

基于场景几何特征的 ETC 识别范围预测方法*

余开^{1,2}, 何怡刚¹, 李兵¹, 佐磊¹, 唐志军²

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009; 2. 湖南科技大学物理与电子科学学院 湘潭 411201)

摘要:超高频(UHF)射频识别(RFID)系统具有标签成本低、识别距离远等优点,在电子不停车收费(ETC)等智能交通领域具有应用潜力。受电波的随机多径传播制约,实际应用中难以准确估计标签识别范围。针对ETC应用场景具有几何共性的特点,基于电波传播的几何光学方法,通过对标签接收多径射线的构成进行分析,融入场景几何特征和天线射频特征参数,提出了一种标签识别范围的预测方法。实际场景测试与仿真表明,能较精确预测标签在三维空间中的接收功率分布和识别范围,且精确性高于对数正态等经验模型,而复杂性低于电磁场的商用仿真软件。

关键词:射频识别;电子不停车收费;传播预测;几何光学

中图分类号: TH865 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Prediction method of identification zone for ETC based on scenario geometric features

She Kai^{1,2}, He Yigang¹, Li Bing¹, Zuo Lei¹, Tang Zhijun²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Physics and Electronic Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Ultra high frequency (UHF) radio frequency identification (RFID) systems have many advantages, such as low tag cost and farther identification range. Therefore, it is meaningful in the field of intelligent transportation such as electronic toll collection (ETC), etc. However, it is difficult to accurately estimate the tag identification area in practical applications for the random multipath propagation of radio waves. For ETC scenarios often have in common geometric features. This paper firstly analyzes the constitution of the tag received multipath waves, and then proposes a prediction method of tag identification area. The method is based on geometric optics theory and takes the scenario geometric features and antenna RF characteristics into consideration. Actual tests and simulations showed that the method can accurately predict the tag received power and identification area. The prediction accuracy is higher than the empirical models, and the computational complexity is lower than the electromagnetic computation software.

Keywords: radio frequency identification (RFID); electronic toll collection (ETC); propagation prediction; geometric optics

1 引言

超高频(ultra high frequency, UHF)频段的射频识别(radio frequency identification, RFID)技术具有标签成本低、识别距离远、可一次读取多标签等特点,在诸如电子不停车收费(electronic toll collection, ETC)、电子车牌和

集装箱识别等智能交通和智能物流领域具有巨大的应用潜力。为最大化降低标签成本,UHF RFID系统采用无线电能传输和反向散射调制技术,标签需要从阅读器辐射的电磁波获得能量^[1-2]。实际应用中,阅读器至标签间电波的随机多径传播,将导致难以准确估计标签识别范围,降低系统识别可靠性^[3-5]。

文献[6]通过实际射频测试,分析了ETC应用电波

收稿日期:2016-08 Received Date: 2016-08

* 基金项目:国家自然科学基金(61377024)、国家自然科学基金青年科学基金(61401139)、湖南省教育厅科学研究项目(1640641)、中央高校基本科研业务费专项资金(105-4115103033)项目资助

的多径传播特点,并研究了通过铺设吸波材料对系统识别范围的改进情况;Lázaro A 等人^[7]对物流仓储应用多径环境的 UHF RFID 系统链路预算方法进行了研究,测试了阅读器天线不同高度和标签不同贴附位置情形下的路径损耗因子,并使用莱斯和瑞丽模型,给出了达到一定识别率时,额外需增加的发送功率阈值;Marrocco G 等人^[8]采用椭球模拟阅读器天线的辐射方向图,通过仿真软件和实际测试,说明了识别范围内将存在识别盲点,且椭球模型能有效描述标签的识别范围;余开等人^[9]对影响标签前向和反向链路接收功率的众多因素,如标签天线与贴附物间的电磁耦合效应,标签天线与芯片间的端口匹配与调制系数,多径传播路径损耗等进行了分析,提出了 UHF RFID 系统链路预算的完整模型和参数值的测试方法,并指出可用于计算识别距离。这些方法运用方便,但精度难以满足应用需求,因此,Hoefinghoff J. F. 等人^[10]通过电磁场的商业仿真软件,建立了一个叉车入库的计算机模型,比较了识别范围的场强仿真值与测试值,表明此方法预测精确,但非常耗时。后续的研究大多采用了经验模型和射线跟踪的方法^[11],如 Bekkali A 等人^[12]和 Gao Y 等人^[13]都是基于两级级联的莱斯模型分析系统误码率。另外, Li B 等人^[14]给出了基于菲涅耳区理论的非视距条件下的双线路径损耗模型;文献^[15]采用波导模型,对 ETC 车道两侧存在大量排队车辆的情形进行了分析,给出识别率的预测方法,简化了计算;Dimitriou A. G. 等人^[16]提出了一种新颖的方法,即将应用场景的几何尺寸,阅读器与标签天线的空间位置与小尺度的莱斯模型中 K 参数建立起关系式,获得应用场景更精确的统计信道模型,但其也仅是对一个矩形房间进行了分析,而且只考虑了标签周围多径信号波达角服从均匀分布的情况,并不适用于其他应用场景。

上述研究表明,UHF RFID 系统不同于一般的移动通信技术,其识别距离多在 10 m 范围内,属于专用短程无线通信,其各类应用场景中反射(散射)物的几何分布具有不同特点。在 ETC 等 RFID 应用部署时,需要有效设计三维空间的识别区域,并优化阅读器天线高度、角度、波束宽度、车道宽度等几何参数,以最优识别率。因此,本文通过分析标签接收多径射线波的构成,基于几何光学方法,融入场景几何和系统射频特征参数,提出了一种适用于 ETC 应用场景的识别范围预测方法,并进行实验研究。

