三维空间下的射频识别标签防冲突算法

于洁潇，刘开华，宫霄霖，闫 格
（天津大学电子信息工程学院，天津 300072）

摘 要：结合射频识别(RFID)系统的工作特点,在给出适用于该系统的面阵多波束实现方法基础上,提出了一种防冲突算法. 该算法采用平面阵列天线,通过数字多波束形成算法控制加权系数,将三维空间划分为多个波束方向,并同已有基于时分多址(TDMA)算法相结合,实现对在阅读器的识别范围内大量密集分布的标签进行快速准确识别的目的. 此外,在实现多标签识别的同时,该算法还引入二次波束形成策略,以解决波束之间的重叠碰撞问题. 实验表明,本算法可将识别效率提高 65%以上.

关键词：射频识别(RFID)；标签防冲突；平面阵列天线；二次波束形成
中图分类号：TN911 **文献标志码**：A **文章编号**：0493-2137(2009)12-1089-07

Anticollision Algorithm for Radio Frequency Tag Identification Tag in Three-Dimensional Space

YU Jie-xiao，LIU Kai-hua，GONG Xiao-lin，YAN Ge
(School of Electronic Information Engineering,Tianjin University,Tianjin 300072,China)

Abstract：In this paper,a radio frequency identification(RFID) anticollision algorithm was proposed based on an analysis of digital multi-beaming forming algorithm of planar array antenna. For identifying the numerous dense tags quickly and accurately in the recognition range of reader,three-dimensional spaces were divided into several subspaces by using planar array antenna and combined with the existing time division multiple access (TDMA) algorithm to avoid the tag collision in each beam. Twice digital beamforming strategy was adopted to solve the reader collision in the overlapping areas between adjacent beams. The simulation results show that the efficiency of identification can be improved more than 65%.

Keywords：radio frequency identification(RFID)；tag anticollision；planar array antenna；twice digital beam forming

射频识别(radio frequency identification,RFID)技术是一项非接触式自动识别技术. 它利用射频方式进行双向通信,自动识别目标对象并获取相关数据,具有精度高、适应环境能力强、抗干扰强和操作快捷等许多优点. 2007 年,RFID 市场份额已超过 50 亿美元[1]. 特别是 RFID 技术在高速运动物体识别、多目标识别等方面的优势,使其在物流、交通、军事、医疗保健、电子商务和安全监视等领域都具有巨大的发展潜力和广泛的应用前景.

RFID 系统主要由电子标签、阅读器、天线以及中间件 4 部分组成.

阅读器和电子标签的所有动作均由应用软件来控制. 阅读器通过发射天线发送一定频率的射频信号,所有在阅读器识别范围内的标签在获得能量之后被唤醒,并将其唯一的识别码——产品电子码(electronic product code,EPC)通过内置天线发送出去. 系统接收天线收到从射频卡发送来的载波信号,经天线调节器传送到阅读器,阅读器对接收的信号进行解调和解码后送到后台主系统进行相关处理,得到标签的 EPC 编码.

在很多应用场合,阅读器要在很短时间内尽快识别多个标签. 由于多个标签通信共享无线信道,信号会发生相互冲突,使阅读器不能正确识别标签. 随着阅读器识别距离的增大,其辐射区域内的标签数量呈

收稿日期：2008-11-24；**修回日期**：2009-06-04.
基金项目：国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA04A109)；国家自然科学基金资助项目(60872001).
作者简介：于洁潇（1981— ），女，博士研究生，讲师.
通讯作者：于洁潇，yjx@tju.edu.cn.

几何倍数增长，发生冲突的几率也随之成倍增加. 对于工作在超高频频段的 RFID 系统，由于采用电磁反向散射耦合技术，其识别距离一般较长，因此在其大半径辐射区域内发生多标签冲突的机率很大. 在射频识别系统中，能使多个标签无故障地进行存取的技术方法被称作防冲突法[2]. 如何选取合适的防冲突方法以达到快速准确识别标签的目的，是提高 RFID 系统工作性能的关键所在.

近几年来，随着硬件成本的不断降低和高速数字信号处理(digital signal processing，DSP)技术的不断发展，在 RFID 阅读器上安装智能天线成为一个新兴的研究方向. 文献[3]构造了五阵元相控阵列天线并对其在 RFID 系统中的应用性能进行了分析. 文献[4]设计了一种适用于 RFID 系统的 3×2 阵元面阵智能天线. 文献[5-6]采用双天线系统，对目标物体的位置进行估计及跟踪. 虽然这些研究尚处于起步阶段，但智能天线技术的引入，必将对提高标签识别速率、减少标签碰撞几率、优化 RFID 系统性能以及实现目标实时追踪等方面都具有很大的贡献.

