

无源标签反向散射调制性能的分析 and 测试*

李兵[†] 何怡刚 侯周国 余开佐 磊

(湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082)

(2010年10月8日收到; 2011年2月14日收到修改稿)

分析了无源超高频射频识别系统阅读器接收机获得最大有效吸收功率的标签侧条件, 讨论阻抗失配对标签反向散射链路调制系数的影响, 导出阅读器接收机归一化有效吸收功率、解调输出信号的信噪比下边界和接收端误码率三者的反向散射调制系数表达式. 在开阔的室内环境下, 完成了不同参数条件下的反向散射调制系数测试. 测试研究表明, 反向散射调制系数位于区间[5%, 10%]时, 标签可以被正确识别.

关键词: 射频识别, 无源标签, 反向散射调制, 调制系数

PACS: 42.25.Fx, 52.70.Gw

1. 引言

无源超高频(UHF)射频识别(radio frequency identification, 简称为RFID)技术具有识别准确率高、识别距离远等特点, 被广泛应用于物流、生产、交通等领域, 但应用中环境噪声、工作频率、设备技术指标、系统参数设置等因素对RFID系统性能有很大影响^[1]. 文献[2—4]利用NI公司研发和生产的软硬件, 基于软件无线电技术完成了部分参数对标签识别距离影响的测试, 并得出使标签天线获取功率及识别距离最大的编码参数组合. 这些针对RFID系统的研究, 主要考虑前向链路中各种因素对标签吸收功率的影响, 并未考虑标签反向散射调制信号质量对RFID系统识别性能的影响. 文献[5]从标签绝对反向散射功率取得最大的方面考虑, 提出了一种等失配值的幅移键控(ASK)调制方法, 文献[6, 7]给出了该方法的误码率(bit error rate, 简称为BER)理论分析, 但均无考虑标签有效反向散射功率. 文献[8]从功率传输和通信质量两方面讨论了标签的反向散射架构形式, 分析了工作周期和信号每比特能量对BER的影响, 着重比较ASK和相移键控(PSK)两种调制方式的性能差异.

目前标签反向散射调制性能主要的分析方法

是反射系数法, 利用标签天线和芯片阻抗求出标签反射系数, 通过双线性变换转换至Smith图进行调制性能分析, 标签反向散射信号质量则通过阅读器接收端BER来评价^[6—8]. 但是标签反射系数的测量需要网络分析仪、探针和平衡-非平衡转换器等器件, 为了减少噪声影响及测量误差, 需测试多种负载情况下的反射系数, 利用其最小平均方差进行曲线拟合, BER的测量需要专用误码测试仪, 这种方法的测试成本高且效率低. 采用反向链路调制系数表征反向链路调制性能, 可同时估计信号调制损耗和接收端BER水平, 综合考虑芯片吸收功率及反向链路通信质量两方面要求, 且测量不需网络分析仪和误码测试仪, 简化了测试.

2. 无源RFID系统通信链路

典型反向散射调制无源RFID系统如图1所示, 系统通信链路分为阅读器到标签的前向链路和标签到阅读器的反向链路. 前向链路中, 标签天线接收阅读器发射携带询问数据的连续载波信号, 连续载波信号经整流器转换成直流信号为芯片电路供电, 询问数据经解调模块检测传送至应用模块; 反向链路中, 标签信号通过调制器以反向散射形式返回阅读器^[8].

* 国家杰出青年科学基金(批准号: 50925727)、国家高技术研究发展计划(批准号: 2006AA04A104)和国家自然科学基金(批准号: 60876022)资助的课题.

