

一种共面波导馈电的双陷波渐变槽天线

李振亚* 竺小松 张建华

(国防科技大学电子对抗学院 合肥 230037)

摘要: 为了滤除WIMAX(3.3~3.8 GHz)和WLAN(5.125~5.825 GHz)窄带信号对超宽带系统的干扰, 该文提出一款共面波导馈电的小型化双陷波渐变槽天线。共面波导结构可以有效地扩展天线的带宽, 实现对整个UWB(3.1~10.6 GHz)频段的全覆盖。通过在天线的馈线上开L型缝隙和在辐射贴片上开一对E字型缝隙的方法, 有效实现了在3.15~3.97 GHz和4.94~6.05 GHz频段的双陷波特性和增益特性, 能够抑制WIMAX和WLAN对超宽带系统的干扰。该天线结构简单紧凑, 尺寸非常小, 仅为40 mm×18 mm×0.813 mm。仿真和实测结果表明该天线在超宽带波段内具有良好的陷波特性和增益特性, 可以应用于小型化超宽带系统中。文中方法对于陷波渐变槽天线的研究具有一定的借鉴意义。

关键词: 渐变槽天线; 共面波导; 双陷波; 小型化

中图分类号: TN823

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)08-1867-06

DOI: 10.11999/JEIT171055

A Co-planar Waveguide Fed Dual Band-notched Tapered Slot Antenna

LI Zhenya ZHU Xiaosong ZHANG Jianhua

(Institute of Electronic Countermeasure, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: In order to filter out the interference of WIMAX (3.3~3.8 GHz) and WLAN (5.125~5.825 GHz) narrowband signals to Ultra WideBand(UWB) system, a Co-Planar Waveguide (CPW) fed miniaturized tapered slot antenna with dual band-notched characteristics is proposed. The CPW structure can effectively extend the bandwidth of the antenna and realize the full coverage of the whole UWB (3.1~10.6 GHz) frequency band. The dual band-notched characteristics (3.15~3.97 GHz and 4.94~6.05 GHz) are effectively achieved by etching the L-shaped slot in the antenna feeder and opening a pair of E-shaped slots in the radiating patch, which can inhibit WIMAX and WLAN interference to the UWB system. The antenna is simple and compact, and the size is very small, only 40 mm×18 mm×0.813 mm. The simulated and measured results show that the antenna has good notch and gain characteristics in the ultra wideband band, and can be used in miniaturized UWB system. The method has certain reference significance for the research of notched tapered slot antenna.

Key words: Tapered slot antenna; Co-Planar Waveguide (CPW); Dual band-notched; Compact

1 引言

超宽带(Ultra WideBand, UWB)天线作为无线通信传输系统的重要终端组件, 被广泛地应用于超高速无线通信系统中。随着FCC将3.1~10.6 GHz划为超宽带的民用频段^[1]后, 平面超宽带天线的研究设计出现了井喷式的发展, 设计一种结构简单、性能优良、剖面低, 易于共形的超宽带天线^[2,3]具有重大的现实意义。由于UWB系统覆盖的频带

很宽, 在其工作频段内包含着很多窄带系统, 比如微波互联网(3.3~3.8 GHz)、无线局域网WLAN(5.125~5.825 GHz)等, 如何很好地避免不同工作系统间的干扰已经成为急需解决的问题。为了抑制不同频段间的干扰, 科研人员提出了具有陷波特性的超宽带天线^[4,5]。

以往对于超宽带陷波天线的研究大多局限于超宽带平面单极子等全向天线的陷波, 对于定向超宽带天线的陷波研究相对较少。渐变槽天线^[6,7]作为一种常见的定向超宽带天线, 具有剖面低、方向性好、易于组阵等优点。渐变槽天线的研究主要集中在提高其辐射增益^[8]、小型化^[9]和实现圆极化^[10]等方面, 研究陷波型渐变槽天线^[11-16]同样非常重要。

收稿日期: 2017-11-14; 改回日期: 2018-04-26; 网络出版: 2018-05-30

*通信作者: 李振亚 lizhenya7189@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61671454)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61671454)

文献[11~13]通过开槽的方式实现了陷波特性和缺点是天线尺寸太大,陷波效果不是很理想。文献[14,15]采用滤波器和EBG结构来实现陷波特性和加工比较复杂。文献[16]采用开槽和加载相结合的方法,设计一种双陷波渐变槽天线。文献[17]对比了H-SRR和S-SRR两种加载结构,实现了双陷波效果,但是低频带的陷波频带过窄。

