

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209554

高速动车组车载双频天线设计与布局研究

闻 品¹ 李常贤² 张 晗¹(1.大连交通大学自动化与电气工程学院 大连 116028; 2.大连交通大学轨道交通装备
国家地方联合工程研究中心 大连 116028)

摘要: 针对动车组内无线通信质量问题,在微带线的基础上运用分枝法,设计出满足高速列车车载要求的双频单极子天线。天线尺寸为 $23\text{ mm}\times 36\text{ mm}\times 1.3\text{ mm}$,最大增益为 3.8 dBi ,其工作频段为 $2.28\sim 2.64\text{ GHz}$ 和 $5.47\sim 6.15\text{ GHz}$,在 2.4 GHz 和 5.8 GHz 频段相对带宽分别为 14.6% 和 11.7% ,覆盖ISM频段。以CRH380A型动车组内部环境为研究对象,运用CST电磁仿真软件,建立车厢内部车载天线布局仿真模型。同时,将车内传输效果与自由空间进行对比。各BSS内的天线传输系数在ISM频段内位于 $-20\sim -50\text{ dB}$ 之间,RSRP属于最优等级I。验证了所设计天线的有效性及其布局的可靠性。研究结果对动车组车载天线设计以及车内天线布局有很好的参考价值。

关键词: 双频天线;CST;天线耦合;传输系数;RSRP

中图分类号: TN 929.5;U285.2 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.99

The research on design and layout of on-board dual-frequency antenna for high speed train

Wen Pin¹ Li Changxian² Zhang Han¹(1. School of Automation and Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;
2. National and Local Joint Engineering Research Center for Rail Transit Equipment, Dalian Jiaotong University,
Dalian 116028, China)

Abstract: Aiming at the quality of wireless communication in EMUs, a dual-frequency monopole antenna is designed based on microstrip line and branch method to meet the vehicle-mounted requirements of high-speed train. The size of the antenna is $23\text{ mm}\times 36\text{ mm}\times 1.3\text{ mm}$, the maximum gain is 3.8 dBi , its working frequency band is $2.28\sim 2.64\text{ GHz}$ and $5.47\sim 6.15\text{ GHz}$, the relative bandwidth in the 2.4 GHz and 5.8 GHz frequency bands is 14.6% and 11.7% , covering the ISM frequency band. Taking the internal environment of the CRH380A EMUs as the research object, using the CST electromagnetic simulation software, the simulation model of the vehicle-mounted antenna layout inside the carriage is established. At the same time, compared the transmission effect in the train with the free space. The antenna transmission coefficient in each BSS is between -20 and -50 dB in the ISM frequency band, and the RSRP belongs to the optimal level I. The effectiveness of the designed antenna and the reliability of its layout are verified. The research results have a good reference value for the design of the on-board antenna of the EMUs and the layout of the in-vehicle antenna.

Keywords: dual-frequency antenna;CST;antenna coupling;transmission coefficient;RSRP

0 引 言

随着我国铁路事业的快速发展,动车组内部的信息传输技术也在不断的改革,车内无线通信情况变得更加复杂^[1]。一个高效的车载天线及布局可以保证车载信号的有效传递,提高通信效率。信息的有效传递对动车的正常运行起到至关重要的作用,监测和控制信息一旦传递失败可

能影响列车的正常运行,严重将造成运行事故^[2]。列车内设备的不断增加,使得列车空间变得拥挤;同时随着车内乘客手机网络的使用量增加,使得车载无线网络在信道频段上的选择也变得更加困难,一个可靠、小型化且能在多个频段工作的天线显得极为重要。

目前,列车车载天线研究的多为单频天线,通信频段单一,当信道频段发生拥挤时或者故障时无备用选择。

收稿日期:2022-04-10

文献[3]研究了单个频段的工作天线；文献[4]列出车载天线在理想状态下的 E/H 图；文献[5]给出整车天线近场与远场增益。以上文献只关注天线本身特性，而没有结合实际工作环境对传输效果进行研究分析。但是天线在动车内进行无线传输时，由实际环境中闭合空间引起的电磁折射、多径效应都会影响天线的工作状态，使无线车载通信面临一系列问题。

天线按形状可以分为线天线和面天线，例如对阵振子天线、螺旋天线和单极子天线属于线天线，而微带天线、贴片天线等属于面天线。2011 年，苏州大学胡汉志团队在文献[6]中对传统天线基础改进，提出单频段的车载印刷天线；2012 年，大同大学黄驰芳团队在文献[7]中，设计了一款单极子天线，实现了车地信息交互的需求；2015 年重庆邮电大学的严冬团队在文献[8]中提出一种倒 F 印刷天线，解决天线增益不足的困扰；2017 年 Simon Fraser 大学的 Roshanak Zabihi 团队在文献[9]设计出了应用车载导航的小尺寸单极子天线。2018 年德国亚琛工业大学的 Amar Al-Bassam 团队在文献[10]中，基于印刷天线基础上提出了车载阵列单极子天线用于车车信息交互；2019 年，西南交通大学的邓文强团队在文献[11]中，提出了圆形车载双频天线的设计；2020 年，四川大学陈蓉团队^[12]设计了一款偶极子天线，实现了宽波束需求；2021 年，上海大学刘庆团队在文献[13]中提出了应用于 WLAN 的单极子天线。以上对天线结构进行不同设计是为了使其工作在各个频段，应用与所需场景之中。单极子天线由于其全向特性，制造简单同时信息传递可靠，已经应用于卫星通信，多普勒雷达等工程领域，并且在轨道通信系统也有广泛的应用^[14]。

