

# 复杂场景下 RFID 标签信号去噪与识别算法改进

刘超

安徽文达信息工程学院

DOI:10.12238/acair.v3i2.13539

**[摘要]** 针对复杂物联网场景中RFID标签信号易受多径干扰、噪声叠加导致识别效率下降的问题,本文结合安徽文达信息工程学院校级科研项目“基于物联网的RFID标签识别算法研究”成果,提出一种融合位仲裁策略的信号去噪与识别算法改进方案。通过特征值分组、碰撞位推断及动态查询树优化,在保证识别准确率的同时降低通信复杂度。仿真实验表明,改进算法在多标签碰撞场景下,碰撞时隙数减少42%,识别效率提升35%,为复杂环境下RFID系统的可靠性提供了技术支持。

**[关键词]** RFID; 信号去噪; 位仲裁策略; 碰撞位推断; 识别效率

**中图分类号:** TP75 **文献标识码:** A

## Improvement of RFID Tag Signal Denoising and Recognition Algorithm in Complex Scenarios

Chao Liu

Anhui Wenda University of Information Engineering

**[Abstract]** Aiming at the problem that RFID tag signals are prone to multi-path interference and noise superposition, leading to reduced recognition efficiency in complex IoT scenarios, this paper proposes an improved scheme for signal denoising and recognition algorithm integrating a bit arbitration strategy, based on the achievements of the school-level scientific research project "Research on RFID Tag Recognition Algorithm Based on Internet of Things" of Anhui Wenda University of Information Engineering. Through eigenvalue grouping, collision bit inference, and dynamic query tree optimization, the scheme reduces communication complexity while ensuring recognition accuracy. Simulation experiments show that the improved algorithm reduces the number of collision slots by 42% and improves recognition efficiency by 35% in multi-tag collision scenarios, providing technical support for the reliability of RFID systems in complex environments.

**[Key words]** RFID; signal denoising; bit arbitration strategy; collision bit inference; recognition efficiency

## 引言

随着物联网技术普及,RFID系统应用于智能仓储等复杂场景。但复杂环境下,标签信号受电磁干扰、多径效应及密集部署影响,信号碰撞概率大增。ITU数据显示,典型仓储环境中RFID标签识别错误率达28%,多径衰落和标签碰撞分别占45%、38%。传统的动态帧时隙ALOHA、二进制树搜索等识别算法,在复杂场景中存在效率低、能耗高问题,无法满足物联网实时性与可靠性要求。<sup>[1]</sup>

安徽文达信息工程学院科研团队基于位仲裁策略,提出GBAQT(分组的位仲裁查询树)算法与BAT(位仲裁防碰撞)算法,通过特征值分组和碰撞位推断优化识别流程。本文结合项目研究成果,系统阐述算法改进原理、性能验证及复杂场景适配方案,为RFID系统在工业物联网中的应用提供理论与技术支持。<sup>[2]</sup>

## 1 复杂场景下RFID信号干扰特性分析

### 1.1 多源干扰类型与影响机制

#### 1.1.1 电磁干扰(EMI)

在RFID技术应用中,周围电子设备的同频干扰是信号失真的关键因素。以2.4GHz ISM频段为例,Wi-Fi、蓝牙等设备信号功率每增加10dB,RFID标签回波信号信噪比(SNR)约下降8dB,导致标签ID误码率指数级增长。高斯白噪声环境下,SNR从15dB降至5dB时,传统ASK调制信号误码率从0.03%激增至18.7%。这表明高干扰环境严重影响RFID系统性能,设计部署时需考虑同频干扰并采取抑制措施。<sup>[3]</sup>

#### 1.1.2 多径衰落

在金属货架、密集障碍物等复杂场景中,无线信号遇障碍物产生反射、衍射,引发多径效应,使单一信号路径变为携带多个时延分量的复杂路径。多径分量会导致标签ID数据传输中出现码间串扰(ISI),即前一码元信号干扰后一码元,造成信号识别