[†] E-mail: libinghnu@163.com

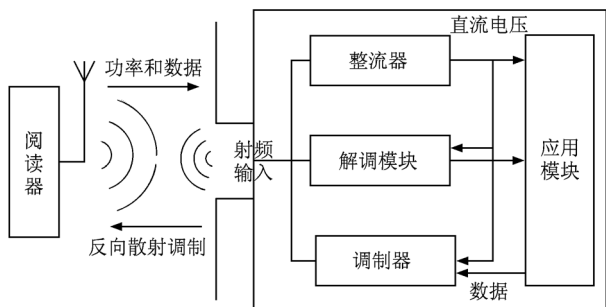


图1 典型的反向散射调制无源 RFID 系统

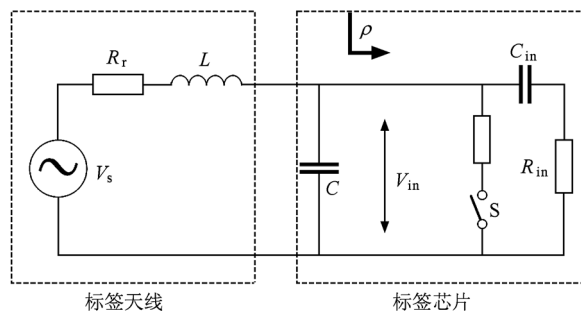


图2 标签芯片等效 ASK 调制电路

自由空间里,假阅读器天线获得功率被全部吸收,根据 Friis 天线传播方程,标签反向散射功率 P_{bs} 、阅读器接收机吸收功率 $P_{reader-in}$ 和接收信号幅度 V_r 分别表示为^[1,5,6,8]

$$P_{bs} = \frac{P_{EIR}}{4\pi d^2} A_e |\rho|^2, \quad (1)$$

$$P_{reader-in} = \frac{P_{bs} G_t G_r \lambda^2}{4\pi d^2 4\pi}, \quad (2)$$

$$V_r = \sqrt{2P_{reader-in} \text{Re}(Z_r)}, \quad (3)$$

其中 P_{EIR} 是各向同性辐射功率, d 是标签到阅读器的距离, A_e 是标签的有效孔径, ρ 是标签的反射系数, G_t 和 G_r 分别是标签和阅读器天线增益, λ 是波长, Z_r 是阅读器接收机阻抗,通常 $\text{Re}(Z_r) = 50 \Omega$. 令阅读器可获取最大功率

$$P_a = \frac{P_{EIR} G_t G_r A_e \lambda^2}{4\pi (4\pi d^2)^2},$$

可见 P_a 与 ρ 无关, (2) 式化为

$$P_{reader-in} = P_a \rho^2. \quad (4)$$

3. 反向散射调制性能分析

反向链路中,无源 UHF RFID 系统通过标签芯片阻抗变化改变标签反射系数,由此改变反向散射调制信号的幅度、相位及功率. 反向散射调制方式主要有 ASK 和 PSK 两种,出于标签成本、体积和通信传输信息量等因素考虑,通常选择 ASK 方式. 标签芯片等效 ASK 调制电路如图 2 所示^[8].

反射系数定义为^[5]

$$\rho = \frac{Z_c - Z_a^*}{Z_c + Z_a^*}, \quad (5)$$

其中 Z_c 是芯片输入阻抗, Z_a^* 是标签天线共轭阻抗. 标签天线通常为感抗,等效为电阻与电感串联,芯片电路中开关 S 的开闭不影响调制电容 C, C 可并

入天线阻抗,标签芯片作为天线负载时,芯片等效阻抗为整流器输入阻抗 R_{in} ,有^[8]

$$R_{in} = \frac{V_{in}}{8N I_{out}}, \quad (6)$$

其中 V_{in} 是整流器输入电压幅度, N 是整流器阶数, I_{out} 是整流器输出电流. 忽略整流器输入电容 C_{in} 的影响,而天线辐射电阻 R_r 值与芯片阻抗无关,设 C_{in} 和 R_r 为常数,令天线与芯片阻抗失配系数 $a = \frac{R_{in}}{R_r}$,

芯片品质因子 $Q = \frac{1}{\omega C_{in} R_r}$, 则(5) 式变为^[8]

$$\rho = 1 - \frac{2j}{Q(1 - 1/a) + j(a + 1)}. \quad (7)$$

由(6)式可知,如果标签芯片吸收功率增大, V_{in} 增大,由于 I_{out} 和 N 恒定,则 R_{in} 增大,使得 a 增大.

标签反向散射功率有两种表示形式. 一种是代表标签真实辐射功率的绝对反射功率,包括载波及边带信号;另一种是有效反射功率,只计算边带信号功率. 同样,阅读器吸收功率也有两种表现形式,假定标签返回信号“0”和“1”数据位的传输概率均为 0.5,根据(4)式,则阅读器接收机平均吸收功率

$\bar{P}_{reader-in}$ 和有效吸收功率 $\tilde{P}_{reader-in}$ 分别为

$$\bar{P}_{reader-in} = \frac{P_a}{2} (|\rho_1^2| + |\rho_0^2|), \quad (8)$$

$$\tilde{P}_{reader-in} = \frac{P_a}{4} |\rho_1^2 - \rho_0^2|, \quad (9)$$

其中 ρ_1 和 ρ_0 分别是反向散射信号在“1”和“0”态时的反射系数.

