

引用格式: 丁宝国, 杨波, 刘重军, 等. 收发分离 RFID 无源物联网系统架构和设计方法研究 [J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(6): 889-895.  
DING B G, YANG B, LIU Z J, et al. Research on the architecture and design method of RFID passive IoT system with separated transmission and reception[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2025, 54(6): 889-895.

# 收发分离 RFID 无源物联网系统架构和设计方法研究



丁宝国, 杨波, 刘重军, 陈真\*, 季飞, 章秀银

(华南理工大学 电子与信息学院, 广州 510641)

**摘要:** 工业 4.0 及智慧工厂的发展推动了全链条智能物联需求, 其中, 实时监控与可视化是工业 4.0 关键环节。通过物联网的传感器和设备对仓库和物流环节的实时监控, 实现整个供应链可视化管理和智能化协同运作。然而, 当前大规模仓储和物流架构主要包括“UHF RFID 固定式读卡器+天线 HUB”“UHF RFID 读卡器+前向链路 repeater”等, 这些系统架构存在覆盖距离短、识别率低等问题。为解决这些问题, 提出了一种基于收发分离 RFID 无源物联网系统架构, 通过前向链路和反向链路全分离方式, 实现连续覆盖及实时盘点, 为大规模仓储和物流环境下的物联网技术应用提供一种基于 RFID 无源物联网系统架构。实验结果表明, 该基于收发分离 RFID 无源物联网系统架构对比传统 UHF RFID 系统架构, 灵敏度提升大于 10 dB, 读取准确率达到 99% 以上。

**关键词:** UHF RFID; 反向链路; 前向链路; 物联网

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.12178/1001-0548.2024278

## Research on the architecture and design method of RFID passive IoT system with separated transmission and reception

DING Baoguo, YANG Bo, LIU Zhongjun, CHEN Zhen\*, JI Fei, and ZHANG Xiuyin

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** The development of Industry 4.0 and smart factories has driven the demand for full chain intelligent IoT, among which real-time monitoring and visualization are the key links in Industry 4.0. Real time monitoring of warehouses and logistics links through IoT sensors and devices enables visual management and intelligent collaborative operation of the entire supply chain. However, the current large-scale warehousing and logistics architectures mainly include “UHF RFID fixed card reader+antenna HUB” “UHF RFID card reader+forward link repeater”, etc. These system architectures have problems such as short coverage distance and low recognition rate. To address these issues, this paper proposes an RFID passive IoT system architecture based on the separation of transmission and reception. By fully separating the forward and reverse links, continuous coverage and real-time inventory can be achieved, thus providing an RFID based passive IoT system architecture for IoT technology applications in large-scale warehousing and logistics environments. The experimental results show that compared with traditional UHF RFID system architectures, the sensitivity of the passive IoT system architecture based on transceiver separation RFID has been improved by more than 10 dB, and the reading accuracy has reached over 99%.

**Key words:** UHF RFID; reverse link; forward link; Internet of Things

随着工业 4.0 及智慧工厂<sup>[1-2]</sup> 的快速发展, 制造业工厂通过整合不同环节和参与方的数据, 将物联网技术应用于整个供应链的各个环节, 实现从供应

商到制造商、再到配送商和零售商的全链条的智能化管理和协同运作。其中, 实时监控与可视化是全链条智能物联的重要环节, 其通过数据可视化分

收稿日期: 2024-10-11

基金项目: 国家重点研发项目 (2019YFB1804100)

作者简介: 丁宝国, 高级工程师, 主要从事移动通信基站系统方面的研究。

\*通信作者 E-mail: chenz@scut.edu.cn

析,使管理人员能够直观地了解仓库和物流环节的运作情况,提高决策的准确性和效率,实现实时监控与可视化的低成本、高准确性的连续检测的无源物联网<sup>[3-4]</sup>系统方法。UHF(超高频)RFID技术能一次性读取多个标签、穿透性强、可多次读写、数据的记忆容量大,无源电子标签成本低、体积小、使用方便,可靠性和寿命高,引起各界广泛关注。目前,UHF RFID已广泛用于仓库和物流环节进行物件跟踪,并且随着标签的价格进一步下降,其应用场景愈发广阔。

