

无源射频识别系统中的雷达截面分析与计算*

唐志军 何怡刚

(湖南大学电气与信息工程学院,长沙 410082)

(2007 年 11 月 2 日收到,2008 年 11 月 12 日收到修改稿)

基于无源射频识别技术原理和天线散射理论,导出了不同负载情况下的雷达截面计算方法,并结合雷达截面和电磁传播环境分析了无源射频识别系统的识别距离.通过测量标签天线不同负载情况下的反向散射功率,再结合该计算方法,从而得出雷达截面.理论分析与实验测量结果保持一致.研究结果对优化无源射频识别系统的标签性能有益.

关键词:射频识别,天线,雷达截面,识别距离

PACC:9580D,4110H,5270G

1. 引言

众所周知,射频识别(RFID)技术被认为是 21 世纪最有发展前途的信息技术之一,它已经引起全球范围的关注.通常,RFID 系统可以分为有源和无源两类,由于成本的关系,无源 RFID 系统更广泛地应用于现实生活当中.无源 RFID 标签的雷达截面(RCS)是一个重要参数,它直接决定了调制反向散射标签信号功率的大小.所以,为了正确评价无源 RFID 系统的性能和行为,标签天线散射能力的分析、测量及其优化就显得至关重要.

到目前为止,已有许多文献对无源 RFID 系统及其通信进行了研究^[1].这些研究对标签的性能进行了深入分析.此外,还有大量文献对无源 RFID 标签的天线进行了研究.而对无源标签的散射性能和雷达截面方面研究的文献不多^[2-7].同时,有若干文献对线性和非线性负载天线的 RCS 进行了研究,但这些研究没有明确涉及到 RFID.文献[7]利用矩量法(MoM)对微带贴片天线的 RCS 的计算及其天线终端负载的影响进行了研究,其 RCS 计算方法比较复杂.文献[2]和[6]都对具有不同负载的 RFID 标签天线的 RCS 进行了理论分析和测量,但文献[2]没有为不同负载模式下的 RFID 标签天线提供具体的 RCS 计算方法,文献[6]没有为其研究提供仿真结

果.文献[8]对运行于超宽带(UWB)不同负载情况下的贴片天线的 RCS 进行了仿真和测量,但其研究没有明确涉及到 RFID 系统.针对以上研究现状,本文主要基于无源 RFID 技术原理和天线散射理论来研究不同负载模式下的标签 RCS,并以此为基础分析了无源 RFID 系统的有效识别范围.

2. 天线散射理论

无源 RFID 技术原理及其系统在许多文献中已进行了阐述^[1-12],本文不再赘述.需要强调的是在 RFID 系统中,天线和芯片的阻抗匹配是非常重要的,它直接影响到 RFID 系统的性能,如 RCS,系统的最大识别距离等.考虑到设备制作的复杂度及成本因素,RFID 标签芯片通常与天线直接相连,而在两者之间增加一个阻抗匹配网络,如图 1 所示.图 1 为无源 RFID 标签的等价电路,其中, $Z_A = R_A + jX_A = R_r + R_1 + jX_A$, $Z_L = R_L + jX_L$, R_A 为天线电阻, X_A 为天线电抗, R_r 为天线辐射电阻, R_1 为天线损耗电阻, R_L 为负载电阻, X_L 为负载电抗.从图 1 中可得

$$I = \frac{V}{Z_A + Z_L} = \frac{V}{\sqrt{(R_r + R_1 + R_L)^2 + (X_A + X_L)^2}} \quad (1)$$

根据文献[11],从天线到它的负载阻抗的功率传递

* 国家高技术研究发展计划(863)批准号:2006AA04A104,国家自然科学基金(批准号:50677014,60876022)资助的课题.

