

文章编号: 2095-4980(2022)11-1137-07

基于 FM0 记忆辅助特性的 RFID 标签碰撞检测

周凌翱¹, 石 林²

(1.常州信息职业技术学院 电子工程学院, 江苏 常州 213164; 2.常州大学 阿里云大数据学院, 江苏 常州 213164)

摘 要: 为实现两个射频识别(RFID)碰撞标签信息的检测和分离, 提出一种利用 Gen2 标准中 FM0 标签编码固有记忆特性的检测方法。通过对 FM0 比特编码特点和碰撞标签信息的无记忆检测分析, 得到基于单个比特持续时间的无记忆检测方法的条件错误概率和单个标签信息检测的误码率; 然后利用单个 FM0 比特编码需要前一比特的“记忆”特性, 得到对应于前一比特的一对测量值和对应于下一比特的一对测量值, 进而得到碰撞标签信息的 1 比特记忆辅助检测时的条件错误概率和误码率性能; 并对在帧 Aloha 媒质接入方案中采用提出的检测方法时的 N 个标签群的总延迟减少性能进行了分析。仿真实验结果表明, 提出的 1 比特记忆辅助检测方法, 相比于无记忆检测具有更好的误码率性能, 且能减少标签群接入时的总延迟。

关键词: 射频识别; 帧 Aloha 接入方案; FM0 标签; 记忆特性; 碰撞检测; 误码率; 延迟

中图分类号: TN92; TP391

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020271

FM0 memory auxiliary characteristics based collision detection for RFID tags

ZHOU Ling'ao¹, SHI Lin²

(1.School of Electronic Engineering, Changzhou College of Information Technology, Changzhou Jiangsu 213164, China;

2.Aliyun School of Big Data, Changzhou University, Changzhou Jiangsu 213164, China)

Abstract: In order to detect and separate the information of two Radio Frequency Identification (RFID) collision tags, a detection method based on inherent memory characteristics of FM0 tag coding in Gen2 standard is proposed. By analyzing the characteristics of FM0 bit coding and memorylessly detecting the collided tags information, the conditional error probability of memoryless detection method based on the duration of single bit and the bit error rate of single tag information detection are obtained. Then a pair of measurement results corresponding to the first bit and another pair of measurement results corresponding to the next bit are got by using the characteristic that encoding of a single FM0 bit requires memory of the previous bit. The conditional error probability and bit error rate performance for one bit memory auxiliary detection of collided tags information are obtained thereafter. The performance of total delay time reduction for N tag groups is also analyzed in framed Aloha medium access scheme where the proposed detection method is adopted. The simulation results show that the proposed one bit memory auxiliary detection method has better Bit Error Rate(BER) performance than memoryless detection, and it can also reduce the total delay time of tag group accessing.

Keywords: Radio Frequency Identification; framed Aloha access scheme; FM0 tag; memory characteristics; collision detection; bit error rate; delay

近年来, 射频识别(RFID)领域的研究和商业应用呈现出蓬勃发展的趋势。信号的后向散射(即信号反射而非有源辐射^[1])对于信息传输是一种非常有吸引力的方式, 因此大量 RFID 标签用于供应链产品识别^[2]或传感器网络^[3-4]。RFID 技术面临的最大挑战之一就是解决冲突的能力, 即多个标签同时传输信息。

目前的工业标准电子产品代码(Electronic Product Code, EPC)第 1 类第 2 代(Gen2)(或 ISO 18000-6C)^[5]规定: 通过帧 Aloha 方案来解决冲突, 其中每个标签随机申请一个帧时隙用于数据传输^[6]。当 2 个或多个标签申请同一个

收稿日期: 2020-06-09; 修回日期: 2020-11-17

基金项目: 2017 年江苏省职业院校高水平骨干专业(计算机应用技术)建设资助项目(SJG201717131); 2019 年江苏省“青蓝工程”优秀教学团队(计算机应用技术)资助项目(GB20190342); 2019 年常州信息职业技术学院自然科学重点科研课题资助项目(CXKZ201909Z)

时隙并同时传输数据时,就会发生碰撞,从而导致在 RFID 阅读器上产生一个无法用标准检测技术(即单标签)检测的波形。

尽管 Gen2 指定了帧 Aloha 方案,但对于 RFID 阅读器上的检测方法没作具体规定,使检测和分离碰撞标签信息成为一个活跃的研究领域,已有不少关于 RFID 波形分离方面的研究。文献[7]提出采用软件定义的非 Gen2 RFID 标签监测器,并测试了差分二进制相移键控调制下的分离;文献[8]提出了当非 Gen2 标签同时传输时,在高信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)下的同相(In-phase, I)和正交(Quadrature, Q)信号的处理;文献[9]提出采用迫零技术对后向散射无线信道和接收的 I 和 Q 分量进行建模;文献[10]提出了基于零恒模信号的盲源分离的多天线检测方法;文献[11]结合多天线技术及基于标签 ID 号序列的二叉树时隙分组,提出了一种自适应树形分组的盲分离 RFID 系统防碰撞算法。

