

# 高速公路 ETC 车道单双天线布局的分析与比较

金 涛，张海峰，李沁南，马 力，刘毅明

(西安公路研究院，陕西 西安 710054)

**摘要：**为了分析在 ETC 专用车道建设中双天线布局的必要性，采用单天线与双天线布局相比较的方法，通过对陕西省路网环境及 170 多万条交易数据分析，并计算交易耗时和行车安全约束的车辆通行限速，认为双天线布局并不会提高车辆的通过速度，交易成功率也不优于单天线布局。陕西省百余条 ETC 专用车道均采用单天线布局。实践证明，单天线布局能够大幅节约 ETC 车道的建设和维护成本，降低系统故障率和逻辑处理复杂度，能够满足 ETC 建设要求，很好地为公众服务。

**关键词：**智能交通；ETC；天线布局；通行速度；交易成功率

中图分类号：TN911.7-34；U491

文献标识码：A

文章编号：1004-373X(2012)17-0150-04

## Analysis and comparison of single-antenna and dual-antenna layout for ETC lane of highway

JIN Tao, ZHANG Hai-feng, LI Qin-nan, MA Li, LIU Yi-ming

(Xi'an Highway Research Institute, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In order to analyze the necessity of the dual-antenna layout in construction of the ETC special lane, the dual-antenna layout was compared with the single-antenna layout. Through analyzing the expressway network environment and more than one million seven hundred thousand charge data of Shaanxi province, in addition, calculating the maximum speed limit of highway vehicles based on transactions processing time and driving safety constraint, it was considered that double-antenna layout can not increase the speed of vehicles and the transaction success rate. All the ETC special lanes adopted the single-antenna layout in Shaanxi province. The practice proves that the single-antenna layout can save the cost of the ETC lane construction and maintenance, reduce the system failure rate and logical processing complexity, meet the needs of the ETC construction, and serve the public well.

**Keywords:** intelligent transportation; ETC; antenna layout; the passing speed of vehicle; transaction success rate

## 0 引言

随着我国经济发展和对交通运输需求的增长，传统收费模式已成为制约高速公路通行能力的瓶颈。电子不停车收费(Electronic Toll Collection, ETC)作为解决这个瓶颈的有效手段已成为高速公路收费的主要发展方向。它是通过路侧单元(Road Side Unit, RSU)和车载单元(On Board Unit, OBU)之间进行通信与信息交换，实现对车辆的自动识别，并从用户的专用账户扣除通行费，从而达到不停车自动收费<sup>[1]</sup>。为了提高收费站的通行能力和服务水平，管理者最关心的是如何提高 ETC 车道的车辆通过速度和交易成功率，因此在国内部分高速公路中采用了 ETC 双天线建设方案。

对 ETC 的研究，大多数论文主要集中在 ETC 的技术实现、缴费方式配置、建设经验及 ETC 车道数对收费站服务水平的影响等方面<sup>[2-5]</sup>，而 ETC 系统的单天线与双天线方案对比，未见相关文献阐述。采用双天线方

案，除要增加天线设备外，还需增加线圈车检器等设备，势必增加了项目建设的造价和工程量，增大了系统的故障率、复杂度和维护成本。分析对比单双天线使用效果，对于合理设计 ETC 系统及降低成本，具有实际的工程价值。

## 1 ETC 车道单天线与双天线布局

### 1.1 ETC 车道单天线布局

单天线方案是在 ETC 车道内布设一台 RSU 设备，位于收费岛前部，其 DSRC (Dedicated Short Range Communications) 典型通信区域(简称通信区)长度为 10 m。车辆通过时，RSU 与 OBU 进行通信和信息交换，完成收费交易，自动栏杆机抬杆放行，车辆无需停车即可通过车道。但在实际使用中，ETC 交易存在失败的可能，为保证车辆通行安全，通信区与栏杆之间留有 10 m 的缓冲区，当交易失败时，车辆可在缓冲区内制动停车，防止撞杆等不安全事件的发生。示意图如图 1 所示。

