

一种基于中间件的 RFID 系统阅读器 去冗余算法

吕石磊, 余顺争

(中山大学电子与通信工程系, 广东广州 510006)

摘 要: 冗余阅读器判别是大规模 RFID 系统性能优化的重要问题之一. 本文基于 EPC 网络架构提出一种阅读器去冗余算法 MRRE. 该算法利用 RFID 中间件的标签信息判别冗余阅读器, 不需阅读器对标签写入信息. 仿真结果表明, MRRE 算法比 LEO + RRE 算法在冗余阅读器检测率上提高了 6.27% ~ 20.80%, 在系统处理的标签信息量上降低了 4.50% ~ 35.73%, 而且在系统部署合理性方面更具优势.

关键词: 射频识别; 中间件; 冗余阅读器

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 05-0965-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.05.016

A Middleware-Based Algorithm for Redundant Reader Elimination in RFID Systems

LÜ Shi-lei, YU Shun-zheng

(Department of Electronic and Communication Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangdong Guangzhou 510006, China)

Abstract: The elimination of redundant readers is a significant approach to optimize the performance of large-scale RFID systems. In this paper, an algorithm for redundant reader elimination (MRRE) is presented, which is based on the architecture of EPC network. The MRRE eliminates redundant readers using the tag information in the RFID middleware, without the “write-to-tag” operations. Simulation results reveal that, compared with the LEO + RRE, the MRRE can improve the detection rate of redundant readers by 6.27% ~ 20.80% while the processed quantity of labels in RFID systems can be decreased by 4.50% ~ 35.73%. Moreover, it can enhance the deployment rationality of RFID systems.

Key words: radio frequency identification (RFID); middleware; redundant readers

1 引言

随着电子工业的发展, RFID 被广泛应用在供应链管理、定位导航等领域, 被视为实现物联网 (Internet of Things) 的核心技术之一. 冗余阅读器是影响 RFID 系统性能的基础问题之一, Carburnar 等人^[1]首次提出该问题, 并证明即使已知系统拓扑, 寻求去除冗余阅读器的最佳方案是一个 NP (Non-deterministic Polynomial) 问题. 在大规模, 尤其是密集部署的 RFID 系统中, 关闭冗余阅读器可减少系统能耗, 优化系统部署. 阅读器去冗余算法旨在最小化覆盖区域内工作阅读器的数量, 其可用于优化系统性能, 也可用于指导系统规划和设计, 还可为系统实现节能的定点监测功能. 现有的去冗余算法包括

RRE、LEO 等^[1~6]. 本文基于 EPC 网络^[7]提出一种 MRRE 算法 (Middleware-based Redundant Reader Elimination), 该算法利用 RFID 中间件 (Middleware) 的标签信息判别冗余阅读器. 与现有算法相比, 它不需系统拓扑信息, 也不需阅读器对标签写入信息. 仿真结果表明, MRRE 算法在冗余阅读器检测率、系统部署合理性等方面均优于现有算法.

2 相关研究

近年来, RFID 应用受到了越来越多的关注, 研究方向包括供应链服务、安全通信等^[8,9], 我们以前的工作也探讨了 RFID 在室内定位方面^[10,11]的应用. 冗余阅读器是指该阅读器识别范围 (reader radius, RA) 内所有标

签均可被其他阅读器读取,关闭它不影响系统读取标签信息. Carburnar 等人^[1]首先提出 RRE 算法(Redundant Reader Elimination). 该算法以阅读器 RA 内标签数量为权重,确保具有最大权重的阅读器优先向标签写入锁定信息,迭代运行直至所有标签被锁定,未锁定标签的阅读器即为冗余阅读器. Hsu 等人^[2]证明某些系统拓扑会导致 RRE 算法失效,并提出 LEO 算法(Layered Elimination Optimization). 该算法确保标签被首次通信的阅读器写入锁定信息,未锁定标签的阅读器即为冗余阅读器. LEO 算法可降低阅读器读写标签的次数,但其阅读器的读取顺序具有随机性,算法可靠性欠佳. 因此, Hsu 又提出了 LEO + RRE 算法,该算法综合了两种算法的优势. 后续算法大多基于上述算法思想或在其基础上加以改进,然而这些算法均需阅读器对标签写入信息^[3~5]或已知系统拓扑^[6].