$\bar{P}_{reader-in}$ 和 $\tilde{P}_{reader-in}$ 对 P_a 做归一化处理,有

$$P_n = \frac{\bar{P}_{reader-in}}{P_a} = \frac{1}{2} (|\rho_1^2| + |\rho_0^2|), \quad (10)$$

$$P_{n,c} = \frac{\tilde{P}_{reader-in}}{P_a} = \frac{1}{4} |\rho_1 - \rho_0|^2. \quad (11)$$

由(7), (10), (11)式可以看出, $P_n, P_{n,e}$ 是 a_1 和 a_0 (a_0 和 a_1 为反射信号在“0”和“1”态时的阻抗失配系数) 的函数, (10) 式对 a_1 和 a_0 求偏导, 便得到 $P_{n,e}$ 最大标签侧的条件为

$$\frac{\partial(\tilde{P}_{\text{reader-in}}/P_a)}{\partial(a_1)} + \frac{\partial(\tilde{P}_{\text{reader-in}}/P_a)}{\partial(a_0)} = 0. \quad (12)$$

根据(7), (10)–(12)式可以给出 P_n 和 $P_{n,e}$ 在 a_1 - a_0 平面的等值线及 $P_{n,e}$ 取得最大值的条件, 结果如图3所示.

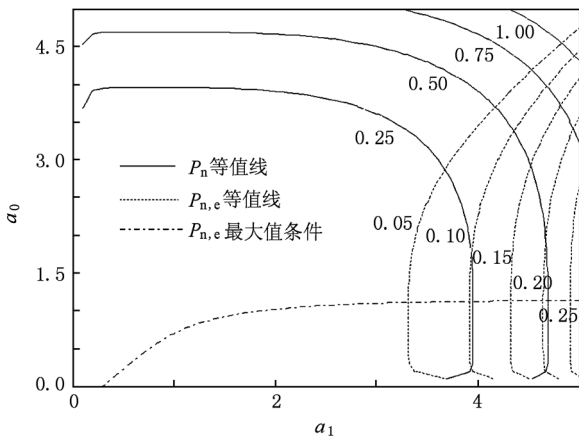


图3 $P_n, P_{n,e}$ 等值线及 $P_{n,e}$ 取得最大值的条件

从图3可以看出, 当 $a_1 = 0, a_0 = 1$ 时, P_n 和 $P_{n,e}$ 的最大值分别为1和0.25. 当 $a_0 = 1$ 时, $P_{n,e}$ 取得最大值, a_1 对其影响不大. 为了获得较大的 P_n 和 $P_{n,e}$, 芯片阻抗应选择短路和匹配状态. 实际电路中, 短路状态易实现且效果理想, 可以取 $\rho_1 = 1$, 而标签芯片无阻抗匹配网络, 存在阻抗失配现象, 天线获得功率无法被芯片全部吸收, 即 $\rho_0 \neq 0$.

定义反向链路调制系数

$$m = (V_{R1} - V_{R0})/V_{R1},$$

其中 V_{R1} 和 V_{R0} 分别为“1”和“0”态时的阅读器接收信号幅度. 根据(3), (7) 式, m 可表示为

$$m = 1 - \rho_0, \quad (13)$$

则(10), (11)式变为

$$\frac{\tilde{P}_{\text{reader-in}}}{P_a} = \frac{1 + (1 - m)^2}{2}, \quad (14)$$

$$\frac{\tilde{P}_{\text{reader-in}}}{P_a} = \frac{1}{4}m^2. \quad (15)$$

令失配值 $\Delta a = a_0 - 1$, 将(7) 式代入(13) 式得

$$m = \frac{2}{\sqrt{Q\Delta a^2 / (\Delta a + 1)^2 + (\Delta a + 2)^2}}. \quad (16)$$

结合(13), (16)式得出 Δa_0 变化时不同 Q 值下的调制系数 m 如图4所示. 由图4可见, 当 $\Delta a_0 = 0$ (芯片与天线阻抗匹配) 时, $m = 1$; Δa_0 越大, m 越小, Q 值越大, 调制系数 m 的变化也越大, $\Delta a_0 > 1$ 时, m 趋于稳定.

