

车载设备内置超宽带天线研究

唐 军, 潘文波

(中车株洲所电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 根据紧耦合能够有效拓展天线工作带宽的原理, 结合天线在强耦合安装环境下阻抗的变化规律, 研究贴片与金属地对天线阻抗的影响, 提出了一种能够嵌入金属机箱的超宽带共形天线。通过仿真技术表明: 该天线在 0.8~3.2 GHz 频段范围内的 S_{11} 均小于 -10 dB, 且天线增益大于 3 dBi。可见, 设计的天线能够满足列车无线通信系统对宽频带和共形的性能需求。

关键词: 车载设备; 紧耦合; 超宽带; 内置天线; 列车无线通信

中图分类号: U285; TN82

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.04.015

Research on the Ultra-wideband Internal Antenna for Train Equipment

TANG Jun, PAN Wenbo

(CRRC ZIC Research Institute of Electrical Technology & Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Base on the theory that tightly coupling can extend the bandwidth of the antenna, the rule in variations of antenna impedance in the strong coupled environment was used to study the influence of patch and metal ground on the impedance of the designed antenna. A new tightly coupled ultra-wideband internal conformal shape antenna which could be embedded in the metal box was introduced. The simulation results showed that the S_{11} of the designed antenna was less than -10 dB in the broad band from 0.8 GHz to 3.2 GHz, while the gain was greater than 3 dBi. Obviously, the designed antenna could meet the performance requirements of the train radio communication system for the wideband and conformal shape performance.

Keywords: on-board equipment; tightly coupling; ultra-wideband; internal antenna; train wireless communication

0 引言

随着移动通信技术的飞速发展, 无线通信系统对终端设备提出了越来越高的要求。天线作为无线通信终端设备的重要部件之一, 其性能对整个设备综合性能、外型尺寸和安装方式有着直接的影响。天线的小型化、易共形、宽频带设计是目前研究的重要方向, 也是未来天线发展的趋势。

目前主流手机采用 PIFA 天线, 具有小型化、多频带工作的优势, 但是辐射效率低且不适合嵌入安装在金属机箱内^[1]。双层耦合贴片天线具有周期单元小、单元之间耦合低、设计加工简单等优势^[2], 但在金属机箱安装环境下的天线带宽会受环境影响严重恶化,

难以满足系统的需求。紧耦合天线是通过紧密地布置天线单元, 增大单元间的电容效应来提高耦合, 实现单元天线小型化和超宽带设计^[3], 该方法主要用于阵列天线, 但没有用于单个天线的设计。本文提出了利用贴片与金属机箱之间的电容效应, 提高天线与安装环境的耦合, 从而拓展单个天线辐射带宽的思路。通过匹配电路的理论分析, 以及反复调整和多次优化, 最终设计出了超宽带的车载内置耦合天线。该天线在 0.8~3.2 GHz 的工作频段范围内, 天线 S_{11} 均小于 -10 dB, 同时, 天线增益均大于 3 dBi。该方法具有设计简单、易于共形安装等优点, 具备实际应用的性能。

1 紧耦合设计原理

基于紧耦合技术的阵列天线单元因具有周期小、宽带宽、剖面低等优势, 被广泛应用于超宽带天线阵

列^[4]。传统阵列单元没有考虑耦合作用,在满足天线辐射性能的条件下,很难同时具备小型化和宽频带的性能,紧耦合超宽带阵列天线利用单元间的强耦合来缩小天线尺寸,同时实现了小型化设计^[5]。2013年,Moulder W F 提出紧耦合等效电路模型^[6],该等效电路主要用于指导紧耦合阵列天线的设计,但没有考虑单个天线紧耦合的设计思路。

通过分析紧耦合实现阵列天线单元小型化和超宽带的原理,本文提出了能够适用于单个机箱内置天线的紧耦合设计方法。紧耦合内置天线与传统天线不同,天线 2 个贴片与金属机箱距离很近,因此会在 2 个贴片末端分别产生不同的耦合电容 C_1 和 C_2 ,其等效电路模型如图 1 所示。其中, Z_{in} 为馈电系统的输入阻抗, Z_0 为自由空间波阻抗, Z_{MC} 为天线周围的金属机箱引入的等效阻抗,贴片天线单元的等效电感分别为 L_{patch1} 和 L_{patch2} 。当贴片天线与金属机箱接地板距离小于四分之一波长时,传输网络呈感性;距离大于四分之一波长时,传输网络呈容性。

