

自适应维分编码 RFID 防碰撞算法研究及优化

李致金¹, 周杰¹, 乔杰¹, 吴文娟²

(1. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044; 2. 南京林业大学 数理学院, 江苏 南京 210017)

摘要: 首先提出 MDDC (multi-dimension division code) 维分编码的算法。该算法在阅读器范围内标签碰撞较多时, 阅读器呼叫每个标签的平均次数 $\overline{C(n)}$ 趋近 $4/3$, 呼叫每个标签所传输的数据量趋近于一个较小的常数。MDDC 维分编码算法在碰撞次数较少时的平均呼叫次数、平均发送数据量相对较大, 又提出自适应 MDDC 维分编码及其优化算法。阅读器根据范围内的标签数目自适应地降低维分编码的维数并对标签重新编码, 大大降低了搜索较少标签时的平均呼叫次数和平均数据量。因此, 自适应 MDDC 维分编码及优化算法无论在标签较多碰撞和较少碰撞时, 都能很好地提高搜索的效率。

关键词: 自适应; 维分编码; RFID; 防碰撞

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)09-0185-06

Optimization and research on RFID anti-collision algorithm based on adaptive multi-dimension division code

LI Zhi-jin¹, ZHOU Jie¹, QIAO-Jie¹, WU Wen-juan²

(1. College of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. College of Science, Nanjing Forestry University, Nanjing 210017, China)

Abstract: Under the circumstance of many tags and many collisions, when multi-dimension division code algorithm is applied, the average number of times the reader calls each tag $\overline{C(n)}$ approximated to a limit $4/3$, and the data conveyed by calling each tag tends to be a relatively small constant. However, under the circumstance of few collisions, the average number of times the reader calls each tag and the average data conveyed were relatively large. The adaptive multi-dimension division code algorithm, and the optimization of adaptive multi-dimension division code algorithm were proposed. The adaptive multi-dimension division code algorithm could adaptively decrease the MDDC dimensions according to the numbers of tags, and encode the tags again, hence greatly decrease the average number of times the reader calls each tag even under the circumstance of few tags. Therefore, in RFID system, adaptive multi-dimension division code algorithm can significantly improve the efficiency of searching for tags no matter in many collisions or in few collisions.

Key words: adaptive; multi-dimension division code; RFID; anti-collision

1 引言

射频识别^[1](RFID, radio frequency identification) 技术是 20 世纪 90 年代兴起的一项非接触式的自动识别技术^[2], 即通过射频方式进行非接触双向通信。RFID 在通信过程中, 由于标签较多, 在信道共用、信号频率相同的情况下会产生各信号之间的相互

干扰、产生数据碰撞^[3]。在 RFID 系统中, 防碰撞的算法主要有 4 种: 空分多址 (SDMA, space division multiple access)、频分多址 (FDMA, frequency division multiple access)、时分多址 (TDMA, time division multiple access) 和码分多址 (code division multiple access)。由于 RFID 系统自身的特点, 目前用于 RFID 系统中的防碰撞算法主要是基于 ALOHA 的

收稿日期: 2012-07-25; 修回日期: 2013-01-11

基金项目: 江苏省行业专项基金资助项目(20110230)

Foundation Item: The Special Profession Foundation of Jiangsu Province (20110230)

