

基于DME的航空器低空飞行引导系统研究

尹长彬 刘新强 李天成

天津七六四通信导航技术股份有限公司 天津 300385

摘要：航空器低空飞行引导对自主式测距手段有较高依赖，DME具备不依赖卫星信号的独立工作特性，在低空场景中拥有独特应用价值。本文针对DME测距机理展开分析，梳理低空多径效应与大气折射对斜距测量精度的制约规律，设计了包含信号处理、位置解算、航迹规划与抗干扰在内的引导系统总体方案。从硬件选型、软件架构与关键算法三个层面给出工程实现路径，构建了以DME距离约束为核心的闭环引导链路，为低空航空器在复杂地形条件下的精确航迹跟踪提供技术支撑。

关键词：DME；低空飞行引导；测距精度；多径抑制

引言：低空飞行引导在航空运输与通用航空领域具有广泛需求，卫星导航系统在低空遮挡环境下可用星数不足，独立测距手段成为引导系统的重要补充。DME通过询问应答机制获取航空器与地面台站间的斜距，具备全天候工作与高更新率的优势。低空环境下多径叠加与大气折射导致测距精度下降，单一台站引导存在几何模糊问题。开展基于DME的低空飞行引导系统研究，设计多台站融合的精密引导方案，对提升低空飞行安全性与航迹跟踪精度具有工程实用价值。

1 DME 工作原理及低空适配性分析

1.1 DME基本工作机制

DME即测距仪，是一种由机载询问机与地面应答器协同工作的二次雷达系统。询问机向地面发射等间隔的脉冲对信号，地面应答器接收后经固定延迟转发回复脉冲对，机载设备通过测量发射与接收之间的时间差来解算斜距^[1]。整个测距过程依赖于询问脉冲对的精准间隔控制与应答信号的恒定群延迟，将往返时间差换算为海里数，再结合几何关系转换为地距。DME系统的测距精度主要取决于脉冲对的前沿陡峭度与时间计数器的分辨能力，而应答器的转发延迟则通过精确标定消除对测距结果的系统性偏移。

1.2 DME信号传输特性

DME工作在超高频频段，信号以视距传播方式从地面台站向空中辐射，沿直线路径抵达机载接收机。询问信号采用高斯包络调制，脉冲对间隔决定了测距的基本分辨率，天线辐射方向图在垂直面呈扇形覆盖，水平面近似全向。应答信号经地面台站转发后携带固定的群延迟，该延迟量在出厂时已被精确测定并写入机载数据库供距离解算时扣除。超高频信号在大气中衰减较小，但对障碍物的穿透能力有限，遇到山体或建筑时会产生明

显的阴影区。信号的多径传播在低空环境中表现尤为突出，地面反射分量与直达分量的叠加会使脉冲前沿出现畸变，进而影响测距精度。

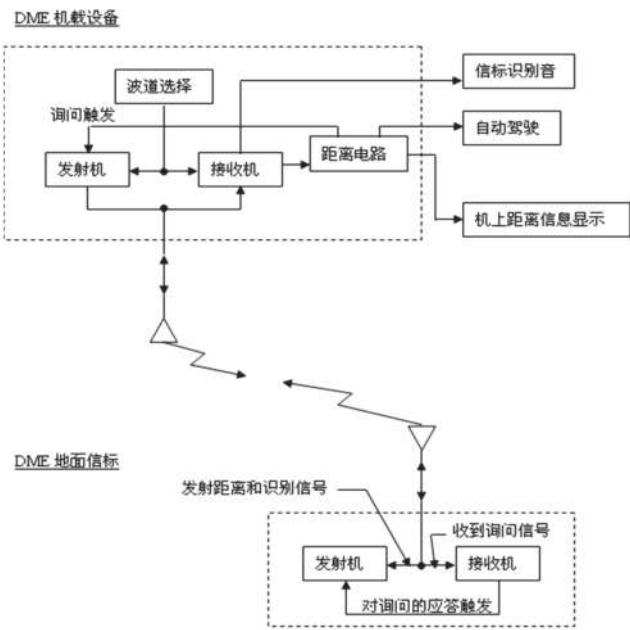


图1 DME测距原理

1.3 低空环境对DME信号的影响

低空飞行场景下航空器与地面台站之间的传播路径缩短，导致信号入射角偏向大角度区域，天线方向图增益在高仰角处出现衰减，接收端信噪比随之下降。地面反射体在近距离条件下产生的多径分量与直达信号的时间差缩小，传统前沿检测算法难以有效分离两路信号，测距偏差因此增大。低空环境中地形起伏对信号的遮挡效应更为显著，山谷与丘陵地带的可用台站数量急剧减少，几何构型趋于稀疏。大气折射率在近地面层的垂直梯度变化也会对斜距测量引入附加延迟，该延迟量随高

