

引用格式: 毛刚, 熊心宁, 汪文勇, 等. RFID 系统物理层防碰撞算法研究综述 [J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(4): 532-545.  
MAO G, XIONG X N, WANG W Y, et al. Anti-collision algorithms at the physical layer for RFID systems: A review[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2025, 54(4): 532-545.

## RFID 系统物理层防碰撞算法研究综述



毛刚<sup>1</sup>, 熊心宁<sup>2</sup>, 汪文勇<sup>2,3</sup>, 杜明谦<sup>1\*</sup>

1. 中国民用航空总局第二研究所, 成都 611430;
2. 澳门科技大学 创新工程学院, 中国澳门 999078;
3. 电子科技大学 计算机科学与工程学院, 成都 611731)

**摘要:** 射频识别 (RFID) 技术作为一种身份识别的关键技术, 可以通过无线射频信号实现对物体的唯一识别。然而, 随着 RFID 技术的广泛部署, 标签数量激增, 对 RFID 系统性能尤其是防碰撞能力的需求日益增长。该文总结了 RFID 系统流程和传统防碰撞算法的研究现状, 并对基于物理层信息的防碰撞算法进行了详细研究。从阅读器算法策略、天线规模、信道与链路以及标签规模 4 个维度对物理层的防碰撞算法进行了深入分析, 总结了当前技术面临的挑战, 并对未来 RFID 系统的发展进行了展望。

**关键词:** 射频识别; 多标签; 防碰撞算法; 物理层

中图分类号: TP391.44

文献标志码: A

DOI: 10.12178/1001-0548.2024078

## Anti-collision algorithms at the physical layer for RFID systems: A review

MAO Gang<sup>1</sup>, XIONG Xinling<sup>2</sup>, WANG Wenyong<sup>2,3</sup>, and DU Mingqian<sup>1\*</sup>

1. The Second Research Institute of CAAC, Chengdu 611430, China;
2. Faculty of Innovation Engineering, Macau University of Science and Technology, Macao 999078, China;
3. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Radio frequency identification (RFID) is a critical technology which can realize the unique identification of objects through radio frequency signals. However, with the wide application of RFID technology, the number of tags is gradually increasing, and the demand for RFID system performance, especially the anti-collision capability, is also growing. Among the many demands, the anti-collision capability of the system is a widely considered application requirement. In this paper, the RFID system process and the traditional anti-collision strategy is briefly introduced. Then, the improved physical layer-based collision avoidance strategy is studied in detail. The improved anti-collision strategy is analyzed from four aspects: reader strategy, antenna size, channel and link, and tag size. Finally, the technical challenges in the current systems are summarized, and the future directions of the RFID system are prospected.

**Key words:** RFID; multi-tag; anti-collision strategy; physical layer

射频识别 (radio frequency identification, RFID) 作为一种无线通信技术, 其历史可以追溯到 Harry Stockman 在 1948 年的开创性工作。他在文献 [1] 中首次描述了“通过反射功率进行通信”这一原理。进入 20 世纪 90 年代, RFID 在全球的电子收

费领域得到了大规模的应用, 这一进步极大地推动了国内外对 RFID 技术的关注和研究<sup>[2]</sup>。随着技术的成熟, RFID 逐渐被视为与条形码技术平起平坐的识别技术。两者都在数据采集领域有着广泛应用, 但在读取速度、灵活性、干扰容忍性、读写

收稿日期: 2024-04-08

基金项目: 国家自然科学基金 (U2033212)

作者简介: 毛刚, 研究员, 主要从事物流装备领域的机械自动化及 RFID 技术应用方面的工作。

\*通信作者 E-mail: dumingqian@caacetc.com

能力以及成本等方面有所不同<sup>[3]</sup>。与条形码需要通过扫描过程进行识别相比, RFID 能够无视线地、同时地与多个标签进行通信, 并且能够精确地跟踪商品从供应商到终端消费者的整个过程<sup>[4]</sup>, 这一能力为现代库存管理和控制<sup>[5]</sup>带来了革命性的改进。

在早期的 RFID 系统应用中, 建立了以读写器为主导, 标签被动反馈的通信方式。当多个标签同时尝试与读写器通信时, 读写器可能会因信号冲突而未能准确接收标签的响应。这一现象通常被归因于标签之间的信号碰撞。针对这一问题, 研究人员提出了一系列解决方法。在现有的 RFID 系统中, 主要采用防碰撞算法来处理碰撞问题, 这些算法主要应用于系统的读写器部分。常用的防碰撞算法包括基于 ALOHA 模式的相关算法<sup>[6]</sup>, 如基于动态帧长度 ALOHA (dynamic frame length ALOHA) 的算法<sup>[7-9]</sup>、基于快速碰撞避免的算法<sup>[10-12]</sup>、基于 ALOHA 的改进策略算法<sup>[13]</sup>和基于 RFID 标签个数估计的算法<sup>[14-17]</sup>, 以及树形算法, 如基于传统树结构的抗碰撞算法<sup>[18-21]</sup>、基于 ALOHA 与树结构混合算法<sup>[22]</sup>、特定场景下的树形防碰撞算法<sup>[23]</sup>和树形算法的性能分析与优化<sup>[24-25]</sup>。这些算法能有效减少碰撞事件, 但需要标签和读写器之间的密切协同操作, 并可能受到网络拓扑和业务模式的影响。一些研究人员提出使用多天线技术以增强读写器的接收性能, 从而减少碰撞事件的发生。然而, 这种改进伴随着更多硬件资源的消耗和更复杂的信号处理技术。

尽管在 RFID 系统中已经提出了多种解决碰撞问题的方案, 但随着 RFID 设备在物联网领域的广泛应用, 尤其在密集场景和大规模场景中, 碰撞问题仍然是一个主要挑战。近年来, 一些研究人员尝试利用碰撞信号恢复的方法, 结合系统的物理层提供的信息, 提升 RFID 系统的整体性能。文献 [26] 通过研究高频 RFID 系统的信号星座点和参数估计方法来研究多个标签的联合解码。文献 [27] 表明, 可以从碰撞信号中估计出最多 4 个标签的数量, 并且该信息稍后可以用于恢复碰撞标签的信号。文献 [28] 利用不同子空间的固定波束形成来检测碰撞, 可以与其他防碰撞算法相结合。文献 [29] 表明, 使用与盲源分离技术相结合的天线阵列可以降低碰撞概率并消除干扰信号。文献 [30] 制

定了一个最大似然估计器来找出每个时隙发生冲突的标签数量, 并将其性能与其他估计器进行比较。文献 [31] 提出了一种不同类型的单天线冲突恢复接收机, 即迫零和有序连续消除, 通过估计最多两个冲突标签的信道系数提高 FSA 的性能, 并在文献 [32] 中对多天线设置方法进行推广。文献 [33] 的研究也表明, 假设阅读器具有完美的信道知识, 可以通过利用额外的分集 (增加接收机天线的数量) 来恢复两个以上的冲突标签。他们紧接着对工作进行进一步扩展, 在文献 [34] 中提出了一种使用前导码后符号的信道估计技术。文献 [35] 提出了一种将标签数量估计与信道估计技术相结合的方法用于冲突恢复。而文献 [36] 则专注于在已知冲突标签数量的前提下, 研究如何设计有效的代码以恢复标签冲突。

## 1 RFID 系统结构

RFID 系统核心一般由 3 个关键组件构成: 标签<sup>[37]</sup>、阅读器<sup>[38]</sup>和天线。标签包括一个微芯片和天线。微芯片用于存储唯一的识别信息和其他相关数据, 而天线则用于接收和发送信号。阅读器设备不仅配备了天线来与标签进行通信, 还包含转换器来管理射频信号, 以及一个控制器来处理接收到的数据。此外, 为了确保数据集成和处理, 系统还包括后端计算机系统、数据库<sup>[39]</sup>以及中间件<sup>[40]</sup>, 它存储和分析从标签收集到的数据。最后, 应用软件作为系统的前端界面, 提供了数据解析、展示和与其他业务系统的集成, 从而满足各种应用需求, 如库存管理、资产跟踪和供应链监控等。一个完整的 RFID 通信流程如图 1 所示, 通常在初始阶段由阅读器首先发起查询会话, 激活作用范围以内的标签并开始通信。标签根据其供电类型, 可以分为无源标签、半无源标签以及有源标签, 他们各自的特点如表 1 所示。处于阅读器查询区域内的无源标签需要从阅读器的查询信号中获取能量并激活其微芯片, 而有源和半有源标签使用内部电池获取能量并激活其微芯片。此外, 为确保标签和阅读器之间的有效通信, RFID 系统通常遵循特定的通信协议, 如 EPC-global (electronic product code global)<sup>[41]</sup>或 ISO 标准。常见的 RFID 通信协议如表 1 所示, 协议的选择取决于应用需求、频段选择以及标签和读写器的兼容性要求。

