

文章编号: 2095-4980(2021)01-0085-05

一种等边三角形缝隙环宽带天线的设计

王友保, 张宥诚*, 郑大鹏

(南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 提出一种带有枝节槽的等边三角形缝隙环结构宽带天线。基于多模谐振原理, 将天线馈源设置在三角形缝隙环中非对称位置, 同时在三角形缝隙环上对称添加 2 个枝节槽以便形成更多谐振回路, 从而激励出多个模式, 得到多模谐振, 提高缝隙天线带宽。仿真和实测结果基本一致。实测所设计的天线的阻抗带宽为 2.11~3.32 GHz, $|S_{11}| < -10$ dB, 相对带宽达到 44.5%; 在阻抗带宽内, 天线辐射性能良好, 方向图具有较好的一致性。该天线可用于 LTE 40 和 41 频段无线通信系统中, 并且三角形缝隙环结构可以给宽频缝隙微带天线的研究提供一定参考。

关键词: 三角形缝隙环; 多模谐振; 无线通信; 宽频

中图分类号: TN82

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019357

Design of an equilateral triangular slot ring broadband antenna

WANG Youbao, ZHANG Youcheng*, ZHENG Dapeng

(College of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing Jiangsu 210044, China)

Abstract: A wideband antenna which has a structure of an equilateral triangular slot ring with a pair of branch slots is proposed. Based on the principle of multi-mode resonance, the antenna feed is set in the non-symmetrical position of the triangular slot ring, and the two branch slots are added symmetrically to the triangular slot ring in order to form many resonance circuits. Therefore, multi-mode resonance is obtained and the bandwidth of the antenna is improved. The results of simulation and measurement are basically consistent. The measured impedance bandwidth of the antenna is 2.11–3.32 GHz, $|S_{11}| < -10$ dB, and the relative bandwidth reaches 44.5%. Within the impedance bandwidth, the antenna radiation performance is good, and the direction pattern is basically the same. The antenna can be applied in LTE 40 and 41 wireless communication systems, and the triangular slot ring structure can provide some reference for the research of wideband slot microstrip antenna.

Keywords: triangular slot ring; multi-mode resonance; wireless communication; broadband

微带天线具有低轮廓、轻质量、低成本和易于与微波电路集成等优点, 其广泛用于雷达、卫星等无线通信领域^[1-2]。随着无线通信技术的不断进步, 通信设备朝着小型化、集成化、宽带化和智能化的方向不断发展。微带天线的窄带特性限制了它的应用, 努力提高微带天线的频带宽度成为目前天线技术研究的热点之一。微带缝隙天线作为微带天线的一种, 不仅拥有传统微带天线的优点, 同时也易于与其他物体共形。近年来, 科研人员提出了一类宽缝隙微带天线^[3-6], 其缝隙的宽度和长度大致相当, 并由宽缝隙区域上方较宽的微带线馈电, 形成 2 个正交模式同时在缝隙内激发, 天线获得了不错的频带宽度, 但这些天线大多数是不易共形的; 另一类是易于共形的窄缝隙微带天线, 采用多种技术得到较好的频带宽度, 如, 通过寄生谐振器或谐振模式沿馈线部分引入额外的非辐射谐振^[7-8]; 通过使用虚构的短路概念^[9]; 采用单极槽组合^[10]; 引入寄生通孔^[11]以及利用多模谐振^[12-13]等, 进而得到各种宽带缝隙天线。尤其值得关注的是近期利用多模谐振原理设计窄缝宽带天线方法^[14-18]。在文献[14-15]中, 通过在缝隙槽中心馈电, 并且在电场零点周围引入槽根进行扰动, 从而产生两个相互靠近的谐振宽带辐射, 天线带宽得到一定程度拓宽。文献[16]提出一种三模宽带缝隙天线, 利用叉状微带调谐短线馈电和槽根对缝隙中

收稿日期: 2019-09-25; 修回日期: 2019-11-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61673222)

作者简介: 王友保(1964-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为天线与电波传播、微波器件与电路、计算电磁学。email:001923@nuist.edu.cn

*通信作者: 张宥诚 email:jszmytx@163.com

被激发出的模式进行扰动，以产生 3 个谐振的辐射宽频特性。文献[17]利用特征模理论研究了对多模谐振缝隙天线缝隙槽中磁模和电模之间的相互作用，设计了一种简单的中心馈电的缝隙宽带天线。