错误。实测显示仓储环境中多径效应对RFID系统影响显著。标签信号均方根时延扩展可达20纳秒,该参数衡量多径效应,反映信号不同路径到达接收端的时间差异。在100kbps传输速率下,20纳秒时延扩展约引入2个码元干扰,直接影响无线通信性能,导致识别延迟增加50-100毫秒,这对需快速响应的仓储管理系统是不容忽视的问题。

### 1.1.3 标签碰撞

在标签数量超500个的高密度场景中,传统ALOHA类算法面临碰撞时隙比例高达65%的问题,导致阅读器需大量重复查询。以1000个标签为例,动态帧时隙ALOHA算法的总查询次数超12000次,较理想场景显著增加,且通信能耗上升40%以上,严重影响系统性能与效率。

### 1.2 传统算法的技术瓶颈

#### 1.2.1 ALOHA类算法

依赖随机时隙分配,无法主动规避干扰。当标签数量超过300时,识别效率下降至20标签/秒以下,且随着标签密度增加,信道吞吐量呈非线性下降趋势。

#### 1.2.2 树搜索算法

研究发现,二进制树递归查询时间复杂度为 $O(N \log N)$ ,处理海量标签时查询效率显著下降,处理速度缓慢。同时,传统树算法设计未考虑信号去噪需求,在实际应用中存在明显缺陷。尤其在信噪比低于10分贝的低信噪比环境下,误码率上升致使数据重传频繁,统计表明该环境下因误码导致的重传次数占比超25%,进一步加重系统负担,大幅降低整体识别效率。

## 2 基于位仲裁策略的算法改进原理

### 2.1 位仲裁策略核心理论

位仲裁策略通过分析标签ID的二进制编码特征,实现干扰信号的定向过滤与碰撞位置推断,其核心包括:

#### 2.1.1 特征值分组理论

根据标签ID前k位二进制码的唯一性,将标签集合划分为 $2^k$ 个子组。例如,当k=4时,可将标签划分为16个子组,单组标签数量减少至原有的1/16,显著降低组内碰撞概率。设原始标签数量为N,分组后单组平均标签数为 $N/2^k$ ,碰撞概率从 $1 - (1 - 1/N)^{N-1}$ 降至 $1 - (1 - 2^k/N)^{N/2^k - 1}$ ,当N=1000、k=4时,碰撞概率从99.9%降至63.2%。

#### 2.1.2 碰撞位推断模型

阅读器通过接收信号的冲突位数量m,构建碰撞矩阵推断可能的标签ID组合。设标签ID长度为L,当前组内标签数为n,则可能的碰撞组合数为 $C(n,m)$ 。通过动态调整分组大小使 $m \leq L/2$ ,可将组合数降低至原有的1/4以下。例如,当L=32、m=8、n=100时,组合数从 $C(100,8) \approx 1.6 \times 10^{13}$ 降至 $C(25,8) \approx 1 \times 10^8$ ,计算复杂度降低5个数量级。

### 2.2 GBAQT算法设计与实现

#### 2.2.1 指令集扩展

分组查询指令(GroupQuery, GQ)。

指令格式: GQ+4位分组标识(如0011)+校验码。

功能: 阅读器广播该指令后,标签解析分组标识,仅ID前4位与之匹配的标签响应,其余标签进入休眠状态。

位仲裁查询指令(BAQuery, BQ)。

指令格式: BQ+碰撞位位置(如B=5)+前缀掩码+校验码。

功能: 携带碰撞位位置信息(如第5位冲突),要求标签仅返回ID中第5位以后的编码,缩小查询范围。

#### 2.2.2 分层识别流程

(1)粗分组阶段。阅读器首先发送GroupQuery指令,将标签按ID前4位划分为16个子组(G0-G15),每组标签数量约为 $N/16$ 。例如,N=800时,单组标签数约50,碰撞概率从99.7%降至76.2%。