共面波导具有辐射损耗小、色散性好的优点,非常适合于超大规模集成电路的发展。共面波导天线金属结构只有一层,对加工的精度要求也不高,相比于传统的微带馈电天线,可以有效地展宽天线的阻抗带宽,有利于天线的小型化,且易共形。本文设计了一款小型化的共面波导双陷波渐变槽天线,天线的陷波特性非常好。通过在天线的共面波导馈电线上开L型缝隙和辐射贴片上开一对E字型缝隙的方法,实现了双陷波特性和可以有效滤除微波互联网WIMAX(3.3~3.8 GHz)和无线局域网WLAN(5.125~5.825 GHz)的干扰。改变缝隙长度可以灵活地控制陷波中心频率,非常方便,天线的工作带宽很好地覆盖了整个超宽带(UWB)的频段。

2 天线的设计与分析

渐变槽天线是通过在金属贴片上开槽线缝隙形成的一种天线形式,该天线由较窄槽线逐步过渡到较宽槽线,形成一种类似喇叭口的形式向外辐射和接收电磁波。天线的工作频率由槽线的宽度决定,槽线宽度一般变化范围大,可以实现宽带传输。由于渐变槽天线具有带宽宽、定向性好、交叉极化低等优点,因而被广泛地应用于超宽带系统中。图1即为所设计的双陷波超宽带渐变槽天线结构图。天线的整个尺寸为40 mm×18 mm,选用罗杰斯RO4003C介质板材,介电常数为3.38,损耗角正切值为0.0027,厚度为0.813 mm。天线采用共面波导

的馈电方式,相比微带线馈电方式具有更小的尺寸。金属在介质板单面印刷,很容易加工。

采用HFSS高频仿真软件,通过天线的参数优化设计,最终得到双陷波渐变槽天线的具体尺寸如表1所示。

表1 优化后的天线单元参数

参数	数值(mm)	参数	数值(mm)
L	18.0	W	40.0
L_1	2.2	W_1	11.0
L_2	2.7	W_2	3.4
L_3	3.5	W_3	3.8
L_4	6.0	W_4	8.5
L_5	2.0	S	3.4
L_6	4.2	d	3.0

由于传统无线通信系统工作频率(微波互联网WIMAX(3.3~3.8 GHz)、无线局域网WLAN(5.125~5.825 GHz))与超宽带天线的工作频带有重叠,不可避免地会对超宽带系统造成干扰,设计具有单陷波、双陷波和多陷波功能的UWB天线显得尤为重要。如图1所示,为了滤除WIMAX的干扰,产生较大的反射系数,采用在共面波导的馈线上开L型缝隙的方法。同时,为了抑制WLAN的干扰,又在天线辐射贴片上开取了一对E字型缝隙。

天线的设计流程如图2所示。根据50 Ω馈电端口阻抗特性,确定了天线馈电端口尺寸,通过HFSS软件调整优化开口处宽缝隙尺寸大小和在共面波导馈电终端处增加长条形缝隙,本文首先设计了小型化的共面波导超宽带渐变槽天线。然后在该天线的基础上通过开L型缝隙,首先实现中心频率在3.5 GHz的单陷波,继而通过开E字型缝隙,实现中心频率在5.5 GHz的单陷波,最后将两种结构结合应用于天线上,通过优化缝隙尺寸,实现陷波中心频率在3.5 GHz和5.5 GHz的双陷波天线。E型和L型可以有效地扰乱天线表面的工作电流,起到半波长谐振结构的作用。改变缝隙结构的长度可以起到调节陷波频率的作用,缝隙的尺寸满足式(1):

$$L_d \approx \frac{c}{f_d \sqrt{2(\epsilon_r + 1)}} \quad (1)$$

这里, c 代表光速, f_d 代表陷波中心频率, ϵ_r 为介质板材的相对介电常数。根据式(1)经验公式,可以粗略估算陷波频率对应的缝隙长度,然后结合HFSS软件参数优化功能,设计出需要的陷波超宽带天线。