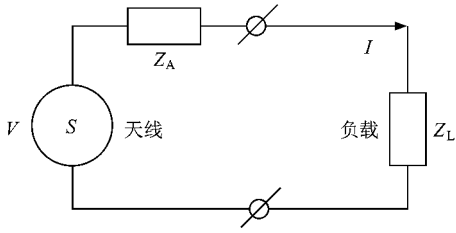


图1 RFID 标签的等价电路

可表示为 $P_{A \rightarrow L} = I^2 R_L$, 将 I 代入可得

$$P_{A \rightarrow L} = \frac{V^2 R_L}{(R_r + R_l + R_L)^2 + (X_A + X_L)^2} \quad (2)$$

文献 [11] 定义了一种理想情况, 即天线传递到负载阻抗的功率等于天线从入射场吸收的总功率, 并且天线从电磁波中吸收的功率可以定义为 $P_a = S A_e$, 其中 S 为天线处电磁场密度, A_e 为天线的有效面积. 结合 (2) 式并通过变换可得

$$A_e = \frac{V^2 R_L}{S[(R_r + R_l + R_L)^2 + (X_A + X_L)^2]} \quad (3)$$

当天线与负载阻抗相匹配时, $X_L = -X_A$, $R_L = R_r + R_l$, 则有

$$A_e = \frac{V^2}{4S(R_r + R_l)} \quad (4)$$

若天线为无损耗天线, 即 $R_l = 0$, 则可得天线的有效面积

$$A_e = \frac{V^2}{4SR_r} \quad (5)$$

考虑到天线的互易性, 即天线散射的功率和它所吸收的功率是相同的(功率匹配时). 根据天线的等价电路, 从负载传递到天线的功率可以表示为 $P_{L \rightarrow A} = I^2 R_r$. 进一步可得

$$P_{L \rightarrow A} = \frac{V^2 R_r}{(R_r + R_l + R_L)^2 + (X_A + X_L)^2} \quad (6)$$

相似地, 当天线与负载阻抗相匹配并且天线无损耗时, 可得天线的有效面积 A_e . 接下来分析两种特殊负载情况时的天线有效面积.

1) 负载电阻 $R_L = 0$, 并且负载感抗 $X_L = -X_A$, 文献 [11] [12] 将这种情况称为天线短路, 此时 A_e 取得最大值, 即

$$A_{e-\max} = \frac{V^2}{SR_r} \quad (7)$$

2) 天线开路时, 有 $Z_L \rightarrow \infty$, $I \rightarrow 0$, 显然天线的最小有效面积 $A_{e-\min} \rightarrow 0$. 由此可得天线完全匹配时的有效面积仅为天线最大有效面积的 1/4, 此外, 当天

线开路时, 其有效面积理论上趋向于 0. 在不同负载阻抗 Z_L 值的情况下, 有效面积可能是 $0 \sim A_{e-\max}$ 中的任意值.

3. 标签的雷达截面及计算

当物体被电磁波照射时, 能量朝各个方向散射, 散射场与入射场之和就构成空间的总场. 散射能量的空间分布取决于物体的形状、大小和结构, 以及入射波的频率、极化等. 天线的散射机理可分为结构模式和天线模式^[3, 5]. 这两种模式的散射原理如图 2 所示. 结构模式散射又称残留散射, 由入射波在天线导电表面感应电流或位移电流引起的, 它与给定的天线材料、形状有关, 独立于天线发射或接收的射频能量, 并且与负载无关. 天线模式散射则与天线辐射和接收的射频能量(辐射特性)、天线阻抗以及负载直接相关.

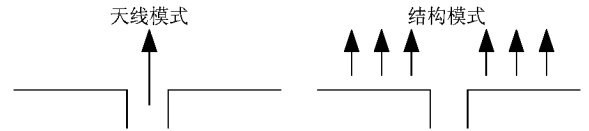


图2 天线的散射机理

雷达截面就是对指定方向的功率散射的度量, 即定量表征目标散射强弱的物理量, 它的大小取决于一系列参数, 例如目标的大小、形状、材料、表面结构以及波长、极化方向和负载等. 雷达截面可以表示为一个有效面积与入射波功率密度的乘积, 用符号 σ 表示^[13]. 对于单站和双站散射, 分别称为单站(或反向)雷达截面和双站雷达截面. 对于 RFID 系统, 由于读写器收发信号都通过一个天线, 因此标签的雷达截面属于单站雷达截面. 根据天线的散射机理, 天线的雷达截面^[14]可以表示如下:

$$\sigma = \frac{1}{\pi} \left| \frac{2\pi R E_s}{E_i} - (1 - \Gamma_a) \frac{\pi R E_a}{E_i} \right|^2 \quad \text{或}$$

$$\sigma = \left| \sqrt{\sigma_s} - (1 - \Gamma_a) \sqrt{\sigma_a} \exp \phi_{\text{rel}} \right|^2 \quad (8)$$

