

基于 Whittle 索引的 RFID 多阅读器信道资源分配算法

石 静 郑嘉利 袁 源 王 哲 李 丽

(广西大学计算机与电子信息学院 南宁 530004) (广西多媒体通信与网络技术重点实验室 南宁 530004)

摘 要 针对无线射频识别 (RFID) 系统中多标签-多阅读器环境下标签与信道资源的分配问题,提出了一种基于 Whittle 索引的多阅读器信道资源分配算法。在 RFID 多阅读器信道分配问题中建立无休止多臂赌博机(RMAB)模型,并采用 Whittle 索引算法进行求解。该算法依据信道前期的忙、闲状态,将信道空闲概率作为信任值赋予每个信道,并根据信道当前的信任值计算其 Whittle 索引值。标签选择索引值最大的信道作为可能感知接入的信道,随后根据每个时隙数据发送成功与否来动态更新信道信任值。对信道分配过程中可能出现的标签碰撞问题,采用等待一个时隙后再根据识别反馈信息重新选择接入信道的方式来解决。将文中所提算法从两个方面与典型的 DiCa 算法和 Gentle 算法进行比较:一是在阅读器数量固定的前提下,其系统吞吐量随待识别标签数量的变化情况;二是在待识别标签数量固定的前提下,其系统吞吐量随阅读器数量的变化情况。仿真结果表明,所提算法在上述两种情况下的系统吞吐量均优于 DiCa 算法和 Gentle 算法,其吞吐量在阅读器数量固定的前提下分别平均提高了 150.34% 和 23.98%,在待识别标签数量固定的前提下分别平均提高了 205.01% 和 43.37%。随着阅读器和待识别标签数量的增多,所提算法在系统吞吐量方面的优势更加明显。因此,采用提出的算法可以对有限的信道资源进行合理的动态分配,有效提高 RFID 多阅读器系统的识别效率。

关键词 无线射频识别,多标签-多阅读器,无休止多臂赌博机模型,Whittle 索引算法

中图分类号 TN92, TN391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/jsjcx.180801602

RFID Multi-reader Channel Resources Allocation Algorithm Based on Whittle Index

SHI Jing ZHENG Jia-li YUAN Yuan WANG Zhe LI Li

(School of Computer, Electronics and Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)

(Guangxi Key Laboratory of Multimedia Communications and Network Technology, Nanning 530004, China)

Abstract This paper proposed a multi-reader channel resources allocation algorithm based on Whittle index for the problem that how to allocate the correspondence between tags and channel resources in the environment of Radio Frequency Identification (RFID) system with multi-tag and multi-reader. The Restless Multi-Armed Bandit (RMAB) model is established and the Whittle index algorithm is adopted to solve the problem of RFID multi-reader channels allocation. According to the previous state of channels: idle or busy, the readers achieve one trust value for every channel based on its idle probability and use the current trust value to calculate the Whittle index for each channel. The tags choose the one with the largest index value as a possible sensing and accessing channel. Then, the trust value of the channels is dynamically updated based on the successful or failing data transmission in each time slot. For the collisions that may occur between tags during channel allocation, the method of reselecting and accessing based on the identified feedback information after waiting for one time slot can solve it. The proposed algorithm is compared with the typical DiCa algorithm and Gentle algorithm in the following two aspects. Firstly, the system throughput varies with the number of tags to be identified under the premise that the number of readers is fixed. Secondly, the system throughput varies with the number of readers to be identified under the premise that the number of tags is fixed. The simulation results show that the system throughput of the proposed algorithm is superior to DiCa algorithm and Gentle algorithm in both cases. The throughput increases by an average of 150.34% and 23.98% respectively on the premise of fixed number of readers, 205.01% and 43.37% respectively on the premise of fixed number of tags to be identified. Moreover, with the increase of the number of readers and tags to be identified, the advantages of the proposed algorithm in terms of system throughput are more obvious. Therefore, the proposed algorithm can be used to reasonably allocate the limited channel

到稿日期:2018-08-30 返修日期:2019-02-02 本文受国家自然科学基金项目(61761004)资助。

石 静(1992-),女,硕士生,主要研究方向为多媒体通信网络理论与技术;郑嘉利(1979-),男,教授,主要研究方向为多媒体通信、物联网技术,E-mail:zhengjiali@vip.163.com(通信作者);袁 源(1995-),女,硕士生,主要研究方向为多媒体通信网络理论与技术;王 哲(1992-),男,硕士生,主要研究方向为多媒体通信及其网络工程;李 丽(1994-),女,硕士生,主要研究方向为多媒体通信网络理论与技术。

resources, thus effectively improving the recognition efficiency of the RFID multi-reader system.

