

基于 SIR 结构的毫米波汽车雷达天线阵列设计

欧阳军¹, 凌龙辉², 马中华²

(1. 集美大学航海学院, 福建 厦门 361021; 2. 集美大学海洋信息工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了提高汽车雷达天线阵列的增益, 使形成窄波束辐射, 设计了一款工作在 24.000 GHz 的阶梯阻抗谐振器 (stepped-impedance resonator, SIR) 微带阵列天线。天线阵列采用两级低损耗 T 型结功率分配器和四分之一波长微带阻抗变换器馈电, 将四个 SIR 线阵单元组成天线阵列。通过增加 SIR 微带贴片数目来提高阵列天线的增益, 调整 SIR 的尺寸以控制工作频带, 利用功率分配器进行阻抗变换和波束宽度控制。天线阵列的峰值增益可达到 21.67 dBi。在中心频率 24.125 GHz 上, XOZ 面的主瓣宽度为 10°, YOZ 面的主瓣宽度为 17°, 旁瓣抑制度为 11 dB。该阵列天线面积小、增益高、波束窄、旁瓣电平低、后向辐射小, 适用于汽车雷达系统。

[关键词] 汽车雷达; 天线阵列; 阶梯阻抗谐振器; 毫米波

[中图分类号] TN 828

Design of Millimeter Wave Automotive Radar Antenna Array with SIR Structure

OUYANG Jun¹, LING Longhui², MA Zhonghua²

(1. Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. School of Ocean Information Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to improve the gain of the automotive radar antenna array and form a narrow beam radiation, a kind of 24.000 GHz stepped-impedance resonator (SIR) microstrip array antenna is designed. Using a two-stage low-loss T-junction power divider and a quarter-wavelength microstrip impedance converter, the antenna array is formed with four SIR linear array elements. It increases the gain of the antenna array by increasing the number of SIR microstrip patches. The size of the SIR microstrip is adjusted to control the operating frequency band. The power divider is used to transform impedance and control beam width. Results show that the peak gain of the antenna array is 21.67 dBi. When the center frequency is 24.125 GHz, the main beam width of XOZ plane is 10°, the main beam width of YOZ plane is 17°, and the sidelobe suppression ratio is 11 dB. With small size, high gain, narrow beam, low sidelobe level and small backward radiation, the antenna array is suitable for automotive radar systems.

Keywords: automotive radar; antenna array; stepped-impedance resonator; millimeter wave

[收稿日期] 2020-12-01

[基金项目] 福建省自然科学基金项目 (2019J01718); 国家基金培育项目 (ZP2020039); 大学生创新性训练项目 (2020xj027)

[作者简介] 欧阳军 (1978—), 男, 实验师, 从事通信技术研究。E-mail: ouyang_jun@jmu.edu.cn

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

0 引言

交通事故主要由超速、疲劳和违规驾驶所致,多为车车相撞或车人(物)相撞。虽然所有的汽车都配备了安全带、安全气囊等防护装置,但是这些措施都是发生事故后采取的一些补救措施,是一种被动式防护,因此还是会造成大量的人员死亡和巨大的经济损失。汽车发生事故的绝大部分原因是由于司机来不及采取措施造成的。为避免车祸的发生,20世纪60年代,世界上开始研究用于汽车驾驶安全防护的汽车防撞雷达,具体研究有超声波测距、激光探测定位、视频图形识别技术、红外成像技术等^[1-5]。但是这一时期微波理论和器件集成度低,研制的防撞雷达效果较差。

近年来微波理论及微波器件技术的迅速发展,特别是毫米波技术的应用,使得汽车雷达系统的性能出现质的飞跃,一些与汽车雷达相关的模块被开发设计出来,如滤波器、混频器和功率放大器等^[6-8]。

