



一种新型微带天线及其宽角扫描特性研究

郑万清¹, 杨杰¹, 庄露², 欧阳骏^{2*}

(1. 四川九州电器集团有限责任公司 四川 绵阳 621000; 2. 电子科技大学电子科学与工程学院 成都 611731)

【摘要】该文主要描述了一种适合宽角扫描的相控阵天线单元设计思路,研究了其组阵实现宽角扫描的特性。为尽量减少大角度扫描过程中由于天线单元波束宽度有限带来的阵列增益下降,采用折叠地板的方式展宽天线单元半功率波束宽度;同时,为了降低互耦引起的天线单元方向图畸变,在宽波束设计基础上探索了降低天线互耦的方法,使得真实阵列方向图尽可能地满足方向图乘积定理,从而实现宽角、高增益扫描的目的。经一维线阵的仿真和测试,设计了一种能扫描到 $\pm 70^\circ$ 且增益变化不大的宽角扫描阵列。设计的天线还能作为一种典型的天线单元,应用于5G等民用消费电子场景。

关键词 高增益; 高隔离度; 相控阵天线; 宽角扫描

中图分类号 TN82 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2019296

Design of a Low Mutual Coupling\Wide Beam Microstrip Antenna

ZHENG Wan-qing¹, YANG jie¹, ZHUANG Lu², and OUYANG Jun^{2*}

(1. Sichuan Jiuzhou Electric Appliance Group co. LTD Mianyang Sichuan 621000;

2. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract This paper introduces a novel idea for designing a phase array microstrip antenna element with low coupling and wide beam scan capabilities. Consisted of two-layers patches separated by an air gap and fold grounds, the proposed antenna element has a simple structure. In order to minimize the array gain drop due to the limited antenna beam width, the proposed antenna is designed to expand the half-power beam width as far as possible with fold grounds structure. At the same time, in order to reduce the distortion of antenna element pattern caused by mutual coupling, some methods are proposed for reducing the mutual coupling to make sure satisfy the product theorem of antenna pattern as much as possible. Moreover, a prototype of the proposed antenna and a linear array are fabricated and measured. The measured results show that the wide angle scanning array is capable of scanning up to $\pm 70^\circ$ along with stable gain characteristics. Meanwhile, the proposed antenna is a classical antenna which can be used for 5G applications ranging from infotainment solutions to consumer devices.

Key words high gain; high isolation; phased antenna array; wide angle scanning

一直以来,宽波束天线单元都具有很广泛的应用价值,其中包括比较典型的如:卫通天线^[1-2],需要较宽的波束宽度同时与多颗卫星进行通信;宽角扫描相控阵天线^[3-4],为减小宽角扫描时的增益下降,需要设计具有较宽波束宽度的天线单元等。

近年来,国内外对如何展宽天线单元波束宽度的研究逐渐增多,文献[5]设计了宽波束的 Vivaldi 天线,并应用于相控阵宽角扫描中;文献[6-7]利用电磁偶极子天线设计了宽波束的天线单元,并利用反射板进一步展宽波束宽度。同时也有一些研究

采用可重构技术,使用分时波束工作的方式,等效展宽了天线单元的波束宽度^[8-10]。当天线单元组阵时,阵列中天线单元的有源方向图会由于互耦的影响而发生改变^[11-13],所以在实际设计中,需要考虑天线单元的互耦环境,由此引申出了一系列的宽角阻抗匹配技术^[14-17]。另外,从根本上减小天线之间的互耦^[18-19]也是一种可行的思路。

综上,从实用性出发,本文选择了直接设计具有低互耦特性的宽波束天线单元,并进行阵列组阵研究,设计具有宽角扫描特性的相控阵列。

收稿日期: 2019-12-24; 修回日期: 2020-02-19

基金项目: 部级基金

作者简介: 郑万清(1982-),男,高级工程师,主要从事微波天线、雷达隐身技术等方面的研究。

通信作者: 欧阳骏, E-mail: 896961171@qq.com

1 宽波束天线单元原型设计

天线单元结构图如图1所示, 该天线单元由双层介质板复合而成, 在天线两侧有个垂直的金属板与地板相连, 作为天线波束宽度和低互耦设计的主要核心部件。介质板采用罗杰斯4350材料, 其相对介电常数选择为3.48。

