

doi: 10.12052/gdutxb.180085

应用于微多普勒效应雷达的 紧凑型宽带端射阵列天线的研究

吴多龙, 谭富文, 吴艳杰

(广东工业大学 物理与光电工程学院, 广东 广州 510006)

摘要:为解决微多普勒效应雷达的端射、小型化及宽频带问题,提出了一款紧凑型宽带端射阵列天线.4个T型环缝天线单元中心对称放置于基板的背面,馈电网络位于基板的正面,从而形成耦合馈电,且馈电的幅度相同,馈电的相位在顺时针方向的分布为 90° 、 270° 、 0° 、 180° .经加工测试,其测试结果与仿真结果基本一致,且工作频带为5.72~6.71 GHz,绝对带宽为0.99 GHz,满足宽带特性的要求.该天线采用易于集成的小型化平面设计,具有宽频带特性以及良好的端射性能,且加工成本较低,可以满足微多普勒效应雷达的实际应用要求.

关键词: 缝隙阵列天线; 紧凑平面; 宽频带; 端射; 微多普勒效应雷达

中图分类号: TN823.24

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2018)06-0043-06

The Research and Design of Compact Broadband Endfire Array Antenna for Micro-Doppler Effective Radar Application

Wu Duo-long, Tan Fu-wen, Wu Yan-jie

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to solve the problems of endfire, miniaturization and broadband of the micro-Doppler effective radar, a compact broadband endfire array antenna is proposed. The four T-slotted antenna elements are symmetrically placed on the back of the substrate, and the feeding network is located on the front of the substrate, thus forming a coupling feed, which has same amplitude and the distribution of phase in the clockwise direction is 90° , 270° , 0° , 180° . After processing and measurement, the measured results are basically consistent with the simulated results, and the operating frequency band is 5.72~6.71 GHz, which has the absolute bandwidth of 0.99 GHz and satisfies the requirement of wideband characteristic. The antenna adopts an easy-to-integrate miniaturized planar design, and has broadband characteristic, good endfire performance, low processing cost, which can meet the practical application requirements of the micro-Doppler effective radar.

Key words: slot array antenna; compact plane; broadband; endfire; micro-Doppler effective radar

微多普勒效应在自然界、人类和动植物中是普遍的现象^[1],所以微多普勒效应雷达的成功研制将在监控、医疗、应急救援、生物等领域具有广泛的应用前景^[2].微多普勒效应雷达的工作原理如图1所示,雷达通过阵列天线将电磁波辐射出去,在传播过程中遇到目标物以后,目标物对电磁波产生反射、散射,接着阵列天线接收到雷达回波,再通过环形器、低噪声放大器、滤波器等将回波信号提取出来,然后利用

六端口网络将该信号与参考信号作对比,最后通过视频检波器阵列、数据采样,在屏幕上显示出来.

天线作为微多普勒效应雷达的关键组成部分,其性能将会影响雷达的可靠性.近年来,在微多普勒效应雷达的研究领域中,具有更宽工作频带的端射天线吸引了越来越多研究工作者的注意力^[3-4],因为它可以在不借助于机械工具的情况下,使微多普勒效应雷达能够在自己的正前方收发电磁波以获得所

收稿日期: 2018-05-30

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(2017A030310063); 中兴通讯有限公司资助项目(移动通信天线跟踪与研究—Massive MIMO天线的关键技术问题)

作者简介: 吴多龙(1964-),男,副研究员,博士,硕士生导师,主要研究方向为无线通信、卫星导航、无线传感器网络、射频与天线.

通信作者: 谭富文(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为射频电路与天线设计. E-mail: rftanfuwen@163.com

需要的关键信息,而且更宽的工作频带有利于减少天线的数量,从而降低单元天线间的相互耦合和相互干扰,使微多普勒效应雷达的性能更稳定可靠.传统的八木天线可以实现电磁波的端射^[5],但它的体积大、重量大、剖面高、空气阻力大以及工作带宽窄,所以不适用于微多普勒效应雷达.为克服传统八木天线的缺点,准八木天线被提出^[6-7],其具有较低的剖面、较小的体积以及较小的重量,但它的面积还是比较大,不利于集成到雷达中,而且其工作带宽仍然比较窄,所以不适用于微多普勒效应雷达.之后,维瓦尔第天线被提出^[8-9],其具有非常宽的工作频带,但它的面积还是比较大,不利于集成到微多普勒效应雷达中.总的来说,天线的小型化设计仍是微多普勒效应雷达领域亟需解决的问题.