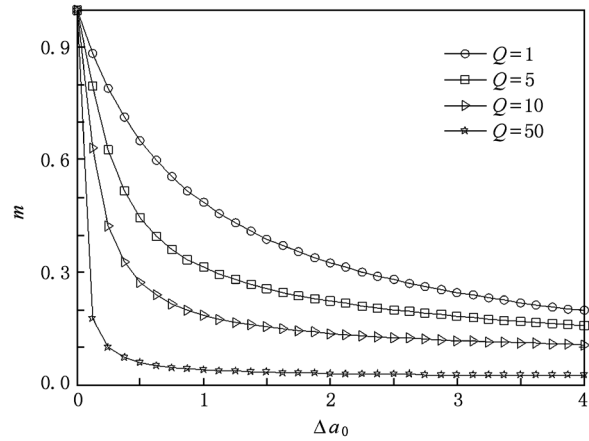


图4 不同 Q 值下调制系数 m 随 Δa_0 的变化

标签被识别需要满足以下两个条件: 阅读器平均吸收功率满足阅读器灵敏度要求, 标签芯片获得能量满足芯片工作需要; 标签反向散射信号被阅读器正确解调和解码, 即阅读器解调输出信号满足规定的信噪比(SNR)和BER要求.

阅读器解调输出信号的SNR表示为^[9]

$$R_{\text{SN}, \text{min}} = \frac{\rho \xi G_t^2 G_r^2}{2\psi} \left(\frac{\lambda}{2\pi d}\right)^4 \frac{\int_{f_l}^{f_h} S\{s(t)\} df}{\int_{f_l}^{f_h} S\{\theta_p(t)\} df}, \quad (17)$$

其中 ξ 是接收机收发隔离系数, ψ 是相位噪声改善因子, f_h, f_l 分别是接收机基带带通滤波器高、低截止频率, $S\{\cdot\}$ 是功率密度谱算子, $s(t)$ 是标签反射信号“1”, “0”的数据序列, $\theta_p(t)$ 是反映本振相位噪声的随机过程. 当 $R_{\text{SN}, \text{min}} \geq R_{\text{SN}, \text{th}}$ 时 ($R_{\text{SN}, \text{th}}$ 为阅读器接收机信噪比阈值), 标签反向散射信号可以被正确解码. 标签天线增益、反向散射编码方式和频率一定时, 不考虑阅读器性能的影响, (17) 式化为

$$R_{\text{SN}, \text{min}} = \frac{C(1 - m)}{d^4}, \quad (18)$$

其中

$$C = \frac{\xi G_t^2 G_r^2}{2\psi} \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^4 \frac{\int_{f_l}^{f_h} S\{s(t)\} df}{\int_{f_l}^{f_h} S\{\theta_p(t)\} df}.$$

由(18)式可知, m 增大时, $R_{\text{SN}, \text{min}}$ 减小, 阅读器最大识别距离减小.

标签识别成功与否可以通过阅读器接收端 BER 来判定. BER 可表示为^[6,7]

$$R_{BE} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{|\Delta V|}{4\sqrt{2}\sigma_{bias}} \right), \quad (19)$$

其中 $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 是补余误差函数, $\Delta V = V_{R1} - V_{R0}$, σ_{bias} 是高斯白噪声标准偏差. 将 (3), (13) 式代入 (19) 式得到

$$R_{BE} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{mV_{R1}}{4\sqrt{2}\sigma_{bias}} \right). \quad (20)$$

从 (14), (15), (18), (20) 式可以看出, 调制系数 m 直接影响 $\bar{P}_{reader-in}$, $\tilde{P}_{reader-in}$, $R_{SN,min}$ 和 R_{BE} . m 越大, 则 $\bar{P}_{reader-in}$, $R_{SN,min}$ 和 R_{BE} 越小, $\tilde{P}_{reader-in}$ 越大, 于是阅读器最大识别距离越小, 标签识别率越高.

当阅读器接收机内部电路噪声水平一定时, 若标签返回信号太弱, 则接收机检测不出有效信号; 若返回信号太强, 则接收信号饱和, 导致功率饱和失真. 因此标签返回信号应位于接收机动态范围内. 接收机动态范围 D 定义为

$$D = P_{max} - P_{min}, \quad (21)$$

其中最小功率 P_{min} 为接收机灵敏度, 最大功率 P_{max} 根据具体要求确定.

