

一种有效的超高频 RFID 读写器防冲突技术

邓敦建^{1,2}, 阎跃鹏^{1,2}, 牟荣增^{1,2}

(1 中科院微电子研究所 昆山分所, 江苏 苏州 215300; 2 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 针对超高频 RFID 多读写器组网中存在的各种干扰问题, 提出了一种多读写器网络规划和协调方法, 并对该算法进行了理论分析. 通过分析读写器冲突类型和目前的研究算法, 采用现有 LBT 技术和 ISO/IEC 18000-6C 标准中针对多读写器环境下的防冲突方法, 结合读写器发射功率可调方法, 达到既保证读写器覆盖范围又解决读写器间干扰问题的目的. 最后, 在专用集成芯片 AS3992 和 STM32 微控制器组成的读写器硬件上进行实验测试. 实验结果表明, 该算法可在现有读写器硬件平台上应用, 并兼容现有的标准, 可以被广泛应用在工程上.

关键词: 超高频 RFID; 防冲突; 多读写器; 功率控制

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)01-0092-07

An Efficient Anti-collision Techinque for UHF RFID Reader

DENG Dun-jian^{1,2}, YAN Yue-peng^{1,2}, MU Rong-zeng^{1,2}

(1 Kunshan Branch Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215300, China;

2 Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Aiming at avoiding various interference problems of ultra high frequency (UHF) RFID multi-reader networking, a multiple reader network planning and coordination algorithm is proposed, and the algorithm is analyzed in theory. In this paper, in order to ensure the reader range and solve interference problem between the readers, we analyze the conflict types of readers and existing anticollision algorithms, use existing LBT technology and Multiple reader anti-collision method in the ISO/IEC 18000-6C protocol, and control reader transmit power. Finally, experimental tests were also performed on the reader hardware composed of ASIC AS3992 and micro-control STM32. The experimental results show that the algorithm can be applied in existing reader hardware platform without additional requirements, such as extra hardware and new protocol, therefore, it can be applied in engineering.

Key words: UHF RFID; anti-collision; multiple readers; power control

1 引言

随着电子信息技术的发展, 近年来射频识别 (Radio Frequency Identification, RFID) 系统在仓库、交通、物流、超市等诸多领域得到了广泛的应用^[1]. 因单个读写器读取范围有限, 所以越来越多的场景需要多个 RFID 读写器来监视整个目标区域, 即需要在近距离下使用多个读写器, 这种情况下存在两类碰撞, 一类称为多标签的数据碰撞问题, 即多

个标签同时回复一个读写器时产生的数据碰撞, 另一类称为多读写器信息冲突问题, 即相邻的读写器在其信号交叠区域内产生相互干扰, 导致读写器的读取范围减小, 甚至无法读取任何标签^[2]. 针对多标签的信息碰撞目前有很多研究, 如基于 Aloha 的随机性算法和基于搜索树的确定性算法两大类, 并且此类算法发展成熟被广泛地应用在各标准和协议中^[3], 而对多读写器信息碰撞问题研究和应用比较少. 本文利用 ISO/IEC 18000-6C 标准^[4] (EPCglo-

收稿日期: 2013-03-22; 修回日期: 2013-05-19

基金项目: 国家科技重大专项(2012ZX03004006)

bal C1G2 标准^[5]已被纳入 ISO/IEC18000-6C 中)的多标签防碰撞 Q 算法^[3]来研究超高频 RFID 多读写器的冲突问题。

2 多读写器冲突分析

当在一个有限的区域内部署大量读写器的时候,由于读写器询问区域的相互重叠,或者由于读写器之间使用的频率相同,都可能导致读写器之间的相互干扰。所有由于读写器的操作而引起的读写器之间的相互干扰称作读写器冲突。读写器冲突可以分为读写器与读写器之间的干扰和多读写器到标签间的干扰两类^[1,2,6]。

如图 1 所示,读写器 R1 在识别标签时,传输的信号影响到读写器 R2 的正常工作,从而导致 R2 在其识别区域内无法通信而发生频率干扰。这时当 R1 与 R2 以相同的频率工作或者 R1 的邻信道泄露功率过大而影响到 R2 信道的正常工作时,容易产生此种读写器与读写器之间的干扰。当读写器 R1 与 R2 同时识别一个标签时会引起多读写器到标签间的干扰,如图 2 所示,两个读写器的识别范围重叠,从读写器 R1 和 R2 发射的信号可能在重叠的标签处产生干扰。另外一种多读写器到标签间的干扰如图 3 所示,虽然 R1 和 R2 识别范围没有重叠,但是 R1 的传输信号会干扰 R2 的正常工作,这种情形发生在两个读写器不在彼此的感应范围内,有可能导致潜在的隐藏终端问题^[7]。

