

A Novel Anti-Collision Protocol in Multiple Readers RFID Sensor Networks*

WANG Jianwei, WANG Dong, TIMO Korhonen, ZHAO Yurping*

(School of Electronic Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The reader collision problem (RCP) is the key problem affecting the reading efficiency in RFID systems. A novel anti-collision protocol—DREAM protocol is proposed to solve the reader collision problem in RFID systems. The new protocol dynamically selects temporal control centers to perform as cluster headers based on interference conditions and arranges the communication sequence of readers reasonably to completely avoid signal collisions among multiple readers. Both analytical and simulation results show that comparing to the current advanced PULSE protocol, DREAM protocol increases the reading efficiency significantly and meanwhile reduces the power consumption.

Key words: RFID; RCP; Anti-collision; MAC

EEACC: 6150P

一种新的 RFID 传感网络中多阅读器防碰撞协议*

王建伟,王 东, TIMO Korhonen, 赵玉萍*

(北京大学 EDA 实验室, 北京 100871)

摘要: 阅读器碰撞问题(RCP)是影响射频识别(RFID)系统读取效率的关键问题。提出了一种新的解决阅读器碰撞问题的协议——DREAM 协议。新协议根据阅读器间的信号干扰情况在多个阅读器中动态产生若干个临时的控制中心作为簇首,合理安排各个阅读器的读取顺序,完全避免了阅读器间的信息碰撞。理论和仿真结果表明 DREAM 协议相对于现有性能较优的 PULSE 协议,在极大地提高系统读取效率的同时,大大地节省了阅读器的功率消耗。

关键词: 射频识别; RCP; 防碰撞; MAC

中图分类号: TP393.03

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)08-1411-06

射频识别(RFID,即 Radio Frequency Identification)是一种利用射频方式对物体进行非接触式识别的技术。通常 RFID 系统由阅读器和应答器两部分组成,阅读器通过射频信号读取应答器的信息。信息碰撞问题是影响 RFID 系统性能的关键问题,通常可以分为两类:一类称为应答器的信号碰撞问题,即多个应答器同时回复一个阅读器读取时产生的信号碰撞^[1-3]。另一类称为阅读器的信号碰撞问题(RCP, Reader Collision Problem),指相邻的阅读器在其信号交叠区域内产生相互干扰,导致该区域内的应答器无法响应任何阅读器^[4-7]。本文主要讨论阅读器的信号碰撞问题。

现有解决阅读器信号碰撞问题的方法主要可以

分为两类:协调计划方式和功率调整方式。协调计划方式的主要思想是通过建立一个全网的体系结构,统一收集阅读器间的信息碰撞消息,将系统可用的资源合理分配给各个阅读器进行使用,其代表性协议有 Colorwave 协议, HiQ-learning 协议和 PULSE 协议等^[4-7]。这种方式的主要问题在于系统通常需要耗费相当大的资源用来建立和实时地维护这种全网的控制结构,并且需要根据系统微小的变化重新调整全网范围内的资源分配,协议开销大,收敛速度慢。功率调整方式是通过引入多个控制节点来检测相邻阅读器间的干扰情况,并动态调整阅读器的信号功率范围从而到达减小阅读器信息碰撞的目的,其代表协议有 HLLCR 协议^[8]。但是,这种方

基金项目: 国家 863 课题资助项目(2006AA01Z278)

收稿日期: 2008-01-04 修改日期: 2008-04-13

式调整阅读器功率的控制算法大都较为复杂,并且需要在RFID系统中引入新的中心控制设备,系统成本高。

本文提出了一种新的RFID系统多阅读器防碰撞协议 - DREAM (Distributed Reservation based Energy efficient Anti-collision MAC) 协议,该协议的工作原理是在RFID传感网络中根据干扰情况,由阅读器竞争产生多个临时控制中心,将全网范围内的RCP问题划分到以临时控制中心为簇首的通信小组内予以解决,从而避免阅读器间的信息碰撞。和现有的RCP协议相比,新协议能够在提高系统读取效率的同时,大大降低系统功耗。

1 系统描述

一个典型的RFID射频识别系统如图1所示,其中圆圈代表阅读器,方框代表应答器。在本文定义的环境中存在多个阅读器,每个阅读器的读写区域由实线所示,而当阅读器工作时其干扰区域则更大,由点划线标出。这样当多个阅读器同时读取应答器信息时,部分应答器将同时被两个阅读器读取(如Tag T_1),而部分应答器被某一个阅读器读取,同时又被另一个阅读器信号所干扰(如Tag T_2),这两种情况都使得阅读器和应答器间的通信无法正常进行。