随机型算法和基于二进制树的确定型算法^[4]。其中，ALOHA 类算法在 RFID 标签防碰撞中得到了广泛的应用^[5]。

由于 Vogt^[6,7,9,10]算法与最大后验概率算法^[8]的估计较为准确，因此其应用较为普遍。但这 2 种算法需要在标签数取值范围内进行多次计算来确定极值，因此计算复杂度较高。如果标签数的取值范围很大，那么计算量将很大。文献[11,12]提出了基于分段搜索的多 RFID 标签抗碰撞算法，此算法节省了每次查询发送的回传标签长度。文献[13~15]提出了基于广义地址码和时隙预测的防碰撞算法，克服了二进制算法和单纯 ALOHA 算法吞吐量不高的缺点。文献[4,16]提出了一种基于时隙 ALOHA 的随机型防碰撞的优化算法——BIS 算法。此算法在帧开始前扫描空时隙，并结合标签估算算法实现对帧长的动态调度，最大限度地减少了空时隙的时间开销，从而提高了多标签的读取效率。文献[17, 18]提出了非线性自适应 Q 值算法，这种算法采用改变参数 Q 的值来适应标签数目的变化，从而解决标签数目不固定且变化范围很大情况下的防碰撞问题。文献[19]提出了锁位的概念，通过锁位寻呼指令锁定碰撞发生的比特位置，在锁定的碰撞位上进行防碰撞运算，然后采用后退策略识别碰撞节点下一个分支内的所有标签。以上算法虽都在一定程度上提高了标签的识别效率，但当标签数跨度较大时仍存在一定的不足。

针对目前算法的不足，本文首次提出了自适应 MDCC 维分编码的防碰撞算法。本算法在阅读范围无论标签较多或较少时，在寻呼次数和发送数据量两方面均有很好的改善。

2 维分编码算法

2.1 维分编码算法的基本原理

维分编码(MDCC, multi-dimension division code)就是将二进制代码按照空间维数进行编码，每维以 4 bit 二进制数据编码。每维维分代码权值 $T(d)$ 和维分编码维数 d 的关系为

$$T(d) = 4^{d-1} \quad (d = 1, 2, 3, 4, L) \quad (1)$$

每维维分编码的 4bit 二进制编码为 0001、0010、0100、1000，对应的十进制数据 i 为 0、1、2、3。不同维的 4 bit 二进制编码所对应的十进制数据与每维维分代码的权值 $T(d)$ 有关，记为 $S_{T(d)}^i = i \cdot T(d)$ ，

则 n 维维分编码与十进制数值转换关系式为

$$D = \sum_{d=0}^{n-1} S_{T(d)}^i, (i = 0, 1, 2, 3) \quad (2)$$

以 8 bit 二进制代码为例，MDCC 算法将 256 个标签分成 4 维空间，采用 16 bit 多维数据进行编码。第 1 维维分编码权值为 $T(d) = 4^{d-1} = 4^0$ ，维分编码 0001、0010、0100、1000 对应的十进制数 $S_{T(d)}^i$ 分别为： 0×4^0 、 1×4^0 、 2×4^0 、 3×4^0 。第 2、3、4 维维分编码对应的十进制数类推。例如 4 维维分编码 0001000100010001 表示的十进制数为 $0 \times 4^3 + 0 \times 4^2 + 0 \times 4^1 + 0 \times 4^0 = 0$ ，即第 0 个标签。4 维维分编码 1000100010001000 表示 $3 \times 4^3 + 3 \times 4^2 + 3 \times 4^1 + 3 \times 4^0 = 255$ ，即第 255 个标签。 n 维维分编码的最大特点就是：每 1 维维分编码有且只有 1 个 1， n 维维分编码有且只有 n 个 1。

十进制数转换为 n 维维分编码采用除权取商法，即将十进制数除以相应维的权值取其商值，并将其转换为相应的维分编码。例如，十进制数 187 的多维维分编码算法如下：187/64，商为 2，所以第 4 维维分编码为 0100。余数 $187 - 2 \times 64 = 59$ ，59/16，商为 3，所以第 3 维维分编码为 1000。余数 $59 - 3 \times 16 = 11$ ，11/4，商为 2，第 2 维维分编码为 0100。余数 $11 - 2 \times 4 = 3$ ，3/1=3，第 1 维维分编码为 1000。综合可得：187 的多维维分编码为 0100100001001000。