Keywords Radio frequency identification, Multi-tag and multi-reader, Restless multi-armed bandit model, Whittle index algorithm

1 引言

随着物联网技术的普及,无线射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)技术在各行各业中的应用越来越广泛。RFID 技术是一种利用无线射频通信实现的非接触式自动识别技术^[1],识别系统与识别目标之间通过无线电信号识别特定目标并进行相关数据的读写操作。作为一种快速采集信息与处理信息的高新技术,RFID 技术可实现快速读写、移动识别、非可视多目标识别等功能^[2]。RFID 技术最大的优势在于可多目标识别,而传统的 RFID 系统中通常只有一个阅读器。随着 RFID 技术的发展和应用范围的扩大,一个阅读器的读取速度已经难以满足实际应用的需求^[3]。在实际应用中,通常需要在一定的识别范围内迅速识别大量标签且尽量避免标签漏读,因此应该在整个空间内放置多个阅读器。在多标签-多阅读器的 RFID 系统中,存在两种形式的冲突:1)同一标签同时收到不同阅读器发出的命令,称之为阅读器碰撞^[4];2)一个阅读器同时收到多个标签返回的数据,称之为标签碰撞^[5]。在实际应用中产生的 RFID 多标签-多阅读器通信信道冲突问题,将导致大量的数据丢失和错误,严重影响系统的准确度和性能^[6]。

目前,在标签防碰撞方面的算法研究相对成熟,最常见的标签防碰撞算法是基于时分复用(TDMA)的方法,其中包括基于 ALOHA 的不确定性防碰撞算法和基于二叉树的确定性防碰撞算法^[7]。文献[8]对动态帧时隙 ALOHA 防碰撞算法中的标签个数估计进行了改进,采用动态调整机制自动调整标签个数估计式系数,解决了在下一个查询周期阅读器可使用帧时隙长度的问题。文献[9]提出了一种基于二叉树的改进算法,利用上一次的查询信息,标签根据碰撞位先后应答阅读器以减少碰撞,若阅读器检测到接收数据中存在 2 个碰撞位,则立即停止接收后续数据,以减少冗余数据的传输。阅读器防碰撞算法主要有:基于有效范围(Coverage-based)的防碰撞算法、基于调度(Scheduling-based)的防碰撞算法^[10]。基于调度的防碰撞算法较多,文献[11]提出了一种基于身份竞争与协作的 RFID 阅读器防碰撞算法,该算法利用闲置阅读器协助其他阅读器工作,同时引入身份竞争机制、双信道机制和载波监听机制以减少碰撞。文献[12]和文献[13]分别提出了较为典型的 DiCa 算法和 Gentle 算法。DiCa 算法采用双信道机制,将数据信道与控制信道分离,避免了控制信息对标签读取的干扰;在此基础上,Gentle 算法的数据信道采用多信道通信,进一步避免了数据信道冲突。文献[14]在认知无线网络中提出了一种基于无休止多臂赌博机(RMAB)模型的动态频谱接入机制,并采用 Whittle 索引值算法和多标拍卖来解决多认知用户择机接入多段空闲频域信道的问题。多阅读器环境实际上具备了多信道通信的特征,但不同于认知无线网络中认知用户可反复参与频谱接入,RFID 系统中成功识别

的标签将不再参与数据传输,在系统识别范围内会有新的待识别标签不断进入。为了解决 RFID 系统中多标签-多阅读器环境下信道资源的合理分配问题,本文创新性地应用了 Whittle 索引算法对待识别标签进行信道的动态分配,并在未被选择信道的回报补贴计算方面进行了改进,即将固定值变为与连续累计未识别次数呈线性正相关的函数,这在一定程度上增加了该信道在下一时隙被选的概率,提高了系统的工作效率。

2 RFID 多阅读器信道模型的建立

在 RFID 系统中,引入多臂赌博机(Multi-Armed Bandit, MAB)模型^[15],各信道的状态(忙碌、空闲)都随时隙改变,因此产生的多臂赌博机问题是无休止的。本文针对多标签-多阅读器环境下的碰撞问题建立无休止多臂赌博机(RMAB)模型,对有限的信道资源进行合理的动态分配。

假设在 RFID 多阅读器系统中存在集合为 $\{1, 2, \dots, N\}$ 的 N 个标签,标签可以选择集合为 $\{1, 2, \dots, M\}$ 的 M 条相互独立信道中的任一信道进行数据通信;阅读器之间碰撞的可能性小,且 $M < N$ 。系统中各信道被划分为多个时隙,信道状态在每个时隙内保持不变,阅读器与标签的数据通信均在每一个时隙 t 内完成。定义信道空闲状态为 1,忙碌状态为 0,则信道状态空间为 $X = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)\} \in \{0, 1\}^M$ 。将信道 m 的状态建模为马尔可夫链^[16],其转移概率为 $P_{x_m(t) \rightarrow x_m(t+1)}^{(m)}$ 。将信道 m 分配给标签 n 时,标签获得的平均传输速率为 $s_{m,n}$ 。

