

小空间密集环境下基于深度学习的RFID信号补全与抗干扰方法

舒畅, 吴涛*, 陈沛霖, 庞志坚, 甘慧圆

武警广东总队医院, 广东 广州

收稿日期: 2024年10月19日; 录用日期: 2024年11月12日; 发布日期: 2024年11月21日

摘要

RFID技术作为智慧仓储的核心技术之一, 凭借其非接触式识别、读取范围广、存储信息量大等优势, 在物品追踪和管理方面发挥着重要作用。然而, 在小空间、多类别密集存储的环境中, RFID面临信号碰撞、错读漏读、环境适应性不足等挑战。针对上述问题, 提出小空间密集环境下基于深度学习的RFID信号补全与抗干扰方法。首先, 针对小空间密集环境下RFID标签密集分布、信号重叠问题, 在信号读取时采用多维度信号获取方法, 优化标签附着介质, 根据环境变化实时进行射频优化; 其次, 应用强耦合松弛化分解技术和盲源分离算法对读取到的RFID信号进行建模和分离, 提高信号质量和可读性; 最后, 对于残缺数据, 基于MDO多目标优化和深度学习的多尺度联动数据融合补全方法, 训练卷积神经网络学习数据特点, 实现不完整RFID信号的数据补全。实验结果表明, 所提方法能够有效解决小空间密集存储环境下RFID信号碰撞导致的数据漏读错读问题, 将识别准确率提升至99%, 显著提高了RFID定位感应的精确度和可靠性。

关键词

小空间密集存储, 智慧仓储, RFID信号分离, 抗干扰

RFID Signal Completion and Anti-Interference Method Based on Deep Learning in Small Space Dense Environment

Chang Shu, Tao Wu*, Peilin Chen, Zhijian Pang, Huiyuan Gan

Guangdong Provincial Corps Hospital of Chinese People's Armed Police Force, Guangzhou Guangdong

Received: Oct. 19th, 2024; accepted: Nov. 12th, 2024; published: Nov. 21st, 2024

*通讯作者。

文章引用: 舒畅, 吴涛, 陈沛霖, 庞志坚, 甘慧圆. 小空间密集环境下基于深度学习的 RFID 信号补全与抗干扰方法[J]. 无线通信, 2024, 14(6): 105-116. DOI: 10.12677/hjwc.2024.146013

Abstract

RFID technology, as one of the core technologies of smart warehousing, plays an important role in item tracking and management with its advantages of non-contact identification, wide reading range, and large amount of stored information. However, in environments with small space and dense storage of multiple categories, RFID faces challenges such as signal collision, misreading, and insufficient environmental adaptability. To address the above issues, a deep learning based RFID signal completion and anti-interference method is proposed for small space dense environments. Firstly, to address the issues of dense distribution and signal overlap of RFID tags in small space dense environments, a multidimensional signal acquisition method is adopted during signal reading to optimize the tag attachment medium and perform real-time RF optimization based on environmental changes; secondly, strong coupling relaxation decomposition techniques and blind source separation algorithms are applied to model and separate the read RFID signals, improving signal quality and readability; finally, for incomplete data, a multi-scale linkage data fusion completion method based on MDO multi-objective optimization and deep learning is used to train convolutional neural networks to learn data characteristics and achieve data completion of incomplete RFID signals. The experimental results show that the proposed method can effectively solve the problem of data leakage and misreading caused by RFID signal collision in small space dense storage environments, improve the recognition accuracy to 99%, and significantly improve the accuracy and reliability of RFID positioning and sensing.

Keywords

Small Space Intensive Storage, Smart Warehousing, RFID Signal Separation, Anti-Interference

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着现代物流和仓储管理系统的不断发展,智慧仓储因其高效率和高准确性而备受关注,无线射频识别(RFID)技术作为智慧仓储中的关键技术之一,通过无线通信实现物品自动识别和追踪,为智慧仓储建设带来革命性变化。RFID 标签具有读取范围广、非接触式识别、信息存储量大、安全性高等优点,能够满足仓库管理人员对物资清点、追踪、精细化管理等需求。然而,在小空间范围内多类型多材质小型物件密集存储会对 RFID 信号准确读取造成干扰,其信息获取准确性仍然存在不足,存在漏读、错读等现象。此外,金属、锡纸等外包装材质或液态物品也会对信息的准确读取形成较大影响,当前小空间密集环境下 RFID 信号准确读取仍然面临以下挑战: 1) 信号干扰问题。在密集空间中,多个 RFID 标签之间的信号容易相互干扰,导致数据读取准确性和稳定性下降。金属、锡纸、液体等会对 RFID 信号造成不同程度的反射或衰减,进一步加剧了信号干扰问题。2) 多尺度识别问题。小空间密集存储环境下物品尺寸形态各异,现有 RFID 技术难以实现对所有方向上不同角度的信号准确识别。物品杂乱放置导致信号源与读写头出现不同角度偏差,导致信号无法被准确读取,液态物品的流动性也会影响信号稳定性。3) 数据补全复杂性。由于标签类型多样、信号质量参差不齐、标签重叠等因素,对不完整 RFID 数据补全变得尤为复杂,现有技术难以有效应对这些挑战,导致 RFID 数据获取的准确性和可靠性受到影响。