度降低而增大,在百米以下空域中不可忽略。

1.4 DME在低空飞行引导中的适配要点

DME用于低空引导需重点解决斜距向地距转换的精度问题,航空器高度越低,斜距与地距之间的差异越小,但转换对高度误差的敏感度反而上升。引导系统应优先选用布局合理的台站组合,使航空器在航线各段均能获得至少两个台站的交叉距离约束,避免单一台站引导带来的航向模糊。信号处理层面需引入多径抑制与前沿修正算法,降低低空反射环境对测距精度的侵蚀。机载系统与飞控计算机之间的数据接口应保证距离更新率与引导指令生成周期相匹配,使航空器能够依据实时距离信息连续修正飞行轨迹。

2 基于DME的低空飞行引导系统总体架构

2.1 系统整体设计思路

低空飞行引导系统以DME测距信息作为距离约束的基础数据源,结合机载导航参数构建航迹跟踪与偏离修正的闭环控制架构。系统设计遵循分层解耦原则,将信号接收处理、距离解算、航迹规划与指令生成划分为独立功能层,各层之间通过标准化数据接口传递观测值与控制指令。引导逻辑围绕“测距—定位—偏航检测—指令输出”的链路展开,利用多台站DME距离约束的交叉解算获取航空器实时位置,与预设引导航线进行偏差比对后生成修正航向^[2]。系统需在台站可用数量动态变化的条件下维持引导连续性,当某一台站信号丢失时应能自动切换至剩余台站组合,确保距离约束不中断。整体架构需兼顾机载平台的算力限制与实时性要求,将计算密集型任务分配至地面预处理模块,机载端仅保留核心解算与指令生成功能。

2.2 系统硬件组成

机载硬件由DME询问接收模块、飞控接口单元、导航传感器组与显示控制终端构成。DME接收模块负责超高频信号的捕获与脉冲对解码,内部集成高精度时间计数器以实现纳秒级往返时延测量。导航传感器组提供惯性测量单元的姿态与速度信息,与DME距离观测值共同支撑航迹解算。飞控接口单元将引导指令转换为飞控计算机可识别的航向与油门控制信号,该单元需满足航空总线协议的通信规范。地面硬件由DME台站网络与数据链路设备组成,台站网提供测距基准,数据链路负责将台站状态信息与差分修正量下行传输至机载平台。

2.3 系统软件模块划分

软件架构划分为信号处理层、状态估计层、航迹规划层与指令生成层四个功能模块。信号处理层完成DME脉冲对的前沿检测与多径抑制,输出经过滤波的距离观

测值。状态估计层融合DME距离约束与惯导推算结果,通过扩展卡尔曼滤波输出航空器的位置与速度估计。航迹规划层依据当前位置与预设航线计算横向偏差与纵向偏差,生成期望航向角。指令生成层将航向偏差转换为飞控可执行的舵面偏转指令,并在偏差超限时触发告警逻辑。各模块独立运行且支持在线参数更新,便于后续功能扩展与算法迭代。

2.4 系统各模块交互逻辑

信号处理层向状态估计层输出经质量评估的距离观测值及对应权重,状态估计层返回当前位置估计供航迹规划层计算偏差量。航迹规划层将偏差信息与期望航向发送至指令生成层,指令生成层结合飞控接口单元的状态反馈调整输出指令的幅度与速率。各模块间的数据流转以固定周期的消息队列为载体,关键观测值采用时间戳对齐机制消除传输延迟引入的相位偏差。当某一模块输出异常时,上游模块自动降低该路数据的权重,下游模块则依据降级策略切换至备用计算路径,保障整个引导链路在局部故障下仍能维持基本运行能力。

3 系统关键技术研究

3.1 DME信号接收与处理技术

DME信号接收处理的核心在于从噪声背景中精确提取脉冲对的到达时刻,前沿检测算法的性能直接决定测距精度^[3]。低空环境下多径分量与直达信号的时间差缩短,传统幅度阈值检测法容易将反射脉冲误判为直达信号,导致距离读数偏大。改进方案采用滑动窗口相关检测技术,利用脉冲对的已知间隔特征进行模板匹配,在时域上锁定真实前沿位置。脉冲对解码过程中需对询问频率进行精细分选,避免邻频台站的干扰脉冲混入解码链路。接收前端的自动增益控制回路应根据信号强度动态调整中频增益,防止强信号饱和与弱信号淹没。多径抑制环节可引入脉冲前沿斜率分析,将上升沿陡峭度低于阈值的观测标记为多径污染并予以剔除,从而输出经过净化的距离观测值供后续解算使用。

3.2 基于DME的位置解算技术

位置解算依赖于多台站DME测距值的交叉交会,当航空器处于两个台站的覆盖范围内时,两条距离圆弧的交点即为位置估计。解算过程需将斜距观测值转换为地距,转换中航空器高度作为关键参数参与计算,高度误差会直接映射为地距偏差。三台站以上的观测可构建超定方程组,通过加权最小二乘法求解位置与钟差,权重由各台站的信号质量指标动态赋予。低空场景下台站几何构型变化剧烈,当航空器飞越台站正上方时几何精度因子急剧增大,解算结果的可靠性下降。引入惯导推算