在传统的仓储管理中,采用手持式RFID读写器设备,受限设备应用形态,仓库管理人员只能手持读写器设备对局部仓储货物进行区域范围盘点,盘点距离一般为5~10 m,整个仓库盘点工作不仅耗时长,而且容易受人为因素影响造成货物漏盘的情况<sup>[5-6]</sup>。另一方面,当前主流UHF RFID读卡器的性能受限于其收发一体的集中式架构<sup>[7-9]</sup>,存在识读距离短、识别率低、多一体机间近点部署干扰严重且读写器仅适用于单点应用的缺点,无法支撑大规模仓储、物流、制造工厂等场景下的连续密集部署。

针对大规模仓储、物流、制造工厂等场景,如何进行RFID技术的系统架构和设计方法创新成为研究热点,当前有以下两种主要的系统架构,可以将读写器覆盖距离提升到10~70 m距离。

架构1:“UHF RFID固定式读卡器+天线HUB”架构。采用高灵敏度性能固定式读卡器<sup>[10]</sup>,通过天线HUB模块,实现天线口的扩展,可提供多个读取区域的部署,可以应用于更大面积的盘点应用场景。

架构2:“UHF RFID读卡器+前向链路repeater”架构<sup>[11]</sup>。采用前向链路repeater,将读卡器到标签方向信号进行模拟放大,将信号再中继转发给标签,从而扩展读卡器覆盖的距离。

架构1和架构2均采用集中式架构,集中式UHF RFID读卡器由于收发采用同一根天线,因此前向链路激励信号对反向链路接收会造成自干扰,进一步恶化读卡器的接收灵敏度,减小集中式UHF RFID读卡器反向链路的覆盖范围和降低读卡器的读取标签的读取准确率。

本文提出一种新的基于收发分离RFID无源物联网系统架构,该系统通过将集中式设备分离为激励器和接收器的架构设计,解决了集中式架构存在的自干扰问题;同时,分离式架构也带来前向链路和反向链路不等价的新问题,需要进一步通过链路

预算分析给出该系统的最优性能边界。

## 1 基于收发分离RFID无源物联网系统架构设计

### 1.1 网络系统模型和问题分析

基于收发分离RFID无源物联网系统架构模型如图1所示,包括接收器(Reader)、激励器(Helper)及标签(Tag)组成。激励器完成前向链路发送,接收器完成反向链路接收,并基于低延时和高吞吐的以太网转发网络,实现接收器及激励器间实时UHF RFID盘点信号实时交互及设备管理。

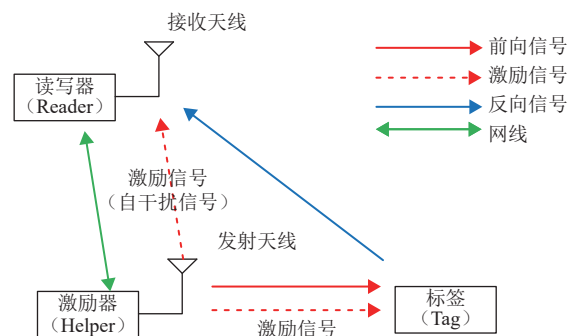


图1 基于UHF RFID无源物联网系统架构模型

基于收发分离RFID无源物联网系统架构通过采用接收器接收天线与激励器发射天线空间相隔离<sup>[12]</sup>的方法,可以有效降低激励器的激励信号对接收器的干扰功率,解决架构1和架构2存在的系统自干扰问题,提升接收器接收标签信号的灵敏度。同时,分离式架构的引入,造成系统前向链路和反向链路不等价的问题,从而需要分别考虑前向链路和反向链路覆盖范围对系统最优性能边界的影响,接下来详细开展该问题讨论和分析。

图2给出分离式RFID无源物联网不同节点的路损模型。

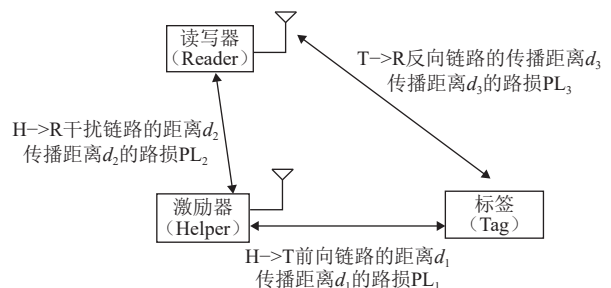


图2 分离式RFID无源物联网不同节点的路损模型

本文系统架构采用前向链路和反向链路分离架构,导致前向链路距离 $d_1$ 和反向链路距离 $d_3$ 不等价,从而引入以下3个待分析解决系统架构性能的

问题。

- 1) 前向链路覆盖能力 $d_1$ 最大化;
- 2) 激励器发射天线与接收器接收天线隔离距离 $d_2$ 对灵敏度性能提升;
- 3) 反向链路 $d_3$ 覆盖性能提升。