尽管已经有一些研究尝试解决以上问题,但大多针对大型仓库中批量成规模物品仓储环境进行改进,

这种 RFID 标签识别方案仍然难以满足小空间密集存储环境下的信号准确读取需求。为了克服这些问题，本文提出一种小空间密集环境下基于深度学习的 RFID 信号补全和抗干扰方法，利用机器学习技术对收集到的多源数据进行深入学习、分析和处理，通过模式识别和预测模型来增强对信号的识别能力，从而实现对小空间内多类别密集存储条件下的物资高效管理和精准追踪。

2. 相关工作

当前主流的 RFID 信号补全方法主要基于信号处理技术，这类方法通过信号处理算法对缺失信号进行补全并对干扰进行抑制，从而提高信号质量和读取准确性。目前，基于信号处理的 RFID 信号补全和抗干扰方法主要有如下三类：1) 基于插值的信号补全方法；2) 基于统计的信号补全方法；3) 基于滤波和变换的抗干扰方法。

基于插值的信号补全方法通过插值算法对缺失的数据进行估计。线性插值方法假设缺失信号在时间上的变化是线性的，通过已知信号点估计缺失点。线性插值方法简单且计算量小，但对信号的高阶变化适应性较差[1][2]。样条插值方法利用样条函数进行插值，能够在已知信号点之间构建平滑曲线。样条插值在处理复杂信号时具有较好性能，能够较好地保持信号的平滑性和连续性[3][4]。多项式插值方法利用多项式函数进行插值，通过拟合已知信号点来估计缺失点。多项式插值适用于信号点较少的情况，但在信号点较多时可能会出现震荡现象[5][6]。

基于统计的信号补全方法利用信号的统计特性来补全缺失信号。均值填充用信号均值填充缺失值，适用于信号缺失较少的情况。均值填充方法简单易行，但可能会引入偏差，尤其是在信号缺失较多时[7][8]。回归填充利用回归模型预测缺失值，通过其他特征信号估计缺失值。回归填充方法能够更好地利用信号之间的关系进行预测，但需要构建合适的回归模型[9][10]。多重插补通过生成多个完整数据集并结合插补结果估计缺失值，能够较好地处理大规模数据缺失问题[11][12]。

基于滤波和变换的抗干扰方法通过各种滤波器和频域变换技术去除信号中的噪声和干扰。信号滤波常用的滤波器包括低通滤波器、高通滤波器和带通滤波器等。低通滤波器用于去除高频噪声，只保留低频信号，适用于平滑信号[13][14]。高通滤波器用于去除低频噪声，只保留高频信号，适用于检测突变信号[15][16]。带通滤波器用于保留特定频段的信号，去除其他频段的噪声，适用于选择性增强或抑制特定频段[17][18]。频域变换通过将信号从时域转换到频域识别和去除噪声。傅里叶变换(FT)将信号从时域转换到频域，通过频谱分析识别和去除噪声，适用于处理平稳信号[19][20]。短时傅里叶变换(STFT)在时频域上分析信号，通过滑动窗口进行傅里叶变换，可以处理非平稳信号[21][22]。盲源分离(BSS)通过分离混合信号中的独立源信号去除干扰。典型的 BSS 算法包括独立成分分析(ICA)和非负矩阵分解(NMF)。独立成分分析(ICA)假设源信号彼此统计独立，通过最大化信号的独立性分离源信号，适用于信号源独立性较高的情况[23][24]。非负矩阵分解(NMF)假设源信号和混合矩阵都是非负的，通过矩阵分解分离源信号，适用于非负信号源的分离[25][26]。自适应滤波通过调整滤波器参数适应信号的变化，从而去除噪声和干扰。常用的自适应滤波算法包括 LMS(最小均方)算法和 RLS(递归最小二乘)算法。LMS 算法通过最小化误差的均方来调整滤波器参数，适用于实时处理环境[27][28]。RLS 算法通过最小化误差的递归估计调整滤波器参数，适用于快速变化的信号环境[29][30]。

3. 模型设计与实现

针对小空间、多类别、密集存储环境下 RFID 信号干扰和数据缺失问题，提出一种基于强耦合松弛化分离深度学习的 RFID 信号补全与抗干扰方法。该方案整体框架如图 1 所示，其中包括三个主要模块：1) 信号读取优化，根据环境变化通过 MDO 调整信号读取角度，最大限度减少信号漏读；2) 信号分离提取，

将已经读取到的数据中强耦合部分进行分离，减少 RFID 信号彼此碰撞得到错误数据；3) RFID 数据特征深度学习与补全模型，基于 CNN 卷积神经网络，通过学习标签信号数据的数据特征和关联性，对残缺 RFID 信号进行补全。