(2)位仲裁阶段。对子组内标签执行BAQuery指令,统计碰撞位位置。若第m位发生冲突,则生成两个子查询分支:m位为0和m位为1,递归执行分组查询。例如,首次冲突发生在第7位,则查询树分裂为左子树( $ID^{[7]}=0$ )和右子树( $ID^{[7]}=1$ ),每组标签数进一步减半。

(3)精准识别阶段。当子组标签数 $\leq 8$ 时,切换至直接查询模式,阅读器发送完整ID请求指令,完成标签识别。

#### 2.2.3 效率优化模型

设标签数量为N,分组层数为k(k=4),则查询次数的计算公式为:

$$T = 2^k \times \sum_{i=1}^k \frac{N}{2^i} \log_2 \frac{N}{2^i}$$

与传统二叉树算法的查询次数 $T_{BTS} = N \log_2 N$ 相比,GBAQT的查询次数降低约30%~45%。以N=1000为例,传统二叉树需约10000次查询,GBAQT仅需5500次。

### 2.3 BAT防碰撞算法关键技术

#### 2.3.1 碰撞位动态跟踪

通过阅读器接收信号的能量分布,实时计算碰撞位数量m:

$$m = \sum_{i=1}^L \delta(|E_i - \bar{E}| > \theta)$$

其中, $E_i$ 为第i位信号能量, $\bar{E}$ 为平均能量, $\theta$ 为能量阈值(取0.3倍标准差)。

#### 2.3.2 自适应功率控制

阅读器根据标签响应强度动态调整发射功率:当标签信号强度 $> -60$ dBm时,功率降低3dB;当信号强度 $< -80$ dBm时,功率增加5dB;通过该机制,冗余信号干扰减少约25%,标签能耗降低18%。

## 3 算法性能仿真与对比实验

### 3.1 实验平台搭建

#### 3.1.1 硬件环境

阅读器: Impinj Speedway R420,工作频率915MHz,发射功率1-33dBm可调;标签: Alien Higgs3, ID长度96位,灵敏度-82dBm;干扰源: Keysight N5183B 矢量信号发生器,模拟高斯噪声、多径衰落信道。

#### 3.1.2 软件环境

仿真工具: MATLAB2023b+RFIDsim3.0, 支持多径信道建模(抽头延迟线模型, 最大时延200ns)。

算法实现: 基于C++编写GBAQT与BAT算法内核, 集成至RFIDsim仿真平台。

### 3.2 关键指标对比实验

#### 3.2.1 碰撞时隙数对比

在高斯白噪声环境(SNR=10dB)中, 不同算法的碰撞时隙数随标签数量变化: 当N=500时, GBAQT碰撞时隙数为180, 较传统二叉树算法(BTS=310)减少41.9%, 较动态帧时隙ALOHA(DFSA=290)减少37.9%; 高密度场景(N=800)中, BAT算法通过碰撞位推断将碰撞时隙数控制在240, 而DFSA升至450, BTS为580。

#### 3.2.2 识别效率与吞吐量

表1 显示了不同算法在多径衰落场景(均方根时延10ns)中的识别效率对比

| 算法类型  | N=300<br>(标签/秒) | N=600<br>(标签/秒) | 吞吐量<br>(bits/s, N=600) | 提升率<br>(vsDFSA) |
|-------|-----------------|-----------------|------------------------|-----------------|
| GBAQT | 45              | 38              | 608                    | 35%             |
| BAT   | 42              | 36              | 576                    | 30%             |
| DFSA  | 33              | 29              | 464                    | —               |
| BTS   | 28              | 22              | 352                    | —               |

#### 3.2.3 通信复杂度与能耗

通信复杂度以阅读器与标签的总交互次数衡量: GBAQT在N=500时交互次数为7200次, 较BTS(12000次)降低40%, 较DFSA(9800次)降低26.5%; BAT算法通过动态休眠机制, 使标签平均能耗从DFSA的3.2mW降至2.1mW, 降幅达34.4%。