进一步通过链路预算理论推导, 得到系统最优接收灵敏度和反向链路 $d_3$ 的最优覆盖距离分析方法。其中, 前向链路 (Helper->Tag) 的路损表示为 $PL_1$ , 干扰链路 (Helper->Reader) 的路损表示为 $PL_2$ , 反向链路 (Tag->Reader) 的路损表示为 $PL_3$ 。

本网络系统模型分析将对上述3个主要问题分别进行分析。

1) Helper 和 Tag 之间的前向链路覆盖性能分析

Helper 和 Tag 之间前向链路覆盖性能分析的主要目的是考察 Helper 可以激活标签的最远覆盖距离。假设 Helper 的发射功率为 $P_H$ , Helper 的发射天线 $H\_Tx$ 的增益为 $G_{Htx}$ , Tag 的接收天线的增益 $G_{Tag}$ , 参考 Friis 公式<sup>[13]</sup>, 可得 Tag 接收到的有用信号功率 $P_{TagRx}$ 表示为:

$$P_{TagRx} = P_H + G_{Htx} + G_{Tag} - PL_1 \quad (1)$$

式中,  $PL_1$ 表示 Helper 和 Tag 之间无线信号的传播损耗,  $PL_1 = -27.56 + 20\lg f_1 + 20\lg d_1$ ;  $f_1$ 表示载波中心频点, 单位 MHz;  $d_1$ 表示 Helper 和 Tag 之间距离, 单位 m。

2) Helper 对 Reader 的自阻塞功率的性能分析

Helper 发射激励信号用于激励标签的同时, 会对 Reader 接收链路产生带内阻塞信号, 造成接收灵敏度恶化, 如图3所示。

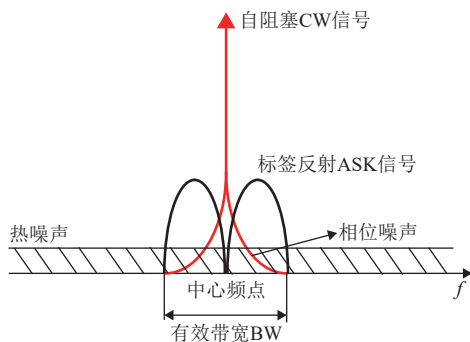


图3 自阻塞功率对接收标签信号造成干扰频谱示意图

因此, 通过 Helper 对 Reader 的阻塞功率的性能分析, 可以得到 Helper 距离 Reader 不同位置对接收灵敏度性能恶化影响。Reader 接收灵敏度计算

公式表示为:

$$P_{Rrx} = \text{Sum}\{-174\text{dBm/Hz} + 10\lg(\text{BW}) + \text{NF}, -126\text{dBm/Hz} + 10\lg(\text{BW}) + P_{th}\} + \text{SNR} \quad (2)$$

式中,  $\text{Sum}\{A,B\}$ 表示热噪声功率和相噪功率之和;  $-174 \text{ dBm/Hz}$ 表示热噪声的功率谱密度;  $\text{BW}$ 表示反向链路的有效带宽;  $-174 \text{ dBm/Hz} + 10\lg(\text{BW})$ 表示热噪声功率;  $\text{NF}$ 表示噪声系数;  $-126 \text{ dBm/Hz}$ 表示相位噪声的功率谱密度;  $P_{th}$ 表示 Helper 到 Reader 的接收功率;  $-126 \text{ dBm/Hz} + 10\lg(\text{BW}) + P_{th}$ 表示相噪功率;  $\text{SNR}$ 表示 Reader 接收机的解调门限。

参考 Friis 公式<sup>[13]</sup>, 可得 Reader 接收到的 Helper 发射激励信号功率 $P_{th}$ 表示为:

$$P_{th} = P_H + G_{Htx} + G_{Rrx} - P_{ISO} - PL_2 \quad (3)$$

式中,  $P_{ISO}$ 表示 Helper 发射天线和 Reader 接收天线之间的隔离度;  $PL_2$ 表示 Helper 和 Reader 之间无线信号的传播损耗,  $PL_2 = -27.56 + 20\lg f_1 + 20\lg d_2$ ,  $f_1$ 表示载波中心频点, 单位 MHz,  $d_2$ 表示 Helper 和 Reader 之间距离, 单位 m。