毫米波技术具有远距离的探测能力,对灰尘烟雾穿透能力较强,受气候的影响较弱,在黑暗或恶劣的环境中相对性能更好^[9]。毫米波系统的防撞雷达一般工作在24 GHz和77 GHz,采用调频连续波(frequency modulated continuous wave, FMCW)制式工作。而天线作为毫米波雷达系统收发电路重要的组成部分,决定了雷达系统的体积、作用距离、反应速度、系统带宽、增益、方向性和扫描角度等关键参数。文献[10]提出了一种用于76.5 GHz汽车雷达系统的45°线极化微带梳状天线阵列,天线增益为11.4 dBi,旁瓣电平低于-16.5 dB。文献[11]采用矩形微带贴片辐射单元,设计48个阵元的微带阵列天线,使用改进的非均匀加权振幅激励,仿真增益达到19.82 dB,天线尺寸为73 mm × 84 mm, E面的波瓣宽度为23°, H面的波瓣宽度为12.8°,旁瓣电平为-14.5 dB, U形槽在馈线的两边,改变槽的深度即改变馈电点,馈电网络比较复杂。文献[12]的天线阵列采用两个并馈线阵,增益达到20 dBi,旁瓣电平较低, E面的3 dB波束宽度为24°, H面的3 dB波束宽度为9°。文献[13]提出改进的微带富兰克林阵列天线,工作频率为24 GHz,增益达到7.2 dBi, E面的3 dB波束宽度小于20°, H平面的3 dB波束宽度小于80°,可实现大面积覆盖,天线的10 dB阻抗带宽约为250 MHz,天线尺寸为90 mm × 25 mm,波束较宽,旁瓣电平较大。文献[14]提出工作频率为24 GHz谐振式串并联馈电的微带平面阵列天线,和单纯的并馈或者串馈相比减小了馈电网络的损耗,提高了天线阵的空间利用率,增益达到22 dBi, 3 dB波束宽度为12°,旁瓣电平为-12 dB,采用36元阵,尺寸为68.89 mm × 68.89 mm,但馈电网络较为复杂。文献[15]采用了凯泽贝塞尔函数进行幅度加权实现了4 × 8元阵的天线,有效地抑制了旁瓣电平。文献[16]采用矩形微带贴片辐射单元,串并混合馈电方式,设计了4 × 14单元的微带天线阵列,仿真得到的增益达到21.7 dBi,水平方向波瓣宽度为8.8°,垂直方向的波瓣宽度为18.7°,旁瓣电平为-13 dB,天线尺寸为124.6 mm × 35.6 mm。以上大都采用矩形微带单元组成天线阵列,馈电结构比较复杂, E面和H面的主瓣波瓣宽度较大,不利于防撞雷达的障碍物判断,且面积较大。

为了提高天线的方向性和增益,实现波束赋形,同时实现波束的相控扫描和低副瓣电平的方向图^[17],本文提出了基于阶梯阻抗谐振器(steped-impedance resonator, SIR)微带线阵的24 GHz毫米波雷达天线阵列:用多个SIR单元构成线阵,增加SIR微带贴片数目提高增益,调整不同的SIR尺寸控制工作频带的大小,采用简单的功率分配网络实现了方向图的综合;采用串馈构成SIR微带线阵,且线阵是对称结构,三个T型微带结将四个线阵用并馈的方式组合成天线阵列,以实现同相馈电。

1 SIR理论

SIR微带结构被广泛应用于滤波器设计^[18-19]、超材料^[20]和天线设计^[21]。高低阻抗的微带线串联组成SIR谐振器。高阻抗的微带线等效成一个串联电感,低阻抗的微带线等效成一个并联电容,它们

构成了 SIR 谐振器。SIR 谐振器通过调整两段微带的阻抗比和高低阻抗微带线的长度来控制与它相对应的谐波频率,以补偿奇数模式和偶数模式的不相等相位速度。基于该结构,可以获得较宽的谐振频带。在图 1 中较宽的微带为低阻抗值,较窄的微带为高阻抗值,分别具有电长度为 θ_1 和 θ_2 的不同特征阻抗 (Z_1 和 Z_2)。两条微带传输线分别具有不同的特征阻抗和不同的电气长度。

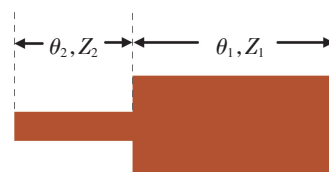


图 1 SIR 微带结构

Fig.1 SIR microstrip structure

从开路端的输入阻抗 Z_{in} 可得出 SIR 的基本谐振条件^[22], 可以写为:

$$Z_{in} = jZ_2(Z_2 \tan \theta_2 + Z_1 \tan \theta_1) / (Z_2 - Z_1 \tan \theta_1 \tan \theta_2)。$$