其中, R 是发射天线到接收天线之间的距离, E_s 为接收机处于短路情况时的电场强度, E_i 为入射到标签天线的电场强度, Γ_a 为负载到天线的反射系数, E_a 为接收机天线的天线模式电场强度. (8) 式中右边的两项分别称为结构模式项 σ_s 和天线模式项 σ_a , ϕ_{rel} 为这两项散射场之间的相对相位差. 通常要

解析确定 ϕ_{rel} 的值是十分困难的, 鉴于此, 优先考虑 (8) 式中的第一个表达式.

电场 E 与功率密度 S 之间的关系为 $E = \sqrt{2\eta_0 S}$, 其中 η_0 为真空中的波阻抗. 将 E 代入 (8) 式可得

$$\sigma = \frac{1}{\pi} \left| 2\pi R \sqrt{S_s/S_i} - (1 - \Gamma_a) \pi R \sqrt{S_a/S_i} \right|^2. \quad (9)$$

在短路情况中, 天线模式项 σ_a 为零, 结构模式项 σ_s 很容易计算. 在其他情况下, 为了计算总 RCS 和天线模式项 σ_a , 考虑到 RCS 的另一种表达形式^[13, 15]:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 |E_{\text{sc}}|^2 / |E_i|^2, \quad (10)$$

其中 E_{sc} 为总散射电场. 将 E 代入 (10) 式可得到总 RCS:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \left| \sqrt{S_{\text{sc}}/S_i} \right|^2. \quad (11)$$

根据 (9) 式和 (11) 式变换可得天线模式 RCS:

$$\begin{aligned} \sigma_a &= \left| (1 - \Gamma_a) \pi R \sqrt{S_a/S_i} \right|^2 \\ &= 4\pi R^2 \left| \sqrt{S_s/S_i} - \sqrt{S_{\text{sc}}/S_i} \right|^2. \end{aligned} \quad (12)$$

从方程 (9) (11) 和 (12) 中可以看出: 若要计算 RCS, 必须找出功率密度与发射功率之间的关联. 根据第 2 节的天线散射理论和 Friis 的自由空间传播方程可以得出

$$S_1 = \frac{G_1}{4\pi R^2} P_1, S_2 = \frac{4\pi}{\lambda^2 G_1} P_3. \quad (13)$$

其中 P_1 为读写器到标签的发送功率, G_1 为读写器天线增益, P_3 为反向散射功率, S_1 为前向链路功率密度, 即标签的入射功率密度, 它等于 S_i , S_2 为反向散射功率密度, 即读写器接收处的散射功率密度, 它等于 S_{sc} .

对于反向散射 RFID 系统而言, 标签是通过改变它的天线负载来实现调制的. RFID 芯片是非线性负载, 其阻抗值的变化会显著影响标签的性能. 鉴于此, 分析了不同负载情形下的 RCS 求解方法.

第一种情况 负载电阻 $R_L = 0$, 并且负载感抗 $X_L = -X_A$. 在这种情形下, $Z_L = R_L + jX_L = -jX_A$, 反射系统 $\Gamma_a = (Z_a^* - Z_L) / (Z_a + Z_L)$ 的值为 1, 从 (8) 式中可以看出第二项的值为 0, 表明没有天线模式散射发生. 根据 (9) (11) 和 (12) 式就可以分别得出天线模式 RCS, 结构模式 RCS 和总散射 RCS:

$$\sigma_{a\text{-sc}} = 0,$$

$$\sigma_{s\text{-sc}} = \frac{(4\pi)^3 R^4}{(\lambda G_1)^3} \left| \frac{P_{3\text{-sc}}}{P_1} \right|, \quad (14)$$

$$\sigma_{\text{sc}} = \sigma_{s\text{-sc}},$$

其中, 下标 sc 用来标识该负载情况.