3 去冗余算法分析

本节基于 RFID 工作特性对典型算法 RRE 和 LEO + RRE 进行性能分析.

(1)如图 1 所示,标签 T_1, T_2 位于阅读器 R_1, R_2 的 RA 重叠区,关闭其中一个不影响系统读取标签信息. 在 RRE 算法中, R_1 和 R_2 权重均为 2, 由于一个阅读器在同一时刻至多可对一个标签写入信息, 因此可能 R_1 锁定 T_1, R_2 锁定 T_2 , 反之亦然. 为不失一般性, 设区域内存在 m 个阅读器, 并有 n 个标签位于所有阅读器 RA 重叠区, 若各阅读器以等概率锁定标签, 则 RRE 算法漏判冗余阅读器的概率 P 为:

$$P = 1 - m/m^n = 1 - m^{1-n} \quad (m, n \in N, m \geq 2, n \geq 2) \quad (1)$$

结论 1 阅读器与标签一对一写入信息的工作特性可能导致 RRE 算法漏判冗余阅读器.

(2)RFID 阅读器间一般只能通过读写标签来交互信息^[1~6]. 表 1 为 RRE 算法对图 2 拓扑的优化过程, R_1 和 R_4 被判为冗余阅读器, R_2 和 R_3 重叠区的标签集合为 $\{T_3, T_4\}$. 然而, 关闭 R_1 和 R_3, R_2 和 R_4 也可读取所有标签, 二者重叠区的标签集合为 $\{\emptyset\}$. 减小重叠区的标签集合可减少 RFID 读写冲突的发生概率^[12], 因此其系统拓扑更具合理性. LEO 算法受阅读器读取顺序影

响, 如表 2 所示, 其不能识别冗余阅读器.

结论 2 阅读器间通过读写标签来交互信息的通信方式将导致算法漏判冗余阅读器或系统性能欠佳.

(3)现有算法^[1~5]需阅读器对标签写入锁定信息, 而且信息也可被其他阅读器读取. 因此这些算法含有一个隐性前提: 阅读器读取标签的最大距离(读距离)等于其写入标签的最大距离(写距离). 然而, 阅读器对标签写入信息时需消耗更大功率, 因此阅读器的写距离一般小于其读距离^[13]. 如图 3 所示, 实线和虚线分别表示阅读器读取和写入标签的最大范围. 在图 3-1 中, 只有 R_3 可对 T_4 写入信息, 因此 RRE 算法和 LEO 算法均不能识别冗余阅读器, 而关闭 R_3 不影响系统读取标签信息. 在图 3-2 中, R_1 不能对 T_1 写入信息, 所以该两种算法均误判 R_1 为冗余阅读器.

表 1 RRE 算法(图 2)

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
R_1	1, R_1				
R_2	4, R_2	4, R_2	4, R_2	4, R_2	
R_3			3, R_3	3, R_3	3, R_3
R_4					1, R_5
锁定	4, R_2	4, R_2	4, R_2	4, R_2	3, R_3
冗余	R_1, R_4				

表 2 LEO 算法(图 2)

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
R_1	R_1				
R_4					R_4
R_3			R_3	R_3	
R_2		R_2			
锁定	R_1	R_2	R_3	R_3	R_4
冗余	\emptyset				

表 3 算法分类总结

算法分类		结论 1	结论 2	结论 3
RRE	Real RRE	√	√	√
	Ideal RRE	√	√	√
LEO + RRE	Real LEO + RRE		√	√
	Ideal LEO + RRE		√	

结论 3 阅读器对标签读写距离不等的工作特性将导致算法漏判和误判冗余阅读器.