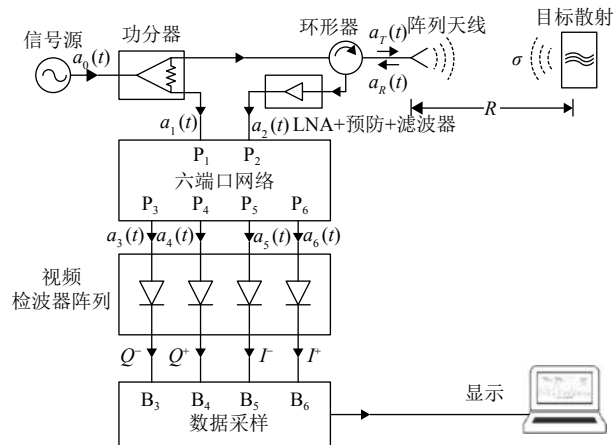


图1 微多普勒效应雷达的工作原理

Fig.1 Operating principle of micro-Doppler effective radar

与单个微带天线相比^[10-11],微带阵列天线具有更灵活的设计方法^[12-13],可以通过调整单元天线的数量、位置、馈电的幅度与相位以获得所需要的特性.此外,为了更好地将天线集成到检测器中,采用开缝的方式减小天线的尺寸将会是一种极为有效的方法^[14-15].

针对实际的应用场合,本文提出了一款紧凑型宽带端射阵列天线,以解决微多普勒效应雷达的小型化、端射及宽频带问题.目前,尚未发现有相关的研究发表在文献中,所以该研究对微多普勒效应雷达的发展具有极其重要的意义.

1 天线设计

1.1 单元天线设计

如图4所示,本设计采用T型环缝天线作为单元

天线,其由1个正方形闭合环缝和4个T型缝组成,其中4个T型缝中心对称放置于正方形闭合环缝内.此外,本设计采用厚度为1 mm的FR4板材(相对介电常数为4.4,正切损耗为0.02),其正面为50 Ω 馈电线,其背面为T型环缝天线,所以基板的背面既作为天线的辐射部分,也作为天线的参考地,而所引入的T型缝的目的是为了增加天线的电长度从而减小天线的尺寸.

未加载T型缝的环缝天线属于传统的单倍波长环缝,所以其谐振频率可以通过式(1)计算获得,

$$f_g = \frac{c}{\lambda_g \sqrt{\epsilon_{eff}}} \approx \frac{c}{l_g \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}}, \quad (1)$$

其中, c 代表自由空间的光速, λ_g 代表导波波长, l_g 代表未加载T型缝的环缝天线的周长, ϵ_r 代表基板材料的相对介电常数.

1.2 馈电网络设计

所设计的馈电网络由1个50 Ω 的输入端口、4个50 Ω 的输出端口、3 dB T型功率分配器、70.7 Ω 四分之一波长变换器($\lambda_g/4$, λ_g 是导波波长,在中心频率5.8 GHz处为24.7 mm)、50 Ω 微带线和100 Ω 微带线组成.

馈电网络中的50 Ω 输入端口与SMA接头连接,而4个输出端口分别对4个单元天线进行耦合馈电,且这4个输出端口具有相同的振幅和变化的相位,在顺时针方向具体的相位分布为90°、270°、0°、180°.

馈电网络的设计在ADS(Advanced Design System)仿真软件中完成,其印制版图如图2所示.