第二种情况 $Z_L = \infty$, 即开路. 反射系统 Γ_a 的值为 -1, 则两种模式散射均发生. 由于结构模式 RCS 与天线的负载情况无关, 所以开路情况下的结构模式 RCS 与短路情况下的结构模式 RCS 相等, 再根据 (9) 式和 (11) 式可以导出其他的 RCS. 其雷达截面如 (15) (16) 和 (17) 式所示, 下标 load 用 oc 来标识.

第三种情况 $Z_L = Z_A^*$, 即负载匹配. 反射系统 Γ_a 的值为 0, 则两种模式散射均发生. 同理, 根据开路情况可以得出匹配情况下的 RCS. 其雷达截面如 (15) (16) 和 (17) 式所示, 下标 load 用 m 来标识.

第四种情况 其他负载. 反射系统 Γ_a 的值在 (1, -1) 之间取值, 它介于第一种情况和第二种情况之间. 同理, 可以得出其他负载情况下的 RCS, 如 (15) (16) 和 (17) 式所示, 下标 load 用 oth 来标识.

$$\sigma_{s\text{-load}} = \frac{(4\pi)^3 R^4}{(\lambda G_1)^3} \left| P_{3\text{-sc}} / P_1 \right|, \quad (15)$$

$$\sigma_{a\text{-load}} = \frac{(4\pi)^3 R^4}{(\lambda G_1)^3} \left| \sqrt{P_{3\text{-sc}} / P_1} - \sqrt{P_{3\text{-load}} / P_1} \right|^2 \quad (16)$$

$$\sigma_{\text{load}} = \frac{(4\pi)^3 R^4}{(\lambda G_1)^3} \left| P_{3\text{-load}} / P_1 \right|. \quad (17)$$

通过以上不同负载情形下的 RCS 计算分析可以得出: 1) 无论处于何种负载模式下, 标签天线的结构模式 RCS 值保持不变; 2) 而天线模式项 RCS 与负载有关; 3) 当读写器到标签的发送功率 P_1 保持不变时, RCS 与反向散射功率 P_3 直接相关, 反过来说, RCS 直接决定了调制反向散射标签信号功率的大小.

4. 无源 RFID 系统的识别范围

识别范围是无源 RFID 标签最重要的特征参数之一, 它主要受限于标签刚好能够从读写器获取足够开启功率的最大距离 R_{tag} 和读写器能够检测到标签反向散射信号的最大距离 R_{reader} , 有效识别范围取这两个距离中的较小者, 即 $\min(R_{\text{tag}}, R_{\text{reader}})$. 下面分析这两个最大距离的计算方法.

在自由空间环境传播中, 标签天线的接收功率 P_2 可以用 Friis 自由空间方程来计算:

$$P_2 = P_1 G_t G_{\text{tag}} \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2. \quad (18)$$

若标签芯片的开启功率门限值为 P_{th} , 则识别距离可以表示为^[16]

$$R = \lambda/4\pi \sqrt{P_t G_t G_{\text{tag}} \tau / P_{\text{th}}}, \quad (19)$$

其中, $\tau = 4R_A R_L / |Z_A + Z_L|^2$, 称为功率传输系数, 它与频率有关. 当 $\tau = 1$, 即完全匹配情况时, 标签的最大识别距离 R_{tag} 可能达到.

另一方面, 在反向散射传播环境中, 根据第 3 节的分析, 标签天线在不同模式负载下的雷达截面 σ_{load} 可以表示为

$$\sigma_{\text{load}} = \frac{(4\pi)^3 R^4}{(\lambda G_t)^2} |P_{3-\text{load}} / P_1|. \quad (20)$$

对于射频标签天线来说, 希望得到最大的 RCS. 根据天线的特性, 散射体的谐振散射特征、阻抗匹配概念及实际应用情况可知: 当读写器天线发射的射频信号

频率为天线的谐振频率, 且电磁波的极化方向与标签天线的极化方向相同时, 可以得到最大的雷达截面 σ_{max} . 对于具有一定动态范围灵敏度的读写器而言, 其最大识别距离 R_{reader} 的 4 次方与 σ_{max} 成正比.