本文将 RRE 算法和 LEO + RRE 算法分别划分为理想(Ideal)和实际(Real)两种状态. 如表 3 所示, √ 表示

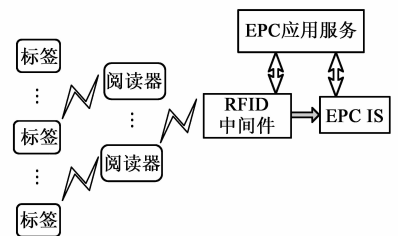
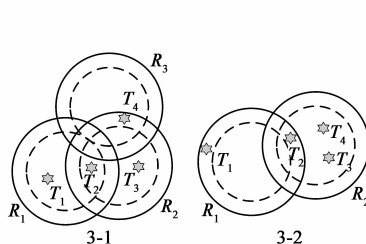
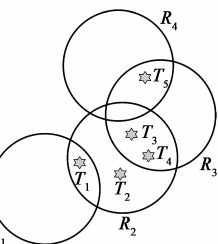
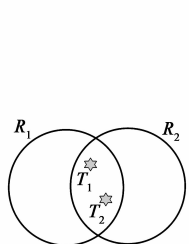


图1 系统拓扑(结论1)

图2 系统拓扑(结论2)

图3 系统拓扑(结论3)

图4 EPC网络架构

算法受相应结论影响,理想状态的算法只漏判冗余阅读器,实际状态的算法会漏判和误判冗余阅读器。

4 MRRE 算法

综上所述,RRE 算法和 LEO + RRE 算法性能会受到 RFID 工作特性的影响,而且无线 RFID 系统一般资源受限^[1,2],阅读器对标签频繁读写将会增加系统负担。基于此,本文提出一种基于中间件的 MRRE 算法,该算法不需阅读器对标签写入信息,可消除或减缓 RFID 工作特性的影响。

4.1 算法描述

如图 4 所示,RFID 中间件是 EPC 网络的重要组成部分,它对标签信息进行汇聚、存储等操作,为 EPC 应用服务和信息服务(EPC IS)提供高质量数据流。MRRE 算法利用 RFID 中间件的标签信息判别冗余阅读器,不需系统拓扑信息,该算法对系统要求如下:

- (1)阅读器可读取到其 RA 内所有标签。
- (2)RFID 中间件可接收并存储阅读器发送的标签信息。

首先建立“阅读器-标签”矩阵 M ,其定义如下:

$$m(i, j) = \begin{cases} 1, & T_j \subset R_i \\ 0, & T_j \not\subset R_i \end{cases} \quad (R_i \in RS, T_j \in TS) \quad (2)$$

其中, RS 、 TS 分别为中间件在单位时间内存储的阅读器集合和标签集合; $T_j \subset R_i$ 表示阅读器 R_i 可读取标签 T_j ,反之 $T_j \not\subset R_i$ 表示标签 T_j 不在阅读器 R_i 内。

MRRE 算法

步骤 1 计算矩阵 M 各行元素之和,得到向量 Me ,表示每个阅读器可读取的标签数量,其中 $e = (1, 1, \dots, 1)'$;计算矩阵 M 各列元素之和,得到向量 $M'e$,表示每个标签可被读取的阅读器数量;

步骤 2 计算向量 Me 中元素最大值,即可找出可读取最多标签的阅读器,由结论 1 可知,其可能对应多个元素,即与最大值对应的阅读器集合为: $\{i | i = \max(Me)\}$

步骤 3 计算每个阅读器与周围阅读器具有相同标签的数量:

$$f = M(M'e) - Me \quad (3)$$

则在可读取最多标签的阅读器中与周围阅读器具有相同标签的数量为最小的阅读器为:

$$i^* = \arg \min_{i = \max(Me)} f_i \quad (4)$$

其中 f_i 是向量 f 的第 i 个元素。所以,阅读器 R_{i^*} 在此次循环中包含最多数量的标签,并与周围阅读器具有相同标签的数量最小,也即其独自包含的标签数量最大。因此,它被作为冗余阅读器的可能性最小,应首先被选为工作阅读器。

步骤 4 把 R_{i^*} 所包含的标签归为阅读器 R_{i^*} ,并将这些标签从其它阅读器中移除。即,更新矩阵 M 为:

$$m \lfloor (i, j) | m(i^*, j) = 1 \rfloor = 0, R_i \in RS, T_j \in TS \quad (5)$$

