

# 集装箱 RFID 系统的传播损耗模型及其性能分析

曹小华, 陶德馨

(武汉理工大学物流工程学院, 武汉 430063)

**摘要:** 根据集装箱射频识别(RFID)系统无线电波传播特性, 建立读写器与电子标签之间电波传播损耗的预测模型。利用该模型对集装箱射频识别系统的性能参数进行仿真分析, 得到最大识别距离与发射功率、接收灵敏度以及读写可靠性与识别距离和发送功率之间的关系曲线。研究表明, 集装箱 RFID 系统天线不宜采用 TE 极化方式, 在 RFID 系统设计和应用中, 应尽量减少多径传播引起的衰落。

**关键词:** 集装箱; 射频识别; 传播损耗模型; 识别性能

## Propagation Fading Model of Container RFID System and Its Performance Analysis

CAO Xiao-hua, TAO De-xin

(Logistics Department, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063)

**【Abstract】** According to characteristic of radio wave diffraction in container Radio Frequency Identification(RFID) system, this paper establishes the forecast model of radio wave propagation fading between reader and tag. Using the model to analyze performance parameter of container RFID system, this paper obtains some relation curves among identification distance, sending power and BER. The research results show that, TE polarization can not be applied in container RFID system and the fading value caused by multi-path propagation should be reduced to minimum during designing and applying RFID system.

**【Key words】** container; Radio Frequency Identification(RFID); propagation fading model; identification performance

### 1 概述

射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)技术是当今自动识别数据收集行业发展最快的一种技术, 它利用无线通信方式实现物品的非接触识别。集装箱射频识别系统主要应用于集装箱港区的进出道口、堆场轮胎式龙门吊、岸边门机或桥吊、管理人员手持读写器等工作环境, 其无线信道具有移动通信的特点。移动信道的衰落特性取决于无线电波传播环境。电波在移动环境中传播时, 会遇到各种物体, 经反射、散射、绕射后到达接收天线时, 已成为通过各个路径到达的合成波, 属于多径传播模式。较准确地预测射频识别系统中的电波传播损耗是设计远距离、高可靠性、低功耗的集装箱射频识别系统的重要环节之一。近年来, 国内外有不少相关论文发表, 建立了一些较实用的电波传播预测模型, 其中, 大尺度预测模型主要有 Okumura-hata 模型<sup>[1-2]</sup>、Walfish-Ikegami模型<sup>[3]</sup>、Lee模型<sup>[4]</sup>等; 常见的小尺度模型有 Rayleigh模型<sup>[5]</sup>、Rician模型<sup>[6]</sup>、Jakes模型<sup>[7]</sup>、Suzuki模型<sup>[8]</sup>等。

由于集装箱射频识别系统应用环境不同于一般移动通信环境, 因此上述信道模型不能直接用于集装箱电子标签系统中电波损耗的预测。目前对集装箱射频识别系统的电波传播损耗, 主要采用实际测量方法, 还没有较准确的理论计算模型。本文在分析集装箱射频识别系统电波传播环境的基础上, 研究其电波传输损耗模型。

### 2 集装箱射频识别系统的电波传播

集装箱射频识别系统采用 2.45 GHz 频段的有源电子标签, 使用 FSK 调制方式, 应用于集装箱港区进出道口(车速为 5 km/h)、堆场轮胎式龙门吊、岸边门机或桥吊等装卸设备。

集装箱电子标签安装在集装箱左侧面(面对集装箱箱门)中上部位置。读写器安装在道口集装箱通道侧向, 因此, 在道口处其电波传播可近似看成自由路径损耗。需要将读写器安装在装卸设备上时, 通常选择吊具。因为读写器与电子标签之间的电波传播路径上存在直角导电尖劈的阻挡, 会在集装箱边缘发生衍射, 损耗大于其他应用环境, 所以在这种阻挡条件下得到的损耗模型和各种参数可以作为集装箱射频识别系统的损耗预测和设计依据。

根据集装箱作业环境, 还会存在电波反射、散射, 产生多径衰落问题。虽然多径引起的衰落变化很快, 但对频带较窄的移动信号来说, 仍然可以认为衰落在一个符号周期内保持不变。因为在上述情况下, 调制符号的周期明显大于由多径引起的时延扩展, 所以在一个符号周期内的所有频率分量都会经历相同的衰减和相移, 信道对于所有频率分量来说是平坦的。因此, 集装箱射频识别系统可以看成平坦 Rayleigh 衰落信道。在集装箱射频识别系统中, 应重点研究路径损耗问题。