由于开路, 输入阻抗为无穷大, 即 $Z_2 - Z_1 \tan \theta_1 \tan \theta_2 = 0$, 于是得到阻抗比

$$k = Z_2 / Z_1 = \tan \theta_1 \tan \theta_2。$$

即, 调节阻抗比就可以调节相应的谐振频率。

2 一维 SIR 线阵设计

选用罗杰斯 5880 介质板, 相对介电常数 2.2, 损耗角正切 0.0009, 介质板厚度 0.508 mm。使用高频结构仿真器 (high frequency structure simulator, HFSS) 软件对一维线阵进行建模, 低阻抗微带宽度加权, 高阻抗微带宽度不变, 组成 8 个 SIR 线阵, 且线阵也是对称的, 如图 2 所示。高阻抗微带和馈线宽度固定为 0.4 mm, 高阻抗微带线的长度为 4.1 mm, 馈线长度 0.2 mm; 从馈线开始低阻抗微带宽度依次为 1.28, 2.38, 3.48, 4.58, 4.58, 3.48, 2.38, 1.28 mm, 长度全部为 4.1 mm。

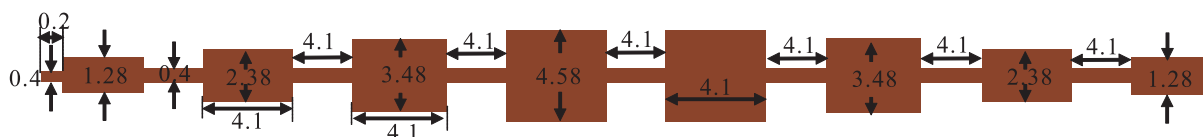


图 2 微带贴片宽度加权的一维微带 SIR 线阵 (单位: mm)

Fig.2 Microstrip patch width weighted one-dimensional microstrip SIR linear array (unit:mm)

图 3 是单个线阵仿真的三维方向图, 线阵是一个扇形体辐射。沿着线阵方向的 YOZ 面为 H 面, 与线阵垂直方向的 XOZ 面为 E 面, Φ 指沿着线阵平面的水平方向角度。在 XOZ 面主瓣宽度非常窄, 在 YOZ 面是一个扇形辐射特性。单个线阵的最大增益达到了 16.6 dBi, 旁瓣很小。

图 4 是单元线阵在天线工作频率为 24.125 GHz 时 XOZ 平面和 YOZ 平面的辐射方向图。在 XOZ 面上形成一个窄波束辐射, 最大增益达到 16.4 dBi, 主瓣 3 dB 宽度为 10° , 旁瓣电平抑制度为 17.9 dB。在 YOZ 面上为半圆形辐射。这种线阵单元再进行组阵可极大减小 YOZ 面的波瓣宽度, 形成一个窄波束辐射特性。

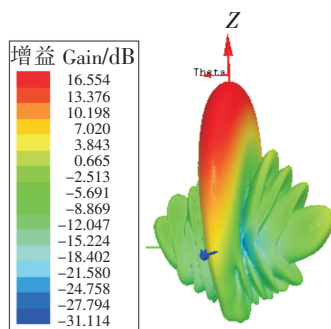


图 3 线阵的三维方向仿真图

Fig.3 3D pattern of linear array simulation

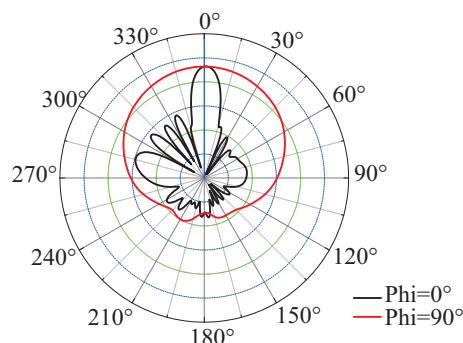


图 4 24.125 GHz 时的辐射方向仿真图

Fig.4 The simulated radiation pattern at 24.125 GHz

图5是单元线阵输入阻抗特性曲线图,在工作频率为24.000 GHz时, $Z_{in} = 78.7 - j * 2.98 \Omega$; 工作频率为24.125 GHz时, $Z_{in} = 109.4 - j * 0.36 \Omega$; 工作频率为24.250 GHz时, $Z_{in} = 137.4 - j * 33.6 \Omega$ 。需要通过T型结馈电网络将单元线阵的输入阻抗匹配到特性阻抗为50 Ω 。

3 天线阵列设计

天线阵列由8个SIR线阵单元、3个T型微带功分器和6条四分之一微带阻抗变换器组成。8个SIR采用串馈方式构成微带线阵,且线阵是对称结构。馈电网络由3个T型结构的一分二、二分四的功分器和四分之一波长阻抗变换器组成,4个SIR微带线阵采用并馈方式。