步骤 5 重复步骤 2 ~ 4,直至矩阵 M 的元素全部为 0。此时,仍未被指定为工作状态的阅读器即为冗余阅读器。

4.2 算法分析

设系统中存在 n 个标签,可读写各标签的阅读器平均数量为 r 。

首先,RRE 算法中阅读器对标签的写操作复杂度为 $O(nr)$;LEO 算法将写操作复杂度降为 $O(n)$,但其结果不稳定;LEO + RRE 算法的写操作复杂度为 $O(nr')$, r' 为经其优化后可读写各标签的阅读器平均数量;而 MRRE 算法不需阅读器对标签写入信息。

其次,RRE 算法和 LEO + RRE 算法的空间复杂度均为 $O(n)$,MRRE 算法的空间复杂度为 $O(nr)$,但 MRRE 算法的信息存储于资源相对丰富的中间件,也适用于标签不具备存储功能的系统。

由结论(1~3)可知,RRE 算法和 LEO + RRE 算法会导致系统出现漏判、误判冗余阅读器和性能欠佳等情况。其中,漏判和误判主要是因为算法需阅读器对标签写入锁定信息,系统性能欠佳则主要是因为阅读器间需读写标签来交互信息。MRRE 算法虽然具有较大的算法复杂度,但其避免了阅读器对标签写入信息,因此不会漏判和误判冗余阅读器,从而在系统的冗余检测率、系统标签信息量和覆盖率等方面具有优势。而且,MRRE 算法确保当多个阅读器具有相同权重时,独自包含最多标签的阅读器 R_{i^*} 优先锁定其 RA 内标签,有效减少了阅读器重叠区的标签数量,即减少了 RFID 读写冲突的发生概率,从而使 MRRE 算法在系统部署合理性方面优于其他算法。

5 实验仿真与结果分析

本文实验环境基于 Matlab 7.0,为不失一般性地分析各算法性能,实验参数同文献[1~3,5]。实验区域为 1000×1000 单位长度(unit distance, UD),其中随机分布 500 阅读器和若干标签,阅读器对标签的写距离与读距离比率 k 为 $0.7^{[13]}$,系统拓扑如图 5 所示。本文从阅读器最大识别范围(maximum reader radius, MRA)和区域内标签数量两个方面来分析实验结果,每个方面分别包括算法性能、系统标签信息量和部署合理性三部分。

5.1 基于阅读器 MRA 变化的结果分析

5.1.1 算法性能分析

本节实验设定区域内随机分布 2000 标签,阅读器 MRA 变化范围为 $[30, 100]$ UD。阅读器对标签的覆盖率(读取率和写入率)随阅读器 MRA 的变化情况如图 6 所

示,当阅读器 MRA 较小时,部分标签只能被阅读器读取,不能被其写入信息。

由于 RRE 算法和 LEO + RRE 算法可靠性较差,本文数据均取 100 次仿真结果的均值。由表 3 可知,Real RRE 算法受结论(1~3)影响,其算法性能最差;Ideal RRE 算法和 Real LEO + RRE 算法分别受其中两项影响,其性能应介于最差和最优之间;Ideal LEO + RRE 算法只受结论 2 影响,其算法性能最优;而 MRRE 算法不受 RFID 工作特性影响,因此其性能应优于上述四种算法。各算法随阅读器 MRA 变化的去冗余结果如图 7 所示,

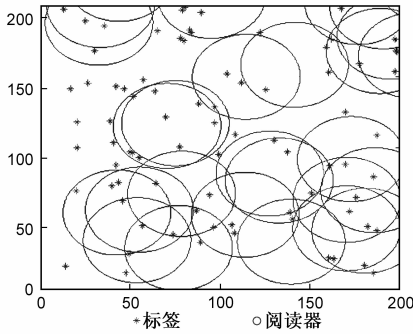


图5 系统局部拓扑图例

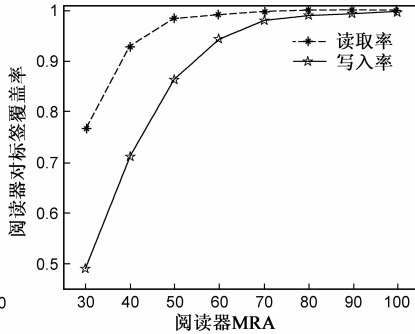


图6 阅读器对标签的覆盖率(2000标签)