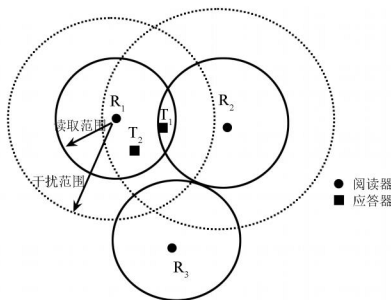


图1 典型的RCP系统

针对RCP问题,已经提出了多种解决方法,但效果都不理想。以性能较好的PULSE协议为例,其基本思想是在系统中额外增加一个信标通道 (beacon channel),阅读器通过竞争方式获得通信机会。竞争成功的阅读器在整个通信过程中不停的发送信标帧以使得邻近阅读器保持静默。信标信号的覆盖范围一定要大于阅读器的干扰范围。该方法的主要问题是增加的信标信道需要现有的系统提供额外的频率资源。另外,大功率发送信标帧会大幅度增加阅读器的功率消耗。

2 DREAM 协议

本节主要介绍新的多阅读器防碰撞协议 -

DREAM 协议。新协议将多个阅读器读取应答器的过程划分为三步:第一步,通过竞争产生临时簇首;第二步,临时簇首预约安排簇内的阅读器读取应答器的通信顺序;第三步,阅读器依照预约的通信顺序读取各个应答器信息。下面分别对上述三个阶段加以详细的分析说明。

2.1 临时簇首的产生

临时簇首由阅读器竞争产生,并且作为一定范围内临时的通信控制中心。这样可以将RFID传感网络划分为多个以临时簇首为中心的通信小组,由临时簇首负责协调安排通信小组内的阅读器和应答器通信。临时簇首的产生过程由如下几步完成:

多个阅读器可通过自由竞争的方式竞争临时簇首,如载波侦听多路访问(CSMA)等。其方法可以是阅读器先进行信道监听,一旦确认周围没有阅读器工作,则发送簇首竞争命令竞争临时簇首;

竞争成功的阅读器发送消息通知相邻的阅读器,确立其簇首地位;

竞争失败的阅读器接收到临时簇首的通知消息后,成为通信小组的受控阅读器,受控于临时簇首。

从阅读器到临时簇首的角色变化是在基于阅读器通信需求的公平竞争原则下进行的,只有存在通信需求的阅读器才会参与竞争。当通信小组内的所有阅读器(包括簇首)通信结束后,临时簇首的地位将自动丧失。待下一轮通信开始时,所有阅读器根据通信需求,重新竞争簇首。

按照上述方式,在RFID传感网络中产生了临时簇首以及由这些临时簇首控制的通信小组。这里通信小组的定义为存在潜在相互干扰的阅读器(包括簇首)及其阅读范围之内的应答器。后续的所有通信都是基于通信小组进行的。部分阅读器虽在簇首控制的范围内,但并没有读取应答器的需求,我们也不认为它属于通信小组。

2.2 阅读器通信顺序的预约过程

2.2.1 通信顺序的预约

临时簇首在通信小组内发起一个预约过程安排各阅读器的通信顺序,从而避免同组阅读器间的信息干扰。由于各个阅读器读取应答器的数目和时间都可能不同,因此无法为每个阅读器确立阅读时间,只能确定各个阅读器的通信顺序。此阶段主要分为两个过程:一是预约过程,即在临时簇首的控制下各阅读器向簇首预约通信顺序,得到预约顺序表;二是临时簇首根据得到的预约顺序表重新排列通信小组

内各阅读器的通信顺序,以确保阅读器间无碰撞的通信。在预约过程中生成预约顺序表的具体步骤如下: 临时簇首发送预约命令通知通信小组内所有的受控阅读器进行预约,同时指定可选择的顺序号范围为[1~R]。 各受控阅读器接收临时簇首的预约命令,选择一个数值 $S_i \in [1, R]$ 作为自己的序号,返回给簇首。 临时簇首检测各受控阅读器返回的预约序号情况,得到预约顺序表。

图 2 给出了预约过程的示例。如图所示,在得到的预约结果中存在三类序号:没有阅读器选择的“空号”,如第 2,5 号;只有一个阅读器选择的“正确号”,如第 1,3,6 号;有两个或两个以上阅读器选择的“碰撞号”,如第 4 号。显然,只有选择“正确号”的阅读器可以在后续的通信过程中进行无碰通信。在此基础上,临时簇首根据预约顺序表的信息重新排列得到一个无碰撞的阅读器正确通信顺序表,如图 2 所示。这一重排结果表示只有预约了时隙 1,3,6 的阅读器可以得到通信机会,而其它阅读器则在此次预约中失败,等待下一轮预约。