通过优化贴片与金属机箱间的耦合形式及强度,内置天线的阻抗特性可以抵消金属机箱引起的随波长(频率)

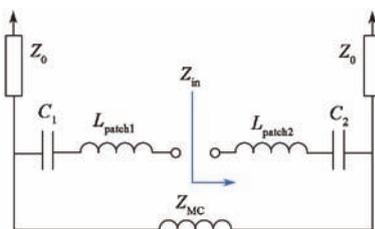


图 1 单个机箱内置天线的等效电路图

变化的阻抗,从而扩展了天线带宽。

2 内置天线技术指标

用于车载无线通信设备的内置天线,其天线辐射性能应满足宽频带、易共形和高效辐射的要求,同时应加工简单、便于安装,与设备机箱共形设计。车载天线的设计指标要求如下:

① 天线适用频段能够覆盖常用无线通信技术使用的频段,具体覆盖频段见表 1。

② 天线在 0.8~0.96 GHz 频段增益

不低于 1.5 dBi,在其他频段增益不低于 2 dBi;

③ 天线最大发射功率不小于 4 W;

④ 天线外形尺寸不大于 72 mm × 56 mm × 30 mm (长 × 宽 × 厚)。

⑤ 天线要嵌入安装在 223 mm × 130 mm × 72 mm 的金属机箱内,且完美共形。

3 内置天线设计及仿真验证

3.1 内置天线设计

本文设计了嵌入在金属机箱内的紧耦合超宽带天

线,该天线的具体设计结构如图 2 所示,设计的天线嵌入在一个 223 mm × 130 mm × 72 mm 的金属机箱内,其主要由金属贴片 1、贴片 2、同轴馈电线和开槽的金属机箱组成。贴片 1 和贴片 2 是印刷在介质基板上、下表面上的 2 个等腰梯形金属贴片,它们的尺寸相同且对称分布。金属贴片 1 和贴片 2 在 y 方向上的距离为 g ,梯形贴片的 2 条平行边的长度分别为 l_1 和 l_2 ,高度为 w 。贴片 1 到金属机箱开槽右边沿的距离为 g_1 ,贴片 2 到开槽左边沿的距离为 g_2 。金属机箱开槽的高度为 h ,宽度为 l ,金属机箱开槽右边沿到机箱最右端的距离为 39 mm。50 Ω 同轴馈电线的外导体与贴片 1 连接,内导体通过微带线与贴片 2 连接。设计中采用型号为 Rogers RT-5800 的介质基板,材料的相对介电常数为 2.2,覆铜厚度为 0.018 mm,介质基底厚度为 1.524 mm。

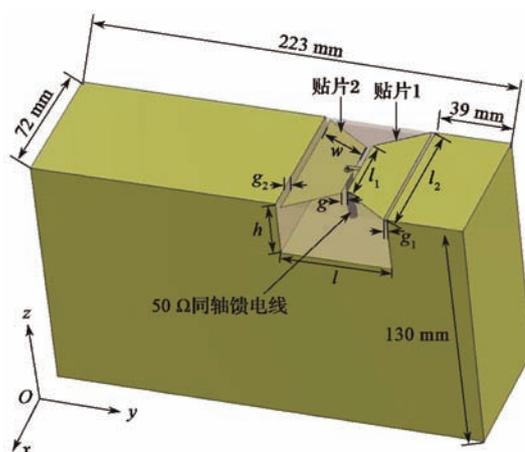


图 2 超宽带内置天线安装及设计图

3.2 内置天线的仿真验证

根据机箱内置天线的结构和安装环境,对内置天线和金属机箱结合在一起进行全波仿真。仿真频带范围设置为 0.5~3.5 GHz,覆盖技术指标要求的无线频带。通过全波仿真得到的天线 S_{11} 如图 3 所示,在 0.8~3.2 GHz 的 S_{11} 均小于 -10 dB,可见机箱内置天线在该频段内与馈电系统匹配良好。特别在 0.9 GHz 附近的 S_{11} 接近 -15 dB,在 2.4 GHz 附近的 S_{11} 低于 -30 dB,天线在这些关键频段的匹配非常好,天线能够高效地将馈电系统的行波转换成自由空间的电磁波。如果需要天线工作到更低频段,可以通过增加金属机箱开槽高度 h ,或者提高天线基板的介电常数。

