

基于UWB的室内高精度定位抗干扰技术研究

杨庆超 胡晨阳 杨静

国家无线电监测中心检测中心 国际认证事业部, 中国·北京 100041

摘要: 超宽带 (Ultra Wide Band, UWB) 作为定位的重要传感器之一, 在空间距离测算方面具有测距精度高的特点, 广泛应用在室内场景。但是复杂的室内场景会出现多径现象以及无视线信号与电磁干扰等问题, 会导致定位的准确率不高。本文根据干扰原因提出基于信号到达时间和信道脉冲响应特征的多径干扰消除算法, 基于机器学习算法的定位误差识别和补偿定位模型, 以及利用频率选择性屏蔽器和动态滤波阈值克服电磁干扰, 以期提升 UWB 系统在复杂室内环境下的定位精度与鲁棒性提供参考。

关键词: UWB 定位; 抗干扰技术; NLOS 修正; 室内高精度定位

Title Research on Anti-Interference Technology for High-Precision Indoor Positioning Based on UWB

Yang Qingchao, Hu Chenyang, Yang Jing

The State Radio_monitoring_center Testing Center, International Certification Department, China Beijing 100041

Abstract: Ultra Wide Band (UWB), as one of the key sensors for positioning, offers high ranging accuracy in spatial distance measurement and is widely employed in indoor environments. However, complex indoor scenarios often exhibit multipath effects, line-of-sight signal loss, and electromagnetic interference, which can significantly compromise positioning accuracy. This paper proposes a multipath interference cancellation algorithm based on signal arrival time and channel impulse response characteristics; a positioning error identification and compensation model utilizing machine learning algorithms; and methods employing frequency-selective shippers and dynamic filtering thresholds to mitigate electromagnetic interference, aiming to enhance the positioning accuracy and robustness of UWB systems in challenging indoor environments.

Keywords: UWB positioning; Anti-interference technology; NLOS correction; Indoor high-precision positioning

0 引言

物联网和智能制造带来室内高精度定位应用领域需求不断膨胀, 与 Wi-Fi、蓝牙以及 ZigBee 等定位技术相比, UWB 以纳秒级窄脉冲和高穿透率性能, 定位精度高和适应性强, 作为现有室内定位主流热点备受关注。然而, 室内多样化的环境状况中包含大量的多径、非视距 (NLOS) 传输以及电磁干扰影响, 极易造成 UWB 定位误差急剧增加, 严重影响其实用化工作, 因此发展 UWB 室内定位系统的抗干扰技术将是实现高精度和稳定定位的基础。本文将围绕主要干扰类型展开建模与分析, 深入探讨多径抑制、NLOS 修正及电磁抗扰等核心技术, 并基于此设计集成化抗干扰定位系统。

1 UWB 室内定位干扰源分析

1.1 多径效应干扰

UWB 室内定位的主要干扰为多径效应, 它是由于室

内物体反射、散射及绕射引起的。接收端直射路径的脉冲信号与反射路径的脉冲信号发生叠加, 改变了到达时间检测算法所需的脉冲波形, 直接影响 TOA 检测精度。反射多径分量的存在导致传统阈值检测算法将最亮反射点误判为直射点, TOA 检测误差为 50~100ns, 即相当于误差 5~10m。

1.2 NLOS 传播干扰

NLOS 传播由障碍物遮挡直射路径引发, 导致信号传播路径延长且衰减加剧, 是制约 UWB 定位精度的关键因素。NLOS 场景下, 接收信号的信道冲激响应呈现两个显著特征: 一是首径到达时间滞后于 LOS 场景; 二是信号幅度波动标准差较 LOS 场景增大 3~5 倍^[1]。

1.3 电磁干扰

UWB 工作在 3.1~10.6GHz 的免授权频段, 易受同频段电子设备的电磁干扰。Wi-Fi、蓝牙及工业设备的电磁

辐射会对 UWB 脉冲信号产生压制性干扰。

2 抗干扰关键技术研究

2.1 多径抑制技术

对于多径影响引起的 TOA 定位误差，利用基于改进 KF 的多径分量分离算法结合超分辨率估计算法对其进行定位。通过设计自适应门限检测算法确定强多径分量，采用由信号的当前幅值决定门限值，一旦某个信号的幅度超出了当前背景均值的 1.2 倍时便可认为有可能属于强多径，并认为属于直射分量，或者和直射分量有冗余，所以当信号的幅度大于主径信号 30% 时就可以视其为强多径，然后利用改进 KF 算法抑制幅度小于 30% 主径信号的弱多径，由于改进 KF 算法包含动态过程噪声的协方差矩阵，所以滤波器可以在多径数目增多时动态缩减滤波增益，在增加 3 条或多条多径后将其增益缩减 15% 左右，滤波器将对这些多径进行有效的压制但又不至于过度滤波^[2]。然后结合 MUSIC 算法进行超分辨率估计算法将时间分辨率从 1ns 提升到 0.5ns，因此该算法能够对间距不足 1ns 的多径进行有效的分离，从而增强了室内场景下定位系统的稳定性与高精度。