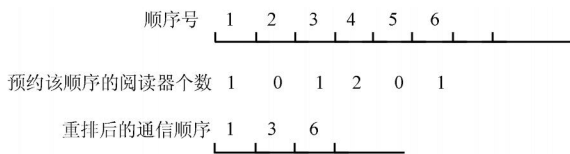


图 2 阅读器通信顺序的预约和重排过程

2.2.2 预约过程对系统效率影响的理论分析

假定当前的通信小组内有 N_t 个受控阅读器,预约序号的选择范围为[1, N_c],那么,有 q 个受控阅读器同一个预约序号的概率服从二项分布:

$$P_q = \binom{N_t}{q} \left(\frac{1}{N_c}\right)^q \left(1 - \frac{1}{N_c}\right)^{N_t - q} \quad (1)$$

其中当 $q = 1$ 时, P_1 代表阅读器成功预约的概率。因此,预约成功的阅读器数目的数学期望可由下式表示:

$$N_{\text{correct}} = N_c \times P_1 = N_c \times N_t \left(\frac{1}{N_c}\right) \left(1 - \frac{1}{N_c}\right)^{N_t - 1} \quad (2)$$

预约过程结束后,预约成功的阅读器将进入无碰撞的通信过程,因此,定义系统的工作效率如下:

$$E_{\text{sys}} = \frac{\text{有效通信时间}}{\text{总时间}} = \frac{L_c \times N_{\text{correct}}}{L_c \times N_{\text{correct}} + L_r \times N_c} \quad (3)$$

式(3)中 L_c 代表阅读器读取阶段通信时隙的长度, L_r 代表阅读器预约时隙的长度,由式(2)和式(3)可以得到:

$$E_{\text{sys}} = \frac{\left(\frac{L_c}{L_r N_c}\right) \times N_t \times \left(1 - \frac{1}{N_c}\right)^{N_t - 1}}{1 + \left(\frac{L_c}{L_r N_c}\right) \times N_t \times \left(1 - \frac{1}{N_c}\right)^{N_t - 1}} \quad (4)$$

定义 $\beta = \left(\frac{L_c}{L_r N_c}\right) \times N_t \times \left(1 - \frac{1}{N_c}\right)^{N_t - 1}$, $\beta = \frac{L_c}{L_r}$,

则 $E_{\text{sys}} = \frac{\beta}{1 + \beta}$, 式(4)可以进一步简化为

$$E_{\text{sys}} = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (5)$$

由式(5)可以看出,要最大化系统的读取效率需要最大化参数 β 的值,而 β 和 N_c 成正比关系。因此,当系统阅读器的读取通信时隙 L_c 一定的情况下,减小预约时隙的长度 L_r 可以提高系统工作效率。同时,还应根据当前的 N_t 值选择适当的 N_c ,使得系统效率最优化。进一步,对 N_c 进行求导:

$$\frac{\partial E_{\text{sys}}}{\partial N_c} = \frac{\beta}{N_c} \left(1 - \frac{1}{N_c}\right)^{N_t - 1} \left(1 + N_t \ln\left(1 - \frac{1}{N_c}\right)\right) = 0 \quad (6)$$

对式(6)求解,可以得出在系统效率最优情况下根据 N_t 值选取的预约序号范围 N_c :

$$N_c(\text{optimal}) = \frac{e^{N_t}}{e^{N_t} - 1} \quad (7)$$

通过上述分析,在引入阅读器的通信顺序预约过程后,系统读取效率可以通过选择合适的 N_c 值(参见式(7))和缩短预约过程的长度(增加 β)而得以提高。文献[9]指出当 RFID 系统采用曼彻斯特(Manchester)编码时,预约过程的碰撞检测可以在几个 bit 内完成。图 3 给出了系统效率在不同 N_c 和 N_t 值下随阅读器数目变化的曲线。从图中我们可以看出:当 N_c 与标签数目满足式(7)关系的时候,系统读取效率达到峰值,随着 N_c 的减小,系统可达的最大读取效率降低。在实际系统中由于受控阅读器的数目 N_t 通常并不知道, N_c 的确定依赖于 N_t 的估计值,因此实际的系统读取效率会比理论值略低。此外, N_t 值估计的方法有多种,例如根据预约过程中的阅读器回复情况,估计通信小组内的阅读器数目,下轮预约过程中簇首可依据估计得到值选择合适的 N_c 值^[10]。我们可以在估计 N_t 的基础上,选择合适的 N_c ,进一步提高系统的工作效率。