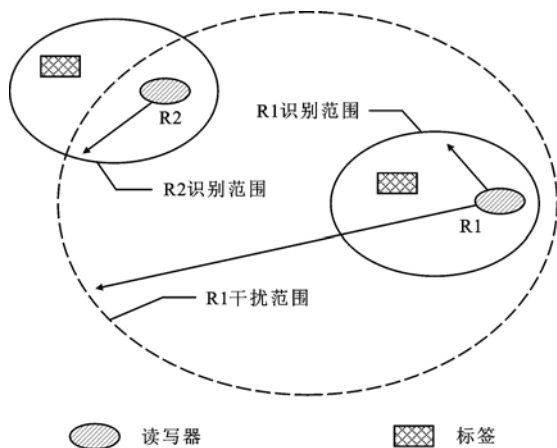


图 1 读写器与读写器之间干扰

如图 4 所示是读写器网络通信示意图,多读写器识别标签群,这需要合理的规划读写器的布局,因为这直接影响着读写器网络的覆盖和识别效果。合理有效的部署和协调方法可以在全面覆盖目标区域情况下,保证各读写器的读取范围,减少读写器之间的干扰,提高整个网络的识别效率。

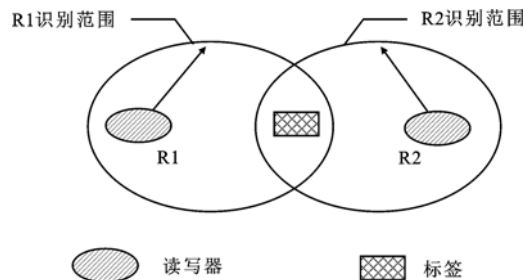


图 2 识别范围重叠的多读写器到标签间干扰

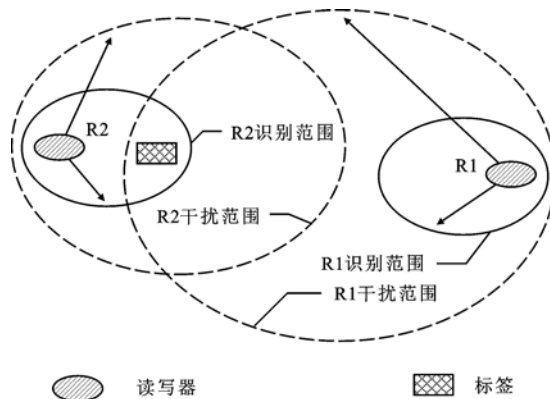


图 3 识别范围不重叠的多读写器到标签间干扰

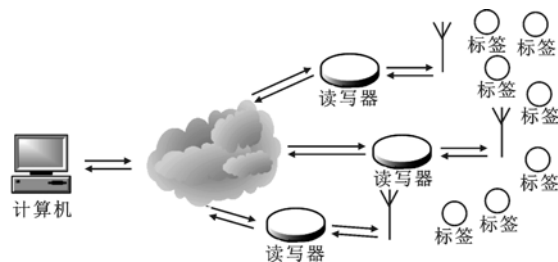


图 4 读写器网络示意图

本文在全面和系统地归纳总结已有的 RFID 系统多读写器防冲突算法的基础上,提出一种新的读写器组网和协调方法以达到防冲突目的。其次对 RFID 读写器信号冲突特性加以研究,理论的分析读写器冲突本质;最后采用两个读写器进行冲突实验,分析证明了该方法可有效防止两种读写器冲突情况,并在已有的硬件条件下实现新算法。

3 多读写器防冲突算法分析与改进

3.1 防冲突算法分析

现有的解决读写器信号碰撞问题的方法可以分为基于调度方式和功率调整方式两种^[8-9]。本文是在调度方式的基础上结合功率调整方式,提出一种新算法。调度方式算法是通过全网的体系结构来统一收集读写器间的碰撞消息,从而将系统的可用资源按照一定原则合理分配给每个读写器使用,防止多个读写器同时发送信号给标签而产生信号干扰,其

主要的算法有 LBT(Listen Before Talk), Colorwave, HiQ-learning, Pulse 以及 NFRA(Neighbor Friendly Reader Anti-collision)算法等^[7-8]. 功率控制算法主要有 PPC(Probabilistic Power Control)与 DAPC(Distributed Adaptive Power Control)等^[9], 该类算法的核心思想是通过调节读写器发射功率的大小来控制读写器与标签的通信范围,减小读写器之间的重叠区域和干扰,减小读写器之间碰撞和增加读写器通信效率.