定义 $B_n(t) = \{b_{1,n}(t), b_{2,n}(t), \dots, b_{M,n}(t)\}$, $b_{m,n}(t)$ 为标签 n 在时隙 t 开始时信道 m 的空闲概率,即信道信任值。 $\bar{\mathbf{G}}_n(t) = \{\bar{g}_{1,n}(t), \bar{g}_{2,n}(t), \dots, \bar{g}_{M,n}(t)\}$ 为标签 n 对 M 个信道的感知结果向量, $\bar{g}_{m,n}(t) \in \{0, 1\}$, $\bar{g}_{m,n}(t) = 1$ 表示标签 n 在信道 m 所对应的阅读器读取范围内, $\bar{g}_{m,n}(t) = 0$ 表示不在其读取范围。标签在数据传输后得到反馈信息 $f_{m,n}(t) \in \{0, 1\}$, $f_{m,n}(t) = 1$ 表示在时隙 t , 标签 n 与阅读器 m 之间数据传输成功; $f_{m,n}(t) = 0$ 表示数据传输失败。因此, RMAB 模型可表示为: $(B(t), P_{x_m(t) \rightarrow x_m(t+1)}^{(m)}, R_{m,n}(t))$, 其中 $R_{m,n}(t)$ 为当前时隙 t 末信道获得的回报值。

3 基于 Whittle 索引的信道分配算法

在建立 RMAB 模型的基础上,本文算法依据信道前期的忙、闲状态,将信道的空闲概率作为信任值赋予每个信道,并根据信道当前的信任值计算其 Whittle 索引值^[17]。标签以信道的索引值为依据,通过阅读器选择感知接入索引值最大的信道,当出现信道选择冲突时,标签等待一个时隙后根据反馈信息再次对信道进行选择感知。当标签与阅读器之间完成数据通信后,被识别标签均会反馈一个应答信息给阅读器,对已选信道的索引值进行更新;对于未被选择的信道,根据累计未

被选择次数给予适当的回报补贴,尽量使标签在每个时隙都能选择相对较优的信道。

3.1 信道 Whittle 索引值的计算

文献[14]考虑到实际环境下认知用户的信道感知误差,在计算 Whittle 索引值时引入了虚警概率和漏检概率两个因素;但在 RFID 系统中,在阅读器的有效识别范围内,标签的虚警概率和漏检概率几乎可以忽略。

定义 $\Psi(t, B_n(t))$ 为模型的值函数,表示标签在当前时隙下可得到的最大回报,即:

$$\Psi(t, B_n(t)) = \max\{R_{m,n}(t) + uv(\Psi(t+1, B_n(t+1)|(\bar{G}_n(t), f_{m,n}(t))))\} \quad (1)$$

其中, $R_{m,n}(t)$ 表示时隙 t 末信道获得的回报值; $\Psi(t+1, B_n(t+1)|(\bar{G}_n(t), f_{m,n}(t)))$ 为下一时隙的最大回报值;对于空闲信道,通过引入补贴 v 以及累计未被选次数 u 来调整信道信任值,增大信道在下一时隙的被选概率,易证明 RMAB 模型是可加索引的。定义值函数 $\Psi_{uv,i}(t, b_{m,n}(t))$ 为当前信任值下信道 m 的回报值,则 Whittle 索引值可表示为:

$$W(b_{m,n}(t)) = \begin{cases} \frac{s_{m,n} b_{m,n}(t) (1 - uv p_{01}^{(m)} - uv p_{11}^{(m)})}{1 - uv A}, & b_{m,n}(t) \leq p_{01}^{(m)} \\ \frac{b_{m,n}(t) s_{m,n}}{1 - uv (p_{11}^{(m)} - b_{m,n}(t))}, & b_m(0) \leq b_{m,n}(t) < p_{11}^{(m)} \\ \frac{(E(1 - (uv)^{Q+2}) + Z) s_{m,n}}{(1 - uv p_{11}^{(m)}) (1 - uv) + Z + uv E(uv - (uv)^{Q+2})}, & p_{01}^{(m)} < b_{m,n}(t) < b_m^0 \\ s_{m,n} b_{m,n}(t), & b_{m,n}(t) \geq p_{11}^{(m)} \end{cases} \quad (4)$$

