

基于标签运动的一种新型 RFID 防碰撞算法

石封茶 崔 琛 余 剑
(合肥电子工程学院 合肥 230037)

摘 要 提出一种基于码分多址思想的帧时隙 ALOHA 防碰撞算法(CD-FSA),推导出其标签识别率的表达式,然后针对实际应用中标签与读写器存在相对运动的情况建立数学模型,并给出系统达到平衡状态时离开作用区域的标签组的识别率公式,最后进行计算机仿真实验与分析。结果表明,无论标签是在静止还是运动状态下,CD-FSA 算法的标签识别率都优于帧时隙 ALOHA 算法。

关键词 射频识别,码分多址,帧时隙 ALOHA,标签运动,识别率

中图法分类号 TP301.6 **文献标识码** A

Novel RFID Anti-collision Algorithm Based on Tags Movement

SHI Feng-cha CUI Chen YU Jian
(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract A novel frame slotted ALOHA anti-collision algorithm based on code division multiple access(CD-FSA) was presented and the expression of tag identification cratio was deduced. And then, the paper built a mathematical model for the relative motion of tags and a reader in the practical application and gave the formula of identification cratio of the grouped tags leaving the region when the system reaches equilibrium state. Finally, computer simulation and analysis were made. The results show that whether tags are the state of stationary or movement, tag identification cratio of the CD-FSA algorithm is higher than that of the frame slotted ALOHA algorithm.

Keywords RFID, CDMA, Frame slotted ALOHA, Tag movement, Identification cratio

无线射频识别技术(RFID, Radio Frequency Identification)利用射频信号通过空间耦合(交变磁场或电磁场)实现无接触信息传递,并通过所传递的信息达到识别目的。与传统条形码、IC卡等自动识别技术相比,RFID 穿透性强、容量大、寿命长,整个识别过程无需人工干预,是目前最具发展前景和变革力的新技术之一^[1]。RFID 系统主要由读写器(transceiver/reader)和标签(transponder/tag)组成,由于读写器与标签共享同一无线信道,当读写器作用区域内有两个或两个以上标签同时发送信号时,必然产生信道争用,信号相互干扰,即发生碰撞。因此,标签之间需要一种防碰撞的机制,以保证每一个标签都能被正确读取,这种解决标签碰撞的方法称为标签防碰撞算法,它可以实现多个标签与读写器之间的正确通信,使读写器能够快速、高效地识别标签,所以标签防碰撞算法是 RFID 系统中的关键技术之一^[2]。已有的防碰撞算法主要分为两大类:ALOHA 类的随机型算法^[3,4]和二进制树类的确定型算法^[5,6]。

现有的防碰撞算法研究中,读写器与标签大都处于相对静止的状态,RFID 系统作用区域内的标签不断响应读写器的命令,直到所有标签都被成功识别,在整个识别过程中没有标签进入或离开读写器的作用区域。然而,在现实应用如传

送带、生产线、便携式读写器扫描标签(粘有标签的货物)等读写器与标签存在相对运动的场合,标签通常以一定的速度和密度通过读写器的作用范围,若标签在离开作用区域前仍未成功发送信息,则会成为漏读标签。因此,如何提高标签与读写器存在相对运动情况下的 RFID 系统标签识别率,减小漏读标签数量成为一个重要问题。文献[7]建立了一种标签运动的传送带模型,对基于帧时隙 ALOHA 防碰撞算法(FSA)的 RFID 系统进行了研究,但其标签识别率还存在进一步提升的空间。

本文在 FSA 算法的基础上提出了一种基于码分多址(CDMA)思想的帧时隙 ALOHA 算法(CD-FSA),并通过建立标签与读写器存在相对运动的数学模型,对基于 CD-FSA 算法的 RFID 系统进行了研究,给出了理论分析与仿真结果。

1 CD-FSA 算法分析

1.1 CD-FSA 算法描述

CDMA 技术^[8]利用码序列的正交性或准正交性来区分不同的用户,即各个用户可以在同一工作频段选用不同的扩频码来发送信息而互不干扰。此时,系统内的各个用户在频率、时间和空间上都可以重叠,接收端利用不同信号码序列之

到稿日期:2012-08-06 返修日期:2012-11-24

石封茶(1988—),男,硕士生,主要研究方向为射频识别防碰撞算法,E-mail:trjytrfy@sina.com;崔琛(1962—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为通信信号处理、通信系统仿真;余剑(1980—),男,讲师,主要研究方向为通信系统仿真。