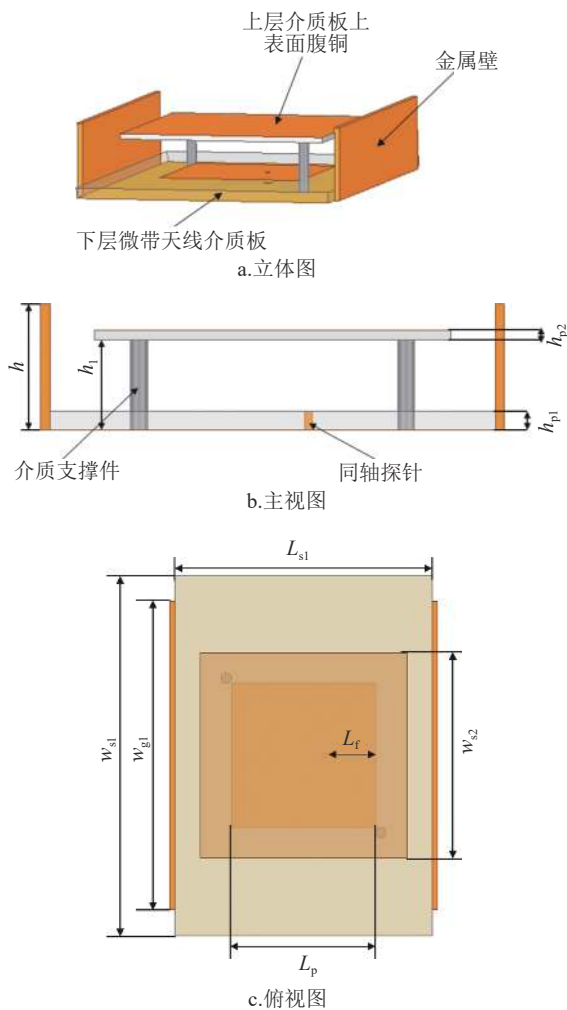


图1 宽波束天线单元结构示意图

在天线的两层介质板中, 下层介质板的上表面蚀刻了一个边长为 L_p 的小正方形贴片, 而下层介质板的下表面为金属地。与之对应的, 上层介质板下表面无金属结构, 上层介质板的上表面蚀刻一边长略大 (边长为 W_{s2}) 的正方形贴片。小贴片在下, 大贴片在上的设计是为了利用上贴片的反射, 拓展天线单元的波束宽度, 其设计思路类似于八木天线的反射器。

两块介质板通过两根分布在对角线上的介质柱进行支撑固定, 高度为 h_1 , 其具体高度将严重影响天线匹配, 后续将进行详细的优化。天线单元通过

底部探针强制馈电, 探针距离下层贴片边缘的距离为 L_f 。

为进一步拓展天线的波束宽度, 本文的微带贴片天线设计为三维结构, 如图1a所示, 地板进行翻折, 两侧金属板厚度分别为2 mm且与地板相连, 其高度为 h , 略高于最上层贴片。将其作为反射器, 对微带等效边沿缝隙的辐射进行适当地反射, 从而使左侧缝隙的辐射朝向右边, 右侧缝隙的辐射朝左边, 实现如图2所示的方向图形状, 从而得到一个更宽的波束。但需要注意, 方向图变化对两侧金属的高度变化非常敏感, 因为尺寸的变化可能使得天线在一个类腔结构中辐射, 反而减小天线的波束宽度。

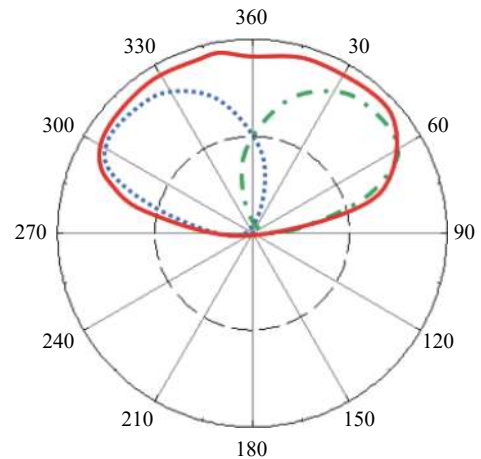


图2 折叠地板形成宽波束原理

2 天线有源方向图的仿真及优化

在设计工程实用的天线单元时, 必须考虑阵列环境对天线单元的影响, 故在本文的设计中, 使用一个8元线阵加以说明, 天线单元的设计将在此8元线阵中进行调整和优化。

其阵列环境仿真模型如图3所示。本文中天线工作的中心频点设计为2.9 GHz, 考虑到布阵和栅瓣抑制条件, 选择布阵间距为50 mm, 约为中心频率的半个波长。

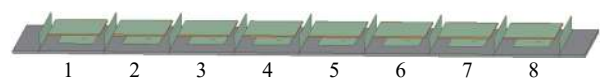


图3 单元在阵列环境下的仿真模型

天线各个设计参数在如图3的阵列环境中进行优化, 得到如表1所示的参数数据, 折叠地板高出最上方贴片4 mm。天线单元整体尺寸为 $50 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ 。