(2) 当 $p_{11}^{(m)} < p_{01}^{(m)}$ 时

$$W(b_{m,n}(t)) = \begin{cases} \frac{(b_{m,n}(t) + uv(p_{01}^{(m)} - b_{m,n}(t))) s_{m,n}}{1 + uv(p_{01}^{(m)} - b_{m,n}(t))}, & g_m(p_{11}^{(m)}) \leq b_{m,n}(t) < p_{01}^{(m)} \\ \frac{(b_{m,n}(t) + uv(p_{01}^{(m)} - b_{m,n}(t))) s_{m,n}}{1 + uv(1 - uv)(p_{01}^{(m)} - b_{m,n}(t)) - (uv)^2 p_{11}^{(m)} A}, & b_m(0) \leq b_{m,n}(t) < g_m(p_{11}^{(m)}) \\ \frac{b_{m,n}(t) s_{m,n}}{1 - uv(b_{m,n}(t) - p_{11}^{(m)})}, & p_{11}^{(m)} < b_{m,n}(t) < b_m^0 \\ s_{m,n} b_{m,n}(t), & b_{m,n}(t) \geq p_{01}^{(m)} \text{ 或者 } b_{m,n}(t) \leq p_{11}^{(m)} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $Q = \lfloor \log_A \left(\frac{1}{A} - \frac{b_{m,n}(t)(1-A)}{p_{01}^{(m)} A} \right) \rfloor + 1$, $Z = (uv)^{Q+2} (1 - uv) g_m^{Q+1}(p_{01}^{(m)})$, $E = (b_{m,n}(t) - uv g(b_{m,n}(t)))$ 。

对于 RFID 系统中所有待识别标签,按照式(4)或式(5)计算其与各个信道相对应的 Whittle 索引值 $W(b_{m,n}(t))$,并以标签为对象,将其在各信道中计算的索引值进行归并排序。

3.2 接入信道的选择

在 RFID 系统中,衰落、噪声以及标签位置的差异将导致标签在不同信道中的传输速率不同。各个标签均选择其索引值最大的信道作为可能感知接入的信道。若信道空闲且同一时隙未被多个标签选中,则标签与阅读器之间进行数据传输,传输完毕后反馈应答信息 $f_{m,n}(t)$;若信道同一时隙被多个标签选中,则碰撞标签须等待一个时隙后再次选择状态更新后的最优信道进行状态感知,直至感知信道状态为空闲,则进行数据传输并反馈应答信息。

3.3 信道回报值的计算

在每个时隙结束后,标签均会给阅读器反馈应答信息 $f_{m,n}(t)$ 。 $f_{m,n}(t) = 1$ 表示标签已被成功识别,同时将该标签设为休眠状态,不再进行读取操作; $f_{m,n}(t) = 0$ 表示标签未成

$$W(b_{m,n}(t)) = \inf_i \{i: \Psi_{uv,i}(t, b_{m,n}(t); c_m = 0) = \Psi_{uv,i}(t, b_{m,n}(t); c_m = 1)\} \quad (2)$$

其中, $c_m = 1$ 表示信道 m 被选中; $c_m = 0$ 表示信道 m 未被选中。式(2)中所求 Whittle 索引值 $W(b_{m,n}(t))$ 是使得信道在被选中或未被选中的情况下均有相同回报值的补贴下界 i 。

假设系统中所有标签在同一时隙对相同环境的感知结果是一致的。在时隙 t , 标签 n 根据各信道的初始信任值,按式(4)或式(5)对信道的 Whittle 索引值进行计算,定义当信道状态在 j 个相邻时隙内均不可观测时,其第 j 步的信任值 $b_{m,n}(t)$ 按式(3)进行更新:

$$g_m^j(b_{m,n}(t)) = p_{01}^{(m)} \times \frac{1 - A^j}{1 - A} - A^j \times b_{m,n}(t) \quad (3)$$

其中, $A = p_{11}^{(m)} - p_{01}^{(m)}$, $p_{11}^{(m)}$ 表示信道 m 保持信道空闲的概率; $p_{01}^{(m)}$ 表示信道 m 由忙碌变为空闲的概率; $p_{10}^{(m)}$ 表示信道 m 由空闲变为忙碌的概率; $g_m^j(b_{m,n}(t))$ 收敛于固定值 $b_m^0 = \frac{p_{01}^{(m)}}{p_{01}^{(m)} + p_{10}^{(m)}}$ 。Whittle 索引值的具体计算如下:

(1) 当 $p_{11}^{(m)} \geq p_{01}^{(m)}$ 时

$$W(b_{m,n}(t)) = \begin{cases} \frac{s_{m,n} b_{m,n}(t) (1 - uv p_{01}^{(m)} - uv p_{11}^{(m)})}{1 - uv A}, & b_{m,n}(t) \leq p_{01}^{(m)} \\ \frac{b_{m,n}(t) s_{m,n}}{1 - uv (p_{11}^{(m)} - b_{m,n}(t))}, & b_m(0) \leq b_{m,n}(t) < p_{11}^{(m)} \\ \frac{(E(1 - (uv)^{Q+2}) + Z) s_{m,n}}{(1 - uv p_{11}^{(m)}) (1 - uv) + Z + uv E(uv - (uv)^{Q+2})}, & p_{01}^{(m)} < b_{m,n}(t) < b_m^0 \\ s_{m,n} b_{m,n}(t), & b_{m,n}(t) \geq p_{11}^{(m)} \end{cases} \quad (4)$$