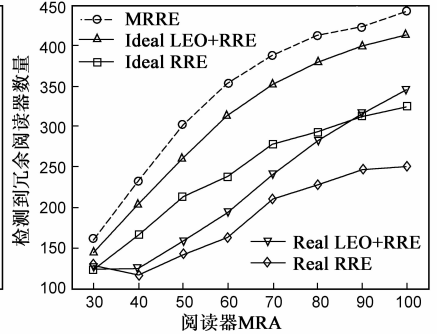


图7 各算法去冗余结果(2000标签)

表 4 为经各算法优化后阅读器对标签的覆盖率。从表中可知,MRRE 算法不影响系统覆盖率,而受结论 3 影响的 Real RRE 算法和 Real LEO + RRE 算法会导致阅读器对标签的覆盖率出现不同程度的下降情况,因此该两种算法均会误判冗余阅读器,算法可靠性欠佳。

表 4 阅读器对标签的覆盖率(500 阅读器,2000 标签)

算法分类 /MRA		30	40	50	60	70	80	90	100
读取率	MRRE	76.65	92.85	98.45	99.35	99.70	99.90	99.95	100
	Real RRE	73.55	92.15	98.10	99.35	99.55	99.90	99.95	100
	Real LEO + RRE	73.57	92.08	98.37	99.31	99.70	99.89	99.95	100
写入率	MRRE	48.95	71.35	86.10	94.40	98.10	98.85	99.55	99.70
	Real RRE	48.00	70.65	84.75	93.80	96.65	97.90	98.85	99.10
	Real LEO + RRE	48.12	70.59	85.07	93.96	97.09	98.13	99.05	99.46

5.1.2 系统标签信息量分析

本节利用标签总量溢出率(rate of overflow, RoF)来比较系统需要处理的标签信息量,其定义如下:

$$\text{RoF} = \frac{\sum_{R_i \in R_w} NT(R_i)}{NoT \times Rr} \quad (6)$$

其中, R_w 为系统优化后工作阅读器集合; $NT(R_i)$ 表示阅读器 R_i 可读取的标签数量; NoT 为系统标签总数量,在本节中 $NoT = 2000$; Rr 表示 R_w 对标签的读取率。

RoF 既可表征系统平均获取一个标签信息所需读取的标签数量,也可表征系统内平均单个标签周围覆

盖的阅读器数量。各算法随阅读器 MRA 变化的 RoF 性能曲线如图 8 所示,与 Ideal LEO + RRE 算法相比,MRRE 算法进一步降低了系统 RoF(降低 4.50% ~ 35.73%)。因此,MRRE 算法可有效抑制系统标签信息量,从而降低了系统对数据的存储和计算要求。

5.1.3 系统部署合理性分析

系统部署合理性即指系统应尽量减少 RFID 读写冲突的发生概率。

首先,减少阅读器 RA 重叠区的标签数量,即减少各标签周围覆盖的阅读器数量,可降低阅读器-标签冲突的发生概率。由图 8 可知,与其他算法相比,MRRE 算法可有效减少阅读器-标签冲突。

其次,减少各阅读器周围的阅读器数量,可降低阅读器-阅读器冲突的发生概率。本节利用阅读器的平均邻居阅读器数量(average quantity of neighbor readers, ANR)来比较各算法性能,其定义如下:

$$NR(R) = \{R_m \mid \forall R_m \in R_w, R_m \neq R, \text{dist}(R_m, R) < 2r\} \quad (7)$$

$$\text{ANR} = \sum_{R_i \in R_w} \frac{|NR(R_i)|}{|R_w|} \quad (8)$$

其中, $NR(R)$ 表示阅读器 R 的邻居阅读器集合, r 为阅读器 MRA, $|\cdot|$ 为对应集合内元素数量。

各算法随阅读器 MRA 变化的 ANR 性能曲线如图 9 所示,与 Ideal LEO + RRE 算法相比,MRRE 算法进一步降低了阅读器 ANR(降低 8.63% ~ 40.08%)。因此,