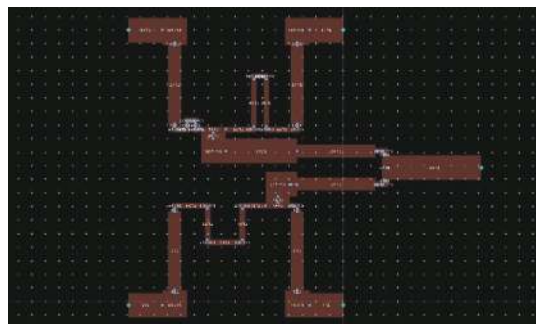


图2 馈电网络的印制版图设计

Fig.2 Printed circuit board of the feeding network

馈电网络的仿真 $|S_{11}|$ 如图3所示,该馈电网络的谐振频率为5.73 GHz,且在4.6~7 GHz的频带范围内,该馈电网络的 $|S_{11}|$ 均低于-10 dB,说明该馈电网络在该频段内具有良好的阻抗匹配.

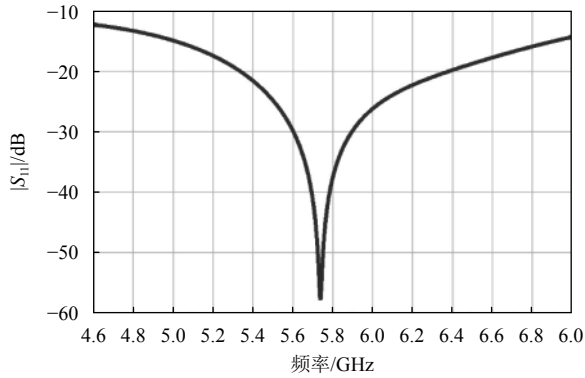


图3 馈电网络的仿真 $|S_{11}|$

Fig.3 Simulated $|S_{11}|$ of the feeding network

1.3 阵列天线设计

如图4所示,本设计将4个单元天线与馈电网络集成在单层FR4基板(相对介电常数为4.4,正切损耗为0.02).4个单元天线和参考地印制在基板的背面,馈电网络印制在基板的正面,从而通过耦合馈电对整个阵列天线进行激励.其中,4个单元天线中心对称放置,且两个天线单元的间距大约为 $0.5\lambda_0$ (λ_0 是在谐振频率在5.8 GHz处的真空波长, $0.5\lambda_0$ 约为25.9 mm),目的是减少单元天线之间的近场耦合以及抑制旁瓣的产生.此时,基板的背面既作为天线的辐射部分,也作为天线的参考地.所提出的宽带端射阵列天线的整体尺寸是 $36.26\text{ mm}\times36.26\text{ mm}\times1\text{ mm}$,具有低剖面、小体积、低空气阻力、低成本以及轻量化等优点,其参数值如表1所示.

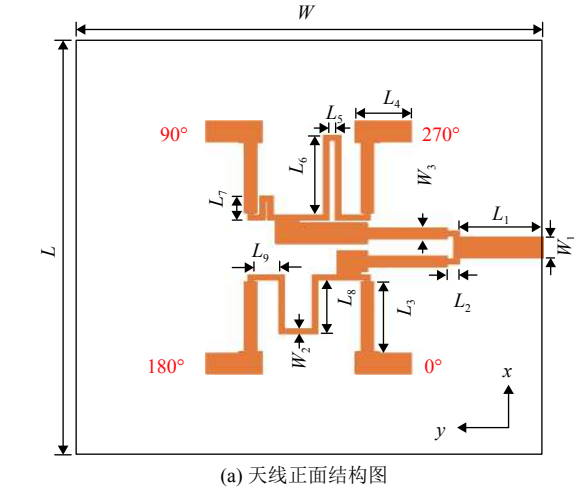
2 仿真结果分析

利用HFSS(High Frequency Structure Simulator)软件对提出的模型进行仿真验证,下面将对相关的仿真数据进行讨论分析,以评估天线的性能.