随着智能天线的引入，新的 RFID 防冲突算法也被相继提出. 文献[7]提出采用扫描天线，在每一个时隙内激活一个天线，根据标签在空间中分布位置的不同进行逐个识别. 文献[8]利用自适应波束形成算法，将其所形成波束对准某一被识标签. 文献[9]采用 MUSIC 算法估计每个标签的波达角，并利用最小输出能量准则和 Lagrange 乘子法形成指向待识别标签的主波束. 由于上述算法计算量都较大，而识别标签数目较少，无法满足大多数 RFID 系统对大规模标签 EPC 码采集的要求.

笔者结合 RFID 系统特点，在对平面阵列波束形成进行深入分析的基础上，提出一种利用平面阵列天线解决标签冲突的方法，实现三维空间下的 RFID 多标签识别.

1　平面阵列波束形成分析

常用的阵列天线有均匀线阵、均匀圆阵、平面阵列等几种形式，由于均匀圆阵的分辨率较低，虽然可通过增加阵元数目加以改善，但会增加阵列天线的复杂性，不适合在 RFID 系统中使用. 针对均匀线阵在 RFID 防冲突算法中的应用，笔者已经在文献[10]中详细讨论，因此本文将针对含有平面阵列天线的阅读器进行研究.

假设该平面阵列是在水平面放置的矩形阵，由 $M\times N$ 个阵元组成，几何关系如图 1 所示. 以阵列左上角的阵元为参考点，x 轴和 y 轴上排列的阵元间距均为 $d_x=d_y=d=\lambda/2$. 为了得到平面阵的波束图，用方位角为 θ、俯仰角为 φ 的单位平面波入射到阵列，则此时阵的输入为入射波方向矢量 $\boldsymbol{\alpha}(\omega_0)$，有

$$\boldsymbol{\alpha}(\omega_0)=\left[\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_0\tau_1},\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_0\tau_2},\cdots,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_0\tau_{MN}}\right]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

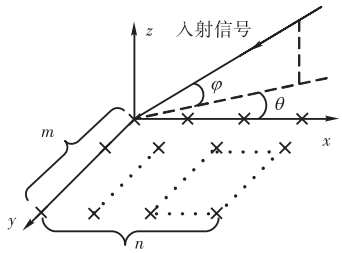

图 1　水平放置的平面阵列天线

Fig.1　Planar array antenna in sideway positioning

设该面阵在空间共形成 L 个波束，则第 l 个波束的权矢量为

$$\boldsymbol{W}_l=\boldsymbol{\alpha}_l(\omega_0)=\left[\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_0\tau_{1l}},\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_0\tau_{2l}},\cdots,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_0\tau_{MNl}}\right]^{\mathrm{T}}\quad l=0,1,\cdots,L-1 \tag{2}$$

式中延时 τ_{ml} 的表达式为

$$\tau_{ml}=\frac{1}{c}(x_m\cos\theta_l\cos\varphi_l+y_m\sin\theta_l\cos\varphi_l)\quad m=1,2,\cdots,MN \tag{3}$$

忽略通道失配、有限字长效应、信道非线性失真等系统误差因素，可以得到第 l 个波束的归一化输出波束图

$$G_l(\theta,\varphi)=\frac{|Y_l|}{\max\{|Y_l|\}}\qquad l=0,1,\cdots,L-1 \tag{4}$$

$$Y_l=\boldsymbol{W}_l^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\alpha}(\omega_0)=\sum_{i=1}^{MN}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_0\tau_{il}}\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_0\tau_i}=\sum_{i=1}^{MN}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_0\frac{1}{c}(x_i\cos\theta_l\cos\varphi_l+y_i\sin\theta_l\cos\varphi_l)}\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_0\frac{1}{c}(x_i\cos\theta\cos\varphi+y_i\sin\theta\cos\varphi)} \tag{5}$$

将 $\omega_0=2\pi c/\lambda$，$x_m=(m-1)d=(m-1)\lambda/2$，$y_n=(n-1)d=(n-1)\lambda/2$ 代入式(5)，则有

$$Y_l=\sum_{m=1}^{M}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\pi(m-1)\cos\theta_l\cos\varphi_l}\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\pi(m-1)\cos\theta\cos\varphi}\cdot\sum_{n=1}^{N}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\pi(n-1)\sin\theta_l\cos\varphi_l}\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\pi(n-1)\sin\theta\cos\varphi}=Y_{l,\mathrm{row}}(\theta,\varphi)Y_{l,\mathrm{col}}(\theta,\varphi) \tag{6}$$

即平面阵列的波束图相当于合成行子阵(平行于 x 方向)波束图 $Y_{l,\mathrm{row}}(\theta,\varphi)$ 与合成列子阵(平行于 y 方向)波束图 $Y_{l,\mathrm{col}}(\theta,\varphi)$ 的乘积.