2.2 MDCC 算法的性能分析

根据多维维分编码中的特点，不失一般性，笔者先推出 4 维维分编码的相关公式。定义 B_4^r 、 B_3^s 、 B_2^t （其中， r, s, t 取值为 1、2、3、4，对应的二进制代码为：0001、0010、0100、1000）为第 4、3、2 维维分编码中对应维的编码为 1，即 B_4^r 、 B_3^s 、 B_2^t 的取值为 0 或 1。例如，第 4 维维分的编码为 0100，则 $B_4^3 = 1$ 。在每维维分编码中，只要有 2 个及 2 个以上编码，则必然产生碰撞。定义 N_1^{rst} 为第 4 维 r bit 为 1、第 3 维 s bit 为 1、第 2 维 t bit 为 1 时所对应的第 1 维的多维维分编码碰撞次数，取值为 2,3,4。为计算公式统一，定义每维维分编码中未发生碰撞时的取值为 1，即 $N_1^{rst} = 1$ 。则多维维分编码算法中，阅读器识别范围内所有标签数目 $T(n)$ 和维分编码的关系式为

$$T(n) = \sum_{r=1}^4 B_4^r \sum_{s=1}^4 B_3^{rs} \sum_{t=1}^4 B_2^{rst} N_1^{rst} \quad (3)$$

阅读器所要发出的呼叫次数为

$$C(n) = 1 + \sum_{r=1}^4 B_4^r \{1 + \sum_{s=1}^4 B_3^{rs} [1 + \sum_{t=1}^4 B_2^{rst} (N_1^{rst} + 1)]\} \quad (4)$$

证明 采用归纳法证明。若阅读器范围内只有 1 个标签，未发生碰撞，不失一般性地以 4 维维分编码为例。阅读器第 1 次发送 REQUEST(11111)命令，要求阅读器范围内的所有标签应答，阅读器接收数据解码后是唯一的 4 bit 第 4 维维分编码，不失一般性，笔者假设为 1000。第 2 次发送 SELECT(100011)命令，接收数据解码后是唯一的 4 bit 第 3 维维分编码，笔者假设为 1000。第 3 次发送 SELECT(100010)命令，接收数据解码后是唯一的 4 bit 第 2 维维分编码，笔者假设为 1000。第 4 次发送 SELECT(100001)命令，接收数据解码后是唯一的 4 bit 第 1 维维分编码，笔者假设为 1000。第 5 次发送 SELECT(100000)命令，标签应答，阅读器总共发送 5 次呼叫。式(4)中， B_4^r 、 B_3^{rs} 、 B_2^{rst} 、 N_1^{rst} 均为 1， $c(n)=5$ ，即阅读器需要 5 次呼叫，式(4)成立。

若阅读器范围内有 n 个标签，不失一般性，设第 1 维碰撞的次数 $N_1^{444} = x$ ，式(4)成立。即

$$\begin{aligned} C(n) &= 1 + \sum_{r=1}^4 B_4^r \{1 + \sum_{s=1}^4 B_3^{rs} [1 + \sum_{t=1}^4 B_2^{rst} (N_1^{rst} + 1)]\} \\ &= 1 + (B_4^4 + \sum_{r=1}^3 B_4^r) \{1 + (B_3^4 + \sum_{s=1}^3 B_3^{rs}) [1 + \\ &\quad (B_2^4 + \sum_{t=1}^3 B_2^{rst}) (N_1^{rst} + 1)]\} \\ &= 1 + (B_4^4 B_3^4 B_2^4 N_1^{444} + L) = 1 + (B_4^4 B_3^4 B_2^4 x + L) \quad (5) \end{aligned}$$

若阅读器范围内有 $(n+1)$ 个电子标签，由维分编码的特性可知，第 1 维碰撞的次数 $N_1^{444} = x+1$ 。由于多出来的那个标签在第 1 维中，因此，阅读器呼叫次数比 n 个标签呼叫次数多出 1 次，即

$$C(n+1) = C(n) + 1 \quad (6)$$

将 $N_1^{444} = x+1$ 代入式(4)可得

$$\begin{aligned} C(n+1) &= 1 + \sum_{r=1}^4 B_4^r \{1 + \sum_{s=1}^4 B_3^{rs} [1 + \sum_{t=1}^4 B_2^{rst} (N_1^{rst} + 1)]\} \\ &= 1 + (B_4^4 + \sum_{r=1}^3 B_4^r) \{1 + (B_3^4 + \sum_{s=1}^3 B_3^{rs}) [1 + \sum_{t=1}^4 B_2^{rst} (N_1^{rst} + 1)]\} \\ &= 1 + (B_4^4 B_3^4 B_2^4 N_1^{444} + L) = 1 + [B_4^4 B_3^4 B_2^4 (x+1) + L] \\ &= 1 + (B_4^4 B_3^4 B_2^4 x + B_4^4 B_3^4 B_2^4 \times 1 + L) \\ &= 1 + (B_4^4 B_3^4 B_2^4 x + 1 + L) = C(n) + 1 \end{aligned}$$