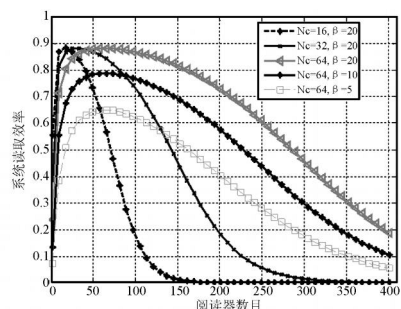


图 3 系统读取效率曲线

这里需要指出的是,上述的分析是针对单个通

信小组进行的,而对于存在多个通信小组的 RFID 传感网络,考虑到通信小组间存在的相互干扰,系统的效率会比单个通信小组分析给出的理论值低。对于 DREAM 协议下的多通信小组的干扰问题,本文将在 2.4 节中予以详细的阐述。DREAM 协议在实现中考虑了多通信小组干扰和共存的情况,其系统效率和性能将在第 3 部分予以分析。

2.3 阅读器和应答器的通信

临时簇首按照生成的通信顺序表,根据确认消息(ACK)握手机制依次控制各个阅读器读取应答器,即在每个阅读器读取顺序到来时,临时簇首发送一个读取开始命令开始阅读器与应答器间的通信,而当阅读器完成读取其范围内的应答器后给临时簇首返回一个 ACK,临时簇首继续安排下一阅读器读取应答器信息。

当本轮通信顺序表中所有阅读器读取完成后,临时簇首重复新一轮预约过程,直至本通信小组内的所有阅读器均完成与应答器的通信为止。

2.4 相邻通信小组间干扰的解决方案

在 DREAM 协议下,当系统中存在多个通信小组时,位于相邻通信小组边缘的阅读器之间也会存在信号的相互干扰,导致受干扰的阅读器无法正常工作,从而降低了系统的通信效率,这称之为多通信小组间的干扰问题。针对这一问题,DREAM 协议给出了如下的解决方案:

RFID 传感网络形成多个通信小组后,通信小组内的阅读器感知并收集它受到相邻阅读器的干扰信息,返回给簇首进行处理。

簇首收集其通信小组内的阅读器反馈的干扰信息,进而获得位于通信小组边缘的阅读器和其相邻通信小组阅读器的干扰信息。

簇首根据各自获取的干扰信息与相邻的簇首进行协调,并结合通信小组内的阅读器的预约情况合理安排各个阅读器的读取顺序。其原则是:使存在干扰的相邻通信小组的阅读器尽可能不在同一个时刻使用信道资源。

对于无法完全协调和避免干扰的阅读器,相邻通信小组的簇首予按照一定的概率,公平轮换的在各自的通信小组内安排干扰阅读器暂停工作,从而避免多通信小组间的干扰。

图 4 给出一个简单的示例,用以说明 DREAM 协议协调多通信小组间干扰的情形。图中存在两个相互干扰的通信小组 A 和 B。通信小组 A 的阅读器 1 和通信小组 B 的阅读器 2 存在相互干扰,而通信小组 A 的阅读器 3 和通信小组 B 中的阅读器 4

则不存在干扰。DREAM 协议下,阅读器 1,2 首先感知相互干扰的信息,并将其汇报给各自的簇首。在通信顺序的预约阶段,通信小组 A, B 的簇首根据收到的干扰信息,分别给 1 号和 2 号阅读器分配不同的通信时隙(如 1 号阅读器分配时隙 i , 2 号阅读器分配时隙 j , $i \neq j$),从而避免阅读器 1 和阅读器 2 发生干扰。而对于相互间不存在干扰的阅读器 3 和 4,则仍然可以使用相同的时隙(如时隙 k)并行通信,保证系统的高效工作。

