

有源 RFID 测试系统中低复杂度多读写器检测方法^{*}

张光山 李墩泰 张一民

(中国电子科技集团公司第四十一研究所 青岛 266555)

摘要:针对采用快跳频模式的有源 RFID 测试系统,提出了一种用于多读写器测试的低复杂度非相干最大似然检测算法。该算法首先基于期望元素选择方式解跳出每读写器的时频矩阵图样并采用最大行原理进行预检测,然后对预检测的数据重映射及跳频地址编码,最后采用子空间最大似然检测算法恢复出读写器信号。该算法在复杂度与性能取得了很好的折衷,具有很好的实用价值。计算机仿真验证了本文研究方法的有效性。

关键词:RFID;读写器;非相干;最大似然

中图分类号: TN42 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 510

Low complexity multireader detection for active RFID test systems

Zhang Guangshan Li Duntai Zhang Yimin

(The 41st Research Institute of CECT, Qingdao 266555, China)

Abstract: A low complexity noncoherent maximum likelihood multi-reader detection algorithm for active radio frequency identification (RFID) test system using fast frequency hopping pattern was proposed. Firstly, the time-frequency (TF) matrix pattern of every reader was calculated based on expectation element selection mode. By means of exploiting the majority row of TF matrix of the desired reader was used for pre-detection. Then these data was re-mapping and coding. Finally it used subspace maximum likelihood detection algorithm to recover the reader signal. The algorithm complexity and performance achieved a good compromise with good practical value. Computer simulation verified the validity of the proposed algorithm.

Keywords: RFID; reader; noncoherent; maximum likelihood

1 引言

RFID是采用射频方式进行无线非接触双向通信的自动无线射频识别技术^[1]。典型的 RFID 系统由读写器和标签组成^[2]。有源 RFID 系统的射频标签内部有电池供电,能够依靠自身的能量发射信号,具有发射功率低、通信距离远、传输数据量大,可靠性高和兼容性好等特点^[3]。根据国际标准 ISO18000-4 模式 2 关于有源 RFID 系统的物理层规范^[4],读写器和标签都采用 FFH/MFSK 模式。

在多读写器和密集读写器环境测试系统中,当读写器间相互通信时也存在相互干扰,可采用传统的检测算法来分离各读写器信号。为了降低检测复杂度,传统的最大似然检测采用基于硬判决模式的简化方法,在牺牲系统性

能下复杂度并没有显著降低。而本文提出基于期望元素选择来构建伴随时频矩阵,充分利用接收信号信息,并且基于最大行方式进行预判决,降低了最大似然搜索子空间。

2 有源 RFID 系统测试系统模型

根据国际标准 ISO18000-4 模式 2 关于有源 RFID 系统的物理层规范,每个读写器采用快跳频模式和 M 进制频移键控调制方式(FFH/MFSK)。设第 k 个读写器的发送符号为 X_k ,跳频地址码为 a_k ,则第 k 个读写器的发射符号表示为:

$$y_k = [y_k(0), \dots, y_k(L-1)] = X_k \cdot \mathbf{1} \oplus a_k \quad (1)$$

式中: \oplus 为模加运算。则第 k 个读写器在 t 时刻的发射信号表示为:

收稿日期:2016-02

^{*} 基金项目:电子测试技术国防科技重点实验室基金资助项目(9140C120201150C12003)

$$s_k(t) = \sum_{l=0}^{L-1} \sqrt{2P} \psi_{T_s}(t - iT_s - lT_h) \times \exp(2\pi[f_c + f_i^{(k)}]t + \varphi_i^{(k)}) \quad (2)$$