5. 实验及仿真分析

对于 RFID 系统, 标签一般采用偶极子天线或微带贴片天线. 其中后者由于具有成本低且易于实现等特点而在实践中得到广泛采用. 基于此, 在实验中采用两种简单的方形微带贴片天线 A_1 和 A_2 , 其中 A_1 的主要参数为: 金属贴片尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$; 基板厚度为 3.28 mm ; 电介质常数 ϵ_r 为 2.3 ; 工作频率为 915 MHz ; A_2 的主要参数为: 金属贴片尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$; 基板厚度为 1.22 mm ; 电介质常数 ϵ_r 为 2.3 ; 工作频率为 2.45 GHz .

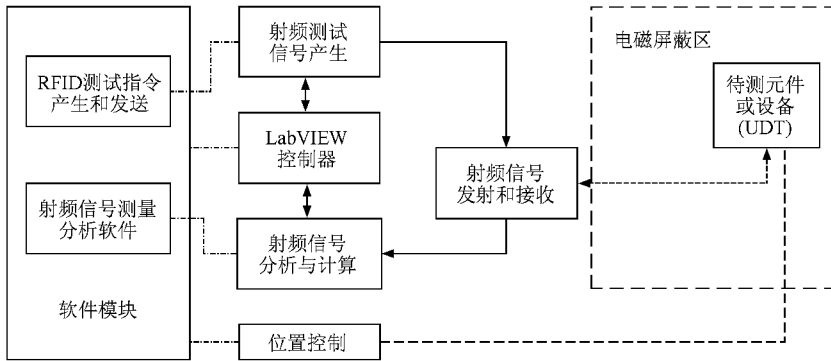


图 3 RFID 标签的 RCS 测量系统框图

待测天线的 RCS 测量系统如图 3 所示. 基于 NI 公司的一个 PXI 硬件模块平台来构建实验系统, 主要实验设备由射频信号发生器 PXI5671, 射频信号分析仪 PXI5660, LabVIEW 控制器 PXI8196, 环形器和一台 PC 机组成. 软件部分采用 NI 公司的虚拟仪器图形化编程软件 LabVIEW8.5. 待测天线及负载(标签)和发射/接收天线一起处于电磁屏蔽室(暗室, 吸波室或电磁吸盘)中, 两者相距 1 m (R), 发射/接收天线的增益为 6.1 dBi (G_t), 传输信号的功率为 0 dBm (P_1). 利用射频信号发生器 PXI5671 和 LabVIEW 控制器 PXI8196 及相应的测试指令来产生需要的射频信号. 利用环形器来隔离发送的测试信号和返回的散射信号. 利用射频信号分析仪 PXI5660 和 LabVIEW 控制器 PXI8196 及相应分析软

件来计算反向散射功率 P_3 和天线的输入阻抗. 为了保证实验的顺利进行, 必须满足下列限制条件: 无电磁干扰测试环境; 发射/接收天线采用的极化方式与待测天线的极化方式一致; 待测天线及负载(标签)和发射系统天线的距离要满足远场的要求; 发射信号和接收信号准确分离; 发射信号的功率不能太小, 以便返回的散射信号能被射频信号分析仪识别.

通过测量可得天线 A_1 的输入阻抗为 $(10.920 + j100.103) \Omega$, 天线 A_2 的输入阻抗为 $(29.751 - j63.585) \Omega$. 与前面的理论分析相对应, 测量了四种不同负载情况下的最大反向散射功率 P_3 , 如表 1 所示. 从表 1 中可以看出, 负载阻抗 $Z_L = -jX_A$ (第一种情况) 和 $Z_L = Z_A^*$ (第三种情况) 的反向散射功率较大, $Z_L = \infty$ (第二种情况) 反向散射功率较小.

表 1 不同负载下最大反向散射功率的测量值

A_1		A_2	
负载阻抗/ Ω	P_3 /dBm	负载阻抗/ Ω	P_3 /dBm
$-j100.103$	-27.22	$j63.585$	-45.26
∞	-44.08	∞	-55.68
$10.920 - j100.103$	-33.11	$29.751 + j63.585$	-50.76
50	-51.07	50	-59.96

根据表 1 的测量数据和第 3 节的计算方法,可以分别得出 A_1 和 A_2 的 RCS 值如表 2 和表 3 所示.