本文聚焦于列车内部的无线通信系统，首先设计了一个应用与工业、科学和医疗^[15] (industrial, scientific and medical, ISM) 频段的单极子天线，最大增益达到 3.8 dBi，其工作频段为 2.28~2.64 GHz 与 5.47~6.15 GHz，覆盖了 ISM 频段。然后在此天线的基础上结合动车内部环境构造提出了一个可靠的天线布局方案，用于车内各种场景情况下的无线通信。最后使用 CST 仿真软件对天线性能与传输效果进行仿真分析，结果显示天线在该布局下，ISM 频段内 AP 与 Client 的天线耦合系数在 -20~-50 dB 之间，属于最优通信等级 I，效果良好，满足列车内无线通信应用需求。

1 车载天线结构设计

ISM 频段是国际通信联盟无线电通信局免费开放给工业、科学和医疗的免授权频段，使用该频段只需要遵守发射功率小于 1 W 即可使用^[15-16]。ISM 频段允许随意地进行数据传输，符合列车车内通信的需求。而我国工业和信息化部在《中华人民共和国无线电频率划分规定》中将无线频段做出一系列划分，其中具体 ISM 频段设定如表 1，从而选择天线工作在 ISM 的 2.4 GHz 频段(2 400 MHz~

2 483.5 MHz)和 5.8 GHz 频段(5 725 MHz~5 850 MHz)。

表 1 国内 ISM 频段分布

频段	用途/分配
2.4 GHz	WLAN 通信；医疗导航扩展通信，点对点或点对多点扩展通信。
5.8 GHz	无线高速局域网，宽带无线接入系统蓝牙车辆无线自主识别。

基于以上调研分析，印刷天线结构可靠，通信效果理想，常用于车内和车地通信，从而确定本动车组车载天线采用印刷单极子天线，工作频段为 2 400 MHz~2 483.5 MHz 与 5 725 MHz~5 850 MHz。

1.1 天线结构设计

传统单极子天线只有一个工作频段，不能同时满足双频段的工作需求，因此需对单频结构进行改进，使其工作在设定的 ISM 频段。当前，天线为了实现多频功能使用枝节开槽法、寄生贴片和折叠分支等方法^[13]。而枝节开槽由于其结构简单、尺寸计算容易、便于设计制造等原因等原因，受到广泛应用。

天线设计流程如下，图 1 为印刷单极子天线示意图。根据单极子天线的 1/4 波长谐振理论，图 1(a)中只有一个谐振频点在 3 GHz 附近。在此基础上采用分枝法进行结构改进，首先将微带线左侧弯折即图 1(b)，形成 2.4 GHz 的辐射单元，然后在右侧加入工作在 5.8 GHz 的谐振枝节，从而满足双频的设计需求，最终确定天线结构如图 1(c)所示。双频天线的设计难度是需要协调微带线与谐振枝节的谐振频点，避免相互干扰的同时，使其工作在 ISM 频段。

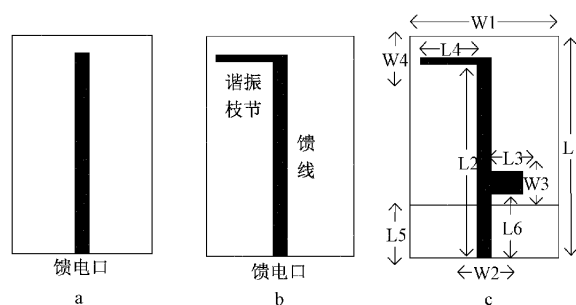


图 1 天线结构设计流程

本文使用电磁仿真软件 CST STUDIO SUITE 的微波工作室对天线进行设计和仿真分析，并对天线影响较大的参数进行优化。天线选择印刷结构，制作容易简单可靠。馈线与谐振枝节均采用理想金属，馈电口采用波导馈电。天线的介质基板使用聚四氟乙烯(FR-4)，该材料常用的天线的介质基板，可满足设计需求且价格便宜，FR-4 的相对介电常数 ϵ 为 4.4，损耗正切角 $\tan\theta$ 为 0.02。天线理论中，由金属腔体内电磁场向量波动方程和腔体边界方程联合可

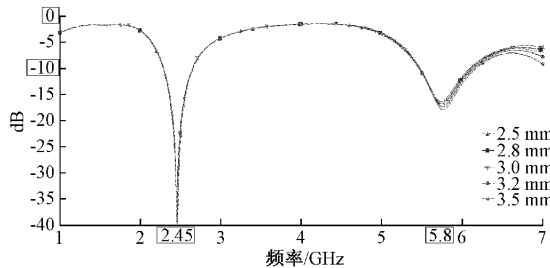
求得到谐振频率与尺寸公式如下：

$$\omega = \frac{c}{2f} \left(\frac{\epsilon + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