3.1 馈电网络设计

微带阵列天线按馈电方式分为并馈^[23]和串馈^[24]。本设计将并馈和串馈相结合,微带线阵采用串馈的方式,微带线阵的组阵采用并馈的方式,使串馈和并馈的优势互补,并在单元线阵馈入点采用同相馈电。馈电网络如图6所示。由图5可知,在中心频率24.125 GHz处单元线阵的输入阻抗 Z_{in} 为 $109.4 - j * 0.36 \Omega$,虚部近似为零,可认为线阵的输入阻抗为纯电阻,经过四分之一阻抗变换器后再接特性阻抗为100 Ω 的微带。根据四分之一波长线阻抗变换公式 $Z_1 = \sqrt{Z_{in} Z_{100}}$,经计算得阻抗 Z_1 为104 Ω ,同理, Z_2 为70.7 Ω 。其余T型结微带的长度和特性阻抗如图6所示,最终得到馈电网络输入端的输入阻抗为50 Ω 。由微带线特性阻抗和确定的基板参数,即可以得到微带线的线宽。

3.2 四线阵设计

将4个图2所示的一维线阵和图6所示的馈电网络组合起来构成毫米波雷达天线阵列,如图7所示。该阵列尺寸为75 mm × 33 mm,基板尺寸为85 mm × 42 mm,线阵单元之间的间隔是一个波长,约为9.36 mm。

用HFSS设计软件建模仿真,得到天线阵列输入端的反射系数和电压驻波比(voltage standing wave ratio, VSWR)曲线分别如图8和图9所示。表1为在工作频率24.000, 24.125, 24.250 GHz时,反射系数、VSWR和输入阻抗的具体数值。

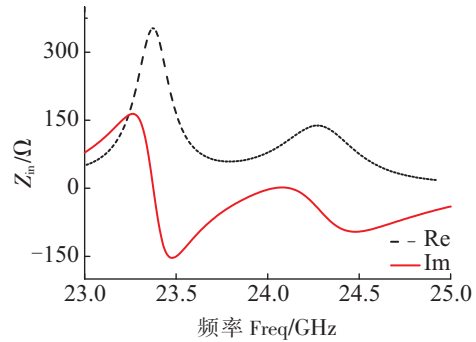


图5 单元线阵的输入阻抗曲线

Fig.5 Input impedance curve of unit linear array

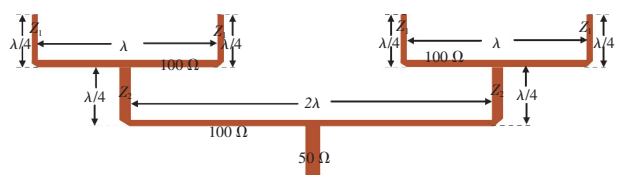


图6 T型结构的四单元线阵的馈电网络

Fig.6 Four-unit linear array feed network formed by T-shaped structure

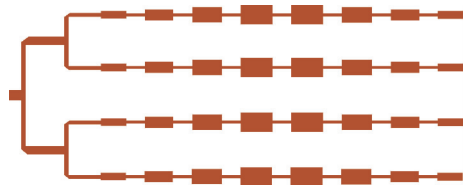


图7 天线阵列结构

Fig.7 Antenna array structure

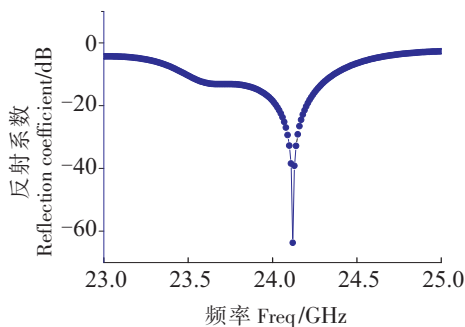


图8 天线阵列反射系数曲线

Fig.8 Reflection coefficient curve of antenna array

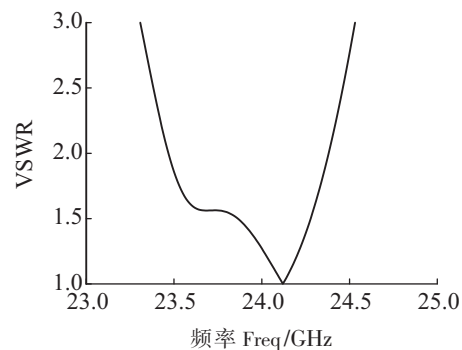


图9 天线阵列的 VSWR

Fig.9 VSWR of antenna array

表 1 天线阵列反射系数、VSWR 和输入阻抗的数值

Tab. 1 Values of antenna array reflection coefficient, VSWR and input impedance

频率 Frequency/GHz	反射系数 Reflection coefficient/dB	VSWR	Z_{in}/Ω
24.000	-18.4	1.27	$41.3 - j * 6$
24.125	-51.4	1.02	$50.1 - j * 0.5$
24.250	-15.9	1.38	$45.7 - j * 14$