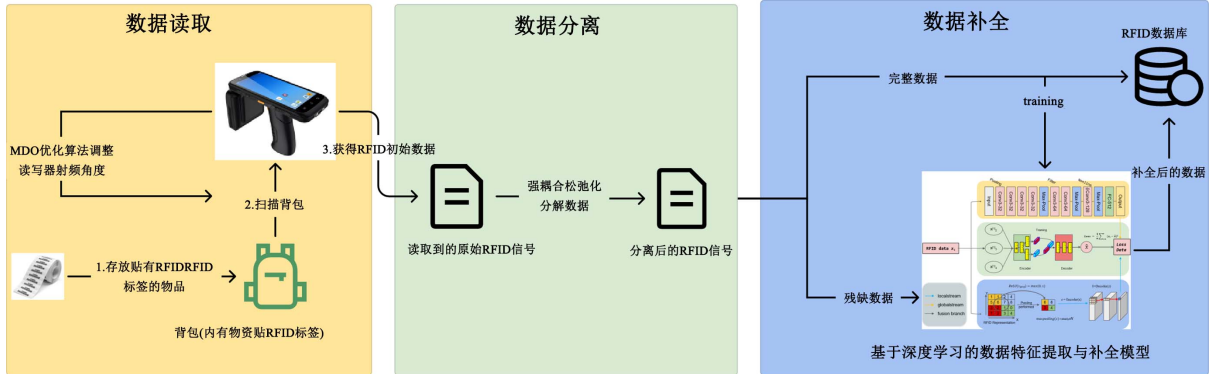


Figure 1. RFID separation and anti-interference scheme based on deep learning in small space dense environment
图 1. 小空间密集环境下基于深度学习的 RFID 分离抗干扰方案

3.1. 信号读取优化设计

RFID 系统防碰撞模块用于管理多个 RFID 标签同时与阅读器通信时，避免信号冲突碰撞，其目标是确保在复杂读取环境中，每个标签都能被准确、快速地读取。当前 RFID 系统的防碰撞算法主要为基于 ALOHA 防碰撞算法、基于树的防碰撞算法和混合算法三类。但是这些算法不能适应环境的动态复杂变化。本文提出一种基于 MDO 多目标优化的 RFID 防碰撞优化策略，可以根据环境变化实时进行射频识别优化，实现自适应性读取标签数据。当 RFID 信号密集时，利用多目标粒子群优化(Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO)算法对获取的 RFID 数据进行智能处理和分析，实时调整读写器射频。基于 MOPSO 的 RFID 防碰撞优化读取流程如图 2 所示，具体算法执行过程描述如下：

首先，定义优化策略的目标函数表示发射功率优化读取准确率，如公式(1)所示，

$$\min \{f_0(y, z), f_1(y, z), \dots, f_m(y, z)\} \tag{1}$$

其中， f_0 为主目标函数，表示 RFID 信号读取准确率提高率， f_i 表示第 i 个辅助目标函数，代表优化 RFID 标签读取器的发射功率或频率，用以减少信号干扰、提高特定类型物资的数据获取准确性。然后，定义决策变量，包括 y 、 z 两个部分构成：

$$y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}, \quad z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\} \tag{2}$$

其中， y 代表与 RFID 系统在密集小空间中的配置参数，包括读写器的布局、天线的角度和位置。 z 表示与不同类型物资或存储区域相关的变量，包括物资的种类、标签特性、在小空间中的位置等信息。

接着，定义约束条件如公式(3)、(4)所示，以确保决策变量满足必需的约束条件：

$$g'_j(y, z) \leq 0, \quad j = 1, \dots, r \tag{3}$$

$$h'_j(y, z) \leq 0, \quad j = 1, \dots, s \tag{4}$$

最后，通过对信号源的特征函数进行加权求和，近似表示观测到的 RFID 信号，实现信号的多源有效提取，具体表示如公式(5)所示：

$$\sum_i^N w_i \Phi_i = x \tag{5}$$

其中, N 表示信号源的数量, w_i 为信号源的权重, Φ_i 表示第 i 个信号源的特征函数, x 表示观测到的 RFID 信号。约束条件表示通过对信号源的特征函数进行加权求和, 来近似表示观测到的 RFID 信号, 实现信号的多源有效提取。

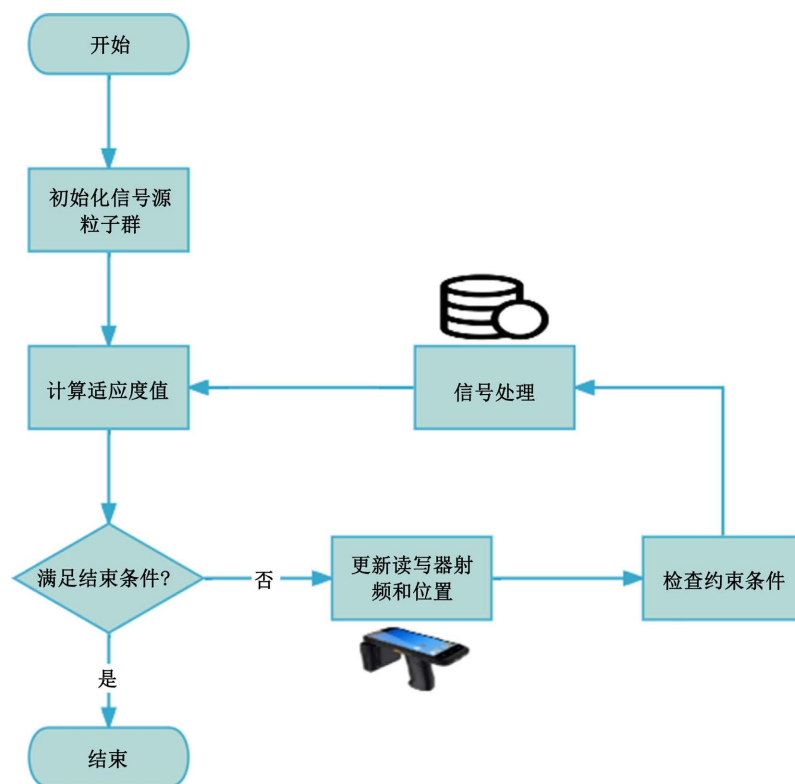


Figure 2. RFID anti-collision optimization algorithm based on MOPSO
图 2. 基于 MOPSO 的 RFID 防碰撞优化算法

