

文章编号: 1002-0268 (2011) S1-0061-06

ETC 系统的邻道干扰问题分析及 射频指标控制

胡 宾, 李全发, 高文宝

(北京快通高速公路电子收费系统有限公司, 北京 100161)

摘要: 基于国标 ETC 车道系统的实际运行情况, 分析了邻道干扰产生的主要原因, 利用建立的邻道干扰车道模型和坐标系, 采用边界分析法计算了与解决邻道干扰相关的天线方向性图约束条件和与之相关的射频指标约束条件, 提出了 OBU 截止电平的概念。研究表明: 在合理的工程安装条件下, 通过设定必要的设备射频指标约束, 可在保证 OBU 与本车道 RSU 正常通信质量的基础上, 切断 OBU 和相邻车道 RSU 通信的下行通信链路, 同时, 在上行链路上采用相邻车道不同信道配置和采用 RSU 窄带接收, 从而防止避免邻道干扰的产生。最后根据理论分析和计算, 结合工程实际应用, 给出了可供参考的 RSU 天线方向性图约束条件和 OBU 接收射频参数范围。

关键词: 邻道干扰; 截止电平; 边界分析法; 电子收费; 坐标系; 方向性图

中图分类号: TN925.91; U491

文献标识码: A

RF Interference from Adjacent Lane and Selection of RF Parameters for ETC System

HU Bin, LI Quanfa, GAO Wenbao

(Beijing Kuaitong Expressway Electronic Toll Collection System Co., Ltd., Beijing 100161, China)

Abstract: Based on the actual operation of ETC lane system produced according to China national standard, main causes of RF interference from adjacent lane are analyzed at first. After the modeling of RF interference between lanes and establishing of coordination systems, the method of boundary analysis is adopted to calculate and analyze the constraints of RSU antenna directional pattern and related OBU RF parameters, and the definition of cut-off level for OBU receiver is given. The research shows that (1) with reasonable installation conditions and necessary RF parameters selection, downlink from RSU in adjacent lane to OBU could be cut off when ensuring the good communication quality between the OBU and the RSU on the same lane; (2) it is proposed to use narrow-band receiver system of RSU with different communication channels for uplink to avoid RF interference from adjacent lane. Lastly, according to analysis and calculation in theory, combined with application experiences, the constraints of RSU antenna directional pattern and a set of OBU RF parameters are given for reference.

Key words: RF reference from adjacent lane; cut-off level; method of boundary analysis; ETC; coordination system; directional pattern

0 前言

我国 ETC (Electronic Toll Collection, 电子收费)

国家标准 2007 年自颁布以来, 以京津冀和长三角两个示范区域为首的 10 多个省市先后建成并开通了高速公路联网 ETC 系统。截止到 2010 年年底, 国标

收稿日期: 2011-04-15

作者简介: 胡宾 (1973-), 男, 四川汶川人, 本科, 高级工程师. (hubin@ktetc.com)

ETC 用户量已超过 60 万, 仅北京地区就有 40 万 ETC 用户。我国的 ETC 应用发展已经进入快车道, 开始向更大范围和更大规模的联网应用推进。随着 ETC 车道建设越来越密集、ETC 用户量持续快速增长, ETC 工程中“邻道干扰”问题逐渐凸显。从实际运营的统计数据分析, 虽然总体上邻道干扰发生的几率较小, 但其影响不容忽视。邻道干扰可造成车道通行交易误操作, 影响正常的车道控制逻辑, 从而影响 ETC 车道的通行秩序。有效解决“邻道干扰”问题, 将对提高 ETC 系统服务水平以及 ETC 应用的大规模发展具有重要意义。

1 邻道干扰产生的原因

1.1 邻道干扰的定义

所谓“邻道干扰”, 是指一个 ETC 车道上的路侧单元 (RSU) 除了“读到”本车道正在通过的车辆车载单元 (OBU) 外, 还“读到”了相邻车道上正在通过车辆上的 OBU, 从而造成“误读”, 影响到鉴别各自车道归属, 这一现象被称之为“邻道干扰”。