2.2 NLOS 识别与修正

NLOS 识别与修正采用“特征提取 - 场景分类 - 误差补偿”的三级处理流程，具体流程如图 1 所示。

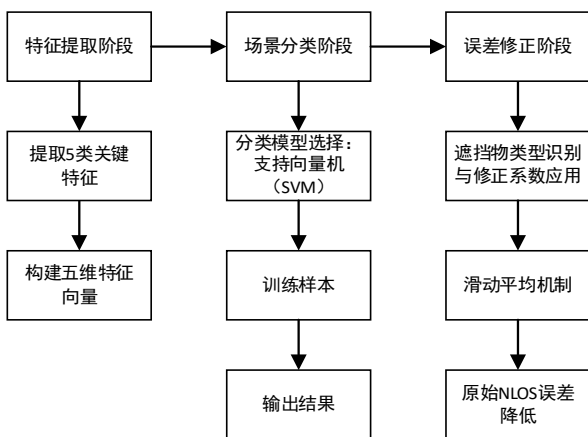


图1 NLOS识别与修正流程

2.3 电磁抗干扰技术

电磁抗干扰技术主要由自适应跳频加空间分集加干扰抑制算法组成，其中跳频方法利用频谱感知模块实现实时分析 3.1-10.6GHz 频段内干扰强度，若某信道内干扰功率超过 -85dBm 时，便进行跳频，根据干扰强度的不同设定跳频速率，每增加 10dBm 功率，跳频速率增加 20%，但最大跳频速率为 2000 跳/秒，保证 UWB 信号一直处在较低的干扰功率范围内。空间分集利用均匀圆形阵列 4 阵元，

阵元间距为圆形阵列工作的中心频率的波长一半，空间分集系统根据 4 个阵元接收的信号进行最大比合并加权合成信号，各个阵元接收到的信号合成结果加权系数根据每个阵元的信噪比来决定。信噪比越大，加权系数越大。干扰抑制算法方面，引入基于最小均方误差准则的自适应滤波器，滤波器输出信号 $y(n)$ 的计算公式为：

$$y(n) = w(n) \cdot x(n)$$

其中， $w(n)$ 为 n 时刻的滤波器系数向量， $x(n)$ 为输入信号向量，通过迭代更新 $w(n)$ 使输出信号与期望信号的均方误差最小，迭代公式为

$$w(n+1) = w(n) + \mu \cdot e(n) \cdot x(n)$$

式中， μ 为步长因子（取值范围 0.01-0.1）， $e(n)$ 为 n 时刻的误差信号。该技术可使接收端的信噪比提升 8-12dB，电磁干扰导致的定位跳变幅度控制在 10cm 以内。

3 抗干扰定位系统设计

3.1 硬件架构

抗干扰定位系统采用“基站—标签—数据处理中心”三层分布式架构，实现高精度、低延迟的室内定位功能。

基站端是在具有超宽带信号接收能力和处理能力的基础上，提供 4 个射频通道，支持 3.1~10.6GHz 频段范围内脉冲信号的工作。

标签端设计采用微型化封装技术，将 UWB 收发芯片和三向加速度传感器，集成在同一硬件平台，并支持动态发射功率控制。电子标签集成 MEMS 惯性测量模块，能够实现动态判别是否处于静止和动态环境中，在动态环境中，为定位的位移解算增加辅助惯性信息，减少位移解算误差；天线阵列采用均匀的圆形设计，阵列直径 10cm，具有 4 个阵元，其中相距等间距切换路径选择，各个切换时延为半个电磁波长的倍数，且用于接收的射频信号通过射频开关切换，使接收天线切换到不同路径^[3]。

数据处理中心由高速 FPGA 芯片与嵌入式 ARM 处理器组成，构成软硬件协同架构。FPGA 部分负责完成前端超宽带信号的高速采样，采样率高达每秒 5 亿次，具备对信道冲激响应中多径分量的实时提取与分离功能。ARM 处理器运行核心定位算法，包括到达时间估计、场景识别、误差修正等关键模块，主频为 1.2 千兆赫兹，内置浮点运算加速单元以加快数据处理效率。

为了进一步抑制系统底噪与时钟抖动对定位性能的影响，硬件平台选用高稳定性的温度补偿晶体振荡器，其输出频率稳定度优于 0.1 百万分之一，确保时钟基准在温漂环境下依旧保持精准。