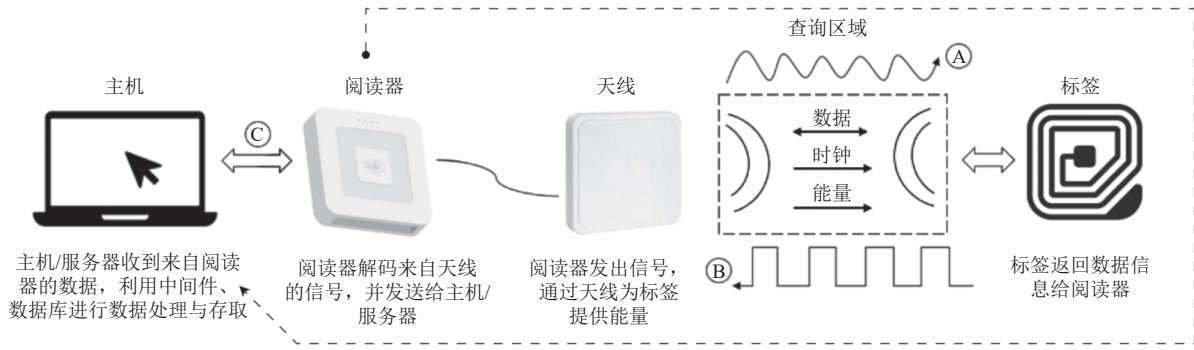


图 1 一个完整的 RFID 系统流程

表 1 RFID 相关协议与应用

协议名称	组织机构	频率范围	能量获取	标签速率/kb·s <sup>-1</sup>	应用场景
EPC Gen2	EPC-global	超高频	无源, 电磁	40~640	物流、零售、库存管理等
ISO/IEC 14443	ISO	中频	无源, 电感耦合	106 847.5	门禁系统、公共交通票务、移动支付等
ISO/IEC 15693	ISO	高频	无源, 电感耦合	6.6~53.0	库存管理、资产跟踪、电子票务等
ISO/IEC 18000	ISO	多频段	无源/半有源/有源, 电磁	40~640	对应不同应用需求

## 2 系统碰撞问题与传统解决办法

### 2.1 系统碰撞问题

在 RFID 系统的部署和使用中, 系统的识别效率会受多种因素的影响, 系统碰撞问题是其中之一。随着标签数量的增加, 尤其是在大规模部署的情况下, 碰撞问题变得尤为显著。碰撞问题主要是因为多个标签尝试在同一时间与读写器进行通信而引发的。当多个标签同时响应读写器的查询或试图传输数据时, 其信号会在空间中相互干扰, 使读写器难以准确辨识和解码每个标签的信息, 如图 2 所示。

在 EPC Gen2 协议中, 规定每次的通信握手都是由阅读器发起的。阅读器通过清点命令 (Query 及其辅助命令 QueryAdjust QueryRep) 获得标签的句柄 RN16 (random number, 即 16 位的随机数, 代表标签在此次清点过程中的身份)。阅读器通过获得响应标签的句柄, 发送 ACK (Acknowledge) 命令, 向对应标签进行确认; 收到 ACK 命令的标签, 返回自己的 PC、EPC 和 CRC 信息给阅读器, 其中 PC 字段是决定 EPC 长度的标识段, EPC 字段是阅读器需要获得的电子编码信息, CRC 字段用于数据校验。

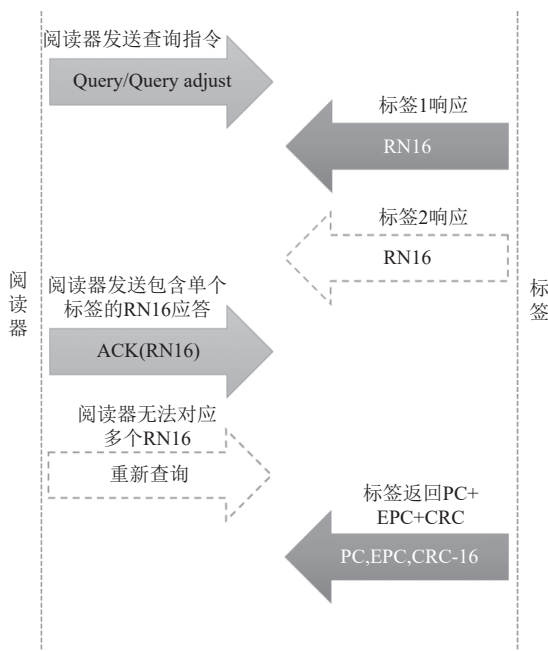


图 2 RFID 指令交互流程

如果在阅读器的范围内只有一个标签, 那么这个识别过程通常会比较顺利。然而, 当两个或更多的信号几乎同时到达同一个阅读器设备时, 它们会同时向阅读器发送 RN16 句柄。由于多个 RN16 信号所带来的信号串扰与信号叠加等问题, RFID 阅读器通常无法准确、快速地区分和解码这些信号。这意味着阅读器无法确定相互对应的标签响应, 从而无法正确读取标签数据。在这种情况下, 我们认为发生了“碰撞”。其次, 除了叠加的信号难以解码之外, 不同的标签可能具有非常相似甚至相同的数据。这使得即使在碰撞发生可以分辨出一些信号的情况下, 仍然难以确定这些信号来自哪些标签。根据 EPC Gen2 协议, 此时阅读器的操作是放弃本轮查询的数据, 并且重新开启新一轮查询, 增加了时间和运行成本。

因此, 为了应对这类碰撞问题, 需要为系统提出有效的防碰撞算法。通过防碰撞算法的实

施, 尽可能减少阅读器在单个读取周期内的碰撞概率。

### 2.2 传统解决办法

在传统的 RFID 系统中, 防碰撞算法通常在阅读器的 MAC 层实现。这样的系统通常使用一个阅读器连接收发天线进行标签的采集工作。在 RFID 防碰撞处理中, 使用最为广泛的是基于 ALOHA 的防碰撞算法以及相关改进算法。其中最为常见的是帧时隙 ALOHA (frame slots ALOHA, FSA) 算法。它将时间分成多个帧, 并将每个帧分为多个时隙, 每个时隙只收到一个信号, 则为成功响应时隙 (Single-S), 同一时隙响应多个信号则视为碰撞时隙 (Collision-C), 若没有任何响应, 则表示为空闲时隙 (Empty-E), 如图 3 所示。

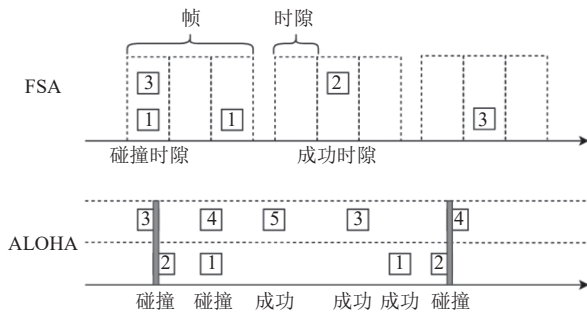


图 3 帧结构与时隙组成

在实践中, 根据文献 [42] 中提出的估计方法, 假设  $N_c$ ,  $N_E$ ,  $N_S$  分别为标签的碰撞时隙的数目、空闲时隙的数目、成功时隙的数目。对处于识别区的标签个数进行估计, 其主要流程如下。

假设标签识别过程满足多项式分布, 则在帧长  $L$  中, 空闲时隙发生  $N_E$  次, 成功时隙发生  $N_S$  次, 碰撞时隙发生  $N_c$  次的概率为:

$$P(N_E, N_S, N_c) = \frac{L!}{N_E! N_S! N_c!} p_e^{N_E} p_s^{N_S} p_c^{N_c} \quad (1)$$

式中,  $p_e$ 、 $p_s$ 、 $p_c$  分别表示空闲时隙发生  $N_E$  次的概率、成功时隙发生  $N_S$  次的概率、碰撞时隙发生  $N_c$  次的概率。

对于一个帧长为  $L$  的识别周期, 通过计算可以得到后验分布概率, 在  $n$  个待识别标签的环境下, 当有  $N_E$  个空闲时隙和  $N_S$  个成功时隙被占用时, 则可以观测到  $N_c$  次碰撞时隙。

根据后验分析, 当式 (1) 值最大时, 标签估计值最佳, 即  $\hat{n} = \operatorname{argmax} P(n | N_E, N_S, N_c)$ , 通过计算可得, 当未识别标签的数量等于帧大小时, RFID 系统的效率能达到最大值 36.8%。

文献 [43] 基于 ALOHA 算法提出了阅读器与电子标签之间通信机制的组合模型, 通过对标签数量的估计, 推导出 ALOHA 算法的最优时隙。此外, 还有一些基于概率的方法<sup>[43-51]</sup> 以及基于混合协议的方法<sup>[52]</sup>。文献 [53] 中提出了一种改进的动态帧时隙分配算法, 该算法利用了估计阅读器识别范围内标签数量的识别方法, 通过动态分配帧大小来避免冲突, 协议的效率受帧大小的影响<sup>[43]</sup>。当帧过大时, 会导致过多的空闲时隙; 当帧过小时, 会产生过多的碰撞时隙。这两种情况都不利于提高 RFID 系统的效率。