2 ETC 场景几何特征与多径传播分析

目前的 ETC 系统大多采取收费广场的模式,场景较

为空旷,相对于仓库、超市等丰富多径环境,ETC 应用场景并不复杂,具有典型性。阅读器天线布置的位置、高度、下倾角、预计识别区域,以及周围反射(散射)体的几何分布是具有几何共性的^[6,17]。

图 1 所示为典型 ETC 系统示意图。阅读器天线(本文取其为笛卡尔坐标原点)布置在 ETC 车道正上方,高 H_{reader} ,下倾角 α ,车道宽 D_{lane} ,沿 y 轴方向,左侧与右侧大型车辆与 ETC 车道距离分别为 D_l 和 D_r 。当行进的车辆接近第 1 条栏杆,铺地线圈感应到车辆,抬起栏杆,车辆即进入了栏杆至阅读器天线正下方所形成的可识别区域。

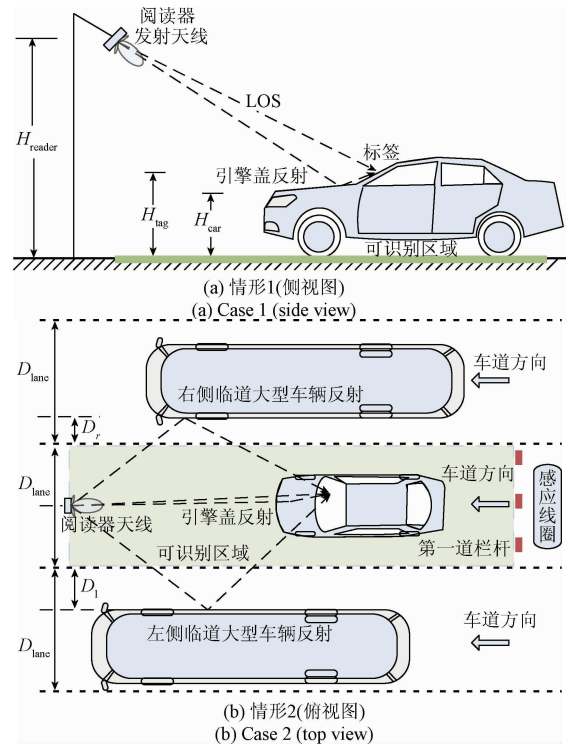


图 1 ETC 场景示意图

Fig. 1 Illustration of ETC scenarios

基于文献^[17]对典型 ETC 场景多径射线波的测试结论,以及射线跟踪仿真软件(Wireless Insite)对标签接收射线构成的仿真结果,发现这类典型 ETC 场景的标签接收功率主要是由阅读器天线至标签的视距射线(line of sight, LOS)和周围一次反射的射线构成的,且周围一次反射体主要就是车辆本身引擎盖(高度 H_{car})和临道大型车辆。这是因为阅读器发射功率较小,若经多次反射吸收,则衰减很大,对标签接收功率贡献很小的缘故。因此,可以将典型 ETC 场景分为如表 1 所示几类情形进行研究。

表1 典型ETC场景多径射线构成分析

Table 1 Constitution of multipath rays for typical ETC scenarios

序号	被识别车辆	临道车辆	射线构成分析
1	car	无/小车	视距+引擎盖一次反射+散射
2	car	大车	视距+引擎盖+大车侧面一次反射+散射
3	MPV	无/小车	视距+地面一次反射+散射
4	MPV	大车	视距+地面&大车侧面一次反射+散射
5	平头大车	无/小车	视距+地面一次反射+散射
6	平头大车	大车	视距+地面一次反射+散射
7	长头大车	无	视距+引擎盖一次反射+散射
8	长头大车	大车	视距+引擎盖一次反射+散射

表1中,小车指小型载客汽车(car)、商务车(MPV)和越野车(SUV),大车指平头大型客货车和长头大型客货车。当临道车辆为大型客货车时,将存在阅读器天线至标签间关于临道车辆的一次反射,若为小型车辆,则为多次反射。典型ETC场景下,标签接收功率主要由视距和一次反射线构成,本文拟针对此场景进行研究,基于几何光学的方法,通过天线、标签和周围反射体的几何与射频频特征参数,预测标签识别范围。

3 本文方法

3.1 识别率

由于目前的UHF RFID系统识别可靠性主要受阅读器天线至标签的前向激活链路制约^[4,11-12],故识别范围内要求有 $P_{tag} \geq P_{th}$,并定义识别标识函数为:

$$f_{id}(x(i), y(j), z(k)) = \begin{cases} 1, & P_{tag}(x(i), y(j), z(k)) \geq P_{th} \\ 0, & P_{tag}(x(i), y(j), z(k)) < P_{th} \end{cases} \quad (1)$$

识别率为:

$$\frac{1}{M \cdot N \cdot L} \sum_{k=1}^L \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M f_{id}(x(i), y(j), z(k)) \times 100\% \quad (2)$$

式中: $(x(i), y(j), z(k))$ 为识别范围内采样点坐标, M 、 N 、 L 分别为沿 x 、 y 、 z 轴方向的采样点数, P_{th} 为标签芯片激活阈值功率, P_{tag} 为标签接收功率,是待求值。