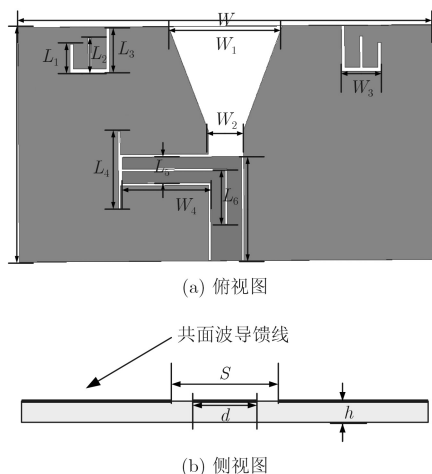


图1 天线结构图

图3为天线设计过程中4种不同天线和参数优化对应的驻波比曲线。从图3(a)可以看出，渐变槽天线的驻波比曲线在3.1~10.6 GHz频段内都小于2，很好地覆盖了整个超宽带工作范围。图3(b)为开L型结构的天线驻波比曲线，通过合理优化L型结构的尺寸，使陷波频段工作于3.25~4.10 GHz，有效地覆盖了整个WIMAX (3.3~3.8 GHz)波段，驻波比峰值达到了97，陷波特性好。图3(c)为开E型槽天线的驻波比曲线，可以看出，陷波频段为4.92~5.97 GHz，有效地滤除了整个WLAN(5.125~5.825 GHz)波段，单陷波驻波比峰值达到了17，陷波效果明显。图3(d)为驻波比曲线随L型缝隙长度的变化规律，从图中可以看出，调节L型缝隙的长度，可以调整低频段陷波的中心频率，缝隙越长，对应的陷波中心频率越低。图3(e)为驻波比曲线随E字型缝隙长度的变化规律，从图中可以看出，调节E字型缝隙的长度，低频段陷波中心频率基本不

变，只改变了高频段的陷波频率，这从侧面说明，两种缝隙对彼此的影响作用相对较小。图3(f)为最终优化设计的双陷波Vivaldi天线的驻波比随频率的变化关系，可以看出两种不同结构的缝隙产生的双陷波中心频率相比于单陷波会有所偏移，驻波峰值也会互相影响，通过参数优化设计使陷波的中心频率分别对应3.5 GHz和5.5 GHz。天线的陷波频段最终工作于3.15~3.97 GHz和4.94~6.05 GHz，天线的工作频率为2.8~9.7 GHz。

为了更直观地理解天线的陷波特性，下面从天线表面电流来分析陷波原理。图4为天线的表面电流分布，图4(a)和图4(b)分别为工作频率为3.5 GHz时，超宽带天线和双陷波天线对应的天线表面电流图。由图4(a)可以看出，非陷波工作条件下，共面波导天线电流主要分布于馈电端的双边缝隙中，而由图4(b)可以看出，陷波工作条件下，表面电流主要沿着L型缝隙分布，集中于L型拐角处，改变了