在大多数文献中, 研究者要么使用碰撞时段<sup>[49]</sup>, 要么结合碰撞时段和空闲时段的值来估算每个查询周期未识别标签的数量。然而, 在当前基于 RFID 防碰撞协议和基于 DFSA 的 RFID 防碰撞算法的文献中, 阅读器没有关于其读取范围内未识别标签数量的先验信息<sup>[54]</sup>。目前的算法是在一个查询周期 (一轮读取) 之后, 利用碰撞时段的信息来估计未识别标签的数量, 并预测下一个查询周期的帧大小。然而经过分析, 从文献 [55-57] 可以得出结论: 并非所有碰撞时段都是由于碰撞造成的, 还可能由于错误信道引发的。文献 [44] 提出标签分组确保在同一时间访问共享信道时, 标签之间的碰撞最小化。由于良好的分组技术有望提高 DFSA 算法的效率。近年来, 标签分组成为增强 DFSA 的一类有效方法<sup>[44-45, 47, 54]</sup>。

### 2.3 存在的问题

ALOHA 算法本身是基于随机访问的, 标签之间的发送时间没有协调, 可能导致冲突和重传的增加, 降低了系统效率。

采用改进的帧时隙 ALOHA 算法, 系统的带宽利用率和传输效率均得到进一步提高, 如图 4 所示, 其中系统效率=吞吐量÷成功率。然而, 该算法的最大系统效率仅能达到理论最大值。

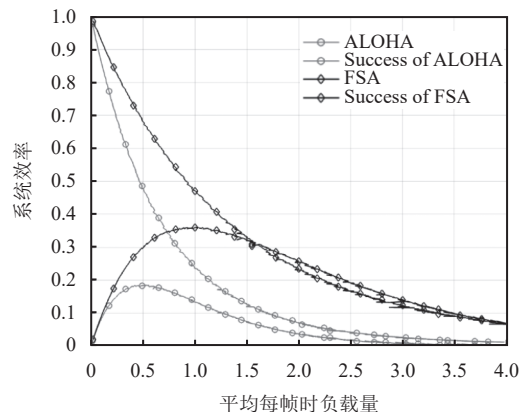


图 4 ALOHA 相关算法系统效率对比

基于 ALOHA 的防碰撞算法,本质上均是通过竞争时隙来避免碰撞。由于随机时隙选择,在高负载或高标签密度的情况下,碰撞概率较高。系统在发生碰撞后,需要通过频繁的重传操作,对剩余标签进行识别,系统效率降低。此外,随机时隙选择可能导致不公平情况,某些标签的通信机会较少,导致资源分配不均衡。

为了解决这些问题,需要进一步提出改进的防碰撞算法和动态时隙调度机制,以提高时隙利用率和公平性。

### 3 基于物理层的防碰撞算法

近年来,一些基于碰撞信号检测与碰撞信号恢复的技术已经引起越来越多的研究和关注。研究者的兴趣逐渐从 MAC 层扩展到物理层。通过从物理层信号入手,从碰撞信号中提取关键信息,可以减少

数据丢失和重新传输的需求,显著提高系统的识别准确性和整体性能。此外,在大规模、高密度的 RFID 标签环境中,存在大量标签同时活动,这可能导致信道冲突和链路干扰的问题。在这种情况下,传统的防碰撞算法可能无法有效处理碰撞和冲突,从而影响系统的性能和可靠性。为了应对这些问题,一些研究提出了基于信道和链路优化的技术。这些方法可以通过动态调整通信参数、时间分配、功率控制、反向散射技术和碰撞检测等方法来提高标签的识别率和系统的吞吐量。此外,利用多个天线和天线分集技术也可以增加系统的容量和抗干扰能力。

本章将从阅读器算法、天线配置、信道与链路和标签规模 4 个方面对改进的防碰撞算法进行阐述和分析,改进的系统架构如图 5 所示。

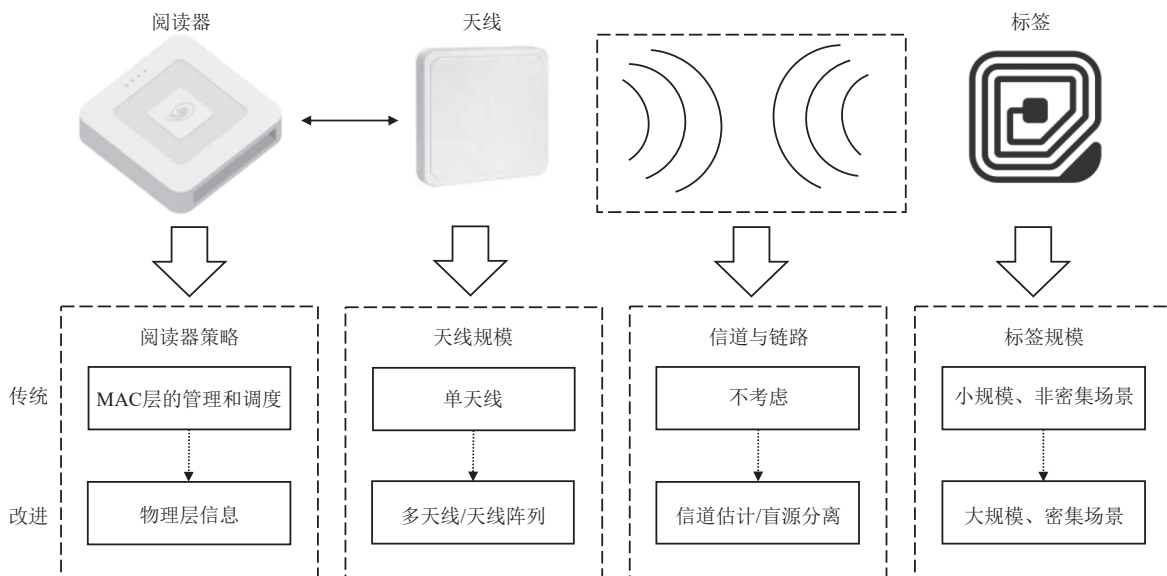


图 5 改进的 RFID 系统策略,从 MAC 层到物理层

#### 3.1 阅读器算法

传统 RFID 系统中,阅读器防碰撞算法主要是在 MAC 层上进行的。当多个标签在同一时刻获取能量,并试图与同一个阅读器通信时,就会发生通信碰撞。而阅读器会丢弃所有碰撞信号,并重新进行通信传输。这样的做法无疑丢失了许多有用信息,并且增加了系统的响应时间,降低了效率。如果能够从碰撞的数据中提取有用信息,减少碰撞几率,必然会使数据重传成本降低,从而提高系统吞吐量。针对以上问题,本小节从系统物理层信息着手,通过结合碰撞信号检测、标签数量估计以及碰撞信号恢复等手段,提高系统识别性能。

##### 3.1.1 碰撞信号检测

文献 [27] 尝试从涉及无源超高频射频识别 (ultra high frequency, UHF) RFID 标签的通信碰撞中提取有价值的信息。提出了可提高防碰撞算法效率的信息提取技术,通过分析接收波形的直方图,在软件层面检测碰撞。文献 [58] 分析了 RFID 系统面临标签碰撞问题,即阅读器无法从重叠信号中区分同时报告的标签 ID。而现有的防碰撞算法使用基于 CRC 的碰撞检测函数,需要复杂的计算,耗时长。提出一种快速碰撞检测 (quick collision detection, QCD) 方案,该方案利用比特互补函数和碰撞前导码来降低计算复杂度,简化集成

电路设计。与现有算法相比, QCD 可将识别效率提高 40%。

由于标签向阅读器进行通信前会对信号进行编码, 考虑一种较为常见的编码方式: FM0 编码, 文献 [59] 提出一种碰撞检测算法, 但是该算法只适用于一个或两个标签出现错误的情况。此处提到的 FM0 (frequency modulation zero) 编码是一种在无线射频识别系统中常用的数字编码方案, 其编码规则简单, 易于实现。它通过对频率进行调制来表示二进制数据, 其中“0”对应频率的不变, 而“1”对应频率的变化。图 6 展示了 FM0 编码的符号以及序列。