3.2 标签接收功率

图2所示为阅读器通过无线供电技术向标签提供电能的等效电路原理图^[1]。

若标签天线 Z_a 与芯片输入阻抗 Z_c 匹配,且发射接

收天线间极化匹配,则标签接收功率为:

$$P_{tag} = A_e S_{av} \quad (3)$$

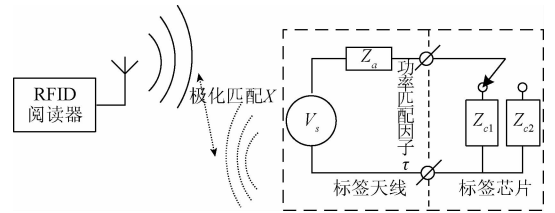


图2 RFID无线供电等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of wireless powered RFID

其中,

$$S_{av} = \frac{|E_{tag}|^2}{2\eta_0} \quad (4)$$

$$A_e = \frac{\lambda^2 G}{4\pi} \quad (5)$$

式中: A_e 为标签天线有效截面, S_{av} 为标签处的能流密度, E_{tag} 为标签处电场强度, η_0 为自由空间阻抗(377 Ω)。若用 X 表示标签天线与阅读器天线间的极化匹配系数,用 τ 表示标签芯片与天线间的匹配因子,用 L_{ws} 表示汽车挡风玻璃穿透损耗系数,则标签接收功率可改写为:

$$P_{tag} = \frac{\lambda^2 G |E_{tag}|^2 X \tau}{8\pi\eta_0 L_{ws}} \quad (6)$$

3.3 电场强度矢量和

式(6)中,关键是求得标签处电场强度 E_{tag} 。ETC系统中,阅读器与标签间视距路径一直存在,其传播延时为 $\tau_{min} = d/c$,其中 c 为光速。实际测试时,由于不同延时之间的差值可能很小,一般只能分割出若干个明显的延时成分。由图1所示几何关系可以看出,除视距路径外,标签接收射线波主要为引擎盖一次反射波、两侧大型车辆一次反射波。测量数据和射线跟踪仿真表明^[6,17],上述射线对标签处电场强度起决定性作用,将4组射线的波达角方向分别计为 (θ_m, ϕ_m) , $m = 0, 1, 2, 3$,则标签接收场强为其矢量和:

$$E_{tag} = \sum_{m=0}^3 E_m(\theta_m, \phi_m) \quad (7)$$

式中: $m = 0, 1$,分别表示视距和引擎盖反射; $m = 3, 4$,分别表示两侧大型车辆一次反射,其值与标签及其周围散射体的几何特征相关。

对于视距路径,阅读器发射天线在方位角为 (ϕ, θ) ,距离 r 的远场处所产生的电场强度可表示为:

$$E(r, \theta, \phi) = (A_\theta(\theta, \phi)\hat{e}_\theta + A_\phi(\theta, \phi)\hat{e}_\phi) \frac{e^{-j\beta r}}{r} \quad (8)$$

其中,

$$\begin{cases} A_\theta(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{P_T \eta_0}{2\pi}} g_\theta(\theta, \phi) \\ A_\phi(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{P_T \eta_0}{2\pi}} g_\phi(\theta, \phi) \\ g_\theta(\theta, \phi) = \sqrt{|G_\theta(\theta, \phi)|} e^{j\psi_\theta} \\ g_\phi(\theta, \phi) = \sqrt{|G_\phi(\theta, \phi)|} e^{j\psi_\phi} \\ \beta = \frac{\omega}{c} \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_T 是阅读器发射功率, $G_\theta(\theta, \phi)$ 和 $G_\phi(\theta, \phi)$ 分别是发射天线在单位矢量 \hat{e}_θ 和 \hat{e}_ϕ 方向的增益分量, 而 ψ_θ 和 ψ_ϕ 为相对相位, β 是波数, ω 是载波角频率, c 为光速。

三维空间中, 阅读器发射的每一射线当发生反射时, 反射电场 \mathbf{E}^r 和入射电场 \mathbf{E}^i 间存在如下关系:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}^r_{\parallel} \\ \mathbf{E}^r_{\perp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_{\parallel} & 0 \\ 0 & \Gamma_{\perp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}^i_{\parallel} \\ \mathbf{E}^i_{\perp} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中,

$$\begin{cases} \mathbf{E}^i_{\perp} = \hat{e}_{\perp} \cdot \mathbf{E}^i \\ \mathbf{E}^i_{\parallel} = \hat{e}'_{\parallel} \cdot \mathbf{E}^i \end{cases} \quad (11)$$

$$\hat{e}_{\perp} = \frac{\hat{\mathbf{k}} \times \hat{\mathbf{n}}}{|\hat{\mathbf{k}} \times \hat{\mathbf{n}}|}$$

$$\hat{e}_{\parallel} = \frac{\hat{\mathbf{k}} \times \hat{e}_{\perp}}{|\hat{\mathbf{k}} \times \hat{e}_{\perp}|}$$

$$\hat{e}'_{\parallel} = \frac{\hat{\mathbf{k}}' \times \hat{e}_{\perp}}{|\hat{\mathbf{k}}' \times \hat{e}_{\perp}|} \quad (12)$$