间的差异来解调和分离出所需要的信号。

本文提出的 CD-FSA 算法在 FSA 算法的基础上引入码分多址的思想,使标签在读写器的查询帧内随机地选择某一时刻响应,标签发送的数据可以在码域和时域进行二维碰撞检测。该算法的工作原理如图 1 所示。

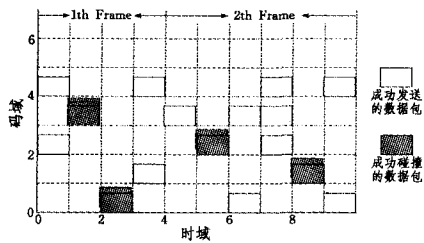


图 1 算法工作原理图

如图 1 所示,CD-FSA 算法的设计基本思想是:标签中存储两组数据,即自身的 ID 号和出厂时随机写入的某一正交扩频码,读写器向标签发送查询命令,标签接收到命令后,随机地选择读写器查询帧内的某一时刻向读写器发送信息;标签实际发送的信号是经其内部正交扩频码扩频之后的信号,由于标签 ID 号的变化范围远大于可用的正交扩频码序列的数量,因此必然存在有不同的标签选用了相同扩频码的可能;当有 2 个或 2 个以上的标签选择了同一个时刻发送数据时,就会发生时域碰撞;当有 2 个或 2 个以上的标签选择了同一扩频码时,就会发生码域碰撞,单独的时域或码域碰撞都不影响数据的正确发送,只有当时域和码域均发生碰撞时,读写器才判断该时刻发生了碰撞,数据发送失败;当前查询帧内发生碰撞的标签将在下一查询帧内进行响应,正交扩频码序列事先选定且数量有限,并以查表方式存储在读写器中。算法利用扩频码的正交性突破了传统 ALOHA 类算法在同一时刻不能有 2 个或 2 个以上标签到达的限制,并且采用帧时隙机制,从而进一步提高了系统的吞吐量和标签的识别率,加快了标签识别速度。

对 CD-FSA 算法的执行步骤进行如下简要描述:

(1)初始化。读写器选取查询过程中帧长度的值 L 时,可根据具体的应用模式或场景进行设定,其中 L 按照 2 的指数规律取值,读写器发出包含参数 L 的查询命令。

(2)标签响应。标签接收到读写器的查询命令后,根据其内部伪随机数发生器产生的随机数选择帧内的某一个时隙,向读写器发送经其内部扩频码扩频的信号。

(3)读写器可能将接收的标签回复判断为以下 3 种情况,且根据不同的情况进行不同的操作:

(a)空闲时隙:即无标签向读写器发送信息,读写器无操作。

(b)可读时隙:只有一个标签向读写器发送信息或多个标签同时向读写器发送信息,但各个标签内部的扩频码各不相同。对于具有不同扩频码的多个标签同时向读写器发送信息时,读写器可以利用扩频码的正交性识别各个标签;已识别的标签将在读写器的命令下自动进入休眠状态,不再响应读写器的指令。

(c)碰撞时隙:当多个标签同时向读写器发送信息,且有

2 个或 2 个以上的标签采用相同的扩频码时,就会发生碰撞,读写器将无法识别这些标签。此时,发生碰撞的标签将在读写器的下一查询周期内进行响应。

(4)算法结束。读写器的查询帧时隙内无标签向读写器发送信息时,查询过程结束,否则返回步骤(1)。

1.2 CD-FSA 算法的标签识别率

假定 RFID 系统的信号传输信道理想,功率控制也是理想的,并且忽略俘获效应^[9]。若 CD-FSA 算法系统选用的正交扩频码组阶数为 M ,即可用的扩频码序列数量为 M ,并以 $0, 1, \dots, M-1$ 来标识这些扩频码序列。标签发送其 ID 号所用的扩频码可以看成是 $[0, M-1]$ 之间的均匀分布^[10],因此某时隙内第 i 个标签选用第 X_m (X_m 为随机整数)个扩频码发送其 ID 号的概率为:

$$P_i(X_m) = \frac{1}{M}, 0 \leq X_m \leq M-1 \quad (1)$$

该时隙中若有其它标签选用同一扩频码发送信息,则会发生碰撞,数据不能被正确接收。如果该时隙内有 K 个标签到达,则另外 $K-1$ 个标签与第 i 个标签没有使用同一扩频码的概率,即在读写器端能成功被解扩的概率为:

$$P(K) = \sum_{X_m=0}^{M-1} P_i(X_m) [1 - P_i(X_m)]^{K-1} = (1 - \frac{1}{M})^{K-1} \quad (2)$$