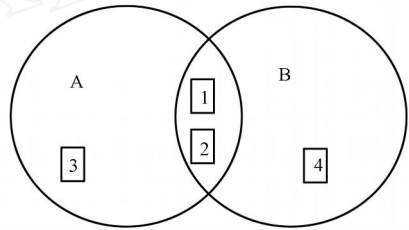


图 4 通信小组间的干扰分析

综上所述,DREAM 协议通过簇首间协调调度,解决了相邻通信小组由于存在相互干扰而无法同时工作的问题,能更充分地使用信道资源,提高读取效率。此外,文献[8]给出了一种方法,阅读器可以根据其相邻阅读器的干扰功率动态调整读取范围。利用此方法,位于各个通信小组边缘的阅读器可依照其受到相邻阅读器干扰的大小,动态调整各自的读取范围,减轻通信小组间阅读器信息碰撞。通信小组间的阅读器信息碰撞问题也是分布式 RCP 协议一个热点方向。

相对于现有的 RCP 协议,本文提出的 DREAM 协议具有以下优势。第 1,通过产生临时簇首并以其为中心组建通信小组,将阅读器信息读取划分到多个分布式通信小组内予以解决,避免了阅读器间的信息碰撞。第 2,引入一个开销较小的阅读器预约过程,由临时簇首根据各阅读器的预约信息合理安排通信顺序,大大减少了开销,提高了系统的读取效率。第 3,在临时簇首的统一调度下,各阅读器按照通信顺序可以完全无干扰地工作,而无需引入额外的控制信道,节省了系统的频率资源,降低了功耗。第 4,通过簇首间的协调,解决了多个通信小组之间的干扰问题,使得多个通信小组可以同时并行工作,进一步提高了系统的工作效率和稳定性。

3 协议性能与比较

本节通过仿真比较 DREAM 协议和 PULSE 协议的读取效率和系统功耗。系统仿真的场景设置为在 100 m × 100 m 的区域内均匀放置一定数目的阅

阅读器,阅读器的读取半径为 3 m,在每个阅读器周围平均随机分布 30 个应答器,要求阅读器的信号能够覆盖其需要读取的全部应答器,阅读器读取应答器遵从 Q-协议^[11]。系统根据各阅读器的干扰范围形成多个通信小组,各通信小组之间互不干扰,可以并行工作。具体的仿真参数设置参见表 1。

表 1 仿真参数设置

参数项目	PULSE 协议	DRA 协议
阅读器数目	10 ~ 100	10 ~ 100
每个阅读器平均所需读取应答器数目	30	30
数据信道工作频率/ MHz	915	915
控制信道工作频率/ MHz	930	N/ A
数据传送速率/ Kbit · s ⁻¹	100	100
簇首竞争时隙	N/ A	2 ms
读取时隙长度/ ms	1	1
预约时隙长度	N/ A	0.1 ms
信标帧的长度	5 ms	N/ A
信标帧的长度	1 ms	N/ A
信标帧的发送功率	2 W	N/ A
阅读器的工作功率/ W	0.2	0.2
天线极性	全向	全向

图 5 给出了 DREAM 协议和 PULSE 协议的系统读取速度的比较曲线。图中的横坐标代表系统中阅读器的数目,图 5 的纵坐标表示所有阅读器完成与其控制范围内的应答器通信所需的时隙数目,对应于读取时间。从图 5 中我们可以看到,在相同数目阅读器的情况下,DREAM 协议所需的时间要少于 PULSE 协议,而且随着阅读器数目的增加,这种差距愈明显。这主要是由于 PULSE 协议中每个阅读器读取应答器信息时都需要重新竞争获取信道,效率较低;而 DREAM 协议则通过预约过程安排阅读器读取顺序,从而大大减少了系统开销。当阅读器数目为 100 时,系统中存在 10 个并行工作的通信小组,DREAM 协议相比于 PUSLE 协议节省了大约 500 个时隙。

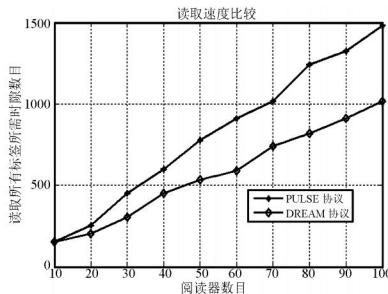


图 5 读取效率比较

图 6 给出了 DREAM 和 PULSE 两种协议下系统功耗的比较曲线。为了公平起见,这里讨论的

功耗是指阅读器除了读取应答器数据外所消耗的功率消耗,即 RCP 协议功耗。图 6 的横坐标代表了系统中的阅读器数目,纵坐标代表阅读器的平均协议功耗。对 PULSE 协议而言,协议功耗主要是用于发送信标和信道竞争的功率,而对 DREAM 协议而言,则主要包含竞争簇首和预约过程所消耗的功率。从图 6 的仿真结果,我们可以看到 DREAM 协议的协议功耗远远小于 PULSE 协议。其原因是 PULSE 协议要求阅读器在读取应答器的同时,采用大功率发送信标帧,而 DREAM 协议则无需信标信道,而且预约过程开销较小。在阅读器数目为 100 时,按照仿真中给定的阅读器功率值,PULSE 协议的协议功耗约为 3 W,DREAM 协议则仅为 0.2 W 左右。可见,相比于 PULSE 协议,DREAM 协议大大降低了协议功耗。

