适应加权融合(57.8 m)和光电-雷达融合(69.3 m)。单一固定规则的融合方法均无效时,多模态适配方法能以较低初始误差持续输出预报航迹,实现了融合精度和连续性的突破。同时多模态适配融合通过精确匹配传感器有效区间与融合策略,尽量避免了单一固定融合规则下,仅有单台传感器而无法有效融合的局限。

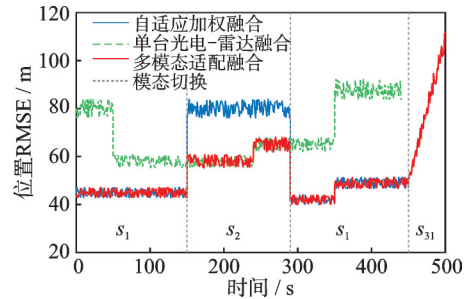


图8 多模态适配融合位置精度对比

Fig.8 Comparison of position accuracy for multi-modal adaptive fusion

表2 多模态适配融合效能分析

Table 2 Efficiency analysis of multi-modal adaptive fusion

时间阶段/s	多模态适配融合策略及位置RMSE	自适应加权融合状态及位置RMSE	光电-雷达融合状态及位置RMSE	多模态适配位置RMSE降低百分比/%	备注
0~50	S_1 , 46 m	有效, 46 m	无效, 79 m	41.7	光电传感器未有效跟踪, 光电-雷达无效融合, 仅输出雷达1局部航迹。
50~150	S_1 , 46 m	有效, 46 m	有效, 57 m	19.3	光电1开始有效跟踪, 光电-雷达开始有效融合。
150~240	S_2 , 57 m	无效, 79 m	有效, 57 m	27.8	仅有雷达1和光电1(高精度)有效; 自适应加权无效融合, 仅输出雷达1局部航迹。
240~290	S_2 , 64 m	无效, 79 m	有效, 64 m	19.0	仅有雷达1和光电2(低精度)有效; 自适应加权融合无效状态, 仅输出雷达1局部航迹。
290~350	S_1 , 43 m	有效, 43 m	有效, 64 m	32.8	4台传感器有效。
350~450	S_1 , 48 m	有效, 48 m	有效, 87 m	44.8	雷达1(高精度)失效, 雷达2(低精度)参与, 自适应加权和光电-雷达融合精度较上一阶段均降低。
450~500	S_{31} , 误差上升发散	无效	无效	—	所有传感器失效; 多模态适配基于积累的精度优势, 输出初始误差较低的预报航迹。
前450的均值	50.4 m	57.8 m	69.3 m	—	多模态适配融合优于自适应加权融合和光电-雷达融合。

(2) 速度估计精度分析

为全面评估多模态适配融合方法的性能,对比分析了多模态适配融合、全程固定自适应加权融合及全程固定光电-雷达融合3种方法在速度估计上的RMSE,结果如图9所示。

多模态适配融合方法在速度估计上同样展现出显著优势,对比3种融合方法在前450 s内速度RMSE的均值,多模态适配融合(6.2 m/s)优于自适应加权融合(7.1 m/s)和光电-雷达融合(8.5 m/s)。特别是在150~290 s自适应加权融合无效的阶段,通过适配光电-雷达融合模态,突破了单一融合模态自适应调节能力的约束,有效抑制了速度误差发散。实验表明,多模态融合体系不仅能提升位置估计精度,还能全面优化目标整个运动状态的估计质量。

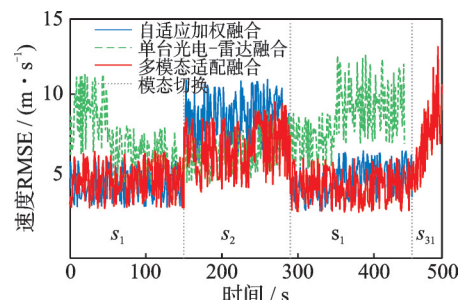


图9 多模态适配融合速度精度对比

Fig.9 Comparison of velocity accuracy for multi-modal adaptive fusion

4.2 动态门限仿真与分析

为验证传感器 SNR、环境干扰、融合残差、目标机动加速度决策指标与动态门限的自适应模型,利用本文 4.1 节选取的典型配置的传感器网络节点进行仿真。场景参数设置如表 3 所示,针对各场景设置了对应的传感器 SNR、融合残差、环境干扰、目标机动加速度基准值,并在此基础上添加了随机波动。动态门限参数设置如表 4 所示。设初始模态为 S_1 ,模态优先级为 $S_1 > S_2 > S_3$,其中 S_1 、 S_2 、 S_3 分别主要用于平稳场景、干扰场景、高机动场景。设置评估指标连续超限 5 次则触发模态切换流程,在保证响应速度的同时有效抑制瞬时干扰引起的误切换。