LBT 算法是由制定 RFID 欧洲标准的 ETSI 提出的一种多读写器协同工作方法(EN 302 208 标准). 该算法采用载波侦听(Carrier Sense Multiple Access, CSMA)机制,即读写器先在数据信道监听是否其他读写器在发射超高频信号,如果信道闲,则马上发射数据;否则更换信道,继续监听. LBT 算法无法解决读写器网络中的隐藏终端的问题. DCS(Distributed Color Selection)算法即图着色法^[10-11],它是基于分布式 TDMA 的算法,该算法把时隙比作颜色,每个读写器选择一个任意的时隙去传输,如果发生碰撞,读写器选择一个新的时隙,并发送一个信号给周边的读写器,提示其它读写器去选择新的时隙. Colorwave 算法^[11-12]是 DCS 的演进算法,该算法的时隙数量是可变的(DCS 算法时隙数是固定的),为了提高 RFID 网络效率,时隙数动态的变化,当碰撞多时时隙数增多,碰撞少时时隙数减少,其中需要一个专门信号以通知读写器时隙的变化. DCS 和 Colorwave 算法的缺陷是要求读写器之间非常严格的时间同步,并且读写器能探测到系统中的信号碰撞,这对于 AdHoc 网络是很难做到的^[10]. HiQ-learning 算法^[13]是一种分层控制联机算法,通过对频率和时隙资源进行有效安排,以减小读写器的信号碰撞. 该算法当最底层的读写器状态变动会导致整个网络的重新分布,而且需要读写器具备侦测碰撞的能力,因此此算法应用较少. Pulse 算法^[14-15]通过在 RFID 系统中使用两个信道来解决读写器碰撞的问题. 其中一个数据信道被用来在读写器与标签之间通信,另一个控制信道用于读写器之间的通信. 在控制信道上周期性的发射指引信号,以控制读写器为等待状态、读取状态或碰撞发送状态. NFRA 算法^[16]是一种应用在移动密集读写器环境下的分布式算法,通过引入一个轮询服务器使读写器之间没有干扰的工作.

功率控制算法主要是通过控制读写器发射功率大小达到调整读写范围,从而解决碰撞问题. PPC

算法^[9]主要采用概率分布选择每个读写器的发射功率. 为了期望的识别范围,读写器需要根据外部的干扰信号选择输出功率. DAPC 算法^[9]基于读写器的干扰测量选择功率,同时当读写器信噪比都达不到要求时,选择功率回退技术以使全部的读写器达到理想的识别范围. 与通过特定概率分布的 PPC 相比,适用于读写器较密集的场所.

不论是 PPC 算法还是 DAPC 算法,读写器与读写器之间都是单通道通信的. 除了以上多读写器识别算法外,ISO/IEC18000-6C 标准还定义了同一标签同时与不同读写器之间的通信——会话(Session)^[5-6],标准规定标签应支持 4 个 Session(S0、S1、S2、S3),即标签最多可以与 4 个读写器在同一时间段内分时进行通信. 由于标签利用反向散射方式把信息调制在载波上发送回读写器^[4],标签不具有选择性,所以标签不能同时向多个读写器发送数据.

3.2 新算法实现

目前除了 ISO/IEC 18000-6C 标准和 EN 302 208 标准中的多读写器防冲突方法在实际应用外,其他的方法均为理论性的研究. ISO/IEC 18000-6C 标准中的频分和 Session 只是对识别范围重叠的多读写器到标签冲突提出了一种可行的方法. EN 302 208 标准中的 LBT 算法也没有解决读写器到标签的冲突问题. 在对读写器进行网络规划和部署时,应以较低的成本,尽量少的读写器,达到覆盖范围大,可靠性强的读写器网络目的.