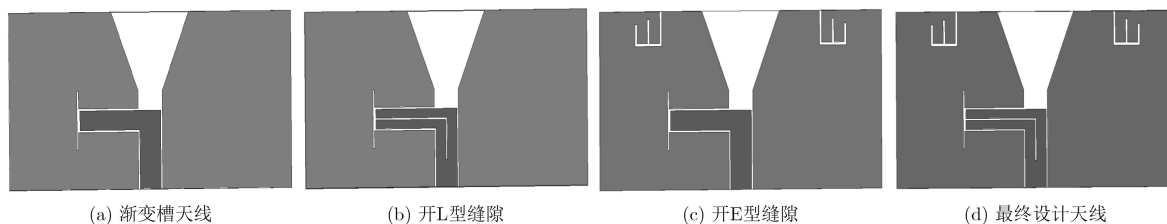


图2 天线的设计流程

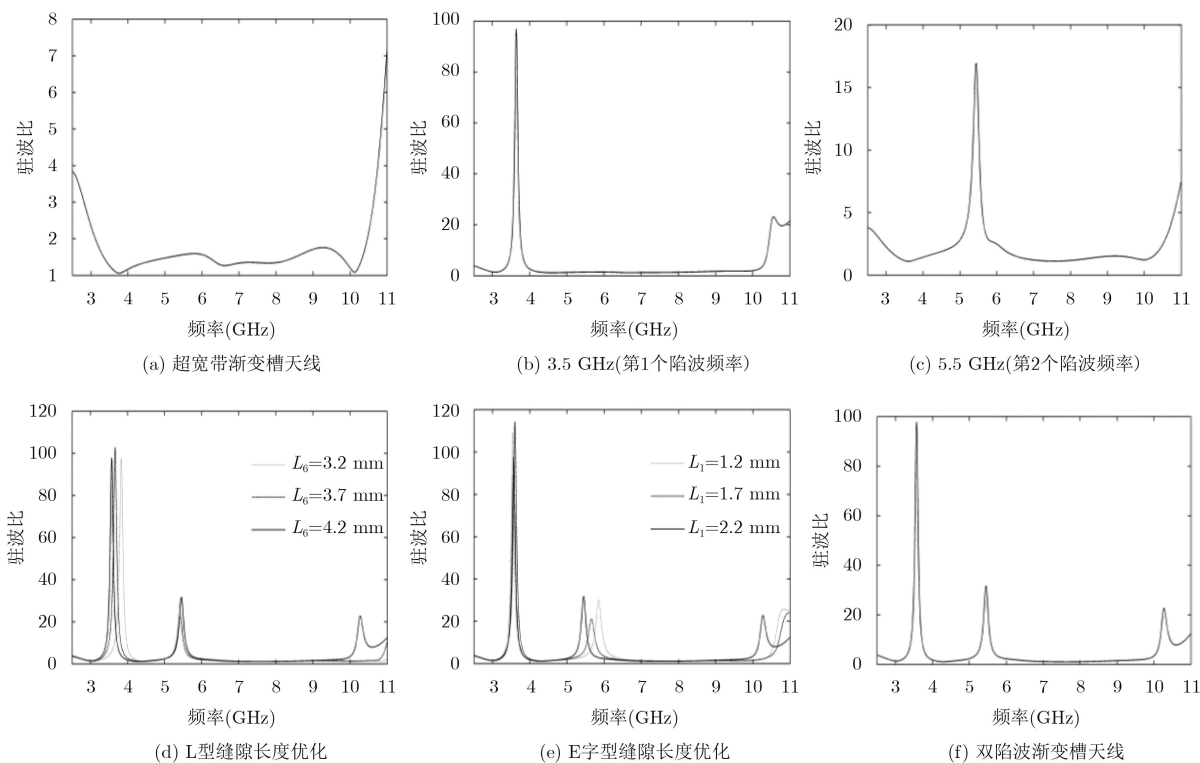


图3 4种不同天线和参数优化驻波比曲线

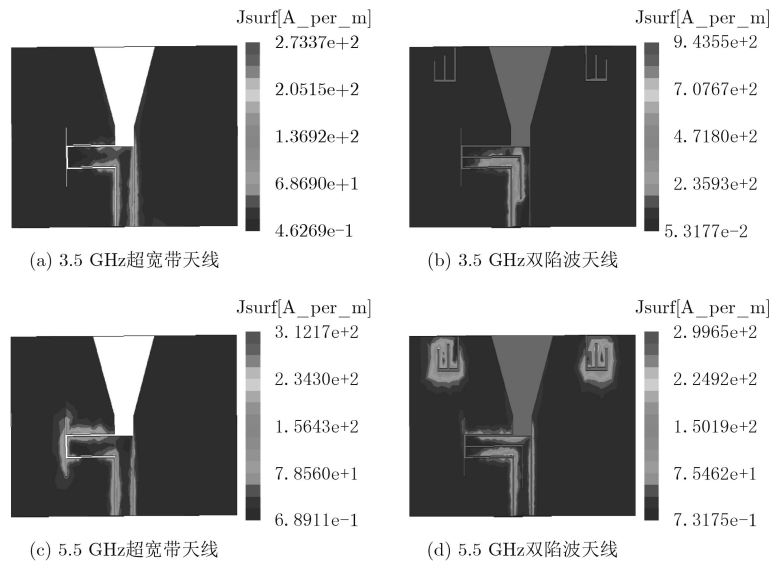


图4 辐射贴片表面电流分布图

天线的电流分布,产生谐振效果,阻抗失配,在陷波频率周围产生高衰减,因而天线不能正常工作。同时可以看出,3.5 GHz工作条件下E字型结构对陷波未产生影响。图4(c)和图4(d)分别为工作频率为5.5 GHz时,超宽带天线和双陷波天线对应的天线表面电流图。由图4(c)可以看出,非陷波工作条件下,天线电流分布图和工作在3.5 GHz的时候大致一致,仍然分布于馈线周边,由图4(d)可以看出,表面电流除了分布于馈线周围,在E字型缝隙周边也有大量分布,能量集中,该结构类似一个谐振腔,引起阻抗失配,天线能量辐射不出去,因而起到了陷波作用。从电流分布可以看出,天线之所以能够产生陷波效果,是因为在馈线和辐射贴片上开槽、开缝,影响了天线的表面电流分布,使能量在小块区域大量集中,产生谐振效果,继而影响到天线的输入阻抗,导致阻抗失配,无法正常工作,产生陷波作用。

3 天线测量结果

为了进一步验证设计陷波天线的实用价值和方案可靠性,按照上文给出的优化后的天线尺寸加工了天线实物,利用矢量网络分析仪和微波暗室对天线实物进行了测量。图5为天线加工实物图,可以看出天线整体尺寸非常小。图6为实际测量得到的天线驻波特性图,与仿真驻波比曲线做了对比。实测的天线驻波比与仿真驻波比陷波趋势基本趋于一致,在3.5 GHz和5.5 GHz频率附近产生陷波效果,而且陷波特性明显,驻波比峰值均超过了70。测量得到的陷波低波段为3.2~4.0 GHz,高频段陷波波段为4.50~5.85 GHz。测试的陷波中心频率相对于仿真的中心频率有所偏移,可以认为这是由于