### 3 电波传播路径损耗模型的建立

#### 3.1 衍射损耗系数

如图 1 所示, 电子标签与读写器之间被集装箱边缘阻挡, 电波产生衍射, 衍射系数依赖于入射角  $\phi$  和入射波极化形式。

**基金项目:** 湖北省自然科学基金资助项目(2006ABA302)

**作者简介:** 曹小华(1973 -), 男, 博士研究生, 主研方向: RFID 技术及应用; 陶德馨, 教授、博士生导师

**收稿日期:** 2008-08-10 **E-mail:** Tomm\_cao@163.com

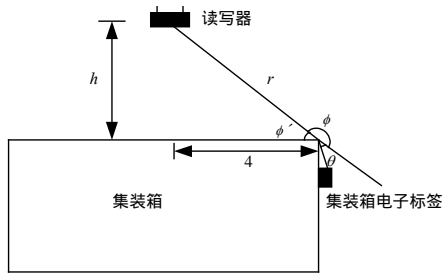


图1 电波传播示意图

衍射系数为

$$D(\theta) = D_1 + D_2 + \Gamma_{E,H}(D_3 + D_4) \quad (1)$$

其中，

$$D_{1,2} = \frac{-1}{3\sqrt{2\pi k}} \cot \frac{\pi \pm (\phi - \phi')}{3} \quad (2)$$

$$D_{3,4} = \frac{-1}{3\sqrt{2\pi k}} \cot \frac{\pi \pm (\phi + \phi')}{3} \quad (3)$$

其中， $k = \omega/c$  是波数。当入射波为 TM 极化时， $\Gamma_{E,H} = +1$ ；当入射波为 TE 极化时， $\Gamma_{E,H} = -1$ 。

### 3.2 路径损耗数学模型

假设发射天线上的终端电流为  $I$ ，阻抗为  $Z$ ，方向增益为  $f_T$ ，发射天线到衍射边缘距离为  $r$ ，衍射边缘到接收点距离为  $\rho$  ( $\rho \ll r$ )。将接收天线入射波看成平面入射波，则接收点的场强为

$$E_d = ZIf_T \frac{e^{-jkr}}{r} e^{-j\pi/4} D(\theta) \frac{e^{-jk\rho}}{\sqrt{\rho}} \quad (4)$$

入射波为球面波，当球面波的一条射线碰到一个边缘时，将产生衍射场。在边缘附近，该衍射场类似入射平面波场产生的衍射场。当远离边缘时，必须乘以修正因子  $A_D$  对式(4)进行修正，即

$$A_D = \sqrt{\frac{\rho}{r} \frac{r_0}{r+r_0}} \quad (5)$$

其中， $r_0$  是球面波衍射边缘到实际接收点的距离。考虑距离变化引起的额外相位变化，则接收点实际场强为

$$E_d = ZIf_T e^{-j\pi/4} D(\theta) \frac{e^{-jk(r+r_0)}}{\sqrt{r r_0 (r+r_0)}} \quad (6)$$

假设发送天线增益为  $G_T$ ，接收天线增益为  $G_R$ ，根据路径损耗定义可知

$$PL = \frac{P_T}{P_R} = \frac{|ZI|^2 \cdot 4\pi \cdot \frac{1}{2\eta} \cdot G_T G_R}{A_e |E_d|^2 \cdot \frac{1}{2\eta}} \quad (7)$$

其中， $A_e$  是有效接收面积。

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} |f_R|^2 \quad (8)$$

根据式(6)~式(8)，可得

$$PL = \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 \frac{r_0 r (r+r_0) G_T G_R}{|D(\theta)|^2 |f_T|^2 |f_R|^2} \quad (9)$$

假设发送天线、接收天线的方向系数均为 1，则式(9)可简化为

$$PL = \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 \frac{r_0 r (r+r_0) G_T G_R}{|D(\theta)|^2} \quad (10)$$

在集装箱射频识别系统中，标签一般安装在离箱顶 1 ft 的侧面，即  $r_0 = 0.348$  m。标准集装箱宽度为 8 ft，则读写器

到边缘的距离为

$$r = \sqrt{h^2 + 1.392^2} \quad (11)$$

识别时通常改变的是  $h$ ，因此，可用  $h$  表示识别距离。

将式(10)转换为

$$PL(\text{dB}) = 21.98 - 20\lg(\lambda) + 10\lg[r r_0 (r+r_0)] + G_T(\text{dB}) + G_R(\text{dB}) - 20\lg|D(\theta)| \quad (12)$$