由于超高频读写器的干扰范围(可以达几公里)是远大于读取范围的(一般在 10 m 以内),在一定的区域内安装读写器时可避免产生图 3 所示的读写器对标签的干扰. 为避免图 2 所示的干扰,可以利用 ISO/IEC 18000-6C 标准中的 Session 对重叠的读写器在不同的频率信道进行分时的发送命令,以有效地避免干扰. 在选择频率前可以通过侦听外部信道功率来选择通信频率和控制读写器发射功率,在覆盖识别范围的基础上降低重叠区.

新算法实现步骤:

①安装读写器确定其位置,读写器功率可调,并且支持 ISO/IEC18000-6C 标准,读写器载波频率可调,范围视各国各地区规定. 根据读写器的干扰和识别范围,安装读写器时保证相互之间不发生图 3 所示的干扰情况.

②先后启动读写器或者在读写器已存的环境中加入新读写器,先侦听外部信号某频率下的功率

(PA 关闭),如果该频率下功率小于某阈值 1(阈值 1 比较小)则选择该频率,如所有频率下功率都大于阈值 1 则选择功率最小(功率值需要小于较大的阈值 2,否则说明读写器安装密度太大)下的频率值.根据已选择频率下的功率值来确定读写器发射的功率,这样就确定了各读写器的功率和频率,下次识别时就可以直接用该功率和频率来识别标签群.如果重新启动读写器系统,则重新分配频率和功率.如此不但降低了读写器之间的频率干扰,而且充分利用了信道.

③保证两两相邻读写器之间不同的 Session,为防止不同读写器同时向同一标签发送命令,读写器之间需要分时的发送命令.读写器在发送命令之前先判断其他读写器有没有在发送数据,由于发送数据的时间是很短的,所以在延迟很短的一段时间后再判断发送,这样时隙被充分利用并解决了图 2 所示的干扰问题.

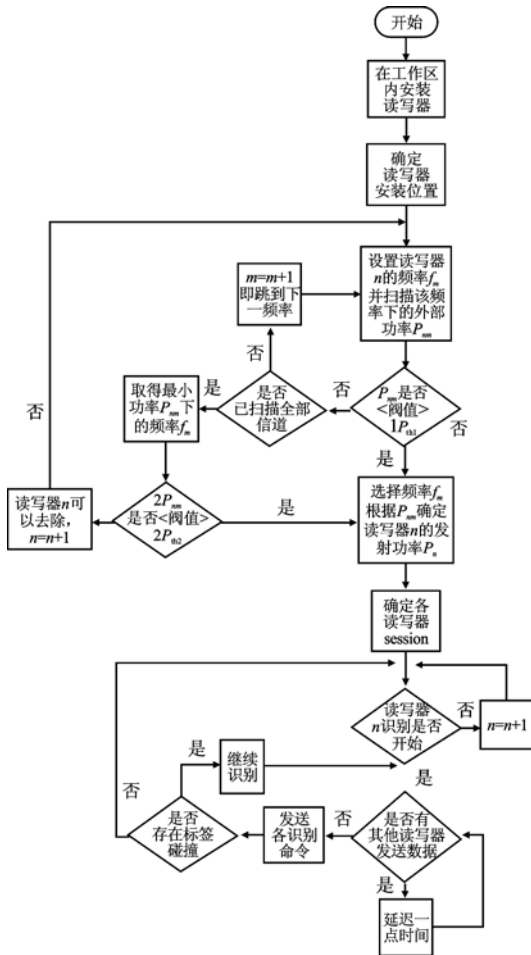


图 5 算法流程图

如图 5 所示为新算法流程图.图中在设置频率和发射功率时需要扫描外部环境功率情况,这是读写器之间的干扰问题.由电磁波在自由空间中传播

的公式可知^[10],读写器 2 发射的功率在距离 d 处同信道下读写器 1 接收的功率为

$$P_{1,2} = bP_2 G_1 G_2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 G_1 G_2 \left(\frac{P_2}{d^2} \right) \quad (1)$$

式中, G_1 和 G_2 分别为读写器的天线增益, λ 为射频信号波长, P_2 为读写器 2 发射功率,与信道频率差有关.当考虑衰落效应和邻信道干扰时 $P_{1,2}$ 可以修改为

$$P_{1,2} = \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 G_1 G_2 \left(\frac{bP_2}{d^{2q}} \right) X_{1,2}^2 \quad (2)$$