1.2 邻道干扰产生的原因

根据我们在工程实践中的发现, “邻道干扰”发生主要有以下几个原因之一或多个原因的组合造成的。

(1) RSU 的天线方向性图

国标对 RSU 的天线方向性图进行了必要的约束, 虽然各厂商参照国标的要求进行了产品设计, 但在具体应用时没有根据实际工程的需要进行进一步的约束, 从而导致 RSU 辐射到相邻 ETC 车道的主瓣电平或副瓣电平衰减值不足以切断 RSU 和 OBU 之间的通信。

(2) 射频指标

为适用不同环境下的应用, 国标中对 RSU 和 OBU 的射频指标 (发射功率和唤醒/接收灵敏度) 仅做了上限限制, 然而在实际应用中各厂商产品虽然满足了上限要求, 但射频指标不一致, 部分产品射频指标相差较大 (比如 OBU 接收灵敏度设置的过高), 从而导致通信区域可能变大, 发生邻道干扰。

(3) OBU 的唤醒

国标规定 OBU 的唤醒灵敏度 ≤ -40 dBm, 接收灵敏度小于 ≤ -50 dBm, 两者之间留有一定的级差, 以确保 OBU 被 RSU 唤醒后与之可靠通信, 但目前基本上所有在用的 OBU 均是在接收到 RSU 的第 1 个 BST (信标服务) 后被唤醒, 只能在收到 RSU 的第 2

个 BST 后才能进行处理, 然而 OBU 收到的第 2 个 BST 既可能来自本车道的 RSU、也可能来自相邻车道的 RSU, 从而导致邻道干扰的发生。

(4) OBU 的信道选择

鉴于高速公路的单车道 ETC 应用需求, 国标中规定了两组信道, 因而在下行链路上 OBU 应采用宽带接收 (国标规定亦如此), 但由于技术水平限制, 目前所有的 OBU 都不能在接收到某一信道的 RSU 唤醒信号后有效的锁定在该信道上, 从而出现上述第 2 个 BST 及之后的下行数据帧有可能来自 (相邻车道的) 另一信道。

在上行链路上, OBU 在接收到某信道的信号并进行处理后, 即在该信道上进行响应, 如果相邻 ETC 车道的 RSU 也采用宽带接收或者与 OBU (车辆) 所在车道 RSU 采用同一信道, 则相邻车道也可能收到该 OBU 的上行信号并进行处理。

1.3 邻道干扰的解决思路

经过针对上述邻道干扰产生的原因分析, 可以清楚的看到, 为避免邻道干扰, 应该对 RSU 天线的方向性图以及 RSU 和 OBU 的射频指标进行必要的约束, 同时, RSU 天线的信道选择和接收方式也非常重要。

以下即从影响邻道干扰的上述因素出发, 通过建立实际应用中的 ETC 车道模型进行分析, 试图在不影响正常 ETC 车道 RSU 和 OBU 正常通信质量的基础上, 寻求对天线方向性图和射频指标的约束条件, 从而从设备本身寻求解决邻道干扰的措施

2 车道模型和坐标系

2.1 车道模型

如图 1 所示, 建立两个同向 ETC 车道的邻道干扰车道模型。图 1 中深色区域为 OBU 与本道 RSU 进行可靠通信交易的有效通信区域, $L1$ 和 $L2$ 之间区域为车辆行驶在车道上 OBU 可能出现的区域, RSU1 和 RSU2 分别安装在各自车道的龙门架上, 图 1 中, $RsuHeight$ 为 RSU 距地面的高度; $LaneWidth$ 为车道宽度; $IslandWidth$ 为两个 ETC 车道之间隔离带的宽度; $UnreachableWidth$ 为隔离带与有效通信区域之间的距离, 两者之间为车辆在本车道行驶中 OBU 不可能到达的区域; $CommFront$ 为有效通信区域距龙门架 (本道 RSU) 在车道平面上的最短距离; $CommLength$ 为有效通信区域的长度; $CommWidth$ 为有效通信区域的宽度; $ObuHeight$ 为车辆上的 OBU 距车道地面的高度。