$$W(b_{m,n}(t)) = \begin{cases} \frac{(b_{m,n}(t) + uv(p_{01}^{(m)} - b_{m,n}(t))) s_{m,n}}{1 + uv(p_{01}^{(m)} - b_{m,n}(t))}, & g_m(p_{11}^{(m)}) \leq b_{m,n}(t) < p_{01}^{(m)} \\ \frac{(b_{m,n}(t) + uv(p_{01}^{(m)} - b_{m,n}(t))) s_{m,n}}{1 + uv(1 - uv)(p_{01}^{(m)} - b_{m,n}(t)) - (uv)^2 p_{11}^{(m)} A}, & b_m(0) \leq b_{m,n}(t) < g_m(p_{11}^{(m)}) \\ \frac{b_{m,n}(t) s_{m,n}}{1 - uv(b_{m,n}(t) - p_{11}^{(m)})}, & p_{11}^{(m)} < b_{m,n}(t) < b_m^0 \\ s_{m,n} b_{m,n}(t), & b_{m,n}(t) \geq p_{01}^{(m)} \text{ 或者 } b_{m,n}(t) \leq p_{11}^{(m)} \end{cases} \quad (5)$$

功识别。在时隙 t 末,通过式(6)计算信道获得的回报值:

$$R_{m,n}(t) = \begin{cases} s_{m,n} b_{m,n}(t), & f_{m,n}(t) = 1 \\ uv, & f_{m,n}(t) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

通过引入累计未被选择次数 u ,对信道 Whittle 索引值计算中未被选择信道的回报补贴进行改进。累计未被选择的次数越多,下一时隙信道的被选概率就越大,这使得信道的选择更加合理,充分利用了有限信道资源。

3.4 信道索引值的更新

在时隙 $t+1$, 标签 n 根据上一时隙 t 的感知结果 $\bar{G}_n(t)$ 和应答信息 $f_{m,n}(t)$,首先对信道信任值按式(7)进行更新:

$$b_{m,n}(t+1) = \begin{cases} p_{01}^{(m)}, & \bar{g}_{m,n}(t) = 0 \\ p_{11}^{(m)}, & \bar{g}_{m,n}(t) = 1 \text{ 且 } f_{m,n}(t) = 1 \\ b_{m,n}(t) p_{11}^{(m)} + (1 - b_{m,n}(t)) p_{01}^{(m)}, & \\ \bar{g}_{m,n}(t) = 1 \text{ 且 } f_{m,n}(t) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

然后,在信道信任值更新的基础上,利用式(4)或式(5)对信道的 Whittle 索引值再次进行更新。

3.5 算法的整体流程

基于 Whittle 索引的 RFID 多阅读器信道资源分配算法的流程如图 1 所示。

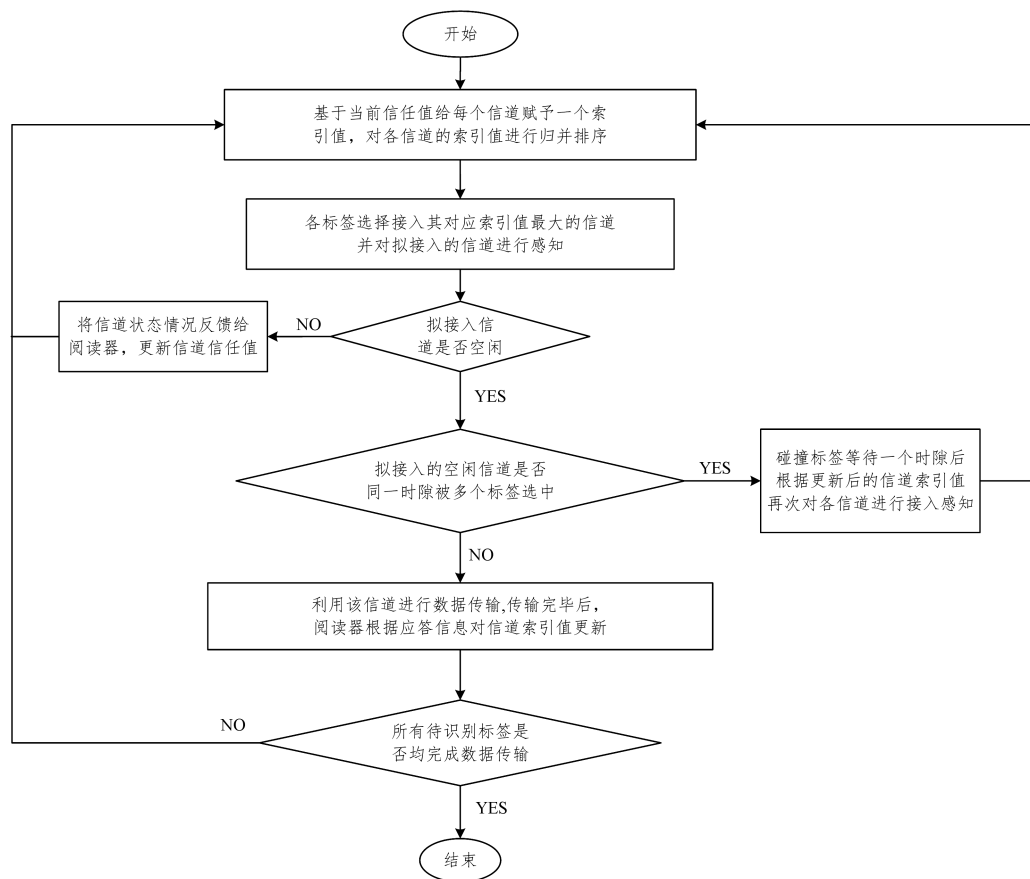


图 1 基于 Whittle 索引的 RFID 多阅读器信道资源分配算法的流程

Fig. 1 Flowchart of RFID multi-reader channel resources allocation algorithm based on Whittle index