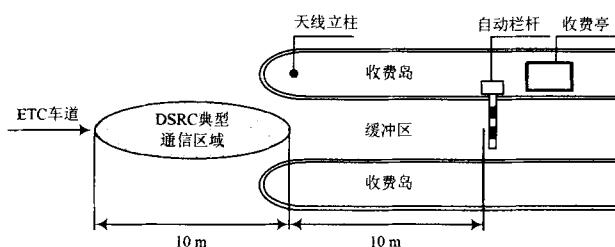


图1 ETC车道单天线布局示意图

## 1.2 ETC车道双天线布局

双天线方案即在ETC车道布设两台RSU设备,分别位于收费岛前部和自动栏杆机前,存在两个DSRC典型通信区域,即A区(远区通信区域)和B区(近区通信区域),长度分别为10 m和8 m,B区结束位置与自动栏杆机之间只有2 m距离。示意图如图2所示。

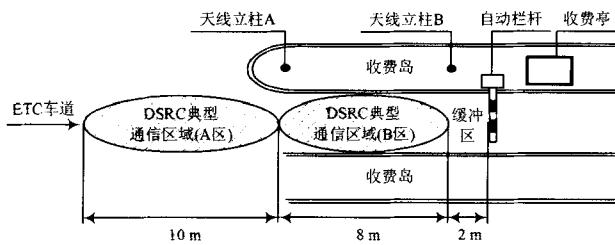


图2 ETC车道双天线布局示意图

在正常情况下,天线A为主天线,当车辆驶入A区后,天线A与OBU通信即可完成交易。在异常情况下,车辆通过A区但交易失败,车辆继续行驶进入B区,由天线B与OBU通信,为了保证交易的安全性和数据的完整性,需要重新尝试交易,而无法继续在A区中未完成的交易。

## 2 ETC车道的车辆限速分析

### 2.1 交易耗时约束的车辆通行限速对比

为保证车辆在通过通信区域时有足够的时间完成ETC交易,车辆通过的最大速度应满足以下关系式:

$$v_{\max} = L/t_{\max} \quad (1)$$

式中: $v_{\max}$ 为最大允许速度; $L$ 为典型通信区域长度; $t_{\max}$ 为ETC交易最大耗时。

目前大多数ETC系统都采用双片式电子标签加双界面CPU卡的组合方式,并以CPU卡作为数据存储介质。国家交通运输部颁布的《收费公路联网电子不停车收费技术要求》中规定了CPU卡数据格式,其中包含了多个保留文件。各省市可对不同变长记录保留文件进行读写,以实现不同应用,因此各地ETC交易时间长短不尽相同。此外,OBU安装高度、OBU电量、车辆贴膜、天线功率等都将是影响ETC交易效率的因素<sup>[6]</sup>。

以陕西省数据作统计,采集全省2011年9月至2011年12月所有的ETC交易耗时数据,总计

1 711 528条记录,经过分析,绝大多数(99.9%)的ETC交易可以在718.2 ms内完成,即可认为陕西省路网环境下ETC交易所需最大时间为718.2 ms。

单天线ETC车道的通信区长度为10 m,将 $L=10 m, t_{\max}=718.2 ms$ 代入式(1),可得允许车辆最大通过速度为50.13 km/h。

双天线ETC车道中,A,B通信区长度分别为10 m和8 m,且A,B区域内的两次交易是完全独立的,因此 $L$ 取A,B通信区长度较短的一个,将 $L=8 m, t=718.2 ms$ 代入式(1),可得允许车辆最大通过速度为40.1 km/h。

由此可知,从保证完成交易所需时间的角度分析,双天线ETC车道允许车辆的最大通过速度比单天线ETC车道慢。

### 2.2 行车安全约束的车辆通行限速对比

#### 2.2.1 制动距离

在实际的ETC使用中,存在部分交易失败而栏杆未抬起的情况,从行车安全的角度考虑,车辆需在必要的情况下制动停车,其安全距离可参照道路交通标志中停车视距的计算方法<sup>[7-9]</sup>,公式如下:

$$S_s = L_1 + S_T + L_0 \quad (2)$$

式中: $L_1$ 为制动反应时间的行驶距离(空驶距离); $S_T$ 为制动距离; $L_0$ 为安全距离(5 m)。

由式(2)可知,停车视距的距离由制动反应时间的行驶距离、制动距离和安全距离三部分组成。但车辆通过通信区所需的时间远大于制动反应时间(0.1 s, 0.2 s),驾驶人员有充足的时间做出反应,在计算停车视距时可不考虑制动反应时间的行驶距离,即 $L_1=0 m$ 。