式中: $\hat{\mathbf{k}}$ 是入射波方向的单位矢量, $\hat{\mathbf{k}}'$ 是反射波传播方向的单位矢量, $\hat{\mathbf{n}}$ 是反射面的法向量, Γ_{\parallel} 和 Γ_{\perp} 是非涅尔反射系数在平行和垂直于入射波平面方向的分量, 与反射界面材料和入射角相关。

$$\begin{aligned} \Gamma_{\parallel} &= \frac{-\varepsilon_r \sin(\varphi) + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2(\varphi)}}{\varepsilon_r \sin(\varphi) + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2(\varphi)}} \\ \Gamma_{\perp} &= \frac{\sin(\varphi) - \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2(\varphi)}}{\sin(\varphi) + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2(\varphi)}} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: ε_r 为相对透射率, φ 为入射波与反射面间的夹角。对于反射物为金属, 如汽车引擎盖或车身, 则有近似值: $\Gamma_{\parallel} = 1, \Gamma_{\perp} = -1$ 。

3.4 镜像反射几何关系式

电波经过若干次反射到达标签, 可以采用商用射线跟踪软件(如 Wireless Insite 等), 建立场景的计算机三维几何模型, 并确定反射物材料属性, 再基于几何光学和一致衍射理论完成计算。鉴于 ETC 应用中, 视距和一次反射波为场强的主要构成, 下面以表 1 中情形 1 和 2 为例, 通过分析一次反射射线的几何关系式, 基于上述方法, 计算标签接收功率 P_{tag} , 并与实测结果进行对比研究。

情形 1 下, 标签接收功率主要取决于阅读器至标签的视距电波和汽车引擎盖的一次反射波, 此时射频传播可由双线模型建模。选取阅读器发射天线位置为笛卡尔坐标原点 $T(0, 0, 0)$, 令标签坐标为 $R(x, y, z)$, 此时, 引擎盖平面 $z = -H_{\text{reader}} + H_{\text{car}}$ 为一次反射面, 且 T 关于反射面的镜像为 $T'(0, 0, -2H_{\text{reader}} + 2H_{\text{car}})$, 图 3 所示为镜像几何关系图, 由此可确定反射点 P_1 的坐标。

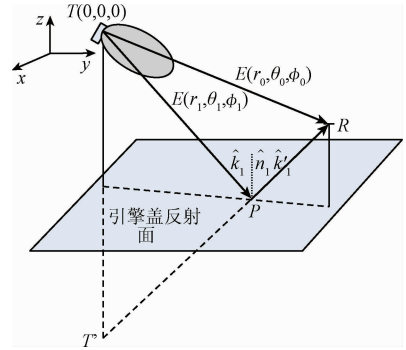


图 3 电磁波一次反射几何关系

Fig. 3 Relationship of one time reflected waves

情形 2 下, 若干扰车辆(近 ETC 车道的车身侧面)距离车道边线为 D_l 和 D_r , 则采用图 3 中镜像方法, 亦可求出两侧干扰车辆上的反射点 P_2 和 P_3 的坐标, 故可计算笛卡尔坐标下的入射波、反射波单位向量和反射面法向量为:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{k}}_m = \frac{TP_m}{|TP_m|} \\ \hat{\mathbf{k}}'_m = \frac{P_m R}{|P_m R|} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $m = 1, 2, 3$ 。反射面法向量为:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{n}}_1 = (0, 0, 1) \\ \hat{\mathbf{n}}_2 = (1, 0, 0) \\ \hat{\mathbf{n}}_3 = (-1, 0, 0) \end{cases} \quad (15)$$

4 实验研究

4.1 天线及仪器

制作了文献[12, 16]中的右旋圆极化微带天线作为阅读器天线用于射频测量, 且其天线增益计算表达式为:

$$G_\theta(\theta, \phi) = G_\phi(\theta, \phi) = \frac{3.136}{\sqrt{2}}$$

$$\left(\sin(\theta) \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cos(\theta)\right)}{\cos(\theta)} \cos\left(\frac{\pi}{2} \sin(\theta) \sin(\varphi)\right) \right)^2 \quad (16)$$

图 4 所示为此款天线及其辐射方向图的计算与测试曲线, 可以看出, 两者比较吻合, 特别是主瓣部分。由于决定标签接收功率的主要射线波是源于主瓣的方向, 而旁瓣主要引起其他多次反射的射线, 对标签功率的贡献

很小。故本文采用与文献[12,16]同样的方法,基于式(16)作增益的近似计算。

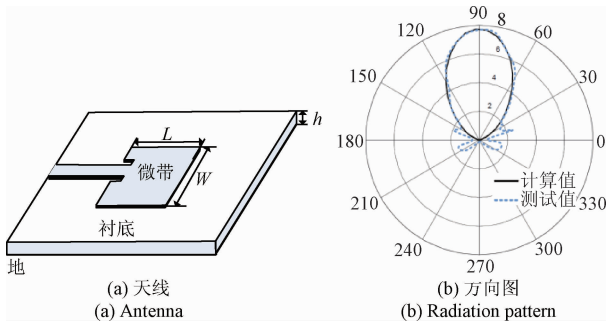


图4 阅读器天线参数

Fig.4 Parameters of reader antenna

采用美国国家仪器公司的VISN-E5800 RFID综合测试仪,进行ETC射频信号的测试。该测试系统由NI PXI-1065机箱、NI PXI-8108主控制器、NI PXIe-5644矢量信号发生/分析仪、NI PXIe-5640R IF RIOFPGA板卡,以及上位机组成。上位机中运行一个自定义的LabVIEW应用程序,实现测试板卡的硬件配置、测试参数设置、测试过程控制和数据的处理功能。中频FPGA板卡与矢量信号发生/分析仪一起产生连续载波信号,并通过射频信号功率放大器与低损耗射频电缆,经阅读器天线辐射出去。同时,采用安捷伦频谱分析仪,通过偶极子天线,捕获和储存接收信号。测试场景与测试仪器如图5所示。