3.6 算法的时间复杂度分析

在 RFID 多阅读器系统中, 标签个数为 n , 阅读器数量为 m , 且 n 远远大于 m , 每个标签的识别过程均在时隙 t 内完成。本文所提算法的时间复杂度所涉及到的基本操作主要为: 在每一个时隙内, 各标签对应各信道的 Whittle 索引值计算, 以及对所得 Whittle 索引值进行归并排序计算。归并排序的最坏时间复杂度为:

$$T_1(k) = O(k \log_2 k) \quad (8)$$

其中, k 为所求问题的规模, 在本文所提算法中, $k = nm$ 。

因此, 本文算法所涉及到的基本操作可归纳为三重循环下的一个归并排序过程, 其时间复杂度可表示为:

$$T(k) = O((n+k+kT_1(k)) * t) = O((nm)^2 * \log_2(nm)) \quad (9)$$

分析式(9)可知, 本文所提算法的时间复杂度为 $O((nm)^2 * \log_2(nm))$ 。

4 仿真实验及结果分析

本文算法忽略了系统的虚警以及漏检情况, 考虑的性能指标主要包括系统吞吐量、标签识别过程所需的总时隙数。

吞吐量是衡量一个 RFID 多阅读器信道资源分配算法性能的主要指标。系统吞吐量等于成功识别的标签数量与阅读器识别所有标签消耗的时间之比, 即单位时间内阅读器成功识别的标签数量^[18], 单位为 tag/s。本文算法的系统吞吐量为:

$$\text{系统吞吐量} = \frac{\text{成功识别的标签数量}}{\text{识别所有标签消耗的时间}} \quad (10)$$

其中, 识别所有标签消耗的时间 = 标签识别过程所需的总时隙数 \times 每个时隙的时长, 标签识别过程所需的总时隙数为成功时隙数、碰撞时隙数以及空闲时隙数的总和。

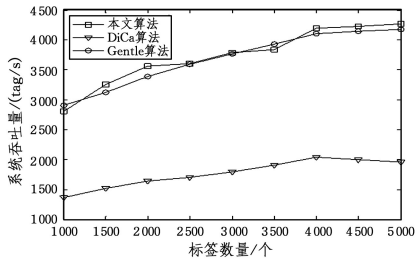
4.1 仿真实验设计

下面将本文算法与 RFID 系统多阅读器防碰撞算法中较为典型的 DiCa 算法和 Gentle 算法进行比较, 采用 MATLAB 仿真平台对算法的系统吞吐量和识别标签所需总时隙数进行仿真。反复进行多次实验, 并在每次实验中随机部署阅读器与标签的位置(本实验中将各信道分配给标签时, 标签在此信道获得不同的传输速率 $s_{m,n}$), 记下每次实验的系统吞吐量和识别标签所需总时隙数。为了减小阅读器和标签之间的拓扑结构不同等因素对算法性能的影响, 实验结果取仿真 50 次的平均数据。在系统仿真中, 设置每个时隙的大小为 $t = 2 \text{ ms}$, 并假设部署阅读器时, 阅读器的信号能够覆盖其通信范围内的所有标签, 且尽量避免阅读器之间的碰撞。

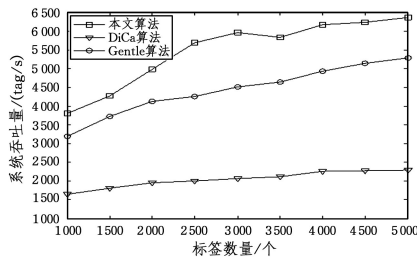
4.2 仿真结果分析

图 2 比较了阅读器数量分别为 20, 40, 60 时, 3 种算法的系统吞吐量。由仿真结果可看出: DiCa 算法的系统吞吐量最低, Gentle 算法其次, 而本文算法较前两种算法均有所提高, 且随着 RFID 系统内阅读器数量的增多, 本文算法在吞吐量上的优势逐渐明显。另外, 当阅读器数量一定时, 随着标签数量的增多, 各个算法的系统吞吐量最终都会达到一个峰值。因为 DiCa 和 Gentle 算法均将通信信道分为数据信道和控制