表 2 不同负载下天线 A_1 的最大 RCS 值

A_1	天线模式/ m^2	结构模式/ m^2	总的散射/ m^2
$-j100.103$	0.000	0.968	0.968
∞	0.710	0.968	0.020
$10.920 - j100.103$	0.234	0.968	0.250
50	0.847	0.968	0.004

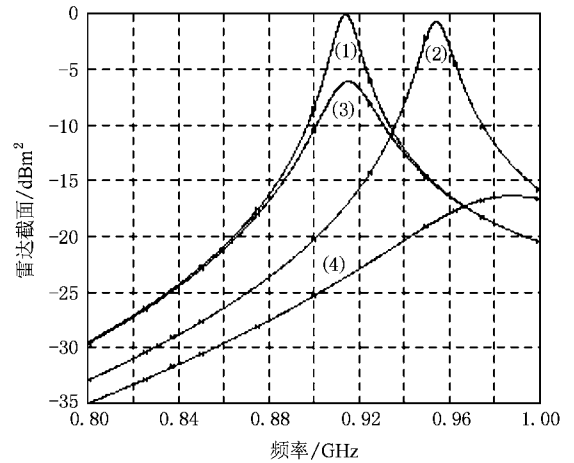
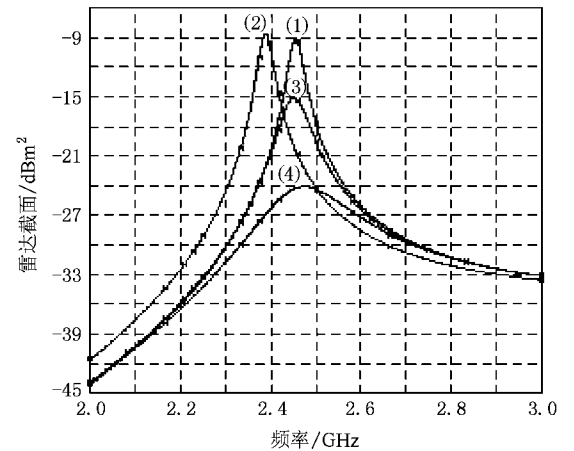
表 3 不同负载下天线 A_2 的最大 RCS 值

A_2	天线模式/ m^2	结构模式/ m^2	总的散射/ m^2
$j63.585$	0.0000	0.1093	0.1093
∞	0.0536	0.1093	0.0100
$29.7513 + j63.585$	0.0242	0.1093	0.0310
50	0.0729	0.1093	0.0037

从表 2 和表 3 中可以看出:当天线的负载阻抗 $Z_L = -jX_A$ 以及负载阻抗与天线匹配时,可以获得较大的 RCS 值,并且前者约为后者的 4 倍;开路时的 RCS 值则较小.

下面利用射频电磁仿真软件 FEKO 对 A_1 和 A_2 在不同负载、不同频率下的 RCS 进行仿真.仿真设置要尽量满足或接近上述实验限制条件.对于天线 A_1 在上述 4 种不同的负载情形下,分别在频率 800 MHz—1 GHz 范围内进行扫描,其雷达截面变化如图 4 所示;对于 A_2 ,分别在频率 2.0 GHz—3.0 GHz 范围内进行扫描,其雷达截面变化如图 5 所示.从图 4 和图 5 中可以看出,雷达截面既受负载的影响,也受工作频率的影响,特别地,对于 A_1 和 A_2 分别工作在 915 MHz 和 2.45 GHz,第一种负载情况的 RCS 要比第三种情况的 RCS 大 6 dB 左右,即天线完全匹配时的 RCS 仅为最大 RCS 的 1/4;开路和其他负载情况的 RCS 要远小于完全匹配时的 RCS.综上所述,在考虑一些非理想因素前提下,RCS 测量及仿真结果与理论分析是保持一致的.