文献[18]给出了一种带有枝节槽的宽频带圆形缝隙环微带天线，制作在 FR4 基板上，大小为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$ ，采用对称位置馈电，天线工作频带为 $2.15\sim 2.7\text{ GHz}$ ，相对带宽为 22.6%。本文基于多模谐振原理，结合文献[18]的缝隙天线设计技术，提出一种带有枝节槽的宽频带等边三角形缝隙环微带天线。同样使用 FR4 介质基板蚀刻天线，尺寸为 $65\text{ mm} \times 65\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$ ，馈电方式使用非对称方式，天线工作频带为 $2.11\sim 3.32\text{ GHz}$ ，相对带宽提高到 44.5%。该天线辐射性能良好，窄缝特性使其易于共形，具有一定的应用价值。

1 天线结构与与设计

多模谐振原理设计宽带天线是指在不引入额外的谐振辐射器情况下，在单个辐射体中相对选定的馈源形成尽可能多的电流谐振回路，进而可在该辐射体上激发多个谐振模式，实现天线较好的宽带特性。

本文依据多模谐振原理设计了一款宽频带窄缝隙微带天线，如图 1 所示。该天线印刷在大小为 $65\text{ mm} \times 65\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$ ，介电常数为 4.4，损耗角为 0.027 的 FR4 介质基板上。采用带有缝隙槽枝节的等边三角形缝隙环结构，缝隙宽度均为 W ，其他长度 L, L_1, S, d 等参见图 1，使用 $50\ \Omega$ 的馈线跨接在缝隙三角形非对称位置的内、外边缘上。这里需特别指出，采用非对称位置馈电和添加缝隙槽枝节均是为了产生更多的电流谐振回路，从而激励出尽可能多的模式，形成多模谐振，拓宽天线频带。为了得到最佳的天线宽频特性，对天线的参数 W, L_1, d, L 在电磁仿真软件 Ansoft HFSS 15.0 进行了仿真分析优化。

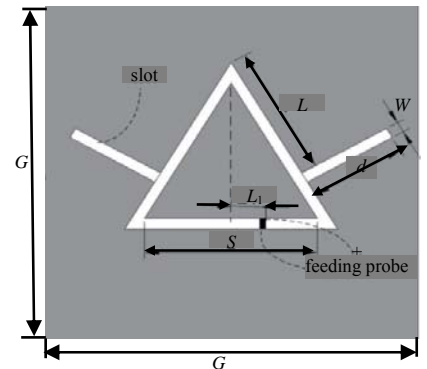


Fig.1 Antenna structure of proposed design
图 1 天线结构示意图

改变缝隙宽度 W ，其余参数固定不变，仿真结果如图 2 所示。由图可见，当 $W=2\text{ mm}$ 时，天线存在较好的宽频带回波损耗参数，同时保证天线的窄缝特性。同样，仅改变馈电点位置，从仿真结果图 3 可以看出，当馈电的位置为中心馈电时，天线的回波损耗并不理想，且频带较窄；馈电点从中心位置向右偏移时，出现 3 个明显的谐振点，使天线的带宽范围得到进一步扩展。经过反复尝试，最佳馈电点位置为 $L_1=5\text{ mm}$ 。

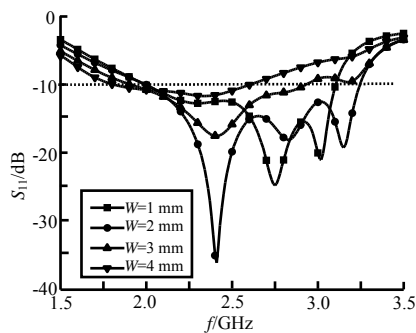


Fig.2 Characteristics of S_{11} as a function of slot width W
图 2 S_{11} 随缝隙宽度 W 变化的特性

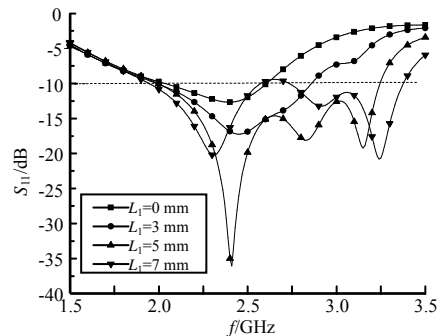


Fig.3 Characteristics of S_{11} as a function of feed position L_1
图 3 S_{11} 随馈电位置 L_1 变化的特性