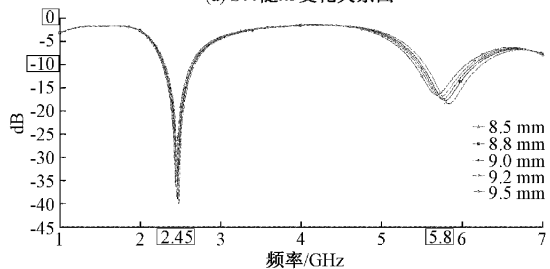
$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon}} \quad (2)$$

式(1)、(2)中, W 为谐振腔体宽度, L 为谐振腔体长度, c 为电磁传播速度, f 谐振频率(天线工作频率), ϵ 为介质基板介电常数。

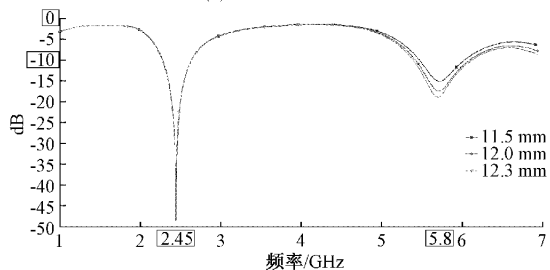
通过参数计算确定了天线整体尺寸为 $23 \text{ mm} \times 36 \text{ mm}$ 。受天线结构的影响, 式(1)和(2)只能计算出谐振枝节的近似尺寸。为了使谐振枝节工作在 ISM 频段, 使用 CST 软件对 $L3$ 、 $L4$ 、 $L6$ 以及介质基板厚度 h 尺寸进行尺寸优化(标注见图 1(c))。共 17 组仿真, 分析不同参数尺寸对天线 S11 参数的影响, 仿真结果如图 2 所示。



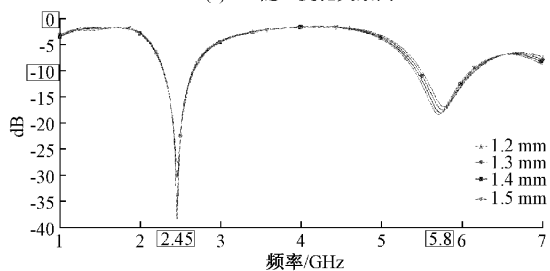
(a) S11随 $L3$ 变化关系图



(b) S11随 $L4$ 变化关系图



(c) S11随 $L6$ 变化关系图



(d) S11随 h 变化关系图

图 2 尺寸变化对天线 S11 参数影响

由图 2(a)可以看出随着 $L3$ 的增加, 天线端口反射系数略有减小, 并且 2.4 与 5.8 GHz 频段的最小反射系数所在频点变化不大; 图 2(b)中可以看出随着谐振枝节长度 $L4$ 的增加, 天线 2.4 GHz 频段与 5.8 GHz 频段的最小 S11 系数所在频点均减小, 整体 S11 曲线左移, 变化规律符合式(2); 图 2(c)中 $L6$ 为天线底部金属板的长度, 可以看出随着 $L6$ 的增加, 2.45 GHz 段端口的 S11 系数减小, 5.8 GHz 的电压驻波比系数变大, 谐振频率逐渐右移且减小; 图 2(d)看出随着介质基板材料厚度 h 的增加, 2.45 GHz 频段 S11 系数减小, 5.8 GHz 频段 S11 系数整体左移。根据天线理论可知, S11 参数小于 -10 dB 时即为天线工作频段, 最终确定天线的最佳尺寸如表 2 所示。

表 2 优化后的天线尺寸

名称	W1	W2	W3	W4	L1	L2
尺寸/mm	23	3	3.8	1.2	36	34
名称	L3	L4	L5	L6	h	
尺寸/mm	3.2	9.0	11	11.5	1.3	

1.2 天线仿真结果分析

采取优化尺寸在 CST 软件中建模如图 3 所示。

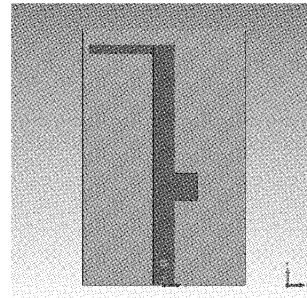


图 3 天线设计图

根据 CST 软件仿真分析, 天线端口 S11 系数如图 4 所示。

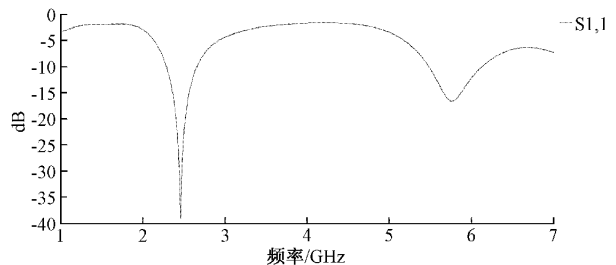


图 4 优化后的回波损耗图

由图 4 可知, 2.45 GHz 频段端口最小反射系数为 -39.3 dB 位于 2.446 GHz, 工作带宽为 2.28 GHz 至 2.64 GHz, 相对带宽为 14.6%; 5.8 GHz 频段端口最小反射系数为 -17.1 dB 位于 5.764 GHz, 天线工作带宽为 5.47~6.15 GHz, 相对带宽为 11.7%, 该天线的工作频段