图5 测试场景与仪器

Fig.5 Testing scenario and used instruments

4.2 测试参数及过程

射频参数如表2所示,参数选取参考了电子收费专用短程通信国家标准(GBT 20851.1-2007)和UHF RFID国际标准(ISO18000-6C)。

测试时将偶极子接收天线贴附在汽车前挡风玻璃的内侧,对标签接收功率值进行测量。表3所示为两处具有代表性的测试场景的几何参数。将ETC车道第一条栏杆内至阅读器天线正下方的车道区域作为预计可识别区域(测试区域),每间隔10 cm记录一次接收功率值,两处场景各测得15 m范围内150个数据。

表2 射频参数

Table 2 RF parameters

参数名称	数值	单位
载波频率	915	MHz
e. i. r. p	33	dBm
天线极化	右旋圆极化	-
阅读器天线增益 ^[12]	7.8	dB
偶极子天线增益	2.15	dB
无源标签激活灵敏度 ^[1]	-11	dBm
极化匹配系数 ^[9]	3	dB
标签功率传输系数 ^[9]	0.92	-
挡风玻璃的路径损耗 L_{ws}	2	dB

表3 几何参数

Table 3 Geometric parameters

参数名称	数值		单位
	场景1	场景2	
天线高度 H_{reader}	5	3.5	m
汽车引擎盖高度 H_{car}	1	0.8	m
天线下倾角 α	45	30	(°)
D_{lane}, D_r, D_l	3, 1, 0.5	2.5, 0.5, 0.7	m

用 $P_{tag}(j)$ 表示沿y轴方向第j个模型预测值, $P_r(j)$ 表示第j个实际测试值,基于下式计算预测误差大小(线性尺度,单位W):

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |P_{tag}(j) - P_r(j)| \times 100\% \quad (17)$$

同时基于现有文献中的UHF RFID路径损耗预测模型^[7,9,11],计算 $P_{tag}(j)$,进行预测精确性的对比研究。

5 实验结果

5.1 标签接收功率随距离变化情况

图6和7给出了场景1和2的预计识别区域内,y轴上,标签接收功率随距离变化的测试与计算结果。

对于场景1,在 $y = 1.78$ m处出现标签接收功率的最大值,这是由于阅读器天线下倾 45° ,最大辐射方向指向该位置的缘故。当 $y > 2$ m或 $y < 2$ m时,接收功率均出现下降趋势,特别地,在接近 $y = 0$ 时(即天线正下方),标签接收功率急剧减小,这是由于此方向的天线增益也急剧减小。图中均画出了标签阈值为-11 dBm时的直线,可以看出,识别最大距离接近 $y = 15$ m,但在此识别距离内(特别是接近识别边界的位置)出现了较大比例的识别盲点。场景2也有类似结论,只是最大功率值和最远

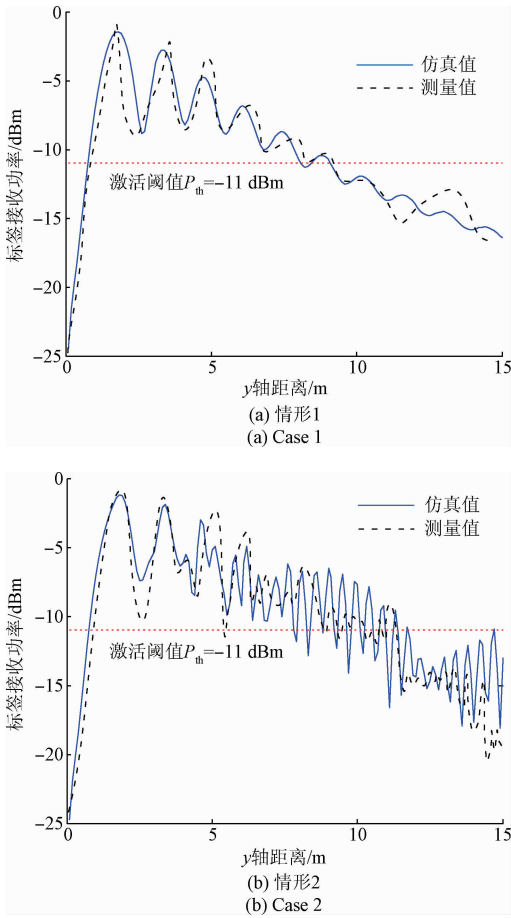


图6 标签接收功率仿真与测试结果对比(场景1)
Fig. 6 Simulation and test results of tag received power (scenario 1)

识别距离的位置由于几何参数的差异,有所不同。限于篇幅,本文仅给出两处场景的实验结果,但如前所述,ETC场景大多为收费广场模式,具有几何共性,电波传播规律明显,所以本文两处测试场景是具有代表性的。