在现有分析和测量无源标签的 RCS 文献中,文

图 4 不同负载不同频率下天线 A_1 的 RCS图 5 不同负载不同频率下天线 A_2 的 RCS

献 2] 比较具有代表性.文献 2] 没有给出无源标签的结构模式 RCS 和天线模式 RCS 理论计算方法,只给出了标签总的 RCS 理论计算方法:

$$\sigma = \frac{\lambda^2 G^2 R_a^2}{\pi |Z_a + Z_c|^2}, \quad (21)$$

其中, G 为标签天线的增益, R_a 为标签天线的电阻, Z_a 为标签天线的阻抗, Z_c 为标签芯片的阻抗.对于 RCS 的测量,文献 2] 首先通过测量发射天线的回波损耗 (S_{11}),再通过近似处理 $|S_{11}|^2 \approx P_3/P_1$,最后利用(22)式来获得标签的 RCS 测量值.

$$\sigma = |S_{11}|^2 \frac{(4\pi)^3 r^4}{G_1^2 \lambda^2}, \quad (22)$$

其中, G_1 为发射天线的增益, r 为发射天线到标签的距离.将(21)式和(22)式应用到 A_1 和 A_2 ,可分别得到它们总的 RCS.表 4 为本文建议的方法和文献

[2] 所采用方法计算 A_1 和 A_2 的 RCS 值比较,为简化起见,不失一般性,表中只列出负载匹配情况(文献[2]着重考虑匹配时的情况)时的 RCS 值.

表 4 采用不同计算方法所得 RCS 值的比较

天线	RCS 计算方法	RCS 理论值/dBm ²	RCS 测量值/dBm ²
A_1	文献[2]	-6.11	-6.63
	本文	-5.92	-6.02
A_2	文献[2]	-15.25	-15.82
	本文	-14.95	-15.09

从表 4 中可以看出:采用本文建议的方法所得结果与文献[2]保持一致,并且由于文献[2]进行了近似处理,其 RCS 测量值与理论值偏差比本文的偏差稍大.

综上所述,本文的 RCS 测量参数和计算方法所得到的结果与现有文献基本上保持一致,但所采用的方法又有所区别.现有负载天线的 RCS 测量技术大部分采用分离发射和接收天线方法,并引入了复杂的含去耦装置或两端口自动化网络分析仪的射频硬件.文献[2]通过测量发射天线的回波损耗(S_{11}),再通过近似处理来获得负载天线的 RCS,着重强调 RCS 的测量,而负载天线的 RCS 理论计算阐述并不多,并且其理论计算方法涉及到标签的具体参数.文献[6]着重对负载天线的 RCS 进行了理论分析,并采用传统的测量方法获得负载天线的 RCS,测量值与理论分析结果有所出入.本文采用单端口射频信号分析仪,很多复杂的硬件部分实现了软件化,从而使 RCS 测量系统得到简化,所采用的 RCS 计算方法较简单,但为了测量最大反向散射功率,引入了一些限制条件.

此外,根据上面的阐述可知 A_1 在匹配时的 RCS 理论值为 -5.92 dBm, A_2 在匹配时的 RCS 理论值为 -14.95 dBm.考虑读写器的接收灵敏度为 -75 dBm,标签的开启功率为 5 μ W,根据(19)(20)式可以分别得出 A_1 和 A_2 的最大识别距离;再通过测量可以得出它们的实际最大识别距离,如表 5 所示.

从表 5 中可以看出,在保证读写器足够高的灵

敏度条件下,系统的最大识别距离主要由 R_{tag} 决定,并且 R_{tag} 和 R_{reader} 相差较大,当然,随着微电子技术和新材料的出现,RFID 标签的开启功率得到进一步降低, R_{tag} 值将增大,并接近或超过 R_{reader} ;测量值要比理论值小,究其原因可能是非理想测量环境的影响;并且测量环境对 A_1 的影响比 A_2 大,究其原因可能是 A_1 工作的频段比较容易受电磁环境的干扰,如 GSM 系统的干扰等.