包含了工业信息部规定的 ISM 频段。而天线端口功率如图 5 所示,在 2.45 GHz 与 5.8 GHz 功率为 0.5 W,符合标准要求。

天线在 2.4 GHz 与 5.8 GHz 频段的起末频点空间远场辐射方向图与平面增益方向图如图 6 所示。

由图 6 中(a)~(d)的空间增益图和平面方向图看出该天线具有全向性,在 2.4 GHz 频段增益为 2.2 dBi, 5.8 GHz 频段增益较大为 3.8 dBi。仿真结果显示天线在 ISM 两个频段增益良好,提供了通信频段备用选择,可以满

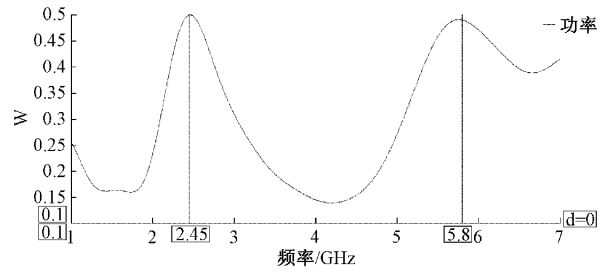
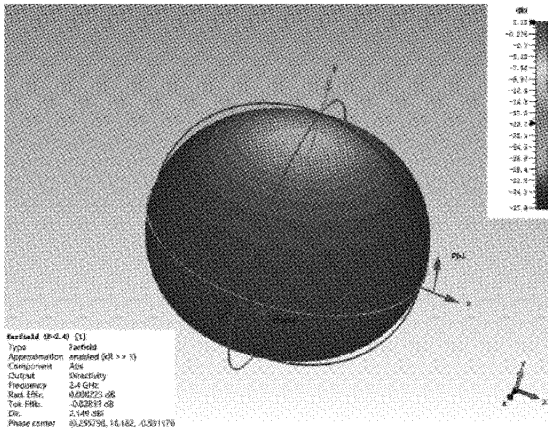
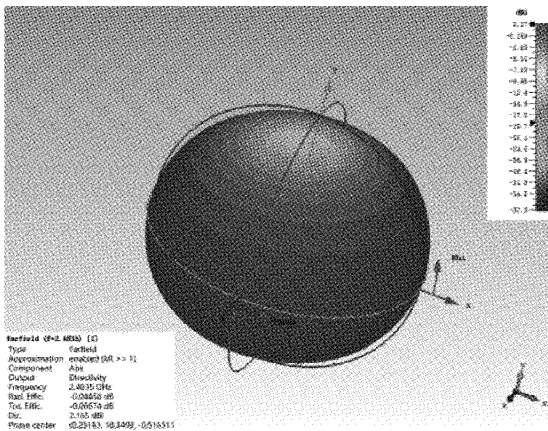
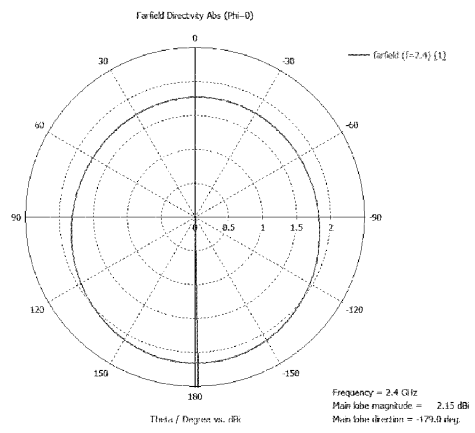


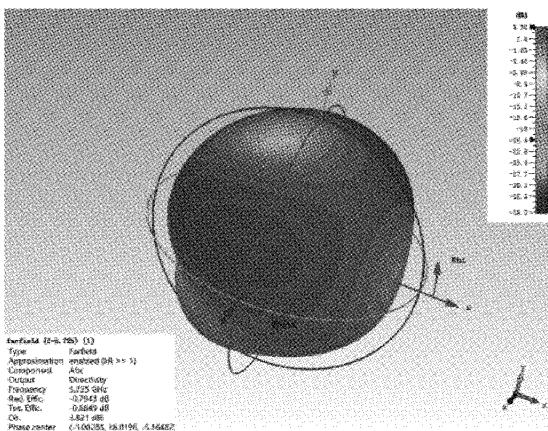
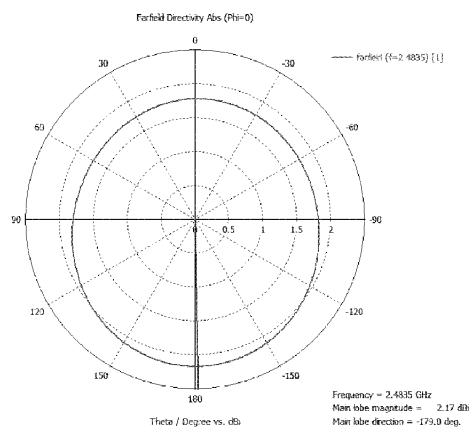
图 5 天线端口功率