在开阔的室内环境下, $\sigma_{bias} = 5 \times 10^{-4}$, R_{BE} 取 10^{-3} 数量级^[7]. 目前商用标签的 P_{bs} 一般小于 -20 dBm, 考虑一定的裕度, $P_{max} = -10$ dBm, 根据 (3) 式可以推出接收机最大接收信号幅度 $V_{R,max} = 100$ mV, 代入 (20) 式可得 $m < 4\%$ 时 R_{BE} 为 10^{-2} 数量级, 因此标签无法被识别. 为满足标签芯片功耗要求, 标签设计时通常取标签反射信号能量为天线吸收能量的 50%^[5]. 照此要求, 根据调制系数 m

的定义及 (3) 式, 有 $m = \frac{(\sqrt{P_{read-in,1}} - \sqrt{P_{read-in,0}})}{\sqrt{P_{read-in,1}}} =$

$1 - \sqrt{\frac{1}{2}} \approx 30\%$. 当 $m > 30\%$ 时, 则标签调制能量损耗过大, 标签芯片绝对吸收功率减少, 导致标签芯片无法正常工作.

4. 实验结果及分析

实验采用美国 NI 公司生产的 NI-5640R IF RIO FPGA 模块、射频上下变频模块、PXI 机箱等模块化硬件, 结合 LabVIEW 软件、信号处理工具包及研发的 RFID 测试软件构建了 RFID 测试系统. 利用 5640R FPGA 处理器可重置定时、触发及板载决策

等功能, 实现 I/O 可重置, 通过其内置数字上下变频模块同射频上下变频模块组合, 完成信号的产生和分析功能, 由于信号的产生、通信以及返回信号的分析都在 FPGA 模块上进行, 可以实现标签与阅读器间的实时“握手”, 实现实时监测和分析, 提高了测试系统的实时处理能力、测试通用性和可扩展性^[2,3,10].

为了刻画 RFID 系统在实际应用场景中的性能, 实验在开阔的室内环境下进行. 按照 ISO18046-3 标准规定, 实验采用谐振频率为 915 MHz 的半波振子天线, 增益为 2.15 dB, 驻波比小于 1.5, 收发天线灵敏度为 -50 dBm, 收发天线相对标签呈对称布置, 天线极化匹配且接收与辐射方向一致. 测试平台发送轮询周期的询问指令, 标签应答返回一个 16 位随机数 (RN16), 接收机获取标签标识码 (TID) 为成功识别; 标签返回 RN16 但是阅读器无法获取 TID 为无法解码; 标签没有返回 RN16 则为标签未激活或标签返回信号低于测试平台的接收天线灵敏度.

4.1. 发射功率对调制系数影响的测试

固定 $d = 50$ cm, 工作频率 $f = 915$ MHz, 改变测试设备的发射功率 P_t 和标签贴附材料, 反向散射链路的调制系数 m 的变化如图 5 所示.

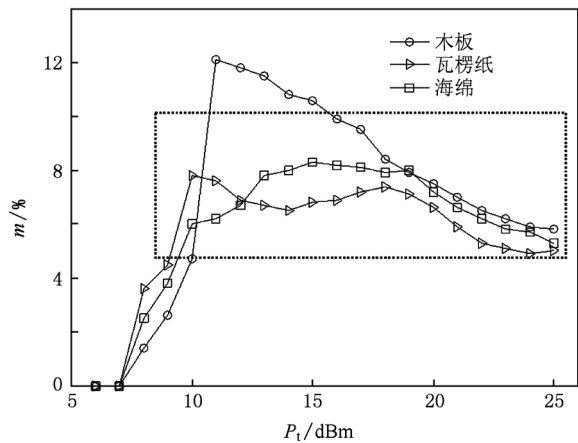


图 5 不同贴附材料的调制系数 m 随 P_t 的变化 $d = 50$ cm, $f = 915$ MHz

图 5 所示为 P_t 以 1 dBm 的步长从 6 dBm 增加至 26 dBm 时不同贴附材料的调制系数 m 的变化, 图中矩形虚线框内的标记点表示该位置标签可以被识别. P_t 为 6 和 7 dBm 时, 标签未被激活而没有应答. P_t 为 8—9 dBm 时, $\tilde{P}_{reader-in}$ 为 -40 — -43 dBm, ΔV