所以式(4)的结论成立，证毕。则搜索每个标签的平均呼叫次数为

$$\begin{aligned} \overline{C(n)} &= \frac{C(n)}{T(n)} = \frac{1 + \sum_{r=1}^4 B_4^r \{1 + \sum_{s=1}^4 B_3^{rs} [1 + \sum_{t=1}^4 B_2^{rst} (N_1^{rst} + 1)]\}}{\sum_{r=1}^4 B_4^r \sum_{s=1}^4 B_3^{rs} \sum_{t=1}^4 B_2^{rst} N_1^{rst}} \\ &= 1 + \frac{1}{N_1^{rst}} + \frac{1}{\sum_{t=1}^4 B_2^{rst} N_1^{rst}} + \frac{1}{\sum_{s=1}^4 B_3^{rs} \sum_{t=1}^4 B_2^{rst} N_1^{rst}} + \\ &\quad \frac{1}{\sum_{r=1}^4 B_4^r \sum_{s=1}^4 B_3^{rs} \sum_{t=1}^4 B_2^{rst} N_1^{rst}} \quad (7) \end{aligned}$$

依据以上推理，当标签数增多时，空间维数增加，标签数目和维分编码的关系为

$$T(n) = \sum_{l=1}^4 B_d^{lL} L \sum_{r=1}^4 B_4^{lLr} \sum_{s=1}^4 B_3^{lLrs} \sum_{t=1}^4 B_2^{lLrst} N_1^{lLrst} \quad (8)$$

其中， d 为维分编码维数。则搜索一个标签的平均呼叫次数为

$$\begin{aligned} \overline{C(n)} &= 1 + \frac{1}{N_1^{rst}} + \frac{1}{\sum_{t=1}^4 B_2^{rst} N_1^{rst}} + \frac{1}{\sum_{s=1}^4 B_3^{rs} \sum_{t=1}^4 B_2^{rst} N_1^{rst}} + \\ &\quad \frac{1}{\sum_{r=1}^4 B_4^r \sum_{s=1}^4 B_3^{rs} \sum_{t=1}^4 B_2^{rst} N_1^{rst}} + L + \\ &\quad \frac{1}{\sum_{l=1}^4 B_d^{lL} L \sum_{r=1}^4 B_4^{lLr} \sum_{s=1}^4 B_3^{lLrs} \sum_{t=1}^4 B_2^{lLrst} N_1^{lLrst}} \quad (9) \end{aligned}$$

由式(9)可以看出，随着标签数即维分编码维数的增多，发生全碰撞时搜索一个标签的平均呼叫次数逐渐增大，最大的平均呼叫次数为

$$\begin{aligned} \overline{C(n)} &= \lim_{d \rightarrow \infty} \left\{ 1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{4 \times 4} + \frac{1}{4 \times 4 \times 4} + \frac{1}{4 \times 4 \times 4 \times 4} + L + \frac{1}{4^d} \right\} \\ &= \lim_{d \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{4^0} + \frac{1}{4^1} + \frac{1}{4^2} + \frac{1}{4^3} + \frac{1}{4^4} + L + \frac{1}{4^d} \right\} = \frac{1}{1 - \frac{1}{4}} = \frac{4}{3} \quad (10) \end{aligned}$$