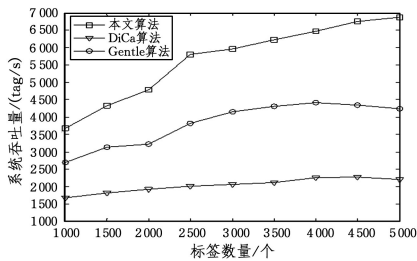
信道,虽然两种信道上的数据传输不会相互影响,但阅读器在进行通信前均需要重新参与竞争以获取信道,这增加了系统开销,降低了系统吞吐量;而本文算法无须额外的控制信道,每个待识别标签依据其在各信道中的 Whittle 索引值选择传输信道,并根据上一时隙的反馈信息对未参与数据传输的信道 Whittle 索引值进行动态调整,以最大化地利用各信道资源进行数据传输。因此在同等条件下,相比 DiCa 和 Gentle 算法,本算法的系统额外开销小,从而增大了系统吞吐量。



(a) 阅读器数量为 20 时各算法的系统吞吐量



(b) 阅读器数量为 40 时各算法的系统吞吐量



(c) 阅读器数量为 60 时各算法的系统吞吐量

图 2 不同阅读器数量下各算法的系统吞吐量

Fig. 2 System throughput for each algorithm with different reader numbers

由于在仿真实验中标签的位置是随机分布的,因此局部范围内由于标签和阅读器的密集分布将产生标签碰撞,使得系统吞吐量增加缓慢或反而下降。

图 3 为将待识别标签数量固定为 5000,且阅读器数量从 20 开始以 10 为步长依次增加至 80 时,各算法系统吞吐量的对比图。由图 3 可知,DiCa 算法的系统吞吐量最低,Gentle 算法较高,本文算法最高。其中,DiCa 算法的吞吐量随阅读器数量增加的变化不大;在一定范围内,Gentle 算法的吞吐量随阅读器数量的增加而增加,在阅读器数量为 40 左右时到达峰值,之后缓慢减小并趋于稳定;本文算法的系统吞吐量变化趋势与 Gentle 算法一致,但吞吐量在同等条件下均比 Gentle 算法大,其峰值在阅读器数量为 60 左右时出现,表明本文算法在较高密度的阅读器分布条件下也能有较大的系统吞吐量,且性能稳定。

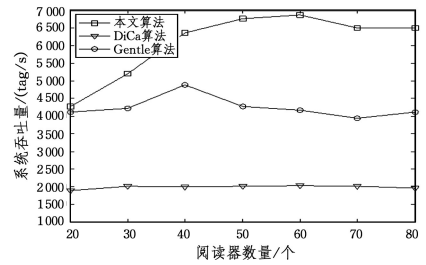


图 3 不同阅读器密度下各算法的系统吞吐量

Fig. 3 System throughput for each algorithm with different reader densities

对图 3 进行分析可知,DiCa 算法由于未考虑控制信道出现碰撞使得阅读器无法正常接收控制信息的情况,导致相邻阅读器之间发生了阅读器碰撞;而 Gentle 算法在 DiCa 算法双信道的基础上,将通信信道分为一个控制信道和多个数据信道,进一步避免了阅读器间的干扰。随着阅读器数量的增多,DiCa 和 Gentle 算法所需的能耗增大,而本文算法的额外开销较小,因此在同等条件下,本文算法的系统吞吐量表现出明显优势。但在实际有限的 RFID 系统识别范围内,阅读器间的碰撞问题在阅读器数量到达一定极限后便不可忽略,因此采用不同算法的 RFID 系统均存在一个最优阅读器数量范围。

图 4 为将阅读器数量固定在 40,且待识别标签数由 1000 开始以 500 为步长依次增加至 5000 时,本文算法、DiCa 算法以及 Gentle 算法在整个识别过程所需总时隙数的比较。从图 4 中可以看出,在相同实验条件下,本文算法所需时隙数少于 DiCa 和 Gentle 算法。随着待识别标签总数的增加,本文算法相比 DiCa 算法在所需总时隙数方面占有的优势逐渐突出;本文算法与 Gentle 算法在识别过程所需总时隙数的增长趋势相似,但在同等条件下本文算法始终比 Gentle 算法所需总时隙数少。

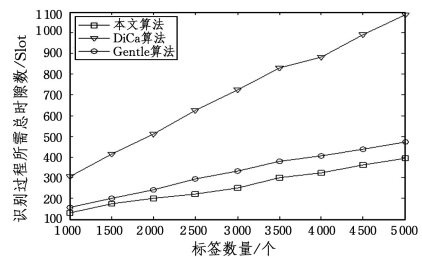


图 4 各算法所需总时隙数的比较

Fig. 4 Comparison of total time slots required by different algorithms

结束语 本文提出了一种基于 Whittle 索引的 RFID 多阅读器信道资源分配算法,创新性地 Whittle 索引算法引入 RFID 系统多标签-多阅读器环境中,将各个信道的传输性能通过具体量化的 Whittle 索引值表现,并根据反馈进行实时调整。具体过程为:标签根据信道的 Whittle 索引值选择各自的最优信道作为感知接入信道,若无标签碰撞,则在一个时隙内完成数据传输并反馈应答信息;同时,对于未被选择的信道,根据该信道累计未被选择的次数给予一定的回报补贴,从而对下一时隙的信道索引值进行动态调整,使标签尽可能

