

文章编号: 2095-4980(2021)05-0884-06

毫米波车地通信的小型化波导螺旋阵列天线设计

鄂蕴纲¹, 李相强^{*1}, 王晓红², 侯圣杰², 王庆峰¹, 张健穹¹

(1.西南交通大学 物理科学与技术学院, 四川 成都 610031; 2.中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111)

摘要: 高速磁浮列车毫米波车地通信系统要求其车载天线具有小型化、宽频带、圆极化和辐射扇形波束等特点。为更好地满足这些要求, 设计一种中心馈电的小型化波导螺旋阵列天线。该天线馈电系统采用同轴波导中心馈电、4路矩形波导并馈的形式, 通过改变馈电波导尺寸、耦合探针长度以及末端采用波导同轴转换器等形式, 实现了所有单元的等幅馈电; 天线单元由低剖面螺旋天线构成, 采用顺序旋转技术改善天线的圆极化性能。利用全波电磁仿真软件设计了一款中心频率为38 GHz的28单元波导螺旋阵列天线, 并进行了实验测试。测试结果表明: 在37~39 GHz频带范围内, 天线驻波比小于1.41, 增益大于21.7 dB, 轴比小于3.6 dB, 俯仰面波瓣宽度为4.5°~4.7°, 方位面波瓣宽度为29°~29.7°, 满足毫米波车地通信系统车载天线的设计需求。

关键词: 毫米波; 扇形波束; 中心馈电; 波导螺旋阵列天线

中图分类号: TN928; TP828

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019565

Design of miniaturized waveguide spiral array antenna for millimeter-wave Vehicle-Ground Communication

E Yungang¹, LI Xiangqiang^{*1}, WANG Xiaohong², HOU Shengjie², WANG Qingfeng¹, ZHANG Jianqiong¹

(1.School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;

2.CRRC Qingdao Sifang Locomotive and Rolling Stock Co., Ltd. Qingdao Shandong 266111, China)

Abstract: In high speed maglev vehicle millimeter-wave communication systems, it is required that the vehicle antenna has the characteristics of miniaturization, wide band, circular polarization and radiating sector beam. To better meet these requirements, a compact waveguide spiral array antenna with center feed is proposed. The antenna feed system adopts the form of coaxial waveguide central feed and four rectangular waveguides joint feed. By changing the size of the feed waveguide, coupling the length of the probe and placing the coaxial converter at the tail of the feed waveguide, the uniform feed of each unit is realized; the antenna low-profile unit is constituted by the helical antenna, and the circular polarization performance of the antenna is improved by using sequential rotation technique. A 28-element waveguide spiral array antenna with a center frequency of 38 GHz is designed by using full-wave electromagnetic simulation software and tested experimentally. Test results show that: in 37–39 GHz band, the antenna standing wave ratio is less than 1.41, the gain above 21.7 dB, the axial ratio less than 3.6 dB, the beam width 4.5°–4.7° at the elevation plane and 29°–29.7° at the azimuth plane. It can meet the design requirements of the vehicle antenna for millimeter wave vehicle-ground communication system.

Keywords: millimeter wave; sector beam; center feed; waveguide spiral array antenna

毫米波无线通信是高速磁浮列车主流的车地通信方式, 车载天线是其中关键部件, 天线需要具有圆极化、扇形波束辐射(俯仰面波瓣宽度小, 方位面波瓣宽度宽)等特性。目前的毫米波车载天线技术采用文献[1]中的反射面天线技术, 产生波瓣宽度为7.6°×24.8°的扇形波束和圆极化辐射, 实现了磁悬浮列车的毫米波通信。反射面天线一定程度上能满足通信要求, 但天线体积较大, 高度很高, 对列车运行和美观等造成很大影响。为此, 本文提出

收稿日期: 2019-12-25; 修回日期: 2020-03-23

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2018GF09); 四川省科技计划资助项目(2018GZ0531; 2018GZ0532; 2019YFG0420)