阅读器每次发送的呼叫数据量与多维维分编码的关系为

$$N = 4 + \text{int}(1bd) \quad (11)$$

式(11)中的前 4 bit 为第 d 维多维维分编码，后 $\text{int}(1bd)$ bit 为维数标示码。 $\text{int}(1bd)$ 取大等于 $1bd$ 的最小整数。例如 $d = 4$ ， $\text{int}(1bd) = 2$ ，则编码为 4 个二进制代码 00：第 1 维；01：第 2 维；10：第 3 维；11：第 4 维。当发生全碰撞时阅读器搜索一个标签

时所发送的数据量为

$$B = \overline{C(n)} \cdot N = \frac{4}{3} \times (4 + lbd) \quad (12)$$

由以上分析可知，采用 MDDC 算法应用于多标签碰撞时，具有非常明显的优势。但当阅读器范围内标签较少即碰撞较少时，该算法搜索一个标签所发送的数据量相对较大。例如，当 4 维维分编码内标签数较多发生全碰撞时，由式(12)可得阅读器搜索一个标签所发送呼叫次数为

$$\overline{C(n)} = \lim_{d=4} \left\{ 1 + \frac{1}{4^0} + \frac{1}{4^1} + \frac{1}{4^2} + \frac{1}{4^3} + \frac{1}{4^4} \right\} = \frac{341}{256}$$

每次呼叫的数据量为 $N = 4 + lbd = 6$ bit，则搜索一个标签呼叫数据量约为 8 bit。但当阅读器范围内只有一个标签时，由式(4)可知搜索一个标签阅读器的呼叫次数为 5 次，每次呼叫所发送的数据量由式(12)可得为 6 bit，则搜索一个标签所发送的数据量为 30 bit。为此需要进一步优化该算法。

3 自适应 MDDC 算法

所谓自适应 MDDC 算法就是根据阅读器范围内 RFID 的标签数和标签碰撞数目自适应地调整维分编码维数的一种搜索标签算法。在建立阅读器系统时（以 4 维空间 256 个标签为例），阅读器向每个标签发送命令，要求所有标签均向该阅读器发送一个唯一的 16 bit（4 维）维分编码的登录信息，该信息就是该标签的 4 维维分编码地址，则该阅读器范围内最多可容纳 2^8 个标签。阅读器根据收到代码的碰撞情况判断阅读器范围内的标签数目，以确定范围内实际标签维分编码的维数。由 2.2 节的分析可知，对于阅读器范围标签数较多时，MDDC 算法具有明显的优势，因此，下面笔者主要研究在阅读器范围内标签较少时，如何自适应地调整 MDDC 算法的维数及如何重新编码。

3.1 自适应 MDDC 降维算法

只要有 2 个以上标签，阅读器接收的编码必然会产生碰撞。最多标签个数 $T(n)$ 与碰撞位数的关系为

$$T(n) = x_d x_{d-1} \dots x_4 x_3 x_2 x_1 \quad (13)$$

其中， x 表示维分编码中每维的碰撞位数，取值为 1、2、3、4，下标为相应的维数。发生碰撞时，阅读器首先发送“111111”6 bit 编码，要求阅读器范围内的所有标签应答，若阅读器收到的响应信号为“??00?00??0?000??”，“?”表示碰撞位。由前文

所述的 MDDC 算法的原理可知，第 4 维编码为“??00”有 2 bit 发生碰撞，有 2 种维分编码，即“1000”和“0100”，以此类推，则整个“??00?00??0?000??”多维编码最多有“ $2 \times 2 \times 2 \times 2$ ”共 16 个标签。因此，根据阅读器收到碰撞数据的情况可判断阅读器范围内的标签，从而可减少维分编码的位数进而进行降维，并对标签自动重新编码。 n 维维分编码降维后的编码维数 W 与碰撞位数的关系为

$$W = \text{int} \left(\frac{1}{2} \left(\text{lb} \prod_{i=1}^d x_i \right) \right) \quad (14)$$

其中， d 为原编码的维数， x_i 为相应维数的碰撞位数， W 取大于等于 $\text{int} \left(\frac{1}{2} \text{lb} \prod_{i=1}^d x_i \right)$ 的最小整数。例如上例中，阅读器范围内最多有 $2 \times 2 \times 2 \times 2$ 个标签，则 $\text{int} \left(\frac{1}{2} \text{lb} \prod_{i=1}^d x_i \right) = \text{int} \left(\frac{1}{2} \text{lb} (2 \times 2 \times 2 \times 2) \right) = 2$ ，因此采用 2 维维分编码即可。