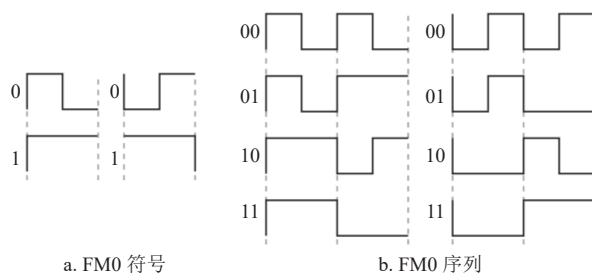


图 6 FM0 编码与序列结构

同样在标签编码上, 文献 [60] 提出了一种基于多子载波米勒编码的新型物理层分离方法。由于传统的物理碰撞分辨率主要使用单子载波编码, 在此基础上, 文献 [60] 提出的方法是将分离后的碰撞信号乘以与子载波频率相同的时钟信号来完成移频, 然后进行相干解调和低通滤波以去除高频分离噪声。仿真结果表明, 与使用单载波的 FM0 码相比, 使用更多子载波的米勒码的误码率更低。在信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 较低的情况下, 与传统的 XOR 方法相比, 实现了更高的分离效率和误码率性能。

在对阅读器底层数据的分析方面, 文献 [61] 使用专用阅读器从 70 个标签中收集信号, 发现可以根据信号的时域特征对 UHF RFID 标签进行分类, 而与阅读器的位置和距离无关, 准确率约为 71%。同时, 阅读器最多可以唯一识别约 26 个 UHF RFID 标签, 而不受群体大小的影响。

### 3.1.2 标签数量估计

在 RFID 系统中, 标签数量估计是一个关键的步骤, 尤其在大规模、密集的部署中。标签数量估计主要指的是在给定时间窗口内, 估计多少 RFID 标签尝试与阅读器进行通信。这有助于优化系统性能、减少碰撞并提高读取速率。

由于传统阅读器在准确估计碰撞槽中同时响应的标签数量方面的局限性。文献 [62] 讨论了利用物理层碰撞恢复估算无源 RFID 系统中标签数量的问题。建议使用物理层阅读器架构来提取参与碰撞的标签的确切数量, 从而提高标签数量估算的准确性。该文提出一种名为 PHY-MAC-MFML 的估算器, 它结合了来自 MAC 层和物理层的信息, 通过结合跨层数据的方式, 提高标签估算的准确性。

在面对大规模标签部署场景时, 传统的 MAC 层方法只能根据响应帧中每个时隙的状态来估算标签数量, 并区分空闲和繁忙时隙。而改进的结合物理层信息的方法, 可以检测并发标签响应的数量, 并从同一个时隙中推断出整数状态。文献 [63] 提出了一种基于物理层的标签数量估计器 (physical layer cardinality estimation, PLACE), 该方案结合了从每个整数槽状态中获得的多个估计值, 实现了更高的估计效率。而文献 [35] 中介绍了一种新型碰撞检测和信号恢复算法, 该算法利用接收信号的直方图来检测多个标签的响应, 并确定响应标签的数量。不过该算法的硬件实现是单独存在的部分, 需要集成到 RFID 阅读器中。

### 3.1.3 碰撞信号恢复

碰撞信号恢复的目标在于从碰撞的多个信号中恢复并分离出各个原始的标签响应。通过实现这一目标, 系统可以避免不必要的重传请求, 从而大大减少与碰撞相关的开销。此外, 这种恢复和分离算法有助于提高系统的整体识别效率, 确保即使在高密度的标签环境中, RFID 系统也能够快速、准确地识别每一个标签, 达到最优的运行状态。

基于以上问题, 文献 [32] 提出了一种描述物理层冲突的模型, 并基于该模型设计了两种类型的接收机结构来分离冲突标签的信号。其中一种是在 I/Q 平面中区分两个标签源的单天线接收机, 另一种是结合两个标签不同空间特征的多天线接收机。而针对常见的 FSA 方案下的物理层信号, 文献 [64] 提出一种包含两个阶段的碰撞恢复算法, 这两个阶段分别为: 连续干扰消除和将星座投影到干扰的正交子空间。进一步地, 文献 [65] 为 RFID 系统提出通过使用波束成形技术对接收信号进行后处理, 降低碰撞的破坏性, 从而解决更多碰撞标签的问题。

文献 [64] 通过模拟验证了其理论预测, 并表明该方法可以显著提高吞吐量或将库存时间减少 90% 以上。而文献 [65] 通过模拟实验研究了所提

方法对系统性能的影响,并且将所提方法的性能与符合 EPC 协议的阅读器进行比较。利用碰撞恢复方法分析了实际场景中,库存时间的理论极限,并提出了接近这些极限的方法。而文献 [66] 同样关注到库存相关的问题。由于 RFID 系统广泛应用于供应链管理 and 库存控制。随着系统规模的扩大,顺序识别方法的性能会下降,该文提出一种并行识别协议 (parallel identification protocol, PIP) 可实现并行识别,并与当前的 RFID 设备兼容,PIP 将标签 ID 编码成专门设计的模式,以便于从碰撞中恢复。分析调查和模拟显示,与现有方法相比,PIP 可将识别延迟降低 25%~50%。

文献 [67] 研究了在超高频射频识别系统中使用多音载波技术从碰撞中恢复信号的问题,提出使用多音载波来解码碰撞的标签信号,并介绍了一种在单个时隙中确认多个标签信号的新方法。而文献 [68] 认为碰撞降低了信道利用率,提出一种名为直接解码碰撞 (directly decode the collisions, DDC) 的方案,其目的是从碰撞信号中直接解码,从而提高系统性能。与传统的 RFID 协议相比,DDC 的标签读取率提高了 40%。但是 DDC 修改了 RFID 标签中的 RN 生成器,需要为 RFID 阅读器增加碰撞解码方案。

文献 [69] 提出了一种分离碰撞 RFID 信号的低复杂度算法。该算法利用了碰撞信号的具体特征,如出现成对的振幅和不同的信息位,在软件定义的阅读器平台上实现了该算法,并通过模拟和实验验证了其有效性。结果表明,与传统的 MAC 方案相比,所提出的算法大大提高了整个系统的吞吐量。进一步,文献 [70] 使用软件无线电平台,提出了一种名为 BiGroup 的新型 RFID 通信范例,允许阅读器在一轮通信中解码来自多个商用 RFID 标签的碰撞。BiGroup 可从时域和星座域检查 RFID 物理层的标签碰撞,利用未充分利用的信道容量,并充分利用标签的多样性。与其他适用于 COTS 标签的解码方案相比,RFID 通信效率有了显著提高。

在 RFID 系统中,底层数据信息一直被忽略。本小节介绍从物理层信号中提取信息并进行处理的方法,其目的是实现碰撞信号的检测和碰撞信息的恢复。前者对于估计标签数量、时隙分配等起到重要作用,有助于系统的优化。后者则能够通过恢复碰撞数据,获取并行响应的数据信息。同时,结合数据编解码等技术,RFID 系统能够更有效地处理碰撞问题,提高数据获取和识别的效率。

### 3.2 天线因素

在 RFID 系统中,天线是与标签进行通信的重要组成部分。天线的设计和选择对系统的性能和效率有着重要影响。较大的天线通常能够提供更高的读取速度,因为它们能够接收到更多的标签信号。在密集环境中,多个标签可能同时处于读取范围内,信号碰撞概率增加。天线的配置应该允许系统同时读取多个标签而不会互相干扰。

#### 3.2.1 多天线配置

早期 RFID 系统配置以单天线为主,文献 [59] 利用单天线相干检测技术检测碰撞的射频识别信号。但是由于单天线的限制,该方案的碰撞解析力度最多只能到达 2 个标签,而带有多个标签的 RFID 系统出现标签信号重叠的情况会更为严重。文献 [71] 提出使用天线阵列的方式用于分离重叠标签信号,该方案与盲源分离技术相结合,解决处理标签碰撞非常耗时的问题。文献 [72] 在反向散射无线电系统中应用多天线,通过用多个射频标签天线对反向散射进行调制,可在散射丰富的环境中实现针孔分集,从而降低射频标签保持恒定误码率所需的功率。这种针孔分集以及射频标签散射孔径的增加可提高通信可靠性,并将射频标签的工作范围最多增加 78%。

先前的一些研究表明,RFID 系统在有多个标签的环境中运行,如果标签数量  $M$  小于接收天线的数量,且信道状态已知,则多天线接收机可从多达  $M$  个标签的碰撞中恢复。在此基础上,文献 [33] 提出了零强迫 (zero force, ZF) 接收机和最小均方误差接收机,可分离多达  $M = 2N^R$  个标签,其中  $N^R$  是阅读器上的接收天线数。对多组信号建模如图 7 所示。

天线接收到的信号首先下变频到基带。当  $R$  个标签同时响应时,接收天线  $i$  处的复值基带信号为:

$$s_i(t) = \sum_{j=1}^R h_{i,j} a_j(t) + L_i(t) + n_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, N_{RA} \quad (2)$$