3.2. 信号分离提取算法

读写器提取 RFID 信号后存储到初始信号库中, 由于标签重叠或者信号碰撞, 这些信号存在互相干扰的混合数据, 需要对这部分信号进行分离。常见的信号分离算法包括 ICA、BSS、NMF 等。这些算法在一定程度上能够有效分离混合信号, 但通常依赖于混合信号的统计独立性假设, 这在实际应用中不总是成立。此外, 这些算法可能对噪声和异常值敏感, 导致分离效果不佳。本文提出一种强耦合松弛化分解技术, 使用盲源分离(BSS)算法, 将强耦合信号分解为独立的信号源, 有效解决其他算法存在的分离不彻底问题。此外, 进一步使用图论和机器学习算法, 对 RFID 信号进行建模, 将信号视为图中的节点, 边代表信号间的相互作用。通过分析信号间的关联性, 识别出强耦合信号, 即相互干扰严重的信号, 将强耦合信号分解为独立的信号源, 提高信号质量和可读性, 并减少信号间的干扰。具体算法流程如下:

首先, 假定一个 BSS 算法是独立成分分析(ICA), 其目标函数可以表示为:

$$\max W \sum_{i=1}^m \log(1 + w_i^T S w_i) \quad (6)$$

其中, W 是分离滤波器矩阵, w_i 是列向量, S 是 RFID 混合信号的协方差矩阵。在小空间多类别密集存储环境下, 该目标函数用于从 RFID 混合信号中分离出独立的源信号, 减少信号间的干扰。

其次, 特征提取用于识别信号的独特属性。使用短时傅里叶变换(STFT)来提取信号的时频特征, 具

体表示如下:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x_{\text{RFID}}(\tau) w(t-\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (7)$$

其中, $x_{\text{RFID}}(\tau)$ 是 RFID 原始信号, $w(t-\tau)$ 是窗函数, $x_{\text{RFID}}(t, f)$ 是 RFID 信号的时频表示。在处理 RFID 信号时, 通过短时傅里叶变换可以提取出信号在时频域的特征, 有助于识别和分离强耦合信号。

3.3. 基于深度学习的信号补全模型

为了解决金属、液体等存储介质导致的 RFID 信号漏读问题, 本文训练了一个基于卷积神经网络的深度学习模型对缺失数据进行学习与补全。通过收集大量历史 RFID 数据信号, 包括标签读取强度、时间戳、环境噪声等, 结合 RFID 标签的空间位置关系, 包括标签之间的距离、角度和相对位置等, 训练一个基于卷积神经网络的深度学习模型, 使其能够学习 RFID 数据中的模式和趋势, 实现对复杂 RFID 信号数据的精准补全。模型结构如图 3 所示, 其具体执行流程介绍如下:

首先, 在 CNN 中, 卷积层通过对输入 RFID 数据应用一系列可学习的过滤器进行卷积操作。卷积操作表示为:

$$(f * g)(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) g(t-\tau) d\tau \quad (8)$$

其中, f 表示输入的 RFID 数据信号, 包括标签读取强度、时间戳、环境噪声等信息, 以及结合的 RFID 标签的空间位置关系数据, 如标签之间的距离、角度和相对位置等。 g 表示可学习的卷积核, 通过调整卷积核的参数, CNN 可以学习到 RFID 数据中的模式和特征。 t 表示时间或数据的索引。

其次, 池化层用于降低特征图的空间尺寸, 从而减少参数数量和计算量。最大池化可以表示为:

$$\max \text{pooling}(x) = \max_{i \in N} x_i \quad (9)$$

在处理 RFID 数据时, 池化操作用于降低特征图的空间尺寸, 减少参数数量和计算量 x 。对于输入的特征图, 在池化窗口内的元素集合 N 中, 取最大值作为池化后的结果, 提取 RFID 数据的主要特征, 同时减少数据维度。这里使用非线性激活函数用于在神经网络中引入非线性, 增强模型的表达能力, 具体表示为:

$$\text{ReLU}(x_{\text{RFID}}) = \max(0, x) \quad (10)$$

ReLU 函数用于在 CNN 中引入非线性, 增强模型的表达能力。对于输入的 x_{RFID} , 如果 x_{RFID} 大于 0, 则输出 x_{RFID} 本身; 如果 x_{RFID} 小于等于 0, 则输出 0。这样可以使 CNN 学习到更复杂的模式和关系, 提高对 RFID 数据的处理和分析能力。在训练 CNN 时, 需要定义一个损失函数来衡量模型预测与实际值之间的差异。使用损失函数均方误差(MSE), 具体表示为:

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (11)$$

其中, n 表示样本数量。在训练 CNN 模型进行数据补全时, 使用 MSE 损失函数来衡量模型预测值 \hat{y}_i 与真实值 y_i 之间的差异。通过最小化 MSE 损失函数, 调整模型的参数, 使模型能够更准确地预测缺失数据的值。

训练过程中使用反向传播算法计算损失函数关于网络参数的梯度。具体来说, 通过链式法则计算每个参数对损失函数的梯度。然后结合梯度下降算法, 根据梯度的方向和大小更新网络权重, 逐步优化模型性能。训练好的模型可以预测缺失数据的值。这通常涉及到一个自编码器结构, 其中编码器部分将输入压缩成低维表示, 解码器部分则将这个表示重构为原始数据。目标是最小化重构误差, 包括编码器和

解码器部分。编码器将输入压缩成低维表示如下：

$$z = \text{Encoder}(x) \tag{12}$$

其中， x 是输入的 RFID 数据， z 是低维表示。解码器将低维表示重构为原始数据如下：

$$\hat{x} = \text{Decoder}(z) \tag{13}$$

目标是 minimized 重构误差，通常使用 MSE 或其他相关的损失函数来衡量重构误差：

$$\text{Loss} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2 \tag{14}$$

通过不断训练自编码器，使模型学习到 RFID 数据中的模式和趋势，从而实现对因金属或液体导致的 RFID 信号数据精准补全。

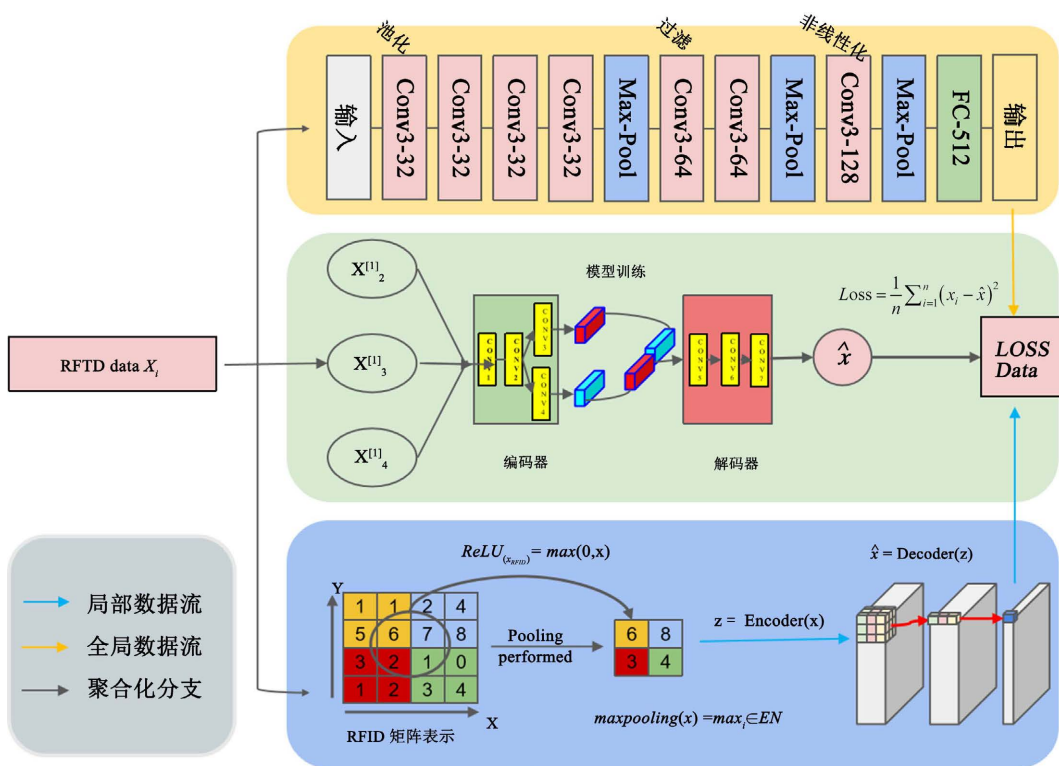


Figure 3. Principle of RFID signal completion
图 3. RFID 信号补全原理

4. 系统实现测试

4.1. 系统性能指标

对于 RFID 标签读取的性能，一般采用有效读取率 η 进行分析：

$$\eta = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{n_k}{n} = \frac{1}{k} \left(\frac{n_1}{n} + \frac{n_2}{n} + \dots + \frac{n_k}{n} \right) \tag{15}$$

其中， k 代表实验测试次数， n 为实际标签个数， n_k 为有效读取到的标签数，对每一次的读取率加权平均即为最终有效读取率 η 。

4.2. 系统实现

基于以上模型方法，本文开发了基于 RFID 的智慧仓储管理系统。硬件环境配置如表 1 所示，具体硬件设备如图 4 所示：

Table 1. Hardware configuration information

表 1. 硬件配置信息

硬件配置	参数
RFID 标签	NXPuicode8/ImpimjR6 型标签
RFID 打印机	G2000e/G3000e RFID 打印机
RFID 智能通道	RS-232/RJ45-DB9 型智能通道
RFID 读取头	MTK6763-8 核读取头
药品	各种小型军用药品(绷带、云南白药、消毒水、消炎药)
药品包装盒	硬板纸质盒