表 1 天线各设计参数最终取值

mm				
W_{s1}	W_{s2}	W_{g1}	L_{s1}	L_p
70	40	60	50	28
L_f	h	h_1	h_{p1}	h_{p2}
10	14	10	2	1

为说明各个主要参数对天线方向图、驻波及互耦等的影响，本文还进行了部分重要参数的对比仿真研究。图 4 为 4 号天线单元在有无上层贴片情况下的 S 参数曲线对比，从图中可明显看出，在谐振频点上，有上层贴片的天线结构其隔离度有 8 dB 的改善，这和天线本身结构带来的 S11 改变有一定的关系，但提升隔离度的效果还是较为明显。

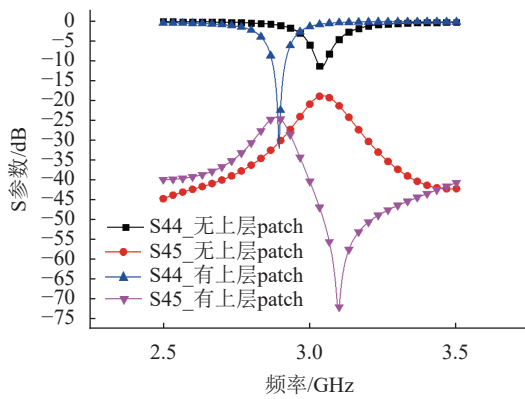


图 4 有无上层贴片对阵中天线单元隔离度的影响

图 5 为 4 号天线单元，在有无折叠地板时对 S 参数的影响对比。从图中可以明显看出，没有折叠地板的天线隔离度远比带有折叠地板的天线单元差，其中还需去除隔离度的影响，证明折叠地板对天线单元之间的耦合有极大影响。

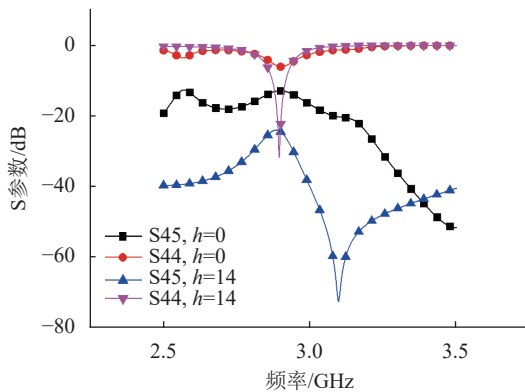


图 5 有无折叠地板对阵元 S 参数的影响

图 6 为不同折叠地板高度参数 h ，对 4 号阵元 S 参数的影响对比， h 变化从 13 mm 到 17 mm，天线隔离度最高和最低有 5 dB 的差距，隔离度最优的结果出现在 $h=14$ mm 的位置。可见，通过合理

调节 h 参数可改善天线的隔离度。

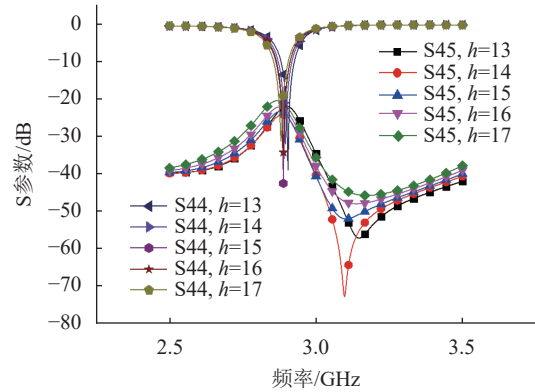


图 6 折叠地板高度对天线 S 参数影响图

需要值得注意的是，调整 h 参数时需要同时考虑对方向图波束宽度的影响。图 7 为不同折叠地板高度对天线单元辐射方向图的影响，可见不同高度对辐射方向图的影响很大，且趋势并非单调趋势，在 $h=14$ mm 时其波束最宽。