在单天线ETC车道存在10 m缓冲区。将 $S_s=10 m, L_1=0 m, L_0=5 m$ 代入式(2),可得车辆的安全制动距离为 $S_T=5 m$ 。

在双天线ETC车道,缓冲区仅为2 m,无法保证正常的行车制动安全,车辆需要在进入B区时开始制动,则其停车视距的总距离与单天线ETC车道相同,即 $S_s=10 m$ 。根据式(2),同理可得车辆的安全制动距离为 $S_T=5 m$ 。

#### 2.2.2 安全制动初速度

车辆行车制动分为两个过程,首先是制动力从零达到最大制动力,该过程的制动力与加速度的绝对值都是增大的,即车辆做变减速运动;其次是制动力达到最大后相对稳定地维持其大小,该过程车辆做近似匀减速运动。行车制动的距离为这两个过程行驶距离之和。

单双天线ETC车道的安全制动距离均为5 m,在此约束条件下,可依据国家标准《机动车运行安全技术

条件》(GB7258-2004)和《机动车安全技术检验项目和方法》(GB21861-2008)的相关要求推导出安全制动初速度的计算公式。通过ETC车道的车辆均为客车,属于国标中乘用车和其他汽车的范畴(后简称为车辆),其制动要求如表1所示。

表1 国家标准中有关车辆制动性能的要求

车辆状态	整车制动力率/%	制动力协调时间/s	
		液压制动	气压制动
空载	≥60	≤0.35	≤0.6
满载	≥50		

车辆制动率计算公式为:

$$L = F/(mg) \quad (3)$$

式中: $L$ 为整车制动力; $F$ 为制动力; $m$ 为整车质量; $g$ 为重力加速度。

对于变减速运动,速度等于距离对时间的变化率,加速度等于速度对时间的变化率,加加速度等于加速度对时间的变化率,即存在以下关系式:

$$v = dS/dt \quad (4)$$

$$a = dv/dt \quad (5)$$

$$\text{jerk} = da/dt = d^2v/dt^2 = d^3S/dt^3 \quad (6)$$

对式(6)、(5)、(4)积分,可得以下关系式:

$$a = \int \text{jerk} \cdot dt = \text{jerk} \cdot t + C_1 \quad (7)$$

$$v_t = v_0 + \int (jerk \cdot t) dt = v_0 + jerk \cdot \frac{t^2}{2} + C_2 \quad (8)$$

$$S = \int (v_0 + jerk \cdot \frac{t^2}{2}) dt = v_0 t + jerk \cdot \frac{t^3}{6} + C_3. \quad (9)$$

在匀减速运动中,距离和速度关系式为:

$$S = v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad (10)$$

$$v_t = v_0 + at \quad (11)$$

此外,根据牛顿第二定律有如下关系式:

$$F = ma \quad (12)$$

式(4)~式(12)中, $v$ 为速度; $v_0$ 为初速度; $v_t$ 为末速度; $S$ 为距离; $t$ 为时间; $a$ 为加速度;jerk为加加速度; $F$ 为力; $m$ 为质量。

其中速度、加速度、加加速度、力等均为矢量,在计算中约定车辆前进方向为正方向,重力加速度取 $g=9.8\text{ m/s}^2$ 。从表(1)中可以看出,满载的气压制动车辆在给定距离内允许的制动初速度最小,推导其计算式如下。

在制动力上升过程中车辆做变减速运动,将制动力协调时间设为 $t_s=0.60\text{ s}$ ,最大制动力率为 $L=50\%$ ,代入式(3),(7),(12),可得车辆达到最大制动力时的加速度为 $a_k=-4.9\text{ m/s}^2$ ,所需时间为 $t_s=0.80\text{ s}$ ,加加速度为 $\text{jerk}=-6.125\text{ m/s}^3$ 。将 $\text{jerk}=-6.125\text{ m/s}^3$ ,