*通信作者: 李相强 email:xiangqiang_li@swjtu.edu.cn

采用螺旋阵列天线,实现一种适用于高速磁浮毫米波车地通信系统的小型化车载天线。

与反射面天线相比,螺旋天线由导电性能良好的金属导体绕成螺旋状。NAKANO H^[2]在研究中发现,较少匝数和螺距角相结合的螺旋天线,具有波瓣宽度宽、轴比良好以及轴向尺寸短等优点,在卫星通信^[3]、高功率微波定向辐射^[4]领域中得到广泛应用。径向线螺旋阵列天线采用径向线作为天线的馈电波导^[5],具有轴对称的特点,会产生轴对称的笔状波束,不适用于车地通信所需扇形波束的应用场合,因此需采用长宽比较高的波导进行馈电。目前采用波导馈电的螺旋阵列天线研究较少,文献[6]设计了一种侧馈式矩形波导螺旋阵列天线,采用侧馈式波导结构作为馈电波导,一路波导给 3 列单元进行馈电。但由于采用侧馈形式,当工作频率偏离中心频率时,相邻单元之间的相位差会发生改变,导致波束指向发生偏移,轴向增益下降,无法实现宽频带工作;同时,采用一路波导给 3 列单元馈电的方式,各单元耦合量难以调节,天线设计复杂,精确度要求高,输出不平衡度较优的频带也较窄。

鉴于此,本文设计了一种应用于毫米波车地通信的小型化波导螺旋阵列天线,天线采用更简易的同轴波导中心馈电,4 路矩形波导并馈的形式,解决了中心频率波束指向偏移的问题,并通过改变波导截面尺寸以及设计探针,解决了探针在矩形波导内耦合难度大的问题,实现了一种 28 单元毫米波小型化波导螺旋阵列天线,已用于毫米波车地通信。

1 天线结构与阵列布局

根据实际工程需求,需设计的毫米波车载天线的主要技术要求为:工作频带 37~39 GHz,增益大于 20 dB,驻波比小于 1.5,俯仰面波瓣宽度约为 5°,方位面波瓣宽度约为 30°。为实现所需的扇形波束,将螺旋天线排列成 2×14 的矩形阵列,单元间距为 6.5 mm≈0.82λ。设计的 28 单元波导螺旋阵列天线如图 1 所示,该天线使用低剖面螺旋天线作为辐射元件,直接辐射所需的圆极化波。天线馈电系统采用同轴波导中心馈电,4 路矩形波导并馈。通过改变波导的截面尺寸和末端采用波导同轴转化器等形式,实现了所有单元等幅馈电。馈电位置位于中心,两侧单元天线关于中心对称,当工作频率偏移中心频率时,不会出现波束指向偏转的问题。单元天线的幅度可以通过改变探针尺寸来调整,可绕其轴旋转调整每个螺旋天线的辐射相位^[7],使每个单元可以实现等幅同相辐射,从而改善天线的轴比。

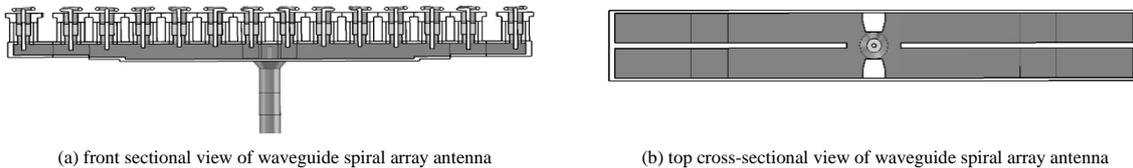


Fig.1 28-unit waveguide spiral array antenna
图 1 28 单元波导螺旋阵列天线

2 天线各部分设计

2.1 单元天线的设计

低剖面螺旋天线,螺旋匝数少,俯仰角小,能够辐射圆极化波。螺旋天线中心频率为 38.0 GHz,单元间距 $L=6.5$ mm,根据文献[8-9]的理论,采用电磁全波软件进行优化。经过优化仿真,选定螺旋半径 $r_1=2.05$ mm,螺旋圈数 0.88,螺距 $s=0.35$ mm,弯曲处高度 $h_1=0.35$ mm,图 2 为螺旋天线模型。优化仿真后得到如图 3 所示的单元天线的反射系数随频率 f 的变化曲线,图 4 为 38 GHz 时 $\phi=0^\circ$ 和 90° 时,单元天线的辐射方向图和轴比。仿真结果得到单元天线增益为 9.4 dB,辐射较好的圆极化波,中心频点辐射方向具有较好的空间轴对称性,在 37~39 GHz 频带内,反射小于 -23 dB。