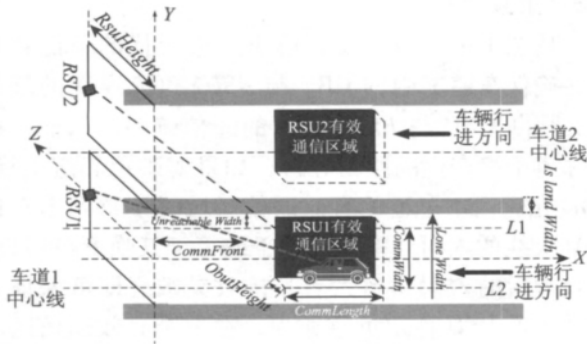


图1 ETC车道模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of ETC lane model

2.2 车道坐标系

为表示车辆行驶过程中 OBU 在本车道中的位置, 建立图 2 (a) 中所示的三维坐标系, 称为车道坐标系, 坐标系的原点为车道中心线与天线龙门架在地面上垂影线的焦点。

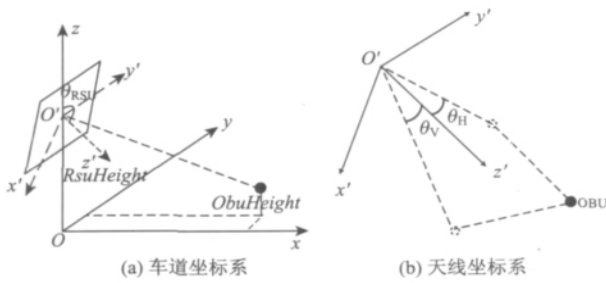


图2 车道坐标系和天线坐标系

Fig.2 Lanecoordinate system and antenna coordinate system

2.3 天线坐标系

为表示车辆行驶过程中 OBU 与 RSU 天线的相对位置关系, 以及 OBU 在天线方向性图中的角度, 建立图 2 (b) 中所示的天线坐标系, 其发射口面平行于 y 轴, θ_{RSU} 为 RSU 天线发射口面法线方向与车道坐标系中 z 轴的夹角, 工程上一般要求 RSU 天线安装在车道的中心线上方 (z 轴上), 所以天线坐标系的原点在上述车道坐标系中的坐标为 $(0, 0, RsuHeight)$; 天线坐标系 y 轴与车道坐标系 y 轴平行, x 轴在天线口面上垂直于 y 轴并指向车道路面, z 轴为天线口面的法线方向并指向车道路面。

2.4 方位角和俯仰角

图 2 中 θ_H 为 OBU 在 $y'o'z'$ 平面上投影点与 z' 轴的夹角, 称之为方位角; θ_V 为 OBU 在 $x'o'z'$ 平面上投影点与 z' 轴的夹角, 称之为俯仰角。天线水平方向的方向性图在 $y'o'z'$ 平面上, 垂直方向的方向性图在 $x'o'z'$ 平面上。

3 下行链路天线方向性图和射频指标的控制

下面的分析首先基于 RSU 与 OBU 之间通信的下行链路。此外, 由于 OBU 作为车载设备, 其天线尺寸受限, 因而可以将其接收天线方向性图近似为面向前方的半球形。

3.1 RSU 天线下行信号的衰减

正常情况下, RSU 和 OBU 之间的 LOS (Line of Sight, 视距传输) 除了前风挡玻璃外没有其它的电磁吸收或散射体, 因此空间信道可以按自由空间对待, 因而 RSU 天线发射出来的信号在到达 OBU 接收天线的过程中, 主要有两个方面的衰减, 即 RSU 和 OBU 之间距离上的衰减以及 OBU 处于 RSU 天线方向性图中不同方位角和俯仰角上的衰减。下面分别加以说明

(1) 距离衰减

按照 Friis 传输公式, OBU 接收到 RSU 天线发出信号在传输空间的距离衰减值为:

$$L_s = \frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2, \quad (1)$$

式中, P_t 为 RSU 天线发射功率的等效全向辐射功率 (EIRP); P_r 为 OBU 接收到的 RSU 天线发射信号的入射功率; d 为 RSU 与 OBU 之间的直线距离; λ 为 RSU 发射信号的波长。