为 20—30 mV, $m < 5\%$, R_{BE} 为 10^{-2} 数量级, 此时标签反射信号强度远弱于噪声信号强度, 标签无法识别. 同时标签反射信号强度随着 P_i 增加而增强, 噪声信号对反射信号影响程度逐渐降低, m 逐渐增大. P_i 大于 20 dBm 时, m 趋于稳定. 发射功率为 12—25 dBm 时, 根据 (20) 式有接收端 R_{BE} 随着 P_i 的增加反而增大, 此时 V_{RI} 随着 P_i 的增加而增大, 但 m 减小, 综合作用下 ΔV 减小, R_{BE} 增大.

不同的标签贴附材料使得标签天线与贴附材料间分布电容和电感不同, 引起标签天线阻抗变化, 因此相同参数条件下阻抗失配系数不同, 造成调制系数 m 的差异. 木板的介电常数较瓦楞纸和海绵要大, 而介电常数越大则回波损耗越大, 因此在调制系数 m 值相同的情况下, 标签贴附于木板时的发射功率 P_i 较贴附于瓦楞纸和海绵时的 P_i 要大.

4.2. 距离对调制系数和标签调制损耗影响的测试

固定 $P_i = 20$ dBm, $f = 915$ MHz, 改变距离 d , 调制系数 m 和调制损耗 M_1 的变化如图 6 所示, 矩形虚线框内的标记点表示该位置标签可以被识别. 当 $d < 15$ cm 时, V_{RI} 为 60—80 mV, $m < 5\%$, R_{BE} 为 10^{-1} 数量级. 此时发射天线辐射场强较强, V_{RI} 较大, Δa 较大, 使得 m 和 ΔV 较小, 标签无法被识别. 当 $d > 60$ cm 时, $\tilde{P}_{reader-in}$ 为 -47 — -49 dBm, $m < 5\%$. 此时 d 过大, 标签的 M_1 和反射信号路径损耗较大, 使得接收信号强度过小, 噪声影响程度增强, 阅读器无法检测出有效的标签反向调制信号.

4.3. 工作频率对调制系数影响的测试

固定 $P_i = 20$ dBm, $d = 50$ cm, 工作频率 f 以

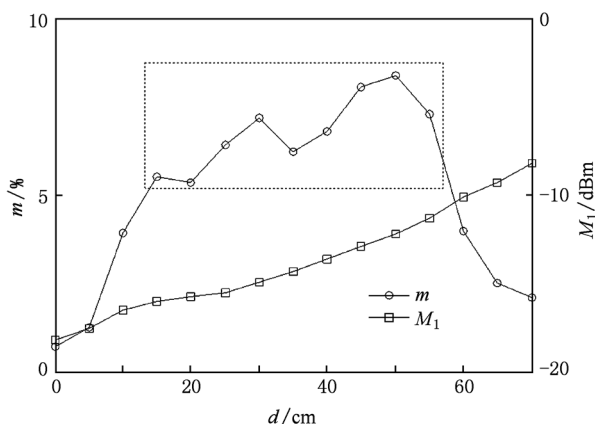


图 6 调制系数 m 和调制损耗 M_1 随距离 d 的变化 $P_i = 20$ dBm, $f = 915$ MHz

10 MHz 步长改变时调制系数 m 的变化如图 7 所示, 矩形虚线框内的标记点表示该位置标签可以被识别. 当 f 位于 890—930 MHz 频段时, m 位于 $[5\%, 10\%]$ 区间内, $\tilde{P}_{reader-in}$ 为 -39 — -44 dBm. 由于标签天线谐振频率为 915 MHz, 此频段范围内标签有效吸收功率相对较大. 频率小于 890 MHz 或大于 930 MHz 时, m 位于 $[5\%, 10\%]$ 区间外, 标签有效吸收功率较小, 标签芯片无法正常工作.