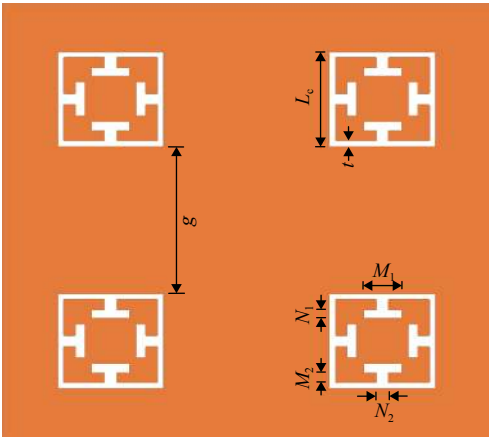
2.1 表面电场分布分析

如图5(a)所示,在馈电网络中,输入端口和输出端口处的电场强度最大,T型功率分配器和四分之一波长变换器处的电场强度较大,50 Ω 微带线和100 Ω 微带线处电场强度稍弱,而剩余位置的电场强度很弱;在图5(b)中,正方形闭合环缝和T型缝处的电场强度最大,参考地面剩余部分的电场强度很弱.

由表面电场强度的分布可知,在单元天线中引入的T型缝对整个阵列天线的性能产生显著的影响.同时,也进一步证明了T型缝的引入增加了天线的有效电长度,从而在不增加天线整体尺寸的情况下降低了天线的谐振频率,真正实现了天线的紧凑型设计,并降低了集成的难度.



(a) 天线正面结构图



(b) 天线背面结构图

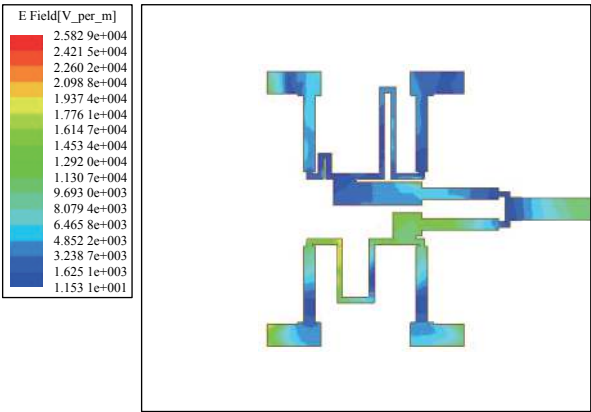
图4 紧凑型宽带端射阵列天线

Fig.4 Compact broadband endfire array antenna

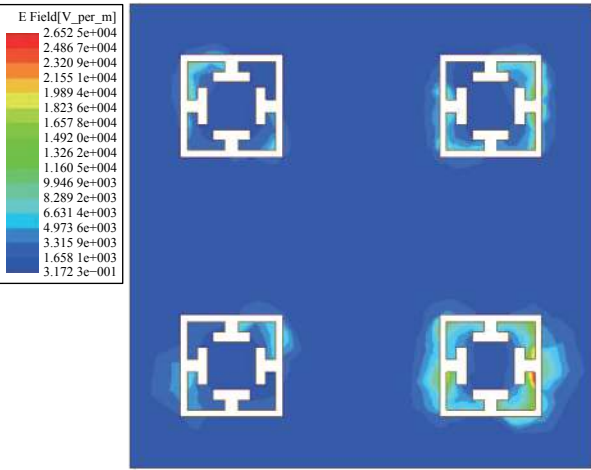
表1 宽带端射阵列天线的参数表					
Tab.1 Parameters of broadband endfire array antenna mm					
参数	数值	参数	数值	参数	数值
L	36.26	W_3	0.96	g	12.26
W	36.26	L_4	4.32	L_c	8
L_1	6.5	L_5	0.5	t	0.55
W_1	1.82	L_6	6.94	M_1	2.9
L_2	0.92	L_7	2.08	N_1	0.8
W_2	0.42	L_8	4.7	M_2	0.8
L_3	6.2	L_9	2	N_2	1

2.2 参数 L_c 分析

如图6所示,当参数 L_c 的值从7.8 mm增加到8.2 mm时,宽带端射阵列天线的谐振频率由5.98 GHz降低到5.64 GHz,这说明了通过增加 L_c 的尺寸可以降低天线的谐振频率,但随之而来的问题是单元天线的尺寸增大,从而导致宽带端射阵列天线的整体尺寸增大,不利于其集成到微多普勒效应雷达中,因此该方法不适用于本设计.