工程通常将衰减以 dB 表示, 因而式 (1) 可以简化为:

$$L_{bs} = 32.45 + 20\log f + 20\log d. \quad (2)$$

本文中将下行信号频率取值为 5.83 GHz (国际中的信道 1), 则式 (2) 可以进一步简化为:

$$L_{bs} = 47.76 + 20\log d.$$

(2) 天线方向性图的衰减

天线方向性图在直角坐标系中分为水平方向性图和垂直方向性图, 一般的约束以与天线主轴之间不同的方位角或俯仰角夹角所对应的 (与天线主轴最大值方向) 衰减进行, 这个衰减一般以 dB 值表示。因而天线方向性图的衰减为水平方向性图的衰减与垂直方向性图的衰减之和。因而 OBU 接收到 RSU 天线发射出微波信号的衰减值为距离衰减与 OBU 在天线方向性图中不同位置 (以方位角和俯仰角表示) 所对应的衰减之和, 所以 OBU 接收到 RSU 发出信号的总衰减 L_a (单位为 dB) 可以表示为:

$$L_a = L_{bs} + L_h + L_v, \quad (3)$$

式中, L_{bs} 为距离衰减; L_h 为 OBU 在 RSU 天线水平方

向图中的方位角所对应相对于天线主轴最大方向的衰减; L_v 为 OBU 在 RSU 天线水平方向图中的俯仰角所对应相对于天线主轴最大方向的衰减。

3.2 ETC 车道参数

从上章的车道模型可以看出, RSU 天线方向性图参数的选择取决于有效通信区域的位置和尺寸大小、天线的高度、安装角度和其在水平方向的位置、车道宽度和隔离带宽度等。

在工程上, 车道宽度和隔离带宽度一般分别取值为:

$$\text{LaneWidth} = 3.2 \text{ m},$$

$$\text{IslandWidth} = 2.2 \text{ m}.$$

如前文所述, RSU 一般均安装在车道的正中间, 但 RSU 的安装高度、OBU 的安装高度和有效通信区域尚未有统一要求, 这里取我们工程上常用的取值进行分析, 即:

$$\text{RsuHeight} = 5.8 \text{ m};$$

$$\theta_{\text{RSU}} = 60^\circ;$$

$$\text{CommFront} = 0 \text{ m};$$

$$\text{CommLength} = 6 \text{ m};$$

$$\text{UnreachableWidth} = 0.7 \text{ m}.$$

市场上车身最小宽度为 1.5 m 左右, 考虑到一定的安装误差和车辆行驶实际情况, 设定该参数), 即 $\text{CommWidth} = 1.8 \text{ m}$ 。

OBU 一般安装在车辆前挡风玻璃的中间位置, 其安装距地面高度通常为 1.2 m 左右, 所以有效通信区域的高度, 即 ObuHeight 取值设为 1.2 m。

3.3 射频指标

从图 1 中可以看出, 解决邻道干扰的关键就是在确保车道 1 中的 OBU 与 RSU1 可靠通信的基础上, 切断 OBU 与 RSU2 之间的通信链路。因而, 根据邻道干扰产生的原因分析, 如果要避免邻道干扰, OBU 在进入本车道的有效通信区域时接收到本车道 RSU 天线的入射功率需要大于或等于其唤醒灵敏度, 被唤醒后的入射功率大于其接收灵敏度即可保证其余本车道 RSU 稳定可靠通信, 在整个有效通信区域内接收到邻道 RSU 天线的入射功率应小于一个固定的功率值, 这个值定义为截止电平, 即 OBU 收到天线的入射功率小于该值时将不进行处理。

在下行链路上, 与邻道干扰相关的关键射频指标包括 RSU 的发射功率 (EIRP, 等效全向辐射功率) 和 OBU 的唤醒灵敏度、接收灵敏度和截止电平。

3.4 RSU 天线方向性图的约束条件

在有效通信区域确定以后, 可以采用边界分析法, 即选择该通信区域的关键点所对应的方位角和俯仰角对 RSU 方向性图进行约束, 因为相邻 ETC 车道 RSU 的天线和射频指标可以认为完全一致, 所以邻道 (车道 2) RSU 天线对本道 (车道 1) 有效通信区域的影响等同于本道 RSU 天线对邻道有效通信区域的影响, 因而可以选择图 1 中两个有效通信区域的如下关键点进行天线方向性的约束。