### 3.3 模型检验

实际测量时，选择无多径传播的环境。发送天线和接收天线增益之和为 8 dB(下文采用该值)，天线产生 TM 极化波，在不同测量高度  $h$  时测到读写器到电子标签之间的电波损耗值(单位为 dB)，然后根据式(12)计算得到不同测量高度  $h$  时的电波损耗值。实验结果证明，实际测量值与理论计算值基本吻合，即所建立的电波损耗模型较好地预测了路径损耗。

### 4 系统性能分析

利用本文建立的电波传播损耗模型，通过 Matlab 软件研究集装箱 RFID 系统中的功率传输特性和识别性能。

(1)不同电波极化方式下的路径损耗。当电波分别取 TM 和 TE 极化波时，不同电波极化方式下的路径损耗如图 2 所示。

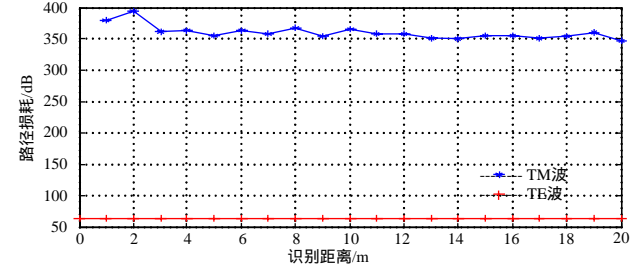


图2 不同电波极化方式下的路径损耗

由图 2 可见，TE 极化时电波损耗远大于 TM 极化时的损耗，因此，集装箱射频识别系统天线不宜采用 TE 极化方式。下文采用 TM 极化。

(2)最大识别距离。先研究发射功率为 0 dBm 的情况下，接收灵敏度变化时，射频系统的最大识别距离，结果如图 3 所示。然后固定接收灵敏度为 -104 dBm，改变发射功率得到不同最大识别距离，如图 4 所示。

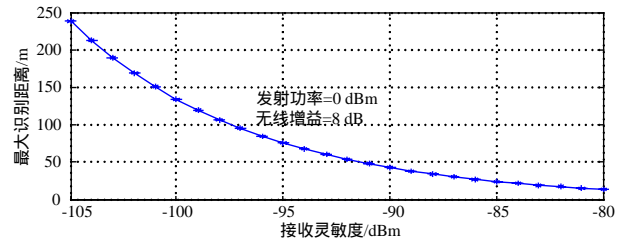


图3 发射功率为 0 dBm 时的最大识别距离

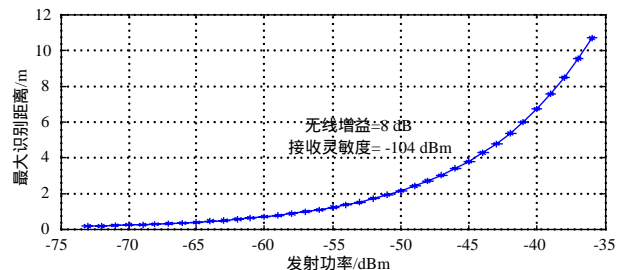


图4 接收灵敏度为 -104 dBm 时的最大识别距离

(下转封三)

(上接第 273)

由图 4 和图 5 可以看出,当天线接收灵敏度小于-85 dBm 时,最大识别距离随接收灵敏度快速变化;当接收灵敏度大于-80 dBm 时,识别距离变化缓慢;当发射功率大于-38 dBm 时,识别距离可达 10 m 以上,且最大识别距离随接收灵敏度快速增加。

### (3) 识别可靠性

识别可靠性通常用误码率来表示,在高斯白噪声信道中,FSK 误码率(BER)公式如下:

$$P_{b,FSK} = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (13)$$

假设 PER 接收灵敏度为  $10^{-4}/-104$  dBm,结合电波传播损耗模型,不同识别距离下的读写可靠性如图 5 所示。

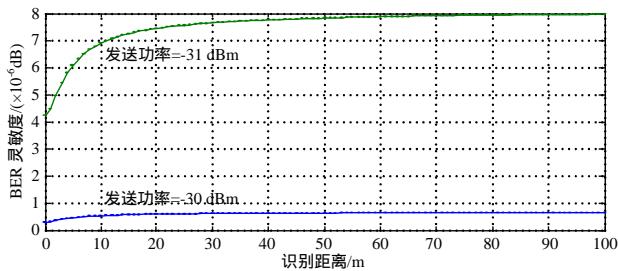


图 5 不同识别距离下的读写可靠性

当发送功率大于-30 dBm、识别距离  $h$  为 0 m~100 m 时,误码率均小于  $10^{-6}$ ;当发送功率小于等于-31 dBm 时、识别距离  $h$  为 0 m~100 m 时,误码率处于  $10^{-6}$ ~ $10^{-5}$  之间。当识别距离在 0 m~100 m 之间变化时,误码率不会发生数量级变化,其原因主要是,随着  $h$  的增加,衍射损耗减小而自由空间损耗增加,因此,总的路径损耗变化不大。

射频识别系统受 Rayleigh 衰落信道影响,其误码率为

$$P_{FSK} = \int_0^{\infty} P_b P(r_b) dr_b \quad (14)$$

(上接第 275 页)

### 3.2 MiniGUI-Lite 中的软键盘测试程序编写

Lite 版本是采用 C/S 方式的多进程系统,在运行过程中只有一个服务器程序在运行。服务器程序可以有一个独占的桌面区域,设定好该区域后,客户程序只能在该独占矩形区域外显示。本文修改了针对 MiniGUI-1.3.3 开源版本的综合示例包 mde-1.3.0 中的服务器程序 mginit,使之在独占区域内创建了工具栏、输入法窗口和软键盘。软键盘由工具栏最左边标题为“软”的按钮调出,能对任何客户程序进行字符输入。图 3 为包含软键盘的 mginit 服务器程序运行界面,为了尽量减少服务器独占区域的大小,软键盘面板只采用了 2 行。



图 3 包含软键盘的 mginit 服务器程序运行界面

其中,

$$p(r_b) = \frac{1}{r_b} \exp\left(-\frac{r_b}{r_b}\right) \quad (15)$$

因为 Rayleigh 信道会对系统误码率产生较大影响,所以在射频系统设计和应用时,应尽量减小多径传播引起的衰落。

### 5 结束语

本文建立集装箱 RFID 系统无线电波传播损耗预测模型,利用该模型研究射频识别系统的性能参数,为射频识别系统的设计提供了理论基础。

### 参考文献

- [1] Okumura T, Ohmori E. Field Strength and Its Variability in VHF and UHF Land Mobile Service[J]. Review Electrical Communication Laboratory, 1968, 16(9/10): 825-873.
- [2] Masaharu H. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Service[J]. IEEE Trans. on Veh. Technology, 1980, 29(3): 317-325.
- [3] Ikegami F, Yoshida S, Takeuchi T. Propagation Factors Controlling Mean Field Strength on Urban Streets[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1984, 32(8): 822-829.
- [4] Willian C, Lee Y. Mobile Communication Engineering[M]. New York, USA: McGraw Hill, 1982.
- [5] Komninakis C. A Fast and Accurate Rayleigh Fading Simulator[C]//Proc. of IEEE Conf. on Globe Comm.'03. San Francisco, USA: [s. n.], 2003: 3306-3310.
- [6] Gordon L S. Principle of Mobil Communication[M]. [S. l.]: Springer, 2000.
- [7] Jakes W C. Microwave Mobile Communications[M]. New York, USA: IEEE Press, 1993.
- [8] Suzuki H. A Statistical Model for Urban Radio Propagation[J]. IEEE Transactions on Communication, 1977, 25(7): 673-680.

### 4 结束语

本文软键盘设计方法简便实用,但在实际应用中,为了确保编写的程序通过编译并正常运行,应使程序源代码包括 mgext.h 头文件,编译时应加上 -lmgext 选项以指定 mgext 扩展库。在 Lite 版的 MiniGUI 中,要避免把软键盘窗口创建到服务器程序的独占区域外,即客户程序的显示区域内,否则会导致一些窗口显示问题。

创建软键盘的窗口的扩展风格应设置为 WS\_EX\_TOOLWINDOW,使之成为工具窗口且不会获得输入焦点。输入法窗口的拼音输入方式有选择汉字不全的问题,因此,应使用全拼或其他方式来输入中文字符。

### 参考文献

- [1] 周立功. ARM 嵌入式 MiniGUI 初步与应用开发范例[M]. 北京:航空航天大学出版社, 2005.
- [2] 北京飞漫软件技术有限公司. MiniGUI 编程指南[Z]. (2004-07-01). <http://www.minigui.com>.