(a) 天线正面电场分布



(b) 天线背面电场分布

图 5 阵列天线的表面电场分布

Fig.5 Surface electric field distribution of array antenna

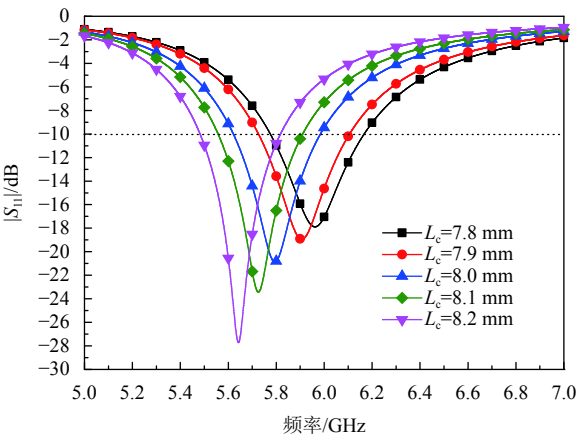


图 6 参数 L_c 对反射系数 $|S_{11}|$ 的影响

Fig.6 Influence of parameter L_c on reflection coefficient $|S_{11}|$

在本设计中, L_c 的最优值为 8.0 mm, 相对应的谐振频率为 5.8 GHz, 此时 $|S_{11}|$ 为 -21 dB, 表明该阵列天线在 5.8 GHz 处具有良好的阻抗匹配。

2.3 参数 M_2 分析

如图 7 所示, 当参数 M_2 的值从 0.6 mm 增加到

1.0 mm 时, 宽带端射阵列天线的谐振频率由 5.91 GHz 降低到 5.65 GHz, 这说明了通过增加 M_2 的尺寸同样可以降低天线的谐振频率. 与 L_c 不同的是, M_2 尺寸的增加并不会引起单元天线尺寸的增大, 有利于阵列天线集成到微多普勒效应雷达中, 因此该方法可以应用于本设计. 此外, 引入 T 型缝的优势进一步显示出来。

在本设计中, M_2 的最优值为 0.8 mm, 相对应的谐振频率为 5.8 GHz, 此时 $|S_{11}|$ 为 -21 dB, 表明天线具有良好的阻抗匹配。

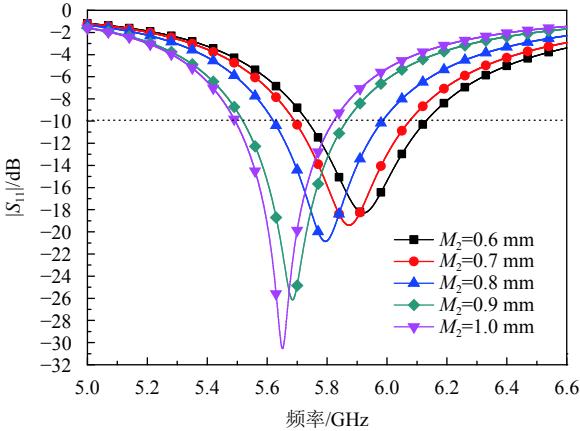


图 7 参数 M_2 对反射系数 $|S_{11}|$ 的影响

Fig.7 Influence of parameter M_2 on reflection coefficient $|S_{11}|$

2.4 参数 L_4 分析

如图 8 所示, 当参数 L_4 的值从 4.12 mm 增加到 4.52 mm 时, 宽带端射阵列天线的谐振频率由 5.83 GHz 降低到 5.76 GHz, 这说明了通过增加 L_4 的尺寸可以降低天线的谐振频率, 因此寻找最合适的馈电位置是本设计的关键。