图 3 为车道坐标系有效通信区域内各关键 (边界) 点在天线坐标系上水平平面 $z'o'y'$ 和垂直平面 $z'o'x'$ 上的投影, (a) 中各关键点与车道 1 RSU 之间的距离衰减和其在天线坐标系中的方位角和俯仰角如表 1 所示。

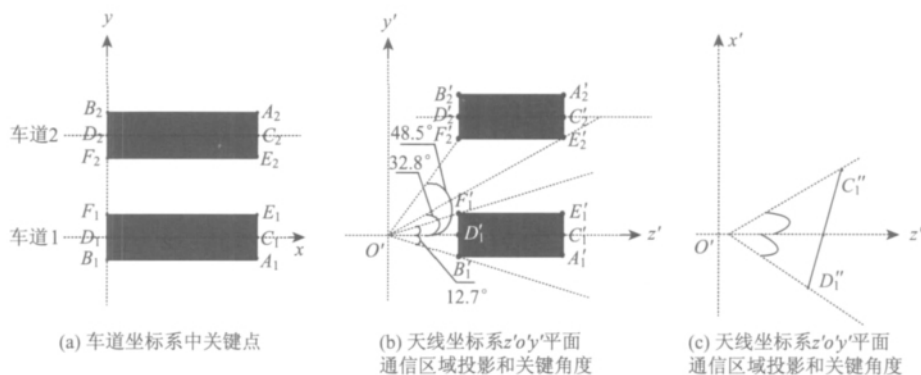


图3 有效通信区域在天线坐标系中的投影

Fig. 3 Effective communication zone's projecting in antenna coordination system

从图 3 和表 1 可以看出:

(1) 邻道干扰的抑制对于水平方向性图要求比较严, 主瓣在方位角 $-13^\circ \sim 13^\circ$ 之间变化应比较平缓以确保本车道有效通行区域内的可靠通信, 而在

$13^\circ \sim 33^\circ$ 以内衰减幅度应比较大以抑制邻道干扰。

(2) 垂直方向性图在本车道有效通信区域俯仰角的范围为 $-30^\circ \sim 22.5^\circ$, 其主瓣应足够宽, 以确保本车道有效通信区域内的可靠通信, 亦即副瓣应

出现在上述角度范围之外, 且副瓣电平应小于该范围内最小的衰减值。

(3) 对于本车道而言, A_1B_1 和 E_1F_1 在本车道 RSU 天线坐标系关于 z' 轴对称, 因而可以只考虑 E_1F_1 边的情况。

(4) 对于相邻车道的抑制情况, 同前所述, 可以只考虑 E_2F_2 或 E_1F_1 边。

假定 RSU 的发射功率 (EIRP) 为 P_t , OBU 的唤醒灵敏度为 P_{wk} 、接收灵敏度为 P_s 、截止电平为 P_{co} (以上单位均为 dBm), 则 OBU 在通信区域内任一点 a 接收到天线入射功率 $P_r(a)$ 为:

表 1 车道坐标系中的关键点坐标、距离衰减和天线方向图中的角度

Tab. 1 Coordinates, distance attenuations, and angles in antenna directional pattern for key points in lane coordinate system

点	车道坐标系 (x, y, z)	距离 衰减/dB	RSU 天线坐标系	
			方位角/(°)	俯仰角/(°)
S	2.66, 0, 1.2	62.3	0	0
A_1	6, -0.9, 1.2	65.4	-7.3	22.4
B_1	0, -0.9, 1.2	61.2	-12.7	-29.4
C_1	6, 0, 1.2	65.3	0	22.5
D_1	0, 0, 1.2	61.0	0	-30.0
E_1	6, 0.9, 1.2	65.4	7.3	22.4
F_1	0, 0.9, 1.2	61.2	12.7	-29.4
E_2	6, 4.5, 1.2	66.6	32.8	19.2
F_2	0, 4.5, 1.2	63.9	48.5	-20.9
C_2	6, 5.4, 1.2	67.1	37.7	18.2
D_2	0, 5.4, 1.2	64.8	53.6	-18.9
A_2	6, 6.1, 1.2	67.5	41.1	17.4
B_2	0, 6.1, 1.2	65.4	56.9	-17.5