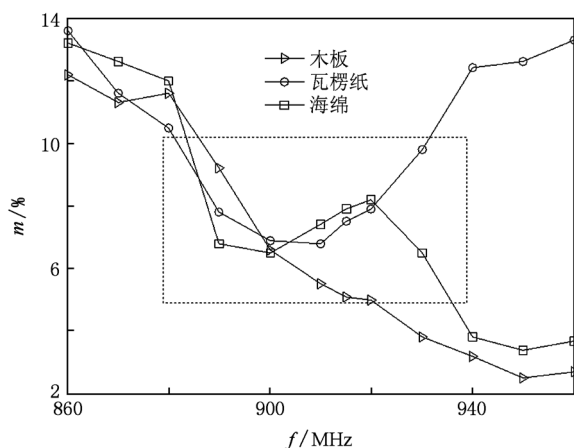


图 7 调制系数 m 随频率 f 的变化 $P_i = 20$ dBm, $d = 50$ cm

5. 结 论

标签反向散射链路调制性能影响无源超高频 RFID 系统的识别性能. 本文提出了基于反向链路 m 的标签调制性能分析方法, 采用研发的 RFID 测试系统对调制系数 m 进行了测试. 当调制系数 m 位于 $[5\%, 10\%]$ 区间时, 标签可以被正确识别; 当 $m > 10\%$ 时, 芯片由于吸收功率过低而无法正常工作, 标签反向调制信号不能被正确解调和解码; 当 $m < 5\%$ 时, $\tilde{P}_{reader-in}$ 过低, 接收端 R_{BE} 过高, 标签无法被识别. 本文研究结果适用于标签决定型 RFID 系统, 阅读器决定型 RFID 系统的性能主要受阅读器接收功率的影响, 标签可被识别的反射系数区间有所区别. 为了减少发射天线泄漏信号的影响, 应采用收发分离天线. 本研究有助于加深对 RFID 系统信道影响因素的理解, 为 RFID 系统的设计、测试和布置提供了参考依据.

本文分析中忽略了芯片电路中 C_{in} 的影响, 然而标签 ASK 调制电路中的电容会影响反向调制信号的相位及功率, 进而影响调制系数 m . 此外, 不同应用环境的噪声干扰不一致, 也会影响标签可被识

别的调制系数区间. 下一步工作将研究芯片电路中电容及环境噪声对反向散射调制性能的影响, 建立

实际应用环境中 RFID 系统反向链路传播模型及性能评估模型.

- [1] Preradovic S, Karakar N C, Balbin I 2008 *IEEE Microwave Theory Mag.* **9** 90
- [2] Nikitin P V, Rao K V S 2006 *Proc. IEEE Trans. Antennas Propag.* **48** 212
- [3] Hou Z G, He Y G, Li B, She K, Zhu Y Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5606 (in Chinese) [侯周国、何怡刚、李兵、余开、朱彦卿 2010 物理学报 **59** 5606]
- [4] Tang Z J, He Y G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5126 (in Chinese) [唐志军、何怡刚 2009 物理学报 **58** 5126]
- [5] Karthaus U, Fischer M 2003 *IEEE J. Solid-State Circuits* **38** 1602
- [6] Vita G D, Iannaccone G 2005 *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.* **53** 2978
- [7] Fuschini F, Piersanti C 2008 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **7** 33
- [8] Curtly J P, Declercq M, Dehollain C, Joehl N 2009 *Design and Optimization of Passive UHF RFID Systems* (New York: Springer) p10
- [9] Fan Z G 2007 *Ph. D. Dissertation* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [范志广 2007 博士学位论文 (杭州: 浙江大学)]
- [10] Zu Y X, Zhou J, Zeng C C 2010 *Chin. Phys. B* **19** 9501

Analysis and measurement for passive tag modulation performance of backscatter link^{*}

Li Bing[†] He Yi-Gang Hou Zhou-Guo She Kai Zuo Lei

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

(Received 8 October 2010; revised manuscript received 14 February 2011)

Abstract

Optimal conditions for maximizing the effectively received power of reader receiver in passive ultra high frequency radio-frequency identification system are analyzed in this paper. The mismatched impedance affecting modulation index of tag backscatter link is discussed. Expressions of backscattered modulation indexes for calculating normalized effective received power of reader receiver, lower boundary of signal-to-noise ratio for demodulated output signal, and bit error rate are derived. Modulation indexes of backscatter link under different parameters are measured in open indoor environment. The measurement results show that the tag can be detected successfully when the modulation index of backscatter link is in a range from 5% to 10%.

Keywords: radio frequency identification, passive tag, backscatter modulation, modulation index

PACS: 42.25.Fx, 52.70.Gw

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (Grant No. 50925727), National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA04A104) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60876022).

[†] E-mail: libinghnu@163.com