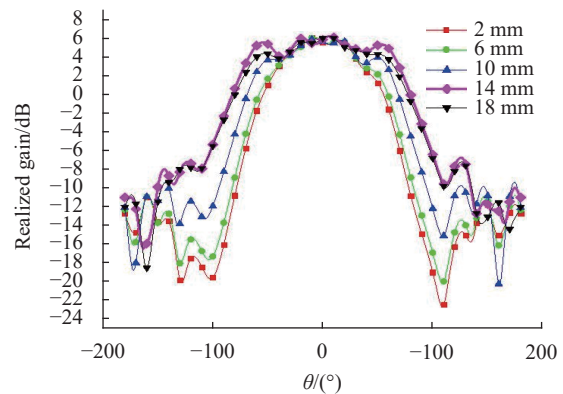


图 7 不同折叠地板高度对单元 4 有源方向图的影响

图 8 为该天线单元 (1, 2, 3, 4) 在阵列环境下的有源方向图对比，从中可看出由于低互耦的效果，其波束保持基本一致，且宽度极宽，大于 140° 。

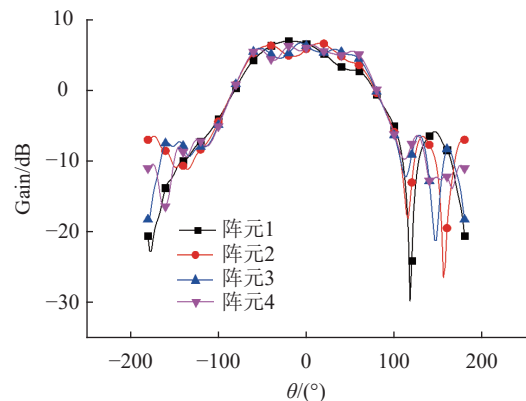


图 8 1, 2, 3, 4 号单元的有源方向图

3 阵列仿真及测试

3.1 阵列仿真

利用 HFSS 对阵列波束方向图进行仿真如图 9 所示, 其馈电相位采用公式 $\alpha = \beta d \sin \theta_m$ 计算得到 (其中 d 为天线单元间距, θ_m 为所需波束指向角度)。由图 9 可知, 在 $\pm 70^\circ$ 位置, 天线阵列增益下降小于 3 dB, 在 $\pm 50^\circ$ 位置, 增益下降小于 1 dB, 实现了高增益的宽角扫描效果。

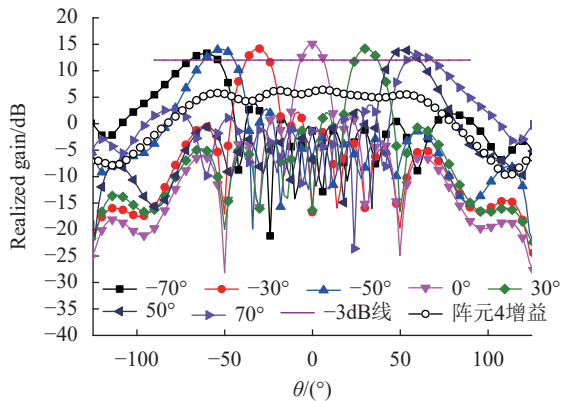


图 9 线阵的扫描性能

3.2 天线测试

图 10 为该线阵的实际加工图, 图 11 为该天线的测试和仿真 S 参数对比。由于加工精度和安装精度的原因, 测试和仿真结果有一定的频偏, 且由于损耗, 实测天线隔离度 35 dB, 略优于仿真结果。

图 12 为 4 号天线单元的单元方向图测试结果与仿真结果的对比, 实测天线单元的增益为 6.1 dB, 半功率波束 136° , 略低于 140° 的仿真结果。

图 13 为该天线阵在其中心工作频点测试的主极化和交叉极化方向图。由于移相器和线缆损耗, 实测增益 (扫描到 $\pm 50^\circ$ 时增益下降 1.8 dB, 在扫描到最大角度 $\pm 70^\circ$ 时增益下降为 2.6 dB) 略低于仿真结果。