若读写器提供的查询帧的帧长为 L ,射频场内有 n 个标签参与响应,其中 K 个标签占用同一时隙的概率服从二项分布^[9],即:

$$B_{n,L}(K) = C_n^K (\frac{1}{L})^K (1 - \frac{1}{L})^{n-K} \quad (3)$$

则系统在某一时刻内成功解扩的标签数的均值 S (即算法在码分条件下的吞吐量)为:

$$\begin{aligned} S &= \sum_{K=0}^n KP(K) B_{n,L}(K) \\ &= \sum_{K=0}^n K (1 - \frac{1}{M})^{K-1} C_n^K (\frac{1}{L})^K (1 - \frac{1}{L})^{n-K} \end{aligned} \quad (4)$$

令 $x = 1 - \frac{1}{M}$, 则求式(4)关于 x 的积分可得:

$$\int S dx = \sum_{K=0}^n x^K C_n^K (\frac{1}{L})^K (1 - \frac{1}{L})^{n-K} = (\frac{x}{L} + 1 - \frac{1}{L})^n \quad (5)$$

求式(5)关于 x 的偏导,可得吞吐量 S 的另一表达式为:

$$S(n) = \frac{n}{L} (\frac{x}{L} + 1 - \frac{1}{L})^{n-1} = \frac{n}{L} (1 - \frac{1}{LM})^{n-1} \quad (6)$$

此时,CD-FSA 算法的标签识别率为成功发送信息的标签数与参与响应的标签数的比值,即:

$$p_{CD-FSA}(n) = \frac{LS(n)}{n} = (1 - \frac{1}{LM})^{n-1} \quad (7)$$

而 FSA 算法的标签的识别率为^[7]:

$$p_{FSA} = (1 - \frac{1}{L})^{n-1} \quad (8)$$

2 标签与读写器相对运动模型及分析

为研究标签与读写器存在相对运动的 RFID 系统的标签识别率,建立了如图 2 所示的模型。

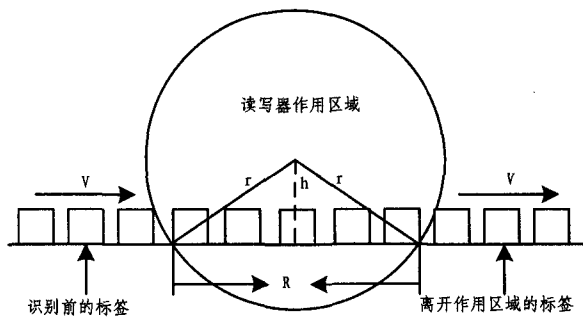


图2 标签与读写器相对运动模型

为描述方便,假定读写器固定、标签运动。如图2所示,标签以一定的速度 V 和密度 D 通过读写器的作用范围 R ,其中 r 为读写器圆形作用区域的最大半径, h 为读写器到标签的垂直距离。

由几何关系可得:

$$R = 2\sqrt{r^2 - h^2} \quad (9)$$

读写器作用范围 R 内的标签总数为:

$$n_{all} = RD \quad (10)$$

对于图2所示的模型,当标签运动速度 V 、密度 D 和读写器查询帧长 L 恒定时,系统最终会达到平衡状态,此时,读写器作用范围 R 内的未识别标签数目 n 、系统标签识别率 p_{CD-FSA} 均在动态平衡状态下保持不变。

当标签应答时隙的持续时间 t_s 一定时,每一轮查询帧持续时间为:

$$t = Lt_s \quad (11)$$

又每一个标签通过读写器作用范围 R 的时间为:

$$T = \frac{R}{V} \quad (12)$$

所以,由式(11)、式(12)可得标签从进入读写器作用范围到最终离开过程中,每一个标签被读写器查询的轮数为:

$$N = \frac{T}{t} = \frac{R}{VLt_s} \quad (13)$$

由于标签速度 V 、密度 D 、帧长 L 固定,读写器在每一轮查询帧识别标签的时间范围内,都有标签进入或离开读写器的作用区域,且进入和离开的标签数相等,若将这些标签作为一组,则每一组标签中包含的标签数目为:

$$n_G = VDt = VDLt_s \quad (14)$$

此时,结合式(7)可知,标签组离开读写器作用区域时的识别率为:

$$p_{CD-FSA} = 1 - (1 - p_{CD-FSA})^N \quad (15)$$

在读写器的作用区域内,总是有标签组进入或离开,即包含有新进入的标签组,经过一轮查询的标签组,经过两轮查询的标签组,直至经过 $N-1$ 轮查询的标签组。当系统达到动态平衡时,由于每一轮查询过程中的标签识别率不变,因此未识别标签总数为:

$$n = \sum_{i=0}^{N-1} n_G (1 - p_{CD-FSA})^i = \frac{n_G [1 - (1 - p_{CD-FSA})^N]}{p_{CD-FSA}} \quad (16)$$