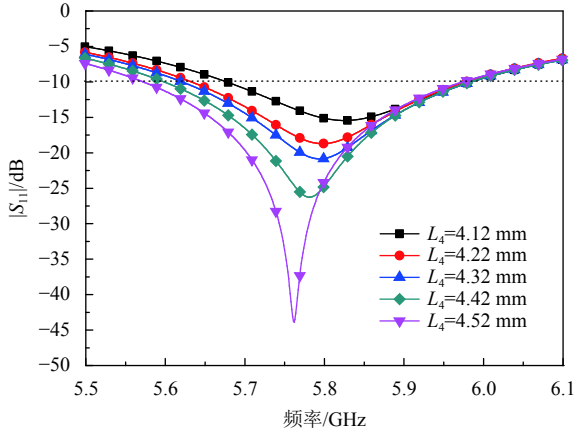


图 8 参数 L_4 对反射系数 $|S_{11}|$ 的影响

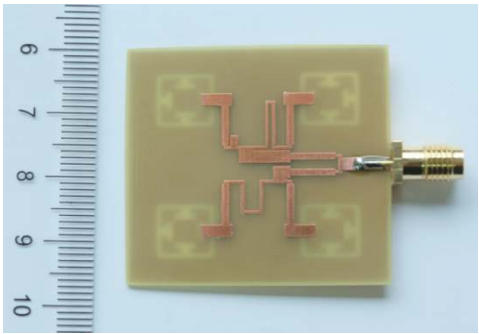
Fig.8 Influence of parameter L_4 on reflection coefficient $|S_{11}|$

在本设计中, L_4 的最优值为 4.32 mm, 相对应的谐振频率为 5.8 GHz, 此时 $|S_{11}|$ 为 -21 dB, 表明该阵列

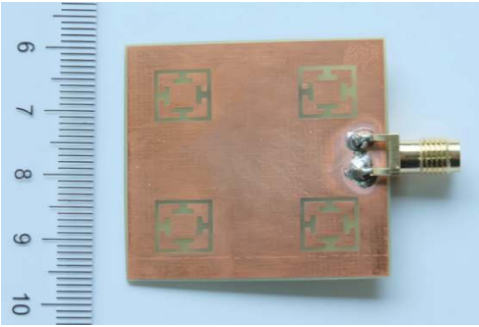
天线在5.8 GHz处具有良好的阻抗匹配。

3 实验结果分析

为了验证所提出阵列天线的性能,该仿真模型已经进行加工测试,如图9所示。下面将会对仿真结果与测试结果进行对比分析,以确保该设计的可行性。



(a) 天线加工模型的正面



(b) 天线加工模型的背面

图9 宽带端射阵列天线的加工模型

Fig.9 Fabricated model of broadband endfire array antenna

3.1 反射系数 $|S_{11}|$

利用型号为E5071C的安捷伦矢量网络分析仪对该天线模型的 $|S_{11}|$ 进行测试分析,图10为 $|S_{11}|$ 的测试数据与仿真数据的对比。

在仿真结果中,该阵列天线的谐振频率为5.8 GHz,对应的 $|S_{11}|$ 值为-50.6 dB,工作频带为5.61~6.57 GHz。在测试结果中,该阵列天线的谐振频率为5.85 GHz,对应的 $|S_{11}|$ 值为-42.9 dB,工作频带为5.72~6.71 GHz,绝对带宽为0.99 GHz,满足宽带特性的要求。

经过数据对比,可以发现 $|S_{11}|$ 的仿真结果与测试结果基本一致,但存在小幅度的频率移动,其引起原因主要有3个:一是实际加工时所采用的FR4板材的相对介电常数与仿真时有一定的差异;二是FR4基板的色散特性对谐振频率产生了较大的影响;三是天线与SMA接头之间的焊接效果对谐振频率产生了影响。

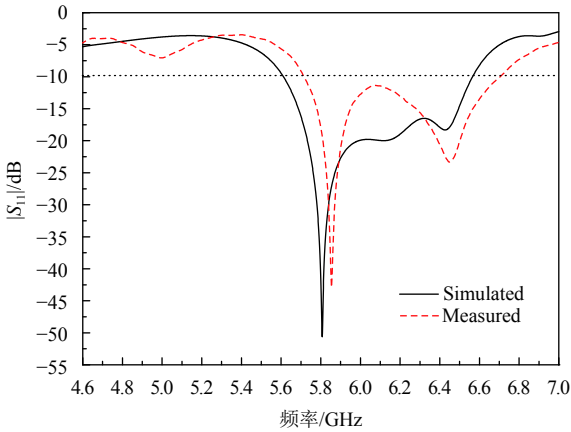


图10 $|S_{11}|$ 的仿真与测试结果对比

Fig.10 Comparison between the simulated and measured $|S_{11}|$

此外,该天线的工作频段位于ISM频段Industrial Scientific Medical(5.725~5.875 GHz),可广泛应用于工业、科学和医学领域中。