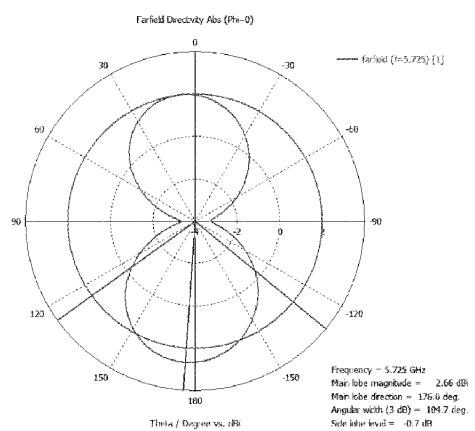
(a) 2.400 GHz频点天线远场方向图

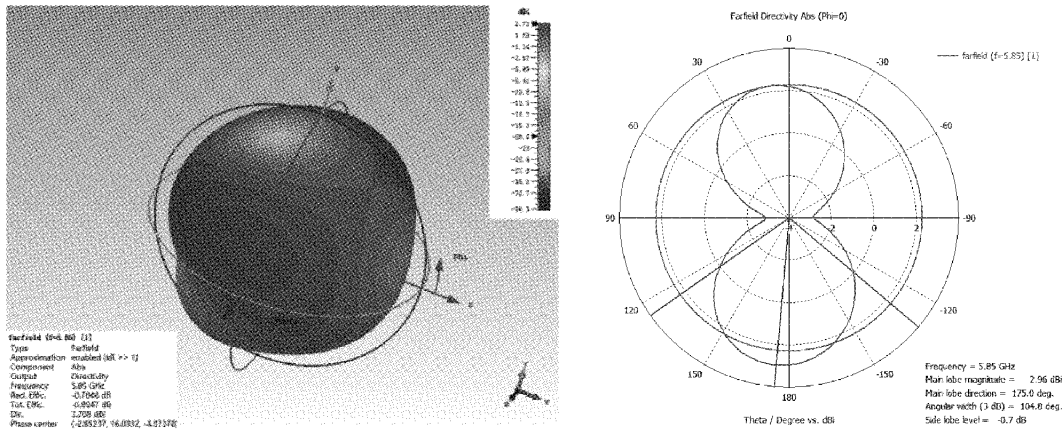


(b) 2.4835 GHz频点天线远场方向图



(c) 5.725 GHz频点天线远场方向图





(d) 5.850 GHz频点天线远场方向图

图 6 天线辐射方向图

足列车内部通信的需求。以上从天线原理出发,结合金属腔电磁理论对天线进行了结构设计,并且通过仿真和参数优化最终确定了天线尺寸。结果显示天线在两频段内增益理想,性能较好,符合设计需求。

2 车载天线布局设计与仿真

2.1 天线传输理论分析

S 参数表示端口网络的散射系数,为端口接收电压与输入电压比,是观测天线性能的重要参数。其中天线传输系数与 S 参数关系^[17]如式(3)。

$$C = 10 \log \left(\frac{P_r}{P_i} \right) = 10 \log (|S_{rr}|^2) \quad (3)$$

式(3)中:

$$P = \frac{v^2}{R} \quad S_{rr} = \frac{V_r}{V_i} \quad (4)$$

将天线在 ISM 频段的发射功率带入式(3),可计算出此天线作为接收端时 S 参数与 3GPP 协议(3rd generation partnership project)中参考信号接收功率(reference signal receiving power,RSRP)等级^[18-19]对应关系,如表 3。

表 3 接收功率与 S 参数关系对应表

等级	RSRP/dBm	S(r t)/dB	备注
I	$R_x > -65$	$S > -92$	信号非常好
II	$-75 \leq R_x \leq -65$	$-102 \leq S \leq -92$	信号良好
III	$-85 \leq R_x \leq -75$	$-112 \leq S \leq -102$	信号较好
IV	$-95 \leq R_x \leq -85$	$-122 \leq S \leq -112$	信号一般
V	$-105 \leq R_x \leq -95$	$-132 \leq S \leq -122$	信号差
VI	$R_x < -105$	$S < -132$	信号很差

