一种新的 RFID 防碰撞算法设计

梁 彪 胡爱群 秦中元
(东南大学无线电工程系 南京 210096)

摘 要：该文提出了一种基于码分多址思想的时隙 ALOHA 算法(CS-ALOHA)，来解决射频识别(RFID)中的防碰撞问题。在建立该算法的数学模型的基础上，分析了其对系统吞吐量带来的好处，并推导出系统稳定的条件。理论与仿真实验表明，采用 CS-ALOHA 算法的系统稳定范围要大于时隙 ALOHA 系统，并且当选用的扩频码组阶数为 N 时，CS-ALOHA 算法的最大吞吐量可达原时隙 ALOHA 的 N 倍。

关键词：射频识别；防碰撞；时隙 ALOHA；码分多址；吞吐量
中图分类号：TN91 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-5896(2007)09-2158-03

A Novel Design for RFID Anti-collision Technique

Liang Biao Hu Ai-qun Qin Zhong-yuan
(*Department of Radio Engineering, Southeast University, Nanjing* 210096, *China*)

Abstract: In this paper, a novel slotted-ALOHA algorithm based on Code division is presented for solving the RFID anti-collision problems. Its advantage to the system throughput is analyzed based on its mathematical model and the condition for system's stability is inferred as well. The theoretical and simulated results indicate that the stable scope of SC-ALOHA is broader than that of S-ALOHA and when N is the degree of spread spectrum codes used, the maximum throughput of SC-ALOHA might achieve N times that of S-ALOHA.

Key words: Radio Frequency Identification (RFID); Anti-collision; Slotted ALOHA; CDMA; Throughput

1 引言

射频识别技术(RFID)是一种利用无线电传输实现物体的非接触式识别的技术。它从 20 世纪 90 年代兴起，由于其显著的特点，被认为可以替代传统的条码、磁卡和IC卡等技术，目前已被广泛应用于生产过程、物流仓储、商业零售、商品防伪、安保及交通管理等至多领域，实现货物、人员和动物信息的自动采集[1]。RFID主要由读写器(Interrogator/Transceiver)和智能标签(Transponder/Tag，以下简称标签)组成，读写器通过发射天线发送一定频率的射频信号，当标签进入发射天线工作区域时产生感应电流，标签获得能量被激活，标签将自身编码等信息通过其内置天线发送出去，读写器接收天线接收到从标签发送来的载波信号，经天线调节器传送到读写器，读写器对接收信号进行解调和解码后，将标签编码等数据通过接口与上位控制计算机进行数据交换并同时可以执行应用系统软件发来的命令，实现不同的应用功能[2]。

由于读写器和标签均共享同一无线信道，多个标签也可能进入同一射频覆盖区，必然存在信道争用问题，即会发生碰撞。而防碰撞技术就是利用排队论及抗噪声技术力图解决这样的问题。防碰撞功能的实现是射频识别系统能够实际运用的必然要求，也是它的一个关键技术。

2006-06-26 收到，2006-12-07 改回
国家 863 计划(2005AA147040)和国家 242 信息安全计划(2006xx)资助课题

本文在随机多址接入技术中的时隙 ALOHA(Slotted-ALOHA)算法的基础上提出一种基于码分思想的防碰撞算法，通过建立算法的数学模型来分析其对整个 RFID 系统吞吐量的提高带来的好处，并推导出系统稳定的条件，通过仿真验证算法，其结果也达到了设计要求。

2 防碰撞技术的分类及实现途径

RFID中的碰撞问题主要分为两类[3]，一类是标签碰撞(Tag Collision)问题，它是由于当读写器天线区域中有多个标签到达时，它们几乎同时响应读写器的指令而发送信号，信号在空间互相干扰而产生的。另一类即读写器碰撞(reader collision)问题，它产生于同一个物理区域内存在多个不同的读写器，它们以同一频率同时与区域内的标签通信而引起的冲突。

总体来说，以上两类问题都是属于通信领域的多址接入技术力图解决的问题，可以从硬件、软件的途径来实现。硬件方法主要有多址技术中的TDMA，FDMA，CDMA等，其优点为时延小，但会要增加系统的复杂度和成本。空分多址(SDMA)技术，由于安装有自适应定向天线读写器的实现复杂性和较高的实施费用，至今未达到产品化的水平，而且它对于大多数的应用来说识别速度太慢，故此技术仅被限制在一些特殊的应用上。软件方法主要有纯-ALOHA，时隙-ALOHA，分帧-ALOHA[4]以及树形搜索算法等，这些方法实现时系统设计相对简单、成本低且易于修改，但时延较长。