Figure 4. Hardware configuration diagram

图 4. 硬件配置图

RFID 标签选择 NXPuicode8/ImpimjR6 型标签，RFID 读取头选取 MTK6763-8 核读取头，确保覆盖到每个存储单元，并根据环境进行合理布局。平台软件系统架构如图 5 所示，包括前端用户界面、后端服务器、数据库管理系统、RFID 读取设备、传感器网络和通信接口。前端系统为方便用户进行物资管理、数据查询和系统设置等操作。后端服务器负责数据存储、处理和分析，以及控制 RFID 读取设备和传感器网络。RFID 数据库管理系统用于存储和管理 RFID 标签信息、物资信息、环境数据等。此外，开发了 RFID 读取设备控制软件，实现 RFID 信号的采集、处理和解析。数据处理模块包括数据补全、容错处理、数据分析、智能服务等功能，图 6 为系统功能入库操作截图。

4.3. 系统测试

为了验证本文方法的有效性和实用性，进行了以下测试：建立实际应用场景测试环境，包括不同类别、不同材质的 RFID 标签，模拟小空间密集存储环境和多种干扰因素。使用型号为 MTK6763-8 核的 RFID 读取头和 NXPuicode8/ImpimjR6 型 RFID 标签。为分析该系统性能，分别针对进行技术优化前、优化读取技术后、优化信号分离技术以及优化信号补全技术的 RFID 标签有效读取率进行比较，根据计算公式(15)，得到在取标签数 n 分别为 50、100、200、300，分别贴在不同规格的小药品纸质盒上，再无序放入大小体积一样的军旅包中，分别做十次重复独立实验($k = 10$)得到的结果 η 如表 2 和图 7 所示：