3.2 标签的降维维分编码

由 3.1 节中标签得到降维的维数后，标签需要重新编码。不失一般性，上例中，阅读器接收到的碰撞编码为“??00?00??0?000??”，最多有 16 个维分编码，这 16 个维分编码如表 1 所示。

表 1 维分编码与十进制数对照

维分编码				十进制数
1000	1000	1000	0010	253
1000	1000	1000	0001	252
1000	1000	0010	0010	245
1000	1000	0010	0001	244
1000	0001	1000	0010	205
1000	0001	1000	0001	204
1000	0001	0010	0010	197
1000	0001	0010	0001	196
0100	1000	1000	0010	189
0100	1000	1000	0001	188
0100	1000	0010	0010	181
0100	1000	0010	0001	180
0100	0001	1000	0010	141
0100	0001	1000	0001	140
0100	0001	0010	0010	129
0100	0001	0010	0001	128

RFID 信号传输中没有“?”的信号频率，阅读器将碰撞数据“??00?00??0?000??”改为“1100 1001 1010 0011”，然后发送给范围内的每一个标

签。维分编码中每维有且只有一个“1”，因此，标签就可确切地判断“1”的位置即为碰撞位。标签根据碰撞位的情况，自动地生成如表1所示的16个4维维分编码，同时将这16个4维维分编码按十进制数值从大到小降序排列。然后将本标签原始的4维维分编码与生成的16个4维维分编码比对，最大者作为降维后的2维维分编码的最大值，编码为10001000，依次类推，直至编码结束。如果标签范围内没有相对应的编码，则该编码相对应的降维后的2维维分编码空缺。

由以上分析可知，搜索该阅读器范围内的一个标签时，阅读器所发送的平均数据量由式(12)可得

$$B = \overline{C(n)} \cdot N = \left(1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{16}\right) \times (4 + \text{lb}2) = \frac{21}{16} \times 5 = \frac{105}{16} \approx 7 \quad (15)$$

例如，阅读器范围内标签“1000 1000 1000 0010”和标签“0100 0001 0010 0001”2个标签亦可产生“??00?00??0?000??”的碰撞情况。这2个标签降维后对应的2维维分编码为“1000 1000”和“0001 0001”，则搜索这2个标签阅读器所要发送的平均数据量为8 bit，因此，采用自适应降维编码对于阅读器范围标签数较少的情况具有非常明显的作用。例如总标签数为256个的阅读器范围内，无论是全碰撞还是单个标签，自适应MDDC算法搜索一个标签阅读发送的数据量均为8 bit，即仅相当于Aloha算法以及二叉树搜索算法发送一次数据(8 bit)的数据量。

4 自适应MDDC算法优化

在2.1节中笔者定义每维维分编码的4 bit二进制编码为0001、0010、0100、1000，对应的十进制数据*i*为0、1、2、3。为进一步减少阅读器所发的数据量，笔者继续优化该算法。用3 bit二进制码代替4 bit维分编码，对应关系如表2所示。

表2 二进制编码与维分编码对应关系

3 bit 二进制码	4 bit 二进制维分编码
000	0001
001	0010
010	0100
100	1000

采用优化编码后，任意2个标签发生碰撞时，有1 bit或2 bit数据产生碰撞，依据优化编码原则

可唯一确定发生碰撞的2个标签的编码。当任意3个标签发生碰撞时，有 $C_4^3 = 4$ 种情况。4种情况碰撞如表3所示。情况1~情况3，有2 bit数据位发生碰撞，另一位数据为“0”。阅读器发送呼叫数据时，依据优化编码的原则，先发送碰撞位的优化编码解码数据，最后发送“000”呼叫数据，可确保识别全部标签。情况4标签编码发生全碰撞时，依据优化编码的原则，阅读器范围内标签编码必然是“001、010、100”和“000、010、010、100”2种情况，这2种情况阅读器无法分清，为了节约阅读器发送的数据量，阅读器识别时先识别编码为“100”的标签，再识别编码为“010”的标签，然后再识别编码为“001”的标签，最后识别编码为“000”的标签。如果是“001、010、100”3个标签发生全碰撞，阅读器前3次已经全部识别范围内的标签，第4次因无标签，因此就不需再发送呼叫数据。如果是4个标签发生数据全碰撞，依次按“100、010、001、000”顺序识别，确保正确、完整识别阅读器范围内的标签。