式中, b 为功率泄露比, q 为与路径损耗有关的环境因子, X 是服从瑞利分布的随机变量,以用于表示信号在信道中的平坦衰落现象.当多个读写器和外部噪声同时在同信道读写器接收处产生干扰时,总干扰功率 $P_{I,1}$ 为

$$P_{I,1} = N_0 + \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \sum_{i \neq j} G_i G_j \left(\frac{X_{i,j}^2}{d^{2q}} \right) b_i P_i = N_0 + K_0 \sum_{i \neq j} g_{i,j} P_i \quad (3)$$

式中, N_0 为白噪声功率, K_0 为与波长有关的变量, $g_{i,j}$ 为与天线增益、路径损耗变量、信道功率泄露比有关的量.

读写器在识别标签时,标签反射的功率和读写器形成的干扰功率之比形成信干比 $\text{SINR}_{\text{reader}}$.当 $\text{SINR}_{\text{reader}}$ 达到一定值时,读写器才能检测出标签返回信号,所以在读写器天线处信干比有个门限值 $\text{SINR}_{\text{require}}$.为求读写器接收信干比,需要得到读写器发射的电磁波功率经标签反射后到达读写器天线处的功率.

距离为 R 处的标签接收读写器发射功率 $P_{r,\text{tag}}$ 为

$$P_{r,\text{tag}} = P_{t,\text{reader}} G_{\text{reader}} G_{\text{tag}} \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (4)$$

式中, $P_{t,\text{reader}}$ 为读写器发射功率, G_{reader} 和 G_{tag} 分别为读写器和标签天线增益, λ 为波长, q 为环境因子.同理,读写器接收标签反射的功率 $P_{r,\text{reader}}$ 为

$$P_{r,\text{reader}} = P_{t,\text{tag}} G_{\text{tag}} G_{\text{reader}} \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (5)$$

式中, $P_{t,\text{tag}}$ 为标签反射的功率,假设 $P_{r,\text{tag}} = P_{t,\text{tag}}$,读写器接收功率 $P_{r,\text{reader}}$ 为

$$\begin{aligned} P_{r,\text{reader}} &= P_{t,\text{reader}} G_{\text{reader}}^2 G_{\text{tag}}^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^4 \\ &= \frac{K_{\text{reader}} P_{t,\text{reader}}}{R^4} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, K_{reader} 是与天线增益和波长有关的量,在实际

中需要考虑标签反射效率,所以 P_{r_tag} 只是近似等于 P_{t_tag} ,由此得到信干比为

$$\text{SINR}_{r_reader} = \frac{P_{r_reader}}{P_{L1}} \geq \text{SINR}_{require} \quad (7)$$

信干比门限 $\text{SINR}_{require}$ 由调制模式和误码率等因素决定^[10]:

$$\text{SINR}_{require} = \frac{E_b \cdot W}{N_0 \cdot D} \quad (8)$$

式中, E_b 是接收信号能量,单位为瓦特/比特; N_0 是噪声功率密度,单位为瓦特/赫兹; W 是信号带宽, D 是传输速度. 由考虑环境因子的式(6)和式(7)可知:

$$\text{SINR}_{r_reader} = \frac{K_1 P_{t_reader}}{R^{4q} P_{L1}} \geq \text{SINR}_{require} \quad (9)$$

由式(9)可知,在读写器之间距离确定,以及射频信号频率近似相等的情况下,读写器可以通过提高自身发射功率或降低其他读写器同信道的干扰来提高信干比. 同理,可以求出在标签处的信干比:

$$\text{SINR}_{r_tag} = P_{t_reader} G_{reader} G_{tag} \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 / P_{L2} = \frac{K_{tag} P_{t_reader}}{R^{2q} P_{L2}} \quad (10)$$

式中, K_{tag} 与读写器和标签天线增益有关, P_{L2} 为多读写器发射功率在标签处产生的信道干扰.

4 实验与分析

4.1 实验平台

实验平台如图6所示,分别利用计算机控制读写器读取标签,组成两套单独的读写器. 根据图5中的算法流程,首先确定两读写器的距离,其次分别确定两读写器的频率,功率以及 Session,最后进入循环. 如果计算机串口向微控制器发送识别命令,两读写器选择之前各自的频率和功率来识别标签群.

