

基于卫星通信的空中交通实时定位数据增强方法研究

杨新宇

(民航华北地区空中交通管理局通信网络中心 北京 101300)

摘要 为了提升空中交通定位的精度和可靠性,文中研究了基于卫星通信的实时定位数据增强方法,通过广域差分定位、卡尔曼滤波数据融合及卫星链路优化,实现高精度定位和抗干扰能力。文中所提出的方法在复杂空域环境下具有显著优势,其定位精度和实时性满足空管需求,为航空交通监控提供了有力支持。

关键词: 卫星通信;空中交通;定位数据增强;广域差分定位

中图分类号 TN929.5

Research on Real time Positioning Data Enhancement Method for Air Traffic Based on Satellite Communication

YANG Xinyu

(Communication Network Center of North China Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation, Beijing 101300, China)

Abstract In order to improve the accuracy and reliability of air traffic positioning, this paper studies a real-time positioning data augmentation method based on satellite communication, which achieves high-precision positioning and anti-interference capability through wide area differential positioning, Kalman filter data fusion, and satellite link optimization. The method proposed in the paper has significant advantages in complex airspace environments, and its positioning accuracy and real-time performance meet the requirements of air traffic control, providing strong support for air traffic monitoring.

Key words Satellite communication, Air traffic, Enhanced positioning data, Wide area differential positioning

0 引言

当前,航空交通对空中定位的精度、实时性及可靠性提出了更高要求。传统定位方法在复杂空域环境中易受多路径效应、电离层延迟等影响,难以保障高精度需求。基于卫星通信的定位数据增强方法,通过多源数据融合和差分定位技术,能有效提高空中交通监控的精度和稳定性,为空域安全管理提供了重要技术支撑,具有广泛的应用前景和研究价值。

1 定位数据增强基本原理

1.1 广域差分定位原理

广域差分定位原理是通过在地面布设多个差分基准站形成广域差分网络,以提高卫星定位的精度和可靠性。各基准站利用双频 GPS 或北斗接收机,实时采集定位数据并通过高速光纤网络将数据传送至中央处理单元。该系统通过消除或减弱空间误差,如电离层延迟和对流层延迟的影响,以提升位置精度^[1]。每个基准站对接收的定位数据进行预处理后,将差分校正信息发送至空中段的接收终端。空中段接收终端再结合本地观测值,通过差分校正信息精

确修正卫星数据,提高定位的精度和实时性。

1.2 卡尔曼滤波数据融合原理

卡尔曼滤波数据融合原理通过递归估计系统状态,在多源数据融合中实现对目标位置、速度和加速度的精确估算,增强定位数据的稳定性与精度。该原理基于状态向量模型,通过构建状态转移矩阵和测量矩阵,实时校正测量误差。卡尔曼滤波算法的核心在于利用系统噪声和测量噪声的协方差矩阵,逐步优化状态估计,使得噪声对定位结果的影响降至最低。在复杂动态环境中,由于系统噪声和非线性问题的存在,卡尔曼滤波数据融合中进一步采用无迹卡尔曼滤波(UKF)进行非线性处理。UKF通过选取符合高斯分布的 sigma 点实现了对状态变量的精确预测,并通过权重系数的自适应调整来增强滤波过程的鲁棒性。

1.3 卫星通信链路传输原理

卫星通信链路传输通过高效的双向数据链路实现地面段和空中段之间的实时数据传输与交互。上行链路采用基于 TDMA 的窄带传输模式,有效减少带宽需求并确保信号在拥挤频段中的传输稳定性;下行链路则采用宽带扩频传输技术,提高抗干扰能力和数据传输速率。此链路系统结合自适应带宽分配机制,根据不同飞行阶段的需求调整通

作者简介: 杨新宇(1996—),硕士,助理工程师,研究方向为空中交通、卫星通信。

信带宽,提升资源利用率^[2]。通过选择高增益天线和优化调制编码方案,如QPSK和多种编码速率的自适应调制编码(ACM)技术,该系统在不同环境下均能保证链路的可靠性和传输效率。

2 实时定位数据增强方法设计

2.1 系统架构设计

实时定位数据增强系统采用分布式体系架构,主要包含地面段和空中段两个部分。地面段由多个差分基准站组成广域差分网络,采用双频GPS/北斗接收机采集原始观测数据,通过高速光纤网络实现数据传输和处理。空中段搭载双频多模接收机和数据处理终端,支持多系统联合定位。系统采用FPGA+DSP双处理器架构,其中FPGA(Xilinx Virtex-7 XC7VX485T)负责数据采集和预处理,实现波形捕获和跟踪、码相位测量等功能;DSP(TMS320C6678)执行复杂算法运算,完成定位解算和数据融合。数据传输采用双向链路设计,上行链路使用基于TDMA的窄带传输模式,下行链路采用宽带扩频传输技术。系统接口设计遵循ARINC 743B标准,支持与机载设备的无缝对接。关键性能指标及实现情况如表1所列。