从上述推导可以看出，选择合适的波束形成算

[illegible]

[illegible]有必

[illegible],采用固

对于 $M\times N$

变换(fast

等间隔波

[illegible]

由

同

因此该

实际上

向(θ

[illegible]

$\sin\theta_l$ co

由式(10)可知,各个波

仰角 φ_l 由阵元数目 M、N 以

图 2　算法流程

Fig.2　Flow chart of algorithm

置零波束. 可以看到原来的阴影部分现在只能接收到 1 路波束信号,因而避免了碰撞情况的发生.

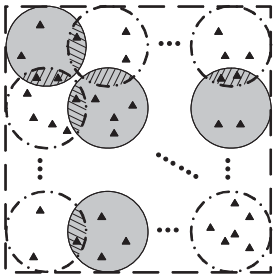

图 5　第 1 次发射波束形成算法中所形成的波束分布
Fig.5　Beaming distribution in first transmit DBF algorithm

步骤 3　所有处于阴影部分的无源标签被该路波束所发射的电磁波唤醒,并发送其 EPC 识别码. 而处于虚线圆形区域的标签由于没有接收到来自阅读器的电磁波,因此没有任何响应. 阅读器的阵列天线接收从标签反射回来的电磁波,并利用接收多波束形成算法,对多个波束信号进行分离. 该接收多波束形成算法采用二维 FFT 算法,其权矢量同发射 DBF 相同. 各个波束可以分为以下 3 种情况.

(1)没有标签. 在发射时将该路输入信号设为 0,则在该方向上将不再出现波束主瓣,即在该方向上所接收到的电磁波为零.

(2)有 1 个标签. 在该波束上发送 SELECT 指令,要求该标签将其存储的 EPC 码发送给阅读器. 之后,阅读器发送 UNSELECT 指令,取消该选中的应答器,则该应答器进入“休眠”状态,对收到的指令不再做任何应答. 由于固定多波束智能天线不能实现最佳接收,因此不能抑制干扰信号及很好地消除噪声. 为了提高抗干扰能力,可以在指令后面附加接收到的 EPC 码,这样即使其他标签接收到该命令,也不会做出任何应答.

(3)有 2 个或 2 个以上标签. 此时在波束内部又一次发生多标签冲突现象. 如前文所述,本算法同基于 TDMA 的防冲突算法完全兼容,因此这里可以启动相应的 TDMA 算法进行内部的防冲突处理,具体采用的算法同实际应用环境相关.

所有被识别标签均将进入“休眠”状态,不再对所接收到的电磁信号做出应答.

由此可见,每个波束都可以单独被控制,具有独立处理能力. 波束和波束之间是并行的,且没有互相干扰. 各个波束可以根据实际情况采用不同的防冲突策略,而该防冲突算法的完成时间取决于含有标签数目最多的那个波束.

步骤 4　在第 2 次识别中,在发射多波束形成算法中令 $y_{2p,2q+1}(n)=y_{2p+1,2q}(n)=0$ $(p=0,2,\cdots,P_{\mathrm{col}}/2-1;$ $q=0,2,\cdots,P_{\mathrm{row}}/2-)$,则所有指向该路方向的波束被置零,如图 6 所示. 黑色小圆圈表示已识别标签. 重复步骤 3,由于不存在波束重叠区域,所有标签都处在不同的波束内并且都被正常识别. 由于原来处于重叠区域内的标签已经被识别,因此其识别时间很有可能要比步骤 2 少.

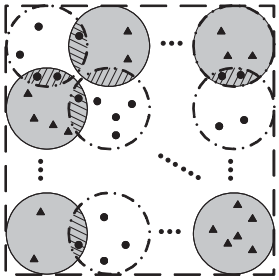

图 6　第 2 次发射波束形成算法中所形成的波束分布
Fig.6　Beaming distribution in second transmit DBF algorithm

步骤 5　由于本算法没有过多考虑干扰因素,也没有对每个标签进行精确跟踪,且波束覆盖范围同阅读器识别范围相比可能会有少量盲区,因此在算法最后,对阅读器的有效识别范围进行全向扫描. 令 $\boldsymbol{\omega}_1=[1,\cdots,1]^{\mathrm{T}}$,则 $y_1(n)=\boldsymbol{\omega}_1^{\mathrm{H}}\boldsymbol{x}(n)=\sum_{m=1}^{MN}x_m(n)$,由于每一个阵元都是一个全向天线,因此可以接收在阅读器识别范围内所有标签的 EPC 码. 已识别标签都已进入休眠状态,对阅读器所发出的指令没有回应,因此只有极少数未被识别的标签才会反射自己的 EPC 码. 若有 2 个以上标签同时发送 EPC 码,则可以再次启动内部防冲突算法.