表3 优化编码任意3标签碰撞关系

序号	优化二进制编码	碰撞数据位
1	000 001 010	0??
2	000 001 100	?0?
3	000 010 100	??0
4	001 010 100	???

依据以上优化算法的分析，阅读器搜索标签每次发送的数据量由6 bit降为5 bit，式(11)变为

$$N = 3 + \text{int}(\text{lb}d) \quad (16)$$

式(12)变为

$$B = \overline{C(n)}N = \frac{4}{3} \times (3 + \text{lb}d) \quad (17)$$

5 结束语

本文提出了MDDC算法的原理，在维分编码的基础上，提出了RFID防碰撞算法。分析式(9)的 $\overline{C(n)}$ 和式(12)的 $B = \overline{C(n)}N = \frac{4}{3} \times (3 + \text{lb}d)$ ，可得出以下结论：采用MDDC算法在未发生碰撞时，呼叫次数最大值为5。随着碰撞次数的增多，搜索每个电子标签平均呼叫次数按式(9)逐渐减小。当无穷多个标签发生全碰撞时，呼叫每个标签的平均呼叫

次数的极限值为 $4/3$ ，阅读器每次发送的平均数据量按式(11)变化，阅读器发送的总平均数据量按式(12)变化。为了克服 MDDC 算法在标签少时，即碰撞次数少时所出现的平均呼叫次数、平均发送的数据量都相对较大的不足，本文提出了自适应 MDDC 算法，阅读器根据范围内的标签数目自适应地对维分编码进行降维和重新编码。降维后搜索一个标签阅读器发送的平均数据量亦按式(12)变化。为了进一步提高阅读器的搜索效率，本文又提出了维分编码的优化算法，采用优化算法后，搜索一个标签阅读器发送的平均数据量按式(17)计算。因此，自适应 MDDC 算法及优化算法无论在标签数目较多和标签数目较少时，都大大地提高了阅读器搜索标签的效率。限于本文的篇幅，对于阅读器范围内标签数据随机增多的情况下，阅读器搜索标签所需发送平均数据量的计算方法不再详细阐述。