表 3 场景参数设置

Table 3 Scenario parameter setting

参数	数值	说明	SNR/dB	融合残差/m	环境干扰/dB	目标机动加速度/($m \cdot s^{-2}$)
总时长	1 000 步	仿真总步数	—	—	—	—
平稳场景	1~300 步	低干扰、低机动	20	1	1	<10
干扰场景	301~600 步	高干扰	10	3	9	<20
高机动场景	601~1 000 步	目标高机动	15	5	3	>30

动态门限与固定门限对比结果如图 10 所示。平稳场景(1~300 步),启动 S_1 模态,动态门限收紧,系统对异常更敏感,但通过连续触发机制避免误切换;干扰场景(301~600 步)干扰波动增大,触发切换到 S_2 模态,后续动态门限自动放宽,减少不必要的切换;高机动场景(601~1 000 步)融合残差显著增大,触发切换到 S_{31} 模态,回差机制($\eta > 1$)确保在残差短暂降低时不立即切回,保持 S_{31} 模态

表 4 动态门限参数设置

Table 4 Dynamic threshold parameter settings

参数	数值	说明
滑动窗口	50 步	历史数据统计窗口
κ 紧致值	1.5	平稳场景门限系数
κ 宽松值	3.0	波动场景门限系数
平稳阈值	5.0	场景稳定性判据
回差系数 η	1.3	防止边界振荡的滞回系数

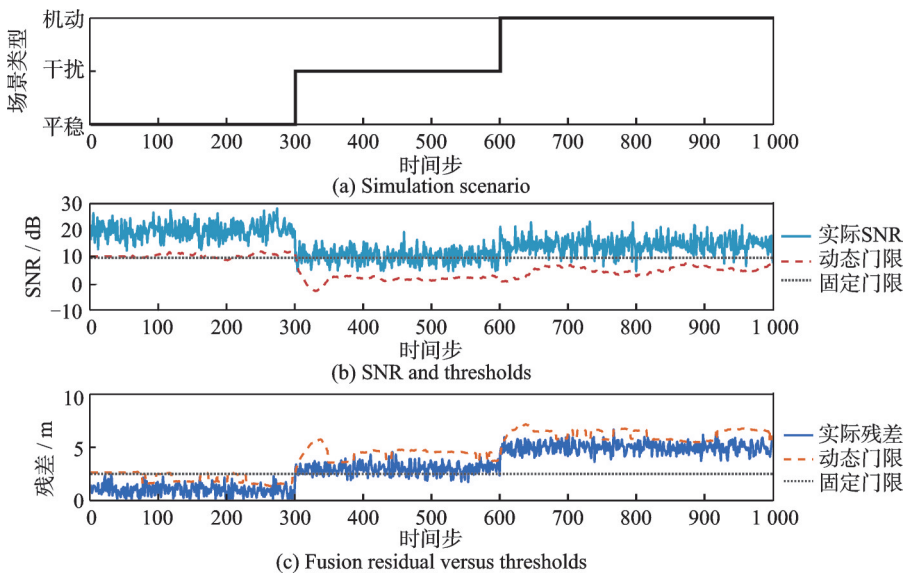


图 10 动态门限与固定门限对比

Fig.10 Comparison of dynamic threshold and fixed threshold

直到场景相对平稳。在干扰和高机动场景,固定门限无法准确、及时适应场景变化,固定门限也因无法放宽而频繁触发切换。动态门限与固定门限性能对比如表5所示。

实验表明动态门限机制通过环境感知、稳健决策、状态连续等优化设计,解决了干扰场景、目标高机动场景中融合模态难以准确、及时切换或频繁误切换的问题,提升了多源信息融合的质量和效率。