天线的加工误差和测量误差导致。

为了进一步验证陷波特性,对双陷波天线的峰值增益进行了测量,如图7所示。从图7中可以看出天线的增益在整个工作频段内均为正值,稳定在2~6 dBi左右,而在陷波波段增益急剧下降。天线在3.5 GHz和5.5 GHz测量的峰值增益分别为-5.5 dB和-8.5 dB。可见,天线在陷波波段内能量辐射不出去,无法正常工作。

图8为测量得到的天线E面和H面辐射方向图,选取了两个陷波频率(3.5 GHz和5.5 GHz)和两个非陷波频率(4.5 GHz和8.0 GHz)进行对比观察测量。

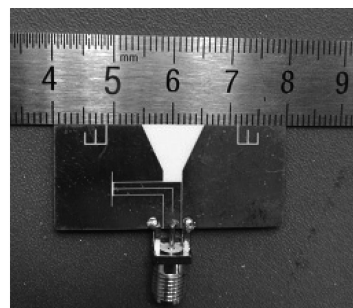


图5 天线实物图

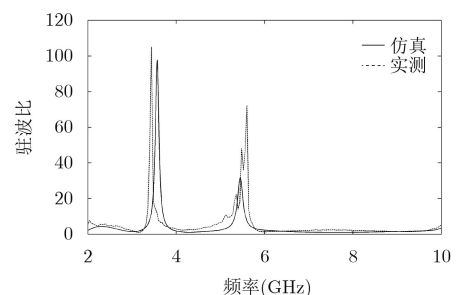


图6 天线驻波比实测与仿真对比图

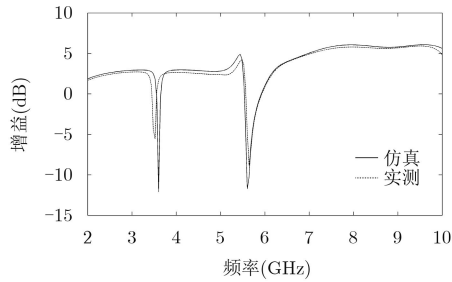


图7 天线的峰值增益

从图8中可以看出，天线的E面方向图在非陷波频率下朝着主波束方向辐射，随着频率的增大，主方向增益逐渐变大，波束变窄。在陷波频率下，天线主波束方向的辐射增益基本为负值，随着陷波频率的增加，主波束方向发生了改变，波束畸变严重，无法朝着端射方向辐射。天线的H面方向图在非陷

波工作频率下近似具有全向性，在陷波频率下，辐射增益为负值，无法朝着主波束方向辐射。从天线的辐射方向图也可以验证天线的陷波特性和辐射特性，天线在非陷波频率下具有正的增益值，而在陷波条件下增益为负值，且主波束方向改变，无法正常工作。