式中,  $s_i(t)$ 、 $L_i(t)$ 、 $n_i(t)$  分别是第  $i$  颗天线上的接收信号、载波泄漏和噪声的复数值;  $a_j(t)$  表示标签  $j$  的调制信号;  $h_{i,j}$  表示对于阅读器,第  $j$  个标签和第  $i$  个接收天线之间的信道系数,如图 7 所示。每个信道系数  $h_{i,j}$  都是前向信道  $h_j^f$  与后向信道  $h_{i,j}^b$  的乘积。此外,文献 [33] 还讨论了使用碰撞恢复接收机的 FSA 系统在理论上的性能提升。

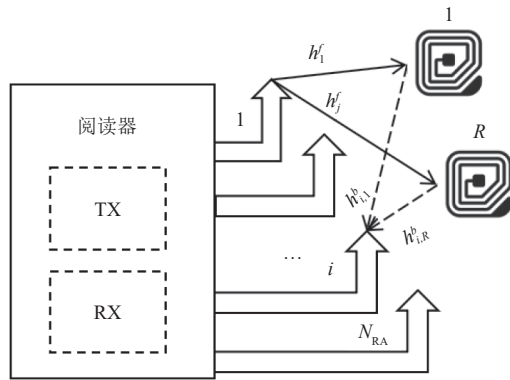


图7 多天线 RFID 收发模型

针对多天线系统下的 RFID 碰撞标签恢复功能, 文献 [73] 提出利用速率容差来增强 RFID 阅读器的性能。现有的碰撞恢复算法过于依赖完美的信道状态信息 (channel state information, CSI), 而忽视了标签回复中的速率容差。这种方法与现行的 RFID 标准兼容。进一步地, 文献 [74] 对具有多接收天线的 UHF-RFID 系统进行了深入研究, 特别关注了在物流中最为常见的 EPC-global Class-1 Gen-2 标准所采用的 FM0 通道编码对系统性能的影响, 并分析了其最大似然解码性能。

文献 [75] 针对多天线 RFID 阅读器提出了一种广泛线性最小均方误差防碰撞算法。这种算法特别关注了 RFID 阅读器的正交特性导致的反向散射标签信号的不恰当二阶统计问题, 为在单个时隙内有效地分离多个重叠的标签信号提供了手段, 从而可成功地集成到多天线 RFID 系统中, 恢复标签信号并提高系统的吞吐量。继续深入研究, 在文献 [76] 中得出结论: 为单天线 RFID 系统设计的估计器在低信噪比 (SNR) 下的性能较差, 因此并不直接适用于在标签信号重叠情况下的多天线系统。为了解决这个问题, 该文设计了一种针对多天线 RFID 系统的高维标签数量估计算法。这种方法利用接收天线上的空间分集来估算多天线环境中的标签数量。碰撞的标签信号被转化为高维向量, 将标签数量估计问题形式化为一个高维数据聚类任务。随后, 结合基于密度的空间聚类算法与高维空间模型, 来实现更精确的标签数量估计。

### 3.2.2 盲源信号分离

盲源信号分离技术的产生和发展源于独立分量分析 (independent component analysis, ICA) 的提出, 经过多年的研究, 形成了一系列算法和方法, 为信号处理领域提供了强大的工具和解决方案。在多天线 RFID 系统中, 由于标签和接收天线之间的

距离和位置的变化, 每个接收天线接收到的信号可能包含来自不同标签的回波信号以及其他环境噪声和干扰。这导致了混合信号的形成, 其中每个源信号代表着不同的标签。在这种情况下, 盲源分离 (blind source separation, BSS) 算法可以应用于多天线 RFID 系统中的信号分离问题。通过对接收到的混合信号进行处理, BSS 算法可以尝试将每个源信号 (即不同标签的回波信号) 分离出来, 从而实现对标签的识别和定位。

文献 [77] 对 RFID 信号的数据模型进行分析, 并验证了盲源分离算法对分离信号的适用性。文献 [78] 介绍了 RFID 系统中的防碰撞电路设计, 该电路采用基于 ICA 的 BSS 方法。文献 [79] 讨论了关于 RFID 阅读器中使用多天线以提高系统性能的问题, 为 RFID 阅读器接收器中的多用户检测提出了一种盲信道估计技术。文献 [80] 讨论了一种基于源信号盲分离的 RFID 识别新方法, 旨在解决 RFID 标签通信中的碰撞问题, 建立了基于盲分离的 RFID 防碰撞模型, 并考虑了 RFID 信号的非完全稀疏性。该文提出了一种改进的两步提取方法, 以最小的干扰估计基向量并提取相应的源信号。文献 [81] 提出了一种新的半盲信号分离方法来恢复 RFID 系统中的冲突标签。该方法利用 RFID 标签信号的统计特性, 特别是二阶和四阶累积量。即使阅读器上只有一个接收天线, 它也能够恢复两个以上碰撞的标签, 而无须对用于 UHF RFID 无源标签的 EPC-global 标准进行任何修改。

本节概述了在 RFID 系统中引入多天线、天线阵列等配置, 可以减少无线传输中信号干扰对数据的影响。多天线系统在碰撞信号的恢复方面也能发挥促进作用。通过使用多个天线, 系统能够更好地接收和处理来自标签的信号, 降低碰撞的影响。虽然增加天线个数会导致系统的成本增加, 但是这样的设计可以提高系统的鲁棒性, 并提升数据的可靠性和准确性。

### 3.3 信道与链路

RFID 系统作为一种无线通信系统, 在其传输过程中会面临各种信道问题, 包括信号衰减、多径效应、干扰和环境因素等。这些因素对系统性能和可靠性产生不利影响, 降低了系统的识别效率并削弱了防碰撞算法的有效性。合理的信道估计方法对解决 RFID 系统中的信道问题至关重要。透过适当的信道估计方法, 有助于优化信道传输, 提高系统

的性能和稳定性,从而进一步提高 RFID 系统的抗碰撞能力。此外,反向散射链路作为标签与读写器之间的通信链路,直接影响标签回应信号的质量和可靠性。通过优化反向散射链路的设计和参数配置,能够改善标签的接收和回应能力,减少碰撞的概率。

在 RFID 系统中,信道估计的功能是通过对接收到信号进行处理和分析,以估计信道的特性和参数,从而对信号进行恢复和解码。有效的信道估计使 RFID 系统能够更准确地提取和解码接收到的信号,从而提高数据传输的可靠性和性能。此外,在面对动态信道环境时,及时的信道估计还能为系统提供实时的信道状态信息,以便进行动态的调整和优化。

文献 [65] 概述了 RFID 系统中碰撞恢复和信道估计的相关研究,通过每个时隙确认两个标签来提高 FSA RFID 系统的理论吞吐量,使用“post-preamble”的修改标签响应进行信道估计的方法。文献 [32] 提出了一个描述物理层碰撞的模型。基于该模型,提出了一种信道估计方法。文献 [82] 为多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 无源射频识别系统提出了一种新的信道估计方法。该方法对标签响应的前导码应用正则化最小二乘算法,其中信息数据与先导符号叠加。结果显示,在标签密集的情况下,该方法减少了成功识别所需的请求总数,并具有抗先导污染效应的鲁棒性和良好的信道估计性能。

现有的信道估计方法对两个碰撞标签效果良好,但当碰撞标签数量超过两个时,估计误差就会增大。文献 [83] 分析了无源超高频 RFID 系统中的标签碰撞问题,并且提出了一种在物理层上恢复碰撞标签信号的新型信道估计方法,该方法使用阅读器已知的前置码信息,并且应用最小平方准则。文献 [84] 提出利用正交矩阵最小二乘法信道估计的新型信道估计算法,用于恢复物理层上的碰撞信号。该方案使用基于前置信号信息的正交矩阵,并应用最小均方误差准则来估计信道,随后利用估计的信道准确分离和恢复碰撞信号。数值结果表明,与现有估计相比,新型信道估计算法具有更低的估计误差和更高的分离效率。

信道中存在各种分布,这些分布描述了信号在传输过程中所经历的衰落、干扰和噪声等影响因素。在无源 RFID 系统中,双瑞利分布或反向散射

瑞利分布是普遍存在的,这使得性能分析与性能评估的难度增加。文献 [74] 在分析具有多个接收天线的 UHF-RFID 系统的最大似然解码性能时,使用两种方法来分析性能:基于成对错误概率的上限符号错误概率,以及通过考虑符号之间的所有错误概率来精确评估。而文献 [85-86] 发现在碰撞过程中,ON-OFF 键控调制信号的移动仍能保持各自标签的信道特性。基于这一观察结果,提出了一种名为 Fireworks 的新方法,用于估计平行后向散射信号的信道,该领域的现有工作仅限于对碰撞信号进行并行解码,或仅对非碰撞信号进行信道估计。

### 3.4 标签规模

在密集仓储环境下,RFID 技术的应用可以实现对附带 RFID 标签的物品的自动化识别和管理。然而,当大量的 RFID 标签在相互靠近的环境中存在时,可能会出现识别效率的问题。如当标签密集堆叠在一起或者相互干扰时,阅读器可能无法准确识别每个标签。同时环境中的物体移动,如移动标签、移动行人同样会对阅读器的识别带来干扰。因此,需要改进 RFID 系统的抗干扰能力和多标签读取算法,以提高大规模、密集环境下的识别效率和准确性,同时在动态移动场景中表现出色,具备良好的鲁棒性。