图 10 是天线阵列三维方向图的仿真结果, 4 个线阵组成阵列后, 形成了极窄的主波束辐射, 天线增益达到 21.6 dBi, 旁瓣电平较低。图 11 是仿真的阵列天线输入阻抗曲线图, 当工作频率为 24.000 GHz 时, 输入阻抗为 $41.3 - j * 6 \Omega$; 当工作频率为 24.125 GHz 时, 输入阻抗为 $50.1 - j * 0.5 \Omega$; 当工作频率为 24.250 GHz 时, 输入阻抗为 $45.7 - j * 14 \Omega$ 。电阻基本接近 50Ω , 在 250 MHz 工作带宽内电抗较小。

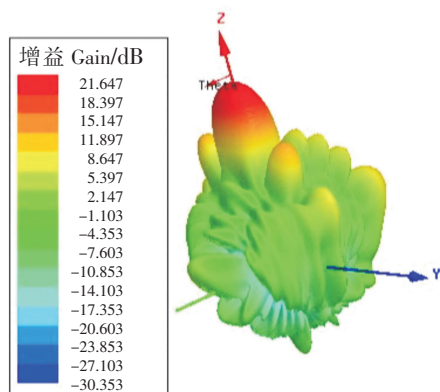


图 10 天线阵列三维方向仿真图

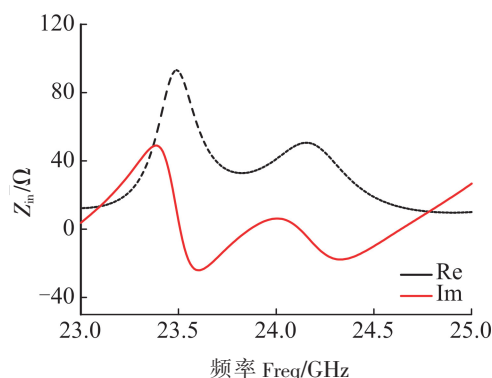
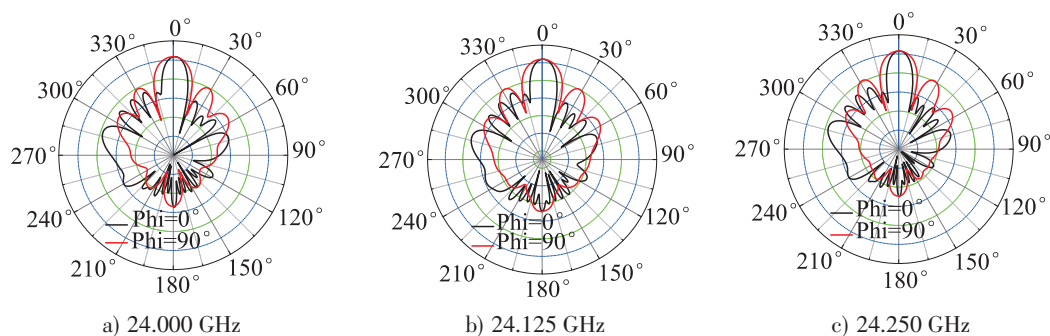


图 11 天线阵列的输入阻抗

Fig.10 The simulation 3D pattern of antenna array

Fig.11 Input impedance of antenna array

图 12 是天线阵列在 XOZ 面和 YOZ 面的辐射方向图仿真图。在 24.000 GHz 工作频率下, 峰值增益达到 21.65 dBi, XOZ 面主瓣的 3 dB 波瓣宽度为 10° , YOZ 面主瓣的 3 dB 波瓣宽度为 17° , 旁瓣电平抑制制度为 11.6 dB; 在 24.125 GHz 工作频率下, 峰值增益达到 21.67 dBi, XOZ 面主瓣的 3 dB 波瓣宽度为 10° , YOZ 面主瓣的 3 dB 波瓣宽度为 16° , 旁瓣电平抑制制度为 12.35 dB; 在 24.250 GHz 工作频率下, 峰值增益达到 21.47 dBi, XOZ 面主瓣的 3 dB 波瓣宽度为 11° , YOZ 面主瓣的 3 dB 波瓣宽度为 16° , 旁瓣电平抑制制度为 10 dB。