表2给出了本文所提出天线与参考文献中所设计陷波渐变槽天线的对比情况，从天线尺寸、工作频率、陷波波段和陷波中心频率处抑制天线增益大小4个方面进行了详细对比分析。由于研究双陷波渐变槽天线的相关文献较少，因而增加了3组单陷波渐变槽天线做对比。从表中可以看出，所设计的天线在基本保证宽带工作频率的前提下，相比于其他参考文献尺寸较小，具有双陷波特性和抑制增益效果也较为明显。同时，本文采用共面波导的馈电方式，制作更方便。

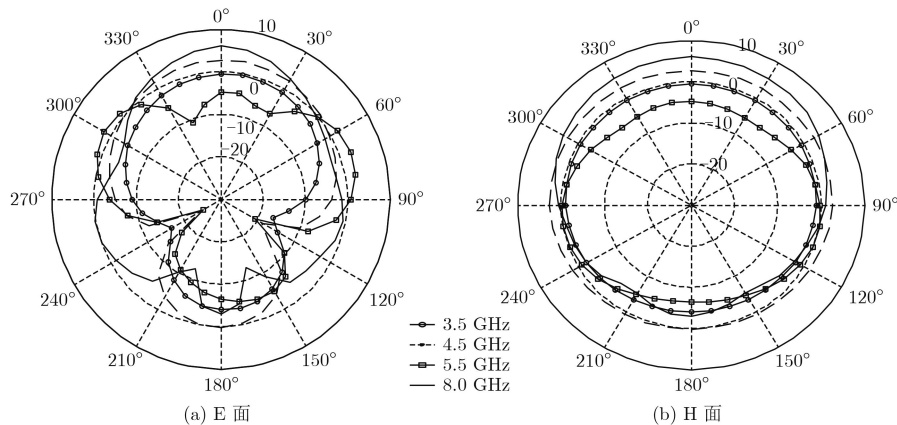


图8 天线E面和H面辐射方向图

表2 与相关文献的对比

文献	尺寸(mm ³)	工作频率(GHz)	陷波波段(GHz)	抑制增益(dB)
[11]	39×38×0.813	3.05~10.3	5~6	15.0
[12]	50×50×0.8	2.4~11.2	4.6~6.2	13.5
[13]	50×50×0.8	3~11	4.3~5.4	3.8
[14]	43×40×0.508	3~11	5.125~5.350/5.725~5.825	10.0/7.6
[15]	66.3×66.3×0.813	3~11	3.6~3.9/5.6~5.8	7.0/5.4
[16]	50×50×0.8	2.4~11.6	3.1~4.0/5.1~6.2	7.5/10.0
[17]	57.4×55×1.524	3.3~10.8	4.17~4.37/6.0~6.8	-/10.5
本文	40×18×0.813	2.8~9.7	3.15~3.97/4.94~6.05	16.0/16.5

4 结论

本文设计了一种共面波导馈电的小型化双陷波渐变槽天线。在渐变槽天线的基础上通过开L型缝隙和E字型结构，实现了单陷波和双陷波特性和辐射特性。该天线具有非常好的陷波效果，可以有效抑制工作在WIMAX(3.3~3.8 GHz)和WLAN(5.125~5.825 GHz)信号的干扰。加工了天线实物，并对其进行