在大规模仓储环境中,现有的盘点方法通常假设丢失的标签数量很少。但是在某些特定情况下,如使用手持式 RFID 阅读器时,丢失率可能会显著增加。如何有效地盘点丢失的标签成为一个重要的技术挑战。针对这个问题,文献 [87] 提出了 P-MTI (物理层丢失标签识别) 的方案,用于识别 RFID 系统中丢失的标签。该方案能够查看标签的汇总响应,并从物理层碰撞中提取有用信息。利用丢失标签事件的稀疏性,通过压缩传感重建标签响应。文献 [88] 发现在开放式 RFID 系统中可能存在意外标签缺失导致的标签识别问题,提出了基于顺序的缺失标签识别协议 (OMTI),即使存在意外标签,也能有效识别所有缺失标签。文献 [89] 提出了一种基于粗粒度库存清单盘点的算法,以解决基于 RFID 的高缺失率盘点问题。现有的盘点方法假定丢失的标签数量很少,但在某些情况下,如在仓库中使用手持式 RFID 阅读器,丢失率可能会很高。文献 [90] 提出基于碰撞解决的缺失标签识别 (CR-MTI) 的新方法,该方法允许多个标签在一个碰撞时段内响应不同的二进制字符串,可以提高射频识

别系统中现有缺失标签识别协议的性能。

文献[90]针对大规模标签识别环境,提出了一种碰撞容忍动态帧时隙ALOHA(CE-DFSA)的算法,用于优化RFID系统中的标签识别。该算法利用正交沃尔什序列实现了同一时隙内多个标签的识别,从而减少了整体识别时间。文献[91]提出了一种运动检测算法,利用标签读取的RSSI和相位信息,近乎实时地从静止标签中准确分辨出移动标签。该算法设计用于多达1000个标签的高标签密度环境,在现实零售环境中进行了实验,准确率达到90%以上。该文还讨论了在零售环境中检测标签交互所面临的挑战,如来自静止和移动人员的干扰。

### 3.5 总结

本章介绍了RFID系统中的防碰撞算法,涉及防碰撞算法、天线规模、信道链路和标签规模场景4个方面的改进。这些部分在防碰撞问题的解决中各有侧重,但也相互联系。1)防碰撞算法主要利用在阅读物理层提取到的信号进行碰撞检测和碰撞恢复。这些算法通过选择和调度标签的方式,减少碰撞的发生,提高系统的吞吐量和效率。天线在RFID系统中扮演着重要的角色,是阅读器与标签之间通信的关键组件。2)增加天线规模可以提高系统的并行处理能力,减少碰撞的可能性。合理的天线布局和定向天线的使用可以减少干扰和提高识别精度。3)信道链路的稳定性对于防碰撞的效果至关重要。通过准确估计信道状态,可以优化通信参数的选择,提高系统的抗干扰能力和传输稳定性。4)在特定的场景下,标签的位置、数量、密度变化对于防碰撞算法的选择和优化提出了挑战。根据不同场景的需求,改进的防碰撞算法能够提升系统的效率和性能,满足实际应用需求。

综上所述,通过改进防碰撞算法、优化天线规模、提高信道链路稳定性和适应特定场景,能够有效提升RFID系统的性能和效率。

## 4 存在的挑战与未来的工作

尽管RFID系统在各个领域都得到了广泛的部署和应用,但随着应用场景的不断扩展和复杂化,一些关键问题和挑战也逐渐浮现出来。本章对高密度标签场景下的干扰与碰撞问题、实施标准与互操作性的挑战以及数据传输安全与隐私保护的关键问题进行总结,提出解决方案,以推动RFID系统的进一步发展和应用。

### 4.1 存在的挑战

1) 高密度标签场景的挑战:①在某些场景中,如零售库存管理或物流中心,可能存在大量标签在相对小的区域内同时存在的高密度场景,这会增加标签之间的碰撞和干扰。②在某些情况下,特别是在有金属、液体等干扰物存在的环境中,标签的读取范围可能受到限制,导致无法准确读取标签。③由于标签之间的密集干扰、环境的干扰、读写器的能力限制以及防碰撞算法的不完善所引起的误识别、漏识别或重复识别等问题,标签的读取和识别变得更加困难。

2) 标准和互操作性:尽管有EPC-global和ISO等组织制定的标准,但在实际应用中,不同厂商的RFID设备和系统之间仍然存在互操作性的挑战。这可能导致系统集成的复杂性和兼容性问题,增加了部署和扩展RFID系统的难度。其次,基于改进的碰撞检测和碰撞恢复算法是基于阅读器在物理层面上接收到的信号进行处理的。阅读器通过检测和解码接收到的信号,可以确定是否发生了碰撞,并尝试恢复受影响的数据。然而,如果当前阅读器的硬件不支持物理信号的获取,这意味着阅读器无法直接获取传输信号的细节和特征,从而无法准确地进行碰撞检测和碰撞恢复。

3) 数据安全和隐私问题:RFID技术涉及大量数据的传输和存储,其中可能包含敏感信息。未经适当的加密和安全措施,RFID数据可能受到未经授权的访问、拷贝或篡改的风险。①数据泄露:在碰撞解决过程中,读写器可能会发送特定命令或询问标签的信息。如果这些信息未经适当保护,可能被未经授权的实体截获,导致数据泄露。②虚假标签攻击:攻击者可能尝试模拟或伪造标签,以干扰系统的运行或进行欺骗行为。这种虚假标签攻击可能会导致认证问题、数据篡改或未经授权的访问等安全风险。

### 4.2 未来的工作

研究人员一直在努力改进RFID技术。包括开发更先进的标签设计、改进的防碰撞算法、增强的数据安全措施、降低成本的制造技术以及更好的标准化和互操作性支持等方面的努力。针对以上存在的问题与挑战,可以从硬件、软件和应用场景3方面来讨论RFID相关技术的发展趋势。

1) 硬件层面的改进:改进阅读器性能,支持对于物理信号的获取。这样能够直接获取到传输信

号的细节和特征,从而准确地进行碰撞检测和碰撞恢复。目前一些基于软件定义的阅读器(SDR-Reader)思路已经在实验室环境中展现出了很好的效果<sup>[92-93]</sup>,需要进一步向工业场景推广。其次,RFID 标签可能具备更多的功能和智能化特性。如标签可以集成传感器<sup>[94]</sup>实时监测温度、湿度、压力等参数。标签可能具备更强的数据处理和存储能力,能够进行简单的本地数据处理和决策。但同样带来的问题是,RFID 标签和阅读器的尺寸和成本需要进行权衡。这将使得标签需要更方便地嵌入到各种物体中,并且读写器可以更容易地集成到现有设备和系统中。

2) 软件层面的改进:由于目前大量已经部署使用的阅读器无法直接获取传输信号的细节和特征,从而无法准确地进行碰撞检测和碰撞恢复。在这种情况下,需要考虑其他的解决方案来改进碰撞检测和碰撞恢复算法。在软件层面上改进碰撞检测和碰撞恢复算法的关键是通过数据分析和统计、算法优化和参数调整、信号处理和解码技术、机器学习<sup>[95]</sup>和模式识别,以及强化学习和自适应算法等技术手段,提高对标签传输中碰撞的识别准确性和受影响数据的恢复能力。这些改进方法旨在利用已有数据和算法的优化,推断碰撞发生的可能性,并通过高级的信号处理和解码技术、机器学习和模式识别以及强化学习等方法实现对碰撞情况的准确识别和自适应调整,以提高整体的标签识别性能和系统鲁棒性。

3) 增强的安全性和隐私保护:随着 RFID 技术的广泛应用,数据安全性和隐私保护变得更加重要。未来的 RFID 系统可能采用更强的加密算法和安全协议,以确保数据的安全传输和存储。通过防止攻击者通过技术手段截获 RFID 系统中的通信信号,保护读写器与标签之间的交互信号。

## 5 结束语

随着 RFID 技术的广泛应用和数量规模的增大,对 RFID 系统性能提出了更大需求。这包括增强防碰撞能力、提高识别速度、扩大读写距离和覆盖范围、提高抗干扰能力。满足这些需求将促进 RFID 在物流管理、库存管理等领域的高效运作。本文基于 RFID 技术的防碰撞算法,从传统算法和改进算法两个层面阐述和分析了基于 RFID 多标签识别的防碰撞技术研究进展。其次,提出了当前系

统中存在的技术挑战,并总结展望了 RFID 系统未来的工作方向。综合来看,基于改进的 RFID 防碰撞算法结合了底层物理信号、天线规模、信道与链路以及标签规模等信息,相比传统的防碰撞算法,它在大规模、密集型和移动环境下更能提高系统的效率和系统。