然而,大多数现有技术都没有考虑 FM0 标签编码方案(Gen2 标准中采用的 2 种编码方案之一)及其固有的记忆特性,此外,一些技术还需要多个天线。因此,本文在充分考虑 FM0 的标签编码特性下,提出了一种采用 FM0 标签编码固有的 1 比特记忆特性的碰撞标签信息检测器。

1 FM0 编码记忆特性与系统建模

在 FM0 编码中,信号电平总是在比特边缘改变。对于“0”比特,总是在比特持续时间的中间发生改变,对于“1”比特,电平保持不变,如图 1 所示。因此,单个 FM0 比特的编码需要前一比特的“记忆”,以便在比特边缘相应地改变信号电平。每个 FM0 编码比特可以表示为 $[\pm a \pm a]^T$ 形式的 2 个半比特常数的一个向量,其中符号 a 依赖于发送的比特和信号“记忆”(即先前的传输电平)。

为验证上述信号模型,采用一个测量装置进行测试。测量装置由 1 个商用 UHF Gen2 阅读器、2 个 FM0 标签和 1 个通用软件无线电外设(Universal Software Radio Peripheral, USRP)软件定义的无线电(Software-Defined Radio, SDR, 带有一个调谐在 865 MHz 的宽带子板)构成,SDR 充当一个低成本 Gen2 监测器^[12]。2 个标签和阅读器之间的对话记录在监测器中,监测器上的下变频基带信号幅度如图 2 所示。可以看出,在直流常量的顶部存在编码的信息(来自于阅读器和从标签上散射回来的载波)。

因此,在 RFID 阅读器上进行脉冲匹配滤波和采样后,在一个比特周期内碰撞信号的同相(或正交)分量可以用 2 个半比特符号的一个向量 $[x_0 x_1]^T$ 来表示,其中每个半比特符号 $(x_0, x_1) \in S = \{s_0 = -a-b, s_1 = -a+b, s_2 = a-b, s_3 = a+b\}$ 。由于 a, b 为编码比特,通常由系统决定,因此对于一个系统是固定不变的,在相干接收机中它们是已知的;而对于不同的符号,它们的编码比特是不同的,如,一个符号用 2 比特编码,0 可以编码为 00,1 可以编码为 01,2 可以编码为 10 等,可见, a 和 b 之间的差异就是高电平和低电平的差异,只要能判断出信号的电平值(用高和低来表示)就可以确保信息有效分离。显然,如果 $a=b$,则 $s_1=s_2 \in S$ 且信息丢失,即标签 A 和 B 的信息分离失败。通常, $a \neq b$,不失一般性,假设整个处理过程中 $a > b$ 。

在上述假设下,接收信号可用向量形式表示为:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \end{bmatrix} + \mathbf{n} \quad (1)$$

式中: $[x_0 x_1]^T \in S^2$ 为碰撞信息信号; $\mathbf{n} = [n_0 n_1]^T$ 为加性白高斯噪声,其中 n_0, n_1 是不相关的零均值高斯变量,其方差为 σ^2 。

图 3 为采用最小距离规则^[13]得到的测量值 $y_i (i \in \{0, 1\})$ 和发射星座 S , 图中虚线标示的为判决区域,得到的条件错误概率为:

$$\Pr(\hat{x}_i \neq x_i | x_i = s_0) = \Pr(\hat{x}_i \neq x_i | x_i = s_3) = Q(b/\sigma) \quad i = 0, 1 \quad (2)$$

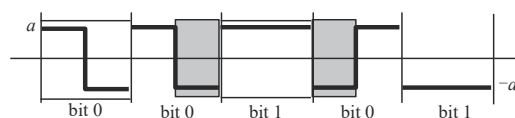


Fig.1 Baseband FM0 signal of a single tag

图 1 单标签的基带 FM0 信号

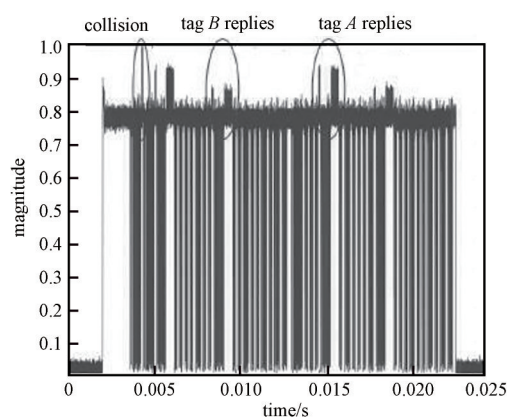


Fig.2 Conversation between reader and two tags captured at the SDR sniffer

图 2 监测器上的基带接收信号以及阅读器和 2 个标签之间的对话

$$\Pr(\hat{x}_i \neq x_i | x_i = s_1) = \Pr(\hat{x}_i \neq x_i | x_i = s_2) = Q[(a-b)/\sigma] + Q(b/\sigma) \quad i=0,1 \quad (3)$$