3.2 辐射方向图

利用SATIMO StarLab微波暗室对该天线进行远场辐射特性测试,其测试场景如图11所示。下面将对测试数据进行处理,以验证天线的辐射性能。

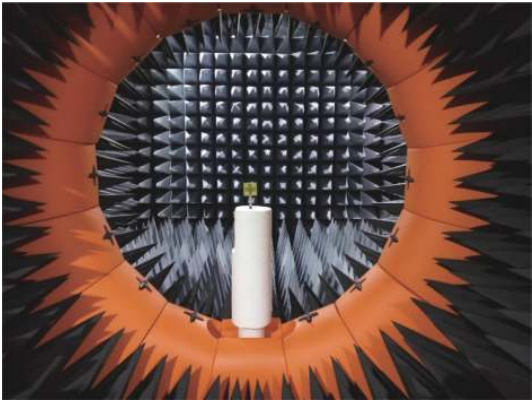


图11 SATIMO StarLab微波暗室测试场景

Fig.11 The test scene in SATIMO StarLab anechoic chamber

根据 $|S_{11}|$ 的测试结果,该天线的实际谐振频率为5.85 GHz,而该频点所对应的远场辐射方向图如图12所示。

由图12可知,该阵列天线的仿真辐射方向图与测试辐射方向图基本一致。由xz平面的辐射方向图可知,该阵列天线最强的辐射方向是沿着x轴方向;由yz平面的辐射方向图可知,该阵列天线的辐射主要集中在yz平面的中间。结合xz平面和yz平面的辐射方向图可知,所提出的宽带端射阵列天线具有良好的端射性能,满足微多普勒效应雷达的端射辐射要求。

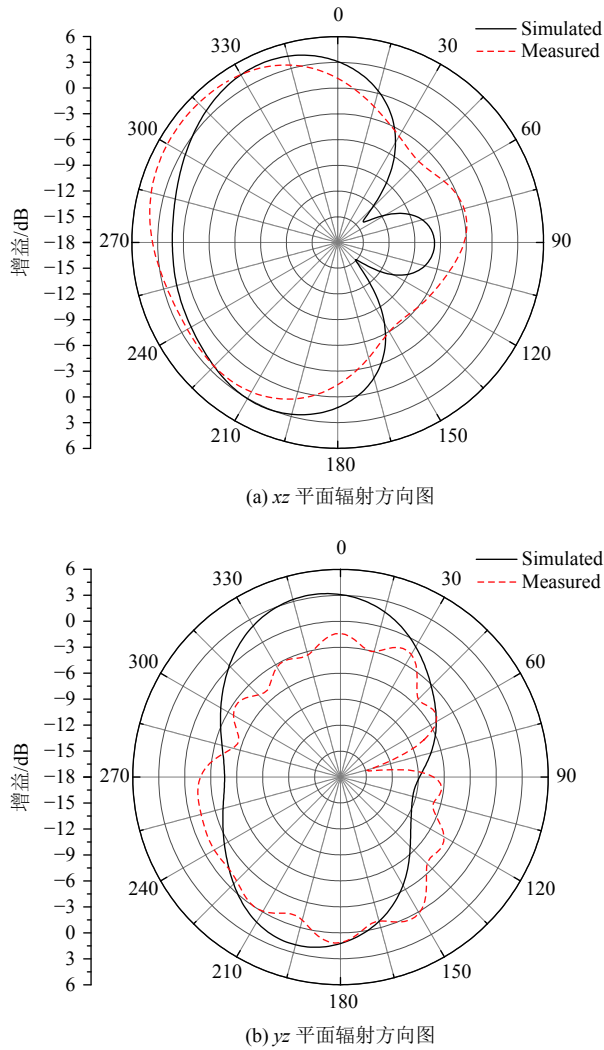


图12 谐振频率为5.85 GHz时xz和yz平面的辐射方向图

Fig.12 Radiation patterns on xz and yz plane at the resonant frequency of 5.85 GHz