图 4 给出仅有参数 d 变化时的天线回波损耗特性曲线，从图中可以看出，当枝节长度 $d=10\text{ mm}$ 时，天线的回波损耗仅在频带为 $3.02\sim 3.17\text{ GHz}$ 范围小于 -10 dB ，且损耗较大，不能满足宽频带通信需求。随着枝节槽长度的增加，天线性能得到明显改善，当枝节长度 $d=17\text{ mm}$ 时，天线呈现多谐振特点且损耗较小，带宽范围较大。继续增加枝节槽长度，该天线的谐振变成 2 个谐振，且谐振均向低频移动。当枝节槽长度 $d=20\text{ mm}$ 时，在 2.5 GHz 附近的天线回波损耗 $S_{11} > -10\text{ dB}$ ，不符合设计宽频天线的目的。图 5 给出仅有枝节槽位置参数 L 变化时的天线回波损耗特性曲线，从图中可以看出，天线枝节槽位置对天线的回波损耗参数影响较大。当 $L=24.5\text{ mm}$ 时，天线的带宽最理想。使用上述各优化

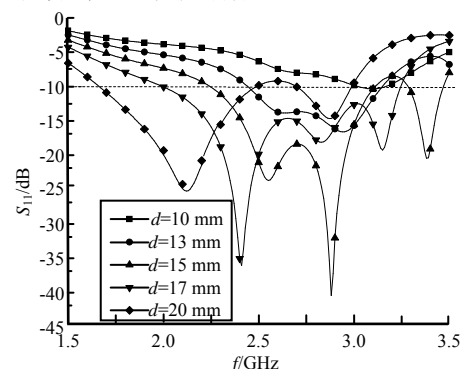


Fig.4 Characteristics of S_{11} changing with the length d of the branch slot
图 4 S_{11} 随枝节槽长度 d 变化的特性

的最佳参数对所设计天线模型进行仿真，得到该天线的频带范围为 2.01~3.29 GHz，相对带宽达到了 48.3%。可见，带有枝节槽三角形缝隙环天线可有效展宽天线的带宽。

为进一步说明该天线主要产生谐振模式的区域，分别给出了中心频率在 2.4 GHz, 2.8 GHz, 3.1 GHz 的电流分布图，如图 6 所示。可以看出，在 2.4 GHz 时，电流主要分布在底边和两侧枝节上，天线辐射主要由这两部分电流产生；当频率提高到 2.8 GHz 时，电流主要集中在等边三角环的底边、顶角和左侧枝节处；当天线工作在 3.1 GHz 时，电流主要集中在底边右下角和右侧枝节上，这两部分成为天线辐射的主体。