式中： P 为每个读写器的发射功率， f_c 为载波频率， $\varphi_i^{(k)} \in [0, 2\pi]$ 为均匀分布的初始相位。

设 K 个读写器同时工作， N 为读写器可使用总的跳频图样数，各读写器所对应的频点都是相互正交的。如图 1 所示为读写器的接收框图，主要分为两部分：前端处理和多读写器检测。假设每个读写器是理想同步的，则低通等效后的接收信号为：

$$R(t) = \sum_{k=1}^K \sqrt{2P} \sum_{l=0}^{L-1} h_l^{(k)} \psi_{T_s}(t - iT_s) \times \exp(2\pi f_i^{(k)} t) + N(t) \quad (3)$$

式中： $h_l^{(k)}$ 为第 k 个读写器在第 l 个时隙的频点 $f_i^{(k)}$ 对应的信道增益。如图 1 所示，前端处理模块就是非相干 MFSK 检测器，经过归一化后得到：

$$R_{ml} = |r_{ml}|^2 = \left| \sum_{k=1}^K h_m^{(k)} \delta[y_k(l), m] + n_{ml} \right|^2 \quad (4)$$

$m = 0, 1, \dots, Q-1; l = 0, 1, \dots, L-1$

式中： R_{ml} 表示读写器在第 m 个频点的第 l 个时隙对应的频域接收信号。

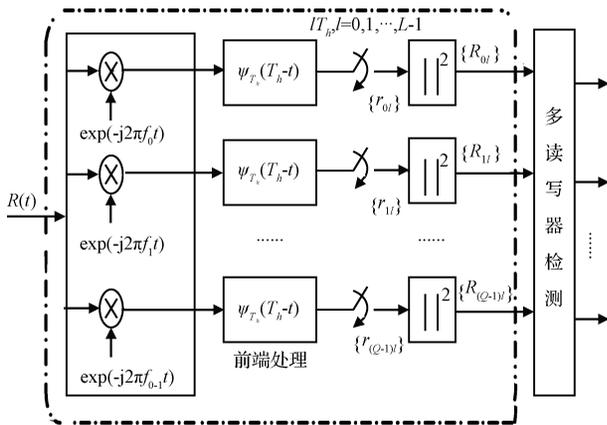


图 1 多读写器测试系统的接收示意

3 低复杂度多读写器检测方法

有源 RFID 测试系统中，传统非相干最大似然多读写器检测采用硬判决方式，没有充分利用接收信号信息，且搜索空间为读写器对应的所有可能信号空间，算法复杂度较高。而本文基于期望元素选择方式得到接收伴随时频矩阵，并采用最大行原理进行预检测。

设 K 个读写器信号用符号向量表示为 $s = [X_1, X_2, \dots, X_K]^T$ ，在给定发射信号 s 和跳频地址码下接收时频矩阵 R 的条件概率密度为 $f(R|s, \{a_k\})$ ，设时频矩阵 R 中的每个元素是相互独立的，则传统的最优非相干最大似然多读写器检测表示为：

$$\hat{s} = \arg \max_{(X_i \in X_i)_{i=1}^K} \left\{ \prod_{m=0}^{Q-1} \prod_{l=0}^{L-1} f(R_{ml} | s, \{a_k\}) \right\} \quad (5)$$

假设各读写器到接收机经过平坦瑞利多径衰落，则 R_{ml} 的实部和虚部也是服从高斯随机分布，其均值为零，方差为 $K_m \sigma_h^2 / 2 + \sigma^2 / 2$ ，则最优非相干多读写器检测表示为：

$$\hat{s} @ \arg \max_{(X_i \in X_i)_{i=1}^K} \prod_{m=0}^{Q-1} \prod_{l=0}^{L-1} \left[\ln(K_m \sigma_h^2 + \sigma^2) + \frac{R_{ml}}{K_m \sigma_h^2 + \sigma^2} \right] \quad (6)$$