4.3 模态切换实时性分析

在本文4.1节使用多模态适配融合方法的条件下,实时记录融合处理耗时情况如图11所示,其中 S_1 、 S_2 、 S_3 融合耗时均值分别为8.9 ms、4.5 ms、2.3 ms,多模态适配融合耗时均值为6.8 ms。鉴于靶场实时信息帧速率通常为50帧/s,即单帧间隔为20 ms,结果表明在典型传感器网络节点配置中,多模态适配融合方法能够满足实时性需求。单帧处理最大耗时达到26.5 ms,超出20 ms帧间隔要求,可能由数据复杂性波动导致计算量骤增、外部干扰进一步增加处理耗时、资源竞争引起信息处理的短暂迟滞等原因导致。

5 结束语

本文通过集成自适应加权融合、光电-雷达异构融合、航迹预报补偿3种核心信息融合处理模态,有效克服了单一模态的局限性。同时设计了基于动态门限决策的多模态切换方法,实现了空天目标测控信息的多模态适配融合,显著提升了传感器网络对空天目标的测量精度和航迹融合输出的连续性,为构建强适应性的测控系统提供了重要的方法支撑。数据采集与处理的高效性及多模态感知与决策能力,将成为未来航空航天测控系统的核心竞争力。在本文的基础上,还可以进一步研究基于学习的智能决策机制、跨模态关联建模、不确定性推理等,实现数据采集与处理的智能化,进一步提升测控系统的整体效能与自主性。

参考文献:

- [1] 王长青.空天飞行技术创新与发展展望[J].宇航学报,2021,42(7):807-819.
WANG Changqing. Innovation and development prospects of aerospace flight technology[J].Journal of Astronautics, 2021, 42(7): 807-819.
- [2] 郑建成,谭贤四,曲智国,等.高超声速滑翔飞行器特性分析与防御发展趋势[J].飞航导弹,2021,11:52-57,70.
ZHENG Jiancheng, TAN Xiansi, QU Zhiguo, et al. Characteristic analysis and defense development trend of hypersonic gliding vehicle[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021, 11: 52-57, 70.
- [3] 郭宗易,王家琪,胡冠杰,等.面向空天飞行器的不确定性观测技术与控制方法研究综述[J].空天技术,2022,5:31-44.
GUO Zongyi, WANG Jiaqi, HU Guanjie, et al. Research review on uncertainty observation techniques and control methods for aerospace vehicles[J]. Aerospace Technology, 2022, 5: 31-44.

表5 性能对比量化分析

Table 5 Quantitative performance comparison analysis

性能指标	动态门限	固定门限	性能提升幅度/%
切换次数/次	7	27	74.1
平均稳定时间/步	71.5	35.2	103.1
有效融合占比/%	85.3	76.8	11.1
短时误切换(<50步)/次	2	9	77.8