式中 $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$ 为 Q 函数。

上述建模即为本文所提出的碰撞标签检测方法所采用的系统模型。关于后向散射无线信道的复杂建模，可参阅文献[3,9,14]。

2 检测方法

2.1 碰撞标签信息的无记忆检测

根据图3的判决区域，对2个半比特符号进行独立检测(即不考虑记忆)，然后基于发现值，对标签A和B的信息共同作出最后判决。检测工作原理如下：

- 1) 从 y_0 中检测 $\hat{x}_0 \in S$;
- 2) 从 y_1 中检测 $\hat{x}_1 \in S$;

3) 从 $\hat{x}_0$ 和 $\hat{x}_1$ 之间的符号变化中选择 $H_i, i \in \{0,1,2,3\}$ 。如果 $\hat{x}_0$ 中 a 的符号与 $\hat{x}_1$ 中 a 的符号不同，则 $\hat{A}_{\text{tag}} = 0$ ；否则 $\hat{A}_{\text{tag}} = 1$ 。同样，如果 $\hat{x}_0$ 中 b 的符号与 $\hat{x}_1$ 中 b 的符号不同，则 $\hat{B}_{\text{tag}} = 0$ ；否则 $\hat{B}_{\text{tag}} = 1$ 。如： $\hat{x}_0 = a - b = s_2$ 和 $\hat{x}_1 = -a - b = s_0$ ，则标签A和B的比特估计值分别为 $\hat{A}_{\text{tag}} = 0$ 和 $\hat{B}_{\text{tag}} = 1$ ，这种情况对应于表1中的 H_2 。

计算上述检测方法的误差。在 H_0 和 FM0 信令条件下，只允许在 s_0 和 s_3 之间或 s_1 和 s_2 之间转换，可以计算出以下条件错误概率：

$$\begin{aligned} \Pr(\hat{H}_i, i \neq 0 | H_0) &= 1 - \Pr(\hat{H}_0 | H_0) = 1 - \frac{1}{4} \left\{ [1 - \Pr(\hat{x}_0 \neq x_0 | x_0 = s_0)] [1 - \Pr(\hat{x}_1 \neq x_1 | x_1 = s_3)] + [1 - \Pr(\hat{x}_0 \neq x_0 | x_0 = s_1)] \right. \\ &\quad \left. [1 - \Pr(\hat{x}_1 \neq x_1 | x_1 = s_2)] + [1 - \Pr(\hat{x}_0 \neq x_0 | x_0 = s_2)] [1 - \Pr(\hat{x}_1 \neq x_1 | x_1 = s_1)] + [1 - \Pr(\hat{x}_0 \neq x_0 | x_0 = s_3)] [1 - \Pr(\hat{x}_1 \neq x_1 | x_1 = s_0)] \right\} = \\ &= 1 - \frac{1}{2} \left\{ [1 - Q(b/\sigma)]^2 + [1 - Q(b/\sigma) - Q((a-b)/\sigma)]^2 \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

在 H_1 和 FM0 信令条件下，只允许在 s_0 和 s_1 之间或 s_2 和 s_3 之间转换：

$$\begin{aligned} \Pr(\hat{H}_i, i \neq 1 | H_1) &= 1 - \Pr(\hat{H}_1 | H_1) = 1 - \frac{1}{4} \left\{ [1 - \Pr(\hat{x}_0 \neq x_0 | x_0 = s_0)] [1 - \Pr(\hat{x}_1 \neq x_1 | x_1 = s_1)] + \right. \\ &\quad \left. 1 - \Pr(\hat{x}_0 \neq x_0 | x_0 = s_1)] [1 - \Pr(\hat{x}_1 \neq x_1 | x_1 = s_0)] + [1 - \Pr(\hat{x}_0 \neq x_0 | x_0 = s_2)] [1 - \Pr(\hat{x}_1 \neq x_1 | x_1 = s_3)] + \right. \\ &\quad \left. 1 - \Pr(\hat{x}_0 \neq x_0 | x_0 = s_3)] [1 - \Pr(\hat{x}_1 \neq x_1 | x_1 = s_2)] \right\} = 1 - \left\{ [1 - Q(b/\sigma)] [1 - Q(b/\sigma) - Q((a-b)/\sigma)] \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

类似地，可以得到：

$$\Pr(\hat{H}_i, i \neq 2 | H_2) = \Pr(\hat{H}_i, i \neq 1 | H_1) \quad (6)$$

$$\Pr(\hat{H}_i, i \neq 3 | H_3) = \Pr(\hat{H}_i, i \neq 0 | H_0) \quad (7)$$

因此，两个标签中至少一个的检测错误概率为：

$$\Pr[(\hat{A}_{\text{tag}}, \hat{B}_{\text{tag}}) \neq (A_{\text{tag}}, B_{\text{tag}})] = \frac{1}{4} \sum_{j=0}^3 \Pr(\hat{H}_i, i \neq j | H_j) = Q(b/\sigma)[2 - Q(b/\sigma) - Q((a-b)/\sigma)] + Q((a-b)/\sigma)[1 - \frac{1}{4} Q((a-b)/\sigma)] \quad (8)$$