图 7 为增益随频率变化的仿真效果曲线。仿真结果表明，在阻抗范围内，该天线的增益均大于 3.5 dB，辐射效率达到 95%以上，满足天线工作要求。

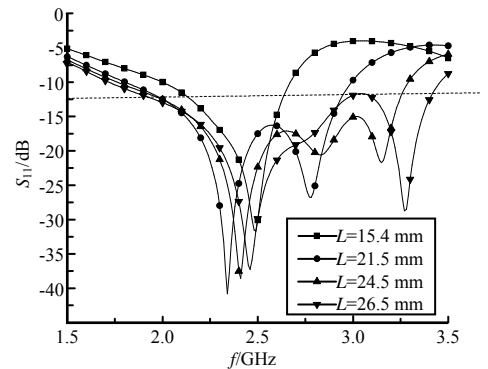


Fig.5 Characteristics of S_{11} changing with the position L of the branch slot

图 5 S_{11} 随枝节槽位置 L 变化的特性

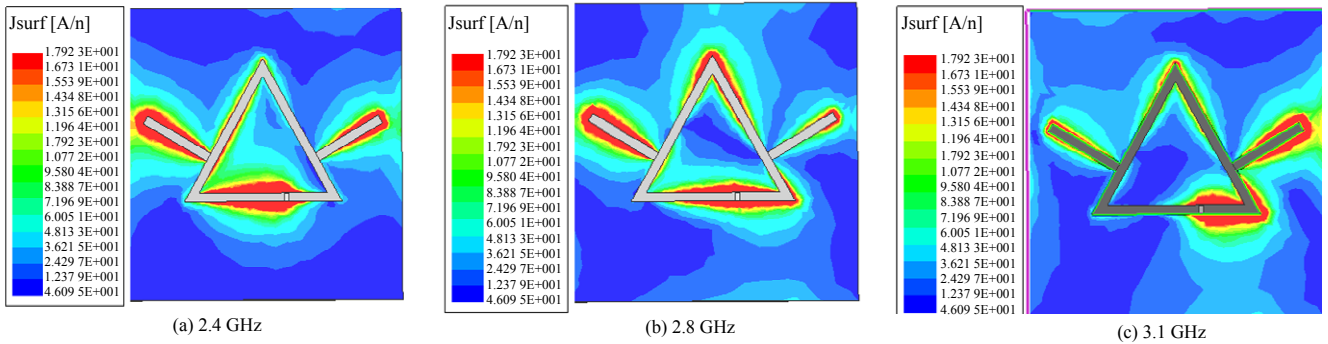


Fig.6 Distribution of antenna current

图 6 天线电流分布图

2 天线加工和测试

根据所设计的天线模型(如图 1)的优化结果，制作出实物天线，如图 8 所示，天线具体尺寸参见表 1。其中 h 为介质基板的厚度， g 为仿真设置的激励端口面宽度。

表 1 天线优化后尺寸的参数(mm)

Table1 Optimized parameters of the proposed antenna(unit:mm)

G	W	d	S	L	L_1	g	h
65	2	17	30	24.5	6	0.5	0.8

实物天线的回波损耗是在安捷伦 N5227A 网络矢量分析仪上测得的，测试结果由图 9 所示，天线的实测阻抗带宽范围为 2.11~3.32 GHz，相对带宽为 44.5%。同时，从图 9 中还可以看出，天线回波损耗的测试结果和仿真结果曲线基本吻合。实测曲线与仿真曲线间的微小偏差主要是天线加工制作的误差、FR4 介质基板质量及不均匀性、SMA 接头焊接精确度等因素影响而产生的。

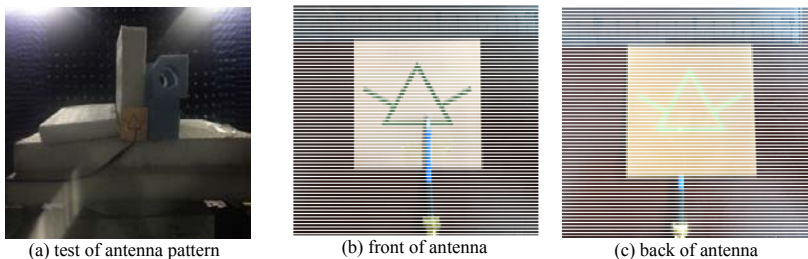


Fig.8 Physical and test of antenna

图 8 天线的实物和测试

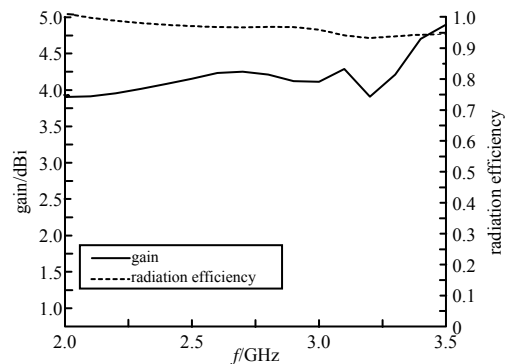


Fig.7 Simulation of the gain and efficiency of the antenna as a function of frequency

图 7 天线的增益和效率随频率变化的仿真图

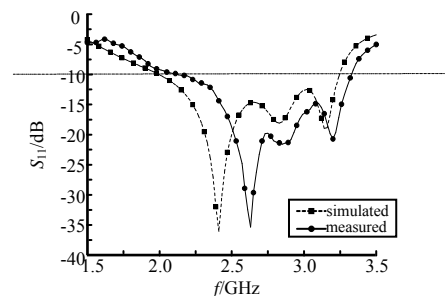


Fig.9 Results of measurement and simulation of S_{11}

图 9 S_{11} 的测量和仿真结果

图 10 给出了天线工作频带范围内的 3 个频点 2.4 GHz, 2.8 GHz, 3.1 GHz 的主极化和交叉极化辐射方向图。从图中可以看出, 该天线是双向辐射天线, 各个频点处的天线辐射方向图基本一致, 该天线具有稳定的辐射方向图。图 10 显示测量结果与仿真结果有微小差别, 产生的原因主要有两方面: a) 与 S_{11} 测量与仿真结果间的误差有相同的原因; b) 天线测试过程中夹具(主要位于天线两侧及后方)固有误差的影响。天线的方向图在带宽范围内主辐射性能能够满足天线在实际场景中的应用。