图 12 天线阵列 XOZ 面和 YOZ 面辐射方向图仿真结果Fig.12 Simulation results of the radiation pattern of the XOZ plane and YOZ plane of the antenna array

4 实物测试结果

图 13 是 SIR 阵列天线的实物照片。图 14 是反射系数的测试结果, 反射系数小于 -10 dB 的频带很宽。在 24.000 ~ 24.250 GHz 工作频带内, 反射都小于 -14 dB。在中心频率 24.125 GHz 上, 反射系数为 -14.84 dB; 在 24.000 GHz 频率上, 反射系数为 -14.32 dB; 在 24.250 GHz 频率上, 反射系数为 -15.9 dB。图 15 是天线阵列输入端口的电压驻波比测试结果, 在 250 MHz 工作频带内, 电压驻

波比都小于 2。在中心频率 24.125 GHz 处 VSWR 为 1.64; 在 24.000 GHz 处为 1.41; 在 24.250 GHz 处为 1.91。在 24.125 GHz 频点上, 待测天线的功率为 -54.215 dBm, 对比天线的功率为 -53 dBm, 待测天线对比天线小 1.2 dB, 那么待测天线的增益 = $20.6 - 1.2 = 19.4$ dBi。将参考天线的增益及接收功率和被测天线阵列对比, 得到此天线阵列在 23 ~ 25 GHz 范围内的增益曲线如图 16 所示, 在 24.000 ~ 24.250 GHz 频带范围内, 天线增益都大于 18.5 dBi, 在通带内增益波动只有 0.9 dB。

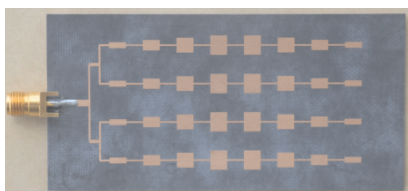


图 13 SIR 阵列天线照片

Fig.13 SIR array antenna photo

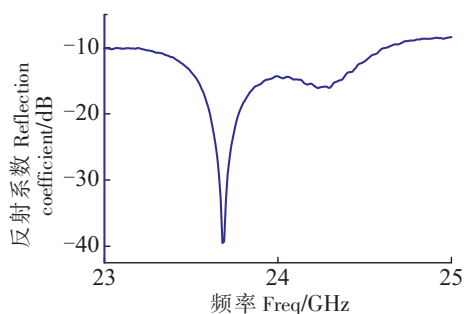


图 14 阵列天线反射系数测试结果

Fig.14 The measurement result of the antenna array

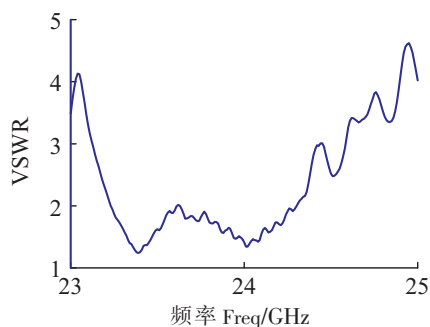


图 15 VSWR 测试曲线

Fig.15 VSWR measurement curve

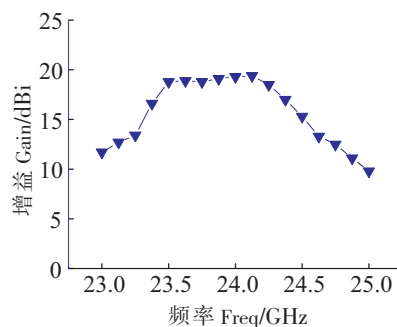


图 16 阵列天线增益的测试结果

Fig.16 The measurement result of the antenna array

图 17 和图 18 分别是在中心频率 24.125 GHz 上测试天线 XOZ 面和 YOZ 面的辐射方向图。XOZ 面主瓣的 3 dB 波瓣宽度 10° , YOZ 面主瓣的 3 dB 波瓣宽度 17° ; XOZ 面的旁瓣抑制制度达到 11 dB, YOZ 面的旁瓣抑制制度达到 12 dB。由于介质板背面有接地层, 因此天线反向辐射较小。表 2 为其他 24 GHz 微带天线阵列特性和本研究的对比, 由表 2 可见本文提出的基于 SIR 结构的毫米波汽车雷达天线阵列在增益、波瓣宽度和尺寸方面都具有较好的性能。