2.2 列车车载天线布局

本文以 CRH380A 型高速列车为研究对象,主要研究天线在车内的信息传输情况:1)电气柜内部的无线通信;2)列车箱体内部的无线传输;3)电气柜内与列车箱体中的

信息传输。结合列车内部构造与无线通信的需求,设计天线布局的俯视图如图 7 所示。

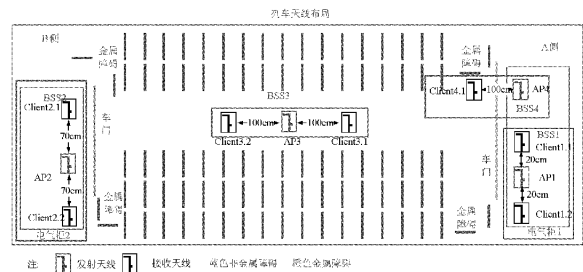


图 7 列车天线布局俯视图

文献[7]在分析列车无线传输时,仅在时域中研究了一种布局下的两个天线之间传输效果,且传输频段单一;文献[14]中只是搭建了个地平面来模拟车顶环境进行仿真,环境建模简单。本文在两个频段内分析了四种情况下天线传输效果,研究的车载网络包含多种工况,天线传输情况和建模布局都更为复杂。

本文中车载无线传输网络俯视图如图 7 所示,包含四个基本服务集合,BSS1~4(basic service set)。各个 BSS 内 AP 发射,对应 Client 接收,即 4 个 AP 与 7 个 Client,共计 11 个天线,发射接收天线均采用所设计的单极子双频天线,收发天线之间距离如图 7 所示。其中,BSS1 和 BSS2 分别位于车体两侧电气柜内;BSS3 的收发天线位于车厢中间;BSS4 发射天线位于电气柜 1 内部,接收天线位于列车箱体内部。

2.3 天线布局仿真分析

车厢尺寸为 24 500 mm×3 160 mm×3 160 mm,整体模型较大。车厢内对天线传输起主要影响的是座椅内饰、金属铭牌、外车厢和两侧的玻璃门,此外电气柜对天线传输也会产生干扰。车厢内的主要材料及其介电常数如下,车门玻璃钢的介电常数为 6.7,地面橡胶垫的常数为 3,座椅聚氨酯材料的介电常数为 8,列车内饰环氧树脂的介电

常数为 4,车窗玻璃的介电常数 6.7,电气柜材料也为玻璃钢。建模时首要考虑列车内对天线传输性能影响影响较大的大尺寸物体以及金属器件,小尺寸的非金属物体会增加列车模型的复杂程度,延长仿真时间,且对天线传输影响较小,因此忽略^[20]。

使用 CST 软件对列车与天线建模如图 8 所示,为了更清楚展现天线布局已将两侧电气柜和车厢隐藏。红色的为 AP 发射天线,黑色 Client 为接收天线。

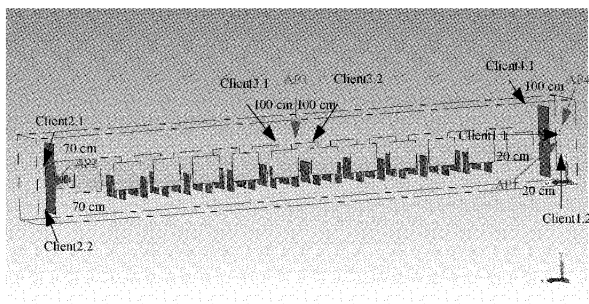


图 8 CST 中天线布局示意图

本仿真布局的对照组为对应距离天线在自由空间中同距离下传输情况。

1)BSS1

电气柜 1 内 BSS1 的两个接收天线位于 AP 两侧,距离为 20 cm。天线传输系数如图 9 所示。

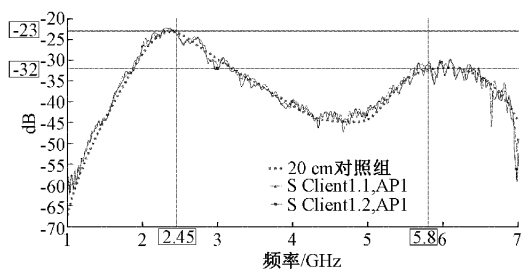


图 9 BSS1 内 client 传输系数

自由空间下的 20 cm 的对照组与列车内在各频段传输系数如表 4 所示。

表 4 AP1 与 Client1.1/1.2 传输系数

天线	2.45 GHz	2.31 GHz	5.80 GHz	6.09 GHz
对照组 1	-23.36 dB	-22.41 dB	-32.28 dB	-31.66 dB
Client1.1	-22.85 dB	-22.25 dB	-32.02 dB	-30.16 dB
Client1.2	-23.57 dB	-23.01 dB	-30.74 dB	-29.84 dB

由图 9 与表 4 可知,BSS1 在 ISM 频段传输效果大于 -92 dB,属于最优等级等级 I。整体 2.45 GHz 传输系数优于 5.8 GHz,最优传输频点位于 2.31 GHz。而高频最佳传输频点为 6.09 GHz。车内天线的传输系数与自由空间传输效果拟合程度较高,距离近时受多径效应影响较小。