3.2 软件算法集成

在软件上实现及时干扰检测多态抗干扰处理定位结果修正的流水线式结构,具有以下5个功能部分。干扰检测部分由能量检测算法来实时测量信道状态,采样周期是10ms,当发现干扰功率在-85dBm以上即进入干扰处理,同时向动态跳频部分发送干扰频率范围及强度等信息。多径抑制部分装入增强卡尔曼滤波算法,从FPGA预处理得到的多径数据包括了幅度、时延信息作为输入,通过动态调节过程噪声协方差大小的0.01-0.1来消除多径分量的影响,输出为直射路径的时间戳的误差小于等于3ns。NLOS部分由分类修正的流程,经特征提取作为输入的包括接收信号的5方面特征参数首先径时差的幅度的衰减率等,输入已预训练好的SVM分类器的大小是512K,分类结果是LOS/NLOS会根据分类结果调用对应的修正方式,当为NLOS时,调出的误差修正表为动态误差修正表,输出的距离数据误差 $\leq 15\text{cm}$ 。电磁抗干扰部分与跳频硬件机制配合,根据干扰检测结果得到的跳频的序列来确定跳频的间隔在100MHz,通过FPGA控制射频通道跳转,相应的更新自适应滤波器系数,采用最小均方差算法,实现滤波器的收敛时间小于等于50ms。定位解算单元将TOA与TDoA到达时间差信息,通过加权最小二乘法组合求解出标签所在的位置,加权因子为基站处的信号质量参数的信噪比,信噪比越高权重值越大,定位结果实时更新10Hz,输出数据库接口,通过OTA空中升级系统软件,可以远程升级抗干扰算法的参数,以满足不同室内环境干扰特征的要求。

4 实验验证

4.1 实验环境搭建

在三个典型室内场景中搭建实验环境,分别为实验室场景 $8 \times 10\text{m}$ 、生产车间场景 $20 \times 15\text{m}$ 、仓库物流场景 $12 \times 15\text{m}$,对应布置有木质桌椅、金属设备和玻璃展柜,以及金属货架、纸箱等设施。每个场景配置6个UWB基站,基站布置方式为矩形分布,6个基站相邻的距离为6米。定位真值参考以高精度全站仪为准,试验定位标签为抗干扰UWB自研标签,定位数据频率为20Hz。辅助设备为频带为100kHz~18GHz的矢量网络分析仪、可调衰减器、环境测试仪,分别用于测量RF通道特性,调节信号大小和记录环境参数。实验中的环境温度为 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$,湿度为 $45 \pm 3\%$;生产车间场景中有频率为3.1-10.6GHz,功率为-85~-65dBm的干扰源来模拟复杂干扰环境中典型

的室内环境。

4.2 抗干扰性能测试

为全面评估系统的抗干扰性能,设计四组对比实验分别是无干扰实验,即在自由环境中进行;多径干扰实验,在实验室内放置8块金属板进一步提高信号的反射;非视距干扰实验,在生产环境中设置3处屏障形成遮挡路径;混合干扰实验,在物流仓库环境下分别加入多径、非视距以及电磁干扰,形成最恶劣干扰环境。每组实验均进行40min,分别记录标签在固定不动以及以0.8m/s速度匀速移动时的定位结果。

4.3 实验结果分析

在三种典型室内场景下,本文所提出的抗干扰UWB定位系统在静止与移动状态下均显著优于传统系统。平均定位误差由传统系统的22.5~42.3cm降低至6.8~13.5cm,最大误差从35.2~68.9cm降低至9.3~20.3cm,刷新率均维持在20Hz,系统响应迅速。尤其在干扰复杂的生产车间和物流仓库中,抗干扰提升率分别达到71.2%与74.7%,验证了本文方法在多路径反射和电磁干扰条件下的鲁棒性与高精度优势。

5 结语

本文针对UWB室内高精度定位系统中常见的多径、NLOS及电磁干扰问题,系统研究并提出了多项抗干扰关键技术。通过软硬件协同设计,构建了具备良好鲁棒性的抗干扰定位系统,并在多种典型干扰场景下进行了验证。实验结果表明,该系统在定位精度与稳定性方面均明显优于传统方案,有效提升了在复杂环境中的实用性与可靠性。未来的工作将进一步聚焦动态场景下的智能干扰识别与自适应算法优化。

参考文献:

- [1] 赵阳,王田虎,李文杰等.基于UWB和IMU融合的UWB弱信号环境下高精度定位算法[J].无线电工程,2024,54(07):1721-1731.
- [2] 张琳.基于5G+UWB+激光雷达信息融合的室内定位研究[J].长江信息通信,2023,36(10):126-128.
- [3] 刘璐,耿鲁静,李斌杰等.面向演进的5G-A室内高精度定位技术研究[J].电信工程技术与标准化,2025,38(06):1-6.

作者简介:杨庆超(1999.03-),男,回族,河北省邯郸市,通信工程师,本科,研究方向:从事短距离无线通信技术相关全球产业联盟认证测试工作。