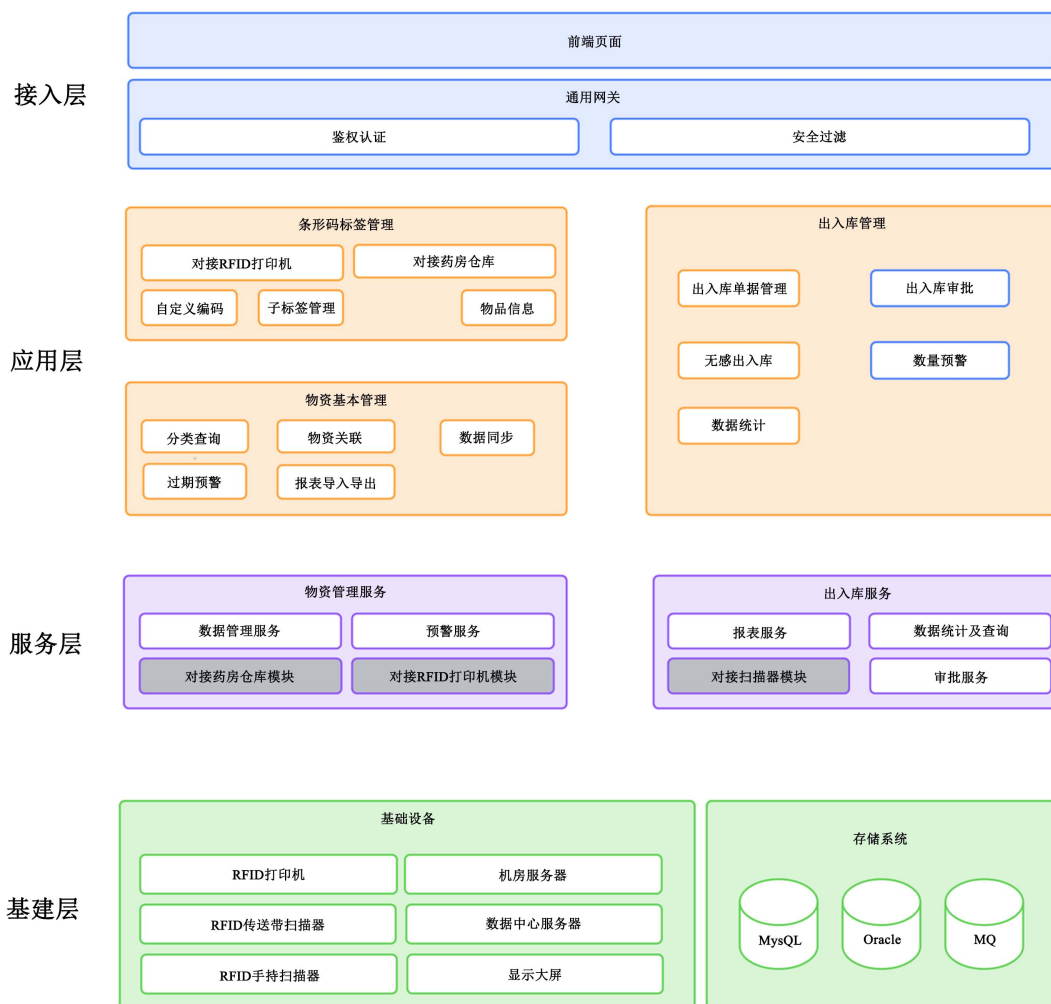


Figure 5. System architecture

图 5. 系统架构图

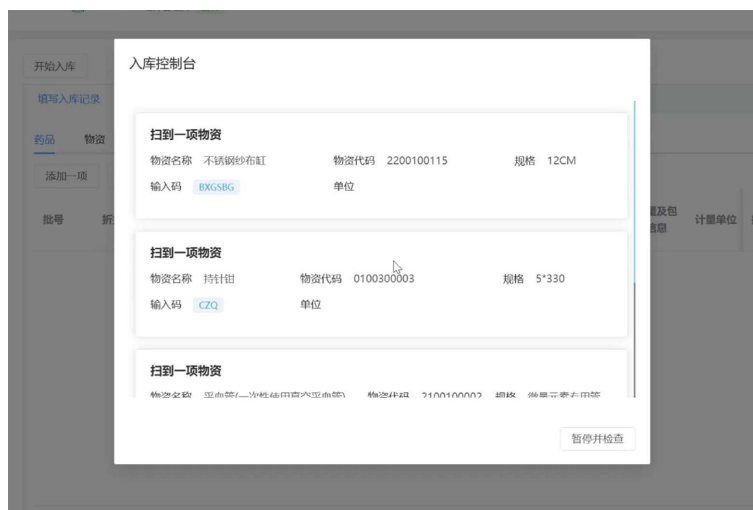


Figure 6. Smart warehouse management platform storage console

图 6. 智慧仓储管理平台入库控制台

Table 2. RFID signal reading accuracy of each scheme in the same testing environment
表 2. 各方案在同一测试环境下的 RFID 信号读取准确率

技术方案	$n = 50$	$n = 100$	$n = 200$	$n = 300$
未优化	83.2%	78.3%	72.1%	64.2%
优化读取技术	88.3%	88.1%	87.8%	87.4%
优化分离技术	91.2%	92.3%	91.8%	92.1%
优化补全技术	92.4%	93.1%	94.4%	96.1%

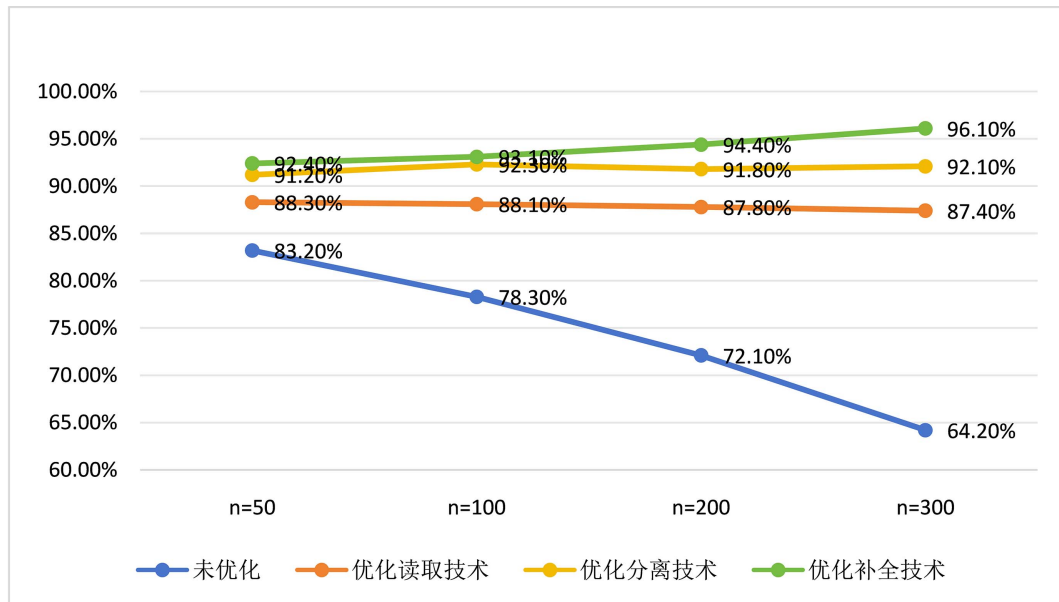


Figure 7. Line graph of RFID signal reading accuracy for each scheme in the same testing environment
图 7. 各方案在同一测试环境下的 RFID 信号读取准确率的折线图

由图 7 可知：未优化技术方案前，由于在小空间密集环境内随着 RFID 标签数量的增多，RFID 碰撞产生，识别准确率大幅下降；优化读取技术后，RFID 读取器实时适应环境变化，调整射频方案和角度，使不同环境下读取准确率趋于稳定；信号分离模块对读取得到的信号中强耦合的信号进行分离，使得这一部分信号 ID 能够与实际货品信号对应，提高了约 3% 的读取准确率。这些信号中完整部分将进入卷积神经网络深度学习模型训练，模型对残缺信号数据进行补全。可见 RFID 标签数量 $n = 300$ 时，数据识别准确率提升至 99%。与未进行技术优化的 RFID 仓储管理系统相比，在读取效率、识别准确率和数据完整性方面均有显著提升。由此可见，该方法能够有效应对小空间密集存储环境下的 RFID 信号干扰问题，保证了数据的准确性和可靠性。

5. 结束语

针对小空间、多类别物品密集存储环境中 RFID 识别面临的信号碰撞、漏读错误、环境适应性不足等问题，通过分析传统 RFID 定位感应技术的局限性，深入探讨了 RFID 信号碰撞算法、信号提取与分离、信号补全等关键技术。提出了基于深度学习的 RFID 信号补全与抗干扰方法，构建了智慧仓储管理实验系统。实验结果表明，该方法能够有效解决小空间密集存储环境下 RFID 信号碰撞导致的漏读错读问题，将识别准确率提升至 99%，显著提高了 RFID 定位感应的精确度和可靠性。

