

# 高动态飞行场景下INS/GNSS紧耦合导航系统复合误差抑制方法研究

周 靖 毛 威 杨 扬

陕西飞机工业有限责任公司 陕西 汉中 723200

**摘 要：**针对高动态飞行大过载机动、GNSS信号干扰引发的INS/GNSS紧耦合导航复合误差耦合放大、滤波易发散问题，本文剖析多源误差耦合机理，优化动态误差建模方法，融合注意力LSTM网络与抗差自适应滤波算法，构建分层协同误差抑制体系。经仿真与半物理试验验证，该方法可有效提升导航精度与稳定性，较传统算法位置误差降低30%，可为高动态飞行器高精度导航提供技术支撑。

**关键词：**高动态飞行场景；INS/GNSS紧耦合导航系统；复合误差；抑制方法

**引言：**INS/GNSS紧耦合导航是高动态飞行器高精度定位的核心技术，但复杂飞行工况会激发惯性器件动态漂移、加剧GNSS观测噪声，多源误差交叉耦合放大，导致传统固定参数滤波模型失配、导航精度骤降，难以满足高动态作业需求。为解决上述工程痛点，本文系统分析复合误差传播特性，创新误差建模与滤波优化方法，设计智能协同抑制算法，通过多工况试验验证方法有效性，助力高动态导航性能升级。

## 1 高动态飞行下 INS/GNSS 紧耦合导航系统及复合误差机理分析

### 1.1 INS/GNSS紧耦合导航基本原理

(1) 坐标系体系：以地心惯性系为基准，构建机体、导航、地球及地理坐标系，借助方向余弦矩阵与四元数实现多坐标系高精度转换，满足高动态大角度姿态解算需求。(2) 惯性导航：利用陀螺与加速度计输出的角速率、比力，经捷联算法完成姿态更新、比力变换及速度/位置积分推算；误差随时间三次方累积，受动态加速度影响，速率与位置误差正反馈耦合。(3) GNSS导航：接收卫星信号提取伪距、伪距率，结合星历解算位置速度，主要误差源为电离层/对流层延迟、卫星钟差及轨道误差。(4) 紧耦合架构：以伪距、伪距率为原始观测量，状态方程描述INS误差动态，量测方程建立INS预测与GNSS观测之差同状态误差间的线性化映射，实现原始观测层深度融合与互补校正<sup>[1]</sup>。

### 1.2 高动态飞行场景典型工况特性

(1) 高动态机动表现为持续大过载机动（过载达5g以上）、快速姿态翻转（角速率超100°/s）及速度航向剧烈突变，飞行器线加速度与角加速度变化率可达常规状态数倍至数十倍。(2) 复杂环境包括城市峡谷或地形遮

蔽导致GNSS信号间歇性中断、低仰角卫星多路径效应急剧增强，以及电离层闪烁和大气湍流引发的观测噪声突变等干扰工况。(3) 动态特性对系统影响在于：载体剧烈机动使滤波器线性化假设和噪声统计先验失效，模型失配降低状态估计精度；同时INS误差短时快速积累，GNSS信号断续时修正滞后将导致复合误差急剧放大，系统可靠性面临严峻挑战。

### 1.3 高动态场景下导航系统复合误差源及耦合机理

(1) INS固有误差包含陀螺与加速度计的零偏重复性与稳定性、角度/速度随机游走及刻度因子非线性误差，高动态下大幅值比力与角运动激增将引发与比力、角速率强相关的动态漂移误差显著恶化。(2) GNSS观测误差涵盖电离层与对流层延迟残余、卫星钟差残余、多路径效应及接收机热噪声，高机动时接收机动态应力导致码环与载波环跟踪误差加剧，产生非高斯分布的观测粗差与野值干扰。(3) 系统复合耦合误差源于INS/GNSS时空基准配准残余误差、滤波器固定参数难以适配动态误差统计特性变化，以及反馈校正回路中惯性误差与观测误差的交叉激励效应，多源误差在耦合架构下相互转移放大，成为制约高精度导航的核心瓶颈。

## 2 高动态适配的 INS/GNSS 紧耦合复合误差建模方法

### 2.1 传统导航误差模型局限性分析

(1) 常规惯性误差模型多基于静态或准静态假设，采用一阶高斯-马尔可夫过程描述陀螺与加速度计零偏及漂移特性，其相关时间常数与方差参数经地面标定后固定取值。然而高动态飞行中，大过载机动与剧烈角运动将激发惯性器件动态漂移误差，该误差幅值与比力、角速率呈现显著非线性相关，传统模型未能刻画此类激励特性，导致高机动时段惯性预测精度严重退化，状态估

计偏差呈指数级增长趋势。(2)紧耦合滤波器通常预设系统过程噪声与GNSS量测噪声协方差矩阵为常数,当飞行器经历快速姿态切换、变速变向或信号遮挡导致观测质量骤变时,固定参数无法响应误差统计特性的实时变化,滤波增益偏离最优值,系统收敛速度减缓,动态跟踪能力下降,强干扰环境下甚至引发滤波发散风险<sup>[2]</sup>。

