

DVOR与卫星导航系统融合定位精度优化研究

刘新强 尹长彬 姚文天 李子洋

天津七六四通信导航技术股份有限公司 天津 300385

摘要：DVOR可提供高精度方位约束，卫星导航具备全域距离覆盖能力，两者融合可实现定位性能互补，但受系统自身特性、协同误差及外部环境干扰，定位精度难以满足高端应用需求。本文围绕融合定位精度优化展开研究，梳理融合定位的理论基础与精度制约因素，从信号融合策略、误差抑制补偿、算法改进及系统协同模式四个维度设计优化方法，并明确硬件适配、算法工程化等技术实现路径，有效解决融合过程中的精度劣化问题，提升融合定位的稳定性与精准度，为相关领域高精度导航定位提供技术支撑。

关键词：DVOR；卫星导航系统；融合定位；精度优化；误差抑制

引言：导航定位精度直接决定各类应用的可靠性，DVOR作为传统导航系统，凭借高精度方位观测优势在特定场景中发挥重要作用，而卫星导航系统虽实现全域覆盖，却受多种误差影响导致单点定位精度受限。单一导航系统难以兼顾精度与覆盖范围，两者融合成为提升定位性能的有效路径。当前DVOR与卫星导航系统融合过程中，存在信号适配不足、协同误差突出、算法适配性差等问题，导致定位精度无法达到预期，因此开展融合定位精度优化研究，梳理制约因素并设计针对性优化方案，具有重要的技术价值与应用意义。

1 DVOR 与卫星导航系统融合定位的理论基础

1.1 DVOR导航系统的定位原理

DVOR即多普勒甚高频全向信标，工作频段为108-118MHz，通过在天线阵列上产生旋转电场来调制载波信号，使辐射出的甚高频电磁波携带方位信息^[1]。地面接收设备捕获该信号后，依据多普勒频移量即可解算出相对于信标台的磁方位角，其方位测量精度可达 $\pm 0.1^\circ$ 。信标台天顶上方辐射的基准信号与可变信号之间存在固定的相位差，这一相位差直接映射为飞行器所在的径向方位。DVOR仅提供角度信息而不具备测距能力，定位过程依赖于方位线的交叉交会，因而单独使用时位置解算存在几何模糊性，定位误差可达5-8m。

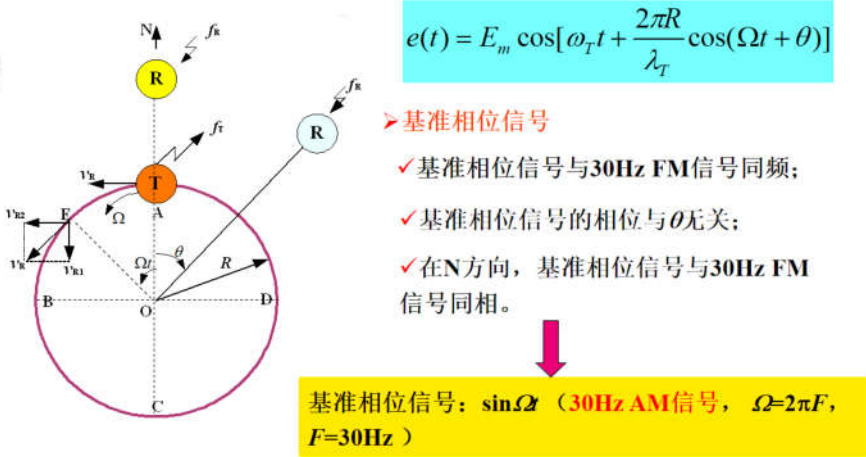


图1 DVOE定向原理

1.2 卫星导航系统的定位原理

卫星导航利用多颗中高轨卫星向地面播发包含精密时间戳与星历参数的导航电文，用户接收机通过测量至少四颗卫星的伪距来构建观测方程组，借助最小二乘等算法求解三维坐标与钟差。由于卫星钟差、电离层折

射、对流层延迟及多径效应等多种误差源叠加，伪距观测值偏离几何真值，导致单点定位精度受限。多频多系统组合可在一定程度上削弱电离层一阶项，但高阶残差与非视距误差仍是制约精度提升的关键瓶颈。

1.3 两者融合定位的核心逻辑与内在关联

DVOR提供高精度方位约束而卫星导航提供全域距离约束,两类观测值在几何上形成互补。融合的逻辑在于将DVOR方位线作为强几何约束嵌入卫星导航的状态估计框架,使原本病态的卫星几何构型得到改善。从信息量角度看,DVOR的角度观测弥补了卫星在低仰角或卫星数不足时的几何弱点,而卫星的距离观测则消除了DVOR方位线交叉带来的位置多值性。两套系统在时间基准上均依赖高稳晶振与UTC溯源,为状态融合提供了统一的时间参考框架。