MRRE 算法可有效减少阅读器-阅读器冲突。

5.2 基于区域内标签数量变化的结果分析

5.2.1 算法性能分析

本节实验设定阅读器 MRA 为 60UD,区域内随机分布的标签数量为 [1000, 8000],阅读器对标签的覆盖率随标签数量变化的情况如图 10 所示。

各算法随标签数量变化的去冗余结果如图 11 所示,MRRE 算法的冗余阅读器检测率比 Ideal LEO + RRE 算法提高了 11.01% ~ 20.80%,而且 Real RRE 算法和 Real LEO + RRE 算法均会误判冗余阅读器,从而导致阅读器对标签的覆盖率有所下降。

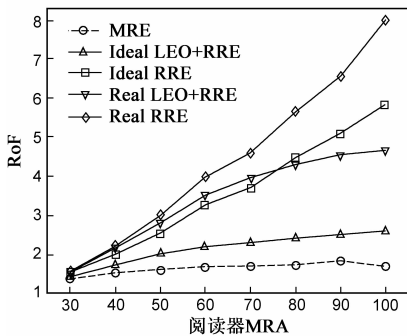


图8 各算法RoF性能比较(2000标签)

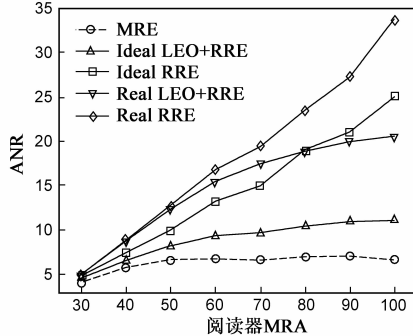


图9 各算法ANR性能比较(2000标签)

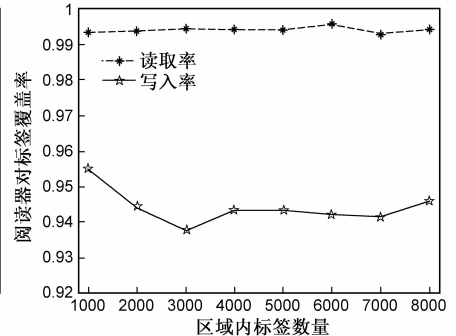


图10 阅读器对标签的覆盖率(MRA=60 UD)

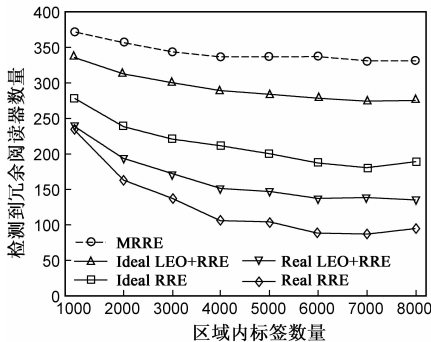


图11 各算法去冗余结果(MRA=60 UD)

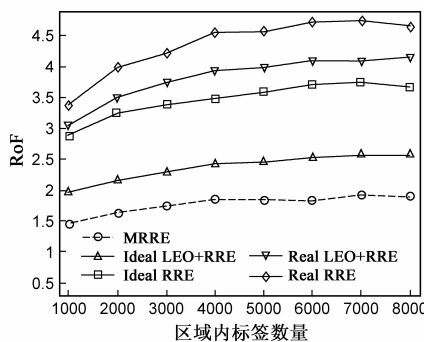


图12 各算法RoF性能比较(MRA=60 UD)

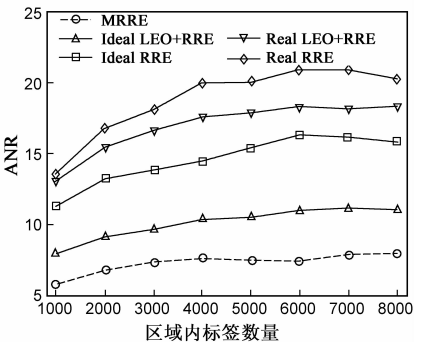


图13 各算法ANR性能比较(MRA=60 UD)

5.2.2 系统标签信息量分析

在本节中系统标签总数量 $NoT = [1000, 8000]$,各算法随标签数量变化的 RoF 性能曲线如图 12 所示,与 Ideal LEO + RRE 算法相比,MRRE 算法进一步降低了系统 RoF(降低 23.33% ~ 27.66%)。