4 结论

本文提出了一款紧凑型宽带端射阵列天线,该设计采用单层FR4基板,且通过引入T型缝以减小阵列天线的整体尺寸,从而实现紧凑型的平面设计,使其易于集成到微多普勒效应雷达中,且较低的加工成本有利于工业推广.此外,该微带阵列天线采用中心对称的单元天线布局、相同的激励幅度以及顺时针方向 90° 、 270° 、 0° 、 180° 的相位分布,获得了良好的端射性能.经加工测试,该阵列天线的工作频带为5.72~6.71 GHz,绝对带宽为0.99 GHz,满足宽带特性的要求.由此可知,所提出的紧凑型宽带端射阵列天线可以满足微多普勒效应雷达的实际应用要求,并对其发展有着极其重要的意义.

参考文献:

[1] TAHMOUSH D. Review of micro-Doppler signatures [J].

IET Radar Sonar and Navigation, 2015, 9(9): 1140-1146.

[2] DING Y P, TANG J T. Micro-Doppler trajectory estimation of pedestrians using a continuous-wave radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(9): 5807-5819.

[3] XU H S, LI Y X, YE D F, *et al.* A broadband offset-parallel-parallelgrams printed endfire antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1167-1170.

[4] ZHANG J, LU W J, LI L, *et al.* Wideband dual-mode planar endfire antenna with circular polarisation [J]. Electronics Letters, 2016, 52(12): 1000-1001.

[5] MUSHIAKE Y. Notes on the history of the Yagi-Uda antenna [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2014, 56(1): 256-257.

[6] GORBACHEVA P, EGOROV V M. A modified planar quasi-Yagi antenna for wireless communication applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8: 1091-1093.

[7] TRINH-VAN S, HWANG K C, YANG Y, *et al.* A printed quasi-Yagi antenna with a coupled slotline feed [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2015, 29(3): 402-409.

[8] WANG Y W, WANG G M, GAO X J, *et al.* Double-Slot Vivaldi Antenna with Improved Gain [J]. Electronics Letters, 2013, 49(18): 1119-1120.

[9] ZHANG J, LIU S, WANG F, *et al.* A compact high-gain Vivaldi antenna with improved radiation characteristics [J]. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2017, 68: 127-133.

[10] 莫凡, 林福民. 一种新型双频圆极化卫星导航天线的设计[J]. 广东工业大学学报, 2018, 35(2): 86-94.

MO F, LIN F M. A design of a novel dual-band circularly polarized satellite navigation antenna [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2018, 35(2): 86-94.

[11] 周梓发, 吴多龙, 李瑞, 等. 一种宽频带宽角度圆极化微带天线的设计[J]. 广东工业大学学报, 2010, 27(4): 36-38.

ZHOU Z F, WU D L, LI R, *et al.* A design of wide-band wide-angle circularly polarized microstrip antenna [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2010, 27(4): 36-38.

[12] TOHID S Y, SADEGHZADEH R A, NASER-MOGHADASI M. Microstrip-fed circularly polarized antenna array using semi-fractal cells for implicative band [J]. IETE Journal of Research, 2014, 60(6): 383-388.

[13] YANG L, ZHANG J D, WU W. Wideband microstrip series-fed magnetic dipole array antenna [J]. Electronics Letters, 2014, 50(24): 1793-U155.

[14] ROW J S, LIN Y M. Broadband slot arrays with wide H-plane beamwidth [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2016, 58(12): 2871-2876.

[15] BAIRAMI P, ZAVVARI M. Broad band circularly polarized square slot array antenna with improved sequentially rotated feed network for C-band application [J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2017, 9(1): 171-175.