表1 关键性能指标

性能指标	技术指标要求	实现值	备注
数据采集率	≥10 Hz	20 Hz	可配置
处理延时	≤50 ms	35 ms	端到端延时
接口带宽	≥10 Mbps	12 Mbps	双向链路
系统稳定性	MTBF≥5 000 h	6 500 h	连续运行
功耗	≤50 W	42 W	典型工作状态
重量	≤5 kg	4.2 kg	不含天线

2.2 数据增强模型的设计

基于卡尔曼滤波理论,构建多源数据融合的增强模型。状态向量 X 包含位置、速度和加速度信息^[3],即 $X=[x, y, z, vx, vy, vz, ax, ay, az]^T$ 。考虑系统噪声和测量噪声的影响,建立状态方程如式(1)、式(2)所示:

$$X(k+1)=\Phi X(k)+W(k) \quad (1)$$

$$Z(k)=HX(k)+V(k) \quad (2)$$

其中, Φ 为状态转移矩阵,用于描述系统的动力学特性, H 为测量矩阵, $W(k)$ 和 $V(k)$ 分别为系统噪声和测量噪声。通过自适应调整算法动态优化协方差矩阵 Q 和 R ,提高模型的鲁棒性。针对非线性问题,采用UKF(无迹卡尔曼滤波)方法进行处理,sigma点的选取采用对称采样策略,权重系数设计考虑高斯分布特性。

2.3 定位数据处理流程

实时定位数据处理采用多级流水线结构,主要包括数据预处理、异常检测、数据融合和精度评估4个环节。预处理阶段首先进行载波相位和伪距平滑,采用改进的Hatch

滤波算法,如式(3)所示:

$$\rho(k)=\lambda\Phi(k)+[\rho(k-1)-\lambda\Phi(k-1)]\cdot e^{-k/\tau} \quad (3)$$

其中, ρ 为平滑伪距, Φ 为载波相位观测值, λ 为波长, τ 为时间常数。异常检测采用基于创新序列的RAIM算法,检测统计量如式(4)所示^[4]:

$$T=v^T W^{-1} v \quad (4)$$

其中, v 为创新序列, W 为加权矩阵。当 T 超过阈值 $\chi\alpha^2(n)$ 时判定存在异常。

数据融合采用改进的联邦卡尔曼滤波结构,子滤波器采用局部自适应估计,主滤波器进行信息融合优化。精度评估建立了基于DOP值和CEP的综合评估体系。处理流程的关键参数配置如表2所列。

表2 处理流程的关键参数配置

处理环节	参数配置	优化准则
预处理	$\tau=100$ s	平滑效果
异常检测	$\alpha=0.001$	虚警率
数据融合	$P_0=\text{diag}(1, 1, 1)$	收敛速度
精度评估	CEP(95%)	可靠性

2.4 卫星链路参数配置与优化

针对卫星通信链路特性,设计自适应带宽分配策略。上行链路采用QPSK调制,码率为2 Mbps,前向纠错采用速率为1/2的卷积码。下行链路采用自适应调制编码(ACM)技术,可在QPSK/8PSK/16PSK之间动态切换,支持1/2、2/3、3/4、5/6多种编码速率。链路传输采用分组格式,包头采用强编码保护,载荷部分使用LDPC码提供纠错能力。为提高链路可靠性,设计了交织深度可调的符号交织器,抗突发误码能力显著提升。链路预算考虑了自由空间损耗、大气衰减、天线增益等因素,主要参数如表3所列。

表3 卫星链路主要参数设置

链路参数	上行链路	下行链路
发射功率	20 W	50 W
天线增益	35 dBi	45 dBi
工作频段	Ku波段	Ku波段
带宽	2 MHz	5 MHz
误码率要求	≤10 ⁻⁶	≤10 ⁻⁷

3 方法实现与验证

3.1 实验平台搭建

本文搭建了基于FPGA+DSP的硬件实验平台,并采用Xilinx Virtex-7系列FPGA(XC7VX485T)和TI公司的TMS320C6678 DSP处理器。FPGA主要负责实现数据采集和预处理功能,时钟频率为200 MHz,片上Block RAM容量为32 MB;DSP负责执行复杂算法运算,主频1.25 GHz,片上L2缓存4 MB。实验平台包含高精度原子钟模块,以提供10 MHz和1PPS基准信号。数据存储采用DDR3-1600内

存,容量为 8 GB。系统接口包括 RS-232、ARINC429、以太网等。软件平台基于 VxWorks 6.9 实时操作系统开发,采用分层架构设计,各功能模块的资源配置如表 4 所列。

表 4 各功能模块资源配置

功能模块	处理器	占用资源	运行周期
数据采集	FPGA	25% LUT	1 ms
预处理	FPGA	30% DSP48	2 ms
增强算法	DSP	45% CPU	10 ms
数据输出	FPGA	15% LUT	1 ms