$$P_r(a) = P_t(a) - L_{fs}(a) - L_v(a) - L_h(a)。$$

设 OBU 在通信区域内接收到本车道 RSU 天线的入射功率值为 P_{r1} , 为保证本车道有效通信区域的可靠通信, 则应有: $P_{r1}(C_1) \approx P_{wk}(C_1)$ 点的要求即为对垂直方向性图上俯仰角 22.5° 的要求); $P_{r1}(E_1) \approx P_{wk}$; $P_{r1}(D_1) \approx P_s(D_1)$ 点的要求即为对垂直方向性图上俯仰角 -30° 的要求); $P_{r1}(F_1) \approx P_s$ 。

在此条件下, 由于通信距离越小或方向性图主瓣内俯仰角角度越小, 衰减越小, 所以有效通信区域内各点均能保证有效通信, 另外, 从车道中线上 C_1 点到 D_1 点的俯仰角变化幅度和距离衰减变化综合分析也可以看出, 从工程实现上 OBU 的唤醒灵敏度和接收灵敏度应尽可能的接近。

设 OBU 在通信区域内接收到相邻车道 RSU 天线的入射功率值为 P_{r2} , 为抑制相邻车道 RSU 天线对本车道有效通信区域的干扰, E_1F_1 线上的任意一点 a (包括 E_1 和 F_1 点), 均应有 $P_{r2}(a) < P_{co}$ 。

3.5 计算机仿真计算

从以上对天线方向性图的约束条件可以看出, 合理的 OBU 射频接收指标要求, 包括唤醒灵敏度、接收灵敏度和接收截止电平, 是进行 RSU 天线方向性图设计和发射功率 (EIRP) 设置的基础。通过国标对射频指标的规定、上述约束条件和工程上实现的难易情况, 可以首先确定 RSU 和 OBU 射频指标的选择范围:

$$-50 \text{ dBm} < P_{wk} \leq -40 \text{ dBm};$$

$$-55 \text{ dBm} \leq P_s \leq -50 \text{ dBm};$$

$$-65 \text{ dBm} \leq P_{co} < -55 \text{ dBm};$$

$$20 \text{ dBm} \leq P_t \leq 33 \text{ dBm}。$$

根据前述的 RSU 天线方向性图关键角度和国标中关于 3 dB 带宽角度的要求, 通过分别设定水平和垂直方向性图上 3 dB 角和关键角相对于主轴最大方向上的最小衰减值得拟合出 RSU 方向性图的变化曲线, 以 1 dB 为上述射频指标和最小衰减值的步进值, 采用枚举法进行计算机仿真计算, 要求 E_1F_1 线上各点满足本车道 RSU 天线的有效覆盖和切断邻道 RSU 天线的下行通信链路, 对于方向图上关键点的衰减需要与 RSU 厂商进行探讨可实现性, 设定 RSU 天线方向性图的关键点角度约束条件为 (从设计的方便性上, 对上述天线方向图中的部分角度范围做了近似取整并且更严格, 图 4 即为某型号符合该设计条件并已实现的 RSU 天线方向性图)。

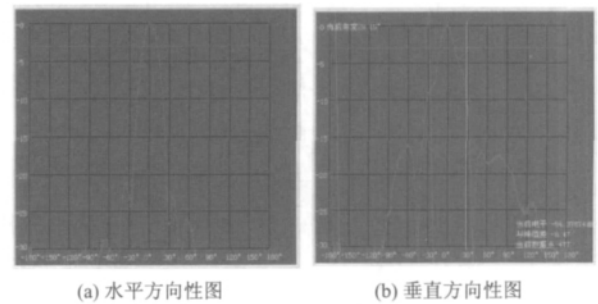


图 4 RSU 天线方向性图实例

Fig. 4 Example of RSU antenna directional pattern

水平方向性图: -3 dB 角波束宽度为 30° (对应 B_1 点的 12.7°), -10 dB 角波束宽度为 40° (保证曲线的变化趋势), -20 dB 角波束宽度为 60° (对应图 3 中的 E_2 点 32.8°);