2)BSS2

电气柜 2 中 BSS2 的 Client 与 AP 的距离为 70 cm。天线传输系数如图 10 所示,其中对照组为自由空间中天线的传输系数。

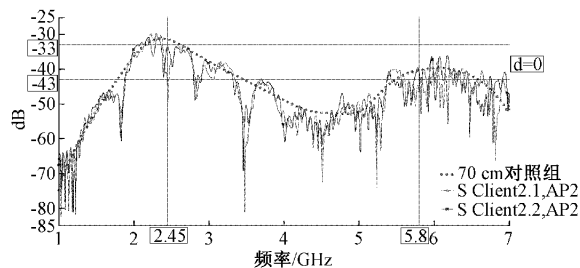


图 10 BSS2 内 client 传输系数

由图 10 看出,BSS2 中天线在 ISM 频段传输系数数大于一 92 dB,属于等级 I。低频的最佳传输频点为 2.30 GHz,高频最佳传输频点为 5.97 GHz。各频点的具体传输系数如表 5。

表 5 AP2 与 Client2.1/2.2 传输系数

天线	2.45 GHz	2.30 GHz	5.80 GHz	5.97 GHz
对照组 2	-31.36 dB	-31.29 dB	-40.28 dB	-39.76 dB
Client2.1	-46.63 dB	-29.75 dB	-45.95 dB	-43.62 dB
Client2.2	-33.55 dB	-31.83 dB	-40.81 dB	-36.20 dB

2.45 GHz 传输系数分别比无外部布局情况下略小 2.2 dB,而 5.8 GHz 频点下减小 1.3 dB,两个频段天线传输系数相差不大。比较 BSS1 和 BSS2,车厢两侧对称布局且电气柜尺寸和外部布局相同,当通信距离由 20 cm 增加到 70 cm 时空间损耗增加,导致天线传输系数降低,同时耦合路径受环境反射电磁波干扰程度也随之增大的同时曲线波动也变大。因此在实际布局中 AP 与 Client 距离越近天线传输效果越好,同时能够减小由多径效应带来的电磁波折射影响。

3)BSS3

列车箱体中 BSS3 的两个 Client 与 AP 的距离为 100 cm。天线传输系数如图 11 所示,其中对照组同距离下自由空间中的天线传输系数。

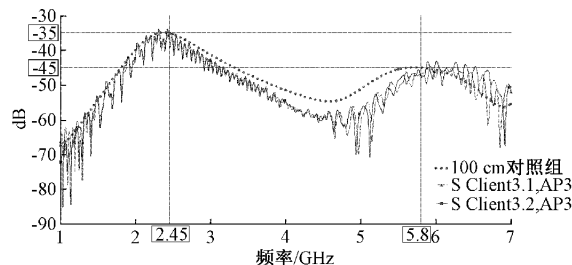


图 11 BSS3 内 client 传输系数

由图 11 可知,BSS3 内部 ISM 段传输系数大于一 92 dB

属于等级 1。最佳传输频点位于 2.43 GHz, 而高频为 5.90 GHz, 各个频点的传输系数如表 6 所示。

表 6 AP3 与 Client3.1/3.2 传输系数

天线	2.45 GHz	2.43 GHz	5.80 GHz	5.90 GHz
对照组 3	-35.05 dB	-34.97 dB	-44.97 dB	-45.20 dB
Client3.1	-36.33 dB	-34.74 dB	-47.15 dB	-47.08 dB
Client3.2	-37.88 dB	-33.82 dB	-47.38 dB	-43.44 dB

BSS3 的 AP 与 client 之间无障碍, 受多径效应影响, 传输系数存在波动, 但与自由空间相差不大。通过与 BSS2 对比, 当外部环境增大时, 传输系数波动也随之减小, 建议天线放置在开阔空间。

4) BSS4

BSS4 内的 AP4 位于电气柜 1 内, 穿过电气柜壁与列车车门传输至车厢内天线进行传输, 其天线传输系数如图 12 所示, 对照组为自由空间传输系数。

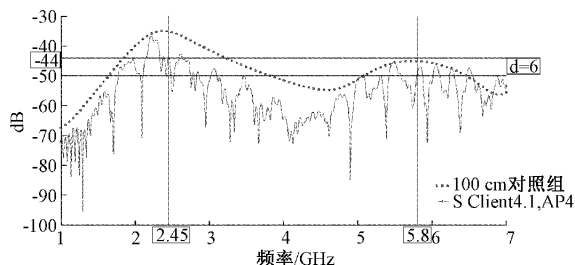


图 12 BSS4 内 Client 传输系数

由图 12 看出 ISM 频段传输系数依旧位于等级 I。最佳传输频点位于 2.22 GHz, 而高频最佳传输系数位于 5.50 GHz, 在各个频点传输系数如表 7。

表 7 AP4 与 Client4.1 传输系数

天线	2.45 GHz	2.22 GHz	5.80 GHz	5.50 GHz
对照组 4	-35.05 dB	-35.75 dB	-44.97 dB	-45.54 dB
Client4.1	-43.83 dB	-36.60 dB	-49.17 dB	-45.13 dB