如果仅考虑标签A的检测错误，即标签B的正确(或错误)检测无关紧要，根据无记忆检测方法，则错误概率可以计算出来。图3中半比特检测的判决区域变为： $y_i < 0$ 对于 $\hat{x}_i = s_0$ 或 s_1 和 $y_i > 0$ 对于 $\hat{x}_i = s_2$ 或 $s_3, i \in \{0,1\}$ ，则式(2)和(3)的条件错误概率修改为：

$$\Pr(\hat{x}_i = s_2 \text{ 或 } s_3 | x_i = s_0) = \Pr(\hat{x}_i = s_0 \text{ 或 } s_1 | x_i = s_3) = Q\left(\frac{a+b}{\sigma}\right), \quad i=0,1 \quad (9)$$

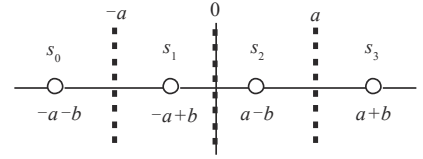


Fig.3 The two-tag, non-uniform signal constellation with decision areas based on the minimum distance rule
图3 采用最小距离规则的2-标签非均匀信号星座

表1 无记忆检测时的判决结果

Table1 Decision without memory detection				
H	H_0	H_1	H_2	H_3
A	0	1	0	1
B	0	0	1	1

$$\Pr(\hat{x}_i = s_2 \text{ 或 } s_3 | x_i = s_1) = \Pr(\hat{x}_i = s_0 \text{ 或 } s_1 | x_i = s_2) = Q\left(\frac{a-b}{\sigma}\right) \quad i=0,1 \quad (10)$$

对式(4)~(7)进行同样的推导, 则采用无记忆检测方法的标签 A 信息的检测比特错误概率即误码率(BER)为:

$$\Pr(\hat{A}_{\text{tag}} \neq A_{\text{tag}}) = \left[Q\left(\frac{a+b}{\sigma}\right) + Q\left(\frac{a-b}{\sigma}\right) \right] \left\{ 1 - \frac{1}{4} \left[Q\left(\frac{a+b}{\sigma}\right) + Q\left(\frac{a-b}{\sigma}\right) \right] \right\} \quad (11)$$

2.2 碰撞标签信息的 1 比特记忆辅助检测

上文方法只针对单个比特(2个连续的半比特)的持续时间, 没有利用 FM0 信令的固有记忆特性。利用 FM0 信令的记忆来检测两个碰撞的 FM0 信号, 恰好为 2 个比特的持续时间。如果采用类似的思想来检测单个标签, 则对于单比特(无记忆)检测, 有 4 种可能假设需要检验, 如表 1 所示。但如果观察到前半比特和后半比特, 则在比特边界只存在 2 个假设(见图 1 中带阴影的半比特)。将这个思想扩展到 2 个 FM0 标签的检测和分离中。

为方便, 用 y_0 表示在比特边界前接收到的半比特信号, y_1 表示在比特边界后接收到的半比特信号, 这样存在第一对测量值 $(y_0, y_1)^0$, 这里 y_1 对应于前一比特的第一个半比特, y_0 对应于前一比特的第二个半比特; 第二对测量值 $(y_0, y_1)^1$, 这里 y_0 对应于下一比特的第二个半比特, y_1 对应于下一比特的第一个半比特。

由于每个标签的 FM0 信号总是在比特的边界改变, 因此在任意一对测量值 $(y_0, y_1)^i (i=0,1)$ 下可能的发送符号 s_0, s_1, s_2 和 s_3 如图 4 所示, 检测方法的工作原理如下:

- 1) 从 $(y_0, y_1)^0$ 中检测 $\hat{x}_0 \in S$, 如图 4(a) 所示;
- 2) 从 $(y_0, y_1)^1$ 中检测 $\hat{x}_1 \in S$, 如图 4(b) 所示;
- 3) 按照表 2, 基于 $\hat{x}_0$ 和 $\hat{x}_1$, 选择 $H_i, i \in \{0,1,2,3\}$ 。如, $\hat{x}_0 = s_2$ 和 $\hat{x}_1 = s_0$, 则标签 B 的电平保持在 $-b$ (即比特“1”)不变, 而标签 A 的电平从 $+a$ 切换到 $-a$ (即比特“0”)。这样, 根据表 2, 决定选择 H_2 。同样, 也可以得出其他情形。

图 4(c) 为 2 个 FM0 标签的碰撞实例, 其中箭头标示为比特的边界, 矩形标示为 2 个观察到的 $\hat{x}_i$ 的半比特。

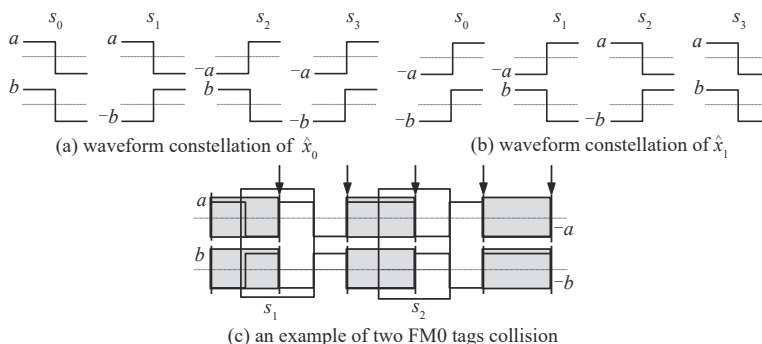


Fig.4 Transmitted symbols for the first and second pairs of measurements in memory-assisted detection