地选择最优信道与阅读器进行数据通信,对信道资源进行合理的分配与利用。与多阅读防碰撞算法中较为典型的 DiCa 和 Gentle 算法相比,本文算法无需额外的控制信道,减少了阅读器在进行通信前须参与竞争获取信道而产生的能耗。仿真结果表明,由于采用了基于信任值的 Whittle 索引算法,该算法作为典型的启发式算法,在信道资源分配过程中能够根据信道的忙、闲状态自我调整标签与信道的分配情况,因此本文算法提高了系统的吞吐量,减少了系统识别所需的总时隙数。

参 考 文 献

- [1] RAJARAMAN V. Radio frequency identification[J]. Resonance, 2017, 22(6): 549-575.
- [2] YU Y, YU X, ZHAO Z, et al. Image Analysis System for Optimal Geometric Distribution of RFID Tags Based on Flood Fill and DLT[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(4): 839-848.
- [3] DU J, SUGUMARAN V, GAO B. RFID and Multi-Agent Based Architecture for Information Sharing in Prefabricated Component Supply Chain[J]. IEEE Access, 2017, 5: 4132-4139.
- [4] REZAIE H, GOLSORKHTABARAMIRI M. A fair reader collision avoidance protocol for RFID dense reader environments [J]. Wireless Networks, 2018, 24(6): 1953-1964.
- [5] CHEN H, WANG Z, XIA F, et al. Efficiently and Completely Identifying Missing Key Tags for Anonymous RFID Systems [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(4): 2915-2926.
- [6] NAFAR F, SHAMSI H. Design and Implementation of an RFID-GSM based Vehicle Identification System on Highways [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(17): 7281-7293.
- [7] ZHANG Y, YANG F, WANG Q, et al. An anti-collision algorithm for RFID-based robots based on dynamic grouping binary trees[J]. Computers & Electrical Engineering, 2017, 63: 91-98.
- [8] ZHOU S K, DENG M L. Survey on ALOHA tag anti-collision algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(14): 9-17. (in Chinese)
周少珂, 邓森磊. ALOHA 标签防碰撞算法综述[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(14): 9-17.
- [9] WANG C H, LIU C S, XU H, et al. An enhanced binary tree-based anti-collision algorithm[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(8): 97-101. (in Chinese)
王春华, 刘迟时, 徐浩, 等. 一种改进的基于二叉树的防碰撞算法 [J]. 湖南大学学报(自科版), 2013, 40(8): 97-101.
- [10] GOLSORKHTABARAMIRI M, ISSAZADEHKOJIDI N. A Distance Based RFID Reader Collision Avoidance Protocol for Dense Reader Environments[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 95(2): 1781-1798.
- [11] YANG X M, DU L, WANG J H, et al. Improved RFID anti-collision algorithm based on identity competition and cooperation [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2015, 44(5): 764-768. (in Chinese)
杨晓明, 杜力, 王佳昊, 等. 基于身份竞争与协作的 RFID 阅读器防碰撞算法[J]. 电子科技大学学报, 2015, 44(5): 764-768.
- [12] SAFA H, EL-HAJJ W, MEGUERDITCHIAN C. A distributed multi-channel reader anti-collision algorithm for RFID environments[J]. Computer Communications, 2015, 64(1): 44-56.
- [13] SOHN S, JUNG J J. Channel and time slot allocation for dense RFID networks[J]. Wireless Personal Communications, 2013, 73(2): 329-339.
- [14] ZHU J, HAN C, YANG H L, et al. Dynamic spectrum access mechanism of multi-users based on restless multi-armed bandit model in cognitive networks[J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(10): 2782-2786. (in Chinese)
朱江, 韩超, 杨浩磊, 等. 认知无线网络中基于无休止多臂赌博机模型的多用户频谱接入机制[J]. 计算机应用, 2014, 34(10): 2782-2786.
- [15] REVERDY P, SRIVASTAVA V, LEONARD N E. Satisficing in multi-armed bandit problems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 62(8): 3788-3803.
- [16] HE X, YANG X S, KARAMANOGLU M, et al. Global convergence analysis of the flower pollination algorithm: a discrete-time Markov chain approach[J]. Procedia Computer Science, 2017, 108: 1354-1363.
- [17] BORKAR V S. Whittle index for partially observed binary Markov decision processes [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(12): 6614-6618.
- [18] MOSHREF M. Improved Anti-Collision Algorithm for Tag Identification in Future Internet of Things [J]. International Journal of Computer Network and Information Security, 2017, 9(3): 11.