由表 7 可知当天线传输的直射路径中存在障碍物时, 传输系数降低, 但是由于电气柜和车门都是非金属材料, 损耗并不大。列车内 2.22 GHz 的传输系数比 5.50 GHz 时大了 8.53 dB, 这是由于频率越低穿透性越强且空间损耗小, 即低频最佳传输系数明显高于 5.8 GHz 耦合系数。由于穿透性会随着频率增高而降低, 2.45 GHz 的传输系数更好。

3 结 论

本文通过给单极子天线增加额外的辐射枝节实现了天线工作在 ISM 双频的目的, 同时结合动车组车内无线传输需求提出了一个可靠的天线布局。考虑列车环境对天

线传输效果的影响, 进行了整车建模仿真, 得出以下结论, 可以给实际工程应用中提供参考。

列车内 BSS1~4 天线在 ISM 的两个频段传输效果在 -20~-50 dB 之间, 均属于等级 I, 通信效果良好, 验证了该天线设计以及该天线布局的有效性。

列车内天线在 2.4 GHz 频段传输系数和穿透效果均优于 5.8 GHz 频段, 但是 5.8 GHz 仍可有效通信, 该天线给列车提供了额外的通信频段。

天线在列车内进行信号传输时, 通过减小天线通信距离或将天线放置于较开阔空间等手段, 可缓解多径效应对传输效果的影响。

对于今后学习方向, 将重点研究车载天线系统在列车电磁环境中的 EMC 特性, 进一步研究天线受扰情况下的工作状态。

参 考 文 献

- [1] 李晟铭. 我国城市轨道交通发展现状与分析[J]. 中国设备工程, 2020(20): 235-237.
- [2] 段海洋, 许得杰, 曾俊伟, 等. 城市轨道交通运营安全事故分析及评价[J]. 铁道运输与经济, 2019, 41(9): 110-114.
- [3] 陈蓬旭, 李建新. 一种带状线 L 型探针馈电的微带贴片天线设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(11): 28-32.
- [4] 贺东海. Wi-Fi/5G 双频段列车车内通信天线设计的研究[J]. 数字通信世界, 2019(7): 56.
- [5] 苏洋, 申静, 张立佳, 等. 车载天线整车测试系统集成与实现[J]. 微波学报, 2021, 37(3): 77-81.
- [6] HU H, LIU X, GUO H, et al. The design of a dual band antenna for high-speed train[C]. 2011 4th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, Beijing, China, 2011: 737-740.
- [7] HUANG CH F, TIEN Y W, TSAI CH L. Design of antennas with spatial diversity for WiMAX terminals on a high-speed train[C]. 2012 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), Cape Town, South Africa, 2012: 239-242.
- [8] 严冬, 汪朋, 李帅永, 等. 2.45 GHz 印刷倒 F 天线的研究与实现[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10): 2372-2380.
- [9] ZABIHI R, VAUGHAN R G. Monopole and conformal PIFA for small cylindrical groundplane mounting[C]. 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2017: 1487-1488.
- [10] AL-BASSAM A, ALSHRAFI W, HEBERLING D. A 60 GHz circularly polarized antenna array for line-

- of-sight train-to-train communication[C]. 2018 11th German Microwave Conference (GeMiC), Freiburg, Germany, 2018; 148-151.
- [11] 邓文强,柳溢航,肖波,等. WiFi/5G 双频段列车车内通信天线设计[J]. 铁路通信信号工程技术,2019,16(1): 22-26.
- [12] 陈蓉,陈星. 一种宽波束磁电偶极子天线设计[J]. 电子测量技术,2020,43(9):8-12.
- [13] 刘庆,王世豪,颜锦奎. 应用于 WLAN/WiMAX 的小型化三频带单极子天线设计[J]. 电子测量技术,2021, 44(11):120-124.
- [14] WU M, LIU X, LIU C, et al. A broadband double sleeve hexagonal pyramid antenna for train communication[C]. 2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2021; 1-3.
- [15] 赵春丽. ISM 频段认知无线电通信的抗干扰技术[D]. 北京:北京邮电大学,2018.
- [16] SHARMA S, TRIPATHY M R. Enhanced E-shaped patch antenna for 5.3 GHz ISM band using frequency selective surface [C]. 2020 4th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOED)(48184), Tirunelveli, India, 2020; 332-336.
- [17] 李帅. 室外无线传播模型预测中的场景参数校正研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2019.
- [18] SUPANAKOON P, JANTANA T, CHAMCHOY M. Study on RSRP of LTE mobile phone on thailand's national highway[C]. 2018 Global Wireless Summit (GWS), Chiang Rai, Thailand, 2018; 7-10.
- [19] PARK C S, PARK S. Analysis of RSRP Measurement Accuracy [C]. IEEE Communications Letters, 430-433.
- [20] 章勇,徐伯初,支锦义,等. 高速列车乘客行为与车内平面布局研究[J]. 机械设计,2013,30(5):109-112.

作者简介

闻品,硕士研究生,主要研究方向为列车天线系统 EMC 特性研究。

E-mail:wenpin717@163.com