3) 接收器灵敏度和最优覆盖距离理论分析

Tag 和 Reader 之间反向链路灵敏度性能分析的主要目的是考察 Reader 可以接收解调到 Tag 信号最远覆盖距离。假设 Tag 的接收 Helper 功率 $P_{Tag}$ , Tag 的接收功率按商用标签最小灵敏度参考 $P_{Tag}$ , Tag 的反向散射插损为 $G_{Tag}$ , Reader 的接收天线 $R\_Rx$ 的增益 $G_{Rrx}$ , 参考 Friis 公式<sup>[13]</sup>, 可得 Reader 接收到的标签有用信号功率 $P_{Rrx}$ 表示为:

$$P_{Rrx} = P_{Tag} + G_{Tag} + G_{Rrx} - PL_3 \quad (4)$$

式中,  $PL_3$ 表示 Tag 和 Reader 之间无线信号的传播损耗,  $PL_3 = -27.56 + 20\lg f_1 + 20\lg d_3$ ,  $f_1$ 表示载波中心频点, 单位 MHz,  $d_3$ 表示 Tag 和 Reader 之间的距离, 单位 m,  $d_3 = d_1 + d_2$ 。

## 1.2 网络系统模型的数值计算

1) Helper 和 Tag 之间的前向链路覆盖距离分析

根据式 (1) 可知 Helper 和 Tag 之间距离 $d_1$ 和 Helper 的发射功率 $P_H$ 关系表达式如下:

$$d_1 = 10^{(P_{Tag} - G_{Tag} + G_{Rrx} - PL_3 + 27.56 - 20\lg f_1)/20} \quad (5)$$

设定 Helper 的发射天线增益 $G_{Htx} = 6 \text{ dBi}$ , Tag 的接收天线增益 $G_{Tag} = 0 \text{ dBi}$ , 商用标签的接收灵敏度 $P_{Tag} = -20 \text{ dBm}$ , 载波中心频点 $f_1 = 922.5 \text{ MHz}$ ,

则 Helper 和 Tag 之间距离和 Helper 的发射功率  $P_H$  关系如图 4 所示。

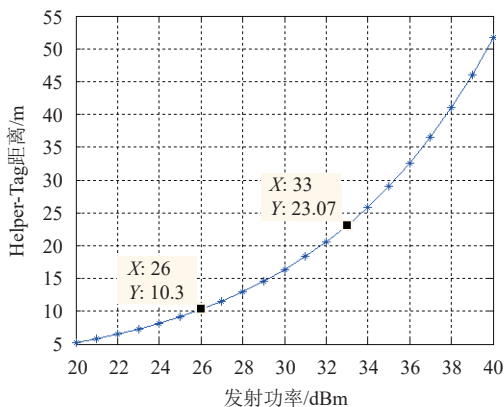


图 4 Helper 和 Tag 之间距离与 Helper 的发射功率  $P_H$  的关系

通过观察图 4 数值分析计算结果可知, Helper 的发射功率  $P_H \geq 26$  dBm, 可以保证前向链路 Helper 到 Tag 覆盖距离  $\geq 10$  m, 保证实际工程余量一般 Helper 发射功率配置为 33 dBm。

2) Helper 对 Reader 的自阻塞功率影响性能分析

设定载波中心频点  $f_1=922.5$  MHz, Helper 的发射功率  $P_H=33$  dBm, 有效带宽 BW 为 80 kHz, 设备 NF 值为 5 dB, Reader 的接收天线的增益  $G_{Rrx}=6$  dBi,  $P_{ISO}$  为 10 dB。以 Helper 与 Reader 距离为 [10, 20, 40, 80, 100] m 为例, 仿真给出 Helper 和 Reader 之间不同距离下的干扰功率大小, 参考文献 [12], MIMO 设计最大隔离度为 51 dB, 降低自阻塞干扰功率为  $-18$  dBm, 远远高于本系统的干扰功率大小, 如图 5 所示。

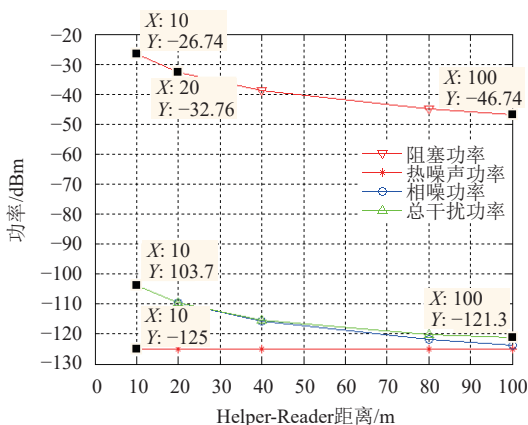


图 5 Helper 和 Reader 之间不同距离下干扰功率大小

图 5 数值仿真结果表明, 在 Reader 与 Tag 反

向链路覆盖距离 100 m 以内, 由于蓝色 “-o-” 曲线的相噪功率大于红色 “-\*” 曲线的热噪声功率, Reader 接收灵敏度主要受到相位噪声的影响。