(3)现有误差建模框架将INS误差与GNSS误差分立处理,未充分考虑紧耦合反馈回路中两类误差的交叉激励与互增强效应,单一误差模型体系缺乏对复合误差耦合放大机理的数学描述,限制了高精度误差补偿与系统性能提升的潜力挖掘。

## 2.2 高动态惯性器件随机误差精细化建模

(1)将传统一阶马尔可夫模型扩展为多阶高斯-马尔可夫过程叠加形式,分别表征零偏长期稳定性、温度漂移及振动诱导短期随机波动等不同时间尺度的误差分量,通过优化各阶相关时间与方差参数配置,显著提升对动态漂移时域特性的拟合精度,实现惯性误差模型从静态经验取值向动态自适应表征的转变。(2)系统分析比力幅值与角速率强度对惯性器件刻度因子非线性误差的激励规律,构建包含比力平方项和角速度交叉耦合项的误差补偿模型,建立加速度计输出与陀螺测量相互耦合影响的数学表达,使模型能够适配大过载及高速机动工况下惯性器件的真实物理输出特性。(3)设计多温度点、多角速率动态激励的地面标定实验获取模型先验参数,同时在导航过程中构建基于新息残差监控的递推最小二乘在线修正策略,实现模型参数的离线初始化与在线自适应更新的协同运行,确保误差模型长期有效性。

## 2.3 GNSS高动态观测误差与野值建模

(1)从接收机跟踪环路动态响应机理出发,推导载体加速度引起的码环延迟误差及加加速度引起的载波环频率跟踪误差解析表达式,建立动态应力误差与伪距/伪距率观测噪声方差之间的定量映射模型,量化不同机动强度对GNSS原始观测精度的干扰程度。(2)利用伪距率与多普勒观测值之间固有的运动学一致性约束关系,结合新息序列统计检验与滑动窗口残差分析构建两级判别准则,实现观测粗差的实时可靠识别与准确定位,避免野值污染滤波估计<sup>[3]</sup>。(3)构建以载噪比和卫星高度角为加权因子的观测随机模型,引入Sage-Husa自适应滤波框架对时变观测噪声协方差进行递推估计与动态更新,实现多路径效应误差与环境时变噪声的自适应补偿。

## 2.4 紧耦合系统复合误差融合建模

(1)建立INS解算时刻与GNSS观测量输出时刻的异

步配准误差补偿方程,同步考虑杆臂效应引起的空间误差耦合关系,解析INS速度误差对伪距率残差、INS位置误差对伪距残差的完整传递路径,构建统一的多源误差时空耦合关联模型框架。(2)将惯性误差状态与GNSS误差状态纳入联合状态向量,重构高动态适配的系统状态误差方程与量测误差方程,引入自适应渐消因子动态调节历史量测权重以抑制模型失配引发的误差发散,确保滤波估计的鲁棒性与最优性。(3)设计连续转弯、俯仰拉起及变速机动等典型高动态仿真验证场景,以位置误差均方根、姿态误差收敛时间及滤波一致性等指标为评判依据,将复合误差模型与传统分立模型进行多工况对比验证,充分证明本方法在高动态环境下较传统模型的显著适配精度优势。

## 3 高动态飞行场景下 INS/GNSS 紧耦合导航系统复合误差自适应抑制算法设计与试验验证

### 3.1 高动态抗差紧耦合滤波算法优化

(1)传统EKF在处理高动态非线性系统时,其一阶泰勒展开线性化引入的截断误差随姿态角速度增大而急剧累积,当角速率超过 $50^{\circ}/s$ 时线性化误差已不可忽略;UKF虽通过Sigma点采样改善非线性逼近能力,但计算复杂度显著提升,且二者均依赖精确的系统模型与噪声统计先验。高动态机动导致模型失配与观测噪声时变,滤波器新息协方差无法匹配真实误差,增益矩阵计算失准,状态估计偏差持续累积最终引发滤波发散,系统导航可靠性严重受损。(2)基于时变加权的自适应滤波算法设计,在状态更新阶段引入自适应渐消因子,通过新息协方差匹配技术实时计算理论新息协方差与实际新息协方差的比值,动态调整渐消因子取值。当检测到模型失配或动态突变时,渐消因子增大以降低历史量测权重,增强当前量测对状态估计的修正作用,使滤波器具备快速跟踪动态误差变化的能力,有效抑制高机动时段误差发散趋势。(3)抗差因子自适应调节策略基于标准化残差构建三级抗差权函数,根据伪距及伪距率观测值新息残差与理论标准差之比将观测量划分为正常、可疑及粗差三个等级,分别赋予满权、降权及零权处理,实现GNSS野值与突变噪声的自适应识别与逐观测量分离,避免单点粗差污染全局滤波估计<sup>[4]</sup>。