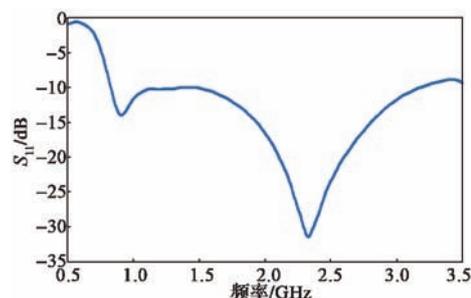


图 3 内置天线的 S_{11}

为了模拟内置天线在金属机箱环境下的远场辐射

特性, 利用有限元法同时对天线和机箱进行全波仿真分析, 所有边界条件设置为自由空间, 从而模拟天线和机箱放置在开阔空间中的辐射特性。由于内置天线的辐射性能随着工作频率不断变化, 为了更加详细地了解各个频段范围内天线的远场辐射情况, 将 0.9 GHz、1.8 GHz 和 2.6 GHz 共 3 个频点的远场方向图进行监控和分析。

内置天线的馈电点在 2 个金属贴片中间位置, 其馈电电流沿着贴片流向贴片与金属机箱开槽的缝隙边缘, 并强耦合到金属机箱表面。可见天线的主要表面电流沿着 y 轴方向, 从而辐射电场方向沿着 y 轴方向, 磁场方向沿着 x 轴方向。接下来分别对内置天线的电场面 (yOz 面) 的远场方向图和磁场面 (xOz 面) 的远场方向图进行仿真分析。如图 4 (a) 所示, 天线在电场面的远场方向图的增益为 3.18 dBi, 最大增益点出现在 $-90^\circ \sim 0^\circ$ 的范围内, 远场方向图没有完全对称, 但在 $\pm 60^\circ$ 范围内的增益波动较小。磁场面的远场方向图如图 4 (b) 所示, 天线增益为 2.92 dBi, 最大增益点出现在 0° 方向, 远场方向图对称分布。可见, 该天线在此频点的最大辐射增益大于 3 dBi, 在电场面和磁场面的远场方向图均比较平滑。天线在该频点的辐射效率为 -0.4 dB, 天线总体辐射性能较好。

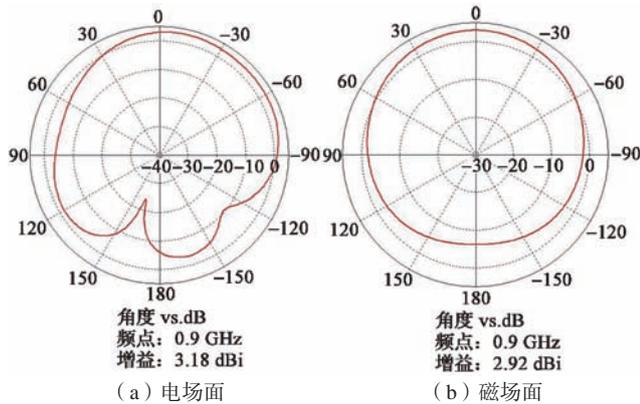


图 4 内置天线在 0.9 GHz 处的远场方向图

如图 5 所示, 天线在电场面的最大增益为 3.44 dBi, 方向图没有对称分布。在磁场面的最大增益为 2.54 dBi, 最大增益点出现在 0° 方向, 远场方向图对称分布。在电场面远场方向图的最大增益比磁场面的最大增益