图 4 记忆辅助检测的第一对和第二对测量值的传输符号

表 2 记忆辅助检测时的判决结果

Table 2 Decision with memory auxiliary detection

H	H_3	H_1	H_2	H_0	H_1	H_3	H_0	H_2	H_2	H_0	H_3	H_1	H_0	H_2	H_1	H_3
$\hat{x}_0$	s_0	s_0	s_0	s_0	s_1	s_1	s_1	s_1	s_2	s_2	s_2	s_2	s_3	s_3	s_3	s_3
$\hat{x}_1$	s_0	s_1	s_2	s_3	s_0	s_1	s_2	s_3	s_0	s_1	s_2	s_3	s_0	s_1	s_2	s_3

对 $(y_0, y_1)^0$ 和 $(y_0, y_1)^1$ 继续执行检测算法, 4 个传输符号 s_0, s_1, s_2 和 s_3 的距离分别用 $d_{0,1,2,3}^i (i=0,1)$ 表示:

$$d_{0,1,2,3}^0 [y_0, y_1] = d_{0,1,2,3}^1 [y_0, y_1] = [y_0 - (a+b)]^2 + [y_1 - (-a-b)]^2 \quad (12)$$

$$d_{0,1,2,3}^0 [y_0, y_1] = d_{0,1,2,3}^1 [y_0, y_1] = [y_0 - (a-b)]^2 + [y_1 - (-a+b)]^2 \quad (13)$$

$$d_{0,1,2,3}^0 [y_0, y_1] = d_{0,1,2,3}^1 [y_0, y_1] = [y_0 - (-a+b)]^2 + [y_1 - (a-b)]^2 \quad (14)$$

$$d_{0,1,2,3}^0 [y_0, y_1] = d_{0,1,2,3}^1 [y_0, y_1] = [y_0 - (-a-b)]^2 + [y_1 - (a+b)]^2 \quad (15)$$

采用 $(y_0, y_1)^0$ 和距离 $d_{0,1,2,3}^0, d_{0,1,2,3}^1$ 和 $d_{0,1,2,3}^2$, 对 $\hat{x}_0$ 作出判决, 随后对 $\hat{x}_1$ (基于 $(y_0, y_1)^1$ 和 $d_{0,1,2,3}^1, d_{0,1,2,3}^2$ 和 $d_{0,1,2,3}^3$) 的判决采用类似的方法。检测 $\hat{x}_0 = s_0$ 当且仅当:

$$d_0^0 < d_1^0 \Leftrightarrow y_0 - y_1 > 2a \quad (16)$$

$$d_0^0 < d_2^0 \Leftrightarrow y_0 - y_1 > 2b \quad (17)$$

$$d_0^0 < d_3^0 \Leftrightarrow y_0 - y_1 > 0 \quad (18)$$

考虑到 $a > b$, 得到:

$$\hat{x}_0 = s_0, y_0 - y_1 > 2a \quad (19)$$

对其他 3 个假设进行同样操作, 则内存资料寄存器(Memory Data Register, MDR)判决区域为:

$$\hat{x}_0 = s_1 \quad 0 < y_0 - y_1 < 2a \quad (20)$$

$$\hat{x}_0 = s_2 \quad -2a < y_0 - y_1 < 0 \quad (21)$$

$$\hat{x}_0 = s_3 \quad y_0 - y_1 < -2a \quad (22)$$

这 4 个判决区域如图 5 所示。

按照类似的步骤, 可以得到对于 $\hat{x}_1$ (基于 $(y_0, y_1)^1$ 和 d_0^1, d_1^1, d_2^2 以及 d_3^1) 的相应判决规则, 这些规则可简化为:

$$\hat{x}_1 = \begin{cases} s_0, & y_0 - y_1 < -2a \\ s_1, & -2a < y_0 - y_1 < 0 \\ s_2, & 0 < y_0 - y_1 < 2a \\ s_3, & y_0 - y_1 > 2a \end{cases} \quad (23)$$

当从 $(y_0, y_1)^0$ 检测或从 $(y_0, y_1)^1$ 检测失败时, 标签 A 或 B 的 FM0 信号就会出现错误检测, 检测方法的条件错误概率也可以计算出来, 如 $x_0 = s_0$, 则条件错误概率为:

$$\Pr(\hat{x}_0 \neq x_0 | x_0 = s_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{y_0 - 2a}^{\infty} f(y_0, y_1 | x_0 = s_0) dy_1 dy_0 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{y_0 - 2a}^{\infty} f\left(\begin{bmatrix} a+b+n_0 \\ -a-b+n_1 \end{bmatrix}\right) dy_1 dy_0 \quad (24)$$