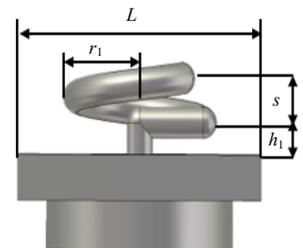


Fig.2 Helical antenna model
图 2 螺旋天线模型

2.2 一分四路功分器设计

图 5 为一分四路功分器,采用同轴波导中心馈电,4 路矩形波导并馈的形式。中心探针采用聚四氟乙烯介质套固定。其工作原理:微波以 TEM 模式由同轴波导输入,通过波导转换匹配节进行模式转化,最后以 TE₁₀ 模式由 4 路矩形波导输出。表 1 给出了一分四路功分器的优化尺寸。利用全波电磁仿真软件,得到如图 6 所示的 S

参数仿真结果，结果表明，一分四路功分器，在 37~39 GHz 频带内反射小于 0.04，四路矩形波导输出能量一致。

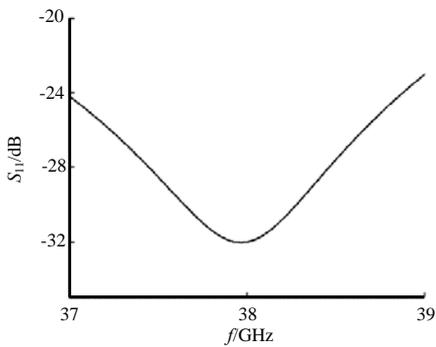


Fig.3 Reflectance of the helical antenna vs. frequency
图 3 螺旋天线反射系数 S_{11} 随频率 f 的变化

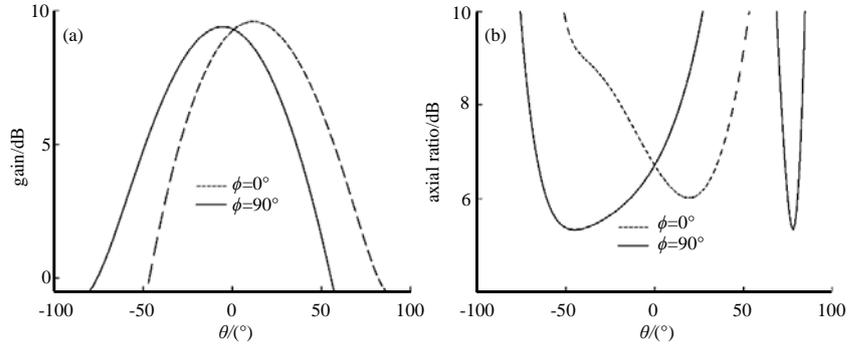


Fig.4 Antenna radiation pattern and axial ratio
图 4 天线辐射方向图和轴比

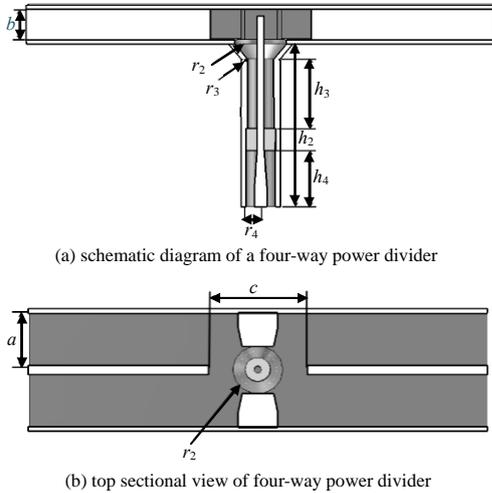


Fig.5 One point four-way power divider
图 5 一分四路功分器

表 1 一分四路功分器结构参数(单位: mm)