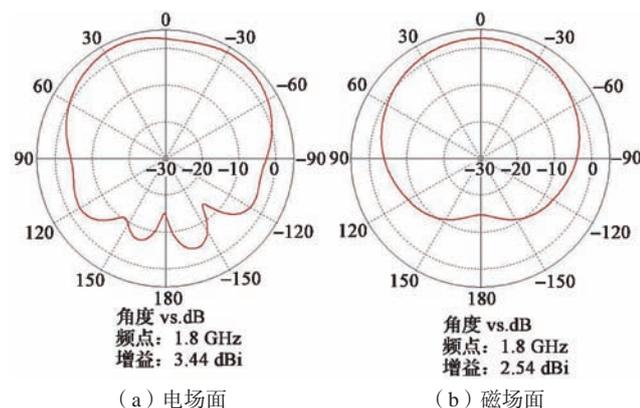


图 5 1.8 GHz 处的远场方向图

高 0.9 dB, 这主要是由于强耦合作用, 表面电流沿着机箱方向延伸, 增加了电场面的等效辐射长度, 提高电场面增益, 同时, 其不对称导致电场面的最大增益偏离 0° 方向。此外, 天线在 1.8 GHz 处的辐射效率为 -0.6 dB, 能够高效地转换导行波和空间自由波。

图 6 展示了内置天线在 2.6 GHz 处的远场方向图, 天线在电场面和磁场面的最大增益分别为 3.30 dBi 和 3.02 dBi。从图 4~图 6 可见, 在 3 个监控频点中, 电场面的远场方向图都不对称, 而磁场面的远场方向图相对天线 z 轴均对称分布。这是由于设计的内置天线在 y 轴是非对称分布, 而在 x 轴是对称分布。电场面的远场辐射方向图由于强耦合作用 $\pm 90^\circ$ 出现凹陷, 但在该角度范围内的天线增益均大于 -4 dBi, 具有较好的远场辐射特性。在磁场面的最大增益点都出现在 0° 方向, 且方向图平滑, 符合设计要求。在 2.6 GHz 处的辐射效率为 -0.5 dB, 天线欧姆损耗很小, 转换效率高。由于内置天线中没有使用功率敏感器件, 能够满足天线功率要求。

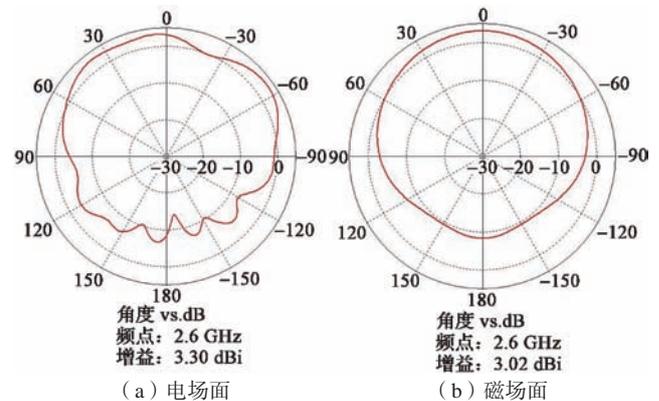


图 6 2.6 GHz 处的远场方向图

4 结语

本文根据紧耦合超宽带阵列天线的设计原理, 提出了单天线耦合扩频的技术方案, 结合金属机箱强耦合环境对天线匹配影响的规律, 设计出超宽带、易共形和低成本紧耦合内置天线。该天线能与机箱完美共形, 满足车载无线通信对内置天线的性能要求。此外, 利用单元天线之间的强耦合效应, 该技术能够有效拓展阵列天线的带宽, 可用于共口径、超带宽的共形阵列天线中。

参考文献:

- [1] Jaume A, Ivan S, Josep M, et al. Multiband Handset Antenna With a Parallel Excitation of PIFA and Slot Radiators [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(2): 348-349.
- [2] Pan W, Huang C, Ma X, et al. An amplifying tunable transmitarray element [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13: 702-705.
- [3] Wheeler H A. Simple relations derived from a phased-array antenna made of an infinite current sheet [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1965(13): 506-514.

(下转第 66 页)

显示装置开展了可靠性热设计,对关键发热器件进行了热计算,确定散热方式,避免过热点出现;增强了传导或辐射散热,CPU、电源模块等发热器件通过和外壳搭接、增加导热胶垫强化散热,板级发热器件通过PCB和过孔等散热,外壳采用黑色增强辐射散热;后壳通过散热翅片设计方便空气对流,热点紧贴后壳强化散热。新产品也强化了安规设计,隔离地与保护地之间严格采用安规电容和金属氧化膜电阻连接,连接器附近增加TVS管进行浪涌防护。