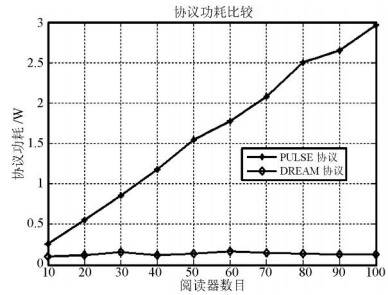


图 6 平均协议功耗比较

4 结论

本文提出了一种新的多阅读器防撞协议 - DREAM 协议,将 RFID 传感网络中的多阅读器碰撞问题划分到若干个以临时簇首为中心的通信小组中予以解决。在每个通信小组内引入一个高效的阅读器预约过程,使得阅读器可以依次无碰撞地读取应答器,在显著提高效率的同时,大大减小了阅读器的竞争开销。此外,DREAM 协议是一种分布式协议,可扩展性好,稳定性高,无需对现有的 RFID 系统的硬件设备做出改动,易于实现。

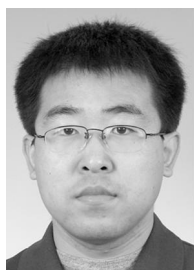
参考文献:

[1] Myung Jihoon, Lee Wonjun, Srivastava, J. Adaptive Binary Splitting for Efficient RFID Tag Anti-Collision[J]. Communications Letters, Volume 10, Issue 3, March, 2006 Page(s) : 144 -146.

[2] Law C, Lee K, and Siu K Y, Efficient Memoryless Protocol for Tag Identification[C]// Proceedings of the 4th International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications, p. 75-84, Boston, MA, August, 2000.

[3] Zhou F, Chen C, Jin D, Huang C, and Min H, Evaluating

- and Optimizing Power Consumption of Anti-Collision Protocols for Applications in RFID Systems[C]// ISLPED '04, Newport Beach, California, USA, August, 2004.
- [4] Waldrop J, Engels D W. Sarma S E. Colorwave: an Anticollision Algorithm for the Reader Collision Problem[C]// ICC'03. IEEE International Conference on, Volume 2, May, 2003 Page(s):1206-1210.
- [5] Junius Ho, Engels D W. Sarma S E. HiQ: A Hierarchical Q-Learning Algorithm to Solve the Reader Collision Problem [C]// Applications and the Internet Workshops, 2006. SAINT Workshops 2006. International Symposium on, Jan, 2006 Page(s):88-91.
- [6] Shailesh M Birari. Mitigating the Reader Collision Problem in RFID Networks with Mobile Readers [D] Dissertation for Master of Technology, Indian Institute of Technology, India, 2005.
- [7] Dong Wang, Jianwei Wang, Yuping Zhao. A Novel Solution to the Reader Collision Problem in RFID System[C]// IEEE 2nd International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Sep, 2006, Wu Han, China.
- [8] Joongheon Kim, Wonjun Lee, Jieun Yu. Effect of localized Optimal Clustering for Reader Anti-Collision in RFID Networks: Fairness Aspects to the Readers[C]// ICCCN 2005. Proceedings. 14th International Conference on 17-19 Oct. 2005 Page(s):497-502.
- [9] Andrew S. Tanenbaum; Computer Networks. [M] Prentice Hall, 1996.
- [10] Jianwei Wang, Dong Wang, Yuping Zha. A Novel Anti-Collision Algorithm with Dynamic Tag Number Estimation[C]// IEEE International Conference on Communication Technology, Nov, 2006, Gulin, China.
- [11] EPC global Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol V1.09 [S]



王建伟(1981-),男,北京大学信息科学与技术学院博士研究生,研究方向包括 UWB 通信,RFID 系统,多载波通信,无线网络跨层设计与无线资源管理, wjw.pku@gmail.com



赵玉萍(1961-),女,北京大学信息科学与技术学院,教授,博士生导师,研究方向包括多载波和多天线通信系统,RFID 系统,数字电视,无线网络规划和无线资源管理。