由式(6)、式(7)、式(14)~式(16)可得,当系统达到动态平衡时,离开读写器作用区域的标签组的标签识别率为:

$$p_{CD-FSA} = \frac{n p_{CD-FSA}}{n_G} = \frac{n(1 - 1/LM)^{n-1}}{VDLt_s} = \frac{S(n)}{VDLt_s} \quad (17)$$

而基于FSA算法系统的标签组的标签识别率为^[7]:

$$p_{FSA} = \frac{(n/L)(1 - 1/L)^{n-1}}{VDLt_s} \quad (18)$$

3 计算机仿真实验与分析

为验证基于CD-FSA算法的RFID系统的性能,做了以下两个综合仿真实验。

实验1 仿真比较了在读写器和标签均处于静止状态下FSA算法与CD-FSA算法的标签识别率。其中,两种算法帧长 L 分别取32、64、128,且CD-FSA算法的扩频码组阶数 M 为8,仿真结果如图3所示。

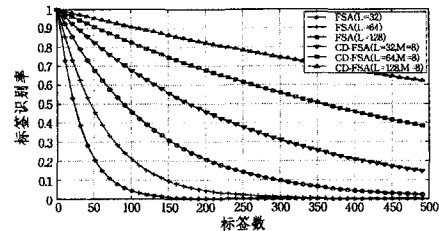


图3 两种算法的标签识别率

由图3可知:两种算法的标签识别率均随着标签数的增加而下降;当标签数相同时,无论是FSA算法还是CD-FSA算法,帧长大的标签识别率高;帧长相同时,CD-FSA算法的标签识别率始终比FSA算法高。这是因为:若帧长不变,当标签数增多时,标签碰撞概率增大,从而识别率减小;若标签数不变,当帧长增大时,标签碰撞概率减小,从而识别率增大;CD-FSA算法将标签碰撞扩展到时域、码域两维,使标签碰撞概率进一步减小,从而在相同帧长条件下其标签识别率比FSA算法高。

实验2 针对本文的标签与读写器相对运动模型,对分别基于FSA算法、CD-FSA算法的RFID系统进行了仿真比较。其中, $D = 100$ 个/m、 $V = 4$ m/s、 $L = 256$ 、 $R = 3$ m、 $t_s = 0.001$ s,CD-FSA算法扩频码组阶数 $M = 4$,仿真开始时,读写器作用范围内的每一组标签都处于未识别状态,仿真结果分别如图4、图5所示。

图4、图5的横坐标均为离开读写器作用区域的标签组数,图4的纵坐标为标签组的标签识别率,图5的纵坐标为读写器作用区域内的未识别标签数。由图4、图5可知,两种算法的第一个标签组离开作用区域时,其识别率都不高(FSA算法为0.31,CD-FSA算法为0.75),而作用区域内的未识别标签数较多(FSA算法为238,CD-FSA算法为151),这是因为仿真开始时,系统作用区域内的标签均为未识别标签。然而随着标签的运动,离开读写器作用区域的标签组的标签识别率迅速增大,直到系统到达动态平衡时标签组的标签识别率始终保持不变(FSA算法为0.88,CD-FSA算法为0.99),系统作用区域内的未识别标签数也并不保持不变(FSA算法为173,CD-FSA算法为110)。由于采用了CDMA技术,因此在整个识别过程中,CD-FSA算法的标签识别率始终要比FSA算法大,而系统作用区域内的未识别标签数要比FSA算

法小。

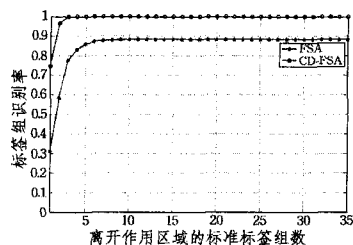


图4 两种算法的标签组识别率比较

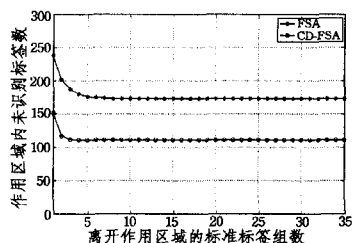


图5 两种算法的未识别标签数比较

当然,由于引入 CDMA 思想,且标签返回的信号是经正交序列码字调制的信号,读写器端需要增加存储所有正交序列码字的存储器和解正交码字的模块,而标签端也需要增加存储各自正交序列码字的存储器。因此,基于 CD-FSA 算法的 RFID 系统对系统的硬件复杂度有一定的要求,即系统成本有所上升。