Table1 Parameters of one point four-way power divider (unit: mm)

parameter	a	b	c	r_2	r_3	r_4	h_2	h_3	h_4
value	5.5	3.5	9.7	2.55	1.30	1.46	18.90	8.00	6.50

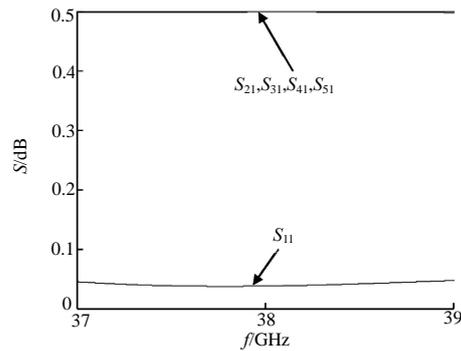


Fig.6 S-parameter of one point four-way power divider
图 6 一分四路功分器 S 参数

2.3 馈电系统设计

在完成一分四路功分器的基础上，设计和优化馈电系统各端口的耦合探针，且反射不能太大。根据阵列天线等幅激励的设计原则可知，当输入功率为 1 W 时，28 单元馈电系统各端口耦合量为 0.189。在 28 单元阵列馈电系统中，关于同一中心对称位置上的探针尺寸相同，归于一组。如图 7 所示，将 28 个耦合输出口分为端口 1~4，端口 5~8，端口 9~12，端口 13~16，端口 17~20，端口 21~24，端口 25~28 共 7 组。在每组探针插入矩形波导腔体后，由于前 1~16 号端口的探针耦合作用，导致后端 17~24 的端口微波分布微弱，需提高探针的耦合能力。采用图 8 所示结构，通过改变端口 17~20、21~24 处矩形波导窄边的尺寸，提高探针的耦合量。为验证其可行性，在探针和其他结构尺寸不变的情况下，改变矩形波导窄边的尺寸大小，观察波导输出能量的变化情况，仿真结果如图 9 所示。研究表明，改变矩形波导窄边尺寸，波导内部电场更加集中，探针可以从波导内耦合到更多的能量，且不会影响能量的传输。

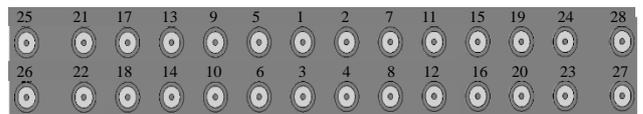


Fig.7 Top view and unit number of the feed system
图 7 馈电系统的俯视图及单元编号

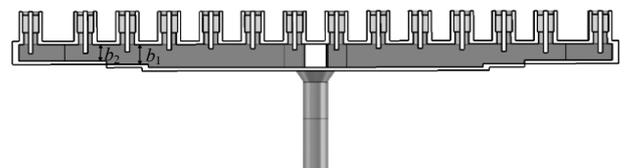


Fig.8 Sectional view of the feed system
图 8 馈电系统的剖视图

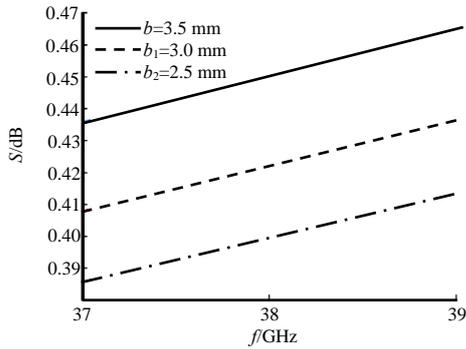


Fig.9 Validation results
图 9 验证结果

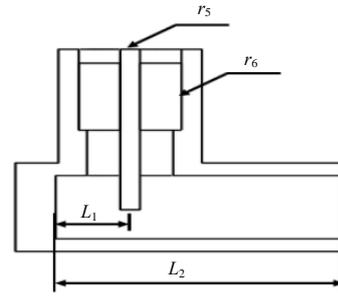


Fig.10 Waveguide coaxial converter
图 10 波导同轴转换器

为实现矩形波导内部能量的全部耦合,在一分四路矩形波导功率分配器末端,设计了波导同轴转换器,将矩形波导内部剩余能量全部耦合,实现高效馈电。图 10 为中心频率为 38.0 GHz 的波导同轴转换器, $r_5=0.35$ mm, $r_6=1.3$ mm, $L_1=1.8$ mm, $L_2=7.1$ mm。通过全波仿真软件优化,其 S 参数如图 11 所示。仿真研究表明,波导同轴转换器在 37~39 GHz 频带内反射小于 0.05,耦合系数为 0.999。将其放置于矩形波导馈电系统末端,可以实现波导内部能量的完全耦合。