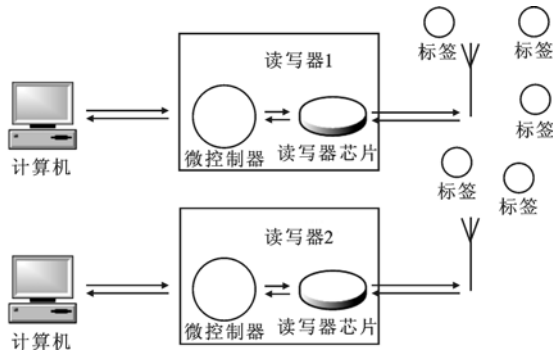


图6 读写器干扰实验平台

读写器硬件结构如图7所示,主要包括电源模块,微控制器 STM32(执行速度快),专用集成读写

器芯片 AS3992,以及定向耦合器等. 微控制器可以控制读写器芯片的功率控制寄存器调节输出功率,也可以读取 RSSI 寄存器以得到外部射频信号 RSSI 或收发机信号 RSSI.

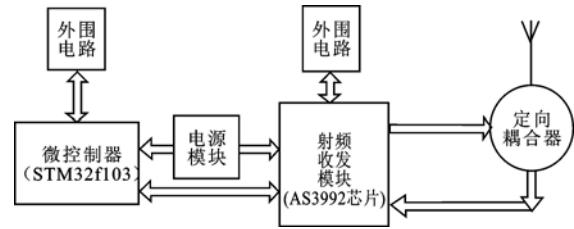


图7 读写器硬件结构

寄存器 RSSI 含 I 通道和 Q 通道值,当利用 RSSI 计算天线输入处的射频信号强度 P_{rf_in} (dBm)时:

$$\text{meanRSSI} = \frac{\text{RSSI}(I) + \text{RSSI}(Q)}{2} \quad (11)$$

$$P_{rf_in} = 2 \cdot \text{meanRSSI} - G \quad (12)$$

当根据 RSSI 计算天线输入处的调制信号强度 P_{s_in} (dBm)时,

$$\text{highRSSI} = \max(\text{RSSI}(I), \text{RSSI}(Q)) \quad (13)$$

$$\text{deltaRSSI} = |\text{RSSI}(I) - \text{RSSI}(Q)| \quad (14)$$

$$P_{s_in} = 2 \cdot \text{highRSSI} + 10 \cdot \log(1 + 10^{\frac{-\text{deltaRSSI}}{10}}) - G - 3 \quad (15)$$

式中, G 是个常量,它与混频器设置、PCB 属性、耦合器耦合系数、天线等都有关系. 由于 P_{s_in} 的第二部分比较小,所以公式可以缩减为下式:

$$P_{s_in} = 2 \cdot \text{highRSSI} - G - C \quad (16)$$

式中, C 是决定于 deltaRSSI 的一个常量,因此 P_{s_in} 与 RSSI 成正比.

根据以上分析,可以根据 RSSI 来扫描图5中外外部信号功率 P_{in} 强弱和判断其他读写器是否发送数据.

4.2 实验结果和分析

由于中国内陆超高频 RFID 频段主要为 920~925 MHz^[17],并且分为 20 个信道,所以实验时,两读写器的载波频率差控制在 5 MHz 以内,并且是 0.25 MHz 的倍数. 读写器 1 发送 920.125 MHz 载波信号或调制后信号,读写器 2 在不同的频率和距离处侦听外部射频信号强度.

由图8可知,随着距离的减小,两读写器频率差的减小,以及发射功率的增加,读写器之间干扰增加,证明了理论推导的正确性. 读写器 1 发送载波信号干扰频带远小于发送已调信号的干扰频带,载波信号干扰频宽为 1 MHz,所以只要两读写器发射的信号频率差为 1 MHz 时,两读写器间的干扰就很

小,当读写器彼此距离较远或发射功率小时,频率差可以不需要 1 MHz. 两读写器不能同时发送调制后的信号,否则在读写器和标签处都将产生较大的干扰. 根据图 8 的侦听功率测试可以确定读写器 2 的频率和发射功率,选择频率时的阈值 P_{th1} 可以选择 $<-60\text{dBm}$ 的值, P_{th2} 可以选择 $-40 \sim -60\text{dBm}$ 之间的值,选择发射功率时,可以把侦听到的功率分为若干等级,保证侦听到该频率下功率小时,发射功率大,这样可以保证读写器的读取范围和减小重叠区.