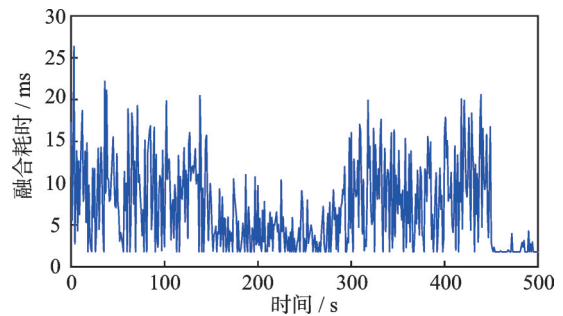


图11 单帧处理耗时

Fig.11 Single-frame processing time consumption

- [4] 刘小洁. 航天器外弹道测量数据处理方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
LIU Xiaojie. Research on data processing methods for spacecraft- exterior trajectory measurement[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [5] 曾雅俊, 王俊, 魏少明, 等. 分布式多传感器多目标跟踪方法综述[J]. 雷达学报, 2023, 12(1): 197-213.
ZENG Yajun, WANG Jun, WEI Shaoming, et al. Review of the method for distributed multi-sensor multi-target tracking[J]. Journal of Radars, 2023, 12(1): 197-213.
- [6] 徐伟华, 黄旭东, 蔡可. 基于粒计算的多源信息融合方法综述[J]. 数据采集与处理, 2023, 38(2): 245-261.
XU Weihua, HUANG Xudong, CAI Ke. Review of multi-source information fusion methods based on granular computing[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2023, 38(2): 245-261.
- [7] 何友, 刘瑜, 李耀文, 等. 多源信息融合发展及展望[J]. 航空学报, 2025, 46(6): 29-54.
HE You, LIU Yu, LI Yaowen, et al. Development and prospects of multisource information fusion[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(6): 29-54.
- [8] 沈琳琳, 徐大专, 孔晓龙, 等. 多雷达参数估计融合方法[J]. 数据采集与处理, 2025, 40(1): 197-206.
SHEN Linlin, XU Dazhuan, KONG Xiaolong, et al. Multi-radar parameter estimation fusion method[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2025, 40(1): 197-206.
- [9] 何贇泽, 谯灵俊, 郭隆强, 等. 以图像为主的多模态感知与多源融合技术发展及应用综述[J]. 测控技术, 2023, 42(6): 10-21.
HE Yunze, QIAO Lingjun, GUO Longqiang, et al. Survey on development and application of image-based multi-modal perception and multi-source fusion technology[J]. Measurement & Control Technology, 2023, 42(6): 10-21.
- [10] 赵蒙, 王明宇, 谢连杰, 等. 弹道导弹及其诱饵的运动特性研究[J]. 现代防御技术, 2023, 51(1): 135-144.
ZHAO Meng, WANG Mingyu, XIE Lianjie, et al. Research on motion characteristics of ballistic missile and decoy[J]. Modern Defence Technology, 2023, 51(1): 135-144.
- [11] 朱金钊. 临近空间非弹道式飞行器轨迹跟踪与预报[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
ZHU Jinzhao. Trajectory tracking and prediction of non-ballistic aircraft in near space[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [12] 徐姣. 基于时间序列的高精度外测数据预处理方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
XU Jiao. Research on preprocessing method of high-precision external measurement data based on time series[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.
- [13] 吴进二. 基于四元数法的空间坐标转换模型初探[J]. 地理空间信息, 2020, 18(5): 8, 120-122, 125.
WU Jiner. Preliminary study on spatial coordinate transformation model based on quaternion method[J]. Geospatial Information, 2020, 18(5): 8, 120-122, 125.
- [14] 张逸飞, 冯灿, 夏伟东. 光电经纬仪坐标系统一方法研究[J]. 测控技术, 2021, 40(12): 20-25.
ZHANG Yifei, FENG Can, XIA Weidong. Unified methods of photoelectric theodolite coordinate system[J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40(12): 20-25.
- [15] 刘利军, 朱时银, 李曦, 等. 多雷达多目标航迹匹配策略[J]. 测控技术, 2024, 43(5): 72-77.
LIU Lijun, ZHU Shiyin, LI Xi, et al. Multi-rader and multi-target track matching strategy[J]. Measurement & Control Technology, 2024, 43(5): 72-77.
- [16] WANG L. Analytical approach to coasting trajectory prediction with higher zonal harmonics[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2025: 09544100251350358.
- [17] WANG L, ZHENG W. Fast trajectory deviation prediction algorithm with arbitrary degree/order gravitational potential[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2019, 42(7): 1595-1600.
- [18] WANG L, LIN Z, PENG Y. Progress on error propagation and correction of long-range rockets in disturbing gravity field[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2022, 236(9): 1693-1704.
- [19] WANG Lei, ZHENG Wei. Approximate analytic solution of motion for spacecraft around an oblate planet[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2019, 233(4): 1423-1434.
- [20] 王磊, 周祥, 赵卫虎, 等. 扰动引力场中机动突防导弹落点精确预报方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(6): 1090-1096.

WANG Lei, ZHOU Xiang, ZHAO Weihu, et al. Accurate prediction method of impact point for maneuver penetration missiles in gravity anomaly field[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2024, 56(6): 1090-1096.

[21] 张博伦, 周获, 吴世凯. 临近空间高超声速飞行器机动模型及弹道预测[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(9): 2072-2079.

ZHANG Bolun, ZHOU Di, WU Shikai. Maneuver model and trajectory prediction of near space hypersonic aircraft[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(9): 2072-2079.

[22] 曾润, 田杰, 江虹, 等. 改进粒子滤波的无人机航迹预测方法[J]. *传感器与微系统*, 2022, 41(5): 148-151.

ZENG Run, TIAN Jie, JIANG Hong, et al. UAV track prediction method based on improved particle filtering[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2022, 41(5): 148-151.

作者简介:



李伟 (1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 多源信息融合, E-mail: liwei_nudt@163.com。



程先哲 (1993-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 智能规划与决策, E-mail: 553654513@qq.com。



刘航 (1994-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 信息通信技术, E-mail: 2545108058@qq.com。



王磊 (1989-), 通信作者, 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向: 弹道预报及智能规划, E-mail: wanglei12a@nudt.edu.cn。

(编辑: 陈珺, 王婕)