$t_s=0.80\text{ s}, C_1=0, C_2=0, C_3=0$ 代入式(8),(9)可得车辆达到最大制动力时,存在以下关系式:

$$v_{ts} = v_{0s} - 1.96 \quad (13)$$

$$S_s = 0.8v_{0s} - 0.523 \quad (14)$$

制动力达到最大后相对稳定地维持其大小,车辆作匀减速运动。该过程的初速度即为上一过程的末速度,即:

$$v_{0y} = v_{ts} \quad (15)$$

将 $v_{ty}=0\text{ m/s}, a=-4.9\text{ m/s}^2$ ,代入式(11),(13),(15)可得:

$$v_{ty} = v_{0y} + at_y \Rightarrow t_y = (v_{0s} - 1.96)/4.9 \quad (16)$$

将 $v_{ty}=0\text{ m/s}, a=-4.9\text{ m/s}^2$ 代入式(10),(15),(16)可得:

$$S_y = v_{0y}t_y + \frac{1}{2}at_y^2 \Rightarrow \frac{1}{9.8}(v_{0s} - 1.96)^2 \quad (17)$$

根据式(14),(17)可得:

$$S = S_s + S_y = 0.102v_{0s}^2 + 0.4v_{0s} - 0.915 \quad (18)$$

以上各式中, $v_{0s}$ 为车辆制动初速度; $v_{ts}$ 为车辆变减速过程中的末速度; $v_{0y}$ 为车辆匀减速过程中的初速度; $v_{ty}$ 为车辆制动末速度; $a$ 为加速度; $t_y$ 为车辆匀减速过程时间; $S_s$ 为车辆变减速过程中行驶的距离; $S_y$ 为车辆匀减速过程中行驶的距离; $S$ 为车辆制动总行驶距离。

单双天线ETC车道允许的安全制动距离均为 $S_T=5\text{ m}$ ,将其代入式(18),可得车辆安全制动初速度为 $v_0=5.40\text{ m/s}$ ,即 $v_0=19.44\text{ km/h}$ 。

### 2.3 ETC车道的合理限速

通过对保证ETC交易耗时和行车安全的分析可知,虽然交易耗时很短,单双天线都可以允许车辆以较快速度通过ETC车道且完成交易,但为了保证在交易失败时车辆可以安全制动,车辆的通过速度都应在 $19.44\text{ km/h}$ 以下。由于停车视距中预留了 $5\text{ m}$ 安全距离,因此建议单双天线ETC车道的合理限速均应设定在 $20\text{ km/h}$ 以下,如表2所示。双天线ETC车道布局相比单天线布局,并不能提高车辆的通过速度。

表2 ETC车道的合理限速

天线布设类型	交易耗时约束的车辆通行限速/(km/h)	行车安全约束的车辆通行限速/(km/h)	车辆合理限速/(km/h)
单天线	50.13	19.44	20
双天线	40.1	19.44	20

### 3 ETC车道通过率

双天线ETC车道存在两个通信区域,即车辆通过时可以有两次交易机会,从而提高ETC车道的通过率。但系统需要控制车道的两台天线协同工作,协调逻辑较

为复杂,增加了系统内在错误存在的可能性。车辆通过车道时,系统通过线圈车检器的状态变化来实现正确的车辆定位和逻辑处理<sup>[10-11]</sup>,在单天线系统中,只需要 3 组线圈车检器,而在双天线系统中却至少需要 6 组。车道设备的增加提高了系统的故障率。这些因素都降低了 ETC 交易的成功率。

单天线 ETC 车道的通信区长度为 10 m,《收费公路联网电子不停车收费技术要求》建议的 ETC 车道通过速度为 20 km/h,则车辆通过通信区域的时间为 1 785.7 ms。而陕西省路网环境下 ETC 交易最大耗时为 718.2 ms,两次连续 ETC 交易之间 RSU 与 OBU 重新建立连接所需时间为 150 ms,则两次连续 ETC 交易所需总时间为 1 486.4 ms。这表明在陕西省路网中,车辆以 20 km/h 的速度通过车道,系统有足够的空间进行两次 ETC 交易,实现了在不增加系统处理逻辑复杂度和故障率的情况下,提高了 ETC 车道的通过率。