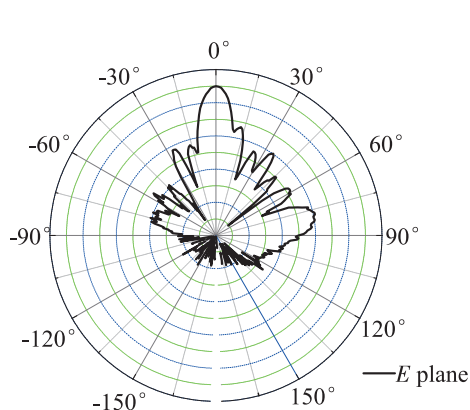


图 17 24.125 GHz 时 XOZ 面辐射方向图

Fig.17 XOZ plane pattern of 24.125 GHz

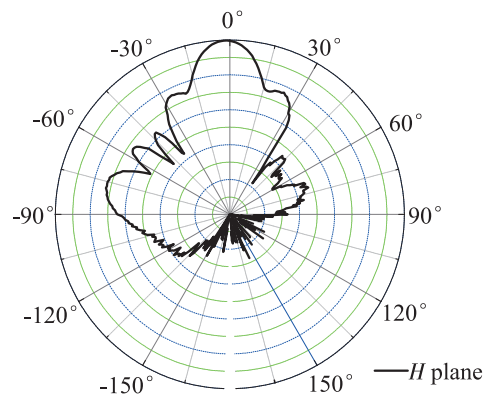


图 18 24.125 GHz 时 YOZ 面辐射方向图

Fig.18 YOZ plane pattern of 24.125 GHz

表 2 SIR 天线阵列特性和其他文献的比较

Tab. 2 Characteristics comparison of SIR antenna array and other literatures

文献 Reference	单元 Unit	单元数目 Number of units	增益 Gain /dBi	E 面波瓣宽度 Beam width of E plane/($^{\circ}$)	H 面波瓣宽度 Beam width of H plane/($^{\circ}$)	旁瓣电平 Sidelobe level /dB	面积 Area size /(mm \times mm)
[11]	矩形微带 Rectangular microstrip	6×8	19.52	23	12.8	-14.5	73×84
[12]	矩形微带 Rectangular microstrip	4×10	20	24	9	较低 Low	-
[13]	网格 Grid	5	7.2	20	80	较大 Large	90×25
[14]	矩形微带 Rectangular microstrip	6×6	22	14	14	-12	69×69
[15]	矩形微带 Rectangular microstrip	4×8	20.6	-	10.1	-18.3	80×50
[16]	矩形微带 Rectangular microstrip	4×14	21.7	8.8	18.7	-13	125×36
本文 This paper	SIR	4×8	21.67	10	17	-11	75×33

5 结论

本文设计了一种用于毫米波汽车防撞雷达的 SIR 微带天线阵列, 工作频率在 24.000 ~ 24.250 GHz 之间, 工作带宽达到 250 MHz。天线阵列尺寸为 85 mm \times 42 mm, 在微波介质板上制作此天线阵后进行测试, 峰值增益达到 19.4 dBi, 旁瓣抑制制度达到 11 dB, 通带内的电压驻波比小于 1.5。 XOZ 面的主瓣宽度只有 10° , YOZ 面的主瓣宽度只有 17° , 可以精确探测到前方的物体。实现了高增益、低副瓣、窄波束的特性, 非常适合应用于汽车雷达系统。

[参 考 文 献]

- [1] XIAO L. Unmanned vehicle with obstacle avoidance technology based on ultrasonic ranging [C] //2018 Eighth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC). Harbin: IEEE, 2018: 87-91. DOI:10.1109/IMCCC.2018.00025.
- [2] ZHANG J, SHANG W. A novel target classification and identification algorithm for 77GHz automotive collision avoidance radar [C] //2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP). Chongqing: IEEE, 2019: 1-4. DOI:10.1109/ICSIDP47821.2019.9173407.
- [3] ZHANG Y, WANG J, DOLAN J M. Road-segmentation-based curb detection method for self-driving via a 3d-lidar sensor [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(12): 3981-3991. DOI:10.1109/TITS.2018.2789462.
- [4] BUSCH C, DOMER R, FREYTAG C, et al. Feature based recognition of traffic video streams for online route tracing [C] //48th IEEE Vehicular Technology Conference on Pathway to Global Wireless Revolution. Ottawa: IEEE, 1998: 1790-1794. DOI:10.1109/VETEC.1998.686064.
- [5] GENG K, YIN G. Using deep learning in infrared images to enable human gesture recognition for autonomous vehicles [J]. IEEE Access, 2020(8): 88227-88240. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2990636.
- [6] 魏倩颖, 马中华. 一种应用于汽车雷达的 SIW 带通滤波器 [J]. 集美大学学报 (自然科学版), 2016, 21(4): 305-309. DOI:10.19715/j.jmuzzr.2016.04.011.
- [7] 饶晟瑞, 石春琦, 张润曦. 一种用于 76 ~ 81GHz 汽车雷达的 CMOS 毫米波下混频器 [J]. 红外与毫米波学报, 2020, 39(4): 441-446. DOI:10.11972/j.issn.1001-9014.2020.04.008.
- [8] 薛裕婷, 石春琦, 张润曦. 一款用于 77/79 GHz 汽车雷达的宽带功率放大器 [J]. 固体电子学研究进展, 2020, 39(4): 441-446. DOI:10.11972/j.issn.1001-9014.2020.04.008.