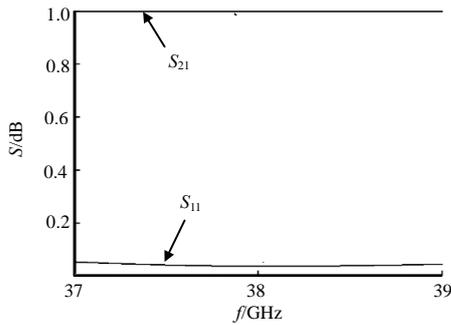


Fig.11 S-parameter of waveguide coaxial converter
图 11 波导同轴转换器 S 参数

表 2 馈电系统耦合结果(38 GHz)
Table2 Coupling results of feed system

port	I	$\theta/(^\circ)$
1-4	0.191	-99
5-8	0.191	81
9-12	0.190	-125
13-16	0.186	21
17-20	0.189	146
21-24	0.187	-96
25-28	0.183	-10

图 12 为馈电系统的反射随频率的变化及各端口的耦合曲线,馈电系统耦合结果见表 2,其中 I 为各端口所需耦合量, θ 为各端口馈电相位。由图 12 可以得到该馈电系统在中心频点 38.0 GHz 处的反射系数为 -23.4 dB,在 37~39 GHz 带宽范围内,反射系数小于 -16 dB。由图 12 和表 2 可以得到,在中心频点 38 GHz 时,可以实现对 28 个单元天线的等幅馈电。

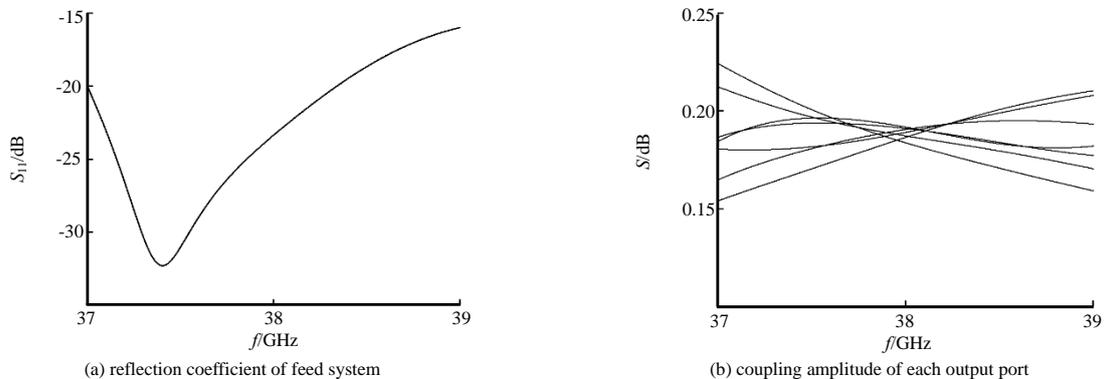


Fig.12 Correlation curves of feed system
图 12 馈电系统相关曲线

2 实验

为验证设计的准确性,对设计模型进行加工测试,实验加工模型如图 13 所示,整体尺寸为 95 mm×13 mm×

32 mm, 与文献[1]中的反射面天线的整体尺寸 120 mm×120 mm×320 mm 相比, 大大减小了天线的体积, 实现了小型化。在大小为 10 m×6 m×5 m 的微波暗室中, 对天线进行全面测试。图 14 为天线测量的电压驻波比(Voltage Standing Wave Ratio, VSWR), 测试结果表明, 在 37~39 GHz 频带范围内, 天线驻波比小于 1.4。图 15 为中心频点 38 GHz 下, 方位面 $\phi=0^\circ$ 和俯仰面 $\phi=90^\circ$ 时, 天线测试的归一化方向图, 结果表明该天线可以在轴向上实现良好的辐射, 证明了该天线的可行性。