3.3.2 可维修性设计

可维修性设计方面主要是减少维修时间、降低维修费用、防差错设计等。新显示装置的应用现场维修以更新程序与整机更换为主,运行数据下载和软件程序更新可通过以太网、串口、USB口完成,整机与司控台连接件只有几个安装紧固螺钉与几根通信线缆,现场更换方便。所有内外部连接器接线都有防差错设计,可方便生产维护。同时,显示器的开盖维修需要返厂进行,新设计实现的平台化模块化,可增强产品的可维修性。

3.3.3 安全性设计

显示装置的安全性设计主要是考虑防触电、防火、防扎伤等几个方面。新显示装置通过良好接地设计来防止触电,选用阻燃材料进行防火,结构设计注意去棱去角防止刮伤,屏幕采用防爆设计避免破裂,同时选用无毒无铅的物料与工艺,提升显示系统安全性,避免引起安全事故。

4 测试与验证

显示装置的测试分为例行试验、型式试验和可靠性试验。

例行试验主要包括显示、按键、触控、音视频、通信等方面的功能测试,新的显示装置完成了常规例行试验,满足功能性能方面的技术规格要求。型式试验主要包括静电放电、浪涌、电快速脉冲群、传导、辐射等方面的电磁兼容试验,和高低温、湿热、振动冲击等方面的环境试验,新显示装置通过了第三方型式试验,可满足轨道交通行业车载控制显示的现场应用需求。

加速可靠性试验是以超出典型服役环境的加速试验条件来进行的试验,以缩短试验时间,提高可靠性

试验的费效比。新的显示装置开展了强化应力环境的加速寿命可靠性测试,试验结果发现在超出显示器设计极限后,出现了液晶屏损坏、CPU过温保护等现象。因此,后续如有极端条件的应用需求,可通过显示器热管理、低温加热设计等方式来提升环境适应能力。

5 结语

通过在高可靠性、人机交互性能与模块化平台化等方面的研究,形成了一套轨道交通车载显示系统平台方案,完成了一款显示装置产品开发,提升了可靠性、用户体验和市场支撑能力。在用户体验方面,处理器的升级使得人机交互更加流畅,大容量存储和外扩存储使用户使用更加便捷,音视频等多媒体功能完善、图像显示更加清晰、按键触控一体化升级与纯平面小型化设计等提升产品品质与使用体验;安全可靠方面,产品设计严格按可靠性设计规范和体系要求开展,提升了显示系统设计可靠性;平台化方面,通过深入挖掘需求开展模块化设计,本文形成了新的平台系统方案,可支持快速的产品配置。

基于该平台的系列化产品后续可推广应用于机车、动车和城轨领域,支持网络控制、信息显示等不同系统的应用需求,对新市场开拓也有支撑作用,应用前景非常广阔。

参考文献:

- [1] 颜小鹏. 机车通用彩色液晶显示诊断装置[J]. 机车电传动, 1999(4): 21-23.
- [2] 刘军. 支持TCN的列车智能显示器的研究与实现[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [3] 王益民, 颜小鹏. 加速可靠性试验技术研究[J]. 机车电传动, 2011(4): 52-54.
- [4] 中国铁路总公司. 轨道交通 机车车辆电子装置: GB/T 25119[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [5] 中国铁路总公司. 轨道交通 电磁兼容 第3-2部分: 机车车辆设备: GB/T 24338.4[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [6] 王鹏, 陈高华. 高速列车液晶显示器可靠性强化试验技术研究[J]. 机车电传动, 2013(5): 75-79.
- [7] 魏文君, 徐亨, 刘学清, 等. 现代显示技术的发展与展望[J]. 功能材料与器件学报, 2015(10): 100-106.

作者简介: 白云(1982-), 女, 硕士, 研究方向为机车车载控制显示与交互技术。

(上接第61页)

- [4] Moulder W F, Sertel K, Volakis J L. Superstrate-enhanced ultra-wideband tightly coupled array with resistive FSS[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(9): 4166-4172.
- [5] Holl S S, Vouvakis M N. The planar ultra-wideband modular antenna array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(1): 130-140.

- [6] Moulder W F, Sertel K. Ultrawideband superstrate-enhanced substrate-loaded array with integrated feed[J]. IEEE Transactions Antennas and Propagation, 2013, 61(11): 5802-5807.

作者简介: 唐军(1980-), 男, 博士, 高级工程师, 从事列车通信网络系统研究工作。