2.4　总识别时间

本算法的总识别时间同标签数目、标签分布情况以及选用的波束内部防冲突算法有关,其计算公式为

$$T=T_{\mathrm{BF_1}}+T_{\mathrm{BF_2}}+T_{\mathrm{OD}}$$

式中:$T_{\mathrm{BF_1}}$ 为第 1 次发射多波束时对波束内标签的识别时间;$T_{\mathrm{BF_2}}$ 为第 2 次对剩余标签的识别时间;T_{OD} 为最后补充扫描的时间. 实际上,T_{OD} 同 $T_{\mathrm{BF_1}}$、$T_{\mathrm{BF_2}}$ 相比非常短,通常可以忽略不计.

3　仿真实验

3.1　波束指向

如前所述,阵元数目 M、N 以及偏移量 $\Delta\psi_1$、$\Delta\psi_2$

的选取直接决定波束的个数以及各个波束的指向，同时考虑到 RFID 系统的硬件复杂度不能太高，选取 M=2，N=4，$\Delta\psi_1=1-1/M$，$\Delta\psi_2=1-1/N$，并在各行、列分别加上 −20 dB、−30 dB 的切比雪夫窗，则各个波束指向如表 1 所示.

表 1　波束指向

Tab.1　Beam steering

m,n	θ_l /(°)	φ_l /(°)	m,n	θ_l /(°)	φ_l /(°)
1,1	71.6	49.5	2,1	−71.6	130.5
1,2	45.0	162.1	2,2	−45.0	17.9
1,3	−45.0	162.1	2,3	45.0	17.9
1,4	−71.6	49.5	2,4	71.6	130.5

3.2　识别时间同标签数目之间的关系

为简单起见，各波束的内部防冲突算法均采用文献[12]中所述的动态二进制树形搜索(jumping and dynamic searching，JDS)算法. 在该算法中，阅读器识别 R 个标签所需问询次数为 $S(R)=2R-1$ 次，则根据概率理论，可以得到本算法的平均总识别时间为

$$S(R)=\left\lceil \frac{P+2}{2P}(R-R_{\mathrm{OD}})\right\rceil-1+S(R_{\mathrm{OD}}) \tag{11}$$

式中：P 为总的波束数目；$S(R_{\mathrm{OD}})=2R_{\mathrm{OD}}-1$，$R_{\mathrm{OD}}$ 是在二次多波束中未被识别的标签，在一般情况下其数值为零或者非常小.

3.3　识别时间同标签分布情况之间的关系

构造归一化标签分布函数 $D_{\mathrm{R}}(P)$ 来表明标签分布的均匀程度，其表达式为

$$D_{\mathrm{R}}(P)=\left(\frac{P}{P-1}\right)\sum_{p=1}^{P}\left|\frac{R_p}{R}-\frac{1}{P}\right|^2 \tag{12}$$

式中 R_p 为第 p 路波束内的标签数目.

设在阅读器有效范围内随机抛洒 128 个标签，并反复进行 100 次测试，得到的结果如图 7 所示. 从图中可以看出，当 $D_{\mathrm{R}}(P)$=0 时，表明标签是均匀分布的，此时的识别时间仅为 JDS 算法的 1/P；当 $D_{\mathrm{R}}(P)$=1 时，表明所有标签分布在一个波束内，则该算法同原有算法识别时间相同. 随着 $D_{\mathrm{R}}(P)$ 值的增大，标签分布越来越不均匀，则所需要的识别时间一般来说也相对更长. 但是当含有标签数目较多的波束均被分配在一组时，由于另外一组标签数目较少，识别时间较短，则总体识别时间也会相对缩短. 此外，从图中可以看出，在随机测试的过程中，分布函数 $D_{\mathrm{R}}(P)$ 的取值在 50~100 范围内较为集中，其所对应的平均询问次数刚好在式(11)所得结果附近.