Fig.13 Antenna processing model
图 13 天线实验加工图

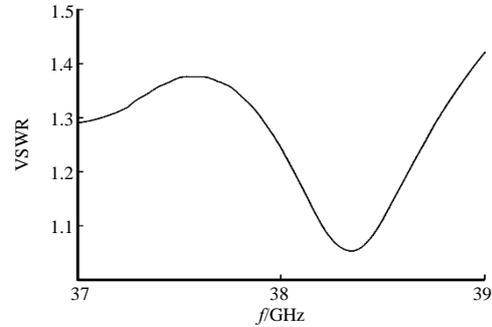


Fig.14 Simulated and measured VSWR of the antenna
图 14 仿真与测试天线的 VSWR

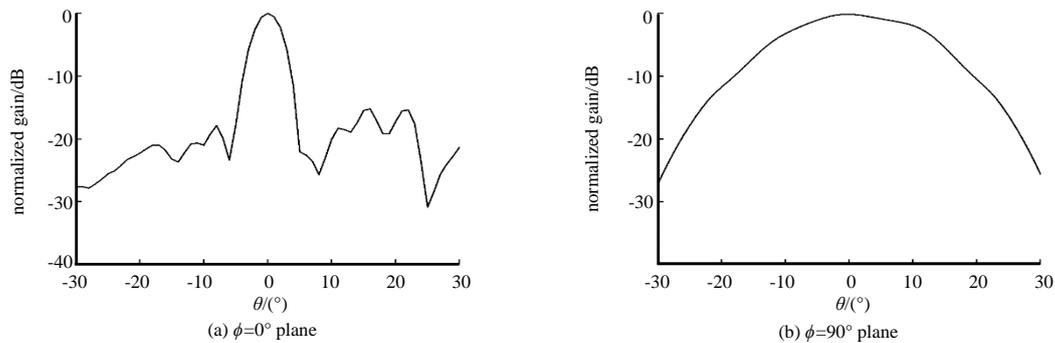


Fig.15 Normalized gain pattern at 38.0 GHz
图 15 38 GHz 归一化增益方向图

表 3 天线实测性能

Table3 Measured performances of the antenna

f/GHz	gain/dB	Axial Ratio/dB	beam width at $\phi=0^\circ$ plane/($^\circ$)	beam width at $\phi=90^\circ$ plane/($^\circ$)
37	20.9	3.6	4.7	29.0
38	22.1	2.6	4.7	29.7
39	22.0	2.4	4.7	29.2

表 3 为天线的测试性能。结果表明, 所设计的阵列天线在 37~39 GHz 的频带范围内实现了微波的轴向辐射, 增益 ≥ 20.9 dB, 轴比小于 3.6 dB, 俯仰面波束宽度不大于 5° , 方位面约等于 30° , 该天线轴比较于单元天线更好, 这是顺序旋转技术的效果。因此所设计的阵列天线可以满足毫米波车地通信天线的研制要求。

3 结论

本文提出并研究了一种用于毫米波车地通信的小型化波导螺旋阵列天线。天线采用同轴波导中心馈电, 4 路矩形波导并馈的形式, 解决了中心频点波束指向偏转的问题, 并通过改变波导截面尺寸设计探针, 解决了矩形波导内耦合难度大的问题。设计并测量了天线, 研究表明, 天线具有较高的增益、低驻波、良好的轴比和小型化的优点。与反射面天线相比, 大大减小了天线的体积; 与螺旋阵列天线相比, 实现了扇形波束、宽频带等优点。实验结果证明了该天线可以用于毫米波车地通信的可行性。

参考文献:

- [1] 韩华龙. 毫米波通信车载天线的研究设计[D]. 成都:电子科技大学, 2010. (HAN Hualong. Research and design of millimeter wave communication vehicle antenna[D]. Chengdu,Sichuan,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2010.)

(下转第 895 页)