因此,在 ETC 车道通过率方面,双天线车道布局并不优于单天线车道布局。

#### 4 结语

通过对单双天线 ETC 车道的对比分析,两种布局方式在车道长度相同的情况下,允许车辆的通过速度是相同的。由于大多数单天线 ETC 车道的 DSRC 典型通信区长度都在 10 m 左右,车辆通过该区域的行驶时间能够满足连续两次 ETC 交易,在交易成功率方面,双天线布局并不优于单天线布局。而且,双天线布局增加了车道设备,使得建设造价、工程量和维护成本都有较大增长,处理逻辑更为复杂,系统的故障率也随之提高。因此,双天线布局的性价比不高,在 ETC 系统的建设中,不建议采用。

陕西省高速公路自 2009 年 5 月至今,已陆续建成

了百余条 ETC 专用车道,全部采用了单天线布局。在建设过程中,经过反复调试、改进优化,目前已使交易耗时大幅缩短,交易成功率明显提升。实践证明,单天线比双天线布局大幅节约了建设和维护成本,同时也完全可以满足国家交通运输部对 ETC 建设的有关要求,可以为公众提供良好的不停车收费服务。

#### 参 考 文 献

- [1] REN Z G, GAO Y B. Design of electronic toll collection system in expressway based on RFID [C]// Proceedings of 2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology. New York: IEEE Computer Society, 2009: 779-782.
- [2] 陈俊杰,山宝银.5.8 GHz 电子不停车收费技术综述[J].同济大学学报:自然科学版,2010,38(11):1675-1681.
- [3] 刘伟铭,李蓉.ETC 系统缴费方式随机选择模型[J].中国公路学报,2006,19(5):77-82.
- [4] 田寅,马涛,常鹏,等.不停车收费系统在西安咸阳国际机场专用高速公路中的应用[J].公路,2009(6):128-132.
- [5] 刘斌,潘红,路小波.ETC 车道数对收费站服务水平的影响仿真研究[J].公路交通科技,2008,25(1):120-123,150.
- [6] 李楠.ETC 车道通行效率影响因素分析[J].中国交通信息化,2011(1):68-69.
- [7] 杨继成,施莉娟,黄承明,等.车道布设的研究[J].交通与计算机,2004,22(4):23-26.
- [8] 马二顺.不停车收费系统(ETC)的应用及车道设计[J].公路,2004(8):315-317.
- [9] 迟峰.黑龙江省高速公路 ETC 车道布设的研究[J].办公自动化,2011(2):10-11.
- [10] 杨洋,黄征,金涛.基于 ETC 和 MTC 高速公路组合式联网收费系统设计[J].现代电子技术,2007,30(21):144-147.
- [11] 谢建华,钟健朋.电子不停车收费技术的软件实现与探索[J].微计算机信息,2007,23(27):47-49.

**作者简介:**金 涛 男,1978 年出生,上海嘉定人,硕士,工程师。主要研究方向为计算机技术在智能交通中的应用。

《物联网技术》月刊,国内统一连续出版物号 CN 61-1483/TP,国际标准连续出版物号 ISSN 2095-1302,邮发代号:52-253,定价 15 元/期。

**主要栏目:**国际动态,国内动态,专题介绍,领军人物,学术研究,成功案例,产品展示,企业黄页,知识讲座。

**发行对象:**主要投放于政府机构、科研院所、大型企业单位的决策、产品设计、研发人员,各军兵种的高科技人员、高校师生和电子爱好者。

**欢迎订阅,欢迎投稿,欢迎刊登广告! 欢迎参与战略合作!**

发行信箱: pub@iotmag.com 网址: www.iotmag.com

联系人:薛进良 029-83229007-8625 13709217694 QQ:794604350

罗凡 029-83229007-8600 18202967136 QQ:37962100

地 址:西安市金花北路 176 号陕西省电子技术研究所科研生产大楼六层(邮编:710032)

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>