则 Reader 接收灵敏度计算公式 (2) 可以进一步简化为:

$$P_{Rrx} = -126 \text{dBm/Hz} + 10 \lg(BW) + P_{th} + \text{SNR} \quad (6)$$

### 3) 接收器最优灵敏度性能数值分析

结合式 (3) 和式 (6) 可知 Reader 接收灵敏度与 Helper 与 Reader 距离  $d_2$  的关系如下:

$$P_{Rrx} = \text{SNR} - 126 + 10 \lg(BW) + P_H + G_{Htx} + G_{Rrx} - P_{ISO} + 27.56 - 20 \lg f_1 - 20 \lg d_2 \quad (7)$$

灵敏度计算参考 FM0 编码方式的解调性能  $\text{SNR}=7 \text{ dB} @ \text{BER} \leq 0.1\%$ , 以 Helper 与 Tag 距离  $d_1=10$  m, Helper 与 Reader 距离  $d_2$  为 [10, 20, 40, 80, 100] m 为例, Reader 接收灵敏度与距离  $d_2$  关系表示如图 6 所示。

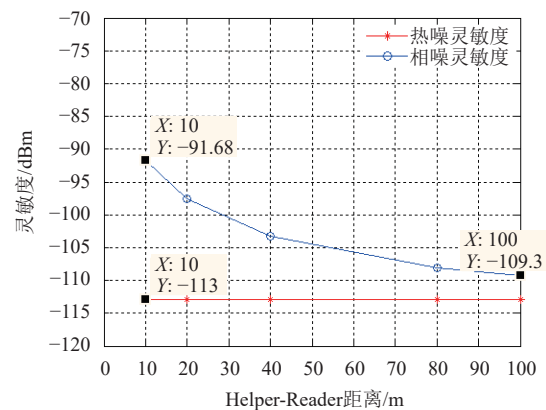


图 6 Helper 和 Reader 不同距离下, 接收灵敏度大小

通过观察图 6 的数值仿真结果可知, 接收器与激励器距离  $\geq 100$  m, 接收机灵敏度  $-109.3$  dBm, 性能优于商用的 RFID 读卡器 (型号 GXR-02) 的  $-92$  dBm, 灵敏度<sup>[4]</sup> 大于 10 dB, 则标签到阅读器覆盖距离  $\geq 110$  m。

### 1.3 网络系统模型覆盖能力分析

综合上述分析结论, 基于式 (4) 和式 (7) 可得出 Reader 接收器的覆盖能力设计的计算公式如下:

$$d_3 = 10^{\frac{\left\{ \begin{array}{l} (P_{Tag} + G_{Tag}) - \text{SNR} + (126 - 10 \lg(BW)) - (P_H + G_{Htx}) + (P_{ISO} + 20 \lg(d_2)) \end{array} \right\}}{20}} \quad (8)$$

通过式 (8) 可知基于收发分离 RFID 无源物联网系统架构组网覆盖能力主要受限于前向链路 Helper 与 Tag 间的覆盖距离, 可以通过提高 Helper

发射功率  $P_H$  保证整个系统链路覆盖余量; 另外, Reader 接收灵敏度主要受到自阻塞激励信号相位噪声干扰的影响, 因此 Helper 与 Reader 之间部署距离  $d_2$  设计会影响上行接收灵敏度, 影响 Reader 覆盖标签距离。

## 2 系统设计及实验结果

### 2.1 系统设计

基于收发分离 RFID 无源物联网系统示意图如图 7 所示。图中 Reader 的接收通道支持频段范围 920~925 MHz, Reader 最大可以支持 4 路接收通道 Rx1~Rx4, 可以进一步扩展 Reader 接收覆盖范围; 同时, Helper 的发射通道支持频段范围 920~925 MHz, 根据式 (5) 数值分析, Helper 最大发射功率可以配置 33 dBm, 前向链路覆盖范围大于 10 m, 并支持最大 4 路发射通道 Tx1~Tx4, 可以进一步扩展 Helper 激励标签覆盖范围。测试用例使用标签为  $10 \times 10 = 100$  个标签, 标签间隔 10 cm, 芯片采用型号 MW8113 标签, 标签灵敏度为  $-20$  dBm<sup>[14]</sup>。