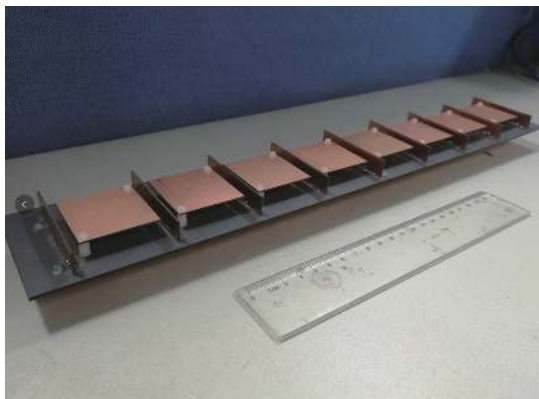


图 10 线阵实物

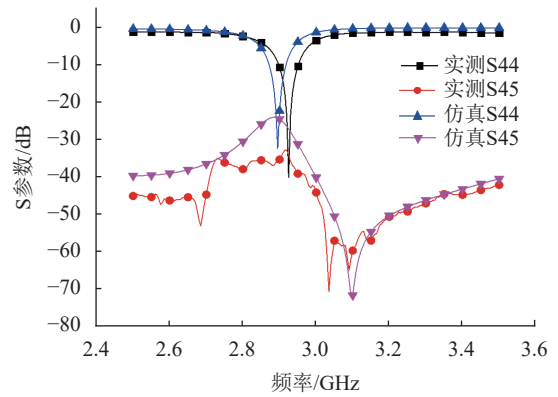


图 11 S 参数测试结果图

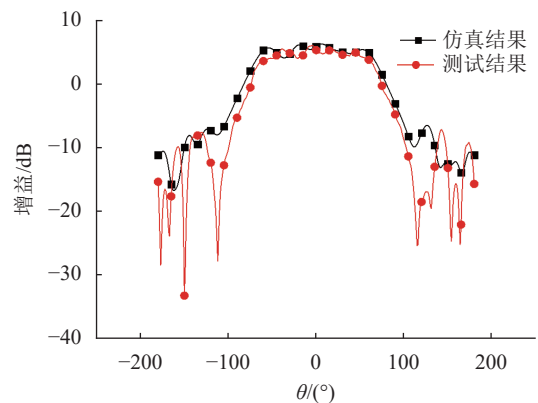
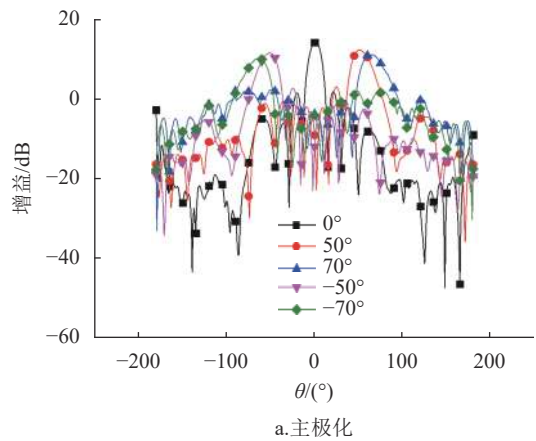
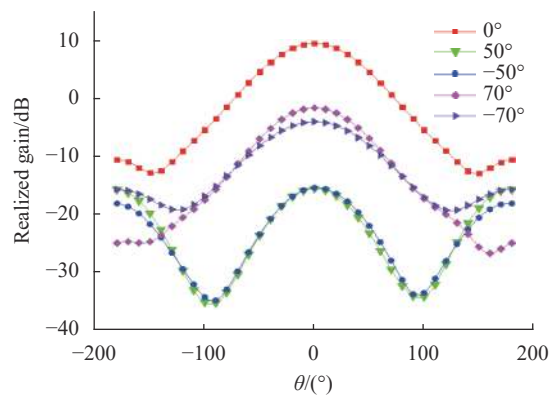


图 12 4 号单元方向图的仿真和测试结果



a.主极化



b.交叉极化

图 13 中心频点主极化和交叉极化实测方向图

4 结束语

本文提出了一种利用寄生贴片和折叠地板等技术设计的具有高隔离度和宽波束性能的新微带天线单元, 仿真得到其半波长布阵时的隔离度为 30 dB, 半功率波束宽度为 140°, 且单元主瓣增益平坦, 适合宽角扫描的相控阵天线。为了验证天线单元和组阵性能, 本文进行了实物的加工测试, 得到实测隔离度为 35 dB, 单元波束宽度为 136°。并在此基础上加入移相器进行了扫描状态下的性能测试, 在波束扫描状态下, $\pm 50^\circ$ 时增益下降 1.8 dBi, $\pm 70^\circ$ 时增益下降为 2.6 dBi, 同仿真结果基本吻合, 验证了其具有作为宽角扫描相控阵天线单元的能力。