另外，国外一些研究人员提出过基于人工神经网络和信号处理(artificial neural networks and signal processing)技术中“盲分离”(blind source separation techniques)的方法[5]来解决两个标签碰撞的情况。本文提出的算法结合了通过软、硬件实现的优点，且较好地回避了它们的缺点。

3　基于码分的时隙 ALOHA

在 RFID 系统中，假设 T_S 为单个标签完成将其 ID 号完整地发送给读写器所需的时间，定义系统负载 G 为 T_S 时长内某读写器识别范围内标签的平均到达数量，吞吐量 S 为 T_S 时长内与某个读写器成功完成通信的平均标签数量。

3.1　时隙 ALOHA(Slotted-ALOHA)算法

时隙ALOHA算法[6]是网络技术中实现多址接入的方法之一，已得到广泛的应用。具体应用在RFID系统中，前面已定义的 T_S 作为时隙长度(Slot)将时间进行等长分割，在所有标签和读写器在时间上已取得同步的基础上，规定标签仅能在每个时隙开始时才能发送数据。显然，某一标签能够成功地将数据发送给读写器仅当在此时隙内无其它标签发送数据，否则将会发生碰撞。在标签到达服从泊松分布的条件下，吞吐量 S_S 和系统负载 G 具有如式(1)的关系：

$$S_S = G \cdot e^{-G} \tag{1}$$

其中 S_S 表示时隙 ALOHA 算法的吞吐量。由上式，当 $G=1$ 时，$\max(S_S)=e^{-1}=0.368$，而且当 $G>1$ 时，系统将处于不稳定的区域，无法满足某些情况下的实际需要。

3.2　码分多址(CDMA)技术

码分多址技术是利用码序列正交性或准正交性来区分不同用户，在同频、同时的条件下，接收端利用不同信号码形之间的差异分离出需要的信号。此时，在系统内的各个用户在频率、时间和空间上都可以重叠。为区分在同一时刻标签向读写器发送其ID号的信号，本文选用Walsh于 1923 年定义的在归一化区间(0，1)上的一个完备、正交函数系统，即沃尔什函数(简称沃尔什序列或沃尔什码)作为标签ID号的正交扩频码，其具体定义如下[7]：

设有 N 段函数的集合，记为 $\{W_{N,i}(t);t\in(0,T),i=0,1,\cdots,N-1\}$，若其满足以下条件：

(1)除了在一些跳跃点上取值为 0 外，$W_{N,i}(t)$ 仅在 $\{+1,-1\}$ 中取值；

(2)在区间 $(0,T)$ 内，$W_{N,i}(t)$ 有 i 次穿越零点；

(3) $\int_0^T W_{N,i}(t)W_{N,j}(t)\mathrm{d}i=\begin{cases}0, & i\neq j\\ T, & i=j\end{cases}$；

(4)在区间中点 $t=T/2$ 处，每一个函数 $W_{N,i}(t)$ 不是奇函数就是偶函数。

则称此 N 段函数的集合为沃尔什函数。在符号 $W_{N,i}(t)$ 中，N 表示 Walsh 函数的阶数，i 表示此函数穿越零点的次数。

沃尔什码产生的方法比较简单，可以利用对哈达码(Hadamard)矩阵的递归获得。另外，64 阶的沃尔什码组在 IS-95 系统中前向链路的区分信道和反向链路的正交调制过程中都已得到了实际应用。

3.3　CS-ALOHA 算法的主要思想与数学模型

为解决上述的标签碰撞问题，以下提出一种称之为基于码分的时隙 ALOHA(Slotted-ALOHA with CDMA，CS-ALOHA)算法，主要思想概述如下：每个标签中存有两组数据：其自身的 ID 号和在生产时随机写入的某一正交码，标签实际发送的信号为经该正交码扩频的信号，读写器通过解扩得到标签真正的 ID 号并利用扩频码的正交性来杜绝一部分的标签碰撞以提高系统的吞吐量。然而，由于标签 ID 号可能的变化远大于正交码的数量，因而在实际中必然会有不同的标签选用了相同的正交码，在所有标签取得同步的基础上，这些标签同时发送其 ID 号时必然还会发生碰撞，这时仍然采用 Slotted-ALOHA 算法中的随机退避达到识别的目的。这样在标签中实现时非常简单，仅需增加一组正交码和相应的扩频电路，对原标签中的硬件电路改动很小。另外，所有的正交码组事先选定且数量有限，并存储在读写器中，这种考虑既为了易于在标签中实现，也可降低在读写器中实现的复杂度。文献[8]仅给出了其在 HFC 网络接入系统应用时的数值仿真，并没有作更多的理论分析。