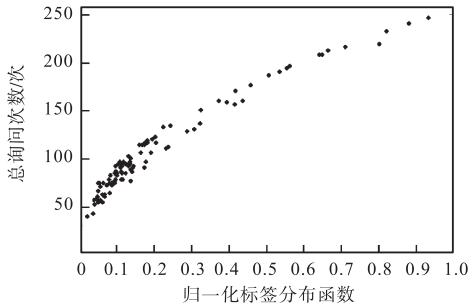

图 7　总询问次数同分布情况之间的关系

Fig.7　Relationship between the number and the distribution of tags

3.4　同已有 TDMA 算法比较

分别采用 JDS 算法和本算法作为 RFID 防冲突算法. 采用蒙特卡罗方法，在阅读器识别范围内随机放置标签，然后进行 500 次测试并取平均值. 仿真结果如表 2 所示. 从表中可以明显看出本算法的平均问询次数远远小于 JDS 算法，只有原算法识别时间的 35%左右.

需要说明的是本算法也可采用其他 TDMA 算法作为内部防冲突算法. 采用同样方法进行比较，本算法的识别时间亦远远小于其他算法.

表 2　2 种算法总询问次数比较结果

Tab.2　Comparison between JDS and the proposed algorithm

标签数目	本算法	JDS 算法	2 种算法结果之比/%	标签数目	本算法	JDS 算法	2 种算法结果之比/%
22	13	40	32.5	162	108	313	34.5
45	28	89	31.5	289	179	577	31.0
79	42	155	27.1	321	233	640	36.4
108	66	216	30.6	496	319	988	32.3

4　结　语

针对 RFID 系统中多标签识别技术，本文提出了一种三维空间下的新型 RFID 防冲突算法. 采用平面阵列天线，在多个波束之间采用 SDMA 技术，在每个波束内部采用 TDMA 算法进行内部多标签识别. 同时，提出二次波束形成策略以避免相邻波束之间的重

叠区域发生阅读器冲突. 仿真结果表明,本算法可将识别效率提高 65%以上,这对于射频识别技术的广泛应用有极其重要的现实意义.

参考文献:

[1] Das R, Harrop P. RFID forecasts,players and opportunities 2006—2016[EB/OL]. http://www. idtechex. com/products/en/view. asp?product categoryid=93. 2007-09-11.

[2] Finkenzeller K. *RFID Handbook: Fundamentals and Application is Contactless Smart Cards and Identification* [M]. 2nd ed. Switzerland:John Wiley and Sons Incorporation,2003.

[3] Salonen P,Sydanheimo L. A 2. 45 GHz digital beamforming antenna for RFID reader[C]// *IEEE 55th Vehicular Technology Conference*. USA,2002:1766-1770.

[4] Karmakar N C,Roy S M,Ikram M S. Development of smart antenna for RFID reader[C]// 2008 *IEEE International Conference on RFID*. The Venetian,Las Vegas, Nevada,USA,2008:65-73.

[5] Kim Myung Sik,Kim Hyung Wook,Chong Nak Young. Automated robot docking using direction sensing RFID[C]// 2007 *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Roma,Italy,2007:4588-4593.

[6] Kim Myung Sik,Chong Nak Young,Ahn Hyo-Sung,et al. RFID-enabled target tracking and following with a mobile robot using direction finding antenna[C]// *Proceedings of the 3rd Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering*. Scottsdale, AZ, USA, 2007:1014-1019.

[7] Abderrazak H,Slaheddine B,Ridha B. A transponder anticollision algorithm based on a multi-antenna RFID reader[C]// *2nd Information and Communication Technologies*. Damascus,Syria,2006:2684-2688.

[8] Lee Jeongkeun,Kwon Taekyoung,Choi Yanghee,et al. Analysis of RFID anticollision algorithms using smart antennas[C]// *Proceedings of the Second International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. USA,2004:265-266.

[9] 朱　华,吉小军,施文康,等. 智能天线技术在多声表面波标签识别中的应用研究[J]. 仪器仪表学报,2007,28(8):1387-1392.
Zhu Hua,Ji Xiaojun,Shi Wenkang,et al. Research on application of smart antenna technology to the identificatin of multiple SAW tags[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*,2007,28(8):1387-1392(in Chinese).

[10] Yu Jiexiao,Liu Kaihua,Huang Xiangdong,et al. An anticollision algorithm based on smart antenna in RFID system[C]// 2008 *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*. Nanjing,China,2008: 1000-1003.

[11] International Organization for Standardization. ISO/IEC 18000-6　2004 Information Technology　Radio Frequency Identification for Item Management(Part 6): Parameters for Air Interface Communications at 860 MHz to 960 MHz [S]. 2004.

[12] Yu Songsen,Zhan Yiju. Anticollision algorithm based on jumping and dynamic searching and its analysis [J]. *Computer Engineering*, 2005, 31(9):19-26.