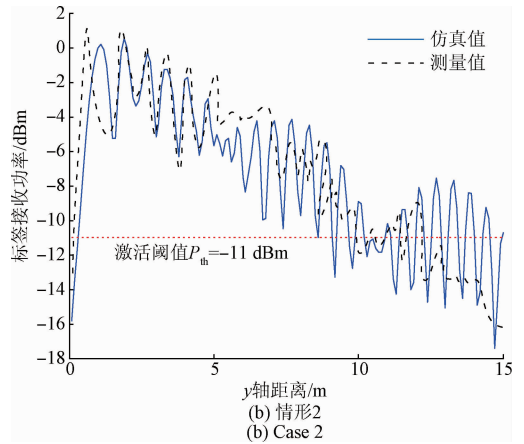


图7 标签接收功率仿真与测试结果对比(场景2)
Fig. 7 Simulation and test results of tag received power (scenario 2)

测试计算结果均表明,源至临道车辆的一次反射并没有显著改变最大标签接收功率位置,只是在远离阅读器发射天线的地方引起接收功率更大幅度的抖动。并且,预测曲线与测试曲线总体保持一致,本文方法准确预测了最大接收功率的位置,以及前面4~6次大幅抖动,即本文方法能准确预测由于大尺度衰落和多径传播所导致的接收功率下降点。这是由于前半段识别范围内,标签接收功率主要取决于视距和引擎盖的一次反射波,其他反射(散射)对于总体功率的影响不大,但对后半段的识别距离影响较大,测量与预测值出现的误差有所增加。

表4所示为场景1和情形2下,本文方法、现有模型^[3,7,9]以及商用仿真软件所预测的y轴上标签接收功率与实际测量值的误差,以及在同一台微机上计算时间的对比结果。计算时,对于对数正态模型和莱斯模型,通过随机生成10组 $P_{tag}(j), 1 \leq j \leq M$,并采用式(17)计算出误差值的平均值。

表4 计算耗时

Table 4 Computation time

模型	参数		误差/%		耗时
			场景1	场景2	
Friis	-	-	14.53	16.45	<1 s
对数	$n = 2.5$	$\delta = 5$ dB	11.52	13.25	<1 s
		$\delta = 10$ dB	14.56	17.23	<1 s
正态模型	$n = 3$	$\delta = 5$ dB	8.51	9.28	<1 s
		$\delta = 10$ dB	13.40	18.39	<1 s
莱斯模型	-	$K = 5$ dB	12.53	17.21	<1 s
	-	$K = 10$ dB	7.55	11.56	<1 s
	-	$K = 15$ dB	14.23	15.75	<1 s
Wireless	-	-	-	-	仿真 >15 m
Insite	-	-	3.28	2.12	建模 >1 h
本文模型	-	-	6.24	9.94	<1 s

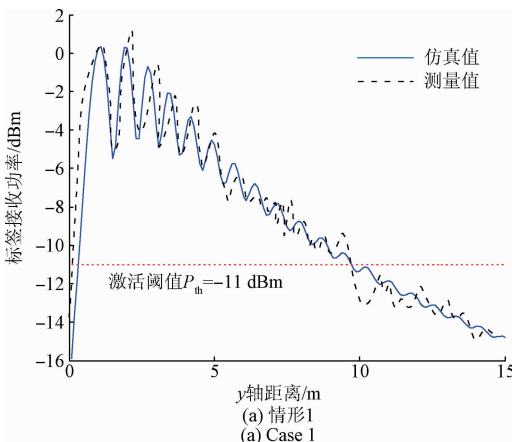


表4所示实验结果表明:本文方法的预测误差优于Friis模型,而对于对数正态模型,只有当参数 $n=3$,且 $\sigma=5$ dB时,其精度才与本文方法相当,而其他参数情形下的精度不及本文方法。对于莱斯模型,也有类似结果,要求取参数 $K=10$ dB。然而,在实际应用中,很难对两种经验模型的参数准确取值,这也正是本文方法融入了场景几何和射频特征参数的优点所在。由于计算的多径射线数远多于本文方法,商用仿真软件获得了很高的预测精度,但其场景的几何建模时间和运算时间却大大高于本文方法。

5.2 识别范围估计

本文方法能有效用于ETC场景几何参数的优化。

针对场景1的情形2,对于不同阅读器天线下降角(标签高1.5 m),图8所示为采用本文预测方法,ETC车道上标签接收功率的分布图(左半部分),以及所对应的可识别范围(右半部份)。选取实际场景1的可识别区域(如图1所示)为预测识别范围,即 $-1.5 < x < 1.5, 0 < y < 15$ 的ETC车道区域。预测结果表明:随着下降角的增加,最大识别距离逐渐减小;虽然下降角为 15° 时识别范围最大,但在远端出现了过多的识别盲点,而实际应用部署时,为减小干扰,并未将阅读器工作范围设置这么远,而是要求在某个具体范围内(如 $y < 8$)有很高的识别率(即盲点很少);而对于 $y < 1$ 的区域,因为是在阅读器天线旁瓣方向,所以也不能识别。