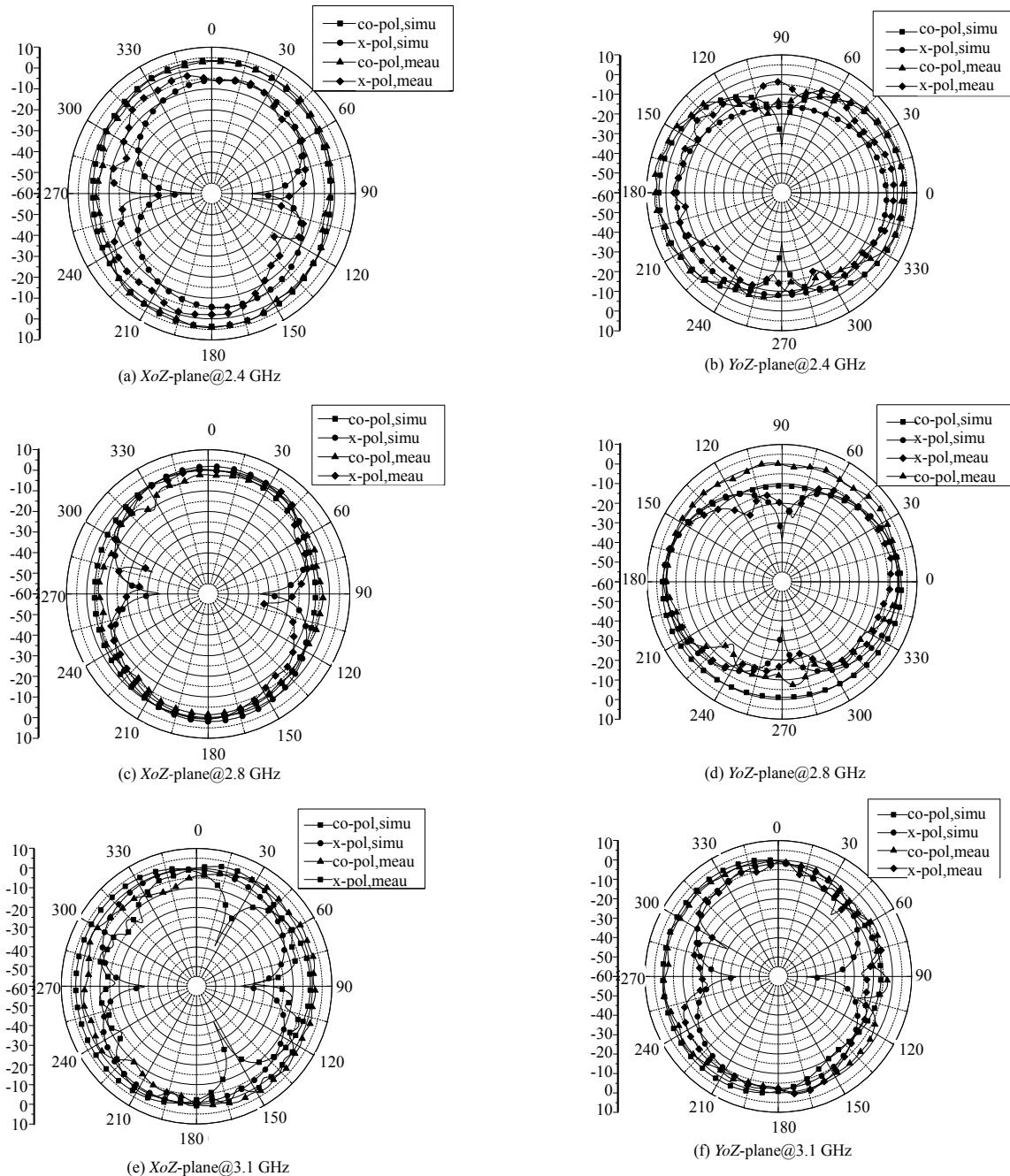


Fig.10 Simulated and measured radiation patterns
图 10 天线的仿真和实测辐射方向图

3 结论

针对目前微带缝隙天线带宽较窄的问题, 本文基于多模谐振原理, 设计了一种结构新颖带有枝节槽的等边三角形缝隙环微带天线, 并对影响天线性能的因素进行仿真分析优化, 最后进行实物制作和测试。所设计的天线工作频带为 2.11~3.32 GHz, 相对带宽达到 44.5%, 在工作的带宽范围内能够实现 3.5 dB 以上的增益, 实测结果与

仿真结果大致吻合, 天线辐射性能良好, 实现了拓宽缝隙微带天线带宽的目的。设计的天线结构简单, 尺寸较小, 易于共形, 易于制作, 能够在 LTE 40 和 41 频段无线通信系统中使用。另外, 该天线具有双向辐射性能, 辐射方向稳定, 可安装于室内墙壁内, 实现两个房间内的宽带通信, 具有一定应用价值。

参考文献:

- [1] POZAR D M. Microstrip antennas[J]. Proceedings of the IEEE, 1992,80(1):79-91.
- [2] KOVITZ J,SAMII Y R. Using thick substrates and capacitive probe compensation to enhance the bandwidth of traditional CP patch antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014,62(10):4970-4979.
- [3] KAHRIZI M,SARKAR T K. Analysis of a wide radiating slot in the ground plane of a microstrip line[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1993,41(1):29-37.
- [4] JANG Y W. Broadband cross-shaped microstrip-fed slot antenna[J]. Electronics Letters, 2000,36(25):2056-2057.
- [5] 谭菲菲,黄何平,刘长军. 一种六边形缝隙宽带微波天线设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(2):245-248. (TAN Feifei,HUANG Heping,LIU Changjun. Design of a hexagonal slot wideband microwave antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronics Information Technology, 2016,14(2):245-248.)
- [6] 高向军,王光明,朱莉,等. 一种新型宽带微带缝隙天线的设计[J]. 电子科技大学学报, 2007(5):883-885,895. (GAO Xiangjun,WANG Guangming,ZHU Li,et al. Design of a novel broadband microstrip slot antenna[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007(5):883-885,895.)
- [7] ZHU L,FU R,WU K L. A novel broadband microstrip-fed wide slot antenna with double rejection zeros[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2003(2):194-196.