图 7 基于收发分离 RFID 无源物联网系统示意图

基于收发分离 RFID 无源物联网系统架构中, 接收器如图 8 采用“ARM+FPGA+AD 93xx”芯片实现, ARM 完成 UHF RFID EPC 协议交互控制及盘点数据上报、激励器设备管理; FPGA 负责完成反向链路接收, 包括 FM0 及 Miller 编码接收、RFID 协议数据处理、RFID 盘点命令交互时序控制等, QOS 交换机处理, 实现超低时延的接收器对激励器控制命令转发; 根据式 (6) 数值分析, 选取 AD 93xx 及射频接收链路, 实现高动态和低底噪功率的接收器。

基于收发分离 RFID 无源物联网系统架构, 激励器如图 9 采用“MCU+FPGA+射频发送电路”方案实现, MCU 完成设备监控及管理; FPGA 负责

QOS 交换机处理, 实现超低时延的接收器对激励器控制命令转发, 根据接收器的控制消息发送对应的 RFID 前向命令; 根据式 (7) 数值分析, 射频发送电路实现低相噪的激励信号发送, 降低激励信号产生的自干扰影响, 发射相位噪声的功率谱密度小于  $-126$  dBm/Hz, 获得接收机的高灵敏度性能; 同时应用于大规模仓储、物流、制造工厂场景中, 根据式 (8), 通过 Helper 与 Reader 之间部署距离  $d_2$  拉远, 进一步将接收器反向链路覆盖能力提升到大于 100 m。

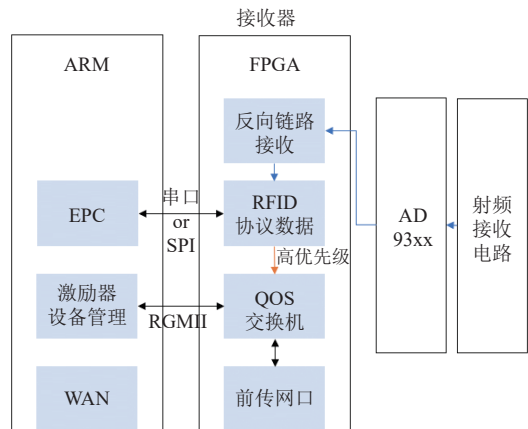


图 8 接收器系统方案

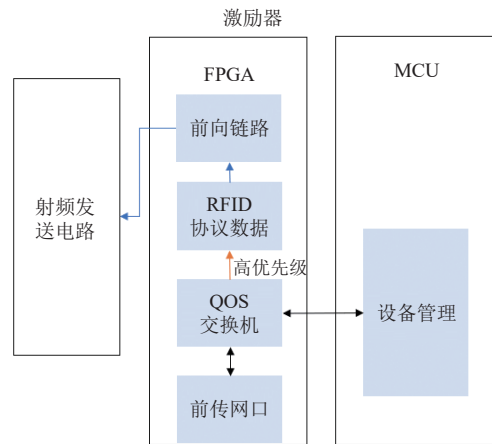


图 9 激励器系统方案

图 10 给出基于收发分离 RFID 无源物联网系统架构。相对于架构 1 和架构 2 的集中式 UHF RFID 系统, 将接收器和激励器进行分离, 支持交换机传输控制的组网部署, 从而有效降低系统的自干扰和互干扰, 扩大系统接收器的覆盖范围超过 100 m, 接收器支持多天线接收和激励支持多天线发送, 可以灵活地扩展大规模仓储、物流、制造工厂等场景的覆盖面积。

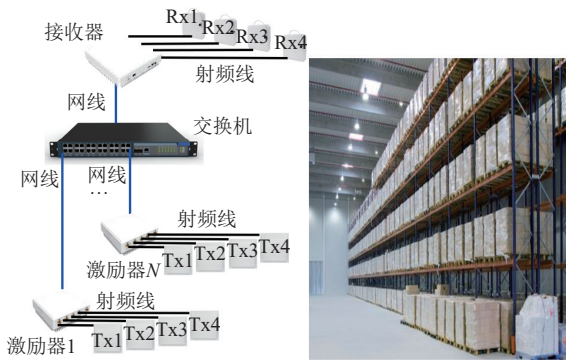


图 10 基于收发分离 RFID 无源物联网系统架构

2.2 实验结果

本小节主要进行两项测试，第 1 项是进行基于 UHF RFID 无源物联网系统与架构 1 “UHF RFID 固定式读卡器（商用 RFID 读卡器）” 的接收器读取率性能对比；第 2 项是基于 UHF RFID 无源物联网系统接收器与标签读取距离的测试。