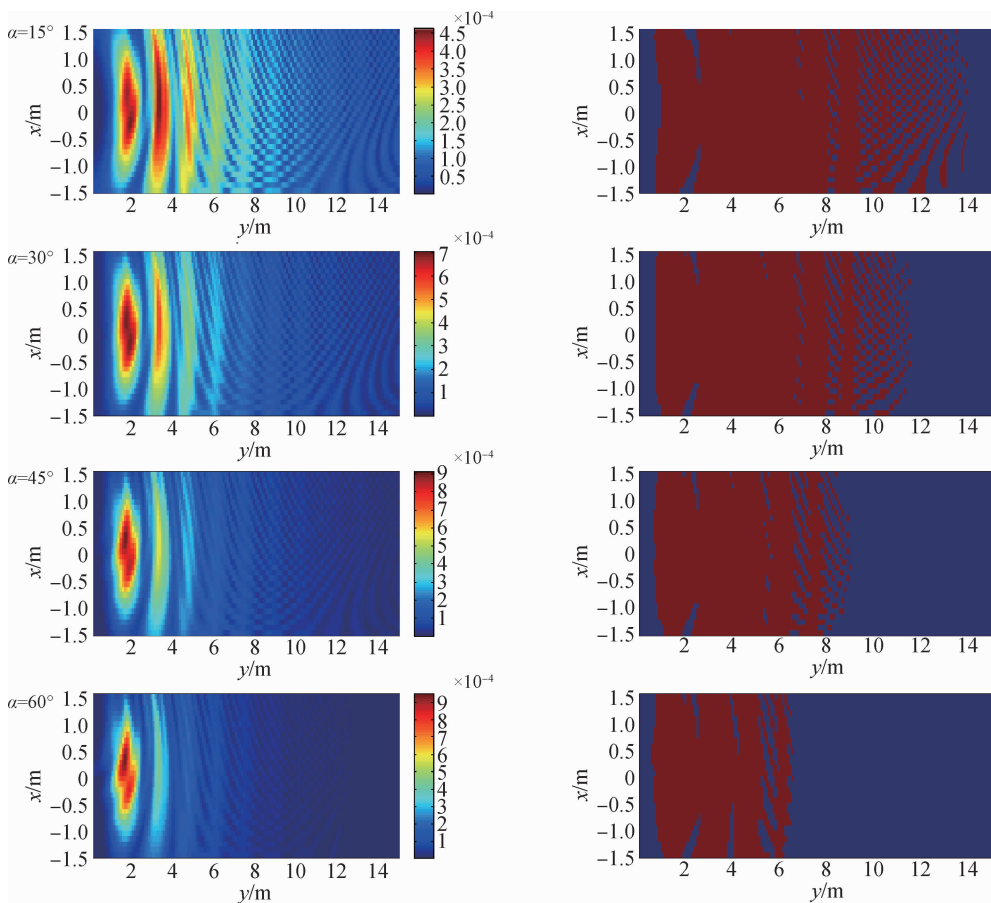


图8 车道上功率与识别区域分布情况

Fig. 8 Distribution of received power and identification rates on the ETC lane

5.3 天线角度与贴附高度变化时的识别率

故假设场景1要求在 $-1.5 \leq x \leq 1.5, 1 \leq y \leq 8$ 的区域内能获得高的识别率,图9所示为阅读器天线下降角以及标签粘贴高度对识别率影响情况的预测结果。

结果表明,场景1下,最大识别率出现在倾角在 $30^\circ \sim 50^\circ$ 内,且此时两种情形的识别率相差不大,情形1因

为不确定的多径波数量较少,识别率稍高于其它两种情形。但当倾角接近 0° 和 90° 时,多径分量丰富的情形2,识别率反而略高;对于小型车辆,引擎盖高1 m时,标签贴附于距地面1.3 m位置时已能获得最优识别率;而对于越野车,引擎盖高1.2 m时,这个数值为1.5 m,且随着贴附高度的进一步增加,识别率变化并不明显;而对于大

型货车,引擎盖高度为 1.5 m 时,较优的贴附高度为 1.8 m,随着贴附高度进一步增加,由于阅读器天线增益的变化,识别率略有减小。

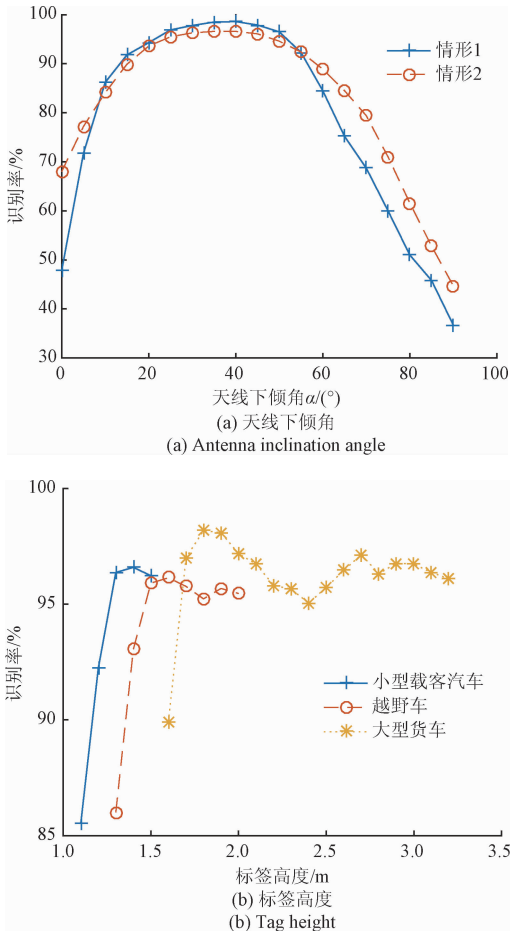


图9 识别率随几何参数变化情况

Fig.9 Identification rates under different geometric parameters

6 结 论

无源 UHF RFID 系统在 ETC 等智能交通领域具有较大的成本优势和应用潜力。本文通过分析 RFID-ETC 系统多径波的构成,提出了一种基于场景几何特征的识别范围预测方法。实际测试和数值仿真表明:给定典型 ETC 场景的射频和几何参数,本文方法能有效预测 ETC 车道上各处的标签接收功率,并准确给出前面 4~6 次波动的位置,且精确性优于统计模型,运算速度优于商用射线跟踪软件。对于文中特定场景的预测结果表明:当 ETC 车道上阅读器天线高度为 5 m 时,最优识别率出现在天线下倾角在 $30^\circ \sim 50^\circ$,并且多径分量越丰富,远离发射天线的位置反而能获得稍高的识别率,但最高识别率仍差于无临道车辆干扰情形;标签在挡风玻璃上的贴附