结束语 本文提出了一种基于码分多址思想的帧时隙 ALOHA 算法,减小了标签碰撞概率,提高了标签识别率,加快了标签的识别过程,然后针对现实应用中标签与读写器存在相对运动的情况建立数学模型并进行了分析。实验结果表明,无论标签是在静止还是运动状态,CD-FSA 算法的标签识

别率都优于 FSA 算法。当然,新算法的性能是在牺牲一定的硬件复杂度的基础上获得的,对应于特殊场合的 RFID 系统的防碰撞算法设计具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] Finkenzeller K. RFID-Handbook Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification (Second Edition)[M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2003
- [2] 王平,胡爱群,裴文江. 一种基于码分复用机制的超高频 RFID 防碰撞方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(11): 2637-2640
- [3] Lee S-R, Joo S-D, Lee C-W. An Enhanced Dynamic Framed Slotted ALOHA Algorithm for RFID Tag Identification[C]// IEEE Proceedings of the Second Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2005: 166-172
- [4] 翟永,徐进. 一种用于 RFID 系统的防碰撞算法[J]. 计算机工程, 2009, 39(5): 272-274
- [5] Choi J H. Query tree-based reservation for efficient RFID tag anti-collision[J]. IEEE Communications Letters, 2007, 11(1): 85-87
- [6] Yang Lei, Han Jin-song, Qi Yong. Revisiting Tag Collision Problem in RFID Systems[C]// IEEE 39th International Conference on Parallel Processing. 2010: 178-187
- [7] 贺洪江,丁晓叶,翟耀绪. 标签运动状态下的 RFID 系统反碰撞算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(08): 2048-2051
- [8] 梁彪,胡爱群,秦中元. 一种新的 RFID 防碰撞算法设计[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(9): 2158-2160
- [9] 刘拓晟,何怡刚,侯再平. 超高频射频识别的防碰撞算法设计[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(36): 87-89
- [10] 李泽兰,何怡刚,刘拓晟. 基于广义地址码的 RFID 防碰撞算法[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(5): 1114-1117

(上接第 44 页)

法,总结了 MQX 顶半部具有屏蔽总中断、快速响应及快速退出特征;底半部具有一般任务或函数特征,在开放总中断背景下,允许中断嵌套等,从而为清晰理解 MQX 中断机理奠定了良好基础。文章研究了 MQX 中断机制的实时性能,归纳出中断延迟公式,根据该公式可准确计算出延迟时间、评价系统实时性能,从而为增强程序稳定性和时间可控性评估提供理论依据。文章根据软件工程原理融合了嵌入式构件思想,根据可复用与可移植的基本要求提出了一种利用程序分层设计、文件分类管理、统一函数调用接口的中断程序框架,为 MQX 的应用编程提供了一个结构清晰、层次分明、可复用与可移植性强的模板。本文工作对 MQX 的应用研究与程序开发具有重要的参考价值。

参考文献

- [1] Freescale. Freescale MQX Real-Time Operating System User's Guide[EB/OL]. <http://www.freescale.com>, 2011-04
- [2] 王运盛,王坚. VxWorks 实时操作系统中的中断处理机制[J]. 电讯技术, 2007, 8(2): 2-4
- [3] Labrosse Jean J. 嵌入式实时操作系统 uC/OS-II(第 2 版)[M]. 邵贝贝,等译. 北京:北京航空航天大学出版社, 2003: 61-72
- [4] 王宜怀,吴臻,蒋银珍. 嵌入式系统原理与实践—ARM Cortex-M4 Kinetis 微控制器[M]. 北京:电子工业出版社, 45-74
- [5] Freescale. K60 Sub-Family Reference Manual[EB/OL]. <http://www.freescale.com>, 2011
- [6] 荐红梅. 基于硬件构件的嵌入式底层软件开发方法研究及其应用[D]. 苏州:苏州大学, 2008, 4: 36-44
- [7] Richard H C, Janell A. Review of current embedded system hardware, OS, development systems and application domains for instructional design[C]// Conference Proceedings ASEE Annual Conference and Exposition. 2007: 16
- [8] Freescale. Freescale MQX RTOS Reference Manual[EB/OL]. <http://www.freescale.com>, 2011-04
- [9] Freescale. MQX RTOS 3. 8. 1 Release Notes[EB/OL]. <http://www.freescale.com>, 2012-06
- [10] Yiu J. ARM Cortex-M3 权威指南[M]. 宋岩,译. 北京:北京航空航天大学出版社, 2009, 7: 11-41, 110-154
- [11] ARM. Cortex-M4 Devices Generic User Guide [EB/OL]. <http://www.arm.com>