1) 本系统与架构 1 的接收器读取率性能对比测试

对比基于 UHF RFID 无源物联网系统和架构 1 的接收器读取率性能，并给出测试参数配置如表 1 所示，系统测试示意图如图 11 所示。

表 1 系统测试配置参数

配置项	数值
激励器发射功率/dBm	33
前向链路/反向链路频段/MHz	920~925
业务模式 (FMD) /kHz	80
前向链路覆盖距离/m	3/5/8/10
反向链路覆盖距离/m	3/5/8/10/100
标签数量/个	100

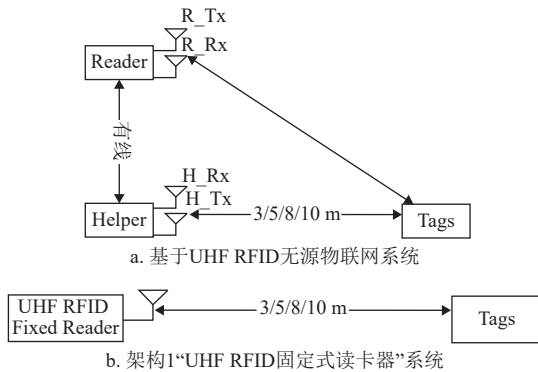


图 11 系统测试示意图

图 12 给出 FM0-80 kHz 业务模式下，分离式 RFID 无源物联网系统和架构 1 “UHF RFID 固定式

读卡器” 系统接收器读取率性能对比。对比测试结果可知：分离式 RFID 无源物联网系统在激励器与标签距离小于等于 10 m 情况下，接收器读取率可以达到 100%，分离式 RFID 无源物联网系统盘存整体性能优于架构 1 “UHF RFID 固定式读卡器” 系统。

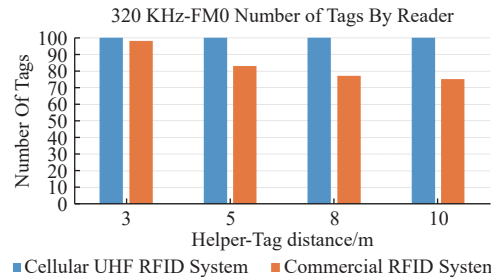


图 12 FM0-80 kHz 业务模式，接收器读取率性能对比

2) 本系统的接收器与标签读取距离的测试

测试将接收器和激励器/标签拉远至大于 100 m，测试阅读器反向链路接收极限性能，系统测试示意图如图 13 所示，其中接收器与标签距离为 110 m，激励器与标签距离 10 m。

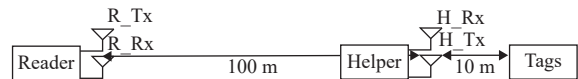


图 13 系统测试示意图

通过 100 个标签拉远测试结果，总共 100 个标签全部盘存到，验证式 (8) 中通过增加接收器和激励器的距离  $d_2$ ，可以进一步优化接收机盘点标签距离  $d_3$ 。

架构 1 的接收机盘点标签距离  $d_3$  表达式如下：

$$d_3 = 10 \frac{\left\{ (P_{Tag} + G_{Tag}) - SNR + (126 - 10 \lg(BW)) - \right\}}{20 (P_H + G_{Htx}) + \tilde{P}_{ISO}} \quad (9)$$

式中， $\tilde{P}_{ISO}$  表示收发一体的自干扰对消能力，架构 1 不具备因接收器和激励器分离  $d_2$  距离而带来的空间隔离优势。

架构 2 的接收机盘点标签距离  $d_3$  表达式如下：

$$d_3 = 10 \frac{\left\{ (P_{Tag} + G_{Tag}) - SNR - \tilde{NF} + (126 - 10 \lg(BW)) - \right\}}{20 (P_H + G_{Htx}) + (P_{ISO} + 20 \lg d_2)} \quad (10)$$