这里选用 3.2 节介绍的沃尔什码，用其在对标签的 ID 号进行扩频处理后即可实现在同一时刻两个以上的标签同时进入读写器的识别区域，它们同时发送各自的 ID 号后，读写器在接收到这些在空间叠加后的信号时也能完整地分离出不同标签的 ID 号，突破了时隙 ALOHA 算法在同一时刻不能有两个以上标签到达的限制。

由于所有标签的 ID 号是互异的，仅当其选用不同的 Walsh 码且在同一时隙内发送 ID 号才可以成功地被读写器经解扩获得，而不同的标签选用了相同的 Walsh 码后仍将会导致标签碰撞。显然，当在某一时隙内到达的标签数为 k，可供选用的 Walsh 码组阶数为 N 时，在统计的意义下，这 k 个标签选用的 Walsh 码互异的平均数(即读写器在此时隙中可以成功解扩的平均标签数)可以由式(2)给出：

$$k_{\text{success}} = k\cdot((N-1).N)^{k-1} \tag{2}$$

系统在某一时隙内能成功解扩的标签数的均值(即系统在码分的条件下的吞吐量 S_C)为

$$S_C = \sum_{k=0}^{\infty} k_{\text{success}} \cdot P[k] \tag{3}$$

其中 $P[k]$ 为当前时隙内到达 k 个标签的概率，当系统的标签到达为泊松过程时，

$$P[k] = (G^k/k!)e^{-G} \tag{4}$$

将式(4)代入式(3)得：

$$\begin{aligned} S_C &= \sum_{k=0}^{\infty} k\cdot\left(\frac{N-1}{N}\right)^{k-1}\frac{G^k}{k!}e^{-G} = Ge^{-G}\sum_{k=0}^{\infty}\left(\frac{N-1}{N}G\right)^k\Big/k! \\ &= Ge^{-G}e^{\frac{N-1}{N}G} = Ge^{-\frac{G}{N}} \end{aligned} \tag{5}$$

在不同的 Walsh 码组阶数 N 的条件下系统负载 G 与吞吐量 S_C 的关系如图 1 所示。对式(5)求导数，并令其导数为

零。即令 $\partial S_C/\partial G = 0$，得当 $G = N$，吞吐量 S_C 取最大值，即 $\max(S_C) = N/e$，即最大的吞吐量是原时隙 ALOHA 算法的 N 倍。由于 $N \geq 1$，显然有 $S_C \geq S_S$，即引入码分机制后系统的吞吐量得到提高，这点在后面的仿真结果中也得到了证实。另外，当选用的 Walsh 码的阶数为 16 时，码分的时隙 ALOHA 算法的吞吐量最大可达 5.89，远高于时隙 ALOHA 的 0.368，而且随着 Walsh 码组阶数的提高，吞吐量的最大值还可以提高，但这是以增加读写器和标签的硬件复杂度为代价，因而在实际使用中必须根据需求在吞吐量和 Walsh 码组阶数作出折衷的选择。

从图 1 中可见，当 $G < N$ 时，CS-ALOHA 算法的吞吐量 S_C 随着系统负载 G 的增大而增加；当 $G > N$ 以后，吞吐量呈下降趋势，这是由于当在同一时隙内到达的标签数量增加到一定程度后，基于 Walsh 码组阶数 N 的有限性，选用相同的 Walsh 码作为扩频码的标签数量将会增加，此时必然导致碰撞的增加，系统进入不稳定的区域。因此，在基于码分的时隙 ALOHA 算法系统稳定的条件如式(6)所示，这样的稳定条件在实际运用中当 N 的取值较大时是完全可以满足的。

$$G < N \tag{6}$$

当然，由于在实际使用中标签的数量远大于可被选用的Walsh码组的数量，因而不免会有不同的标签随机地选用了相同的Walsh码，当这样的标签同时发送数据时还是会引发碰撞，此时仍然采用时隙ALOHA算法中的随机退避机制，每个标签各自延时一段时间后再发送数据，利用各标签产生的随机退避时间的不同来降低再次碰撞的概率。另外，当重传时的随机时延足够长时，退避后的标签重传时可以认为并不影响标签到达所满足的泊松过程的特性[9]。