位置只需高于引擎盖 0.3 m 即可获得接近最优识别率。下一步的研究工作包括以识别率为目标函数,进行几何参数设置的最优化算法研究。

参考文献

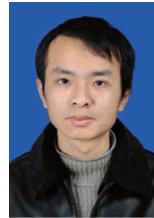
- [1] 苏圆圆,何怡刚,邓芳明,等. 基于无源 RFID 的混凝土湿度监测技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016,30(8):1235-1243.
SU Y Y, HE Y G, DENG F M, et al. Research on online monitoring technology for concrete humidity based on passive RFID [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2016,30(8):1235-1243.
- [2] 朱磊基,熊勇,李强,等. RFID 标准一致性测试系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2015,34(11):53-59.
ZHU L J, XIONG Y, LI Q, et al. Research on RFID standard conformance testing system [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(11):53-59.
- [3] 张剑勇,周尚儒,杨军. ETC 模式货车计重收费系统设[J]. 中国测试, 2016,42(7):84-87.
ZHANG J Y, ZHOU SH R, YANG J. Design of truck weighing toll system based on ETC mode [J]. China Measurement & Test, 2016,42(7):84-87.
- [4] 郑学理,付敬奇. 基于 PDR 和 RSSI 的室内定位算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015,36(5):1177-1185.
ZHENG X L, FU J Q. Study on PDR and RSSI based indoor localization algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5):1177-1185.
- [5] 李忠建,张雪凡,叶咏,等. 多标签环境下 RFID 系统的受限链路[J]. 电子测量技术, 2016,39(1):9-13
LI ZH J, ZHANG X F, YE Y, et al. Link constrains in RFID with intensive tags [J]. Electronic Measurement Technology, 2016,39(1):9-13.
- [6] POKHAREL R K, TOYOTA M, HASHIMOTO O. Analysis on effectiveness of wave absorbers to improve DSRC electromagnetic environment on express highway [J]. IEEE Transaction on Microwave Theory and Technique, 2005, 53(9):2726-2731.
- [7] LAZARO A, GIRBAU D, SALINAS D. Radio link budgets for UHF RFID on multipath environments [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2009(4):1241-1251.
- [8] MARROCCO G, DI GIAMPAOLO E, ALIBERTI R. Estimation of UHF RFID reading regions in real environments [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2009, 51(6):44-57.
- [9] 余开,何怡刚,李兵,等. 无源超高频 RFID 系统链路预算分析[J]. 仪器仪表学报, 2010,31(5):974-979.
SHE K, HE Y G, LI B, et al. Passive UHF RFID link

- budget analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(5): 974-979.
- [10] HOEFINGHOFF J F, JUNGK A, KNOP W. Using 3D field simulation for evaluating UHF RFID systems on forklift trucks [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(2): 689-691.
- [11] CHAKRABORTY R, ROY S, JANDHYALA V. Revisiting RFID link budgets for technology scaling: Range maximization of RFID tags [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(2): 496-503.
- [12] BEKKALI A, ZOU S, MEMBER S, et al. Performance analysis of passive UHF RFID systems under cascaded fading channels and interference effects [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(3): 1421-1433.
- [13] GAO Y, CHEN Y, BEKKALI A. Performance of passive UHF RFID in cascaded correlated generalized Rician fading [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(4): 660-663.
- [14] LI B, HE Y G, ZUO L, et al. Metric of the application environment impact to the passive UHF RFID system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(10): 2387-2395.
- [15] GONZALEZ R M, Y MIRANDA R L, MONTES L. Modeling the RFID radio channel applied to vehicular identification as a waveguide environment [C]. 9th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, 2012: 1-5.
- [16] DIMITRIOU A G, SIACHALOU S, BLETSAS A, et al. A site-specific stochastic propagation model for passive

UHF RFID [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014(13): 623-626.

- [17] HANEDA K, TAKADA J I, IWATA T, et al. Experimental determination of propagation paths for the ETC system equipment development and field test [J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2004, 87(11): 3008-3015.

作者简介



余开,分别在2003年、2006年和2012年于湖南大学获得学士、硕士和博士学位,现为合肥工业大学博士后、湖南科技大学讲师,主要研究方向为射频识别技术。

E-mail: shekai@126.com

She Kai received his B. Sc., M. Sc., and Ph. D. degrees all from Hunan University in 2003, 2006 and 2012, respectively. Now he is a post-doctor in Hefei University of Technology, and a lecturer in Hunan University of Science and Technology. His main research interest is technologies of RFID.



何怡刚(通讯作者),1996年于西安交通大学获得博士学位,现为合肥工业大学电气与自动化工程学院教授、博士生导师,主要研究方向为测试与诊断、智能信息处理。

E-mail: hyghnu@yahoo.com.cn

He Yigang(Corresponding author) received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 1996. Now he is a professor and supervisor for Ph. D. student in Hefei University of Technology. His main research interests include test and diagnosis, intelligent information processing.