## 参考文献

- [1] STOCKMAN H. Communication by means of reflected power[J]. Proceedings of the IRE, 1948, 36(10): 1196-1204.
- [2] XU J, LI Z, ZHANG K, et al. The principle, methods and recent progress in RFID positioning techniques: A review[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2023, 7: 50-63.
- [3] SMITH-DITIZIO A A, SMITH A D. Barcodes vs. RFID and Its Continued Success in Manufacturing and Services[M]//KHOSROW-POUR M. Encyclopedia of Information Science and Technology. 4th ed. Hershey: IGI Global, 2018: 5273-5284.
- [4] WEINSTEIN R. RFID: A technical overview and its application to the enterprise[J]. IT Professional, 2005, 7(3): 27-33.
- [5] JIA X L, FENG Q Y, FAN T H, et al. RFID technology and its applications in Internet of Things (IoT)[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks. New York: IEEE, 2012: 1282-1285.
- [6] ZHU L, YUM T S P. A critical survey and analysis of RFID anti-collision mechanisms[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(5): 214-221.
- [7] SCHOUTE F. Dynamic frame length ALOHA[J]. IEEE Transactions on Communications, 1983, 31(4): 565-568.
- [8] MOTA R P B, BATISTA D M. A dynamic frame slotted ALOHA anti-collision algorithm for the internet of things[C]//Proceedings of the 29th Annual ACM Symposium on Applied Computing. New York: ACM, 2014: 686-691.
- [9] CHEN W T. Optimal frame length analysis and an efficient anti-collision algorithm with early adjustment of frame length for RFID systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(5): 3342-3348.
- [10] CHEN W T. A fast anticollision algorithm for the EPCglobal UHF class-1 generation-2 RFID standard[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(9): 1519-1522.
- [11] WANG N, XIE G, LIU Y A. EDCS: An enhanced distributed color selection algorithm for anti-collision in RFID system[C]//Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications. New York: IEEE, 2017: 1031-1035.
- [12] CHEN Y H, FENG Q Y. A collision avoidance identification algorithm for mobile RFID device[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2019, 65(4): 493-501.
- [13] ŠOLIĆ P, RADIĆ J, ROŽIĆ N. Early frame break policy for ALOHA-based RFID systems[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2016, 13(2):

- 876-881.
- [14] TONG Q L, ZHANG Q, MIN R, et al. Bayesian estimation in dynamic framed slotted ALOHA algorithm for RFID system[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2012, 64(5): 1179-1186.
- [15] LIU X L, XIAO B, LI K Q, et al. RFID cardinality estimation with blocker tags[C]//*Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications*. New York: IEEE, 2015: 1679-1687.
- [16] SHAHZAD M, LIU A X. Fast and accurate estimation of RFID tags[J]. *ACM Transactions on Networking*, 2015, 23(1): 241-254.
- [17] LIU X L, XIE X, LI K Q, et al. Fast tracking the population of key tags in large-scale anonymous RFID systems[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2017, 25(1): 278-291.
- [18] SU J, SHENG Z G, XIE L B, et al. Fast splitting-based tag identification algorithm for anti-collision in UHF RFID system[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(3): 2527-2538.
- [19] SU J, CHEN Y R, SHENG Z G, et al. Bit query based M-ary tree protocol for RFID tags identification[C]//*Proceedings of the 2017 IEEE Global Communications Conference*. New York: IEEE, 2017: 1-7.
- [20] ZEIN W, SHAABAN E. An enhanced binary tree anti-collision technique for dynamically added tags in RFID systems[C]//*Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology*. Chengdu: IEEE, 2010: 349-353.
- [21] MYUNG J, LEE W, SHIH T K. An adaptive memoryless protocol for RFID tag collision arbitration[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2006, 8(5): 1096-1101.
- [22] ZHOU W H, JIANG N D. Research on hybrid of ALOHA and multi-fork tree anti-collision algorithm for RFID[J]. *Procedia Computer Science*, 2021, 183: 389-394.
- [23] YE H M K, JIANG J R, HUANG S T. Parallel response query tree splitting for RFID tag anti-collision[C]//*Proceedings of the 40th International Conference on Parallel Processing Workshops*. New York: IEEE, 2011: 6-15.
- [24] PAL K. Algorithmic solutions for RFID tag anti-collision problem in supply chain management[J]. *Procedia Computer Science*, 2019, 151: 929-934.
- [25] TRIPATHI S, JAIN V K. Performance analysis of adaptive tree-based anti-collision protocol using M-ary splitting in RFID[C]//*Proceedings of the 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies*. New York: IEEE, 2019: 1-6.
- [26] SHEN D W, WOO G, REED D P, et al. Separation of multiple passive RFID signals using software defined radio[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on RFID*. New York: IEEE, 2009: 139-146.
- [27] KHASGIWALE R S, ADYANTHAYA R U, ENGELS D W. Extracting information from tag collisions[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on RFID*. New York: IEEE, 2009: 131-138.
- [28] YU J X, LIU K H, HUANG X D, et al. An anti-collision algorithm based on smart antenna in RFID system [C]//*Proceedings of the International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*. New York: IEEE, 2008: 1149-1152.
- [29] FENG M, KAMMEYER K D. Blind source separation for communication signals using antenna arrays[C]//1998 IEEE International Conference on Universal Personal Communications. Florence: IEEE, 1998: 665-669.
- [30] KNERR B, HOLZER M, ANGERER C, et al. Slot-wise maximum likelihood estimation of the tag population size in FSA protocols[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(2): 578-585.
- [31] ANGERER C, MAIER G, DELGADO M V, et al. Single antenna physical layer collision recover receivers for RFID readers[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*. New York: IEEE, 2010: 1406-1411.
- [32] ANGERER C, LANGWIESER R, RUPP M. RFID reader receivers for physical layer collision recovery[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(12): 3526-3537.
- [33] KAITOVIC J, LANGWIESER R, RUPP M. RFID reader with multi antenna physical layer collision recovery receivers[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications*. New York: IEEE, 2011: 286-291.
- [34] KAITOVIC J, ŠIMKO M, LANGWIESER R, et al. Channel estimation in tag collision scenarios[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on RFID*. New York: IEEE, 2012: 74-80.
- [35] TAN X, WANG H, FU L Z, et al. Collision detection and signal recovery for UHF RFID systems[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, 15(1): 239-250.
- [36] MAHDAVIFAR H, VARDY A. Coding for tag collision recovery[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on RFID*. New York: IEEE, 2015: 9-16.
- [37] WANT R. An introduction to RFID technology[J]. *IEEE Pervasive Computing*, 2006, 5(1): 25-33.
- [38] KARANTZALIS P. Analog circuit design[M]. Oxford: Newnes, 2015: 1075-1076.
- [39] AL-JAROODI J, AZIZ J, MOHAMED N. Middleware for RFID systems: An overview[C]//*Proceedings of the 33rd Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference*. New York: IEEE, 2009: 154-159.
- [40] SU J, CHEN G Q. A new RFID middleware architecture design[C]//*Proceedings of the 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering*. New York: IEEE, 2010: 637-639.
- [41] GS1. EPC Gen2V2 UHF air interface standard[EB/OL]. [2024-04-01]. <https://www.gs1.org/standards/rfid>.
- [42] CHEN W T. An accurate tag estimate method for improving the performance of an RFID anticollision algorithm based on dynamic frame length ALOHA[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2009, 6(1): 9-15.
- [43] HUANG Z, XU R, CHU C, et al. A novel cross layer anti-collision algorithm for slotted ALOHA-based UHF RFID systems[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 36207-36217.
- [44] ZHONG D B. An ALOHA-based algorithm based on