1.4 融合定位中精度影响的核心理论机制

融合定位精度受观测噪声特性、几何强度因子以及系统间偏差三重机制支配。DVOR方位角观测噪声主要来源于天线多径与信号调制失真,卫星伪距噪声则由热噪声与电离层残余误差构成。当两类观测值进入同一估计模型时,权重分配由各自噪声协方差矩阵决定,不当的权比会导致精度劣化。几何精度因子在融合后发生重构,DVOR方位约束可显著降低径向方向的精度衰减,但若方位观测存在系统偏差则会引入有偏估计。此外,两系统时钟偏移的不一致会在状态向量中引入附加未知数,进一步影响解算的收敛速度与最终精度。

2 DVOR与卫星导航系统融合定位的精度制约因素

2.1 DVOR系统自身特性带来的精度制约

DVOR信标台依赖甚高频信号的多普勒频移来传递方位信息,信号调制过程中天线阵列的物理特性直接决定了方位角的解算精度^[2]。台址周围反射体的存在会引发多径叠加,使接收端捕获的相位出现畸变,进而造成方位角测量值偏离真值。旋转天线产生的调制信号在低仰角区域辐射强度下降,导致远距离用户接收到的信噪比恶化,方位观测噪声随之增大。DVOR台站本身的场地反射与天线近场效应构成一类难以完全消除的系统误差,该误差呈现出随方位角变化的非均匀分布特征,对融合定位中角度约束的可靠性形成持续压制。

2.2 卫星导航系统的固有精度限制

卫星导航定位精度受制于多种传播路径上的误差叠加。电离层延迟是影响伪距观测值的首要因素,虽然双频组合可消除一阶项,但高阶残差在太阳活动剧烈期仍会显著放大。对流层延迟具有高度角依赖特性,低仰角卫星的天顶延迟可达数米量级,且干湿分量的模型化精度存在固有不足。多径效应在城市与山区环境中尤为突出,反射信号与直达信号的相干叠加使伪距观测产生系统性偏移。卫星钟差与星历误差虽经精密轨道产品修正,但残余量仍以厘米级贡献于定位误差预算。

2.3 融合过程中的协同误差来源

两套系统的观测值进入统一解算框架后,时间基准的不一致会在状态向量中引入附加未知数。DVOR信号的群延迟与卫星信号的码相位延迟具有不同的物理起源,两者在融合模型中若未作差异化处理,会导致观测方程出现模型失配。权矩阵的构造依赖于各观测值噪声特性的先验估计,当DVOR方位角噪声与卫星伪距噪声的统计特性随环境动态变化时,固定权比策略将引起估计偏差。两类观测值的采样时刻若存在微小偏移,状态外推引入的线性化误差也会在迭代解算中逐步累积。

2.4 外部环境对融合定位精度的干扰机制

外部电磁环境的变化对两类信号产生差异化干扰。甚高频信号易受雷暴与工业辐射源的污染,导致DVOR方位观测出现粗差。卫星信号在穿越电离层不均匀结构时会发生闪烁效应,使载波相位观测的连续性受到威胁。地形遮挡改变了卫星的可见构型,降低了几何精度因子的数值,而DVOR信号在山谷与高楼间的绕射与反射则使方位观测的稳定性下降。大气折射率的时空梯度变化为两类信号引入了不同量级的传播延迟,这种环境耦合效应应在融合解算中若未被充分建模,将成为制约最终定位精度的关键外部因素。

3 DVOR与卫星导航系统融合定位精度优化方法

3.1 基于信号特性的融合策略优化

结合DVOR甚高频信号的方位指向特性与卫星导航伪距信号的全域距离覆盖特性,优化观测值自适应选择机制,通过信号质量评估指标筛选高信噪比、低干扰的观测数据纳入融合解算流程^[3]。针对两类信号传播特性的本质差异,设计专属信号适配处理流程,通过时序校准与空间配准技术实现观测值在时空维度的精准对齐,规避信号特性不匹配引发的融合偏差。强化方位约束与距离约束的协同联动,根据信号传播环境动态调整观测值纳入权重,让DVOR的高精度方位优势与卫星导航的全域覆盖优势形成互补,提升融合策略的环境适配性与定位可靠性,契合两类导航系统的信号本质特性。

3.2 误差抑制与补偿方法设计

针对DVOR系统突出的多径误差的卫星导航系统常见的电离层、对流层延迟误差,设计差异化误差抑制方案,采用自适应滤波技术削弱多径干扰对DVOR方位观测的影响,通过构建高精度电离层与对流层延迟模型实现传播路径误差的精准补偿。针对双系统间的时钟偏移与信号延迟偏差,建立实时偏差估计模型,通过动态校正算法修正两类系统的时间基准差异与信号传播延迟差,降低协同误差对融合精度的负面影响。结合多路径效应的抑制原理,优化信号接收处理流程,减少反射信号对