垂直方向性图: -3 dB 角波束宽度为 40° (国标

规定 $<45^\circ$, 对应 C_1 点的 22.5°) , -10 dB 角波束宽度为 60° (对应 D_1 点的 30°)

在上述天线方向性图条件下, OBU 的接收射频参数要求为: 唤醒灵敏度为 -46 dBm, 接收灵敏度为 -50 dBm, 接收截止电平为 -60 dBm; RSU 的发射功率的范围为 $22 \sim 25$ dBm 之间可调, 如果考虑到车窗玻璃的衰减为 $2 \sim 3$ dB, RSU 的发射功率可以调整为 $25 \sim 27$ dBm。

在上述要求下, 计算机仿真计算上验证是完全可以避免邻道干扰的。

4 上行链路天线方向性图和射频指标的控制

由于相邻车道 RSU 天线的下行链路被切断, OBU 与 RSU 之间通信上行链路的要求则不需要太严格, 只要保证 OBU 的上行信号不对邻道 RSU 的接收产生影响即可, 既可以通过下行链路的上述分析和要求进行分析以及天线方向性图和射频指标的控制, 也可以通过 RSU 采用不同信道设置和窄带接收来实现, 从节约成本和实现的方便性考虑, 本文中推荐采用后一种方案。

5 结论

(1) 国标 ETC 系统中的邻道干扰可以通过对 RSU 和 OBU 设备本身的天线射频指标进行必要的约束条件解决;

(2) 对于 RSU 和 OBU 设备天线射频指标的约束条件主要是对下行链路的约束, 即在保证 OBU 与本道 RSU 可靠通信的基础上, 切断相邻 ETC 车道 RSU 的下行信号, 因而必须定义并设置一个合理的 OBU 接收截止电平。上行链路的约束可以通过相邻 ETC 车道设置不同信道并在 RSU 窄带接收的条件下实现 OBU 与 RSU 之间通信的上行信号切断。OBU 射频接收指标的约束 (唤醒灵敏度、接收灵敏度和截止电平) 可以在给定的 RSU 天线方向性图特定角度的约束条件下, 在确保工程可实现和充分验证的前提下, 在国标基础上制定一组适应工程应用的指标要求, 文中给出了一组可实现的指标范围。

(3) RSU 天线指标的约束即是对其天线方向图的约束, 可以根据车道布局、RSU 天线安装条件, 找到边界点进行分析并结合 OBU 的射频接收指标的

约束给定限定条件, 因而在车道布局设定的条件下, 需要制定 RSU 和 OBU 的工程安装规范, 并设置可靠通信区域的尺寸, 以便于天线的设计和射频指标的设置。

参考文献:

References:

- [1] GB/T20851.1-2007, 电子收费 专用短程通信 第1部分: 物理层 [S].
GB/T20851.1-2007, Electronic Toll Collection-Dedicated short Range Communication-Part1: Physical layer [S].
- [2] EN 12253: 2004, Road Transport and Traffic Telematics-Dedicated Short-range Communication-Physical Layer Using Microwave at 5.8 GHz [S].
- [3] GB/T20851.3-2007, 电子收费 专用短程通信 第4部分: 应用层 [S].
GB/T20851.3-2007, Electronic Toll Collection-Dedicated Short Range Communication-Part 1: Application Layer [S].
- [4] ARIB STD-T75, Dedicated Short-range Communication System ARIB Standard Version 1.0 [M]. Japan: Association of Radio Industries and Businesses (ARIB), 2001.
- [5] 徐永斌, 何国瑜, 卢才成, 等. 工程电磁场基础 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1992.
XU Yongbin, HE Guoyu, LU Caicheng, et al. Engineering Electromagnetics Basis [M]. Beijing: Beihang University Press, 1992.
- [6] JOHN D K, RONALD J. 天线 [M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2004.
JOHN D K, RONALD J. Antennnas: for All Applications [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [7] MAKAROV S N. 通信天线建模与 MATLAB 仿真分析 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006.
MAKAROV S N. Antenna and EM Modeling with MATLAB [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2006.
- [8] 胡树豪. 实用射频技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
HU Shuhao. Practical Radio Frequency [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.