其他 3 个条件错误概率 $\Pr(\hat{x}_0 \neq x_0 | x_0 = s_1)$, $\Pr(\hat{x}_0 \neq x_0 | x_0 = s_2)$, $\Pr(\hat{x}_0 \neq x_0 | x_0 = s_3)$ 也可以类似地表示出来。

因为利用了 2 个比特的持续时间, 将信号能量刚好提高了 2 倍, 与前面的无记忆(1 比特)方法不同, 由此可以推断出, 1 比特记忆辅助检测方法的误码率性能比无记忆检测方法的误码性能在信噪比方面改善了 2 倍。因此, 采用 1 比特记忆辅助检测方法, 两个标签信息中至少一个被错误检测的概率为:

$$\Pr((\hat{A}_{\text{tag}}, \hat{B}_{\text{tag}}) \neq (A_{\text{tag}}, B_{\text{tag}})) = Q\left(\sqrt{2} \frac{b}{\sigma}\right) \left[2 - Q\left(\sqrt{2} \frac{b}{\sigma}\right) - Q\left(\sqrt{2} \frac{a-b}{\sigma}\right) \right] + Q\left(\sqrt{2} \frac{a-b}{\sigma}\right) \left[1 - \frac{1}{4} Q\left(\sqrt{2} \frac{a-b}{\sigma}\right) \right] \quad (25)$$

此外, 如果标签 A 信息的检测是重要的, 而标签 B 检测到的比特可以被忽略, 则可以计算出检测方法的性能。根据前文推理, 当仅对标签 A 感兴趣时, 由于其信噪比改善了 2 倍, 故记忆辅助检测方法的误码率为:

$$\Pr(\hat{A}_{\text{tag}} \neq A_{\text{tag}}) = \left[Q\left(\sqrt{2} \frac{a+b}{\sigma}\right) + Q\left(\sqrt{2} \frac{a-b}{\sigma}\right) \right] \times \left\{ 1 - \frac{1}{4} \left[Q\left(\sqrt{2} \frac{a+b}{\sigma}\right) + Q\left(\sqrt{2} \frac{a-b}{\sigma}\right) \right] \right\} \quad (26)$$

于是, 可得到检测方法的主要步骤如下:

- 1) 设置标签数目 N , 编码比特常数 a, b ;
- 2) 获取任意两个标签的碰撞信息信号向量 $\mathbf{x}$ 和噪声向量 $\mathbf{n}$;
- 3) 采用最小距离规则计算接收向量测量值 $\mathbf{y}$ 和发射星座 S ;
- 4) 计算发射星座下每个标签的 FM0 信号的条件错误概率;
- 5) 从接收信号向量中检测碰撞信号向量 $\mathbf{x}$, 获取两个碰撞标签的错误概率;
- 6) 根据无记忆检测方法和 1 比特记忆辅助检测方法的工作原理过程, 分别计算出两个标签中感兴趣的一个的 FM0 信号的误码率;
- 7) 继续执行步骤 2)~6), 直至检测完标签数目 N ;
- 8) 分离出成功检测的标签;
- 9) 终止检测方法。

应用两个碰撞标签的检测技术时, 可以计算出相比于传统的检测方法(即不考虑两个标签的碰撞信号)的延迟时间效益(即延迟减少)。如在 Gen2 中, 首先选择要接入的标签群, 其中标签采用帧 Aloha 和 16 位长的随机 ID 来争用信道。这样, 在 Gen 2 中接入 N 个标签群所需要的总的时间为:

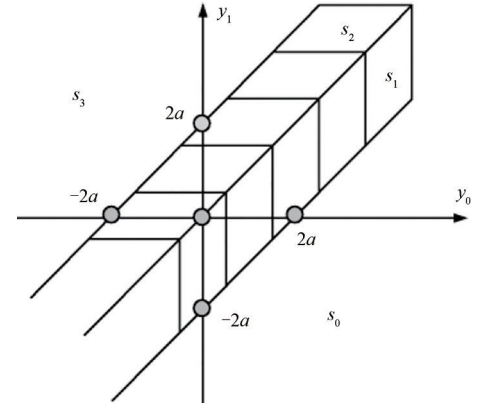


Fig.5 Decision areas for each pair of measurements in memory-assisted detection

图 5 记忆辅助检测中每对测量值的判决区域

$$T_{\text{Gen2}} = \left(\sum_{i=1}^F L(i) \right) T_s + NT_{\text{EPC}} = \left(N + \beta \sum_{i=1}^F L(i) \right) T_{\text{EPC}} \quad (27)$$

$$\beta = T_s / T_{\text{EPC}} \quad (28)$$

式中: T_s 为在标签争用期间帧 Aloha 协议的期望时隙持续时间; T_{EPC} 为接入阶段(当仅有标记标签传输时)发送 EPC 码所需要的总时间; $L(i)$ 为帧 i 的时隙数。