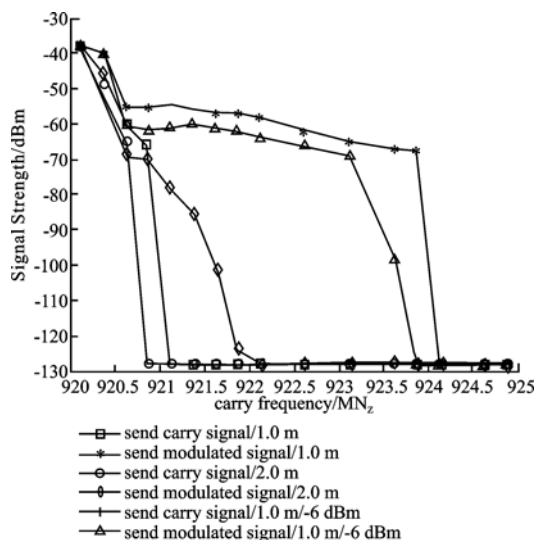


图 8 读写器侦听干扰测试

当读写器 1 发射载波或者已调信号时,读写器 2 在发射识别命令前可以利用 RSSI 来判断读写器 1 是否在发送命令. 图 9 所示为相距 1 m 两读写器进行的识别干扰测试,由图可知,当两读写器的频率差在 $0.75 \sim 4\text{MHz}$ 之间时,读写器 2 可以判断读写器 1 是否在发送识别标签命令,这样读写器之间可以分时隙的进行识别命令,读写器识别碰撞率降低.

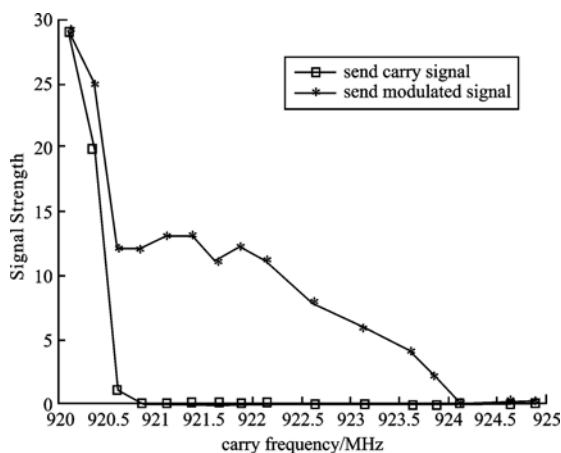


图 9 读写器识别干扰测试

两读写器干扰测试后,接下来就是算法的实现,

新算法运用在两个读写器时简便实用,利用现有的标准就可实现,并在一定程度上解决了读写器对读写器,读写器对标签之间的干扰,可以应用在工程上.

5 结束语

本文针对超高频 RFID 多读写器组网中存在的各种干扰问题,提出了一种新算法. 该算法利用目前存在的 LBT 技术和 ISO/IEC 18000-6C 标准中针对多读写器环境下的防冲突方法,并根据信噪比调节读写器发射功率的方法,达到既保证覆盖范围又解决读写器间干扰问题的网络规划和读写器协调. 新算法首先经过理论推导,后经过两个读写器的实验测试,寻找到算法在现有读写器硬件平台上的实现方式,并最终在多读写器环境下得到验证,算法兼容现有的标准,不需要修改太多的硬件,可以广泛应用于工程上.

参考文献:

- [1] 李雪, 陆百川, 李政. RFID 系统多读写器防碰撞问题研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2012, 31(3): 435-442.
- [2] 陈颖, 张福洪. RFID 传感网络中多读写器碰撞算法的研究[J]. 传感技术学报, 2010, 23(2): 265-268.
- [3] 邓敦建, 安勇, 牟荣增, 等. 基于 AS3992 的防碰撞 Q 算法分析与改进[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(3): 7-10.
- [4] ISO/IEC, Information technology-Radio frequency identification for item management-Part 6: Parameters for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz[S]. 2007.
- [5] EPCglobal. EPCTM. Radio-Frequency Identity Protocols Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol for Communications at 860 MHz - 960 MHz Version 1.0.9[S]. EPCglobal Inc, 2004.
- [6] 陈泰伟, 吴黎明, 吴学文, 等. 一种基于图论的 RFID 防冲突建模与优化方法[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(6): 185-192.
- [7] 康东, 石喜勤, 李勇鹏. 射频识别(RFID)核心技术与典型应用开发案例[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.
- [8] 王建伟, 王东, TIMO Korhonen, 等. 一种新的 RFID 传感网络中多读写器防碰撞协议[J]. 传感技术学报, 2008, 21(8): 1411-1416.
- [9] Cha K, Ramachandran A, Jagannathan S, et al. Decentralized power control with implementation for RFID networks[C]// Proceedings of the 45th IEEE Conference on