理了测量。从表面电流方面，分析了天线的陷波原理。测量了天线的驻波系数、峰值增益和辐射方向图，实验结果与仿真结果基本一致，验证了本文方法的正确性。该天线结构简单紧凑、性能优良，尺寸仅为40 mm×18 mm×0.813 mm，可以应用于小型化超宽带系统中。文中所采用的方法，对于设计陷波渐变槽天线也具有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] Federal Communications Commission. First report and order in the matter of revision of part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems[R]. Technical Report ET-Docket 98-153. USA, Washington: FCC, 2002.
- [2] SITU R P and SURYA P S. CPW-fed Flower shaped patch antenna for broadband applications[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2015, 57(12): 2908-2913.
- [3] SHRIKANTH G R, ANIL K, SHILPA K, *et al.* Cross-configured directional UWB antennas for multidirectional pattern diversity characteristics[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(2): 853-858. doi: [10.1109/TAP.2014.2382687](https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2382687).
- [4] 胡章芳, 胡银平, 罗元, 等. 具有陷波特性的改进Sierpinski分形超宽带天线[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(6): 1520-1524. doi: [10.11999/JEIT160738](https://doi.org/10.11999/JEIT160738).
HU Zhangfang, HU Yinping, LUO Yuan, *et al.* Modified Sierpinski fractal UWB antenna with band-notched characteristic[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(6): 1520-1524. doi: [10.11999/JEIT160738](https://doi.org/10.11999/JEIT160738).
- [5] ALI K H, ZAHRA S, JORDI N, *et al.* Reconfigurable and tunable S-shaped split-ring resonators and application in band-notched UWB antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(9): 3766-3776. doi: [10.1109/TAP.2016.2585183](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2585183).
- [6] ANTHONY G, FRÉDÉRIC P, VUONG T P, *et al.* Millimeter-wave air-filled SIW antipodal linearly tapered slot antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 768-771. doi: [10.1109/LAWP.2016.2602280](https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2602280).
- [7] 王友成, 董明宇, 张锋, 等. 渐变槽天线端射特性优化设计[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(1): 124-128. doi: [10.11999/JEIT160203](https://doi.org/10.11999/JEIT160203).
WANG Youcheng, DONG Mingyu, ZHANG Feng, *et al.* Design of tapered-slot antenna with optimized end-fire characteristics[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(1): 124-128. doi: [10.11999/JEIT160203](https://doi.org/10.11999/JEIT160203).
- [8] AREZOOMAND A S, SADEGHZADEH R A, and MOGHADASI M N. Novel techniques in tapered slot antenna for linearity phase center and gain enhancement[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 270-273. doi: [10.1109/LAWP.2016.2572064](https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2572064).
- [9] KAZUTAKA K and AKIRA H. Compact folded-fin tapered slot antenna for UWB applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 1192-1195. doi: [10.1109/LAWP.2015.2397008](https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2397008).
- [10] YAO Yuan, CHENG Xiaohe, and YU Junsheng. Analysis and design of a novel circularly polarized antipodal linearly tapered slot antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(10): 4178-4187. doi: [10.1109/TAP.2016.2593870](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2593870).
- [11] ZHU Fuguo, STEVEN G, ANTHONY T S, *et al.* Miniaturized tapered slot antenna with signal rejection in 5-6 GHz band using a balun[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, 11: 507-510. doi: [10.1109/LAWP.2012.2199276](https://doi.org/10.1109/LAWP.2012.2199276).
- [12] LEE D H, YANG H Y, and CHO Y K. Tapered slot antenna with band-notched function for ultra wideband radios[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, 11: 682-685. doi: [10.1109/LAWP.2012.2204718](https://doi.org/10.1109/LAWP.2012.2204718).
- [13] BHASKAR M, JOHARI E, AKHTER Z, *et al.* Gain enhancement of the vivaldi antenna with band notch characteristics using zero-index metamaterial[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2016, 58(1): 233-238. doi: [10.1002/mop.29534](https://doi.org/10.1002/mop.29534).
- [14] ZHU Fuguo, STEVEN G, ANTHONY T S, *et al.* Dual band-notched tapered slot antenna using $\lambda/4$ band-stop filters[J]. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 2012, 6(15): 1665-1673. doi: [10.1049/iet-map.2012.0502](https://doi.org/10.1049/iet-map.2012.0502).
- [15] ALSHAMAILEH K A, ALMALKAWI M T, and DEVABHAKTUNI V K. Dual band-notched microstrip fed vivaldi antenna utilizing compact EBG structures[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015, 439832: 1-7.
- [16] LEE D H, HAE Y Y, and CHO Y K. Ultra-wideband tapered slot antenna with dual band-notched characteristics[J]. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 2014, 8(1): 29-38. doi: [10.1049/iet-map.2013.0116](https://doi.org/10.1049/iet-map.2013.0116).
- [17] CHINMOY S, PRIYANKA N, LATHEEF A, *et al.* Square/hexagonal split ring resonator loaded exponentially tapered slot ultra wideband(UWB) antenna with frequency notch characteristics[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2017, 59(6): 1241-1245. doi: [10.1002/mop.30511](https://doi.org/10.1002/mop.30511).
- 李振亚: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为宽带微带天线、共形微带天线的理论分析与仿真计算。
- 竺小松: 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为嵌入式智能信号处理、智能蒙皮技术。
- 张建华: 女, 1962年生, 教授, 研究方向为电磁场理论与天线技术。