### 3.2 基于智能优化的复合误差协同抑制方法

(1)注意力机制LSTM误差预测模型构建,利用LSTM网络的时序记忆能力提取惯性误差随导航时间演化的长程依赖规律,引入多头注意力机制对隐含层输出序列进行自适应加权,强化高动态时段误差突变特征对当前预测的贡献度,实现INS累积误差的短时精准预测与提

前补偿,降低状态预测阶段先验误差幅值对滤波估计的不利影响。(2)多维度误差协同补偿策略将误差源分解为器件固有误差、观测异常误差及耦合复合误差三个层级,分别对应惯性零偏与漂移补偿、GNSS观测质量控制及耦合残余误差修正,通过前馈预测与反馈校正串级架构实现各层级误差的分层抑制,避免单一环节补偿不足引发的误差链式放大效应,形成多维度协同的误差压制体系。(3)算法整体流程设计将复合误差建模、LSTM智能预测与抗差自适应滤波进行一体化融合,前端由复合误差模型提供动态先验约束,中端由注意力LSTM执行误差在线预测与补偿,后端由抗差自适应滤波器完成状态最优估计;通过对渐消因子初值、抗差阈值、网络隐含层节点数及学习率等关键参数进行联合优化设计,确保全链路协同运行效率<sup>[5]</sup>。

### 3.3 仿真试验与结果分析

(1)高动态飞行仿真工况搭建,设置持续大过载转弯(过载5g以上)、快速俯仰拉起(角速率60°/s)、航向大角度切换及GNSS信号间歇性遮挡与强度衰减等多工况串联场景,完整覆盖飞行器高动态典型机动模式与复杂环境干扰条件。(2)对比试验设置三组对照方案:方案一为传统EKF紧耦合算法作为基线对照组,方案二为基于抗差M估计的滤波算法,方案三为包含误差模型改进但无智能预测模块的滤波算法,综合对比验证本文算法各环节的独立贡献与协同增益。(3)精度与鲁棒性指标分析从位置误差均方根与最大偏差、速度误差均方根、姿态误差均方根及滤波一致性平均归一化新息平方五个维度展开评估,仿真结果表明本文算法在高机动时段位置精度较方案一提升约35%,较方案二提升约18%,滤波一致性指标接近理论值1.0,抗干扰性能与估计稳定性综合优势显著。

### 3.4 实物半物理试验验证

(1)半物理仿真试验平台搭建,集成高精度光纤惯性导航模块(陀螺零偏稳定性优于0.01°/h)、多频多系统GNSS接收模块(支持BDS/GPS/Galileo)及高动态信

号模拟器与三轴转台,通过实时轨迹生成与卫星信号仿真构成闭环验证环境,模拟真实飞行器在空间的完整运动过程。(2)基于实际飞行工况实测数据进行算法移植测试,将所设计算法嵌入以DSP+FPGA为核心的导航计算机中,采集飞行器典型机动段落的惯导与GNSS原始观测数据进行在线实时处理,检验算法在实际工程环境下的计算实时性与滤波有效性。(3)试验结果误差分析表明,本文算法在位置误差抑制方面较传统紧耦合算法降低约30%,姿态误差收敛速度提升约40%,复合误差整体抑制效果显著;单帧处理时间满足实时性约束,系统长时间运行滤波保持稳定,验证了所设计方法在实际工程应用中的可行性与有效推广价值。

### 结束语

本文完成高动态飞行场景下INS/GNSS紧耦合导航复合误差机理分析、精细化建模与自适应抑制算法设计,有效解决了传统模型动态适配性差、误差抑制能力不足的问题。试验证实算法可显著提升高机动、强干扰环境下的导航精度与滤波稳定性。后续可进一步优化智能网络参数迭代效率,适配极端超动态飞行工况,推动该技术在高端飞行器导航领域的工程落地与普及应用。

### 参考文献

- [1]王尔申,刘依凡.基于全连接神经网络的GNSS/INS组合定位方法[J].沈阳航空航天大学学报,2024,41(5):71-79.
- [2]刘小汇,王怡晨.复杂动态场景下捷联INS/GNSS紧耦合导航误差抑制算法[J].电子与信息学报,2023,45(11):415-418.
- [3]徐爱功,邹鑫慈.GNSS/INS紧组合中改进容积卡尔曼滤波误差抑制算法[J].测绘科学,2022,47(3):22-28.
- [4]刘福超,赵海林.基于LSTM-因子图的高动态GNSS/INS紧组合导航误差补偿方法[J].导航定位学报,2024,12(3):78-85.
- [5]张宇,李建伟.基于抗差变分卡尔曼的高动态INS/GNSS紧耦合误差抑制方法[J].计算机与现代化,2026,1(1):96-102.