式中， $\tilde{NF}$  表示中继 Repeater 的设备噪声系数，会进一步恶化中继对标签前向激励距离和接收机盘点标签距离。

综合上述测试结果，与架构 1 和架构 2<sup>[11]</sup> 对比情况如表 2 所示，分离式 RFID 无源物联网系统反向链路覆盖性能分别达到了架构 1 覆盖范围和架构 2 覆盖范围的 1.5 倍和 11 倍。架构 1 和架构 2

均受限于反向链路覆盖距离, 不适用于连续覆盖组网应用场景。

表 2 不同系统架构覆盖范围对比

对比项	本文章系统架构	架构1系统	架构2系统
反向链路接收距离	110	72	10
前向链路距离	10	0.1~0.5	10

### 3 结束语

分离式 RFID 无源物联网系统架构充分利用接收器接收天线与激励器发射天线相隔离的特点, 可以有效降低自干扰信号, 成为提升整个系统盘点效率和成功率的关键突破技术, 具有以下几个应用优势: 标签的反向读取距离提升到 1.5~11 倍, 读取准确率达到 99% 以上。本文提出的分离式 RFID 无源物联网系统, 可实现大型仓储物流、制造等工业场景下的连续覆盖及实时盘点, 可应用于出入库管理、资产管理以及生产过程管理优化中。

随着 5.5G 及 6G 的发展, 3GPP 在 2023 年开展 A-IoT<sup>[15]</sup> 研究, 并提出蜂窝式无源物联网指标及需求。本文提出的分离式无源物联网架构, 可应用于 3GPP 未来 A-IoT 网络架构研究并应用。

### 参考文献

- [1] JOSHI S J, MAMANIYA S, SHAH R. Integration of intelligent manufacturing in smart factories as part of industry 4.0 - A review[C]//Proceedings of the Sardar Patel International Conference on Industry 4.0 - Nascent Technologies and Sustainability for 'Make in India' Initiative. New York: IEEE, 2022: 1-5.
- [2] FERNÁNDEZ-CARAMÉS T M, FRAGA-LAMAS P. A review on the application of blockchain to the next generation of cybersecure industry 4.0 smart factories[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 45201-45218.
- [3] BRAGLIA M, GABBRIELLI R, FROSOLINI M, et al. Using RFID technology and discrete-events, agent-based simulation tools to build digital-twins of large warehouses[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on RFID Technology and Applications. New York: IEEE, 2019: 464-469.
- [4] ZHOU H. Application of RFID information technology in

logistics warehouse management[C]//Proceedings of the IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers. New York: IEEE, 2022: 1215-1217.

- [5] GUNAWAN R, CHANDRA P D, KUSMADI, et al. Autonomous vehicle guided with RFID position detection for warehouse management system[C]//Proceedings of the 16th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications. New York: IEEE, 2022: 1-6.
- [6] MEHER B K, AMIN R, DAS A K, et al. KL-RAP: An efficient key-less RFID authentication protocol based on ECDLP for consumer warehouse management system[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2022, 9(5): 3411-3420.
- [7] TEKCIN M, PALANDOKEN M, KURSUN S. Wearable UHF-RFID sensor for wetness detection[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 115179-115189.
- [8] NIU Y H, LI X P, ZHAO W Y. Review of reader antennas for UHF RFID systems[J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2023, 30(5): 72-92.
- [9] ZHAO Y, ZHAO X X, LI L Y, et al. Timing: Tag interference modeling for RFID localization in dense deployment[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(23): 23464-23475.
- [10] Impinj R700 antenna hub product brief[EB/OL]. [2024-10-01]. <https://www.impinj.com/>.
- [11] DIMITRIOU A G. Design, analysis, and performance evaluation of a UHF RFID forward-link repeater[J]. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2020, 4(2): 73-82.
- [12] LIN H W, YANG X J, GE L, et al. Self-decoupling antennas for MIMO UHF RFID systems[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on RFID Technology and Applications. New York: IEEE, 2021: 275-277.
- [13] VOLAKIS J L. Antenna engineering handbook[M]. 4th ed. New York: Mc Graw Hill, 2007.
- [14] 2024 中国 RFID 无源物联网白皮书[EB/OL]. [2024-10-01]. <https://www.doc88.com/p-24859620551826.html>. 2024 White Paper on China's RFID Passive Internet of Things Industry[EB/OL]. [2024-10-01]. <https://www.doc88.com/p-24859620551826.html>
- [15] 3GPP. TR 38.848, Ambient IoT (Internet of Things) in RAN[EB/OL]. [2024-10-01]. [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38\\_series/38.848/38848-i00.zip](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.848/38848-i00.zip).

编辑 张莉