实际中, 根据从标签到阅读器和从阅读器到标签的选定传输速率(一般情况下是可变的, 受阅读器控制), β 可以达到 22% 或 27%。在后文的仿真部分, β 作为输入参数, 在 [0.1, 0.3] 之间取值。

如果一个 Gen2 阅读器采用本文提出的检测方法, 能够成功识别两个碰撞标签中的一个, 总的延迟时间减少

$$\text{为: } \frac{\beta \left[\sum_i L_1(i) - \sum_j L_2(j) \right]}{N + \beta \sum_i L_1(i)} \times 100\%.$$

3 仿真实验结果及分析

对本文提出的检测方法性能进行评价, 测试装置为: 1 个商用 UHF Gen2 阅读器、2 个 FM0 标签和 1 个 USRP SDR。仿真实验采用开发的自定义软件, 对本文提出的 1 比特记忆辅助检测方法与无记忆检测方法在误码率性能方面进行比较。

图 6 为当考虑标签 A 或 B 的检测错误时, 得到的误码率与信噪比之间的关系。仿真中将两个标签之间的功率比设置为 $L=6$ dB(由于两个标签之间的功率比是由两个标签基带信号之间的功率比决定, 本文将两个标签之间的功率比设置为 $L=6$ dB 实际上为最坏的情形。以最少的 2 比特编码为例, 两个标签之间的功率比为 $2^2:2^0$ 即 4:1, 即最坏情形下检测都是有效的, 则在其他场景下检测自然也是有效的, 从图 7 也可以看出)。可以看到, 测试结果与理论分析结果吻合得相当好, 而且 1 比特记忆辅助检测方法比无记忆检测方法在性能上改善了近 3 dB, 这正是利用了 FM0 的智能记忆特性。

图 7 为在固定信噪比($E_b/N_0=6$ dB 和 10 dB)时任一标签的 BER 和两个标签基带信号之间的功率比 L 之间的关系。可以看到, 随着 L 的增大, 总的误码率会达到一个稳定状态, 这是由于考虑了两个标签上的差错; 还可以看到, 在信噪比为 10 dB 和 L 接近 6 dB 时, 1 比特记忆辅助检测方法可以将误码率降至 10^{-6} 量级, 说明 1 比特记忆辅助检测方法是有效的。

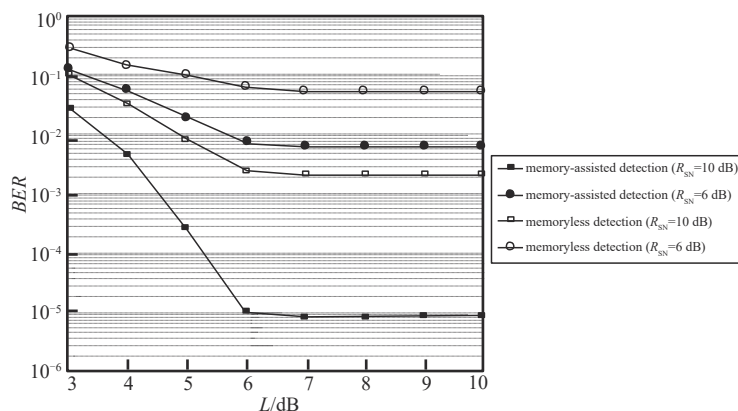


Fig.7 BER at either tag vs. L
图 7 任一标签的 BER 与 L 的关系

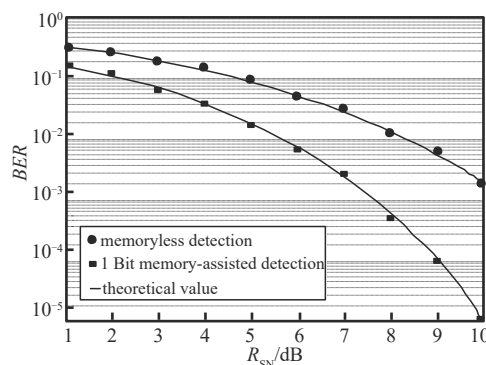


Fig.6 BER at either tag vs. SNR
图 6 任一标签的 BER 与 SNR 的关系

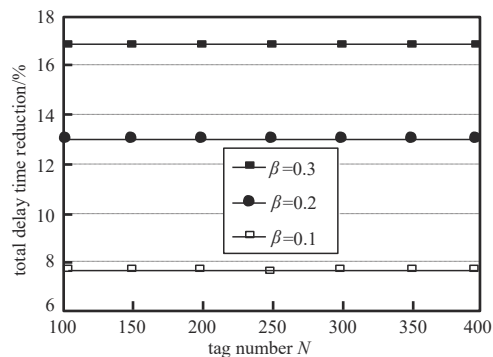


Fig.8 Resulting reduction in the total delay time in Gen2
图 8 得到的 Gen2 中总延迟时间的减少

图 8 为对于 3 个不同的 β 值计算得到的 Gen2 中总的延迟时间减少(百分比)。一方面, 可以看出, 采用本文的 1 比特记忆辅助检测方法时, Gen2 中的总延迟时间对于 $\beta=0.1$ 、0.2 和 0.3 可以分别减少约 8%、13% 和 17%, 这是由于在采用基本的帧 Aloha 控制算法时, 应用了本文提出的检测方法, 从而使得每帧的吞吐量最大化, 而不是总的帧数目最大化, 从而降低了总的延迟时间; 另一方面, 由于每帧的时隙数 $L(i)$ 与标签数目 N 有直接关系, 接入标签的总时隙数相比于标签数目 N 来说大得多, 所以计算总的延迟时间减少(百分比)时, N 可以忽略, 这样得到