- [8] ZHU L,SUN S,MENZEL W. Ultra-Wideband(UWB) bandpass filters using multiple-mode resonator[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2005,15(11):796-798.
- [9] BEHDAD N,SARABANDI K. A multiresonant single-element wide-band slot antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2004(3):5-8.
- [10] HARMA S K,SHAFAI L,JACOB N. Investigations of wideband microstrip slot antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004,52(3):865-872.
- [11] YUN S,KIM D Y,NAM S. Bandwidth enhancement of cavity-backed slot antenna using a via-hole above the slot[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012(11):1092-1095.
- [12] GOPIKRISHNA M,KRISHNA D D,AANANDAN C K,et al. Design of a microstrip fed step slot antenna for UWB communication[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2010,51(4):1126-1129.
- [13] HUANG X D,CHENG C H,ZHU L. An Ultrawideband(UWB) slotline antenna under multiple-mode resonance[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2011,60(1):385-389.
- [14] LU W,ZHU L. A novel wideband slot line antenna with dual resonances:principle and design approach[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015(14):795-798.
- [15] LU W J,ZHU L. Wideband stub-loaded slot line antennas under multi-mode resonance operation[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2015,63(2):818-823.
- [16] GUO C R,LU W J,ZHANG Z S,et al. Wideband non-traveling-wave triple-mode slotline antenna[J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2017,11(6):886-891.
- [17] MOHAMED M H N,EVA A D,MARTA C F,et al. Designing slot antennas in finite platforms using characteristic modes[J]. IEEE Access, 2018(6):41346-41355.
- [18] LIN J,CHU Q. Increasing bandwidth of slot antennas with combined characteristic modes[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018,66(6):3148-3153.