参考文献：

- [1] YOON W J, CHUNG S H, LEE S J. Implementation and performance evaluation of an active RFID system for fast tag collection[J]. *Computer Communications*, 2008, 31(17):4107-4116.
- [2] 李慧贤. 轻量级 RFID 双向认证协议设计与分析[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2012, (1):172-178.
LI H X. Design and analysis of the light-weight mutual authentication protocol for RFID[J]. *Journal of Xiidian University*, 2012, (1):172-178.
- [3] 高飞, 薛艳明, 王爱华等. 物联网核心技术-RFID 原理与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010. 96-101.
GAO F, XUE Y M, WANG A H, *et al.* The Core-Technology of the Internet of Things the Application & Principle of RFID[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2010. 96-101.
- [4] 王中祥, 王俊宇, 刘丹等. 一种降低空时隙开销的 RFID 防碰撞算法[J]. *通信学报*, 2009, 30(9):1-5.
WANG Z X, WANG J Y, LIU D, *et al.* An RFID anti-collision algorithm minimizing the cost of empty slots[J]. *Journal on Communications*, 2009, 30(9):1-5.
- [5] 吴海峰, 曾玉. RFID 动态帧时隙 ALOHA 防冲突中的标签估计和帧长确定[J]. *自动化学报*, 2010, 36(4):621-624.
WU H F, ZENG Y. Tag estimate and frame length for dynamic frame slotted ALOHA anti-collision RFID system[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(4):621-624.
- [6] VOGT H. Multiple object identification with passive RFID tags[A]. *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics[C]*. Hammamet, Tunisia, 2002. 1-6.
- [7] VOGT H. Efficient object identification with passive RFID tags[A]. *Proceedings of International Conference on Pervasive Computing[C]*. Zurich, Switzerland, 2002.98-113.
- [8] CHEN W T. An accurate tag estimate method for improving the performance of an RFID anti-collision algorithm based on dynamic frame length ALOHA[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2009, 6(1):9-15.
- [9] LEE S R, JOO S D, LEE C W. An enhanced dynamic framed ALOHA algorithm for RFID tag identification[A]. *Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services[C]*. Washington D C, USA, 2005. 166-174.
- [10] BONUCCELLI M A, LONETTI F, MARTELLI F. Tree slotted ALOHA: a new protocol for tag identification in RFID networks[A]. *Proceedings of the International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks[C]*. New York, USA, 2006. 603-608.
- [11] 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.
LI Z L, HE Y G, LIU T S. An anti-collision algorithm on new spreading code RFID[J]. *Computer Measurement & Control*, 2010, 18(5):1114-1117.
- [12] 李萌, 钱志鸿, 张旭等. 基于时隙预测的 RFID 防碰撞 ALOHA 算法[J]. *通信学报*, 2011, 32(12):43-50.
LI M, QIAN Z H, ZHANG X, *et al.* Slot predicting based ALOHA algorithm for RFID anti-collision[J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(12):43-50.
- [13] 朱军, 张元, 卢小冬等. 基于分段搜索的多 RFID 标签抗冲突方法[J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(3):1031-1033.
ZHU J, ZHANG Y, LU X D, *et al.* Anti-collision method of multi-RFID tags based on segmental search[J]. *Application Research of Computers*, 2011, 28(3):1031-1033.
- [14] 李世煜, 冯全源, 分层深度搜索树型 RFID 防碰撞算法设计[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(11):82-84.
LI S Y, FENG Q Y. Delaminating deepness searching tree anti-collision algorithm in RFID system[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(11):82-84.
- [15] EOM J, LEE T. Accurate tag estimation for dynamic framed-slotted ALOHA in RFID systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(1):60-62.
- [16] 杨坤, 冷霆鹏. RFID 系统时隙不完全竞争防碰撞算法[J]. *计算机工程*, 2011, 37(1):260-262.
YANG K, LENG S P. Slot partial competitive anti-collision algorithm for RFID system[J]. *Computer Engineering*, 2011, 37(1):260-262.
- [17] CHOI J S, LEE H, ENGELS D W. Robust and dynamic bin slotted anti-collision algorithms in RFID systems[A]. *Proc of IEEE International Conference on RFID[C]*. IEEE Press, 2008. 191-198.
- [18] 陈颖, 张福洪, 廖彬彬. 一种新的 RFID 传感系统的防碰撞算法的研究[J]. *传感技术学报*, 2009, 22(6):865-868.
CHEN Y, ZHANG F H, LIAO B B. Research on a novel anti-collision algorithm in RFID sensor system[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22(6):865-868.
- [19] 王雪, 钱志鸿, 胡正超等. 基于二叉树的 RFID 防碰撞算法研究[J]. *通信学报*, 2010, 31(6):49-50.
WANG X, QIAN Z H, HU Z C, *et al.* Research on RFID anti-collision algorithms based on binary trees[J]. *Journal on Communications*, 2010, 31(6):49-50.

作者简介：



李致金 (1973-)，男，江苏南京人，南京信息工程大学讲师、博士生，主要研究方向为信号处理和智能控制系统。

周杰 (1963-)，男，重庆人，南京信息工程大学教授、博士生导师，主要研究方向为无线通信和微波天线。

乔杰 (1979-)，男，新疆乌鲁木齐人，博士，南京信息工程大学讲师，主要研究方向为语音信号处理。

吴文娟 (1979-)，女，山东济宁人，博士，南京林业大学讲师，主要研究方向为语音信号处理。