4 计算机仿真结果及分析

为了验证提出的算法，在 MATLAB 环境下得出如图 2 的仿真结果。其中以 Walsh 码组的阶数 $N = 4$ 为例，对本文提出的 CS-ALOHA 算法与传统的时隙 ALOHA 算法的吞吐量进行了比较。仿真条件为标签的到达符合泊松过程，利用到达率为 G 的泊松发生器产生。从仿真结果看，在同样的到达率的条件下，CS-ALOHA 算法的吞吐量远高于 S-ALOHA 算法，并且随着到达率的增加，CS-ALOHA 算法的吞吐量也随之增加，并在 $G = 4$ 时达到最大，当 $G > 4$ 时随着到达率的增加而减小，这就验证了 CS-ALOHA 算法的性能且达到了预期的目的。至于仿真值与理论值的差距主要是因为在仿真中仅能选取一定长度的泊松到达序列，而这些有限长度的序列在统计意义上会与理论值存在误差，而这种误差并不能因产生的序列长度的增加而减小或消除，类似的情况在仿真某一标签随机选择 Walsh 码时也会存在。

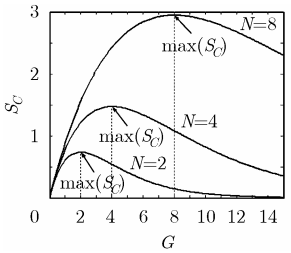

图 1 吞吐量曲线

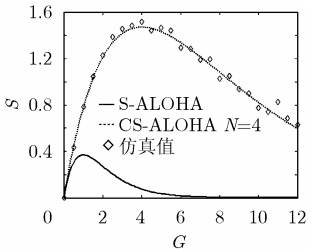

图 2 两种算法的吞吐量比较

5 结束语

本文提出一种基于码分的时隙 ALOHA 算法用于 RFID 系统的防碰撞功能的实现，该算法的系统稳定范围要大于时隙 ALOHA 系统，并且当选用的扩频码组阶数为 N 时，其最大吞吐量可达原时隙 ALOHA 的 N 倍。这种算法的好处在于：具体实现时仅需对已实现时隙 ALOHA 算法的标签作很小的改动，而读写器中也仅加入数量有限的 Walsh 码组和相应的解扩电路，具体实现过程将会非常简单，有利于实际应用。

参 考 文 献

[1] Raza N, Bradshaw V, and Hague M. Applications of RFID technology. IEE Colloquium on RFID Technology, London, England, 1999.10: 1/1–1/5.

[2] Flor T, Niess W, and Vogler G. RFID: the Integration of contactless identification technology and mobile computing. Proc. of the 7th Int'l Conf. on Telecomm., Zagreb, Croatia, 2003.6, Vol.2: 619–623.

[3] Liang B, Hu A Q, and Qin Z Y. Trends and brief comments on anti-collision techniques in RFID. Proc. of the 6th Int'l Conf. on ITS Telecomm., Chengdu, China, 2006.6:241–245.

[4] Schoute F C. Control of ALOHA signaling in a mobile radio trunking system, IEE Int'l Conf. on Radio Spectrum Conservation Techniques, London, England, 1980.7: 38–42.

[5] Devillea Y, Damourb J, and Charkanic N. Multi-tag radio-frequency identification systems based on new blind source separation neural networks, Neurocomputing, 2002, 49: 369–388.

[6] 芬肯泽勒著. 陈大才编译. 射频识别(RFID)技术——无线电感应的应答器和非接触 IC 卡的原理与应用(第二版). 北京:电子工业出版社, 2001.6: 140–143.

[7] 窦中兆, 雷湘. CDMA 无线通信原理. 北京:清华大学出版社, 2004.2: 59-65.

[8] 谢磊, 陈惠芳, 仇佩亮. HFC 网络 CDMA 时隙 ALOHA 接入系统性能分析. 电路与系统学报, 2000, 5(3): 6–11.

[9] 谢希仁. 计算机网络(第四版). 北京:电子工业出版社, 2003.6: 420–426.

梁 彪：男，1969 年生，博士生，研究方向为射频识别、无线网络接入技术等.

胡爱群：男，1964 年生，博士，教授，博士生导师，研究方向为通信信号处理、无线网络技术、移动信息安全技术等.

秦中元：男，1974 年生，博士，讲师，研究方向为视频和图像处理、模式识别、网络安全等.