## 4 复杂场景下的算法优化与应用

### 4.1 极化分集技术

在本项研究中, 我们采用了圆极化天线作为阅读器的配置, 而标签方面则使用了线性极化天线。通过这种极化方式的差异, 我们成功地抑制了金属表面反射所产生的干扰。经过一系列的实验验证, 结果显示, 采用这种极化失配技术后, 多径信号的功率得到了显著降低, 具体来说, 可以降低12到15分贝(dB)。此外, 信号噪声比(SNR)也得到了提升, 幅度在5到8分贝(dB)之间。更重要的是, 误码率(BER)有了大幅度的下降, 从原先的12%降低到了4%。

### 4.2 空时自适应滤波

构建4阵元均匀线性阵列(ULA), 利用最小均方误差(LMS)算法实时滤除多径分量。滤波后的信号星座图显示, 码间串扰引起的符号扩散减少70%, 眼图清晰度显著提升。

### 4.3 高密度标签群的动态识别策略

动态分组扩展: 当标签密度 $>200/m^2$ 时, 自动将分组数从16

组扩展至32组(k=5), 单组标签数控制在25以内。此时, 碰撞概率从63.2%(k=4)降至39.5%(k=5), 识别效率提升18%。

移动标签轨迹预测: 基于卡尔曼滤波算法预测标签移动方向, 提前分配时隙避免动态碰撞。在标签移动速度1m/s的场景中, 预测误差 $<0.2m$ , 时隙分配准确率达92%。

实时性与能耗平衡机制: 优先级调度算法: 建立标签优先级队列, 实时性标签(如医疗冷链标签)优先级最高, 分配独立时隙, 识别延迟 $<50ms$ ; 普通标签采用动态帧时隙分配, 延迟控制在200ms以内。

能量收集技术集成: 标签集成射频能量收集模块, 在休眠状态下收集阅读器信号能量, 使待机时间从3个月延长至1年以上, 适用于难以更换电池的场景。

## 5 结语: 研究创新点与未来研究方向

### 5.1 研究创新点

干扰定向过滤技术采用特征值分组与碰撞位推断法, 融合信号去噪与标签识别, 突破传统“先去噪后识别”的串行模式, 提升处理效率与系统整体性能, 保持高识别准确率。分层识别架构创新提出“粗分组-位仲裁-精准识别”三级流程, 保证高准确率, 降低计算复杂度, 高效处理大量数据, 减少资源消耗。多目标优化策略综合提升识别效率、通信能耗与实时性, 相较传统算法性能指标改善超30%, 优化运行效率与成本, 提供稳定高效的识别服务。

### 5.2 未来研究方向

智能干扰预测: 引入长短期记忆网络(LSTM)建模干扰信号时序特征, 实现碰撞位置与干扰模式的提前预测。

边缘计算融合: 在阅读器端部署边缘计算节点, 实现信号去噪与识别算法的本地化运行, 减少云端通信延迟。

绿色RFID系统: 结合环境反向散射通信技术, 构建零功耗标签识别网络, 推动物联网可持续发展。

### [基金项目课题]

安徽文达信息工程学院2022年度校级科研基金项目“基于物联网的RFID标签识别算法研究”(XZR2022A05)。

### [参考文献]

[1]张晓明, 陈磊. 高密度RFID标签群冲突消解算法[J]. 电子学报, 2022, 50(5): 1123-1130.

[2]李明, 周伟. 多径衰落信道下RFID信号处理技术[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(8): 2456-2460.

[3]陈斌, 赵强. 基于分组的RFID标签防碰撞算法[J]. 通信学报, 2020, 41(3): 156-165.

### 作者简介:

刘超(1972—), 男, 汉族, 安徽淮北人, 硕士, 教研室主任, 讲师, 研究方向: 物联网工程、嵌入式系统。