参 考 文 献

- [1] MASHHADI S H H, JIAO Y C, CHEN J. Broadbeam cylindrical dielectric resonator antenna[J]. *IEEE Access*, 2019, 7(1): 112653-112661.
- [2] MENG Q, YANG W, CHE W, et al. Novel wideband low-profile dual-circularly polarized metasurface antenna[C]//2018 International Workshop on Antenna Technology (iWAT). Nanjing: [s.n.], 2018: 1-3.
- [3] XIAO D, WANG Bing-zhong, HE Guo-qiang. Research on a millimeter-wave phased array with wide-angle scanning performance[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2013, 61(10): 5319-5324.
- [4] MAILLOUX R J. Phased array antenna handbook[M]. 2nd ed. London: England Artech House, 2005.
- [5] 王茂泽. 二维宽带宽角扫描相控阵天线研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
WANG Mao-ze. Design of the antenna array of two dimension broadband and wide angle phased array antenna[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [6] WEN Ya-qing, WANG Bing-zhong, XIAO Ding. Wide-beam SIW-Slot antenna for wide-angle scanning phased array[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15(2): 1638-1641.
- [7] GUO Jia-jia, XIAO Shao-qiu, LIAO Shao-wei, et al. Dual band and low profile differentially-fed slot antenna for wide-angle scanning phased array[J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2017, 17(2): 259-262.
- [8] OUYANG Jun, YANG Feng, YANG Shi-wen, et al. A novel e-shape radiation pattern reconfigurable microstrip antenna for broadband, wide-beam, high-gain applications[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008, 50(8): 2052-2054.
- [9] SELVAM Y P, KANAGASABAI M, MOHAMMED G N, et al. A low profile frequency and pattern reconfigurable antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16(1): 3047-3050.
- [10] MEHTA A, MIRSHEKAR-SYAHKAI D. Pattern steerable square loop antenna[J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(9): 491-493.
- [11] JEDLICKA R P, POE M, CARVER K. Measured mutual coupling between microstrip antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 1981, 29(1): 147-149.
- [12] SVANTESSON T, RANHEIM A. Mutual coupling effects on the capacity of multielement antenna systems[C]//IEEE International Conference on Acoustics. [S.l.]: IEEE, 2001: 2485-2488.
- [13] GUPTA I J, KSIENSKI A A. Effects of mutual coupling on the performance of adaptive arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2006, 31(5): 785-791.
- [14] 郑学誉, 万长宁. 宽带宽角扫描相控阵天线[J]. *电波科学学报*, 1995, 10(1, 2): 33-38.
ZHENG Xue-yu, WANG Chang-ning. Scanning phased array antenna with broadband and wide angle[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 1995, 10(1, 2): 33-38.
- [15] 罗耀辉, 李正军. 宽角扫描相控阵天线有源阻抗的计算[J]. *空间电子技术*, 2009, 6(4): 84-87.
LUO Yao-hui, LI Zheng-jun. Active impedance simulation of wide-angle scanning phased array antenna[J]. *Space Electronic Technology*, 2009, 6(4): 84-87.
- [16] 鲁加国. 适于二维相控阵宽角扫描的非对称单脊波导裂缝线源[J]. *现代电子*, 2011, 23(4): 1-5.
LU Jia-guo. Asymmetric ridge waveguide slot linear array for one dimension wide angle scan phased array[J]. *Modern Electronics*, 2011, 23(4): 1-5.
- [17] 郑秋容. 微波光子晶体带隙特性及其在天线中的应用[D]. 合肥: 国防科学技术大学, 2007.
ZHENG Qiu-rong. Band gap characteristics of microwave photonic crystals and their applications in antennas[D]. He fei: National University of Defense Technology, 2007.
- [18] ZHOU Z, WEI Z, TANG Z, et al. Design and analysis of a wideband multiple-microstrip dipole antenna with high isolation[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(4): 722-726.
- [19] SAURABH A K, RATHORE P S, MESHRAM M K. Compact wideband four-element MIMO antenna with high isolation[J]. *Electronics Letters*, 2020, 56(3): 117-119.

编辑 税红