观测值的干扰,通过误差模型的动态更新,提升观测值的一致性与准确性,为融合定位精度提升奠定基础。

3.3 融合定位算法的改进路径

立足现有融合算法的固有不足,优化权矩阵自适应调整机制,摒弃固定权比分配模式,根据观测噪声的动态变化实时更新各观测值的权重占比,避免权比不当导致的定位精度劣化。改进状态估计迭代流程,优化迭代收敛准则,减少线性化误差在迭代过程中的累积,提升算法解算效率与数值稳定性。强化几何精度因子的重构效果,通过算法优化让DVOR方位约束充分发挥作用,改善卫星几何构型的病态问题,充分释放两类观测值的互补优势。优化算法的抗干扰能力,使融合算法能够适应外部环境的动态变化,在观测噪声波动时依然保持稳定的解算精度,实现融合定位算法的性能提升。

3.4 系统协同工作模式优化

优化两套系统的工作时序衔接,通过时序校准技术实现观测数据的同步采集与高效传输,减少采样时刻偏移引发的线性化误差。建立系统状态实时监测机制,动态感知信号质量变化与外部环境干扰强度,根据监测结果动态调整协同工作参数。当某一系统观测精度下降时,自适应调整观测权重分配,优先选用精度更优的系统观测数据,保障融合定位系统的持续稳定运行。优化系统间的数据交互流程,减少数据传输延迟与丢失,提升观测数据的实时性与完整性,同时协调两套系统的工作模式,让DVOR与卫星导航系统形成高效协同的工作状态,进一步挖掘双系统融合的精度提升潜力。

4 融合定位精度优化的技术实现路径

4.1 融合系统的硬件适配与调试方向

融合系统硬件适配需围绕DVOR接收机与卫星导航接收机的接口兼容性展开,采用标准化硬件接口设计实现两类设备的数据互通,规避接口协议不兼容导致的数据传输偏差。优化硬件电路布局,减少电磁干扰对信号接收的影响,提升信号采集的稳定性与准确性。针对DVOR甚高频信号与卫星导航信号的接收特性,选用高性能信号接收模块,强化弱信号捕获能力,满足复杂环境下的观测需求。调试过程聚焦硬件参数校准,通过信号源模拟测试调整接收模块增益与滤波参数,消除硬件自身特性差异引发的系统偏差,确保两类导航设备输出观测数据的一致性,为后续精度优化技术落地提供可靠硬件支撑。

4.2 优化算法的工程化实现思路

优化算法的工程化实现需兼顾算法精度与运行效率,基于嵌入式平台完成算法代码的模块化开发,拆解

复杂算法流程为可独立运行的功能模块,降低工程实现难度。针对融合算法中的权矩阵自适应调整与误差补偿逻辑,采用高效数值计算方法简化运算流程,减少算力消耗,确保算法在嵌入式设备上实现实时解算。通过代码优化消除冗余运算,提升算法运行速度,同时加入异常处理机制,应对观测数据缺失或异常时的算法稳定性问题。结合硬件平台性能特点调整算法参数,使优化算法与硬件资源高效匹配,避免算法复杂度与硬件性能不匹配导致的解算延迟,实现优化算法的工程化落地与稳定运行。

4.3 精度优化技术的拓展应用路径

精度优化技术的拓展应用需立足导航定位的实际需求,结合不同应用场景的环境特点与精度要求,调整优化技术参数,实现技术的场景化适配。在航空导航领域,重点强化低仰角环境下的精度优化效果,适配高空飞行的信号接收特性,提升飞行过程中的定位可靠性。在地面交通导航领域,针对城市复杂地形与电磁干扰环境,优化多径误差抑制与抗干扰技术,满足车辆动态导航的精度需求。在测绘勘探领域,结合高精度定位需求,进一步提升融合定位的解算精度,适配野外复杂地形的观测条件。同时,推动精度优化技术与其他导航技术的融合,拓展技术应用边界,实现多场景下的高精度定位服务全覆盖。

结束语

单一导航系统在定位精度与可用性方面存在固有局限,DVOR受限于仅能提供方位信息而卫星导航在低仰角与遮挡环境下精度衰减明显。将DVOR的方位约束与卫星导航的距离观测进行融合,可在几何与信息量两个维度实现优势互补。融合过程中观测噪声特性差异、几何精度因子重构以及系统间时间基准偏差构成了精度优化的核心技术问题。针对上述问题展开融合定位的理论分析与方法设计,对提升导航定位系统的整体性能具有重要的工程价值。

参考文献

- [1]陈俊平,张益泽,于超,等.北斗卫星导航系统精密定位报告算法与性能评估[J].测绘学报,2022,51(4):511-521.
- [2]郑云飞.基于北斗卫星导航系统的工程测量定位精度提升研究[J].时代报告,2023(39):0031-0032.
- [3]许霞云,涂锐,张凯丽,王冰,成芳.静态场景下的低轨通信卫星多普勒定位性能分析[J].导航定位学报,2025,13(5):22-30.