- grouping of tag prefixes for industrial Internet of Things[J]. *Security and Communication Networks*, 2022, 2022: 1812670.
- [45] BAI Z, WANG S N, HE Y G. A novel anti-collision algorithm in RFID for Internet of Things[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 45860-45874.
- [46] SU J, SHENG Z G, LIU A X, et al. A time and energy saving-based frame adjustment strategy (TES-FAS) tag identification algorithm for UHF RFID systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(5): 2974-2986.
- [47] CHEKIN M, HOSSIENZADEH M, KHADEMZADEH A. A rapid anti-collision algorithm with class parting and optimal frames length in RFID systems[J]. *Telecommunication Systems*, 2019, 71(1): 141-154.
- [48] WU H F, WANG Y, ZENG Y. Capture-aware Bayesian RFID tag estimate for large-scale identification[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2018, 5(1): 119-127.
- [49] SU J, SHENG Z G, HONG D F, et al. An effective frame breaking policy for dynamic framed slotted aloha in RFID[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(4): 692-695.
- [50] CHOI J, LEE C. Maximum a posteriori (MAP)-based tag estimation method for dynamic framed-slotted ALOHA (DFSA) in RFID systems[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012, 2012(1): 268.
- [51] EOM J B, LEE T J. Accurate tag estimation for dynamic framed-slotted ALOHA in RFID systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(1): 60-62.
- [52] WANG X. A fast hybrid strategy-based RFID tag identification protocol[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, 21(1): 1-7.
- [53] FERREIRA H P A, ASSIS F M, SERRES A R. Novel RFID method for faster convergence of tag estimation on dynamic frame size ALOHA algorithms[J]. *IET Communications*, 2019, 13(9): 1218-1224.
- [54] SU J, SHENG Z G, LIU A X, et al. A group-based binary splitting algorithm for UHF RFID anti-collision systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(2): 998-1012.
- [55] ZHOU Z L, CHEN B B. RFID counting over time-varying channels[C]//*Proceedings of the IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications*. New York: IEEE, 2018: 1142-1150.
- [56] CHEN Y H, HUNG R Z, CHEN L K, et al. Channel-quality aware RFID tag identification algorithm to accommodate the varying channel quality of IoT environment[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(2): 321.
- [57] SU J, SHENG Z G, LIU A X, et al. Capture-aware identification of mobile RFID tags with unreliable channels[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2022, 21(4): 1182-1195.
- [58] YANG L, HAN J S, QI Y, et al. Revisiting tag collision problem in RFID systems[C]//*Proceedings of the 39th International Conference on Parallel Processing*. New York: IEEE, 2010: 178-187.
- [59] BLETSAS A, KIMIONIS J, DIMITRIOU A G, et al. Single-antenna coherent detection of collided FM0 RFID signals[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2012, 60(3): 756-766.
- [60] ZENG Y, WU H F, XING C X. Unsupervised clustering separation in cross-layer approach for UHF RFID tag collision recovery[C]//*Proceedings of the 2018 International Conference on Advanced Control, Automation and Artificial Intelligence*. Paris: Atlantis Press, 2018: 231-235.
- [61] ZANETTI D, DANEV B, CAPKUN S. Physical-layer identification of UHF RFID tags[C]//*Proceedings of the 16th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. New York: ACM, 2010: 353-364.
- [62] DELGADO M V B, ANGERER C, ALONSO J V, et al. Estimation of the tag population with physical layer collision recovery[C]//*Proceedings of the 3rd International EURASIP Workshop on RFID Technology*. Cartagena: TU Wien Academic Press, 2010: 106-111.
- [63] HOU Y X, OU J J, ZHENG Y Q, et al. PLACE: Physical layer cardinality estimation for large-scale RFID systems[C]//*Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications*. Hong Kong, China: IEEE, 2015: 1957-1965.
- [64] KAITOVIC J, LANGWIESER R, RUPP M. A smart collision recovery receiver for RFIDs[J]. *Journal of Embedded Systems*, 2013, 2013(1): 7.
- [65] KAITOVIC J, RUPP M. Improved physical layer collision recovery receivers for RFID readers[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on RFID*. New York: IEEE, 2014: 103-109.
- [66] KONG L H, HE L, GU Y, et al. A parallel identification protocol for RFID systems[C]//*Proceedings of the IEEE INFOCOM 2014 - IEEE Conference on Computer Communications*. New York: IEEE, 2014: 154-162.
- [67] NABEEL M, NAJAM A I, DUROC Y, et al. Multi-tone carrier technique for signal recovery from collisions in UHF RFID with multiple acknowledgments in a slot[C]//*Proceedings of the IEEE 9th International Conference on Emerging Technologies*. New York: IEEE, 2013: 1-5.
- [68] KANG L, WU K S, ZHANG J, et al. DDC: A novel scheme to directly decode the collisions in UHF RFID systems[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2012, 23(2): 263-270.
- [69] XU C Y, ZHANG S L, DING F, et al. Experiment verified physical-layer collision separation of passive UHF tags[C]//*Proceedings of the 8th International Conference on Wireless Communications & Signal Processing*. New York: IEEE, 2016: 1-5.
- [70] OU J J, LI M, ZHENG Y Q. Come and be served: Parallel decoding for COTS RFID tags[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2017, 25(3): 1569-1581.
- [71] MINDIKOGLU A F, VAN DER VEEN A J. Separation of overlapping RFID signals by antenna arrays[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. New York: IEEE, 2008: 2737-2740.
- [72] GRIFFIN J D, DURGIN G D. Gains for RF tags using

- multiple antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56(2): 563-570.
- [73] SALAH H, AHMED H A, ROBERT J, et al. Multi-antenna UHF RFID reader utilizing stimulated rate tolerance[J]. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2017, 1(2): 124-134.
- [74] SALAH H, ROBERT J, AHMED H A, et al. Theoretical performance evaluation of UHF-RFID systems with multi-antenna maximum-likelihood decoding[J]. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2019, 3(2): 108-117.
- [75] DENG W, LI Z, XIA Y L, et al. A widely linear MMSE anti-collision method for multi-antenna RFID readers[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(4): 644-647.
- [76] DENG W, XIA Y L, LI Z, et al. A high-dimensional collided tag quantity estimation method for multi-antenna RFID systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(1): 132-136.
- [77] FENG S, WANG M A, YAN J, et al. Independent component analysis based tag anti-collision algorithm in multi-antenna radio frequency identification[C]//2015 5th International Conference on Information Science and Technology (ICIST). Changsha: IEEE Computer Society, 2015: 519-524.
- [78] OUNAS M, CHITROUB S, TOUHAMI R, et al. Evaluation performance of anti collision circuit based BSS method for RFID system[C]//Proceedings of the 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. New York: IEEE, 2011: 1988-1991.
- [79] PROMKEEREE T, DUANGSUWAN S, PROMWONG S. Experimental evaluation of received signal using blind channel estimation for RFID system via MIMO antenna[C]//Proceedings of the 4th Joint International Conference on Information and Communication Technology, Electronic and Electrical Engineering (JICTEE). Chiang Rai: IEEE, 2014: 1-5.
- [80] CHENG X H, LIU C. Research on RFID collision detection algorithm based on the underdetermined blind separation[C]//Proceedings of the 2016 4th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology. Paris: Atlantis Press, 2016: 1291-1298.
- [81] KALACHE M A, FERGANI L, METREF A, et al. New semi blind tag separation method for efficient tags to reader collision recovery in RFID systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(4): 877-881.
- [82] KHELLADI M F, METREF A, FERGANI B. Request efficient channel estimation method for MIMO passive RFID systems[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on RFID. New York: IEEE, 2015: 94-99.
- [83] DUAN H J, WU H F, ZENG Y. Channel estimation for recovery of UHF RFID tag collision on physical layer[C]//Proceedings of the International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems. New York: IEEE, 2015: 1-5.
- [84] DUAN H J, WU H F, ZENG Y, et al. LS channel estimation and signal separation for UHF RFID tag collision recovery on the physical layer[J]. *Sensors*, 2016, 16(4): 442.
- [85] JIN M, HE Y, JIANG C K, et al. Fireworks: Channel estimation of parallel backscattered signals[C]//Proceedings of the 19th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks. New York: IEEE, 2020: 85-96.
- [86] JIN M, HE Y, JIANG C K, et al. Parallel backscatter: Channel estimation and beyond[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2021, 29(3): 1128-1140.
- [87] ZHENG Y Q, LI M. P-MTI: Physical-layer missing tag identification via compressive sensing[C]//Proceedings IEEE INFOCOM. New York: IEEE, 2013: 917-925.
- [88] WANG Y Y, LIU J, WANG X, et al. Missing tag identification in open RFID systems[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications. New York: IEEE, 2017: 1-6.
- [89] ZHU W P, MENG X, PENG X L, et al. Collisions are preferred: RFID-based stocktaking with a high missing rate[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2020, 19(7): 1544-1554.
- [90] SU J, SHENG Z G, LIU A X, et al. An efficient missing tag identification approach in RFID collisions[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2023, 22(2): 720-731.
- [91] WAN C Y, TANRIOVER C, SHAH R C. Utilizing RFID tag motion detection in high tag density environments for customer browsing insights[J]. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2021, 5(4): 345-356.
- [92] BUETTNER M, WETHERALL D. A software radio-based UHF RFID reader for PHY/MAC experimentation [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on RFID. New York: IEEE, 2011: 134-141.
- [93] DE D D, LAKAFOSIS V, TARRICONE L, et al. Increasing performance of SDR-based collision-free RFID systems[C]//Proceedings of the IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest. New York: IEEE, 2012: 1-3.
- [94] SAMPLE A P, YEAGER D J, POWLEDGE P S, et al. Design of an RFID-based battery-free programmable sensing platform[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, 57(11): 2608-2615.
- [95] AKYILDIZ T, KU R, HARDER N, et al. ML-Aided collision recovery for UHF-RFID systems[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on RFID. New York: IEEE, 2022: 41-46.