值作为辅助约束,在台站构型不佳时以惯导位置为先验信息缩小解算搜索空间,可有效抑制几何稀疏带来的定位发散。

3.3 低空飞行引导路径规划技术

引导路径规划需在预设航路点序列与实时距离约束之间建立动态映射关系。航空器沿引导航线飞行时,系统根据当前位置与下一航路点的相对关系计算期望距离变化率,将该变化率与DME实测距离变化率进行比对,生成航向修正指令。路径规划算法应考虑低空地形对可用台站的限制,在航线设计阶段即规划台站切换逻辑,使航空器在进入下一台站覆盖区前完成引导源的平稳过渡。转弯引导段的路径规划需引入曲率约束,避免因航向指令突变导致飞行轨迹出现过大偏差。引导路径应具备自适应调整能力,当某一台站信号质量恶化时自动重新规划引导路径,利用剩余台站维持距离约束的连续性。

3.4 系统抗干扰技术

低空飞行环境中DME信号面临多径干扰、邻频串扰与电磁脉冲污染等多重威胁。多径干扰的抑制依靠前述前沿检测与斜率分析联合实施,邻频串扰则通过询问频率的精确滤波与解码门限控制来削弱。电磁脉冲对接收前端的冲击可导致瞬时测距失效,系统需设置异常值检测门限,当单次测距偏差超过统计边界时自动丢弃该次观测并启动预测补偿。干扰环境下的引导连续性保障依赖于观测值的时序滤波,利用距离变化率的物理约束剔除跳变观测,使引导指令不因单次粗差而产生剧烈抖动。

4 系统硬件选型与软件实现思路

4.1 核心硬件选型依据

硬件选型需围绕低空引导系统的实时性与可靠性约束展开。DME接收模块应选用具备宽动态范围的超高频前端,确保在近距离强信号与远距离弱信号条件下均能保持线性工作状态,避免增益饱和或灵敏度不足对测距精度造成损害。机载导航传感器组的选取应侧重惯性测量单元的零偏稳定性与温度漂移特性,因为引导解算中惯导数据与DME观测的融合精度高度依赖于惯导短期推算的可信度。飞控接口单元需兼容ARINC429或ARINC664航空数据总线协议,保证引导指令以确定的周期与格式送达飞控计算机。处理平台应选用具备浮点运算能力的嵌入式处理器,满足扩展卡尔曼滤波与最小二乘解算的算力需求,处理器的主频与缓存容量需留有充足余量以应对多台站并发解算的峰值负载。

4.2 软件开发环境与技术选型

软件开发环境选用实时操作系统作为底层支撑,该

系统具备任务调度的确定性与中断响应的可预测性,能够保证引导解算任务在严格的时间窗口内完成。开发语言以C语言为主,利用指针操作与内存管理的精细化控制降低运行时开销,关键算法模块可采用汇编级优化以提升执行效率。数值计算库选用经过航空领域验证的线性代数与矩阵运算工具包,避免自行实现基础运算带来的精度风险与调试成本。版本管理与持续集成工具贯穿整个开发流程,确保各模块的迭代更新不破坏已有功能的稳定性。通信中间件采用发布订阅模式实现模块间的数据分发,降低耦合度的同时保证消息传递的时效性。

4.3 核心软件模块实现思路

信号处理模块的实现以脉冲对解码为入口,通过滑动窗口相关运算锁定前沿时刻,结合斜率判别逻辑剔除多径污染观测,输出带有质量标识的距离序列。状态估计模块将经筛选的DME观测值与惯导推算结果送入扩展卡尔曼滤波器,滤波器的状态向量包含位置、速度与钟差,观测方程以斜距地距转换为基准构建。航迹规划模块依据当前估计位置与预设航线计算横向与纵向偏差,偏差量经比例导引律转换为期望航向角,引导指令生成模块将航向偏差映射为舵面偏转量并施加速率限制以避免指令突变。各模块通过消息队列传递数据,关键观测值附带时间戳,接收端依据时间戳对齐机制消除传输延迟引入的相位偏差,保障整个引导链路的时序一致性。

结束语

DME凭借询问应答测距机制为低空航空器提供了不依赖卫星的距离约束,多台站融合方案有效克服了单一台站引导的几何模糊缺陷。研究从信号接收处理、位置解算、航迹规划到系统抗干扰进行了全链路设计,硬件选型与软件架构的工程化方案保障了引导系统在低空复杂环境下的运行稳定性。DME引导系统在航空进近与低空通场等场景中具备良好的适配性,为航空器自主精密飞行提供了可靠的技术手段。

参考文献

- [1]张世翔,黄天翔,冯瀛尹.低空经济高质量发展背景下低空航空器在紧急医学救援中的应用研究[J].商业经济,2025(3):131-133,156.
- [2]张弛.基于应用场景的浦东新区低空载人航空器起降点布局研究[J].交通与运输,2025,41(1):38-43.
- [3]曾康,路丹,王轩,等.面向低空垂直起降航空器的维修工作卡编制标准框架设计与应用研究[J].航空维修与工程,2025(5):25-28.