5.2.3 系统部署合理性分析

首先,由图 12 可知,MRRE 算法可有效减少阅读器-标签冲突.其次,各算法随标签数量变化的 ANR 性能曲线如图 13 所示,与 Ideal LEO + RRE 算法相比,MRRE 算法进一步降低了阅读器 ANR(降低 24.56% ~ 32.22%)。因此,经 MRRE 算法优化的 RFID 系统部署更具合理性。

6 小结

本文提出一种阅读器去冗余算法 MRRE,该算法利用 RFID 中间件的标签信息判别冗余阅读器.与现有算法不同,MRRE 算法不需阅读器多次读写标签,不受 RFID 工作特性的影响.仿真结果表明,与不同状态的 RRE 算法和 LEO + RRE 算法相比,MRRE 算法均具有更高的冗余阅读器检测率,有效抑制了系统标签信息量,并进一步优化了系统部署合理性.在下一步工作中,我们考虑将阅读器去冗余和负载均衡相结合,从而可更好地优化系统性能。

参考文献

[1] B Carbanar, M-K Ramanathan, et al. Efficient tag detection in RFID systems [J]. Parallel and Distributed Computing, 2009,

69(2): 180 - 196.

[2] C-H Hsu, Y-M Chen, et al. Performance-effective and low-complexity redundant reader detection in wireless RFID networks [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2008, 22: 138 - 145.

[3] K-M Yu, C-W Yu, et al. A density-based algorithm for redundant reader elimination in a RFID network [A]. Proceedings of the 2nd International Conference on Future Generation Communication and Networking [C]. Washington, DC: IEEE Computer Society Press, 2008. 89 - 92.

[4] Z-Y Yang, J-L Chen. The simulation and analysis of algorithms for redundant reader elimination in RFID system [A]. Proceedings of the 3rd UKSim European Symposium on Computer Modeling and Simulation [C]. Washington, DC: IEEE Computer Society Press, 2009. 494 - 498.

- [5] J-W Hung, I-H Li, et al. The first search right algorithm for redundant reader elimination in RFID network [A]. Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Software Engineering, Parallel and Distributed Systems [C]. Wisconsin: WSEAS Press, 2010. 177 – 183.
- [6] N Irfan, M-C Yagoub. Efficient algorithm for redundant reader elimination in wireless RFID networks [J]. International Journal of Computer Science Issues, 2010, 7(3): 1 – 8.
- [7] EPCglobal Architectural Framework [S/OL]. http://www.gs1.org/gsm/ke/epcglobal/architecture/architecture_1_4_framework-20101215.pdf, 2010-12.
- [8] 赵文, 李信鹏, 等. 供应链环境下一种分布式 RFID 发现服务 [J]. 电子学报, 2010, 38(2): 99 – 106.
ZHAO Wen, LI Xin-peng, et al. A distributed RFID discovery service for supply chain [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(2): 99 – 106. (in Chinese)
- [9] LIU Xueyang, ZHAO Wen, et al. A secure communication mechanism of P2P RFID code resolution network [J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 19(4): 621 – 626.
- [10] HUANG Yihua, LUI Zongyuan, et al. An improved bayesian-based RFID indoor location algorithm [J]. Chinese Journal of Electronics, 2009, 18(3): 509 – 512.
- [11] HUANG Yihua, LV Shilei, et al. An isosceles triangular placement of reference tags for RFID indoor location system [J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 20(2): 504 – 510.
- [12] A Papapostolou, H Chaouchi. RFID-assisted indoor localization and the impact of interference on its performance [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2011, 34(3): 902 – 913.
- [13] P V Nikitin, K V S Rao, et al. Sensitivity and impedance measurements of UHF RFID chips [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(5): 1297 – 1302.

作者简介



吕石磊 男, 1984 年出生, 中山大学博士研究生, 主要研究方向为 RFID 网络应用、优化及其相关技术。

E-mail: lvshilei@mail3.sysu.edu.cn



余顺争 男, 1958 年出生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为信息安全、信号处理、无线网络。