式中：最优非相干最大似然多读写器检测的搜索空间为 M^K ，复杂度较高。而本文主要围绕该问题提出了低复杂度多读写器检测算法，具体算法流程描述如下：

1) 设有 K 个读写器同时传送数据，首先基于期望元素选择(EES)^[5]和接收时频矩阵 R 来构造伴随时频矩阵 R_a ：选取时频矩阵 R 每列中 $E(R)$ 个最大值对应的位置并在伴随时频矩阵 R_a 中将相对应的位置涂黑，其他位置留空。期望元素选择对应的 $E(R)$ 表示为：

$$E(R) = L \times \sum_{i=1}^{\min(Q,K)} i \binom{Q}{i} f_R(i) \quad (7)$$

2) 根据不同的跳频地址码对矩阵 R_a 进行解跳译码，得到 K 个解跳译码矩阵。

3) 对每个解跳译码矩阵采用最大行原则进行预处理。若某个译码矩阵存在某个行中黑格子的个数大于 $L - \epsilon$ ，则该行行为该译码矩阵对应的跳频地址码可能传送的数据，并进行 MSK 映射， ϵ 为预先设置的整数值。设这些跳频地址码对应的可能发送符号表示成集合为 $\{\hat{X}_i \in X_i\}_{i=1}^K$ 。

4) 根据上述步骤得到的集合 $\{\hat{X}_i \in X_i\}_{i=1}^K$ ，对这些可能的符号重新进行跳频地址编码得到时频矩阵 R_i 。设所有的时频矩阵 R_i 构成的集合为 M 即所有可能发送的符号对应的图样。

5) 根据前面得到的接收符号集合 $\{\hat{X}_i \in X_i\}_{i=1}^K$ 和时频矩阵集合 M ，则式(6)对应的次优非相干多读写器检测表示为：

$$\hat{s} = \arg \max_{(X_i \in X_i)_{i=1}^K} \left\{ \prod_{m=0}^{Q-1} \prod_{l=0}^{L-1} \frac{1}{K_m + \sigma^2} \exp\left(-\frac{R_{ml}}{K_m + \sigma^2}\right) \right\} \quad (8)$$

$(m, l) \in M$

从式(8)可知，对于其他不包含在 M 的元素，则有 $K_{ml} = 0$ 即表示没有读写器使用该跳频图样，因此去除不包含在 M 的元素对非相干多读写器检测最优解的影响很小。而且从式(8)可知，次优非相干多读写器检测的搜索子空间为 $\{\hat{X}_i \in X_i\}_{i=1}^K$ ，显然比式(6)对应的最优非相干多读写器检测对应的搜索空间要小很多，极大降低了算法的复杂度。

4 仿真分析

本节给出有源 RFID 测试系统中低复杂度次优非相干多读写器检测的仿真性能。仿真时采用十六进制频移键控^[6]，且各频点是相互正交的，采用随机跳频图样，信道模型为平坦瑞利多径信道^[7]，各信道独立同分布^[8]，信道径数为 8，预设值 $\epsilon = 1$ 。

如图 2 所示，给出了瑞利多径衰落信道下，采用次优非相干 ML 多读写器检测的快跳频(FFH/MFSK)系统的

平均误比特率性能曲线,同时给出了单读写器最优最大似然检测曲线。由图可知,本文算法的平均误比特率性能随着读写器数的增加而下降,但是下降缓慢,并且没有出现误码平台。

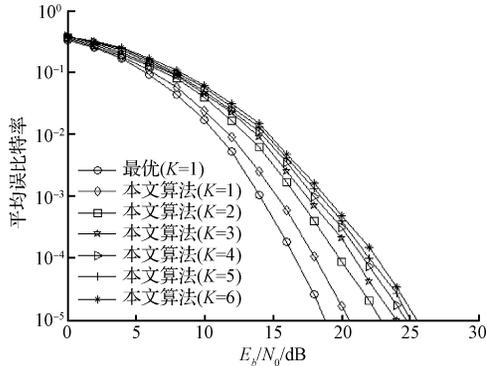


图2 瑞利信道下不同读写器数对应的性能曲线

如图3所示为本文算法在瑞利衰落信道下单用户使用不同间隙数的平均误比特率的性能曲线。可以看出,当时隙数为1时,本文算法出现误码平台,不过随着间隙数增加,平均误比特率显著降低,本文算法性能越好。