3.2 关键算法实现

关键算法的实现主要包括自适应卡尔曼滤波和多源数据融合两部分。自适应卡尔曼滤波算法采用改进的衰减记忆结构,引入遗忘因子 λ ($0.95 \leq \lambda \leq 1$),状态估计方程修正如式(5)所示:

$$\hat{X}(k|k) = \hat{X}(k|k-1) + \lambda K_k [Z(k) - H\hat{X}(k|k-1)] \quad (5)$$

算法在 DSP 上实现,采用定点数计算提高运算效率,关键矩阵运算采用 DSPLIB 优化库函数。多源数据融合算法采用改进的联邦卡尔曼结构,融合权重基于创新序列协方差自适应调整。算法处理流程中的关键参数设置如表 5 所列。

表 5 算法处理流程中的关键参数设置

参数类型	数值范围	优化准则
遗忘因子	0.95~1.0	最小 MSE
融合权重	0.1~0.9	最小方差
迭代步长	0.01~0.1	收敛速度
终止阈值	10^{-6} ~ 10^{-1}	精度要求

3.3 性能测试与验证

采用真实飞行数据进行系统性能测试,测试数据集包含 100 h 飞行轨迹,覆盖了起飞、巡航、着陆等典型飞行阶段。测试环境温度 $25 \pm 5^\circ\text{C}$,相对湿度 $65\% \pm 10\%$ 。系统性能测试结果显示(见表 6),水平定位精度优于 5 m (95%),垂直定位精度优于 7.5 m (95%),速度测量精度优于 0.1 m/s,数据更新率 20 Hz,处理延时小于 40 ms。系统可靠性测试累计运行 1 000 h,平均无故障时间(MTBF)达到 6 500 h。

表 6 系统性能测试结果

性能指标	设计指标	测试结果	提升幅度
水平精度	≤ 8 m	4.8 m	40%
垂直精度	≤ 10 m	7.2 m	28%
速度精度	≤ 0.15 m/s	0.08 m/s	47%
系统延时	≤ 50 ms	38 ms	24%

3.4 系统优化与改进

基于测试结果,对系统进行针对性优化。在硬件层面,通过调整 FPGA 时钟树结构降低功耗,优化后整机功耗降

低 15%。在算法层面,改进 UKF 算法中 sigma 点的选取策略,采用球面-径向准则生成 sigma 点,提高算法稳定性。针对实时性问题,采用流水线并行处理架构,优化任务调度策略。经过优化(见表 7),系统整体性能提升显著,特别是在实时性和资源利用率方面。

表 7 系统优化效果对比

优化项目	优化前	优化后	改善率
系统功耗	45 W	38 W	15.6%
算法收敛时间	85 ms	65 ms	23.5%
CPU 占用率	75%	58%	22.7%
内存使用	4.5 GB	3.8 GB	15.6%

4 系统应用与效果分析

4.1 应用场景设计

本文选择在京津冀空管区域开展系统应用测试,模拟了典型飞行环境,包括巡航、起降及低空飞行等阶段,以检验定位系统在不同飞行状态下的稳定性与精度。测试区域模拟了多类空域环境,以提供必要的支撑。实验中使用有限的地面参考点,尽可能优化设备的配置,以便获得有效的测试结果。测试持续时间为 6 个月,累计获取飞行数据 3 600 h,覆盖了不同气象条件和飞行环境。具体测试场景参数配置如表 8 所列。

表 8 测试场景参数配置

场景类型	飞行高度/m	速度范围/km/h	数据量/h	气象条件
巡航阶段	8 000~11 000	750~900	1 500	晴/雨/雪
起降阶段	0~3 000	200~350	1 200	晴/雨/雾
低空飞行	0~1 000	100~250	900	晴/雨/霾

4.2 系统运行效果

系统在实际运行中展现出优异的性能指标。通过对采集的数据进行统计分析,系统在不同场景下的定位精度均优于设计指标(见表 9)。在巡航阶段,水平定位精度(95%)达到 3.8 m,垂直定位精度(95%)为 5.2 m。在起降阶段,受多路径效应影响,精度略有下降但仍维持在较高水平,水平精度 4.5 m,垂直精度 6.3 m。在低空飞行场景中,系统表现出良好的抗干扰能力,水平精度 4.2 m,垂直精度 5.8 m。系统可用性达到 99.99%,满足空管运行要求^[5]。

表 9 具体性能指标

性能指标	巡航阶段	起降阶段	低空飞行	设计指标
水平精度/m	3.8	4.5	4.2	≤ 5.0
垂直精度/m	5.2	6.3	5.8	≤ 7.5
速度精度/m/s	0.06	0.08	0.07	≤ 0.1
数据延时/ms	32	35	33	≤ 40
完好率/%	99.99	99.98	99.97	≥ 99.95

(下转第 39 页)