表 5 最大识别距离(单位/m)

天线	R_{tag}	R_{reader}	$\min(R_{\text{tag}}, R_{\text{reader}})$	R 测量值
A_1	4.89	9.12	4.89	3.27
A_2	1.72	3.31	1.72	1.56

6. 结 论

对于 RFID 技术来说,系统参数的分析和测量是一项重要而又艰巨的任务.本文首先基于现有文献从理论上分析了无源 RFID 标签的 RCS,然后对分别工作于 915 MHz 和 2.45 GHz 的不同负载模式下的标签天线 RCS 进行了测量,并对其进行了仿真.最后讨论了无源 RFID 系统的最大有效识别距离主要受哪些因素制约,获得的结论有:结构模式 RCS 在总的散射模式 RCS 中占主导地位;天线完全匹配时的 RCS 仅为最大 RCS 的 1/4;天线失配时的 RCS 比较小;RFID 系统的最大识别距离受 RCS 的影响,特别当 RFID 标签的开启功率进一步降低时,这个影响会更显著.本文采用的 RCS 计算方法还存在一些不足或面临的问题,主要体现在如何减少限制条件而准确获得最大反向散射功率 P_3 和实际应用环境考虑的问题上.而要解决这些不足和所面临的问题,可能需要构建无源 RFID 系统的实际应用传播模型.并且由于无源 RFID 系统的性能高度依赖于所使用的天线和应用环境,因此,今后研究工作的重点是对各种应用环境下 RCS 和系统识别距离的测量方法的研究,各种天线参数对无源 RFID 系统性能的影响,以及如何优化无源 RFID 系统识别距离.

[1] Rao K V S, Nikitin P V, Lam S F 2005 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **53** 3870

[2] Nikitin P V, Rao K V S 2006 *IEEE Antennas and Propagation Magazine* **48** 212

[3] Yen C C, Gutierrez A E, Veeramani D, Wisconsin D U, Madison 2007 *Antennas and Wireless Propag. Letters* **6** 279

[4] Kwon H, Lee B 2005 *Asia-Pacific Microwave Conference Proc.* **4** 1

[5] Liu S B, Zhang G F, Yuan N C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2633(in

- Chinese)[刘少斌、张光甫、袁乃昌 2004 物理学报 **53** 2633]
- [6] Penttila K , Keskilammi M , Sydanheimo L , Kivikoski 2006 *IEE Proc. Micro. Antennas Propag.* **153** 103
- [7] Pozar D M 1987 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **35** 613
- [8] Hu S M , Chen H L , Law C L , Shen Z X , Zhu L , Zhang W X , Dou W B 2007 *IEEE Antennas and Wireless Propag. Letters* **6** 70
- [9] Glidden R , Bockorick , Cooper C , Diorio S , Dressler C , Gutnik D , Hagen V , Hara C , Hass D , Humes T 2004 *IEEE Communication Magazine* **8** 140
- [10] Nikitin P V , Rao K V S , Martinez R D 2007 *Electronics Letters* **43** 431
- [11] Kraus J 1988 *Antennas* (New York : McGraw-Hill International Editions) p32
- [12] Klaus F 2003 *RFID Handbook : Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification* (New York : John Wiley & Sons Press) p83
- [13] Ruan Y Z 1998 *Radar Cross Section and Stealth Technology* (Beijing : National Defence Industry Press) p30 (in Chinese)[阮颖铮 1998 雷达截面与隐身技术(北京 国防工业出版社)第 30 页]
- [14] Hansen R C 1989 *Proceedings of the IEEE* **77** 659
- [15] Knott E , Shaeffer J , Tuley M 1993 *Radar cross section* (Norwood , MA ,USA : Artech House Inc.) p61
- [16] Rao K V S , Nikitin P V , Lam S F 2005 *Automatic Identification Advanced Technologies* **4** 39

Analysis and calculation of radar cross section in passive RFID systems^{*}

Tang Zhi-Jun He Yi-Gang

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

(Received 2 November 2007 ; revised manuscript received 12 November 2008)

Abstract

Based on the theory of passive RFID technology and antenna scattering , some computation methods for radar cross-section of tag antennas with different loads are derived , and by integrating the radar cross-section with electromagnetic propagation environment , the identification range of passive radio frequency identification is theoretically analyzed. Furthermore , by measuring backscattered power in the case of different loads , and then combined with the calculating methods , radar cross-section of the tag is also found. Theoretical analysis results are found to be in good agreement with experimental data. The results obtained are useful for optimizing tag performance in passive RFID systems.

Keywords : radio frequency identification , antenna , radar cross section , identification range

PACC : 9580D , 4110H , 5270G

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA04A104) , the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50677014 , 60876022).