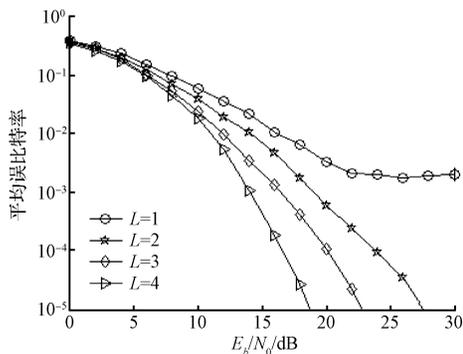


图3 不同间隙数对应的误比特率性能曲线

如图4所示,给出了采用次优非相干ML多读写器检测的快跳频系统的吞吐量。从图中可以看出,给定平均误比特率,本文算法的吞吐量随着信噪比增加而迅速提升,尤其当给定平均误比特率越低性能越好。

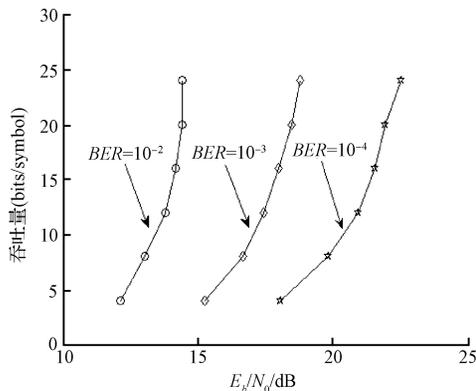


图4 不同误比特率对应的吞吐量性能曲线

计算复杂度是衡量多读写器检测器的重要指标。传统的ML检测搜索空间与用户成指数关系,而本文算法通过基于期望元素选择方式进行预处理,大大降低了次优非相干最大似然检测的搜索子空间,明显降低了非相干最大似然检测算法的复杂度。

5 结论

本文主要研究了有源RFID测试系统中低复杂度非相干最大似然检测算法。利用期望读写器信号的一致性,以及充分利用接收信号信息的期望元素选择方式,来完成检测目的。该算法通过基于最大行原理进行预检测,以及重映射和跳频地址编码,极大降低了非相干最大似然检测算法的搜索子空间。理论分析和数值仿真结果显示,本算法在性能上非常接近最优最大似然检测,同时大大降低了算法的复杂度。

参考文献

- [1] 何婷婷,邵晖,陈柯. 有源RFID-“DASH7”构建智能传感网络[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(11):1-5.
- [2] 肖春华. 基于RFID多功能烟酒防伪装置设计与实现[J]. 电子测量技术, 2014, 37(4):64-67.
- [3] 袁江,吕晶,邱自学,等. 基于传感标签的机床直线度无线监测方法及实验[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1378-1384.
- [4] 刘茂旭,何怡刚,邓芳明,等. 融合RFID的无线湿度传感器节点设计研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(8):1171-1178.
- [5] ZHANG S, YANG L L, ZHANG Y. Dynamic FFH/MFSK for multiple access in cognitive radios[C]. Proceedings of ISWCS, 2010: 1051-1055.
- [6] ZHANG S, YANG L L. Fast frequency-hopping dynamic multiple access for cognitive radios: suboptimum noncoherent ML multiuser detection[C]. Proceedings of ISWCS, 2010: 238-243.
- [7] 王霞,朱世华,孙德龙. FHMFSSK多址系统中一种多用户检测算法[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(6): 845-850.
- [8] 刘传清,胡修林,张蕴玉. 一种半盲异步快跳频多址系统多用户检测算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(2):287-290.

作者简介

张光山,1983年,工程师,主要研究方向为无线自动测试。

E-mail: zhangguangshan1010@163.com