- 2020, 40(3): 173-179. DOI:10.19623/j.cnki.rpsse.2020.03.004.
- [9] UMEHIRA M, NOZAWA T, MAKINO Y, et al. A novel iterative inter-radar interference reduction scheme for densely deployed automotive FMCW radars [C] //2018 19th International Radar Symposium (IRS). Bonn: IEEE, 2018: 1-10. DOI:10.23919/IRS.2018.8448223.
- [10] WU D, TONG Z, REUTER R. et al. A 76.5 GHz microstrip comb-line antenna array for automotive radar system [C] //9th European conference on antennas and propagation (EuCAP). Lisbon: IEEE, 2015: 1-3.
- [11] XU Y, QIU J, YANG C. et al. A novel millimeter-wave antenna module design for automotive radar sensors [C] //2015 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM). Heidelberg: IEEE, 2015: 1-3. DOI:10.1109/ICMIM.2015.7117930.
- [12] WANG H, HUANG Y, CHUNG S. Spatial diversity 24-GHz FMCW radar with ground effect compensation for automotive applications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2): 965-973. DOI:10.1109/TVT.2016.2565608.
- [13] KUO C, LIN C, SUN J. Modified microstrip franklin array antenna for automotive short-range radar application in blind spot information system [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16(99): 1731-1734. DOI:10.1109/LAWP.2017.2670231.
- [14] 李恒城, 敬守钊. 24 GHz 微带贴片天线阵的仿真与设计 [J]. 微波学报, 2010(8): 211-214. DOI:10.14183/j.cnki.1005-6122.2010.s2.062.
- [15] 赵晓磊, 姜兴, 李思敏. 一种高增益低旁瓣毫米波微带天线阵设计 [J]. 微型机与应用, 2015, 34(4): 37-39. DOI:10.19358/j.issn.1674-7720.2015.04.015.
- [16] 王坤鹏. 车载毫米波防撞雷达天线的研究与设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [17] ASHKENAZY J, PERLMUTTER P, TREVES D. A modular approach for the design of microstrip array antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1983, 31(1): 190-193. DOI:10.1109/TAP.1983.1142998.
- [18] QIN W, CAO J, LI Y, et al. Wideband tunable bandpass filter using optimized varactor-loaded SIRs [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017, 27(9): 812-814. DOI:10.1109/LMWC.2017.2734848.
- [19] LIU H, LIU T, ZHANG Q, et al. Compact balanced bandpass filter design using asymmetric sir pairs and spoof surface plasmon polariton feeding structure [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018, 28(11): 987-989. DOI:10.1109/LMWC.2018.2873209.
- [20] ZARGHOONI B, DENIDNI T A. New compact metamaterial unit-cell using sir technique [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2014, 24(5): 315-317. DOI:10.1109/LMWC.2014.2309080.
- [21] CHOI H, KIM T, HWANG H, et al. An UWB antenna design with adjustable second rejection band using a SIR [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(2): 913-916. DOI:10.1109/TMAG.2013.2283774.
- [22] MAKIMOTO M, YAMASHITA S. Bandpass filters using parallel coupled stripline stepped impedance resonators [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1980, 28: 1413-1417. DOI: 10.1109/TMTT.1980.1130258.
- [23] JENN D C, FLOKAS V. In-band Scattering from arrays with parallel feed networks [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996, 44(2): 172-178. DOI:10.1109/8.481644.
- [24] TSAP B, CHANG Y, FETTERMAN H R, et al. Phased-array optically controlled receiver using a serial feed [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(2): 267-269. DOI:10.1109/68.655380.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 叶秋波)