的总的延迟时间减少基本与 N 无关，所以图 8 中的 3 条曲线基本为水平直线。

4 结论

本文针对碰撞 FM0 标签的信息检测和分离检测技术对基于帧 Aloha 的 RFID 系统(包括 Gen2)是十分有用的，而且不需要更改现有阅读器的射频前端，所提出的检测技术就可以工作于单天线阅读器，这对于便携式超高频 Gen2 RFID 系统是很重要的，因为在这种系统中，多天线并不总是一种选择；本文所提出的检测技术也可以应用于在天线切换模式下工作的多天线阅读器。

参考文献：

- [1] SMIDA B, KHALEDIAN S. ReflectFX: In-band full-duplex wireless communication by means of reflected power[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017,65(5):2207–2219.
- [2] 李香,刘宴兵. 基于 RFID 供应链的双轨迹克隆检测方法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2015,27(1):111–116. (LI Xiang, LIU Yanbing. Double tracks clone detection for RFID-enabled supply chains[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2015,27(1):111–116.)
- [3] 李梦龙. 射频识别传感器网络防碰撞算法研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2015. (LI Menglong. Research on anti-collision algorithm of RFID sensor networks[D]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.)
- [4] 白煜,滕建辅,张立毅,等. 基于零知识证明的多实体 RFID 认证协议[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(1):104–109, 119. (BAI Yu, TENG Jianfu, ZHANG Liyi, et al. Multiple entities RFID authentication protocol based on zero-knowledge proof[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(1):104–109,119.)
- [5] HASSOUNI S, QJIDAA H. A design of modulator and demodulator for a passive UHF RFID tag using DTMOST compatible with C1 G2 EPC standard protocol[J]. International Journal of Wireless Information Networks, 2015,22(4):407–414.
- [6] 付钰,钱志鸿,孟婕,等. 基于连续时隙预测的帧时隙 Aloha 防碰撞算法[J]. 电子学报, 2016,44(9):2081–2086. (FU Yu, QIAN Zhihong, MENG Jie, et al. FSA anti-collision algorithm based on continuous slot prediction[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(9):2081–2086.)
- [7] OLONKINS S, BOBROVS V, IVANOV G, et al. Demonstration of a dual-pump FOPA based 48 channel multicarrier optical source for WDM transmission systems[C]// Proceedings of 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium. Shanghai, China:IEEE, 2016:3768–3772.
- [8] XU C, ZHANG S, DING F, et al. Experiment verified physical-layer collision separation of passive UHF tags[C]// Proceedings of 2016 8th International Conference on Wireless Communications & Signal Processing(WCSP). Yangzhou, China:IEEE, 2016:1–5.
- [9] KAITOVIC J, RUPP M. RFID physical layer collision recovery receivers with spatial filtering[C]// Proceedings of 2015 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications(RFID-TA). Tokyo, Japan:IEEE, 2015:39–44.
- [10] BENBAGHDAD M, FERGANI B, TEDJINI S, et al. Simulation and measurement of collision signal in passive UHF RFID system and edge transition anti-collision algorithm[C]// Proceedings of 2014 IEEE RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA). Tampere, Finland:IEEE, 2014:277–282.
- [11] 穆宇超,张小红. 自适应树形分组的盲分离射频识别系统防碰撞算法[J]. 计算机应用, 2015,35(1):19–22. (MU Yuchao, ZHANG Xiaohong. Adaptive tree grouping and blind separation anti-collision algorithm for radio frequency identification system[J]. Journal of Computer Applications, 2015,35(1):19–22.)
- [12] WANG Y, MAUNDER R G, LIU D, et al. USRP and LabVIEW:a flexible Software Defined Radio-based UHF RFID reader[J]. Journal of Platform Technology, 2017,5(1):13–22.
- [13] BARAHONA M, BETANCOURT D, ELLINGER F. On the decoding of equiprobable UWB chipless RFID tags using a minimum distance detector[C]// Proceedings of 2016 International Symposium on Antennas and Propagation. Okinawa, Japan:IEEE, 2016: 1006–1007.
- [14] 李燕君,胡绍利. 后向散射通信的动态帧和充电时长调整策略[J]. 工程科学与技术, 2017,49(2):169–176. (LI Yanjun, HU Shaoli. Dynamic frame and charging time adaptation scheme for backscatter communication[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017,49(2):169–176.)

作者简介：

周凌翱(1980–), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为电子技术及应用 .email:xdasw64@163.com.

石林(1979–), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为数据分析和挖掘.