基金项目

武警部队国防科技领域科研自主选题研究项目：ZZKY20233115 (The Self-Selected Research Projects in the Field of National Defense Science and Technology of the Chinese People's Armed Police Force under Grant No. ZZKY20233115)。

参考文献

- [1] Burden, R.L. and Faires, J.D. (2010) Numerical Analysis. 9th Edition, Brooks/Cole.
- [2] Kincaid, D. and Cheney, W. (2002) Numerical Analysis: Mathematics of Scientific Computing. 3rd Edition, American Mathematical Society.
- [3] Unser, M. (1999) Splines: A Perfect Fit for Signal and Image Processing. *IEEE Signal Processing Magazine*, **16**, 22-38. <https://doi.org/10.1109/79.799930>
- [4] de Boor, C. (2001) A Practical Guide to Splines. Springer.
- [5] Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. and Flannery, B.P. (2007) Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. 3rd Edition, Cambridge University Press.
- [6] Bartels, R.H., Beatty, J.C. and Barsky, B.A. (1987) An Introduction to Splines for Use in Computer Graphics and Geometric Modeling. Morgan Kaufmann Publishers.
- [7] Little, R.J.A. and Rubin, D.B. (2002) Statistical Analysis with Missing Data. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119013563>
- [8] Schafer, J.L. and Graham, J.W. (2002) Missing Data: Our View of the State of the Art. *Psychological Methods*, **7**, 147-177. <https://doi.org/10.1037/1082-989x.7.2.147>
- [9] Azur, M.J., Stuart, E.A., Frangakis, C. and Leaf, P.J. (2011) Multiple Imputation by Chained Equations: What Is It and How Does It Work? *International Journal of Methods in Psychiatric Research*, **20**, 40-49. <https://doi.org/10.1002/mpr.329>
- [10] Enders, C.K. (2010) Applied Missing Data Analysis. Guilford Press.
- [11] Rubin, D.B. (1987) Multiple Imputation for Nonresponse in Surveys. Wiley.
- [12] Van Buuren, S. (2018) Flexible Imputation of Missing Data. 2nd Edition, Chapman and Hall/CRC.
- [13] Oppenheim, A.V. and Schafer, R.W. (2009) Discrete-Time Signal Processing. 3rd Edition, Prentice Hall.
- [14] Tan, L. and Jiang, J. (2013) Digital Signal Processing: Fundamentals and Applications. 2nd Edition, Academic Press.
- [15] Lyons, R.G. (2010) Understanding Digital Signal Processing. 3rd Edition, Prentice Hall.
- [16] Hamming, R.W. (1998) Digital Filters. 3rd Edition, Dover Publications.
- [17] Proakis, J.G. and Manolakis, D.G. (2006) Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications. 4th Edition, Prentice Hall.
- [18] Mitra, S.K. (2005) Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach. 3rd Edition, McGraw-Hill.
- [19] Brigham, E.O. (1988) The Fast Fourier Transform and Its Applications. Prentice Hall.
- [20] Cooley, J.W. and Tukey, J.W. (1965) An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. *Mathematics of Computation*, **19**, 297-301. <https://doi.org/10.1090/s0025-5718-1965-0178586-1>
- [21] Allen, J.B. (1977) Short Term Spectral Analysis, Synthesis, and Modification by Discrete Fourier Transform. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, **25**, 235-238. <https://doi.org/10.1109/tassp.1977.1162950>
- [22] Oppenheim, A.V., Schafer, R.W. and Buck, J.R. (1999) Discrete-Time Signal Processing. 2nd Edition, Prentice Hall.
- [23] Hyvärinen, A. and Oja, E. (2000) Independent Component Analysis: Algorithms and Applications. *Neural Networks*, **13**, 411-430. [https://doi.org/10.1016/s0893-6080\(00\)00026-5](https://doi.org/10.1016/s0893-6080(00)00026-5)
- [24] Comon, P. (1994) Independent Component Analysis, a New Concept? *Signal Processing*, **36**, 287-314. [https://doi.org/10.1016/0165-1684\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0165-1684(94)90029-9)
- [25] Lee, D.D. and Seung, H.S. (1999) Learning the Parts of Objects by Non-Negative Matrix Factorization. *Nature*, **401**, 788-791. <https://doi.org/10.1038/44565>
- [26] Cichocki, A. and Zdunek, R. (2006) Regularized Alternating Least Squares Algorithms for Non-Negative Matrix/Tensor Factorization. In: *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 793-802. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72395-0_97

- [27] Widrow, B. and Stearns, S.D. (1985) Adaptive Signal Processing. Prentice Hall.
- [28] Haykin, S. (2002) Adaptive Filter Theory. 4th Edition, Prentice Hall.
- [29] Diniz, P.S.R. (2008) Adaptive Filtering: Algorithms and Practical Implementation. 3rd Edition, Springer.
- [30] Farhang-Boroujeny, B. (2013) Adaptive Filters: Theory and Applications. 2nd Edition, Wiley.