- Decision & Control Manchester Grand Hyatt Hotel. San Diego, CA, USA;IEEE,2006.
- [10] 陈宝云. 密集型 RFID 系统读写器防碰撞算法 DPC-EdiCa 的提出与研究[D]. 广州:华南理工大学,2011.
- [11] Gandino F, Ferrero R, Montrucchio B. Introducing probability in RFID reader-to-reader anti-collision [C]//Eighth IEEE International Symposium on Network Computing and Applications. Italy:IEEE,2009.
- [12] Waldrop J, Engels D W, Sanna S E. Colorwave: a MAC for RFID reader networks[C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). New Orleans, Louisiana, USA;IEEE,2003.
- [13] Ho H, Engels D W, Sarma S E. HiQ: a hierarchical Q-learning algorithm to solve the reader collision problem [C]// International Symposium on Applications and the Internet Workshops. [s. l.]:IEEE,2006.
- [14] Ferrero R, Gandino F, Montrucchio B. A fair and high throughput reader-to-reader anticollision protocol in dense RFID networks[J]. IEEE Transactions on industrial informatics,2012,8(3):697-705.
- [15] Joshi J P, Mamun K M A, Kim S W. A reader anti-collision MAC protocol for dense reader RFID system [C]// International Conference on Communications and Mobile Computing. [s. l.]:IEEE,2009:313-316.
- [16] Eom J B, Yim S B, Lee T J. An efficient reader anti-collision algorithm in dense RFID networks with mobile RFID readers[J]. IEEE Transactions on industrial electronics,2009,56(7):2326-2336.
- [17] 信部无[2007]205 号文件,《关于发布 800/900 频段射频识别(RFID)技术应用试行规定的通知》[S]. 2007.

作者简介:

邓敦建 男,(1986—),硕士研究生.研究方向为射频通信系统、UHF RFID 系统.

阎跃鹏 男,(1963—),博士,研究员.研究方向为通信系统与信息科学.

牟荣增 男,(1972—),博士,研究员.研究方向为无线传感器网络.

(上接第 91 页)

- [2] Wagner I, Bertacco V. MCjammer: Adaptive Verification for Multi-core Designs [C]//Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test in Europe. EDA Consortium San Jose, CA, USA: ACM, 2008:670- 675.
- [3] Singh P, Landis D L. Test generation for CMP designs [C]//proceeding of Microprocessor Test and Verification (MTV). Austin, TX;IEEE,2010: 67- 70
- [4] 王朋宇, 陈云霁, 沈海华, 等. 片上多核处理器存储一致性验证[J]. 软件学报, 2010,21(4):863-874.
- [5] Taylor S, Ramey C, Barner C, et al. A simulation-based method for the verification of shared memory in multiprocessor systems[C]//IEEE/ACM ICCAD. [s. l.]:IEEE,2001:10-17.
- [6] Chen X, Yang Y, Gopalakrishnan G, et al. Reducing verification complexity of amulticore coherence protocol using assume/guarantee [C]//proceeding of FMCAD. San Jose, California, USA;IEEE,2006:81- 88.
- [7] Meixner A, Sorin D. Dynamic verification of memory consistency in cache-coherent multithreaded computer architectures[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2009,6(1):18-31.
- [8] Manovit C, Hangal S. Efficient algorithms for verifying memory consistency[C]//Proc of the 17th ACM Symp on Parallelism in Algorithms and Architecture. Las Vegas, Nevada, USA;ACM,2005:245-252.

作者简介:

罗汉青 男,(1985-),博士研究生.研究方向为处理器验证与测试.

梁利平 男,(1969—),博士生导师.研究方向为高性能数字信号处理器、微处理器、高速混合信号集成电路设计技术.

叶甜春 男,(1965—),博士生导师.研究方向为集成电路制造技术、新型器件及微细加工技术.